

С.В. Зарубин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОЙ СТАЛИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Рассмотрена математическая модель магнитогидродинамических процессов в жидкой стали при электромагнитном перемешивании в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок. Приведены примеры расчетов для круглых и сортовых заготовок.

E-mail: sevlzaru@mail.ru

Ключевые слова: непрерывное литье, электромагнитное перемешивание жидкой стали, кристаллизатор, магнитогидродинамические процессы.

В настоящее время в мировой практике электромагнитное перемешивание (ЭМП) жидкого металла на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) стало неотъемлемой частью прогрессивной технологии улучшения качества непрерывно-литых заготовок. В зависимости от требований к качеству непрерывно-литого металла электромагнитные перемешивающие устройства устанавливаются в кристаллизаторе, зоне вторичного охлаждения и зоне окончания затвердевания. Наибольшее воздействие на качество заготовок сортовых и блюмовых МНЛЗ оказывает устройство ЭМП, размещенное в кристаллизаторе.

Электромагнитное перемешивание предназначено для создания с помощью электромагнитных сил перемешивающих потоков в жидкой фазе заготовки. При ЭМП имеют место следующие физические процессы: интенсификация тепло- и массообмена в объеме затвердевающего металла; выравнивание градиента температур и химического состава внутри заготовки; интенсификация теплообмена с окружающей средой; разрушение фронта кристаллизации, перенос неметаллических включений и других частиц из объема расплава к поверхности раздела металл — шлак; ускорение столкновения включений, их рост и повышение скорости удаления из металла; ликвидация застойных зон.

Механизм ЭМП является результатом взаимодействия электродинамических, магнитогидродинамических (МГД) и металлургических факторов. Несмотря на сложность этих факторов в настоящее время существует возможность математического описания особенностей процесса. Для математического моделирования процесса ЭМП

необходимо построить алгоритмы расчета вращающегося магнитного поля в ЭМП-индукторе и турбулентного течения жидкого сплава под действием электромагнитных сил. Учет взаимного влияния магнитного поля, полей температур и скоростей потоков жидкого металла в затвердевающей заготовке [1, 2] приводит к значительным затратам вычислительных ресурсов, что существенно затрудняет расчетное определение оптимальных параметров ЭМП-устройства. Представляется оправданным при анализе возможности эффективного перемещения жидкого ядра слитка ввести некоторые упрощения в методику расчета. Отметим, что влияние жидкого металла на созданное электромагнитным устройством поле незначительно (магнитное число Рейнольдса $Re_\mu \approx 0,2$ существенно меньше единицы). Кроме того, основное влияние на рост толщины затвердевающей оболочки слитка оказывает теплообмен на поверхности слитка и высвобождающаяся теплота фазового перехода, а не теплообмен в жидком ядре слитка. В результате удалось значительно упростить задачу, разделив ее на несколько этапов, первым из которых является расчет электромагнитного поля [3, 4], вторым — расчет затвердевания заготовки и определение геометрии расчетной области для гидродинамической задачи, третьим — собственно гидродинамический расчет течения жидкого металла в зоне ЭМП [1].

В статоре магнитной системы ЭМП создается вращающееся магнитное поле, индуцирующее вихревые токи в жидкой стали, направление которых зависит от направлений вектора магнитной индукции и скорости перемещения расплава. В результате взаимодействия магнитного поля и вихревых токов расплава возникает электромагнитная сила, которая, будучи приложенной к элементарным объемам металла, приводит их во вращательное движение [5].

Численная методика расчета электромагнитного поля в поперечном сечении индуктора для неподвижной среды основана на решении уравнения Гельмгольца в двумерной постановке для комплексного векторного магнитного потенциала \mathbf{A} [6]:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - j\omega\mu_r\mu_0\gamma \mathbf{A} = -\mu_r\mu_0 \mathbf{J}_{\text{ст}}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота питающего тока; μ_r — относительная магнитная проницаемость среды; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; γ — удельная электропроводность среды; $\mathbf{J}_{\text{ст}}$ — плотность стороннего тока.

Уравнение Гельмгольца описывает квазистационарный процесс, в котором комплексная функция векторного магнитного потенциала формально не зависит от времени. Физически временную зависимость учитывают в фазовых соотношениях электромагнитных величин.

Зная распределение векторного магнитного потенциала в зоне ЭМП и учитывая, что движущийся расплавленный металл практически не влияет на характеристики электромагнитного поля, достаточно легко можно вычислить поле сил, действующих на расплав. Вихревые токи \mathbf{J} в движущемся расплавленном металле, необходимые для вычисления электромагнитных сил, определяют по уравнению

$$\mathbf{J} = \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}), \quad (2)$$

где \mathbf{E} — ЭДС, наведенная полем индуктора в расплаве,

$$\mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A}; \quad (3)$$

\mathbf{V} — вектор скорости движения расплава; \mathbf{B} — магнитная индукция в поперечном сечении индуктора (необходимо учитывать, что в двумерной постановке для плоскости xy , перпендикулярной оси заготовки, вектор магнитной индукции $\mathbf{B} = \{B_x, B_y, 0\}^T$ и векторный потенциал $\mathbf{A} = \{0, 0, A\}^T$; $B_x = \partial A / \partial y$, $B_y = -\partial A / \partial x$; x и y — горизонтальные оси декартовой системы координат; z — вертикальная ось, совпадающая с направлением вытягивания заготовки).

Средние (осредненные по времени) объемные электромагнитные силы рассчитывают следующим образом:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{J} \times \mathbf{B}^*), \quad (4)$$

где звездочка указывает на то, что данная величина является сопряженной комплексной величиной по отношению к величине без звездочки.

Следующим этапом математического моделирования МГД-процессов в жидком ядре слитка является построение математической модели движения расплава под действием электромагнитных сил. В данной работе для описания структуры турбулентного течения в жидком ядре слитка используются концепция коэффициента турбулентной вязкости и осредненные уравнения неразрывности и Навье — Стокса, которые позволяют вычислить среднее давление p и компоненты вектора средней скорости $\mathbf{V} = \{v_x, v_y, v_z\}^T$. При таком подходе с вычислительной точки зрения турбулентное течение эквивалентно ламинарному течению с довольно сложной зависимостью для коэффициента вязкости. В результате осредненные по времени уравнения для турбулентного течения имеют тот же вид, что и уравнения для ламинарного течения, с той лишь разницей, что коэффициент молекулярного обмена (коэффициент вязкости) заменяют на эффективный (т. е. молекулярный плюс турбулентный):

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t. \quad (5)$$

Выделяют несколько подходов к определению турбулентной вязкости. Одним из наиболее универсальных подходов является метод замыкания мелкомасштабных движений. Наилучшие возможности для описания сложных пространственных течений предоставляет класс методов замыкания с помощью поля средней кинетической энергии турбулентности. В данной работе турбулентную вязкость находят из двухпараметрической k — ε -модели турбулентности (уравнений турбулентного переноса для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее вязкой диссипации ε). Определяющие уравнения записаны в трехмерной нестационарной форме, позволяющей реализовать метод одновременного расчета полей давления и компонент вектора скорости [7]. Основные уравнения модели включают:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0; \quad (6)$$

уравнения Навье — Стокса

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho(\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} = \nabla(\mu_{ef} \mathbf{D}) - \nabla p + \mathbf{F}, \quad (7)$$

где $\mathbf{D} = (\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T)$;

уравнение переноса кинетической энергии турбулентности

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\mathbf{V} \nabla) k = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \Phi - \rho \varepsilon; \quad (8)$$

уравнение переноса скорости диссипации кинетической энергии

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{V} \nabla) \varepsilon = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (9)$$

где $\Phi = \mu_t D_{ij} \partial v_i / \partial x_j$;

уравнение переноса тепловой энергии

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} + c_p \rho(\mathbf{V} \nabla) T = \nabla [(\lambda + \lambda_t) \nabla T], \quad (10)$$

где c_p — теплоемкость; λ — коэффициент молекулярной теплопроводности жидкой стали; $\lambda_t = \mu_t c_p / \sigma_t$ — параметр «турбулентной» теплопроводности.

Для замыкания системы уравнений применяется «связка» Прандтля — Колмогорова

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}, \quad (11)$$

основанная на локальной аналогии с теорией однородной и изотропной турбулентности. В уравнения (6)—(11) входят ρ — плотность; t — время; \mathbf{F} — вектор электромагнитных сил; $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k$ и σ_ε — стандартные параметры k — ε -модели турбулентности. Вблизи твердых поверхностей граничные условия были заданы вне вязкого подслоя в виде закона стенки [7]. На границе затвердевшей оболочки слитка скорость потока жидкого металла принята равной скорости движения затвердевающего слитка.

Для численного решения системы уравнений, описывающих турбулентное движение вязкой несжимаемой жидкости, применен метод конечных элементов. Поскольку задача является нелинейной, основные уравнения объединены вместе с использованием специальной итерационной процедуры. Одновременно с уточнением решения гидродинамической задачи на каждой итерации проведена корректировка электромагнитных сил по уравнениям (2)—(4), которые зависят от текущих значений скоростей жидкого металла.

Приведем примеры численного анализа МГД-процессов в кристаллизаторах МНЛЗ. На рис. 1 показана упрощенная схема ЭМП-кристаллизатора для литья круглых заготовок. Анализ ЭМП проведен для расчетной области, образованной затвердевшей оболочкой слитка и прямооточным погружным стаканом. Высота расчетной области 2 м. Центральная плоскость индуктора расположена на расстоянии 400 мм от мениска (поверхности) жидкого металла в кристаллизаторе. Для слитков $\varnothing 360$ мм проведена серия расчетов для ЭМП в кристаллизаторе для диапазона частот питающего тока 1,5...5 Гц, что позволило определить оптимальные частоты с точки зрения достижения максимальных скоростей металла.

На рис. 2, *a* показано поле скоростей потоков жидкой стали в кристаллизаторе с прямооточным стаканом без

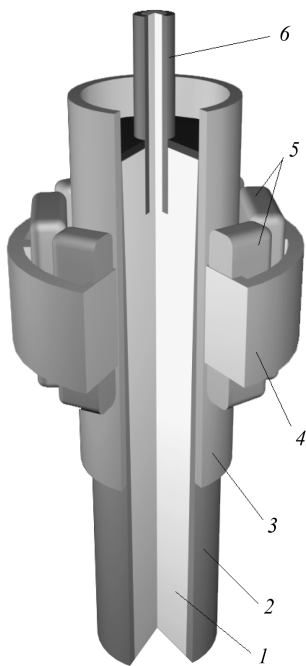


Рис. 1. Упрощенная схема ЭМП-кристаллизатора для литья круглых заготовок:

1 — жидкая сталь; 2 — затвердевшая оболочка заготовки; 3 — гильза кристаллизатора; 4 — магнитопровод с сердечниками; 5 — катушки; 6 — погружной прямооточный стакан

ЭМП. Следует обратить внимание на достаточно резкое разделение объемов движущегося металла — центральная, глубоко проникающая струя более горячего жидкого металла, и периферийные (более холодные) течения, направленные вверх к мениску. В результате получается неоднородное температурное поле в жидком ядре слитка, медленно снимающийся перегрев жидкой стали.

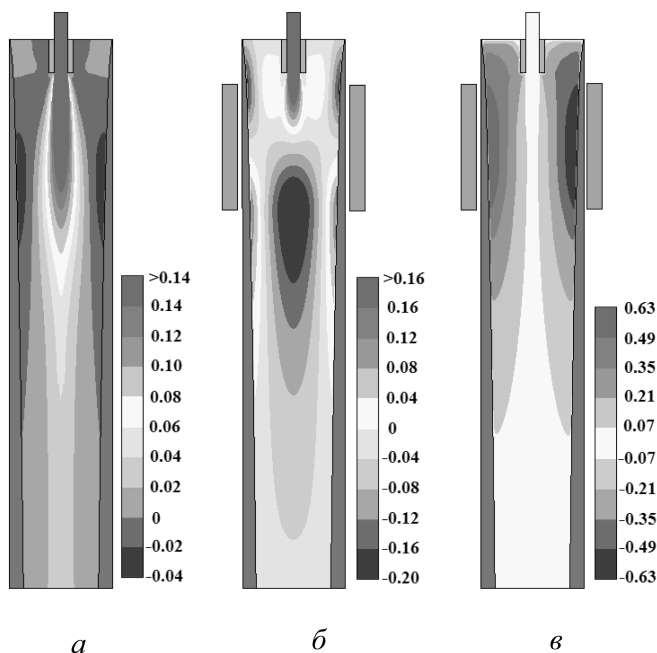


Рис. 2. Поле скоростей, м/с, в диаметральной плоскости круглой заготовки $\varnothing 360$ мм (прямоугольниками схематически показано расположение катушек индуктора):

a — поле вертикальных скоростей при разливке без ЭМП (положительные значения скоростей при движении металла вниз); *б* — поле вертикальных скоростей при разливке с ЭМП (положительные значения скоростей при движении металла вниз); *в* — поле горизонтальных скоростей при разливке с ЭМП (показаны скорости при движении металла перпендикулярно плоскости рисунка)

Данные о полях скоростей в продольном диаметральной сечении (вдоль вертикальной технологической оси) при работе ЭМП-устройства (200 А, 2 Гц) приведены на рис. 2, *б* и 2, *в*. При ЭМП происходит полное «гашение» струи жидкого металла из погружного стакана в центральной плоскости индуктора. Заметное вращательное движение металла наблюдается на глубине до 1,5 м от мениска. Несомненно, что данное распределение потоков жидкого металла приведет к выравниванию температурного поля в жидком ядре слитка и быстрому снятию перегрева.

Информация о поле скоростей потоков жидкого металла дает возможность получать распределение температуры непосредственно в незатвердевшей части заготовки. На рис. 3 показаны результаты расчета температурных полей в жидком ядре слитка с использованием полученных ранее полей скоростей жидкой фазы и турбулентной вязкости. Расчеты приведены для перегрева поступающей в кристаллизатор жидкой стали на 30 °С (диапазон значений температуры для жидкой стали 1450...1480 °С). На рис. 3 видно, что при ЭМП происходит интенсификация теплопереноса в жидком ядре слитка. Более горячий металл, поступающий из разливочного стакана, отбрасывается к более холодной затвердевшей оболочке слитка. При этом ввиду

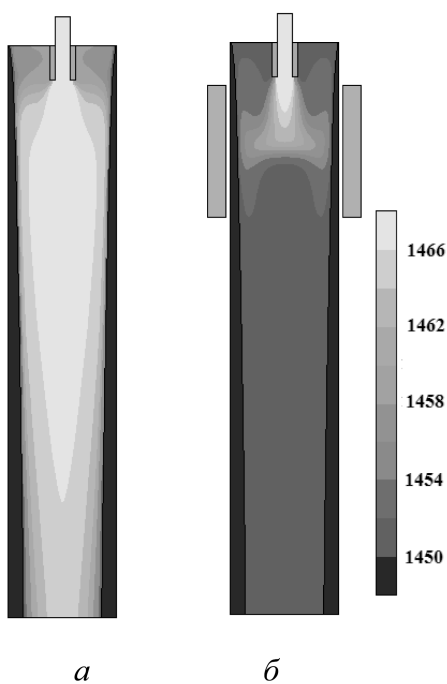


Рис. 3. Температурные поля, °С, в жидком ядре слитка Ø360 мм при разливке без ЭМП (а) и с ЭМП (б)

вращательного движения длина пути потоков жидкого металла вдоль фронта кристаллизации резко увеличивается, в результате чего плотность теплового потока от жидкой стали к оболочке слитка в зоне индуктора ЭМП возрастает. Вследствие этого процесса почти полностью снимается перегрев жидкой стали на выходе слитка из кристаллизатора.

В качестве другого примера использования разработанной расчетной модели может служить анализ ЭМП в кристаллизаторе для получения сортовых квадратных заготовок. В большинстве случаев для получения более совершенной структуры слитка в основном объеме кристаллизующейся массы необходимо лишь интенсивное ее перемешивание, однако в зоне мениска требования к качеству перемешивания значительно многообразнее [8].

Интенсивность перемешивания в зоне мениска имеет ограничения. Чрезмерная интенсивность перемешивания может привести к образованию поверхностных дефектов, вызванных неустойчивостью мениска (плены, заливины, ужимины и т. п.). Особенно это важно при высокоскоростном литье сортовых заготовок: ввиду интенсивного подвода металла проблемы с сохранением плоской формы мениска

часто возникают и без применения ЭМП. Поэтому независимое и гибкое управление перемешиванием потоков в менисковой зоне кристаллизатора и кристаллизующейся массы является важным фактором, влияющим на эффективность ЭМП-устройства [9]. Предложенный в работах [8, 9] перемешиватель обеспечивает независимое регулирование перемешивания в различных участках кристаллизатора. Это достигается путем объединения в одну систему ЭМП двух комплектов индукционных катушек, один из которых располагают в нижней части кристаллизатора, другой — в зоне мениска (рис. 4). Индукционные катушки, питание к которым поступает от отдельных источников тока, образуют независимые магнитные поля, регулирование их силы, частоты и направления вращения осуществляется также независимо.

Все расчетные варианты проведены для разлива под уровень в сортовой кристаллизатор размером 154×154 мм с использованием прямооточного разливочного стакана. Искривление поверхности зеркала металла в кристаллизаторе имеет большое значение для обеспечения высокого качества продукции, поскольку при слишком сильном движении шлак (если применяется защита мениска) может быть затянут в металл.

В расчетах статическое давление на мениске можно пересчитать на высоту волны по формуле $h = p/\rho g$. Этот простой метод применялся в ряде исследований (в частности, в работе [2]) и показал неплохое соответствие экспериментальным замерам. На рис. 5 приведены формы поверхности «возмущенного» мениска для некоторых основных вариантов расчета (в центре видно «плато» в виде круга, которое соответствует нулевой отметке для области, занимаемой погружным стаканом; Δ — максимальная высота «волны» на мениске, мм). Наиболее «спокойный» мениск обеспечивают при использовании верхнего индуктора в режиме ЭМ-тормоза. При возбуждении двух фаз постоянным током и создании четырехполюсной системы в

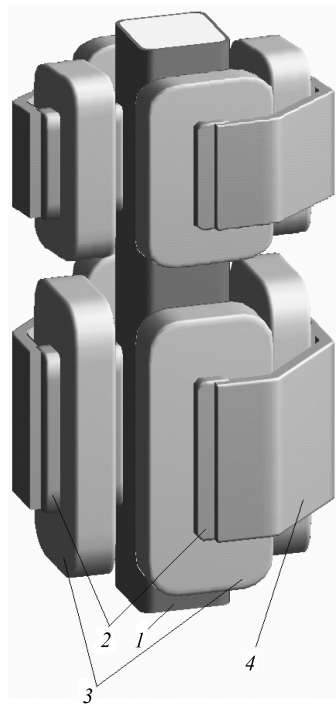
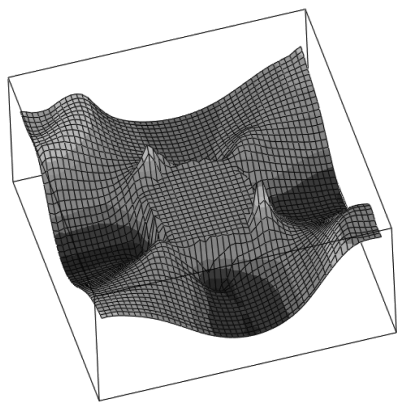
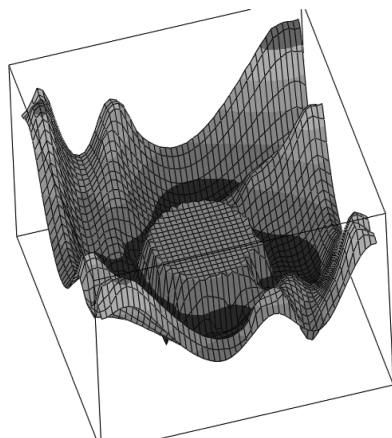


Рис. 4. Упрощенная схема двухкатушечного ЭМП-кристаллизатора:

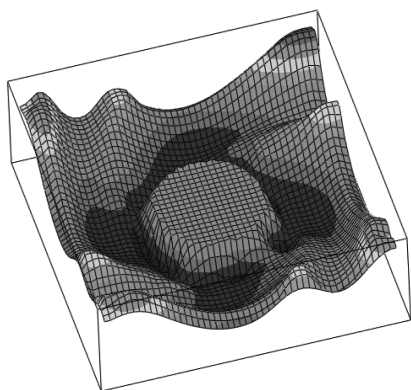
1 — кристаллизатор с жидкой сталью; 2 — сердечники; 3 — катушки; 4 — магнитопровод (ближайшая четверть магнитопровода для наглядности вырезана)



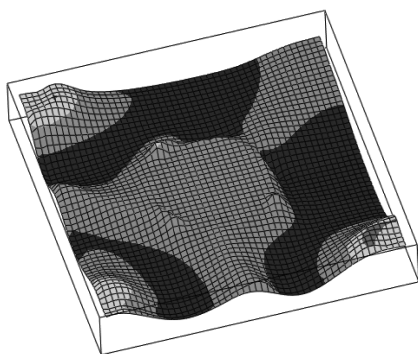
ЭМП отсутствует,
 $\Delta = 1,2$ мм



ЭМП: верхний и нижний индуктор
200 А, 5 Гц, противоположное враще-
ние, $\Delta = 3,1$ мм



ЭМП 5 Гц: верхний индуктор 100 А,
нижний индуктор 200 А, противопо-
ложное вращение, $\Delta = 0,9$ мм



ЭМП: нижний индуктор 200 А, 5 Гц,
верхний индуктор в режиме ЭМ-
тормоза, $\Delta = 0,25$ мм

Рис. 5. Формы поверхности «возмущенного» мениска

верхнем индукторе можно добиться практически плоского мениска и в 2—3 раза снизить скорость потоков жидкого металла в менисковой зоне по сравнению с вариантами активного перемешивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физико-математическое моделирование процесса ЭМП жидкого металла в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ / В.Г. Грачев, Б.А. Спивак, Л.И. Кузьмина, С.В. Зарубин // Тяжелое машиностроение. – 2002. – № 5. – С. 2–6.
2. Цифровое моделирование процессов течения и затвердевания металла в МНЛЗ для литья тонких слябов / К. Олер, Х.-Ю. Оденталь, Г. Пфайфер, И. Леманович // Черные металлы. – 2002. – № 8. – С. 22–30.

3. Расчет объемных сил, действующих на жидкую фазу непрерывного слитка при электромагнитном перемешивании / В.Г. Грачев, Л.И. Кузьмина, Г.С. Тамоян, В.Г. Фисенко // Тезисы докл. IV Междунар. конф. «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Россия, Клязьма, 2000. – С. 346–347.
4. Математическая модель электромагнитного перемешивания жидкой фазы слитка при непрерывном литье заготовок / М.В. Немцов, Г.П. Митин, В.Г. Грачев, Л.И. Кузьмина // Техника машиностроения. – 2001. – № 2.
5. Самойлович Ю.А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
6. Демирчан К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. – М.: Высш. шк., 1986. – 240 с.
7. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачев А.Е. Методологические аспекты численного моделирования динамики вихревых структур и теплообмена в вязких турбулентных течениях // Изв. АН. Энергетика. – 1996. – № 4. – С. 133–141.
8. Бейтельман Л. Управление процессом перемешивания в кристаллизаторах сортовых и блюмовых МНЛЗ // Тр. Шестого конгресса сталеплавильщиков. – М., 2001. – С. 519–524.
9. Бейтельман Л. Улучшение качества сортовых заготовок путем электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе // Сталь. – 1997. – № 4. – С. 21–24.

Статья поступила в редакцию 28.09.2012