

УДК 621.746.62:669.189

Федосов А.В.¹, Казачков Е.А.²

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ
ОТ ПОВЕРХНОСТИ СЛЯБОВОЙ ЗАГОТОВКИ МНЛЗ
В ЗОНЕ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Рассмотрены особенности распределения плотности орошения на поверхности слэбовой заготовки в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ. Разработана математическая модель определения локальных коэффициентов теплоотдачи от поверхности слэба. Рассмотрены возможные пути повышения равномерности теплоотвода от поверхности непрерывнолитого слитка в зоне вторичного охлаждения с целью уменьшения вероятности трещинообразования.

Для многих отечественных заводов, на сегодняшний день, остается нерешенной проблема образования поверхностных дефектов непрерывнолитых заготовок особенно в условиях постоянно расширяющегося марочного сортамента стали и повышения требований к качеству продукции. В силу различной склонности некоторых марок стали к трещинообразованию переход в разливке стали от одной марки к другой, как правило, требует изменения режима охлаждения. Системы форсуночного водовоздушного охлаждения позволяют производить регулирование условий охлаждения в широком диапазоне, что необходимо при осуществлении разливки стали различных марок и типоразмеров. Качество непрерывнолитой заготовки во многом зависит от условий ее охлаждения в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ, при этом развитие внутренних и поверхностных дефектов определяется величиной напряжений, возникающих в затвердевающей заготовке. Причиной возникновения термических напряжений в затвердевающей корочке является неравномерная скорость охлаждения по периметру заготовки. Поэтому для ограничения развития трещин в литых заготовках вторичное охлаждение должно обеспечивать плавное понижение температуры поверхности с момента выхода заготовки из кристаллизатора вплоть до полного затвердевания [1, 2].

Добиться равномерности отвода тепла от поверхности заготовки очень трудно из-за отличающихся условий охлаждения заготовки на разных участках МНЛЗ. Между роликами выделяют несколько зон, отличающихся по механизму теплоотвода: зона орошения водой, натекания струи, участок контактного охлаждения роликом и зона свободной конвекции и излучения на воздухе. О расположении этих зон на поверхности слитка можно судить исходя из рис. 1. Охлаждающая жидкость подается на поверхность при помощи форсунок установленных в зазоре между роликами. Наибольший теплоотвод осуществляется в зоне действия факела форсунки. Характер распределения потока жидкости от форсунки определяется: расположением форсунки относительно охлаждаемой поверхности, углами раскрытия струи, давлением истекающей среды и физическими параметрами среды [3 – 5].

Целью данной работы является анализ основных факторов, влияющих на распределение коэффициента теплоотдачи от поверхности слитка. Построение математической модели определения локальных коэффициентов теплоотдачи. Анализ условий охлаждения поверхности слэба при изменении основных технологических факторов зоны вторичного охлаждения.

Охлаждающая вода распыляется струями воздуха на мельчайшие частицы размером <100 мкм. Образующееся при этом облако водовоздушной эмульсии переносится с большой скоростью к поверхности слитка, что повышает равномерность и эффективность охлаждения. Результаты многих исследований показали существенную зависимость коэффициента теплоотдачи от гидродинамической картины на поверхности слитка [1, 4].

¹ПГТУ, аспирант

²ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

Максимальное значение коэффициента теплоотдачи наблюдается в центре факела. За пределами действия факела форсунки в районе стекающей воды из-за образования буферной паровой или паровоздушной прослойки происходит снижение коэффициента теплоотдачи до значений $150 - 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [1, 3, 6, 7]. Колебание значений коэффициента теплоотдачи в этой зоне также незначительно.

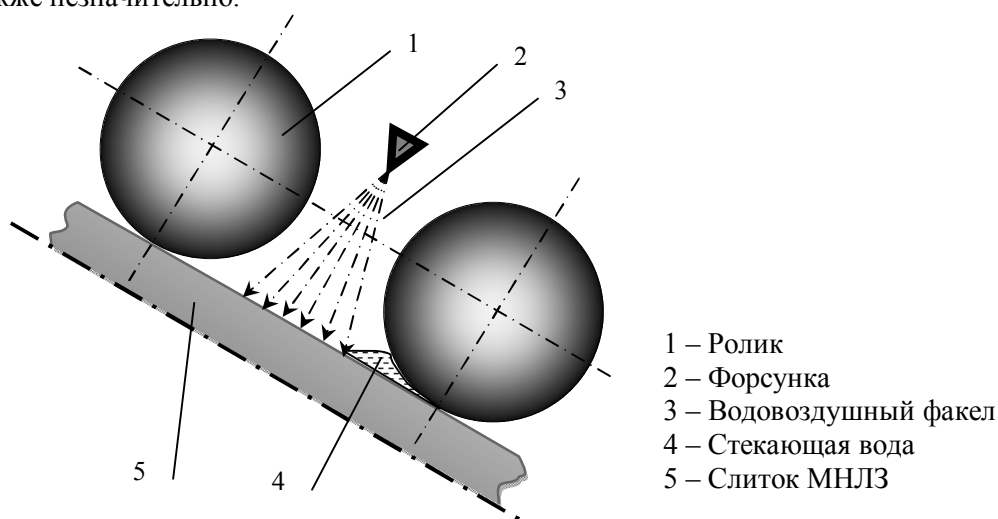


Рис. 1 – Схема элемента зоны вторичного охлаждения слябовой МНЛЗ

Распределение же коэффициента теплоотдачи на участке действия факела форсунки имеет другой характер. В этой зоне существуют несколько основных параметров, влияющих на скорость теплоотдачи: интенсивность потока воды, размер капель и скорость их движения, угол разбрызгивания и эффект смачивания. Исследование многими авторами коэффициента теплоотдачи при использовании плоскофакельных форсунок показали, что интенсивность теплообмена существенно зависит от скорости истечения воды из форсунки. При увеличении скорости истечения в 3 раза, коэффициент теплоотдачи возрастает в 2,5 раза [6].

Исследования характера распределения плотности орошения в зоне действия факела широко освещены как в отечественных, так и в зарубежных источниках [3 – 5]. Применение параболического закона распределения охладителя позволяет наиболее точно передать гидродинамическую картину распыления плоскофакельными форсунками (рис. 2).

В системе охлаждения с применением нескольких форсунок могут возникнуть области перекрытия потоков охладителя. Эти области характеризуются чрезвычайно неравномерным коэффициентом теплоотдачи. В свою очередь это приводит к появлению температурных полос, что отрицательно сказывается на качестве поверхности сляба (рис. 3).



Рис. 2 – Распределение плотности орошения форсункой фирмы lechler

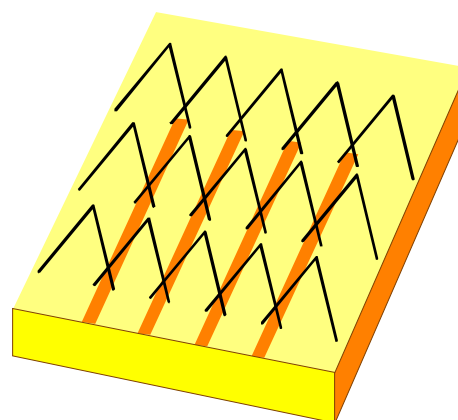


Рис. 3 – Появление температурных полос при линейном расположении форсунок

Т.о. схема теплоотвода от поверхности сляба МНЛЗ представляет собой сочетание участков с различными законами теплоотдачи. Следовательно, для более обоснованного выбора схемы вторичного охлаждения и определения интенсивности охлаждения слитка необходимо иметь максимально точное представление о величине теплоотвода в каждой точке поверхности слитка.

Описание распределения коэффициента теплоотдачи можно разбить на три ступени по сложности расчета. Самый простой способ это определение среднего коэффициента теплоотдачи по характерным зонам МНЛЗ (кристаллизатор, подбой и т.д.) в соответствии с расходами воды на зону. Во втором способе задается закон изменения теплоотвода по длине характерной зоны. Третий метод должен описывать изменение коэффициента теплоотдачи по длине и по ширине зоны охлаждения. Из-за сложности описания последнего метода для математического моделирования, как правило, применяют первые два способа. Однако только третий метод может позволить качественно оценить как геометрическое положение элементов ЗВО, так и технологические характеристики каждого элемента, что представляет особый интерес для исследования процесса образования поверхностных дефектов сляба.

Авторами была разработана математическая модель расчета распределения локальных коэффициентов теплоотдачи в ЗВО слябовой МНЛЗ по поверхности слитка, которая учитывает следующие технологические параметры:

- расход воды на зону (коллектор);
- расположение и диаметр поддерживающих роликов;
- расположение форсунок относительно поверхности сляба;
- углы раскрытия для каждой форсунки;
- коэффициент, учитывающий засорение для каждой форсунки;
- углы поворота относительно оси сляба в плоскости воздействия для каждой форсунки;
- углы наклона относительно плоскости сляба для каждой форсунки.

Алгоритм расчета коэффициента теплоотдачи в ЗВО условно разделяется на два этапа: расчет распределения плотности орошения по поверхности слитка в соответствии с заданными технологическими параметрами, и вычисление собственно коэффициента теплоотдачи по рассчитанным значениям плотности орошения.

На первом этапе задается расход воды на секцию, в соответствии с которым рассчитывается плотность орошения на единицу охлаждаемой поверхности $q = f(G/F)$, где q – плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; G – расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$; F – орошаемая площадь, м^2 [1].

Однако, нам необходимо перераспределить среднее значение плотности орошения в соответствии с особенностями орошения каждой точки поверхности слитка.

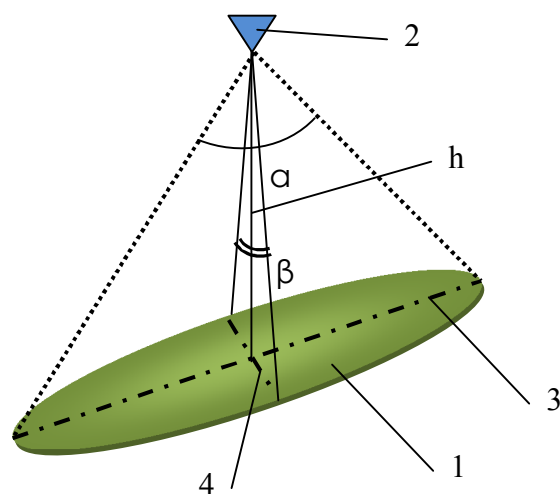
Принимается, что зоне стекающей воды, за пределами действия факела форсунки коэффициент теплоотдачи изменяется незначительно и задается постоянным для всей зоны ($150 - 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$).

Участок действия факела форсунки представляет собой овальное пятно на плоскости, где большая ось эллипса соответствует большему углу раскрытия струи и высоте расположения форсунки над плоскостью. Аналогично определяется и малая ось (рис. 4). Исследования многих авторов и ведущих фирм по производству форсунок показывают, что процесс распределения воды плоскофакельными форсунками наиболее точно описывает параболический закон [4, 5, 8, 9]. Т.о. перенос параболического закона распределения на эллиптическую поверхность воздействия факела позволит рассчитать плотность орошения в заданной точке зоны работы форсунки. Пример такого расчета демонстрируется на рис. 5.

При увеличении высоты расположения и углов раскрытия форсунки увеличивается площадь орошения, и, следовательно, уменьшаются локальные значения плотности орошения. Т.е. изменяя эти параметры можно регулировать уровень теплоотвода от поверхности слитка, и скорость кристаллизации. Изменения угла наклона оси факела форсунки, относительно перпендикуляра к поверхности слитка, влечет за собой искажение формы пятна воздействия факела и смещение максимума плотности орошения относительно проекции местоположения форсунки на поверхность заготовки.

Важным моментом определения гидродинамической картины процесса орошения слитка форсунками, является появление зоны перекрытия потоков от двух соседних форсунок при

достаточно близком их расположении друг относительно друга. При частом расположении форсунок в ряд перекрытие неизбежно. Пересечение струй не ведет к увеличению коэффициента теплоотдачи [8, 9].



- 1 – поверхность воздействия факела;
- 2 – форсунка;
- 3 – большая ось факела;
- 4 – малая ось факела;
- h – высота расположения форсунки;
- α , β – углы раскрытия форсунки.

Рис. 4 – Схема расположения большой и малой оси раскрытия форсунки

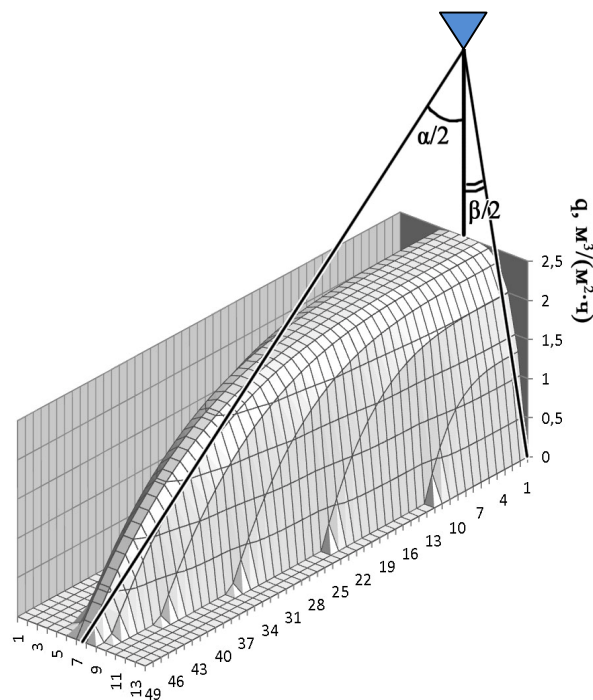


Рис. 5 – Распределение плотности орошения по поверхности действия факела форсунки

Определив распределение плотности орошения слитка, проводим второй этап расчета.

Основной зависимостью, определяющей процесс теплоотдачи при водяном форсуночном охлаждении нагретых поверхностей, является зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности орошения. В связи со сложностью процесса и невозможностью точной оценки влияния всех факторов при теоретических расчетах, часто в конкретных условиях экспериментально оценивают зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности орошения. Для условий охлаждения сляба в ЗВО применяется следующая зависимость: [1, 10]

$$\alpha = A + B \cdot (q)^r, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи к охлаждающему агенту Вт/(м²·К); параметры A, B, r определялись методом статистического анализа экспериментальных данных по оценке коэффициента теплоотдачи форсунок на конкретной МНЛЗ.

Задав значения эмпирических коэффициентов уравнения 1 в соответствии с конкретными условиями, проводим расчет локальных коэффициентов теплоотдачи от поверхности сляба. На рис. 6 приводятся результаты расчета коэффициентов теплоотдачи для условий охлаждения сляба пятнадцатью форсунками, расположенными в ряд по три штуки на одинаковой высоте (250 мм) от поверхности сляба. Большой и малые углы раскрытия потоков форсунок одинаковы и равны соответственно 110 и 22 градуса. Большая ось эллипса воздействия потока каждой форсунки в ряду располагается перпендикулярно узким граням слитка. Расстояние между форсунками 450 мм. Обобщая полученные данные, строим график изменения значения среднего (по длине заготовки) коэффициента теплоотдачи по ширине слитка (рис. 7). По середине графика (рис. 7а) имеются два минимума (≈ 190 Вт/(м²·К)) соответствующие области перекрытия потоков охлаждающей среды и характеризующиеся заниженным коэффициентом теплоотдачи. Наличие таких участков на поверхности слитка приводит к возникновению температурных градиентов и напряжений, что в свою очередь может послужить причиной образования продольных трещин сляба.

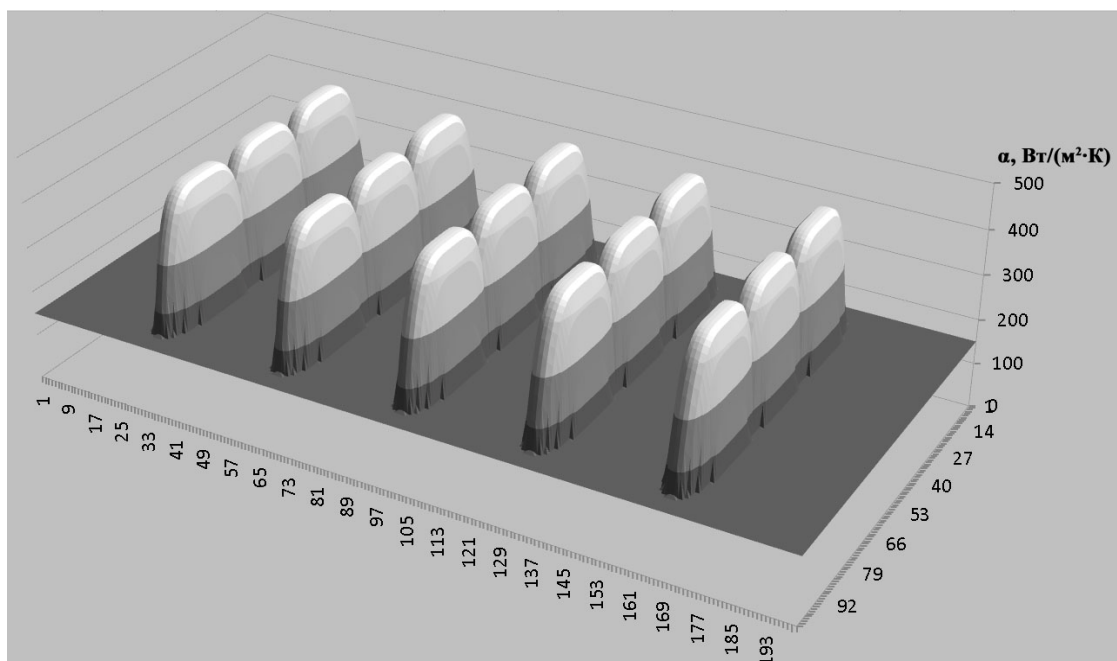


Рис. 6 – Результаты расчета локальных коэффициентов теплоотдачи от поверхности слябовой заготовки в зоне вторичного охлаждения

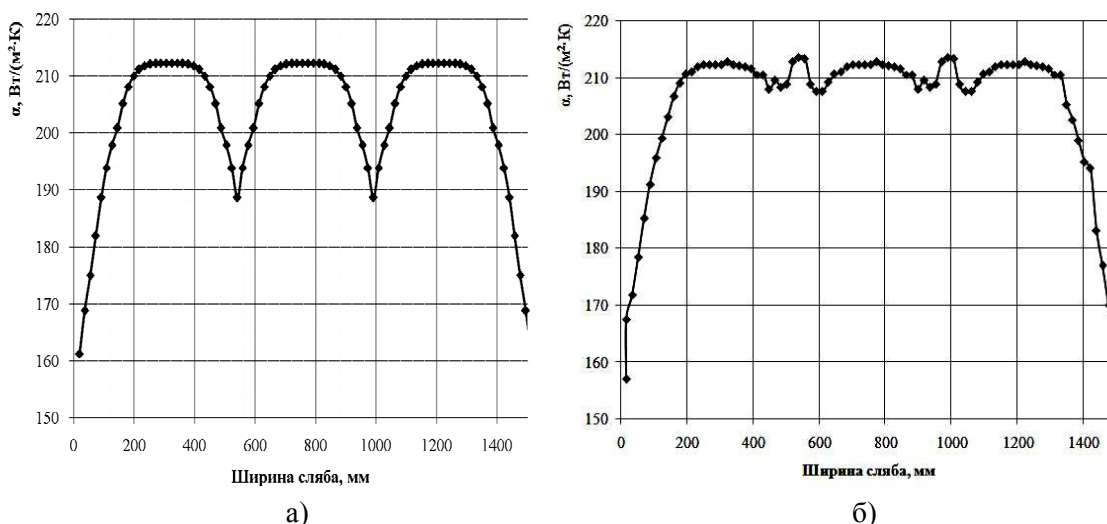


Рис. 7 – Среднее значение коэффициента теплоотдачи по ширине слитка: а – расположение форсунок в ряд без поворота форсунок; б – поворот форсунок относительно оси широкой грани на 10 градусов

В результате в ЗВО имеют место колебания коэффициента теплоотдачи от поверхности слитка по длине вытягивания заготовки, что связано с переходом по участкам с разными условиями охлаждения. Колебания по ширине сляба в свою очередь зависят от расположения и характеристики форсунок. Технологически возможно изменить положение форсунок относительно поверхности сляба. Поэтому проведен расчет локальных коэффициентов теплоотдачи от заготовки при условии поворота форсунок относительно оси широкой грани на 10 градусов. Результаты расчета представлены на рис. 7б. Из графика видно, что средний коэффициент теплоотдачи более равномерно рассредоточен по ширине сляба. Следовательно, теплоотвод от слитка осуществляется более равномерно по ширине заготовки, что позволит избежать лишних термонапряжений по сечению слитка и улучшить качество поверхности готового сляба. В ближайшее время предполагается разработка математической модели затвердевания непрерывнолитой заготовки, что позволит учесть влияние температуры поверхности сляба на коэффициент теплоотдачи от слитка в зоне вторичного охлаждения.

Выводы

1. Для уменьшения пораженности сляба трещинами необходимо обеспечить равномерный отвод тепла от поверхности слитка по направлению движения и по ширине сляба.
2. Локальный коэффициент теплоотдачи от поверхности слитка в зоне действия факела форсунки зависит от плотности орошения сляба, которая определяется технологическими параметрами форсунки (углы раскрытия струи, расход водовоздушной смеси) и ее геометрическим положением.
3. Для описания процесса распределения плотности орошения применяется параболический закон, который наиболее точно отражает действительную гидродинамическую картину охлаждения сляба в ЗВО.
4. На основании изученных данных построена математическая модель определения локальных коэффициентов теплоотдачи от поверхности слитка в зоне вторичного охлаждения, позволяющая проводить исследования условий охлаждения сляба при изменении параметров действующих форсунок.
5. Расположение нескольких форсунок в ряд может привести к пересечению струй. В области пресечения не происходит увеличение коэффициента теплоотдачи, это приводит к нестабильным показаниям коэффициента теплоотдачи с уменьшением значения до 50 % от среднего.
6. Простым и достаточно эффективным средством повышения равномерности распределения коэффициента теплоотдачи является возможность поворота форсунок относительно оси широкой грани на небольшой угол (10 градусов).

Перечень ссылок

1. *Емельянов В.А.* Тепловая работа машины непрерывного литья заготовок / В.А. Емельянов. - М.: Металлургия, 1988. – 143 с.
2. Водовоздушное охлаждение при непрерывной разливке низколегированной трубной стали / А.М. Поживанов, М.П. Овчаренко, С.Д. Разумов и др. // Сталь. – 1986. – № 5. – С. 223 – 225.
3. Водовоздушное охлаждение заготовок на МНЛЗ металлургического комбината «Азовсталь» / Я.А. Шнееров, В.С. Есаулов, О.В. Носоченко и др. // Сталь. – 1986. – № 7. – С. 28 – 30.
4. *Bendig L.* Spray Parameters and Heat Transfer Coefficients of Spray Nozzles for Continuous Casting / L. Bendig, M. Raudensky, J. Horsky, // 78th Steelmaking, 54th Ironmaking, and 13th Process Technology Conferences, Nashville, TN, USA, April 2 – 5, 1995. – P. 88 – 95.
5. *Raudensky M.* Heat Transfer of Twin Fluid Nozzles for Continuous Casting at Different Test Conditions / M. Raudensky // at the 13th International Conference on Liquid Atomisation and Spray Systems on July 9 – 11, 1007 in Florence Italy by the Institute for Liquid Atomisation and Spray Systems ILASS Europe. – P. 153 – 161.
6. Разработка и внедрение единой системы вторичного водовоздушного охлаждения непрерывнолитых слитков // О.Н.Ермаков, В.А. Емельянов, В.П. Логинов и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 10. – С. 12 – 14.
7. *Шатохин С.П.* Важные факторы эффективного охлаждения валков / С.П. Шатохин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 8. – С. 195 – 199.
8. *Frick J.* Improved Secondary Cooling in Continuous Casting / J. Frick, R. Haap // at XXXII Seminario de Fusao, Refino e Solidificacao dos Metais on May7th & 8th , 2001 in Salvador Brazil. – P. 31 – 35.
9. Boyle R. Implementation of modern secondary cooling technology in existing casters/ R. Boyle, J.W. Frick // 3rd International Conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries, Beijing China, Sept. 2004. – P. 111 – 118.
10. Разработка и внедрение рациональных режимов охлаждения при разливке высокопрочных трубных сталей на криволинейных МНЛЗ / В.А. Горяинов, Л.И. Урбанович, А.М. и др. // Бюл. ин-та «Черметинформация». – 1979. – № 18. – С. 34 – 36.

Рецензент: С.Л. Макуров
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 27.02.2008