

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫМ СЛИТКОМ И ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Л.Л. Демиденко

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия*

Описывается энергосберегающая технология, позволяющая повысить эффективность использования топливно-энергетических ресурсов при непрерывной разливке стали. Предлагается использовать теплоту расплава непрерывнолитого слитка, что позволит уменьшить или исключить его нагрев перед прокаткой. Для этого разработана математическая модель рационального охлаждения непрерывнолитого слитка в машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с применением теплоизоляции в зоне воздушного охлаждения. Описываются материалы теплоизолирующего устройства и его конструктивное применение в технологической схеме МНЛЗ.

Для расчета теплообмена между слитком и теплоизоляционным устройством совместно решены задачи охлаждения слитка и разогрева теплоизоляционной конструкции. Составлен тепловой баланс зоны теплоизоляции. Проанализировано взаимодействие тепловых потоков между слитком и теплоизолирующим устройством с помощью математического моделирования.

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что при использовании зоны теплоизоляции затвердевание слитка происходит при скоростях до 1,3 м/мин. При более высоких скоростях вытягивания для полного затвердевания слитка перед порезкой необходимо увеличить интенсивность охлаждения в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). Средне-массовая температура возрастает на 160–260 °С. По полученным данным можно сделать вывод: при использовании теплоизоляции происходит термостатирование слитка, разность температур между поверхностью и центром уменьшается на 100–220 °С по сравнению с воздушным охлаждением, т. е. экономия теплоты составляет около 30 %.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, непрерывнолитой слиток, математическая модель, охлаждение, энергосбережение, теплообмен, теплота расплава, температурное поле, теплосодержание, теплоизоляция.

Одним из основных потребителей топливных и энергетических ресурсов остается металлургическое производство. Энергосберегающие технологии позволяют повысить эффективность использования топливно-энергетических ресурсов, которые составляют значительную долю затрат в себестоимости продукции.

Снижение расходов энергоресурсов при непрерывной разливке стали в машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) возможно при рациональном использовании теплоты расплава, что позволит уменьшить или исключить нагрев слитка перед прокаткой [1–5]. Оптимальной организацией теплоотвода от поверхности слитка в процессе его охлажде-

ния и кристаллизации занимались исследователи в работах [6–9].

Повышение теплосодержания слитка на линии «МНЛЗ – прокатный стан» описывалось в работах [10, 11], где рассматривались высокотемпературные технологии литья слэбов.

Математические модели охлаждения непрерывнолитого слитка позволяют учитывать важнейшие характерные черты процесса кристаллизации: сложные граничные условия, изменяющиеся по зонам, выделение скрытой теплоты кристаллизации в интервале температур солидус–ликвидус и связанные с ним процессы образования кристаллов, особенности технологии и другие вопросы [12–19].

Краткие сообщения

Разработка и реализация математической модели затвердевания непрерывнолитого слитка прямоугольной и восьмиугольной формы в двумерном пространственном представлении описана в работах [17, 20, 21].

Особенностью данной модели является учет зоны теплоизоляции, которая расположена непосредственно после зоны воздушно-охлаждения. В этой зоне происходит разогрев поверхностных слоев слитка за счет теплоты жидкой фазы.

Теплоизоляционное устройство предлагается расположить в технологической схеме МНЛЗ между роликами и несущими прижимными балками тянущей клетки (рис. 1) с разбивкой на блоки по ширине балки. Теплоизолирующую конструкцию предлагается выполнить из следующих материалов: со стороны слитка жаростойкая сталь марки 10X11H20T2P, со стороны крепёжной балки – Ст3. В качестве теплоизоляционного слоя используется каолиновая вата с высокими огнеупорными свойствами [22]. Для применения профилактических ремонтов конструкция выполняется разборной. Учитывая повышенный температурный режим, в зоне теплоизоляции применяются жаропрочные ролики.

Для расчета теплообмена между слитком и теплоизоляционным устройством необходимо совместно решить задачи охлаждения слитка и разогрева теплоизоляционной конструкции.

Составим тепловой баланс зоны теплоизоляции. Статья прихода $Q_{пр}$ включает теплоту, поступающую с непрерывнолитым слитком в зону теплоизоляции:

$$Q_{пр} = (C_m(t_l - t_k) + q_{кр} + (C_{ж}\Delta T))G,$$

где t_k – конечная температура стали, °С;

ΔT – перегрев сверх температуры начала затвердевания, °С;

G – производительность МНЛЗ, кг/с.

Так как тепловые потоки в направлении, перпендикулярном к технологической линии, будут значительно превышать тепловые потоки в других направлениях, ими можно пренебречь. Статьи расхода теплоты включают: теплоту, уходящую со слитком $Q_{сл}$, и тепловые потери: $Q_{нач}$ – теплота, затраченная на начальный разогрев устройства, $Q_{ак}$ – теплота, аккумулируемая теплоизоляционным материалом кожуха, $Q_{рол}$ – теплота, затраченная на нагрев роликов рольганга, $Q_{ср}$ – тепловые потери в окружающую среду.

$$Q_{пр} = Q_{сл} + Q_{ак} + Q_{нач} + Q_{рол} + Q_{ср}.$$

Часть теплоты $Q_{нач}$, $Q_{рол}$ затрачивается только в первоначальный момент времени и при длительной работе не учитывается. В дальнейшем полагаем, что конструкция находится в разогретом состоянии и теплоотдача определяется в условиях стационарного режима.

Теплота, отдаваемая затвердевшей корочкой слитка, нагревает стенку теплоизолирующей конструкции. Через время Δt эта разница температур уменьшится, величина теплового потока от слитка к внутренней стенке устройства также уменьшится, между поверхностью и центром слитком произойдет выравнивание температур за счет нагрева поверхности слитка (рис. 2).

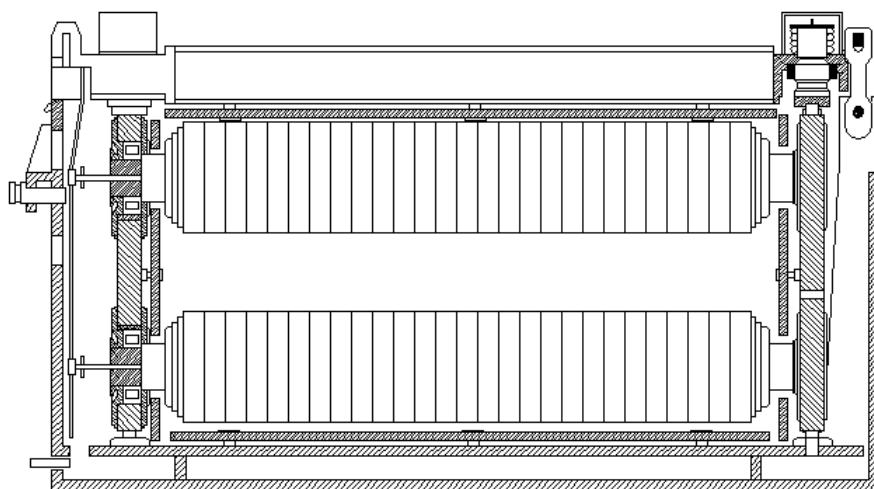


Рис. 1. Расположение теплоизолирующего устройства в тянущей клетке

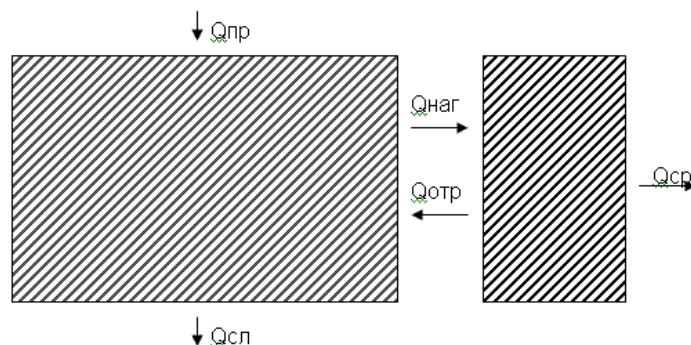


Рис. 2. Тепловой баланс непрерывнолитого слитка в зоне теплоизоляции

Перенос теплоты от слитка к теплоизоляционной конструкции через воздушный зазор осуществляется излучением и конвекцией. Тепловой поток $q_{\text{сл-к}}$ запишем по формуле

$$q_{\text{сл-к}} = E_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{t_{\text{п}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{ст}} + 273}{100} \right)^4 \right] + \frac{\lambda_3}{\delta} (t_{\text{п}} - t_{\text{ст}}),$$

где $E_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты при теплообмене излучением, $E_{\text{пр}} = 0,74$;

$C_0 = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана;

$t_{\text{п}}, t_{\text{ст}}$ – температуры поверхности слитка и стенки конструкции, °С;

λ_3 – коэффициент теплопроводности воздуха в зазоре между слитком и устройством, Вт/(мК);

δ – величина зазора, м.

Теплоперенос от конструкции в окружающую среду осуществляется теплообменом излучения и конвекцией. Со стороны окружающей среды для нахождения коэффициента теплоотдачи применено уравнение, аналогичное тому, которое решается для теплоизолированного кожуха со стороны слитка:

$$q_{\text{ср}} = C_1 \left[\left(\frac{t_{\text{п}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{ср}} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где C_1 – коэффициент излучения поверхности стенки устройства, Вт/м² К⁴;

$t_{\text{п}}, t_{\text{ср}}$ – температуры поверхности устройства и окружающего воздуха, °С.

Величина удельного теплового потока $q_{\text{ср}}$ зависит от теплового состояния конструкции, толщины, вида теплоизоляции и от

температуры окружающей среды. Основное количество теплоты от слитка к устройству передается излучением.

Изменение количества теплоты в теплоизоляционном устройстве вследствие теплопроводности за время δt вызывает изменение количества энергии вещества и рассчитывается по формуле

$$dQ_k = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} dx dy.$$

Для определения теплового состояния устройства необходимо рассчитать тепловой поток, поступающий от слитка к конструкции [21]. Сложный теплообмен выражается суммарным коэффициентом α_s , учитывающий передачу теплоты излучением α_l и конвекцией α_k .

Решение уравнения теплопроводности теплоизолирующего устройства осуществлялось численными методами, аналогичными тем, которые использовались при решении уравнения теплопроводности для слитка [21]. Адекватность модели определялась с помощью статистических критериев Фишера, Стьюдента, Манна – Уитни.

Было промоделировано температурное поле непрерывнолитого слитка при различных скоростях разлива для слитков прямоугольных сечений 250×750...1050 мм и 250×1100...2350 мм.

Длины зон водо-воздушного охлаждения и теплоизоляции (17 м) выбирались постоянными для всех скоростей. В секциях зоны водо-воздушного охлаждения интенсивность теплоотдачи регулировалась расходом воды. Критерием выбора α из диапазона 100–650 Вт/(м²К) было полное затвердевание слитка перед его порезом на мерные длины и обеспечение среднемассовой температуры не ниже 1200 °С.

По результатам моделирования установлено, что в отличие от традиционной технологии при использовании теплоизолирующего устройства затвердевание жидкой сердцевины происходит не в конце зоны вторичного охлаждения (ЗВО), а в зоне теплоизоляции. Для исключения выпучивающего эффекта в зоне теплоизоляции используются опорные устройства (ролики и поддерживающие балки). Полное затвердевание слитка происходит за 4 м до выхода слитка из зоны теплоизоляции. Таким образом, величина ферростатического давления не превысит допустимых пределов.

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что при использовании максимальной зоны теплоизоляции затвердевание слитка происходит при скоростях до 1,3 м/мин. При более высоких скоростях вытягивания для полного затвердевания слитка перед порезкой необходимо увеличить интенсивность охлаждения в ЗВО. Среднемассовая температура возрастает на 160–260 °С [23]. По полученным данным можно сделать вывод: при использовании теплоизоляции происходит термостатирование слитка, разность температур между поверхностью и центром уменьшается на 100–220 °С по сравнению с воздушным охлаждением, т. е. экономия теплоты составляет ≈ 30 %.

Литература

1. *Improvement of Continuous Casting Technology for Direct Charging Process at Kastima No. 3 Caster* / Yoshida Katsuma, Kimura Tomohiko, Watanabe Tadao, Akai Yoshihiro // 70th Steelmak. Conf. Proc. Vol. 70: Pittsburgh Meet., Marth 29 – Apr. 1, 1987. – Warrendale, Pa, 1987. – P. 231–235.
2. *Operation of the speed slab caster for hot direct rolling* / Kouano Takayuki, Terada Osamu, Ushida Shigetaka, Ishikawa Hazaru // 5th Ins. Iron and Steel Congr.: Proc. 69th Steelmak. Conf. Vol. 69: Washington Meet. Apr. 6–9, 1986. Warrendale, Pa, 1986. – P. 576–577.
3. *Progress on CC-DR Process (Direct Linked Process of Continuous Casting and Rolling Mill) at Sakai Works* / Iso Hei-Ichiro, Narita Susumu, Honda Michiyasu, Isogami Katsuyuki // 5th Ins. Iron and Steel Congr.: Proc. 69th Steelmak. Conf. Vol. 69: Washington Meet. Apr. 6–9, 1986. – Warrendale, Pa, 1986. – P. 449–456.
4. *Advanced CC-DR Process Goes Operation at Yawata Works* // Nippon Steel News. – 1988. – No. 206. – P. 1.
5. *Application 62-207545 Japan, International Patent Classification V 22 D 11/12, V 21 V 45/00. Method of heat insulation of hot steel slabs* / Miki Hiromitsu; Shinwa Tekku k.k. – N 61-47688; application 05.03.86; in press 11.09.87.
6. *Краснов, Б.И. Оптимальное управление режимами непрерывной разливки стали* / Б.И. Краснов. – М.: Металлургия, 1975. – 312 с.
7. *Девятков, Д.Х. Оптимальное управление тепловой обработкой массивных тел при наличии фазовых превращений* / Д.Х. Девятков // Проблемы кристаллизации сплавов и компьютерное моделирование: тез. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Ижевск, 1990. – С. 72–73.
8. *Оптимизация режимов затвердевания непрерывного слитка* / В.А. Берзинь, В.Н. Желваков, Я.Я. Клявинь и др. – Рига: Зинатне, 1977. – 148 с.
9. *Соболев, В.В. Оптимизация тепловых режимов затвердевания расплавов* / В.В. Соболев, П.М. Трефилов. – Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1986. – 154 с.
10. *Production Techniques of High Temperature CC Slabs for Remote Direct Rolling* / Naonori Moritama, Mayumi Okimori, Eiji Ikezaki, Katsuyuki Isogami // Tetsu-to-Hagane, J. Iron and Steel, Inst., Jap. – 1988. – Vol. 74, iss. 7. – P. 1227–1234. DOI: 10.2355/tetsutohagane1955.74.7_1227
11. *Direct Rolling Process at Nippon Steel k.k.* // 33 Metal Producing. – 1988. – Vol. 26, no. 4. – P. 15.
12. *Емельянов, В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок* / В.А. Емельянов. – М.: Металлургия, 1988. – 143 с.
13. *Flow and Temperature Fields in Slab Continuous Casting Molds* / Zhang Yin, Cao Ligu, He Youduo. et al. // J. Univ. Sci. and Technol. Beijing. – 2000. – Vol. 7, no. 2. – P. 103–106.
14. *Тепловые процессы при непрерывном литье стали* / Ю.А. Самойлович, С.Л. Крулевецкий, В.А. Горяинов, З.К. Кабаков. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.
15. *Стальной слиток. Т. 2: Затвердевание и охлаждение* / Ю.А. Самойлович и др. – Минск: Беларуская навука, 2000. – 637 с.
16. *Экспериментальные исследования процессов затвердевания и нагрева крупных промышленных слитков* / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский, А.Б. Стеблов, В.В. Невсвет // Литье и Металлургия. – 2001. – № 4. – С. 103–109.
17. *Салганик, В.М. Моделирование температурного поля при непрерывном литье стальных слитков с угловыми скосами* /

В.М. Салганик, Л.Л. Демиденко // Производство проката. – 2012. – № 5. – С. 22–26.

18. Самойлович, Ю.А. Микрокомпьютер в решении задач кристаллизации слитка / Ю.А. Самойлович. – М.: Металлургия, 1988. – 182 с.

19. Бровман, М.Я. Непрерывная разливка металлов / М. Бровман. – М.: Экомет, 2007. – 484 с.

20. Демиденко, Л.Л. Математическое моделирование процесса охлаждения непрерывнолитого слитка / Л.Л. Демиденко // Электротехнические системы и комплексы. – 2004. – № 8. – С. 183–185.

21. Demidenko, L.L. Simulation of Power Efficient Cooling Technology for Continuously Cast Bars / L.L. Demidenko // Solid State Phenomena, 2017, vol. 265, pp. 1086–1091. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.1086

22. Кац, С.К. Высокотемпературные теплоизоляционные материалы / С.К. Кац. – М.: Металлургия, 1981. – 232 с.

23. Demidenko, L.L. Simulation of the Cooling Process of the Continuously Cast Bar with Heat Insulation / L.L. Demidenko // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2017. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076481

Демиденко Людмила Леонтьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры информатики и информационной безопасности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; demidenkoludmila@gmail.com.

Поступила в редакцию 8 апреля 2018 г.

DOI: 10.14529/met180213

CALCULATION OF HEAT TRANSFER BETWEEN THE CONTINUOUS-CAST INGOT AND THERMAL INSULATING DEVICE USING MATHEMATICAL MODELING

L.L. Demidenko, demidenkoludmila@gmail.com

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

The article describes energy saving technology, which allows to increase the efficiency of fuel and energy resources use in the continuous casting of steel. It is proposed to use the heat of the melt of a continuously cast ingot, which will reduce or eliminate its heating before rolling. For this purpose, a mathematical model of rational cooling of a continuously cast casting in a continuous casting machine with the use of heat insulation in the air cooling zone was developed. Materials of a heat-insulating device and its constructive application in the technological scheme of CCM are described.

To calculate the heat transfer between the ingot and the heat insulating device, the problems of cooling the ingot and heating the heat-insulating structure are solved together. The thermal balance of the heat insulation zone was compiled. The interaction of heat flows between the ingot and the heat insulating device is analyzed using mathematical modeling.

Based on the simulation results, it can be concluded that when using the thermal insulation zone, the ingot solidification occurs at speeds up to 1.3 m / min. At higher drawing speeds, to fully solidify the ingot before cutting, it is necessary to increase the cooling intensity in the secondary cooling zone (SCZ). The average mass temperature increases by 160–260 °C. According to the data obtained, it can be concluded that when the thermal insulation is used, the ingot is thermostatted, the temperature difference between the surface and the center is reduced by 100–220 °C compared to air cooling, that is, the heat saving is about 30%.

Keywords: continuous casting machine, continuous-cast ingot, mathematical model, cooling, energy saving, heat exchange, heat of melt, temperature field, heat content, heat insulation.

References

1. Yoshida Katsuma, Kimura Tomohiko, Watanabe Tadao, Akai Yoshihiro. Improvement of Continuous Casting Technology for Direct Charging Process at Kastima No. 3 Caster. *70th Steelmak. Conf. Proc. Vol. 70: Pittsburgh Meet., Marth 29 – Apr. 1, 1987*. Warrendale, Pa, 1987, pp. 231–235.
2. Kouano Takayuki, Terada Osamu, Ushida Shigetaka, Ishikawa Hazaru. Operation of the speed slab caster for hot direct rolling. *5th Ins. Iron and Steel Congr.: Proc. 69th Steelmak. Conf. Vol. 69: Washington Meet. Apr. 6–9, 1986*. Warrendale, Pa, 1986, pp. 576–577.
3. Iso Hei-Ichiro, Narita Susumu, Honda Michiyasu, Isogami Katsuyuki. Progress on CC-DR Process (Direct Linked Process of Continuous Casting and Rolling Mill) at Sakai Works. *5th Ins. Iron and Steel Congr.: Proc. 69th Steelmak. Conf. Vol. 69: Washington Meet. Apr. 6–9, 1986*. Warrendale, Pa, 1986, pp. 449–456.
4. Advanced CC-DR Process Goes Operation at Yawata Works. *Nippon Steel News*, 1988, no. 206, p. 1.
5. Miki Hiromitsu; Shinwa Tekku k.k. *Method of Heat Insulation of Hot Steel Slabs*. Patent Japan no. 62-207545, 11.09.1987.
6. Krasnov B.I. *Optimal'noye upravleniye rezhimami nepreryvnoy razlivki stali* [Optimal Control of Continuous Casting Modes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 312 p.
7. Devyatov D.Kh. [Optimal Control of Heat Treatment of Massive Bodies in the Presence of Phase Transformations]. *Problems of Crystallization of Alloys and Computer Modeling: Theses of the All-Union Scientific and Technical Conference*. Izhevsk, 1990, pp. 72–73. (in Russ.)
8. Berzin' V.A., Zhelvakov V.N., Klyavin' Ya.Ya. et al. *Optimizatsiya rezhimov zatverdevaniya nepreryvnogo slitka* [Optimization of Solidification Modes for Continuous Ingots]. Riga, Zinatne Publ., 1977, 148 p.
9. Sobolev V.V., Trefilov P.M. *Optimizatsiya teplovykh rezhimov zatverdevaniya rasplavov* [Optimization of Thermal Conditions of Solidification of Melts]. Krasnoyarsk, Publishing House of Krasnoyarsk University, 1986. 154 p.
10. Naonori Moritama, Mayumi Okimori, Eiji Ikezaki, Katsuyuki Isogami. Production Techniques of High Temperature CC Slabs for Remote Direct Rolling. *Tetsu-to-Hagane, J. Iron and Steel, Inst., Jap.*, 1988, vol. 74, iss. 7, pp. 1227–1234. DOI: 10.2355/tetsutohagane1955.74.7_1227
11. Direct Rolling Process at Nippon Steel k.k. *33 Metal Producing*, 1988, vol. 26, no. 4, p. 15.
12. Emel'yanov V.A. *Teplovaya rabota mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Thermal Performance of Continuous Casters]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 143 p.
13. Zhang Yin, Cao Ligu, He Youduo, Li Shigi, Shen Yishen. Flow and Temperature Fields in Slab Continuous Casting Molds. *J. Univ. Sci. and Technol. Beijing*. 2000, vol. 7, no. 2, pp. 103–106.
14. Samoylovich Yu.A., Krulevetskiy S.L., Goryainov V.A., Kabakov Z.K. *Teplovyye protsessy pri nepreryvnom lit'ye stali* [Thermal Processes in the Continuous Casting of Steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. –152 p.
15. Samoylovich Yu.A. et al. *Stal'noy slitok. T. 2: Zatverdevaniye i okhlazhdeniye*. [Steel bar. Vol. 2. Solidification and Cooling]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2000. 637 p.
16. Samoylovich Yu.A., Timoshpol'skiy V.I., Steblov A.B., Nesvet V.V. [Experimental Studies of the Processes of Solidification and Heating of Large Industrial Ingots]. *Casting and Metallurgy*, 2001, no. 4, pp. 103–109. (in Russ.)
17. Salganik V.M., Demidenko L.L. [Modeling of the Temperature Field during the Continuous Casting of Steel Ingots with Angled Bevels]. *Manufacture of Rolled Metal Products*, 2012, no. 5, pp. 22–26. (in Russ.)
18. Samoylovich Yu.A. *Mikrokomp'yuter v reshenii zadach kristallizatsii slitka* [Microcomputer in Solving Problems of Ingot Crystallization]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 182 p.
19. Brovman M.Ya. *Nepreryvnaya razlivka metallov* [Continuous Casting of Metals]. Moscow, Ekomet Publ., 2007. 484 p.
20. Demidenko L.L. [Mathematical Modeling of the Cooling Process of Continuous Cast Ingots]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2004, no. 8, pp. 183–185. (in Russ.)
21. Demidenko L.L. Simulation of Power Efficient Cooling Technology for Continuously Cast Bars. *Solid State Phenomena*, 2017, vol. 265, pp. 1086–1091. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.1086

22. Kats S.K. *Vysokotemperaturnyye teploizolyatsionnyye materialy* [High-Temperature Heat Insulating Materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 232 p.

23. Demidenko L.L. Simulation of the Cooling Process of the Continuously Cast Bar with Heat Insulation. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076481

Received 8 April 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Демиденко Л.Л. Расчет теплообмена между непрерывнолитым слитком и теплоизолирующим устройством с помощью математического моделирования / Л.Л. Демиденко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 107–113. DOI: 10.14529/met180213

FOR CITATION

Demidenko L.L. Calculation of Heat Transfer between the Continuous-Cast Ingot and Thermal Insulating Device Using Mathematical Modeling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 107–113. (in Russ.) DOI: 10.14529/met180213
