

УДК 621.746.58:536.248

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Стулов В.В., д.т.н., профессор кафедры «Технологии и оборудование прокатки» (stuvv@inbox.ru)

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(МГТУ им. Баумана)

(105005, Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская, д. 5, стр. 1)

Аннотация. В работе акцентируется внимание на моделировании процессов, происходящих в кристаллизаторе с новой запатентованной системой охлаждения в машине непрерывной разливки стали, в частности, на перепаде температур в металле заготовки и в стенке по высоте кристаллизатора, от которых зависит качество получаемой заготовки. В обзоре приводятся работы, в которых исследуются шлакообразующие смеси (ШОС), влияющие на передаваемый от металла заготовки тепловой поток в кристаллизатор. При этом зарубежные авторы акцентируют внимание на «мягком» охлаждении кристаллизатора подбором ШОС. Совершенствование процесса охлаждения заготовки в кристаллизаторе в первую очередь направлено на улучшение качества поверхности сляба, повышение стойкости кристаллизатора и увеличение производительности машины, что, по мнению ряда авторов, можно добиться путем математического моделирования процесса. Вопрос охлаждения кристаллизатора напрямую зависит от конвективного движения жидкой стали в кристаллизаторе, что рассматривается в ряде работ зарубежных авторов. Использование принципа работы тепловых труб в системе охлаждения кристаллизатора машины, в частности, с использованием пористого материала с рабочей средой вода и воздух, а также вопрос испарения капель жидкости на наноструктурированных супергидрофильных поверхностях также привлекает внимание исследователей. Охлаждение кристаллизатора при скоростях разливки металла более 7 м/мин, сопровождающееся возрастанием плотности теплового потока, является актуальной задачей и рассматривается рядом авторов. Взаимосвязь основных параметров процесса определяется с использованием теории размерности Рэлея. В качестве основного параметра выбирается перепад температур в металле стенки кристаллизатора, зависящий от скорости разливки (времени нахождения формирующейся в кристаллизаторе заготовки), свойств разливаемого металла (теплоемкости, температуропроводности), теплопроводности стенки кристаллизатора, перепада температур в разливаемом металле. Показатели степени при критериях подобия определяются с учетом имеющихся экспериментальных данных зависимости плотности теплового потока от принятой скорости разливки стали, параметров стали. Полученное в работе соотношение $\Delta t_c / t_c$ (где Δt_c – средний перепад температур по толщине стенки, t_c – среднее значение температуры стенки) для кристаллизаторов с существующей и новой (запатентованной) системой охлаждения позволяет определить перепад температур в металле заготовки, который при двух сравниваемых системах охлаждения кристаллизатора составляет $\Delta t_{m1} = 450$ °С и $\Delta t_{m2} = 231$ °С, а соотношение $\Delta t_{m1} / \Delta t_{m2} = 1,95$ раза. Уменьшение перепада температур металла Δt_{m2} свидетельствует о более «мягком» охлаждении кристаллизатора с новой системой охлаждения.

Ключевые слова: моделирование, кристаллизатор, охлаждение, скорость разливки металла, толщина стенки.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-102-107

Вопрос формирования непрерывнолитых заготовок, в частности, в начале процесса разливки металла в кристаллизатор является актуальным в связи с увеличением производительности процесса (скорости разливки), расширением сортамента разливаемых сталей и необходимостью повышения их качества [1].

Использование аппарата физического моделирования процесса непрерывной разливки металла расширяет возможности математического моделирования процесса с целью прогнозирования качества получаемых заготовок [1].

Существующие в настоящее время работы, связанные с формированием заготовки в кристаллизаторе, затрагивают широкий спектр вопросов: гидродинамику расплава, свойства и поведение шлакообразующих смесей, теплопередачу, затвердевание заготовки, охлаждение металла и стенок кристаллизатора [2 – 12].

Вопросы охлаждения металла при непрерывной разливке и теплообмена в кристаллизаторе, в частности при скоростях разливки более 7 м/мин, рассматриваются в работах [2, 3].

Математическое моделирование процесса разливки стали на слябовой МНЛЗ, позволяющее прогнозировать качество заготовок, выполнено в работе [13]. Вдовин В.К. с соавторами [13] отмечают, что совершенствование процесса охлаждения заготовки в кристаллизаторе направлено на улучшение качества поверхности сляба, повышение стойкости кристаллизатора и увеличение производительности машины. Разработанные авторами [13] математическая модель и компьютерная программа позволяют анализировать затвердевание заготовки в слябовой машине и контролировать процесс линейной усадки заготовки по высоте кристаллизатора.

Влияние шлакообразующей смеси (ШОС) на теплофизические параметры при кристаллизации непрерывнолитой заготовки исследуется в работах [5,6,14].

Напао М. с соавторами и Капиа Н. [5, 6] отмечают, что одной из главных причин появления продольных трещин на поверхности непрерывнолитой заготовки является ее неравномерное затвердевание в кристал-

лизаторе. С целью предотвращения этого большое значение имеет мягкое охлаждение кристаллизующейся корочки под мениском на участке длиной несколько десятков миллиметров. По мнению авторов работ, этого можно добиться подбором ШОС. Проблеме обеспечения высокого качества поверхности непрерывнолитой заготовки, формируемой в кристаллизаторе в присутствии ШОС, уделяется внимание в работе [14], в которой отмечают, что протекание процесса затвердевания корочки непрерывнолитой заготовки сильно зависит от марки разливаемой стали. Поэтому для разных марок сталей необходимо использовать ШОС, обладающие различными свойствами, в частности, вязкостью, температурой начала затвердевания, степенью кристаллизации шлака.

В последние годы в области непрерывной разливки большое значение приобретает также задача оптимизации потока жидкой стали в кристаллизаторе, решаемая с использованием результатов моделирования [7 – 10].

Для рассмотрения вопроса моделирования охлаждения стенок кристаллизатора с использованием тепловых труб [15] представляют интерес исследования [11, 12].

В работе [11] приведены результаты численного исследования влияния теплопроводности пористого материала на теплообмен в трубе. В качестве рабочей среды используются воздух и вода. Пористость материала 90 %, а эффективная теплопроводность 0,1 – 200 Вт/(м·К). Приведенные результаты моделирования показывают взаимосвязь чисел Рейнольдса, Нуссельта среды и эффективной теплопроводности, их влияние на улучшение теплообмена.

В работе [12] приведены результаты экспериментов по определению температуры Лейденфроста для капель, испаряющихся на наноструктурированных супергидрофильных поверхностях. Наноструктуры оказывают глубокое влияние на точку Лейденфроста с увеличением ее значений.

Результаты физического моделирования затвердевания модельных материалов с использованием для их охлаждения тепловых труб, определение параметров процесса при разливке стальных заготовок представлены в работах [16 – 19].

Авторы работы [20] отмечают, что одной из главных причин появления продольных трещин на поверхности непрерывнолитой заготовки является ее неравномерное затвердевание в кристаллизаторе. В сталях с содержанием 0,08 – 0,16 % С усадка затвердевшей корочки и образование продольных трещин в значительной степени связаны с перитектической реакцией. Для предотвращения образования продольных трещин большое значение имеет «мягкое» охлаждение кристаллизующейся корочки.

Целью настоящей работы является определение параметров и основных критериев подобия процесса разливки стали в кристаллизатор, в частности, при изме-

нении системы его охлаждения [21], замене материала стенок, перепаде температур металла.

Работа направлена на улучшение условий разливки в кристаллизатор сталей с низким содержанием углерода (0,08 – 0,15 % С), заключающееся в предотвращении образования трещин при «мягком» (замедленном) охлаждении кристаллизующейся корочки толщиной не более 1 мм на участке длиной несколько десятков миллиметров под мениском. Этого можно добиться изменением конструкции кристаллизатора и способа его охлаждения.

К сталям с низким содержанием углерода можно отнести: сталь 12ХН (0,09 – 0,15 % С), сталь 15Х5 (0,15 % С), сталь 12Х8ВФ (0,08 – 0,15 % С), сталь Р6М5 (0,82 – 0,90 % С), сталь Р9 (0,85 – 0,95 % С) и другие.

Существующий способ [15] охлаждения кристаллизатора включает подачу холодной воды с температурой не более 30 °С в охлаждаемые каналы стенок или щелевой зазор. В новом способе [21] охлаждения кристаллизатора с двухконтурной системой охлаждения в щелевой зазор кристаллизатора подается горячая вода с температурой 150 – 180 °С, циркулирующая в первом контуре охлаждения, что позволяет организовать более эффективное «мягкое» охлаждение стенок [22].

На рисунке приведена схема охлаждения цилиндрического кристаллизатора 1 [21] перегретой водой, циркулирующей через щелевой канал 2 при помощи насоса 5 и охлаждаемой в теплообменнике 6. Предварительно перед разливкой жидкой стали в кристаллизатор 1 включается нагревательное устройство 17 с разогревом воды, находящейся в щелевом канале 2, а также стенки кристаллизатора до заданной температуры. После этого одновременно выключается нагревательное устройство 17, включается насос 5 циркуляции перегретой воды, заливается в кристаллизатор жидкий металл и включается подача холодной воды в теплообменник 6 через патрубок 11. Температура входящей и выходящей из кристаллизатора перегретой воды фиксируется по показаниям термомпар, соответственно, 13 и 14, подключенными в систему автоматического управления работой.

Конструктивное исполнение никелевого кристаллизатора высотой $H = 0,5$ м и толщиной стенки $\delta_c = 0,005$ м с результатами конструктивного расчета температуры стенки при диаметре получаемой цилиндрической заготовки $d = 0,15$ м описываются в работе [22]. Установлена температура рабочей поверхности стенки $t_1 = 297 - 303$ °С при температуре внутренней поверхности стенки $t_2 = 198 - 204$ °С и среднем значении плотности теплового потока $q = 1,5$ МВт/м².

Сравнительно большое количество параметров, влияющих на процесс формирования заготовки в кристаллизаторе машины, заставляет ограничиться наиболее из них важными и получаемыми критериями подобия.

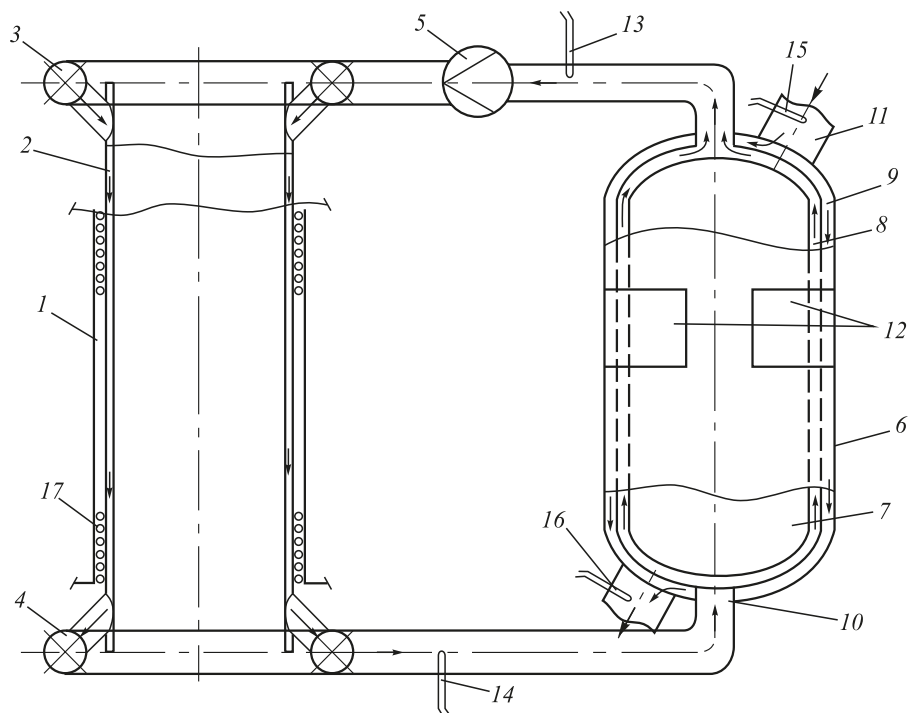


Схема охлаждения цилиндрического никелевого кристаллизатора перегретой водой:

1 – кристаллизатор; 2, 8, 9 – щелевой канал; 3, 4 – коллектор для подвода и отвода перегретой воды соответственно; 5 – водяной насос; 6 – теплообменник; 7 – полое тело; 10, 11 – патрубок для перегретой и холодной воды соответственно; 12 – люки; 13 – 16 – термодары; 17 – нагреватель электрический

Scheme of cooling of a cylindrical nickel mold with superheated water:

1 – mold; 2, 8, 9 – close clearance channel; 3, 4 – collector for superheated water supply and removal, respectively; 5 – water pump; 6 – heat exchanger; 7 – hollow body; 10, 11 – inlet pipe for superheated and cold water, respectively; 12 – doors; 13 – 16 – thermocouples; 17 – electric heater

В качестве основного метода определения критериев подобия процесса используется теория размерностей Рэлея [16, 23].

Выполним анализ размерностей на примере задачи о перепаде температур в металле стенки кристаллизатора.

Перепад температур в стенке Δt_c [K] кристаллизатора зависит от температуропроводности разливаемого металла a_m [м²/с], теплоемкости металла C_m [Дж/(кг·К)], скрытой теплоты фазового перехода металла r_m [Дж/кг], времени нахождения заготовки в кристаллизаторе τ_m [с], высоты стенки H_c [м], перепада температур металла заготовки Δt_m [K], теплопроводности материала стенки λ_c [Дж/(с·м·К)]. В результате имеем $n = 8$ различных размерных параметров, описывающих процесс.

В соответствии с алгебраическим методом Рэлея для определения безразмерных комплексов записывается выражение

$$\Delta t_c = A a_m^a \tau_m^b C_m^c r_m^d H_c^e \Delta t_m^f \lambda_c^g, \quad (1)$$

где A – коэффициент.

Перепишем выражение (1) в размерностях входящих величин

$$K = A \left(\frac{m^2}{c} \right)^a c^b \left(\frac{Дж}{кг \cdot К} \right)^c \left(\frac{Дж}{кг} \right)^d m^e K^f \left(\frac{Дж}{с \cdot м \cdot К} \right)^g. \quad (2)$$

Суммирование показателей степени при одинаковых основных единицах приводит к следующей системе из пяти уравнений:

$$K: 1 = -b - z + i; \quad (3)$$

$$Дж: 0 = b + \gamma + z; \quad (4)$$

$$c: 0 = -a + \delta - z; \quad (5)$$

$$m: 0 = 2a + \eta - z; \quad (6)$$

$$кг: 0 = -b - \gamma. \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (3) – (7) дает: $b = -\gamma$, $z = 0$, $a = \delta$, $\eta = -2a$ и $b = -\gamma$.

После подстановки в основное уравнение (1) получаем

$$\Delta t_c = A a_m^a \tau_m^a C_m^{-\gamma} r_m^{-\gamma} H_c^{-2a} \Delta t_m^{-\gamma} \lambda_c^0. \quad (8)$$

В выражении (8) выразим

$$\left(\frac{a_m \tau_m}{H_c^2} \right)^a = Fo^a, \quad \left(\frac{r_m}{C_m \Delta t_m} \right)^\gamma = K^\gamma,$$

где Fo – критерий Фурье; K – критерий Кутателадзе.

Подставив критерии Fo и K в выражение (8), получим уравнение

$$\Delta t_c = A Fo^a K^\gamma, \quad (9)$$

в котором разделим правую и левую части на коэффициент A . В правой части получается безразмерный комплекс. Тогда и в левой части отношение $\Delta t_c / A$ должно быть безразмерным параметром. Выразим $A = t_c$ и перепишем выражение (9) в следующем виде:

$$\frac{\Delta t_c}{t_c} = Fo^a K^\gamma, \quad (10)$$

где t_c – среднее значение температуры стенки кристаллизатора.

Для сравнения в работе [16] коэффициент $A = -1/H$.

Соотношение $\Delta t_c / t_c$ зависит от системы охлаждения и материала стенок кристаллизатора [15, 21, 22, 24]. Для существующей системы охлаждения кристаллизатора [24] при $\Delta t_c \leq 50$ и $t_c \leq 250$ °С соотношение $\Delta t_c / t_c \leq 0,2$.

Для новой разрабатываемой системы охлаждения стенок [21, 22] с температурой охлаждающей среды $t_b > 100$ °С, значением $\lambda_c \leq 70$ Вт/(м·К), $\Delta t_c \geq 100$ и $t_c \geq 250$ °С имеем $\Delta t_c / t_c \geq 0,4$.

Определим показатели степени (a , γ) при Fo и K для следующих параметров стали [24]: $a_m = 0,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $r_m = 287 \cdot 10^3$ Дж/кг, $C_m = 622$ Дж/(кг·К).

Принимаем $H_c = 1,2$ м, скорость разливки $v = 1,2$ м/мин. Получаем $\tau = H/v = 72$ с, $Fo = 25$.

При $q = 1,3 - 1,5$ МВт/м² [24] для существующей системы охлаждения (при $\Delta t_c / t_c \leq 0,2$) равенство по выражению (10) после подстановки исходных данных обеспечивается при $\Delta t_{m1} = 450$ °С и показателях степени $a = -0,5$, $\gamma = 1$. Выражение (10) записывается в виде

$$\frac{\Delta t_c}{t_c} = -Fo^{-0,5}, \text{ К.} \quad (11)$$

После подстановки в выражение (11) исходных данных получаем для новой разрабатываемой системы охлаждения стенок [21, 22] (при $\Delta t_c / t_c \geq 0,4$) значение $\Delta t_{m2} = 231$ °С. Соотношение $\Delta t_{m1} / \Delta t_{m2}$ составит 1,95 раза.

Новая система охлаждения кристаллизатора направлена в первую очередь не на увеличение скорости разливки сталей (сплавов) с низким содержанием углерода (0,08 – 0,15 % С), а на расширение сортамента их разливки непрерывным способом. Поэтому более высокие скорости разливки сталей ($v > 1,2$ м/мин) пока не рассматриваются.

Выводы. При плотности теплового потока в кристаллизаторе не более 1,3 – 1,5 МВт/м² получено соотношение безразмерных критериев подобия, включающих основные параметры процесса, которое позволяет определить при моделировании разливки сталей с низким содержанием углерода (0,08 – 0,15 %) перепад температур в металле, влияющий на качество формирующейся в кристаллизаторе заготовки. Соотношение перепадов

температур в металле с существующей системой охлаждения медного кристаллизатора (с температурой охлаждающей среды не более 30 °С) и новой системой охлаждения никелевого кристаллизатора (с температурой охлаждающей среды более 100 °С) достигает 1,95 раз. Полученные результаты моделирования будут использованы при разливке металлов в модели кристаллизаторов с существующей и новой системами охлаждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Design of the sleeve mold. Danieli Centro Met. 8 th European Continuous Casting Conference, 23 – 26 June 2014. Austria, Graz, 2014, pp. 60 – 62.
2. Kim S.Y., Choi Y.S., Hwang J.Y., Lee S.H. Mold Heat Transfer Behavior at Hing Casting Speed Over 7 m/minute in the CEM, POSCO // Iron Steel Technology. 2016. Vol. 13. No. 7. P. 47 – 56.
3. Raudensky M., Tseng A.A., Horsky J., Kominek J. Recent developments of water and mist spray cooling in continuous casting of steels // Metallurgical Research Technology. 2016. Vol. 113. No. 5. P. 509.
4. Singh V., Das S.K. Thermofluid Mathematical Modeling of Steel Slab Caster: Progress in 21 st. Century // ISIJ International. 2016. Vol. 56. No. 9. P. 1509 – 1518.
5. Hanao M., Kawamoto M., Yamanaka A. Influence of mold flux on initial solidification of hypo-peritectic steel in a continuous casting mold // Tetsu-to Hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. 2014. Vol. 100. No. 4. P. 581 – 590.
6. Kania H., Nowacki K., Lis T. Impact of the density of the mould powder on thickness of the layer of liquid slag in the continuous caster mould // Metalurgija. 2013. Vol. 52. No. 2. P. 204 – 206.
7. Furumai K., Miki Y. Molten Steel Flow Control Technology for Decreasing Slab Defects // JFE Giho. 2016. No. 38. P. 36 – 41.
8. Kratzsch Ch., Timmel K., Eckert S., Schwarze R. URANS Simulation of Continuous Casting Mold Flow: Assessment of Revised Turbulence Models // Steel Research International. 2015. Vol. 87. No. 4. P. 400 – 410.
9. Sengupta J., Yavuz M. Metin. Nozzle design for ArcelorMittal Dofasco's no. 1 continuous caster for minimizing sliver defects // Iron and Steel Technology. 2011. No. 7. P. 39 – 47.
10. Lee P.B., Ramirez-Lopez P.E., Mills K.C. etc. Review: the “butterfly effect” in continuous casting // Ironmaking and Steelmaking. 2012. Vol. 39. No. 4. P. 244 – 253.
11. Tingzhen Ming, Yong Tao. Улучшение теплообмена в трубе, заполненной пористым материалом: 15-я Международная конференция по теплопередаче (IYNC-15), 10-15 августа 2014 г. Япония, Киото. С. 89 – 91.
12. Хорхе Падилья, Ван П. Кэри. Экспериментальное исследование фазового перехода на наноструктурированных супергидрофильных поверхностях: 15-я Международная конференция по теплопередаче (IYNC-15), 10 – 15 августа, 2014 г. Япония, Киото. С. 102 – 104.
13. Вдовин К.Н., Ларина Т.П., Ячиков И.М., Позин А.Е. Математическое моделирование затвердевания слэба в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 2. С. 38 – 41.
14. Макуров С.Л., Смирнов А.Н., Епишев М.В., Шлемко С.В. Исследование и оптимизация технологических свойств шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали с повышенной скоростью // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 12. С. 13 – 16.
15. Стулов В.В. Физическое моделирование охлаждения высокотемпературной техники (в металлургии). – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2012. – 142 с.
16. Стулов В.В. Анализ подобия физических процессов при моделировании охлаждения кристаллизаторов машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 1. С. 80 – 83.

17. Стулов В.В. Моделирование охлаждения стали в кристаллизаторах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 1. С. 73 – 77.
18. Стулов В.В. Моделирование теплообмена при охлаждении кристаллизаторов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 4. С. 78 – 84.
19. Стулов В.В., Одинокое В.И., Оглоблин Г.В. и др. Физическое моделирование процесса получения непрерывнолитой деформированной стальной заготовки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 8. С. 41 – 46.
20. Hanao M., Kawamoto M., Yamanaka A. Influence of mold flux on initial solidification of hypo – peritectic steel in a continuous casting mold // *Tetsu-to-Hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 2014. Vol. 100. No. 4. P. 581 – 590.
21. Пат. № 2601713 РФ. Способ охлаждения кристаллизатора / В.В. Стулов // БИ 2016. № 10. С. 5.
22. Stulov V.V. Cooling of a Mold at Preforming Cylindrical Continuous Cast Steel Billets // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017. Vol. 46. No. 1. P. 57 – 62.
23. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 254 с.
24. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л.В. Буланов, Л.Г. Корзунин, Е.П. Парфенов и др. Под общей ред. Г.А. Шалаева. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рек-ламы, 2003. – 320 с.

Поступила 21 июля 2017 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. No. 2, pp. 102–107.

ON MODELING PROCESSES IN CONTINUOUS CASTING MOLD

V.V. Stulov

Bauman Moscow State Technical University (Bauman MSTU), Moscow, Russia

Abstract. The work focuses on modeling of processes occurring in the mold with a new patented cooling system in continuous casting machine, in particular, at temperature drop in metal of the stock and in the wall along the height of the mold, on which quality of the resulting billet depends. In the review, works are referred in which slag-forming mixtures (SFM) are investigated that affect heat flow from stock metal to the mold. Foreign authors put emphasis on “soft” cooling of the mold by selection of the SFM. Improvement in process of stock metal cooling in the mold is primarily aimed at improving quality of slab surface, increasing resistance of the mold and increasing productivity of machine, which, according to several authors, can be achieved by mathematical modeling of the process. The problem of mold cooling depends directly on convective motion of liquid steel in the mold, which is considered in a number of works of foreign authors. Use of the principle of heat pipes operation in cooling system of the machine mold, in particular, using porous material with water and air operating medium, as well as the question of liquid droplets evaporation on nanostructured super-hydrophilic surfaces, draws attention of researchers. Cooling of the mold at metal casting speeds of more than 7 m/min, accompanied by an increase in heat flux density, is an urgent task and is considered by a number of authors. Interrelation of the main parameters of the process is determined using Rayleigh dimension theory. Temperature gradient in metal of the mold wall is determined as the main parameter, depending on casting speed (time of stock metal forming in the mold), properties of poured metal (heat capacity, heat conductivity), thermal conductivity of the mold wall, and temperature drop in molded metal. Exponents for similarity criteria are determined taking into account available experimental data on dependence of heat flux density on accepted speed of steel casting, steel parameters. The ratio $\Delta t_c / t_c$ (where Δt_c is an average temperature difference across the wall thickness, t_c is an average value of a wall temperature) for the mold with the existing and the new (patented) cooling system allows us to determine temperature difference in metal of the billet, which in two compared cooling systems of the mold comprises $\Delta t_{m1} = 450$ °C and $\Delta t_{m2} = 231$ °C, and the ratio $-\Delta t_{m1} / \Delta t_{m2}$ is 1,95 times. Decrease in metal temperature drop Δt_{m2} indicates more “soft” cooling of the mold with a new cooling system.

Keywords: modeling, mold, cooling, metal casting speed, wall thickness.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-102-107

REFERENCES

1. Design of the sleeve mold. Danieli Centro Met. *8 th European Continuous Casting Conference, 23 – 26 June 2014. Austria, Graz*, 2014, pp. 60–62.
2. Kim S.Y., Choi Y.S., Hwang J.Y., Lee S.H. Mold heat transfer behavior at high casting speed over 7 m/minute in the CEM, POSCO. *Iron Steel Technology*. 2016, vol. 13, no. 7, pp. 47–56.
3. Raudensky M., Tseng A.A., Horsky J., Kominek J. Recent developments of water and mist spray cooling in continuous casting of steels. *Metallurgical Research Technology*. 2016, vol. 113, no. 5, pp. 509.
4. Singh V., Das S.K. Thermofluid mathematical modeling of steel slab caster: progress in 21 st. century. *ISIJ International*. 2016, vol. 56, no. 9, pp. 1509–1518.
5. Hanao M., Kawamoto M., Yamanaka A. Influence of mold flux on initial solidification of hypo-peritectic steel in a continuous casting mold. *Tetsu-to Hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 2014, vol. 100, no. 4, pp. 581–590.
6. Kania H., Nowacki K., Lis T. Impact of the density of the mould powder on thickness of the layer of liquid slag in the continuous caster mould. *Metallurgija*. 2013, vol. 52, no. 2, pp. 204–206.
7. Furumai K., Miki Y. Molten steel flow control technology for decreasing slab defects. *JFE Giho*. 2016, no. 38, pp. 36–41.
8. Kratzsch Ch., Timmel K., Eckert S., Schwarze R. URANS simulation of continuous casting mold flow: Assessment of revised turbulence models. *Steel Research International*. 2015, vol. 87, no. 4, pp. 400–410.
9. Sengupta J., Yavuz M. Metin. Nozzle design for ArcelorMittal Dofasco’s no. 1 continuous caster for minimizing sliver defects. *Iron and Steel Technology*. 2011, no. 7, pp. 39–47.
10. Lee P.B., Ramirez-Lopez P.E., Mills K.C. etc. Review: the “butterfly effect” in continuous casting. *Ironmaking and Steelmaking*. 2012, vol. 39, no. 4, pp. 244–253.
11. Tingzhen Ming, Yong Tao. Improvement of heat transfer in a pipe filled with porous material. In: *The 15th International Conference on Heat Transfer (IYNC-15). 10–15 August, 2014. Japan, Kyoto*, 2014, pp. 89–91.
12. Jorge Padilla, Van P. Carey. Experimental study of phase transition on nanostructured superhydrophilic surfaces. In: *15th International Conference on Heat Transfer (IYNC-15). 10–15 August, 2014. Japan, Kyoto*, 2014, pp. 102–104.
13. Vdovin K.N., Larina T.P., Yachikov I.M., Pozin A.E. Mathematical modeling of slab solidification in a continuous casting mold. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 2, pp. 38–41. (In Russ.).

14. Makurov S.L., Smirnov A.N., Epishev M.V., Shlemko S.V. The study and optimization of technological properties of slag-forming mixtures for steel high-speed continuous casting. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 12, pp. 13–16. (In Russ.).
15. Stulov V.V. *Fizicheskoe modelirovanie okhlazhdeniya vysokotemperaturnoi tekhniki (v metallurgii)* [Physical modeling of cooling of high-temperature equipment (in metallurgy)]. Komsomolsk-on-Amur: IMiM DVO RAN, 2012, 142 p. (In Russ.).
16. Stulov V.V. Analysis of similarity of physical processes during simulation of cooling of machine crystallizers. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2012, vol. 41, no. 1, pp. 6
17. Stulov V.V. Simulation of steel cooling in crystallization tanks. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2011, vol. 40, no. 1, pp. 59–62.
18. Stulov V.V. Simulation of heat transfer on cooling molds. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2011, vol. 40, no. 4, pp. 366–371.
19. Stulov V.V., Odinkov V.I., Ogloblin G.V. etc. Physical simulation of continuously cast deformed steel billet production process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 8, pp. 41–46. (In Russ.).
20. Hanao M., Kawamoto M., Yamanaka A. Influence of mold flux on initial solidification of hypo – peritectic steel in a continuous casting mold. *Tetsu-to-Hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 2014, vol. 100, no. 4, pp. 581–590.
21. Stulov V.V. *Sposob okhlazhdeniya kristallizatora* [Method of the mold cooling]. Patent no. 2601713 RF. *Byulleten' izobretenii*. 2016, no. 10. (In Russ.).
22. Stulov V.V. Cooling of a mold at preforming cylindrical continuous cast steel billets. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017, vol. 46, no. 1, pp. 57–62.
23. Migai V.K. *Modelirovanie teploobmennogo energeticheskogo oborudovaniya* [Modeling of heat-exchange of power equipment]. Leningrad: Energoatomizdat, 1987, 254 p. (In Russ.).
24. Bulanov L.V., Korzunin L.G., Parfenov E.P. etc. *Mashiny nepre-ryvno lit'ya zagotovok. Teoriya i raschet* [Machines for continuous casting of blanks. Theory and calculation]. Shalaev G.A. ed. Ekaterinburg: Ural'skii tsentr PR i reklamy, 2003, 320 p. (In Russ.).

Information about the author:

V.V. Stulov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of "Technologies and Equipment of Rolling" (stuvv@inbox.ru)

Received July 21, 2017