

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК ВОДЯНЫМ И ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

М. А. Коновалов, В. В. Ульянов, М. М. Кошелев, С. Е. Харчук

АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск, Российская Федерация, mkonovalov@ippe.ru

Аннотация: на сегодняшний день тепло, отводимое от машин непрерывного литья заготовок, сбрасывается в окружающую среду и практически не используется. Одним из способов сокращения энергетических затрат при производстве стали является замена воды на жидкометаллический теплоноситель в контуре охлаждения кристаллизатора и повышение температуры до уровня, достаточного для осуществления паросилового цикла с последующей генерацией электроэнергии [1, 2]. Установлено, что наиболее приемлемым жидкометаллическим теплоносителем при охлаждении кристаллизуемой стали в машинах непрерывного литья заготовок является свинец-висмутовая эвтектика. На основе сравнительного анализа охлаждения различными теплоносителями затвердевающей стали в кристаллизаторе круглого сечения с использованием кода OpenFOAM показано, что эффективность охлаждения практически идентична при охлаждении водой и охлаждении свинец-висмутовой эвтектикой. При этом наибольший поток тепла, снимаемый с кристаллизатора, достигается при величине подогрева теплоносителя от 180 °С на входе в кристаллизатор до 400 °С на выходе. Для оценки целесообразности предлагаемого решения выполнен тепловой расчет парогенерирующего контура. Показано, что КПД паросилового цикла составит ~ 32 %. При условии работы на одном предприятии шести кристаллизаторов на протяжении года (250 рабочих дней) количество выработанной электроэнергии составит примерно 6,2 млн кВтч.

Ключевые слова: машины непрерывного литья заготовок, затвердевание стали, кристаллизатор, теплообмен, жидкометаллический теплоноситель.

Благодарности: исследования проводятся при поддержке Правительства Калужской области и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-48-400003).

Для цитирования: Коновалов М. А., Ульянов В. В., Кошелев М. М., Харчук С. Е. Моделирование охлаждения кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок водяным и жидкометаллическим теплоносителями. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):49–52. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-7.

SIMULATION OF WATER AND LIQUID-METAL COOLANT HEAT TRANSFER IN CONTINUOUS CASTING MACHINE

M. A. Konovalov, V. V. Ulyanov, M. M. Koshelev, S. E. Kharchuk

Russian National Research Center Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering, Obninsk, Russian Federation, mkonovalov@ippe.ru

Abstract: to date, heat to be dissipated in a continuous casting machine is discharged in the environment and not utilized much. A way of saving energy in steel production is replacing the water-cooling system with liquid-metal coolant to increase the temperature sufficiently to produce steam and, subsequently, electricity [1, 2]. We identified that lead-bismuth eutectic is the most suitable liquid coolant for continuous casting machines. We performed a simulation of the heat transfer process during steel solidification with various coolants with OpenFOAM. The cooling efficiency is virtually identical for water and lead-bismuth eutectic. The max dissipated heat flux occurs when the inlet coolant temperature is 180 °C and the outlet coolant temperature is 400 °C. To check the feasibility, we analyzed the steam generation efficiency. It would be ~ 32 %. For six machines, 6.2 mln. kWh can be generated annually.

Keywords: continuous casting machine, steel solidification, mold, heat transfer, liquid-metal coolant.

Acknowledgements: this study is supported by the Kaluga Region Government and the Russian Foundation for Basic Research, grants YY No. 19-48-400003.

Cite this article: Konovalov M. A., Ulyanov V. V., Koshelev M. M., Kharchuk S. E. Simulation of Water and Liquid-Metal Coolant Heat Transfer in Continuous Casting Machine. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(1):49–52. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-7.

Введение

На сегодняшний день отводимое тепло от машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) сбрасывается в окружающую среду и практически не используется. Одним из способов сокращения энергетических затрат (рекуперации энергии) при производстве стали является замена воды на жидкометаллический теплоноситель в контуре охлаждения кристаллизатора и повышение температуры до уровня, достаточного для осуществления паросилового цикла с последующей генерацией электроэнергии [1].

Рекуперация тепла с использованием паротурбинной установки

Тепловая мощность, отводимая от одного кристаллизатора, на основе данных [2], составляет 605 кВт. На основе теплового расчета предлагаемой системы «сталь — жидкометаллический теплоноситель — парогенератор — турбогенератор» можно показать, что при использовании паротурбинной установки, работающей по циклу Ренкина (рисунок 1), с температурой пара на входе 275 °С и давлении 5 МПа, КПД цикла составит 28,5 %. При этом электрическая мощность, вырабатываемая системой рекуперации одного кристаллизатора, составит от 150 кВт и выше. При условии работы на одном предприятии шести кристаллизаторов на протяжении года (250 рабочих дней) получим, что количество выработанной электроэнергии составит примерно 6,2 млн кВтч. В пересчете на стоимость электроэнергии предприятие будет экономить около 31 млн руб. в год при тарифе на электроэнергию 5 руб./кВтч.

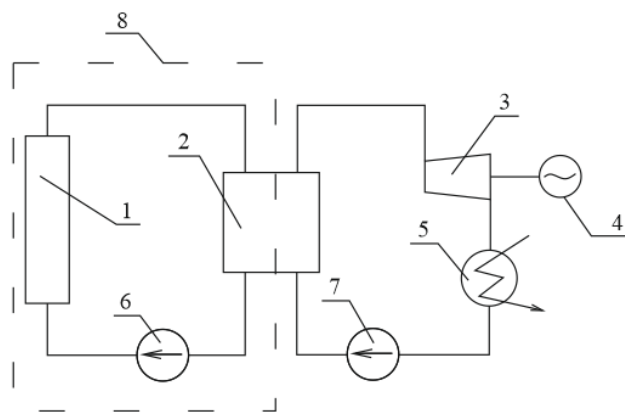


Рис. 1. Упрощенная тепловая схема утилизации тепла кристаллизатора МНЛЗ с последующей генерацией электроэнергии. 1 — кристаллизатор стали; 2 — парогенератор; 3 — паровая турбина; 4 — электрогенератор; 5 — конденсатор турбины; 6 — циркуляционный насос жидкометаллического контура; 7 — питательный насос; 8 — жидкометаллический контур охлаждения кристаллизатора

Сравнительный анализ охлаждения стали в кристаллизаторе различными хладагентами (вода, свинец-висмут)

Конструкция МНЛЗ и общий вид расчетной модели кристаллизатора представлены на рисунке 2. Сталь из промежуточного ковша попадает в кристаллизатор, в котором происходит ее частичное затвердевание. Скорость перемещения стали через кристаллизатор регулируется с использованием роликов, установленных на выходе из кристаллизатора и вытягивающих заготовку.

Затвердевание металла в кристаллизаторе и сопутствующие ему процессы наиболее полно описываются на основе представлений о частичном контакте слитка со стенкой, исходя из которых участки поверхности слитка отделены от кристаллизатора зазорами [3]. В процессе разливки стали величина зазора зависит от многих факторов, поэтому удобно пользоваться понятием о кажущемся сплошном воздушном зазоре между стенкой кристаллизатора и слитком. При дальнейшем моделировании этот факт учитывался путем задания термического сопротивления на границе затвердевающая сталь — стенка кристаллизатора, равного 1250 Вт/м²К.

Расчет полей скорости и температуры при затвердевании стали проводился с использованием вычислительного модуля interCondensatingEvaporatingFoam, основанного на VOF-методе, в котором процесс превращения жидкой стали в твердую основан на модели превращения фаз Ли [4]. Массообмен между фазами зависит от температурного режима и описывается уравнениями:



Рис. 2. Конструкция МНЛЗ и общий вид расчетной модели кристаллизатора

$$\dot{m}_{12} = \text{coeff}_1 \cdot \alpha_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{(T_1 - T_{sat})}{T_{sat}}, \quad (1)$$

$$\dot{m}_{21} = \text{coeff}_2 \cdot \alpha_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{(T_2 - T_{sat})}{T_{sat}}, \quad (2)$$

где индекс «1» — фаза «1», «2» — фаза «2»; α — объемная доля фазы; ρ — плотность, кг/м³; T — температура, К; T_{sat} — температура превращения фаз. Коэффициенты coeff могут быть интерпретированы как время релаксации и должны настраиваться по известным экспериментальным данным. Значение коэффициента coeff₁ задавалось равным 40 с⁻¹ [3], T_{sat} стали — 1420 °С.

Результаты

Анализ показал, что объемные доли твердой фазы стали на выходе из кристаллизатора при охлаждении различными хладагентами практически совпадают. Толщина затвердевшего слоя стали на выходе из кристаллизатора, охлаждаемого водой, составила 35 мм, свинец-висмутовой эвтектикой с температурой на входе в кристаллизатор 180 °С — 32 мм, свинец-висмутовой эвтектикой с температурой на входе в кристаллизатор 450 °С — 30 мм.

Наибольший поток тепла 1,01 МВт/м² при охлаждении свинец-висмутовой эвтектикой достигается при минимально допустимой для реализации паросилового цикла температуре свинец-висмута на входе в кристаллизатор 180 °С. Температура поверхности слитка стали в кристаллизаторе представлена на рисунке 3.

Наравне с определением толщины слитка на выходе из кристаллизатора и теплового потока, снимаемого теплоносителем, важной задачей являлось обоснование оптимального направления течения жидкометаллического теплоносителя. При температуре свинец-висмута на входе в кристаллизатор 180 °С получено, что для обоих вариантов направления течения жидкометаллического теплоносителя (сонаправленного/противоположного) при ширине кольцевого зазора 5 мм и скорости теплоносителя 0,5 м/с достигается среднесмешанная температура на выходе из системы охлаждения ~ 400 °С. Максимальная температура стенки кристаллизатора, контактирующей со свинец-висмутовой эвтектикой, при сонаправленном течении составила ~ 470 °С, при противоположном — ~ 530 °С. Перепад температур по стенке кристаллизатора, контактирующей со свинец-висмутовой эвтектикой, при сонаправленном течении составил ~ 280 °С, при противоположном — ~ 340 °С.

При использовании в качестве теплоносителя в кристаллизаторе свинец-висмутовой эвтектики материал стенки должен быть применим при максимальной температуре стенки, контактирующей со свинец-висмутовой эвтектикой: 470 °С при сонаправленном течении и 530 °С при противоположном течении теплоносителя и кристаллизуемой стали.

Таким образом, видно, что оптимальным направлением движения жидкометаллического теплоносителя является сонаправленное направлению перемещения стали через кристаллизатор. При этом

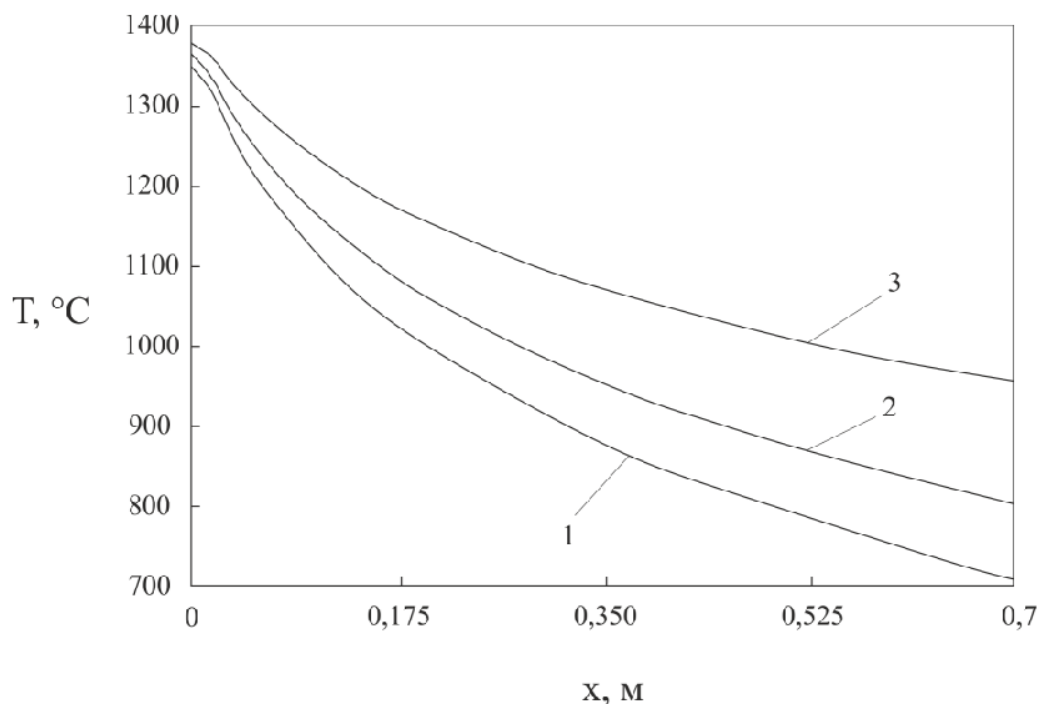


Рис. 3. Температура поверхности слитка стали в кристаллизаторе. 1 — вода, 2 — Pb-Bi 180 °C, 3 — Pb-Bi 450 °C

перепад температуры вдоль стенки, контактирующей с хладагентом, составит 280 °C, а максимальная температура равна ~ 470 °C.

Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность перехода от охлаждения водой кристаллизатора к жидкометаллическому охлаждению с термодинамическими параметрами теплоносителя на выходе из кристаллизатора, достаточными для реализации паросилового цикла.

Необходимо продолжение начатых исследований для обоснования конструкционного материала корпуса кристаллизатора, стойкого в свинец-висмутовой эвтектике, а также моделирования охлаждения теплоносителем канала кристаллизатора щелевой формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ульянов В. В., Кошелев М. М., Коновалов М. А., Харчук С. Е. Моделирование теплопередачи в каналах круглой формы машин непрерывного литья заготовок с перспективным свинцово-висмутовым кристаллизатором. *ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2020;2:131–140. Режим доступа: <https://vant.ippe.ru/year2020/2/thermal-physics-hydrodynamics/1877-12.html>.
2. Лукин С. В., Шумова А. А., Завлин М. В., Шестаков Н. И., Ригин А. Н. Использование теплоты, отводимой от стальных слябов кристаллизаторами и роликами машин непрерывного литья заготовок, в системе теплоснабжения предприятия. *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2017;3:28–37. DOI: 10.23859/1994-0637-2017-3-78-3.
3. Козырев Н. А., Гизатулин Р. А. *Машины и процессы непрерывного литья заготовок*. Новокузнецк: СибГИУ; 2011. 357 с.
4. Lee Wah Cheng. *Filmwise Condensation on a Horizontal Tube in the Presence of Forced*. A thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy to the University of London convection and non-condensing gas. 1982. 341 p.