

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.746.27:047

Ячиков И.М., Феоктистов Н.А., Савинов А.С., Шафилов Т.И., Михалкина И.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ЩЕЛЕВЫМИ КАНАЛАМИ ОХЛАЖДЕНИЯ

Аннотация. На ПАО «ММК» для широких стенок кристаллизаторов машины непрерывного литья заготовок встал вопрос перехода от сверленных к щелевым каналам с целью унификации существующих моделей кристаллизаторов, а также упрощения процедуры изготовления медных стенок и сокращения расхода меди. При этом главным условием реконструкции является сохранение существующей петлевой системы охлаждения при одновременном обеспечении заданного теплового режима работы кристаллизатора. Приведены результаты теплового расчета широких стенок кристаллизатора с щелевыми каналами охлаждения. Для автоматизации и визуализации результатов расчета был разработан модуль моделирования этих процессов в СКМ ЛП «ПолигонСофт». Это позволило прогнозировать тепловое поле на рабочей поверхности широкой стенки кристаллизатора для обеспечения заданного теплового режима его работы, а также предотвращения разупрочнения медного сплава и сохранения заданных прочностных свойств. Проведен тепловой расчет медных стенок с щелевыми каналами, а также полученные данные адаптировали к системе компьютерного моделирования «ПолигонСофт». Представленные результаты математического и компьютерного моделирования носят практический характер и могут быть применены при разработке новых унифицированных конструкций слывовых кристаллизаторов машины непрерывного литья заготовок.

Ключевые слова: кристаллизатор, машина непрерывного литья заготовок, слыв, медная стенка, щелевые каналы охлаждения.

Введение

Одной из важных и актуальных проблем для ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» является снижение стоимости слывов при повышении качества готового проката. Снижение себестоимости слывов и последующей продукции прокатного производства возможно за счет сокращения затрат на ремонт машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), связанных с восстановлением сменного оборудования и кристаллизаторов.

Одним из наиболее дорогостоящих узлов МНЛЗ является кристаллизатор, имеющий крайне низкую стойкость. Это обусловлено тяжелыми условиями его эксплуатации – высокими механическими нагрузками, непосредственным контактом с жидким металлом и шлаком. Основная функция кристаллизатора заключается в отводе тепла от жидкой стали к воде и формировании на поверхности образующейся заготовки твердой корочки определенной толщины, способной выдержать ферростатическое давление жидкого металла после выхода слыва (с жидкой фазой внутри него) из кристаллизатора [1, 2].

Наиболее изнашиваемой и подлежащей быстрой замене частью в кристаллизаторах являются медные стенки. Для их изготовления применяют дорогостоящую медь марки М1р или ее сплав с серебром МСр0,1 (Ag=0,1%). При движении слыва в кристаллизаторе медные стенки подвергаются интенсивному износу, особенно в нижней части.

В существующих сдвоенных кристаллизаторах

МНЛЗ-2,3 ККЦ ПАО «ММК» установлено 4 широких и 8 узких медных стенок общим весом примерно 3390 кг. Вес широких стенок составляет 3008 кг, они имеют сверленную конструкцию каналов охлаждения, из-за чего часть материала медных стенок, которая располагается возле стальной стенки кристаллизатора, практически не участвует в тепловой работе кристаллизатора. Кроме того, применяемая технология изготовления цилиндрических каналов в широких стенках кристаллизатора – это сложная непроизводительная и ресурсоемкая работа. На ПАО «ММК» стенки сверлят на специально изготовленном нестандартном оборудовании: горизонтально-сверлильном станке 1С975. Ружейные сверла длиной 1045 мм под отверстия диаметром 20 мм оборудованы дорогостоящими режущими пластинами ВК-8. Сверла имеют низкую стойкость и часто ломаются в процессе сверления [3]. При этом длительность сверления может достигать двух суток.

Решить проблему можно отказавшись от цилиндрических каналов охлаждения в стенках кристаллизатора, что возможно посредством перехода к его новой конструкции. В настоящее время в мировой и отечественной металлургической практике известен опыт применения кристаллизаторов с щелевыми каналами охлаждения. В Российской Федерации впервые кристаллизатор с радиальными медными стенками с щелевыми каналами охлаждения был применен в конверторном цехе ОАО «Северсталь» в 2003 г. [4]. Отмечено, что стойкость кристаллизатора составила 124 плавки, а во время его эксплуатации претензий к работе не возникало.

В работах [5, 6] проведён тепловой расчет кристаллизаторов при использовании щелевых каналов различной формы: полукруглой, прямоугольной и трапециевидальной. Установлено, что при прочих равных условиях разливки наименее эффективным являются каналы охлаждения полукруглой формы. Также отмечено, что коэффициент теплопередачи для щелевых каналов зависит от соотношения высоты и ширины канала.

Авторы работ [7, 8] отмечают, что для обеспечения оптимальной тепловой работы кристаллизатора необходимо рационально выбирать не только размеры каналов, но и расстояние между ними и скорость охлаждающей воды.

Кристаллизаторы с щелевыми каналами для узких стенок охлаждения применяются на МНЛЗ ПАО «ММК» [9–12]. В частности, с такой конструкцией кристаллизатора довольно давно работает МНЛЗ-1 конвертерного цеха.

В рамках работы по унификации парка кристаллизаторов ПАО «ММК» была разработана новая конструкция медных стенок с щелевыми прямоугольными каналами для МНЛЗ-2,3, обеспечивающая сохранение существующего гидравлического оборудования и петлевой системы охлаждения. Все это привело к необходимости проведения теплового расчета широкой стенки кристаллизатора при работе для существующих технологических условий.

Целью работы является прогнозирование теплового состояния широкой стенки кристаллизатора новой конструкции с использованием компьютерного моделирования, позволяющего анализировать возможности ее использования в разных технологических условиях.

В процессе проектирования и расчета рассматривалась широкая стенка кристаллизатора с щелевыми каналами охлаждения, показанная на рис. 1. Основные исходные данные приведены в табл. 1.

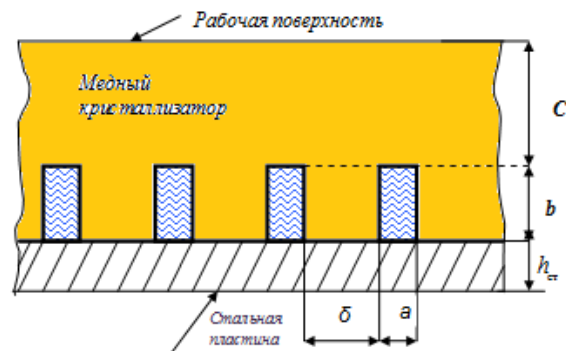


Рис. 1. Расположение щелевых каналов и основные размеры стенки кристаллизатора

Для расчёта теплового потока, Вт/м², использовалась эмпирическая зависимость Л.В. Буланова [2, 4]:

$$q(h, v) = v^{0,46668} \exp\{14,689 + h \cdot [-4,3376 + h(5,5939 - 3,1608 \cdot h^2)] + 0,007815 / h / v - 5,7084 \cdot 10^{-8} \cdot h^{-5}\}, \quad (1)$$

где h – расстояние от верха мениска в кристаллизаторе, м; v – скорость разливки, м/мин.

Для теплового расчета важным параметром является среднеинтегральная плотность теплового потока, Вт/м², по высоте кристаллизатора, определяемая как

$$\bar{q}(v) = \frac{1}{B - h_{\min}} \int_{h_{\min}}^B q(h, v) \cdot dh, \quad (2)$$

где $h_{\min} \approx 0,08-0,1$ м – расстояние от верха мениска в кристаллизаторе, где наблюдается максимальный тепловой поток. Более подробно расчёты представлены в работе [12].

Таблица 1

Исходные данные для теплового расчета широкой стенки кристаллизатора МНЛЗ

Наименование	Значение
Количество слитков в кристаллизаторе, шт.	2
Диапазон скорости разливки v ; средняя (рабочая) скорость, $\bar{v}$, м/мин	0,1–1; 0,74
Скорость протока воды в каналах W_b , м/с	5–8
Давление воды на входе в панели кристаллизатора, МПа	0,75–0,85
Температура воды на входе t_b , °C, не более	35–40
Толщина медных стенок $H=C+b$, мм	50
Высота медных стенок кристаллизатора B , мм	930
Расход воды общий и на каждую стенку V_b , м ³ /ч, не менее,	225/112,5
Расстояние от канала до рабочей поверхности C , мм	30
Минимальная толщина стенок (последний ремонт) $H_{\min}$, мм	33
Число каналов в одной стенке n	48
Длина стенки кристаллизатора L , мм	1480
Длина щелевых каналов l , мм	830
Ширина щелевых каналов a , мм	5
Высота щелевых каналов b , мм	20

Зависимости среднего и максимального тепловых потоков от скорости разливки, рассчитанные по выражениям (1), (2), представлены графически на рис. 2. Отношение максимального теплового потока к его среднему значению при разной скорости разливки составляет $\mu=1,8-2,0$.

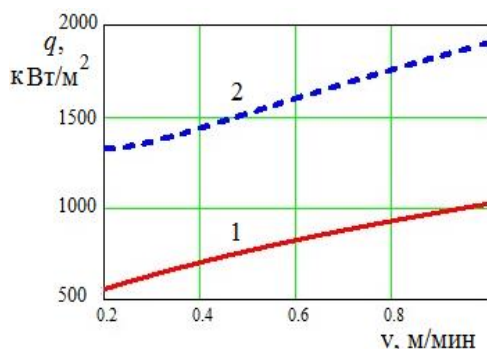


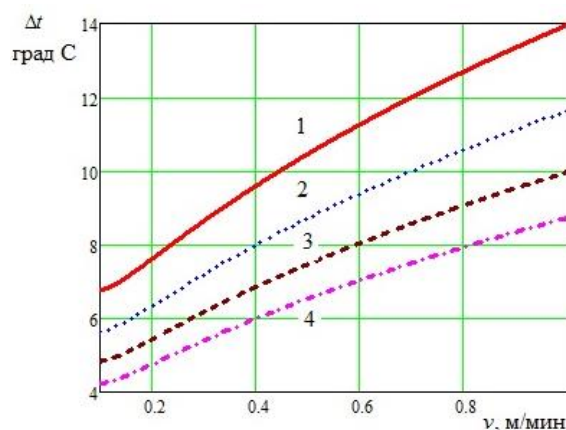
Рис. 2. Зависимости среднего теплового потока по высоте кристаллизатора (1) и максимального теплового потока (2) от скорости разливки

Важными тепловыми параметрами процесса эксплуатации кристаллизатора являются изменение температуры воды, проходящей через широкую стенку кристаллизатора, а также изменение средней температуры поверхности щелевых каналов. По этим параметрам можно оценивать теплосъем с поверхности медной стенки, а также эффективность работы системы охлаждения в целом.

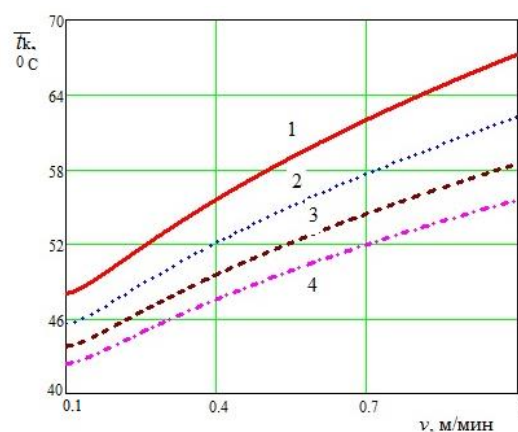
По методике, представленной в литературных источниках [2, 14], рассчитали тепловой баланс работы кристаллизатора, а именно зависимость изменения температуры воды и средней температуры поверхности щелевых каналов от скорости разливки (рис. 3). Начальная температура воды на входе в кристаллизатор была принята 35°C .

Увеличение перепада температур воды с повышением скорости разливки связано с повышением объема жидкой стали, поступающей в кристаллизатор в единицу времени. При этом, согласно полученным зависимостям, средняя и максимальная температуры медной стенки кристаллизатора не поднимаются выше $\bar{t}_k > 70^{\circ}\text{C}$, $t_{k \max} < \mu \cdot \bar{t}_k = 140^{\circ}\text{C}$. Для предотвращения вскипания воды в каналах избыточное давление в них не должно быть менее чем 3,5 атм.

Представленная методика расчета теплового профиля кристаллизатора была адаптирована к системе компьютерного моделирования литейных процессов СКМ ЛП «ПолигонСофт». Программный продукт и адаптированная под него методика расчета теплового профиля позволяет производить расчет формирования сляба в кристаллизаторе МНЛЗ при меньших временных затратах. Кроме того, применение «ПолигонСофт» позволит моделировать процесс кристаллизации сляба при изменении условий процесса литья: скорости разливки, температуры воды на входе в кристаллизатор, температуры разливаемого металла.



а



б

Рис. 3. Перепад температуры охлаждающей воды в широкой стенке кристаллизатора (а) и средней температуры поверхности охлаждающих каналов (б) при разной скорости разливки и скорости течения воды:

- 1 – $W_b = 5$ м/с ($V_b = 86$ м³/ч); 2 – $W_b = 6$ м/с ($V_b = 104$ м³/ч);
3 – $W_b = 7$ м/с ($V_b = 121$ м³/ч);
4 – $W_b = 8$ м/с ($V_b = 138$ м³/ч)

Для оценки эффективности работы программного обеспечения и адекватности получаемых результатов была проведена серия моделирования процессов литья. Исходные данные для моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для процесса моделирования

Наименование	Значение
Скорость разливки металла, м/мин	0,4, 0,6
Скорость протока воды в каналах W_b , м/с	5–8
Температура воды на входе t_b , °C, не более	35
Коэффициент теплопередачи через медную стенку, Вт/м ² ·К	600

Геометрические параметры кристаллизатора принимались из технической документации и сборочных чертежей, разработанных специалистами ФГБОУ

ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Перед началом моделирования была построена трёхмерная и сеточная модели кристаллизатора и слитка (рис. 4).

На первом этапе моделирования оценивалось распределение температур в кристаллизующемся слябе. Первый срез по времени был сделан спустя 88 секунд с момента окончания заполнения кристаллизатора, второй – через 138 секунд с момента начала движения слитка. Распределение температур в кристаллизующемся слитке представлено на рис. 5.

Моделирование процесса формирования сляба позволяет оценивать распределение температур в кристаллизующемся металле как до момента начала вытяжки сляба (рис. 5, а), так и после (рис. 5, б). Нарастание корочки на слябе происходит равномерно с двух сторон, а зная температуру кристаллизации, возможно оценить динамику нарастания твёрдого слоя на поверхности сляба.

Далее было получено тепловое поле в медной стенке кристаллизатора. Визуализированные результаты моделирования представлены на рис. 6.

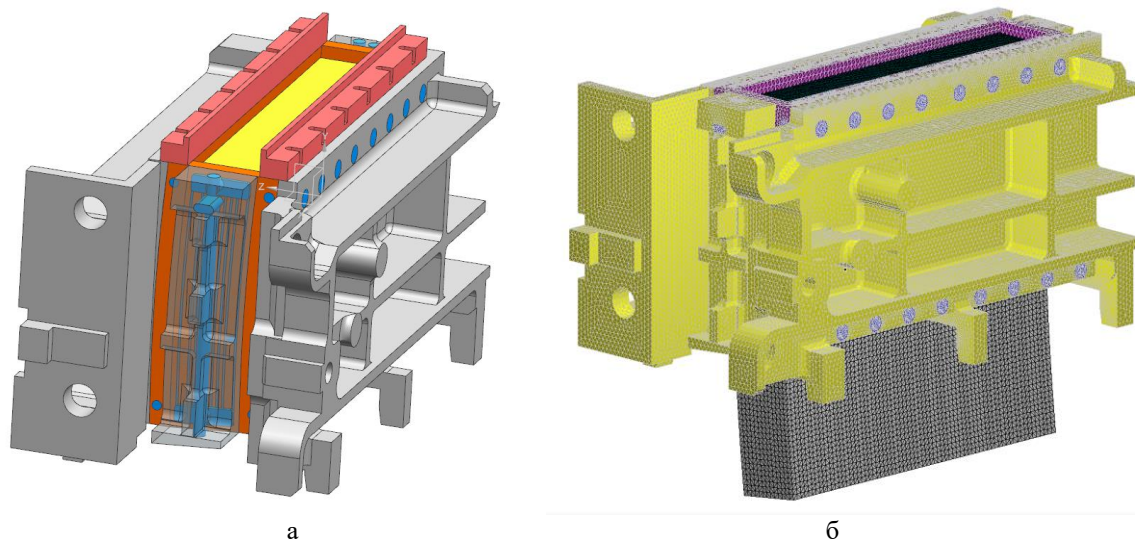


Рис. 4. Трёхмерная (а) и сеточная (б) модели кристаллизатора

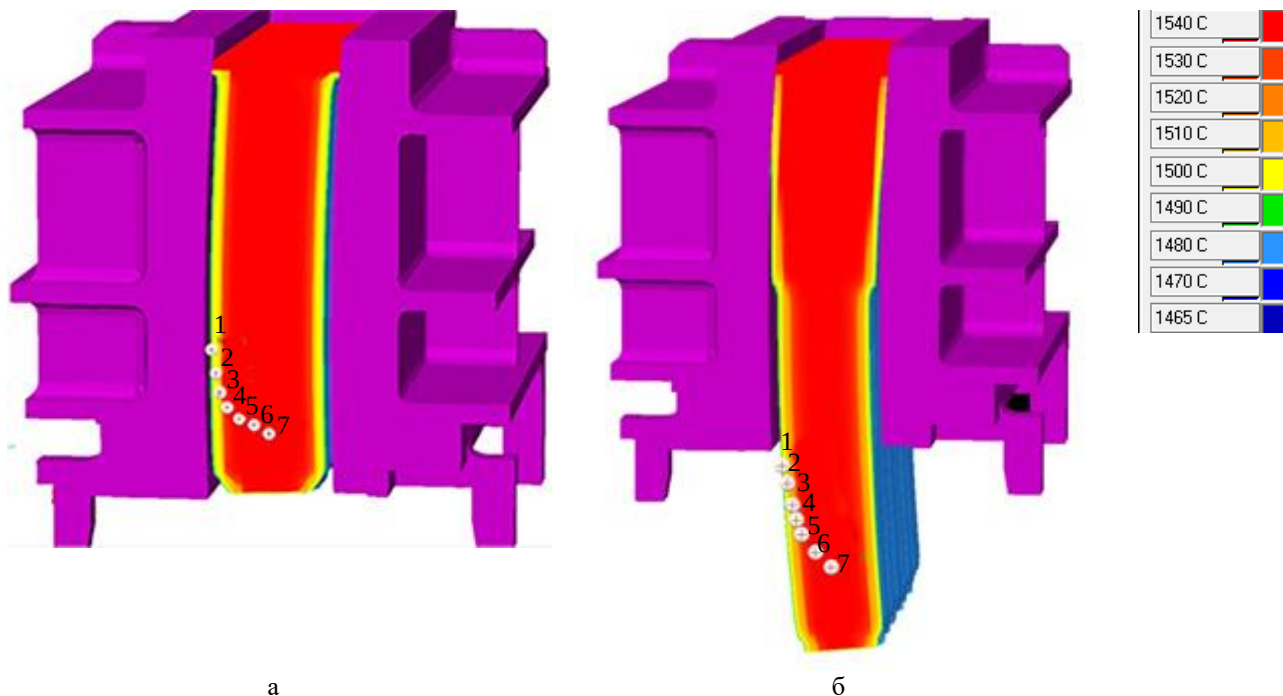


Рис. 5. Распределение температур в кристаллизующемся слябе:
 а – на 88-й секунде с момента заполнения кристаллизатора, распределение температур, °C:
 1 – 1448; 2 – 1511; 3 – 1523; 4 – 1534; 5 – 1539; 6 – 1540; 7 – 1540;
 б – на 138-й секунде с момента начала движения сляба, распределение температур, °C:
 1 – 1448; 2 – 1494; 3 – 1519; 4 – 1522; 5 – 1531; 6 – 1534; 7 – 1538

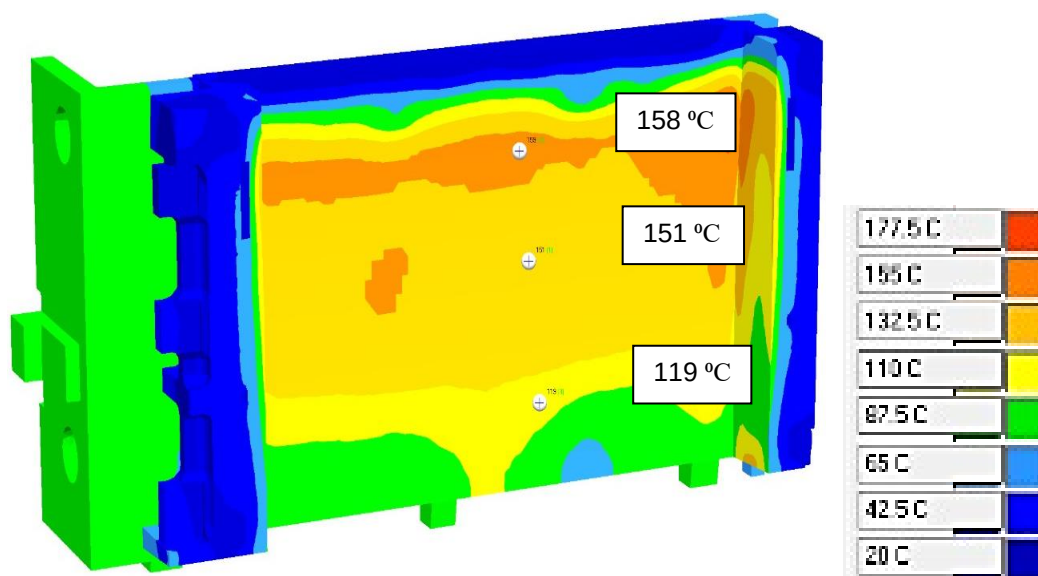


Рис. 6. Тепловое поле в кристаллизаторе при скорости разливки со скоростью 0,6 м/мин

Видно, что температура на рабочей поверхности широкой медной стенки находится в пределах 158–119 °C при скорости движения слитка 0,6 м/мин и 122–84 °C при скорости – 0,4 м/мин. Изменение температуры на рабочей поверхности медной стенки кристаллизатора при различных скоростях разливки связано с увеличением объема стали, проходящей через кристаллизатор в единицу времени. Данные температуры рабочей стенки предотвращают ее разупрочнение под действием снимаемых тепловых потоков и связанные с этим аварийные ситуации.

Выводы по работе

1. С помощью компьютерного моделирования установлено, что разработанная конструкция широкой стенки кристаллизатора с щелевыми каналами охлаждения при заданных технологических условиях охлаждения обеспечивает требуемый теплосъем от слитка. При этом предотвращается разупрочнение медной стенки под действием снимаемых тепловых потоков и связанные с этим аварийные ситуации.

2. Расчетным путем определены технологические параметры работы кристаллизатора в машине непрерывного литья заготовок при различных условиях: скорость разливки, скорость течения воды в охлаждающих каналах и т.д. Построена зависимость перепада температуры охлаждающей воды в широкой стенке кристаллизатора и средней температуры поверхности охлаждающих каналов при рабочих скоростях разливки и течения воды в каналах.

3. Созданные математические модели были адаптированы к системе компьютерного моделирования «ПолигонСофт», что позволило производить расчеты и визуализировать результаты с минимальными временными затратами.

Список литературы

1. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок: М.: Металлургия, 1988. 53 с.
2. Расчетно-аналитическое исследование тепловых процессов в кристаллизаторе / Буланов Л.В., Асанова Р.Ф., Волегова В.Е., Лобанов Е.П. // Сталь. №9. 1999. С. 24–26.
3. Опыт эксплуатации узких медных стенок кристаллизаторов на ММК / Подосян А.А., Завьялов В.И., Каримов М.И., Юсин А.Н. // Межрегиональный сборник научных трудов / под ред. К.Н. Вдовина; МГТУ им. Г.И. Носова, ОАО «ММК». Магнитогорск, 2002. С. 73–78.
4. Радиальный слябовый кристаллизатор с щелевыми каналами и никелевым покрытием стенок / Макрушин А.А., Куклев А.В., Айзин Ю.М., Зарубин С.В. и др. // Metallurg. № 2. 2005. С. 39–41.
5. Ячиков И.М., Ларина Т.П., Вдовин К.Н. Сравнение тепловой работы кристаллизаторов МНЛЗ с охлаждающими каналами различной формы // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №2. С. 65–70.
6. Yachikov I.M., Larina T.P., Vdovin K.N. Thermal operation of molds in continuous-casting machines with cooling channels of different shape // Steel in Translation. 2007. T. 37. № 11. С. 929-933.
7. К вопросу оптимизации геометрических размеров охлаждающих каналов рабочей стенки щелевого кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок / Лукин С.В., Калягин Ю.А., Кибардин А.Н., Славов В.И. // Вестник Череповецкого государственного университета. 2012. № 2. Т. 1. С. 11–14.
8. Larina T. P., Vdovin K. N., Yachikov I. M. Calculation of Hydraulic Parameters of Copper Crystallizers with a Complex Connection of Channels // Russian

- Journal of Non Ferrous Metals, 2015, vol. 56, no. 6, pp. 648–653. (DOI: 10.3103/S106782121506005X)
9. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка сталей: монография. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 732 с.
 10. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка стали: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 540 с.
 11. Переход к прямоугольным охлаждающим каналам широких стенок кристаллизаторов МНЛЗ / Вдовин К.Н., Ларина Т.П., Ячиков И.М., Позин А.Е. // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Вып. 10. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. С. 52–57.
 12. Непрерывная разливка стали. Расчеты медных кристаллизаторов: монография / Ячиков И.М., Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ларина Т.П. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 190 с.
 13. Математическое моделирование прочности шпилечного соединения сборных плит кристаллизатора МНЛЗ / Ячиков И.М., Панферов В.И., Феоктистов Н.А., Чернов В.П. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2021. Т. 21. № 2. С. 87–97.
 14. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / под общ. ред. Г.А. Шалаева. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2003. 320 с.

Сведения об авторах

Ячиков Игорь Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: iachikovim@susu.ru, ORCID.ORG 0000-0002-1562-7506.

Феоктистов Николай Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: fna87@mail.ru.

Савинов Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, директор института металлургии, машиностроения и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: savinov_nis@mail.ru.

Шафиков Тимур Ильдусович – аспирант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: timur_shaficov97@bk.ru.

Михалкина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: miv.mgtu@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MODELING OF THERMAL FIELDS IN THE MOLD WITH SLOT CHANNELS COOLING

Yachikov Igor M. – Dr. of Tech. Sciences, Prof., Prof. Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: iachikovim@susu.ru, ORCID.ORG 0000-0002-1562-7506.

Feoktistov Nikolay A. – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fna87@mail.ru, ORCID.ORG 0000-0002-6091-7983

Savinov Alexander S. – Dr. of Tech. Sciences, assistant professor, Director of the Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: savinov_nis@mail.ru.

Shaficov Timur I. – postgraduate student, South Ural State University, Chelyabinsk. Russia. E-mail: timur_shaficov97@bk.ru.

Mikhalkina Irina V. – Candidate of Technical Science, Senior Lecturer Department of Foundry Processes and Material Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: miv.mgtu@mail.ru

Abstract. At PJSC «ММК» for wide walls of CCM molds there was a question of transition from drilled to slotted channels in order to unify existing models of molds, as well as to simplify the procedure of copper walls manufacturing and to reduce copper consumption. The main condition for the reconstruction is to retain the existing loop cooling system while ensuring a given thermal mode of the crystallizer. Results of thermal calculation of wide walls of the crystallizer with slot cooling channels are presented. For automation and visualization of calculation results a module for modeling these processes was developed in SCM FP "PolygonSoft". It makes it possible to predict the thermal field on the working surface of a wide mold wall to ensure a specified thermal mode of its operation, as well as to prevent copper alloy loosening and to maintain the specified strength properties. The thermal calculation of copper walls with slotted channels was carried out, and the obtained data were adapted to the computer modeling system "PolygonSoft". The presented results of mathematical and computer modeling are of practical character and can be used in the development of new unified designs of slab crystallizers of continuous casting machines.

Key words: mold, continuous casting machine, slab, copper wall, slot channels cooling.

Ссылка на статью:

Моделирование тепловых полей в кристаллизаторе с щелевыми каналами охлаждения / И.М. Ячиков, Н.А. Феоктистов, А.С. Савинов, Т.И. Шафиков, И.В. Михалкина // Теория и технология металлургического производства. 2022. №1(40). С. 12-18.
Yachikov I.M., Feoktistov N.A., Savinov A.S., Shaficov T.I., Mikhalkina I.V. Modeling of thermal fields in the mold with slot channels cooling. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 40, no. 1, pp. 12-18.