

А. В. Ноговицын, А. Д. Подольцев\*, И. Н. Кучерявая\*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*Институт электродинамики НАН Украины, Киев

## Численное моделирование гидродинамических и тепловых процессов при непрерывной двухвалковой разливке стали

Разработана математическая модель и методика численного расчёта связанных гидродинамических и тепловых процессов в кристаллизующемся металле двухвалкового кристаллизатора при его непрерывной вертикальной подаче через щелевой питатель. Методика реализована в программе Comsol для двумерного случая в приближении ламинарного характера течения металла и для установившегося режима. Проанализированы распределения скорости и температуры расплава в активной зоне кристаллизатора при скорости вращения валков в диапазоне 0,085-0,85 м/с. Показано, что с увеличением скорости разливки увеличивается глубина расплавленной лунки в металле, и вблизи его свободной поверхности появляются дополнительные вихревые структуры течения.

**Ключевые слова:** валковая разливка металлов, ламинарное течение, температурное поле, фазовые превращения, циркуляция расплава, скорость вращения валка, компьютерное моделирование

В настоящее время в мире проводятся широкие научные исследования и проектные работы, направленные на разработку эффективных технологий и оборудования для металлургических процессов получения и обработки материалов, в том числе стали и цветных металлов, методом валковой разливки-прокатки [1, 2].

Валковая разливка является одной из перспективных и энергосберегающих технологий производства полос из металлических материалов и сплавов. Получение тонкого плоского проката заключается в формировании полосы непосредственно из жидкого металла путём кристаллизации и деформации его между двумя вращающимися валками (рис. 1, а).

В двухвалковых кристаллизаторах как с вертикальной, так и горизонтальной подачей жидкого ме-

талла, затвердевание расплава происходит между двумя вращающимися навстречу друг другу валками. Производство листового металлопроката с помощью валковых агрегатов отличается сравнительно небольшими энергозатратами, экономическими преимуществами за счёт устранения промежуточных технологических операций и экологической чистотой. Благодаря высокой скорости охлаждения расплава, процесс двухвалковой разливки-прокатки позволяет производить высококачественные изделия. Вместе с тем, его реализация в промышленных масштабах затруднена вследствие сложного управления технологическим процессом.

Для изготовления полос из сталей чаще всего используется вертикальная подача расплава в валки-кристаллизаторы. Жидкий металл поступает в межвалковую зону, в окрестности которой происходит сложное по характеру течение металла. Практический и научный интерес представляет изучение гидродинамических процессов и процессов теплообмена с учётом турбулентного течения расплава, кристаллизации и пластической деформации металла в зазоре между валками. Таким вопросам посвящены, например, работы [3-7].

Анализ ряда публикаций, в числе которых [1, 8-11], показал, что остаются вопросы, требующие дальнейшего детального изучения. Среди них:

- достижение равномерного распределения температуры в потоке металла вдоль валков;
- обеспечение требуемого качества полосы металла, включая качество боковой кромки полосы;

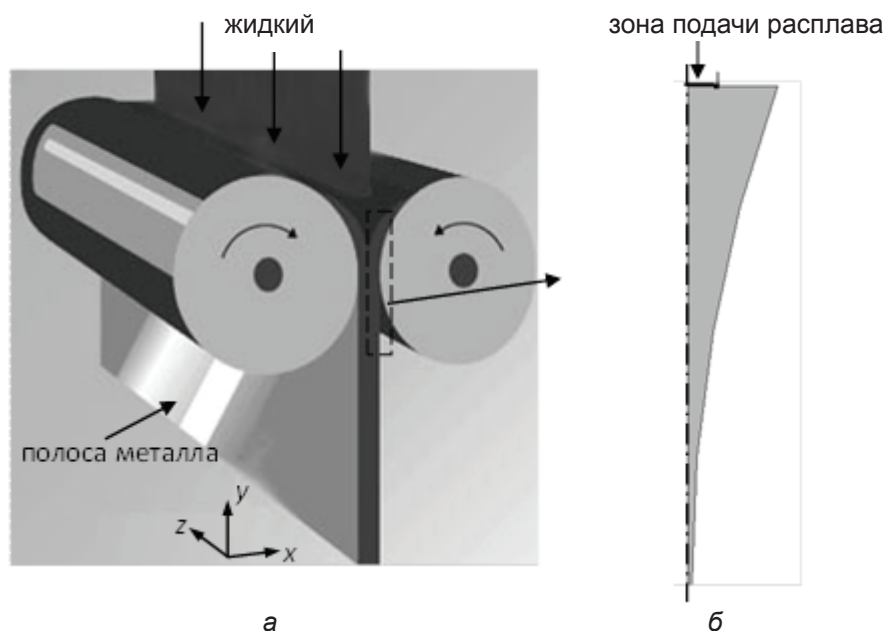


Рис. 1. Исследуемая система подачи жидкого металла (а), и расчётная область задачи (б)

– повышение производительности бездефектной разливки.

Решение таких вопросов предполагает, прежде всего, исследование закономерностей течения металла и связанных с ним процессов тепломассопереноса в межвалковом зазоре и, в целом, в потоке жидкого металла.

В связи с тем, что экспериментальные исследования закономерностей протекания процессов кристаллизации и формирования полос из расплава затруднительны, в большинстве работ, например, в [4, 12-17] проводятся исследования с помощью численного моделирования. Разработаны как двумерные [4, 16, 17] математические модели, так и трёхмерные – например, в [5], при учёте связи между турбулентным течением расплавленного металла и теплопередачей.

В настоящей работе изучаются процессы в двухвалковом кристаллизаторе с вертикальной подачей жидкой стали по всей длине валков и на ограниченном отрезке межвалкового пространства в поперечном сечении (рис. 1). Путём компьютерного моделирования в программе Comsol [18] в двумерном случае исследуются связанные гидродинамические и тепловые процессы в межвалковом зазоре кристаллизатора в зависимости от скорости разливки металла (скорости вращения валков). При этом используются основные теоретические положения работ [19-22].

*Математическая модель для исследования.* Исследуемая система двухвалковой разливки жидкой стали показана на рис. 1, а.

В модели используются следующие положения и допущения: валки недеформируемые; расплав является ньютоновской (вязкой, несжимаемой) жидкостью; течение расплава предполагается ламинарным. Поскольку расплав подаётся по всей длине валков, задача решается в двумерной постановке в декартовой системе координат, в плоскости сечения  $O_{xy}$  непосредственно в области жидкого металла (рис. 1); вследствие симметрии относительно центральной вертикальной плоскости между валками, рассматривается 1/2 часть объёма металла (рис. 1, б); в силу того, что отношение ширины полосы металла к его толщине велико, концевыми эффектами пренебрегают; процессы рассматриваются в установившемся режиме без учёта малого по продолжительности начального переходного режима; для учёта фазовых превращений при кристаллизации расплавленного металла в уравнении движения учитывается сила, снижающая скорость в зоне фазового перехода; задаются постоянные значения коэффициента теплоотдачи вдоль поверхности полосы и на разделе поверхности валка и жидкого металла; на поверхности валков коэффициент теплоотдачи зависит от скорости их движения.

Процессы движения металла описываются уравнениями [23]:

сохранения количества движения (уравнением Навье-Стокса):

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T)] - (2\eta/3)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} + \mathbf{F}, \quad (1)$$

сохранения массы или уравнением неразрывности:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (2)$$

В системе (1)-(2) неизвестными величинами являются  $\mathbf{u}$  – вектор скорости металла и  $p$  – давление. Приняты также обозначения:  $\eta$  – динамическая вязкость;  $\rho$  – плотность расплава;  $\mathbf{I}$  – единичный тензор;  $\mathbf{F}$  – искусственно введённая объёмная плотность силы, уменьшающая и подавляющая скорость на границе фазового перехода так, чтобы учесть затвердевание расплавленного металла.

Процессы теплопроводности и конвекции тепла, связанные с гидродинамическими процессами, описываются уравнением:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T). \quad (3)$$

Здесь  $T$  – температура;  $\lambda$  – теплопроводность материала;  $C_p$  – теплоёмкость, определяемая с учётом фазового перехода, происходящего при затвердевании металла.

В процессе фазового превращения выделяется значительное количество скрытого тепла, теоретические основы расчёта которого изложены в [22, 24].

Количество тепловой энергии на единицу массы расплава при его кристаллизации задаётся изменением энтальпии  $\Delta H$ . В общем случае для известной величины теплоёмкости материала  $C_p(T)$  изменение энтальпии в изобарическом процессе ( $p = \text{const}$ ) при нагреве от температуры  $T_1$  до  $T_2$  рассчитывается согласно термохимическому закону Кирхгофа:

$$\Delta H|_{T_1 \rightarrow T_2} = \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT.$$

Изменение в удельной теплоёмкости при фазовом переходе может быть приближённо определено как

$$\Delta C_p = \frac{\Delta H}{T}.$$

В модели для учёта скрытой теплоты кристаллизации металла при разливке задаётся значение теплоёмкости, равное  $C_p + \delta \Delta H$ , где дельта-функция Дирака  $\delta$  в вычислительной программе определяется изменяющейся по нормальному закону распределения Гаусса:

$$\delta = \frac{e^{-(T-T_m)^2/(\Delta T)^2}}{\Delta T \sqrt{\pi}},$$

где  $T_m$  – температура плавления;  $\Delta T = (T_L - T_S)/2$ ;  $T_L, T_S$  – температура ликвидуса и солидуса соответственно.

Поскольку в температурном интервале  $T_S \leq T \leq T_L$  удельная теплоёмкость претерпевает скачок, при её расчёте в численной модели используется стандартная ступенчатая функция сглаживания Хевисайда с непрерывной второй производной – функция  $flc2hs$  в программе Comsol [18].

Важным вопросом моделирования тепловых процессов при разливке жидкого металла является определение границ областей твердой и жидкой фаз для нахождения зоны кристаллизации расплава. Объемная доля жидкой фазы определяется следующим образом

$$B = \begin{cases} 1 & \text{при } T > T_m + \Delta T; \\ (T - T_m + \Delta T) / (2\Delta T) & \text{при } (T_m - \Delta T) \leq T \leq T_m + \Delta T; \\ 0 & \text{при } T < T_m - \Delta T. \end{cases} \quad (4)$$

На основе величины  $B$  определяется сила  $F$  [24] в уравнении (1), с помощью которой учитываются фазовые превращения при затвердевании металла:

$$F = \frac{(1-B)^2}{B^3 + \varepsilon} A \cdot (u - u_0). \quad (5)$$

В выражении (5):  $\varepsilon$  – малая константа ( $\varepsilon = 10^{-3}$ );  $A$  – большая постоянная величина ( $A = 10^5$ );  $u_0 = 0$ ;  $v_0(x_0 - R)/l$  – продольная составляющая средней скорости разливки металла. Здесь, согласно рис. 2,  $x_0, R$  – координата центра и радиус валка соответственно;  $l = l(y)$  – полуширина канала (половина расстояния между валками) в текущей точке  $y$  по высоте канала. Величина  $l$  рассчитывается как  $l(y) = x_0 - \sqrt{R^2 - y^2}$ . По сути, выражение  $v_0 \cdot (x_0 - R) / l$  даёт оценочное значение средней продольной составляющей скорости движения расплава в различных точках по высоте канала, определяемых координатой  $y$  (рис. 2). В его основу положено условие равенства расхода металла во всех точках на выходе из канала.

Система уравнений (1)-(3) дополняется граничными условиями:

– для скорости – условие симметрии на оси области (рис. 1, б); на входе – скорость истечения металла из щели, равная  $0,125v_0$ ; на выходе – скорость движения металла равна скорости движения валка  $v_0$ ;

– для температуры – условие симметрии на оси области; условие конвективного потока на выходе; на входе – температура подаваемого металла  $T_0$ ; на остальных границах, включая поверхность валка – тепловой поток  $q = n \cdot -(k + k_T) \nabla T - \alpha(T_{\text{окр}} - T)$ , где  $\alpha$  – эффективный коэффициент теплоотдачи, значения которого зависят от тепловых условий для граничной поверхности;  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды;  $n$  – вектор внешней нормали к теплоотдающей поверхности. Коэффициент теплоотдачи на поверхности валка определяется в зависимости от скорости разливки согласно формуле, Вт/(м<sup>2</sup>·К) [25, 26]:

$$\alpha = 17300 \cdot v_0^{0,65}, \quad (6)$$

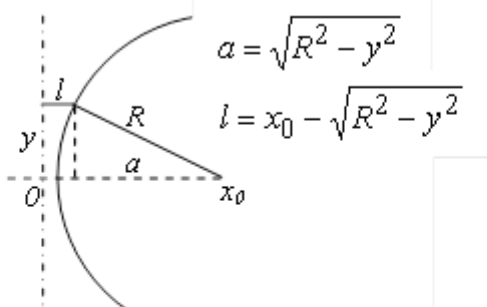


Рис. 2. Пояснение к выражению (5), в котором учитывается изменение средней скорости расплава по высоте

Модель для исследования связанных стационарных гидродинамического и теплового полей, описываемых системой дифференциальных уравнений в частных производных (1)-(3), реализовывалась, с учётом выражений (4)-(6), численно методом конечных элементов в пакете программ Comsol.

**Результаты компьютерного моделирования.** В качестве разливаемого металла выбиралась сталь. Характеристики двухвалковой системы разливки и данные для расчётов представлены в таблице [5, 13, 27].

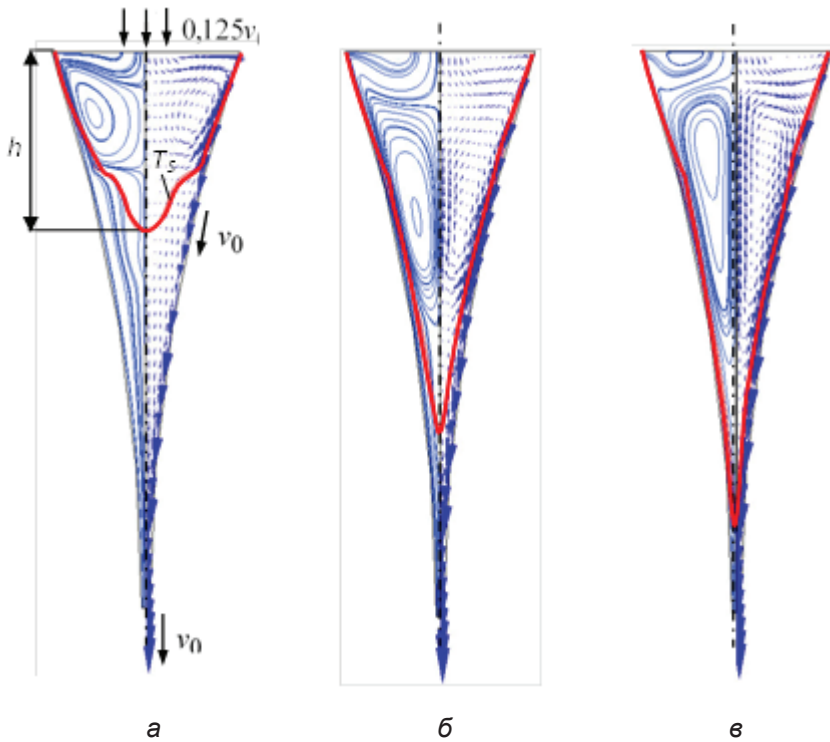
### Данные для компьютерных расчётов

Характеристики	Значения
Радиус валка, мм	210
Длина валка (ширина полосы), мм	600
Высота мениска, мм	70
Толщина полосы металла, мм	1
Линейная скорость на поверхности валка, $v_0$ , м/с	0,085/0,4/0,85
Ширина щели для подачи расплава, мм	8
Плотность разливаемого металла, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7000
Эффективная динамическая вязкость расплава, $\eta$ , Па/с	0,062
Теплопроводность расплавленной стали, $\lambda$ , Вт/(м·К)	29
Скрытая теплота кристаллизации стали, $\Delta H$ , Дж/кг	272000
Температура солидуса стали, $T_s$ , °C	1460
Температура расплава на входе, $T_0$ , °C	1500
Температура окружающей среды, $T_{\text{окр}}$ , °C	27
Коэффициент теплоотдачи с поверхности валка, $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	3485/9536/15566
Коэффициент теплоотдачи с открытых поверхностей расплава, $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	100

Результаты численных расчётов показаны на рис. 3 и 4 для различных значений скорости  $v_0 = 0,085; 0,4; 0,85$  м/с.

Из приведённых результатов можно заключить следующее.

При малой скорости разливки (0,085 м/с) из-за большого времени нахождения металла в канале между валками глубина расплавленной лунки  $h$  мала – занимает приблизительно треть часть высоты канала (см. рис. 3, а). При этом в половине канала возникает одна вихревая структура. Температура металла на выходе из валков равна 823 °C (см. рис. 4, а).



**Рис. 3.** Распределение поля скорости в расплаве в виде линий потока (слева) и вектор (справа) в активной зоне валкового кристаллизатора при различной скорости движения вала  $v_0$ , м/с: 0,085 (а); 0,4 (б); 0,85 (в). Утолщённой линией показана изолиния температуры солидус  $T_s = 1460$  °С

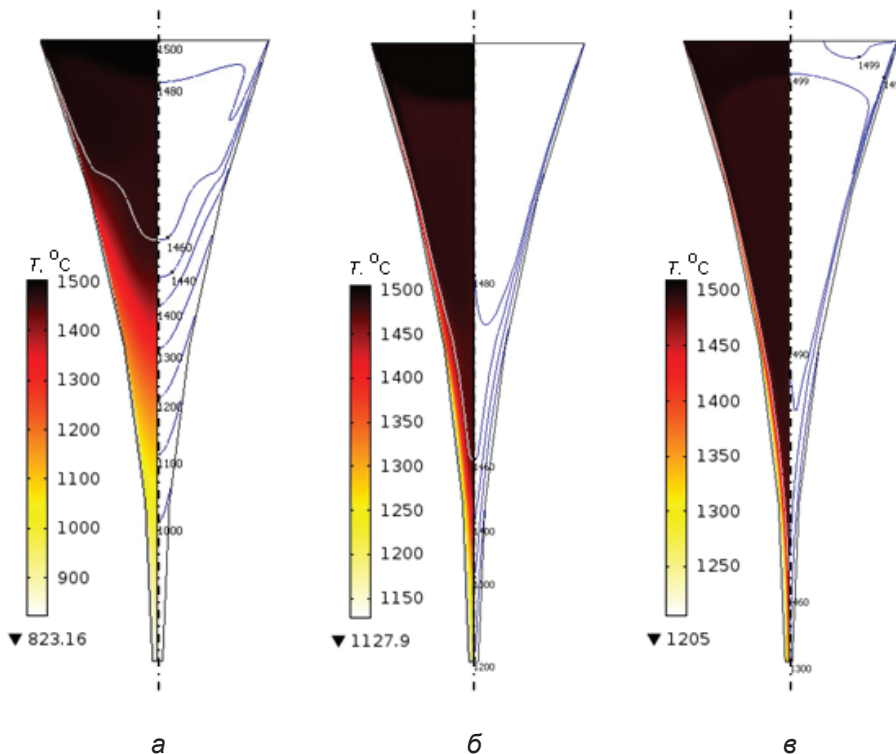
С увеличением скорости движения валков до 0,4 м/с (рис. 3, б и 4, б) глубина лунки увеличивается. При этом задаваемый согласно выражению (6) коэффициент теплоотдачи возрастает. Вместе с тем уменьшается время нахождения расплава между валками, что преобладает и приводит к увеличению глубины лунки. Для этого случая температура металла на выходе повышается до 1128 °С (рис. 4, б).

При дальнейшем увеличении скорости движения валков до 0,85 м/с (рис. 3, в и 4, в) глубина лунки ещё более увеличивается. Вблизи свободной поверхности в течении расплава появляется небольшая дополнительная вихревая структура. Затвердевание металла происходит вблизи поверхности валков по всей высоте канала и температура на выходе достигает 1205 °С (рис. 4, в).

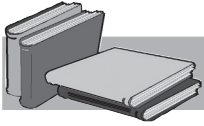
Отметим, что во всех случаях максимальная скорость металла имеет место на поверхности валков и равна их линейной скорости движения.

## Выводы

Разработана математическая модель и численная методика расчёта связанных гидродинамических и тепловых процессов в кристаллизующемся металле, движущемся в канале двухвалкового кристаллизатора. Рассмотрен вариант непрерывной вертикальной подачи расплавленного металла через целевой питатель. Методика реализована в программе Comsol для двумерного случая в приближении ламинарного характера течения металла в установившемся режиме. Проанализированы распределения скорости движения расплава и температуры в активной зоне валкового кристаллизатора при различных значениях скорости движения валков в интервале 0,085-0,85 м/с. Показано, что с увеличением скорости разлива увеличивается глубина расплавленной лунки в металле и вблизи его свободной поверхности появляются дополнительные вихревые течения.



**Рис. 4.** Распределение температуры в цвете (слева) и изолиниями (справа) в активной зоне валкового кристаллизатора при различной скорости движения вала  $v_0$ , м/с: 0,085 (а); 0,4 (б) и 0,85 (в)



## ЛИТЕРАТУРА

1. Ge S. Progress of strip casting technology for steel: historical developments. Review / S. Ge, M. Isac, I. L. Guthrie // *ISIJ International*. – 2012. – Vol. 52. – № 12. – P. 2109-2122.
2. Данченко В. Н. Прогрессивные процессы обработки металлов давлением / В. Н. Данченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 7 (272). – С. 1-8.
3. Haga T. Strip casting of A5182 alloy using a melt drag twin-roll caster / T. Haga, T. Nishiyama, S. Suzuki // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 133 (1-2). – P. 165-168.
4. Choudhary S. K. Mathematical modeling of transport phenomena in continuous casting of steel / S. K. Choudhary, D. Mazumdar // *ISIJ International*. – 1994. – Vol. 34. – № 7. – P. 584-592.
5. Guthrie R. I. L. Mathematical and physical modelling of steel flow and solidification in twin-roll/horizontal belt thin-strip casting machines / R. I. L. Guthrie, R. P. Tavares // *Applied Mathematical Modelling*. – 1998. – Vol. 22, Is. 11. – P. 851-872.
6. Ноговицын А. В., Баранов И. П. Метод расчёта протяженности зон кристаллизации и деформации при валковой разливке-прокатке / А. В. Ноговицын, И. П. Баранов // *Обработка материалов давлением*. – 2013. – № 1 (34).
7. Ноговицын А. В. Прогнозирование напряженно-деформированного и структурного состояния стали при горячей прокатке // *Чёрные металлы*. – 2000. – № 4. – С. 16-20.
8. Matsushita T. Development and commercialization of twin roll strip caster / T. Matsushita, K. Nakayama, H. Fukase, S. Osada // *IHI Engineering Review*. – 2009. – Vol. 42. – № 1. – P. 1-9.
9. Barekar N. S. Twin Roll Casting of Aluminum Alloys – An Overview / N. S. Barekar, B. K. Dhindaw // *Materials and Manufacturing Processes*. – Published online: 28 Apr 2014. – <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426914.2014.912307#U3IBU6K4rmU>
10. Cook R. Development of the twin-roll casting process / R. Cook, P. G. Grocock, P. M. Thomas, D. V. Edmonds, J. D. Hunt // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – Vol. 55, Is. 2. – P. 76-84.
11. Haga T. Development of a twin roll caster for light metals / T. Haga // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2010. – Vol. 43, Is. 1. – P. 393-402.
12. Wang B. Modelling of melt flow and solidification in the twin-roll strip casting process / B. Wang, J. Y. Zhang, J. F. Fan, S. L. Zhao, S. B. Ren, K. C. Chou // *Steel Research International*. – 2009. – Vol. 80, Is. 3. – P. 218-222.
13. Santos C. A. Modeling of solidification on twin-roll strip casting / C. A. Santos, J. A. Spim, A. Garcia // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – Vol 102. – P. 33-39.
14. Гридин А. Ю. Математическое моделирование температурного поля металла и валков в процессе валковой разливки-прокатки / А. Ю. Гридин // *Обработка материалов давлением*. – 2009. – №1 (20). – С. 75-83.
15. Zeng J. Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip / J. Zeng, R. Koitzsch, H. Preifer, B. Friedrich // *Journal of Materials processing Technology*. – 2009. – Vol. 209. – P. 2321-2328.
16. Saxena A. Modeling of fluid flow and heat transfer in twin-roll casting of aluminum alloys / A. Saxena, Y. Sahai // *Material Transactions*. – The Japan Institute of Metals. – 2002. – Vol. 43, № 2. – P. 206-213.
17. Mieke A. Modelling of heat transfer and solidification processes in horizontal twin-roll casting of magnesium AZ31 / A. Mieke, U. Gross // *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 33, Is. 1. – P. 12-17.
18. COMSOL multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
19. Исаев С. А. Методологические аспекты численного моделирования динамики вихревых структур и теплообмена в вязких турбулентных течениях / С. А. Исаев, А. И. Леонтьев, А. Е. Усачов // *Известия Академии наук. Энергетика*. – 1996. – № 4. – С. 133-141.
20. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
21. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 618 с.
22. Самойлович Ю. А. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю. А. Самойлович. – М.: Metallurgia, 1982. – 152 с.
23. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
24. Voller V. R. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems / V. R. Voller, C. A. Prakash // *Internat. Journal of Heat Mass Transfer*. – 1987. – Vol. 30. – P. 1709-1719.
25. Guthrie R. I. L. Measurements, simulations, and analyses of instantaneous heat fluxes from solidifying steels to the surfaces of twin roll casters and of aluminum to plasma-coated metal substrates / R. I. L. Guthrie, M. Isac, J. S. Kim, R. P. Tavares // *Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science*. – 2000. – Vol. 31, Is. 5. – P. 1031-1047.
26. Wang G.-X. On the heat transfer at the interface between a solidifying metal and a solid substrate / G.-X. Wang, E. F. Matthys // *Proceedings of Internat. Symp. on Melt-spinning, Strip Casting, and Slab Casting*. / Eds. E. F. Matthys and W. G. Truckner. – TMS Pub., USA, 1996. – P. 205-236.
27. Chang J. G. Numerical modeling of twin-roll casting by the coupled fluid flow and heat transfer model / J. G. Chang, C. I. Weng // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 1997. – Vol. 40, Is. 3. – P. 493-509.

## Анотація

Ноговицин О. В., Подольцев О. Д., Кучерява І. М.

Чисельне моделювання гідродинамічних та теплових процесів при неперервній двовалковій розливці

Розроблено математичну модель і методику чисельного розрахунку пов'язаних гідродіних і теплових процесів в металі, що кристалізується в каналі двовалкового кристалізатора при безперервній вертикальній подачі металу через щілинний живильник. Методика реалізована в програмі Comsol для двомірного випадку в наближенні до ламінарного характеру течії металу і для усталеного режиму. Проаналізовано розподіл швидкості і температури розплаву в активній зоні кристалізатора при значеннях швидкості обертання валків в діапазоні 0,085-0,85 м/с. Показано, що зі збільшенням швидкості розливання збільшується глибина розплавленої лунки в металі, і поблизу його вільної поверхні появляються додаткові вихрові структури течії.

## Ключові слова

валкове розливання металів, ламінарний плин, температурне поле, фазові перетворення, циркуляція розплаву, швидкість обертання валка, комп'ютерне моделювання

## Summary

Nogovitsyn O., Podoltsev O., Kucheryava I.

Numerical modelling of hydrodynamic and thermal processes at continuous twin-roll steel casting

The mathematical model and numerical technique are developed for computations of coupled hydrodynamic and thermal processes in the gap of twin-roll caster at continuous vertical melt feeding through slit nozzle. The computer technique is realized by Comsol for two-dimensional laminar flow of molten metal under steady-state conditions. The distributions of the melt velocity and temperature in active zone of the caster are analyzed at the different values of roll speed ranging from 0,085 to 0,85 m/s. As show, when the casting speed increases, the depth of molten hole in the metal grows and the additional vortexes in the melt flowing appear near the free surface of the melt.

## Keywords

roll metal casting, laminar flow, temperature field, phase transition, melt circulation, roll speed, computer modelling

Поступила 11.03.2015