

5. Хансен М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. - М.: Металлургиздат, 1959. - 390с.

Bibliography:

1. Makurov S.L. Installation for thermophysical properties of alloys by dynamic calorimetry / S.L.Makurov; Priazov.gos.tehn.un-t. - Mariupol, 1997. - 14с., II.3, - Ref.: 9 titles. - Dep. NTEI in Ukraine 11.07.97, № 494. (Rus.)
2. Kazachkov E.A. Enthalpy change of some steels at high temperatures / E.A. Kazachkov, S.L. Makurov // Math. universities. Iron and steel. - 1978. - № 1. - P. 67-69. (Rus.)
3. Kazachkov E.A. Experimental investigation of thermal properties of steels in liquid, two-phase and solid state / E.A. Kazachkov, S.L. Makurov // In. The study of processes involving oxide and metallic melts: Sat. Nauchn. mp. MISA. - Moscow, Metallurgy, 1983. - Vol. 148. - P. 120-127. (Rus.)
4. Smirnov A.N. , Nedeljkovic L., M. Djurdjevic, etc. Calculate the liquidus temperature of ferroalloys // Steel. - 1996. - № 3. - Pp. 15-19. (Rus.)
5. Hansen M. Constitution of Binary Alloys / M. Hansen, K. Anderko. - Moscow: Metallurgy, 1959. - 390 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 01.04.2013

УДК 621.746.62:669.189

© Федосов А.В.*

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ФОРСУНОК ЗВО МНЛЗ НА УСЛОВИЯ НЕРАВНОМЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СЛЯБОВ

Проведен анализ влияния высоты расположения форсунок ЗВО на колебания температуры поверхностного слоя металла непрерывнолитой заготовки. Предложена аналитическая зависимость для расчета коэффициента ослабления плотности орошения в зависимости от основных технологических и технических параметров МНЛЗ.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, зона вторичного охлаждения, форсунка, непрерывнолитой слиток, водовоздушный факел.

Федосов А.В. Вплив розташування форсунок ЗВО МБЛЗ на умови нерівномірного охолодження безперервнолитих злитків. Проведено аналіз впливу висоти розташування форсунок ЗВО на коливання температури поверхневого шару металу безперервнолітої заготовки. Запропонована аналітична залежність для розрахунку коефіцієнту послаблення щільності зрошування в залежності від основних технологічних та технічних параметрів МБЛЗ.

Ключові слова: машина безперервного лиття заготовок, зона вторинного охолодження, форсунка, безперервнолитий злиток, водоповітряний факел.

A.V. Fedosov. Influence of CCM secondary cooling zone nozzles location on conditions of slabs non uniform cooling. The analysis of influence of location height of the secondary cooling zone nozzles on the temperature variations of the slab surface layer is conducted. An analytical relation for the calculation of the water concentration attenuation coefficient depending on the basic technological and technical parameters of the CCM is offered.

Keywords: continuous casting machine, secondary cooling zone, nozzle, strand, water and air spray.

* канд. техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

Постановка проблеми. При непрерывной разливке низколегированных перитектических марок сталей одним из наиболее распространенных дефектов слябовых заготовок являются поверхностные трещины различного типа. Удаление этих трещин методами огневой либо механической зачистки требует дополнительных материальных затрат. К тому же, не всегда удается обнаружить и вычистить все трещины. При прокатке слябов с поверхностными трещинами, последние трансформируются в дефекты листа, которые снижают его качество.

Образование и развитие трещин в слитках происходит вследствие возникновения напряжений и деформаций превышающих критические значения [1]. Одной из основных причин возникновения напряжений и деформаций в твердой оболочке непрерывнолитой заготовки является наличие температурных градиентов, которые в свою очередь возникают вследствие неравномерного теплоотвода с наружной поверхности заготовки. Уменьшение вероятности образования трещин достигается путем обеспечения условий равномерного охлаждения поверхности непрерывнолитой заготовки в ЗВО.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросу обеспечения равномерности теплоотвода посвящено множество публикаций, в которых можно выделить два основных подхода. В первом, поставленную задачу решают с позиции оптимизации расходов воды по зонам ЗВО без изменения ее конструкции [2,3]. Во втором подходе производят корректировку конструкционных параметров ЗВО и форсунок [4,5].

Первый подход наиболее прост в реализации, однако имеет существенное ограничение, связанное с особенностью конструкции ЗВО слябовых МНЛЗ. Межроликовые расстояния поддерживающей системы таких ЗВО минимизированы с целью обеспечения оптимальных условий поддержания твердой корочки слитка. Форсунки системы охлаждения, как правило, располагаются на расстоянии от поверхности слитка больше, чем радиус поддерживающих роликов. В таком случае площадь воздействия факелов охлаждающей смеси ограничивается за счет эффекта «затенения» поверхностью роликов. По результатам моделирования [6] в зависимости от конструкции ЗВО площадь активного форсуночного охлаждения может находиться в пределах 20 – 25% от всей площади слитка, находящегося в сегментах ЗВО. Это резко снижает эффективность управления процессом охлаждения слитка в ЗВО МНЛЗ посредством изменения расходов воды.

Изменение конструкции ЗВО и форсунок открывает больше возможностей для управления охлаждением непрерывнолитых слитков за счет корректировки площади воздействия факелов охлаждающей смеси [5]. Несмотря на то, что этому вопросу посвящено большое количество публикаций, до сих пор не представлено универсальной схемы расположения форсунок ЗВО, отвечающей всем возможным требованиям процесса непрерывной разливки. Следовательно, вопрос об оптимизации конструкций ЗВО остается актуальным, и для его решения необходимо четкое представление об условиях взаимодействия основных элементов ЗВО: форсунки, сляб и ролики поддерживающей системы.

Цель статьи – оценить влияние расположения форсунок ЗВО МНЛЗ на колебания температуры поверхности слябовых заготовок. Предложить аналитические зависимости для определения условий форсуночного охлаждения поверхности слитков, учитывающие взаимное расположение роликов и форсунок ЗВО и их основные технологические параметры.

Изложение основного материала. Для оценки теплового состояния поверхности слябовых заготовок применялся метод математического моделирования. С помощью многофакторной математической модели [6] проведены расчеты процесса затвердевания непрерывнолитого слитка сечением 250×1850 мм при скорости разливки 0,9 м/мин. Колебания температуры поверхности сляба по его оси представлены кривой 1 на рис. 1. После выхода заготовки из кристаллизатора МНЛЗ наблюдается вторичный разогрев поверхности, вызванный резким уменьшением интенсивности теплоотвода в ЗВО. На участках активного воздействия факелов форсунок хорошо просматриваются локальные понижения температуры поверхности. Величина колебания температуры достигает 70 °С.

Кривая 2 на рис. 1а изображает изменение коэффициента теплоотдачи по длине вытягивания сляба. Пиковые значения коэффициентов теплоотдачи соответствуют местам воздействия водовоздушных факелов форсунок ЗВО. Протяженность пиков определяется характеристиками форсунок и межроликовыми промежутками [6]. Из рис. 1 наглядно видна тесная связь между изменениями коэффициента теплоотдачи и колебаниями температуры

поверхности, которые приводят к возникновению термических напряжений. По длине слитка (рис. 1а) зоны повышенного теплоотвода чередуются с зонами низкого теплоотвода, что приводит к возникновению температурных градиентов на поверхности непрерывнолитого слитка.

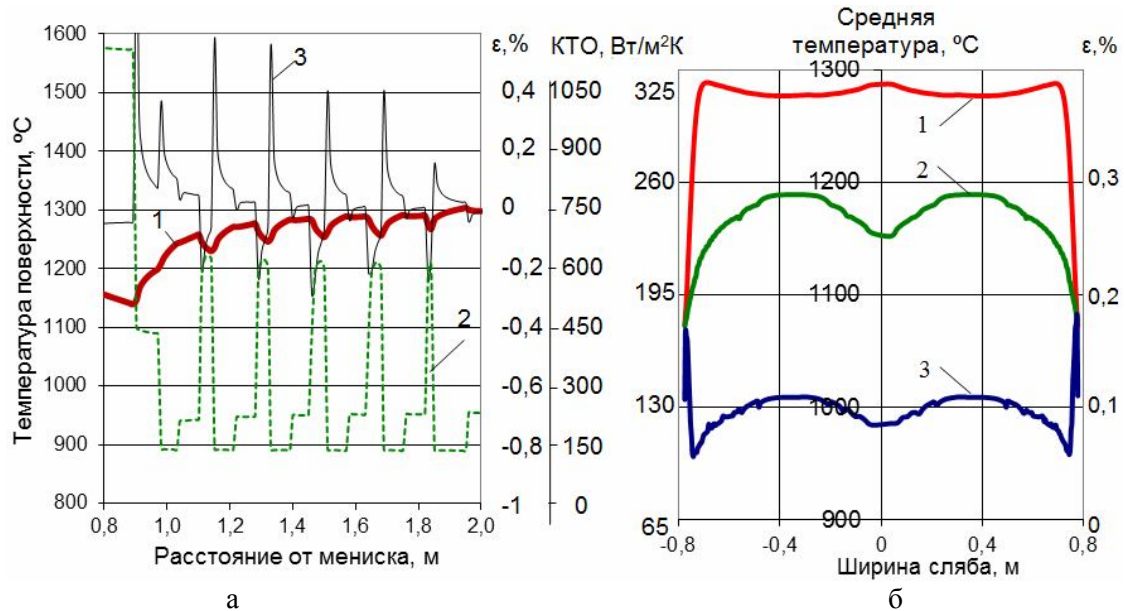


Рис. 1 – Изменение температуры поверхности, коэффициента теплоотдачи и относительных термических напряжений по длине (а) и ширине (б) непрерывнолитой заготовки: 1 – температура поверхности, °С; 2 – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К; 3 – относительные термические деформации, %

В случае, когда рассматриваются условия возникновения термических напряжений по толщине непрерывнолитых слитков, определяющую роль играет величина интенсивности теплоотвода и возникающий при этом температурный градиент по толщине слитка. В рассматриваемом случае, на формирование термических напряжений в поверхностном слое металла определяющее влияние оказывают колебания интенсивности теплоотвода.

На рис. 1б представлен график распределения среднего коэффициента теплоотдачи по ширине сляба (кривая 2), из которого хорошо видно повышение теплоотвода в местах проекции центральной оси форсунки на охлаждаемую поверхность. При удалении от центра водовоздушного факела интенсивность охлаждения падает. Изменение величины теплоотвода по ширине грани сказывается и на распределении температуры поверхности. Как видно из представленного графика (рис. 1б кривая 1), на охлаждаемой поверхности наблюдается некоторое понижение температуры в местах максимальных значений коэффициента теплоотдачи.

Из вышеприведенного анализа следует, что для уменьшения термических напряжений на поверхности непрерывнолитых заготовок в ЗВО МНЛЗ необходимо уменьшить амплитуду и увеличить период колебаний величины коэффициента теплоотдачи с поверхности заготовок. Для увеличения периода колебаний используется хорошо известный метод шахматного расположения форсунок в ЗВО МНЛЗ. Уменьшение амплитуды колебаний коэффициента теплоотдачи достигается либо уменьшением расходов воды в ЗВО, либо распределением охладителя на большую площадь поверхности. Применение первого варианта приводит к уменьшению общей интенсивности охлаждения заготовки и элементов оборудования ЗВО, что может оказаться неприемлемо. Второй вариант позволяет избежать отмеченных недостатков, поэтому он представляет больший интерес.

Оптимизация площади активного орошения форсунок ЗВО МНЛЗ связана с рядом сложностей. Эффект экранирования факелов форсунок роликами поддерживающей системы ЗВО не позволяет достичь увеличения площади орошения только путем изменения малого угла

раскрытия форсунок (β). Увеличение большого угла раскрытия форсунки (α) ограничивается эффектом перекрытия факелов от соседних форсунок и размерами слитков. Часто для решения этой проблемы прибегают к корректировке высоты расположения форсунок относительно поверхности непрерывнолитых слитков. При этом важно учитывать изменение условий экранирования факелов форсунок. С этой целью разработано уравнение, позволяющее определять угол касательной струй факела форсунки к поверхности ролика.

Для разработки уравнения был выделен участок ЗВО протяженностью от оси ролика до оси форсунки. Расчетная схема для вывода искомого уравнения (1) представлена на рис. 2.

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{l_r}{(h_n - R_r)}\right) - \arccos\left(\frac{R_r}{\sqrt{l_r^2 + (h_n - R_r)^2}}\right), \quad (1)$$

где l_r – половина межроликового расстояния, м;
 h_n – расстояние от поверхности сляба до форсунки, м;
 R_r – радиус ролика, м.

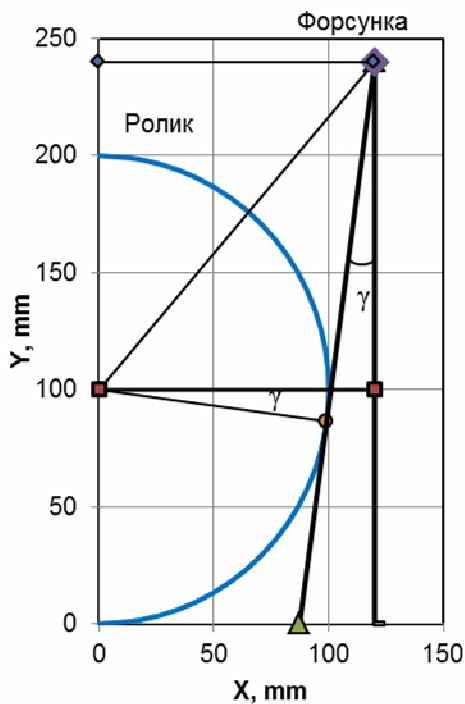


Рис.2 – Схема определения угла наклона касательной факела к окружности ролика

Поскольку условия экранирования факела зависят от радиуса роликов и межроликового расстояния, которые по длине ЗВО существенно изменяются, то для оптимизации высоты расположения форсунок удобно пользоваться безразмерной величиной (h_{omn}), выражающей отношение текущей высоты форсунки (h_n) к ее максимальной высоте, при которой не происходит экранирования факела (h_{max}). Уравнение для определения h_{max} представлено в работе [6]. Высота форсунки при которой $h_{omn} = 1$ является критической, поскольку при ее превышении часть воды от форсунки попадает на ролик, в результате контакта с его поверхностью несколько нагревается и достигает поверхности сляба в виде неорганизованных струй свободно стекающей воды. Величина коэффициента теплоотдачи в зоне действия свободно стекающей воды значительно меньше, чем на участках активного воздействия факелов форсунок, что в итоге приводит к уменьшению среднего коэффициента теплоотдачи.

Для изучения влияния высоты расположения одной центральной форсунки на условия охлаждения поверхности слябов в пределах межроликового промежутка поддерживающей системы ЗВО было проведено численное моделирование, в ходе которого для выражения амплитуды колебаний коэффициента теплоотдачи использовалось его максимальное значение (рис. 3 кривая 2). Оценка общего состояния теплоотвода производилась на основании средних значений величины коэффициента теплоотдачи (рис. 3 кривая 3). Кривая 1 на рис. 3 представляет интегральное значение плотности орошения.

Кривая 2 на рис. 3 показывает, что при увеличении высоты форсунки до $h_{omn} = 1$ происходит резкое уменьшение максимального значения коэффициента теплоотдачи. В дальнейшем темп уменьшения максимума теплоотдачи снижается. Кривая 3 на рис. 3 имеет максимум при значениях h_{omn} близких к единице. Рост среднего значения коэффициента теплоотдачи происходит при одновременном резком уменьшении его максимального значения (кривая 2) и неизменном интегральном значении плотности орошения (кривая 1). Это происходит вследствие того, что зависимость величины коэффициента теплоотдачи от плотности орошения носит затухающий характер [7].

Таким образом, распределение охлаждающей смеси по большей площади благоприятно сказывается на величинах термических напряжений. При росте общей интенсивности

теплоотвода происходит уменьшение амплитуды колебаний коэффициента теплоотдачи.

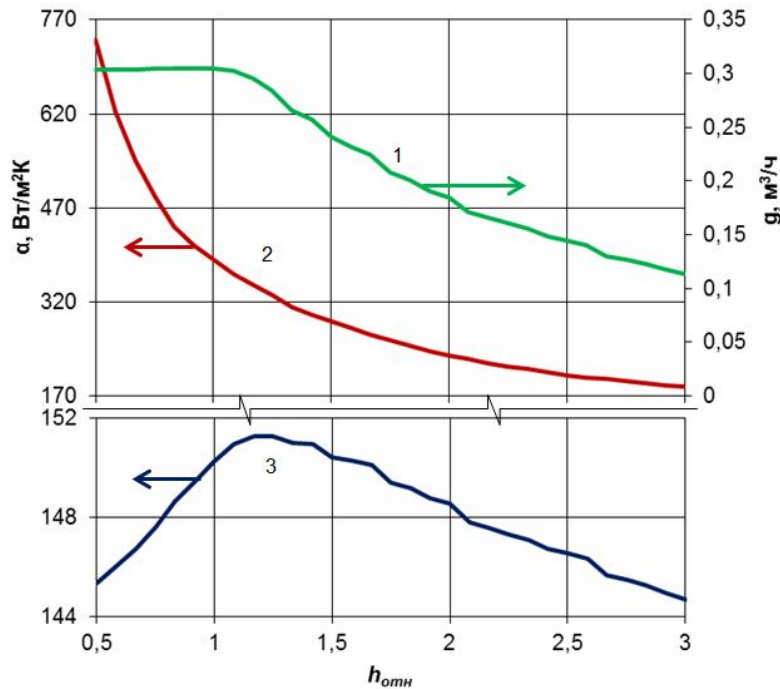


Рис.3 – Зависимость интегральной величины плотности орошения (1), максимального (2) и среднего (3) коэффициентов теплоотдачи от расположения форсунки

Увеличение высоты форсунки относительно величины h_{max} ($h_{omn} > 1$) сопровождается уменьшением площади активного воздействия факела на поверхность слитка в результате эффекта экранирования роликами поддерживающей системы. На рис. 3 это отражается в уменьшении интегральной величины плотности орошения (кривая 1) и соответственно уменьшении средней величины коэффициента теплоотдачи (кривая 3). Следовательно, увеличение высоты форсунки относительно величины h_{max} целесообразно в двух случаях: для дальнейшего уменьшения максимального значения коэффициента теплоотдачи или для обеспечения наружного охлаждения роликов поддерживающей системы. В этом случае представляет интерес аналитическая зависимость для определения коэффициента ослабления интегральной плотности орошения.

Для определения аналитической зависимости необходимо задаться формой площади орошения факела. Как правило, это эллипс, большая ось которого является основанием равнобедренного треугольника, определяемого большим углом раскрытия форсунки (α) и высотой ее установки над поверхностью слитка. Малая ось определяется аналогично, только угол треугольника равен малому углу раскрытия факела (β). Распределение плотности орошения по этой площади задавалось в виде параболоида четвертой степени. В результате экранирования, от эллипса отсекается сегмент, размеры которого определяются соотношением катетов треугольников образованных высотой форсунки и углами $\beta/2$ и γ . Небольшие значения этих углов позволяют использовать их отношение вместо отношения катетов. Так, приближенное отношение катетов определяем из уравнения:

$$K_k = 1 - \frac{\gamma}{\beta}. \quad (2)$$

Угол сегмента эллипса выделенного контуром «тени» ролика будет равен:

$$\theta = 2 \cdot a \cos K_k. \quad (3)$$

Тогда коэффициент ослабления можно найти из уравнения:

$$K_{осл} = 1 + ((\theta - \sin \theta) / \pi - 1) \cdot K_k^{1,25}. \quad (4)$$

Представленные на рис. 4 результаты расчетов по аналитической модели показывают хорошую сходимость с расчетами, выполненными с помощью численной модели.

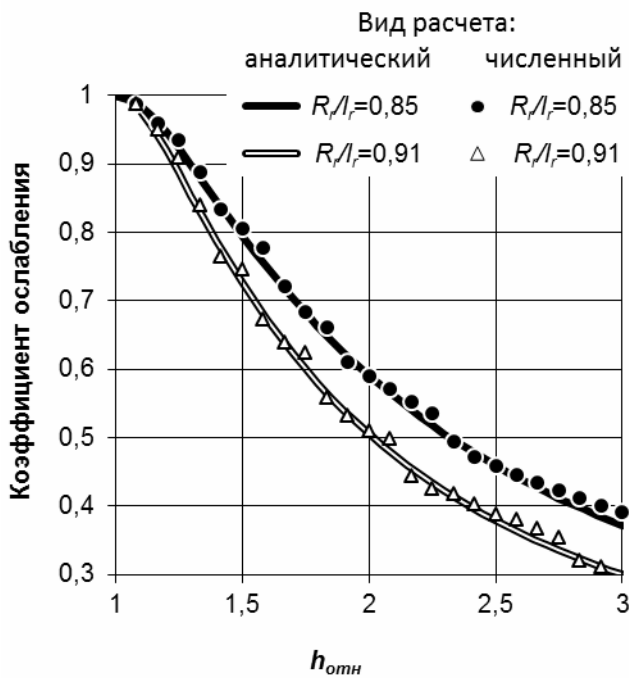


Рис.4 – Сопоставление результатов расчета коэффициента ослабления выполненных по аналитической зависимости и с помощью численного моделирования

относительно охлаждаемой поверхности, температурных градиентов при максимальном уровне теплоотвода.

- Предложенное уравнение для определения угла касательной факела форсунки к поверхности ролика, позволило вывести аналитическую зависимость для расчета коэффициента ослабления интегральной величины плотности орошения поверхности непрерывнолитых слитков. Данные уравнения позволяют существенно упростить математическую модель форсуночного охлаждения в ЗВО МНЛЗ и повысить точность решений задачи оптимизации конструкции ЗВО.

Список использованных источников:

- Теоретическое и экспериментальное исследование влияния параметров литья на растрескивание непрерывнолитого слитка / А.А. Позняк, В.А. Берзинь, А.М. Кац [и др.] // Изв. АН ЛатвССР, Сер. физ. и техн. наук. – 1981. – №1. – С. 72-79.
- Моделирование и оптимизация температурного поля непрерывно-литого слитка / И.О. Мищенко, А.В. Дуб, Е.В. Макарычева [и др.] // Известия Вузов ЧМ. – 2007. – №3. – С. 15-21.
- Preliminary Numerical Experiments in Multiobjective Optimization of a Metallurgical Production Process / F. Bogdan, T. Tea, S. Jožef [etc.] // Informatica. – 2007. – №3. – pp. 233–240.
- Модернизация системы вторичного охлаждения слябовой МНЛЗ ОАО «Уральская сталь» / А.В. Куклев, В.В. Тиняков, А.М. Лонгинов [и др.] // Металлург. – 2011. – №2. – С. 39-41.
- Сравнение существующих концепций вторичного охлаждения непрерывнолитых заготовок на традиционных слябовых МНЛЗ / Л.В. Буланов, Н.А. Юровский, В.В. Бусыгин [и др.] // Бюллетень «Черная металлургия». – 2012. – №3. – С. 40-50.
- Федосов А.В. Математическая модель расчета условий охлаждения поверхности непрерывнолитых заготовок в ЗВО МНЛЗ / А.В. Федосов, Е.А. Казачков, В.И. Бурлаков // Математичне моделювання. – 2012. – №2(27). – С. 31-35.
- Patrick B. Practical aspects of the design, operation and performance of caster spray systems / B. Patrick, B. Barber, D. Brown // La Revue de Metallurgie. – 2001. – April. – pp. 383–390.

Таким образом, предложенная аналитическая модель, позволяет упростить расчет интенсивности активного охлаждения поверхности слитка форсунками ЗВО с учетом эффекта экранирования поддерживающей системы. Интенсивность внешнего охлаждения оборудования поддерживающей системы ЗВО возможно определить из произведения полной интегральной плотности орошения на величину $(1-K_{осл})$. Однако в предложенном аналитическом методе не учитываются эффекты перекрытия факелов соседних форсунок и ограничение площади орошения поверхностью непрерывнолитой заготовки, поэтому для цельного анализа конструкции ЗВО желательно использовать численную модель расчетов.

Выводы

1. В результате анализа условий форсуночного охлаждения в ЗВО МНЛЗ, учитывающего эффект экранирования факелов форсунок системой поддерживающих роликов, предложены рекомендации по расположению форсунок обеспечивающие минимальные значения

Bibliography:

1. Theoretical and experimental study of the influence of parameters on the cracking casting continuous casting ingot / A.A. Poznak, V.A. Berzin, A.M. Kac [etc.] // Izv. AN LatvSSR, Ser. fiz. i tehn. nauk. – 1981. – №1. – pp. 72-79. (Rus.)
2. Simulation and optimization of the temperature field of continuous-cast strand / I.O. Mishchenko, A.V. Dub, Ye.V. Makarycheva [etc.] // Izvestiya Vuzov CHM. – 2007. – №3. – pp.15-21. (Rus.)
3. Preliminary Numerical Experiments in Multiobjective Optimization of a Metallurgical Production Process / F. Bogdan, T. Tea, S. Jožef [etc.] // Informatica. – 2007. – №3. – pp. 233-240.
4. Modernization of the secondary cooling slab caster "Ural Steel" / A.V. Kuklev, V.V. Tinyakov, A.M. Longinov [etc.] // Metallurg. – 2011. – №2. – pp. 39-41. (Rus.)
5. Comparison of existing concepts of secondary cooling cast strand in traditional slab CCM / L.V. Bulanov, N.A. Yurovskiy, V.V. Busygin [etc.] // Byulleten «Chernaya metallurgiya». – 2012. – №3. – pp. 40-50. (Rus.)
6. Fedosov A.V. Mathematical model of calculation of strand surface cooling conditions in CCM secondary cooling zone / A.V. Fedosov, E.A. Kazachkov, V.I. Burlakov // Matematychnye modelyuvannya. – 2012. – №2(27). – pp. 31-35. (Rus.)
7. Patrick B. Practical aspects of the design, operation and performance of caster spray systems / B. Patrick, B. Barber, D. Brown // La Revue de Metallurgie. – 2001. – April. – pp. 383-390.

Рецензент: А.М. Скребцов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 21.02.2012

УДК 621.744.044:669.18

© Макуров С.Л.¹, Силкин Д.В.²

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО
ГИДРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ
СТАЛИ НА МАКРОСТРУКТУРУ И НЕОДНОРОДНОСТЬ КРУПНОГО
СТАЛЬНОГО СЛИТКА**

В статье рассмотрены современные теории кристаллизации и методы исследования крупных стальных слитков. Выполнен критический анализ способов воздействия на кристаллизующийся металл с целью повышения качества стальных слитков. Методом физического моделирования и экспериментальными исследованиями в производственных условиях показана возможность применения ударно-импульсного воздействия для улучшения макроструктуры слитков.

Ключевые слова: крупный слиток, внешние воздействия, кристаллизация, макроструктура, гидроимпульсный удар.

Макуров С.Л., Силкин Д.В. Дослідження впливу низькочастотної гідроімпульсної обробки в процесі затвердіння сталі на макроструктуру та неоднорідність великого сталювого злитку. У статті розглянуті сучасні теорії кристалізації і методи дослідження великих сталевих злитків. Виконано критичний аналіз способів впливу на кристалізуючийся метал з метою підвищення якості сталевих злитків. Методом фізичного моделювання та експериментальними дослідженнями у виробничих умовах показана можливість застосування ударно-імпульсного впливу для поліпшення макроструктури злитків.

Ключові слова: великий злиток, зовнішні впливи, кристалізація, макроструктура, гідроімпульсний удар.

¹ д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь