

УДК 669.14.018.8

Оглоблин Г.В.

Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет, Россия

Стулов В.В.

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ НА ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЕНКАХ КРИСТАЛЛИЗАТОРА

Предлагается методика моделирования тепловых полей в кристаллизаторе ЛКМ с помощью жидких кристаллов.

UDC 669. 14. 018. 8

Ogloblin G. V.

Amur State Pedagogical University, Komsomolck sur Amur, Rossiya

Chairs V. V.

Institute of Engineering and Metallurgy, RAS, Komsomolck sur Amur, Rossiya

## SIMULATION OF THERMAL FIELDS ON A VERTICAL WALL KRISTALLIZATORA

The technique of simulation of thermal fields in the mold coatings using liquid crystals.

В существующих установках непрерывной разливки стали [1] жидкий металл подаётся в кристаллизатор через погружной разливочный стакан. В зависимости от типа стакана и кристаллизатора формируется корочка, отвод тепла от жидкой середины. Данные процессы можно визуализировать в реальном масштабе времени. С этой целью была разработана установка позволяющая осуществить физическое моделирование гидродинамики расплава при его истечении через каналы глуходонного погружного разливочного стакана. На рис.1 показана установка на которой моделируется процесс заполнения кристаллизатора. Основные элементы установки выбраны в масштабе 1:7 – это погружной стакан и кристаллизатор. Погружной стакан располагается в кристаллизаторе согласно рис 2а так, чтобы каналы погружного стакана ориентированы параллельно широкой стенки кристаллизатора. Глубина погружения стакана может варьироваться в нашем случае она составляла пять диаметров стакана. Стенки кристаллизатора с внутренней стороны покрывались чёрной краской. Внешняя жидкими кристаллами холестерического типа с мезофазой 27-32<sup>°C</sup>. Такой подход имеет недостаток, так как слой жидкого кристалла открыт и подвергается воздействию кислорода, ультрафиолета, а также других компонент среды которые приводят к быстрому выходу кристаллов из температурного интервала за счёт окислительных процессов (сутки).

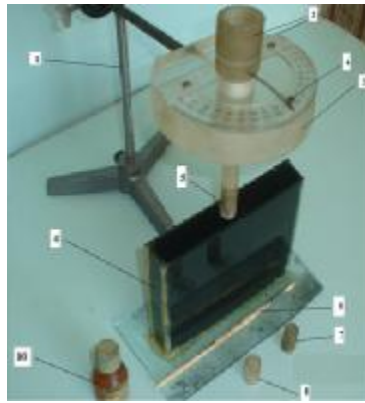


Рис.1 Установка для моделирования работы погружных стаканов.

1.Физический штатив. 2. Погружной разливочный стакан.3. Угловое отсчётное устройство. 4.Визор, связанный с осью каналов. 5. Насадка 2х- каналов. 6. Модель кристаллизатора. 7.8. 4-х канальная и двух канальная с эксцентриком насадки.9.Кисть. 10 Флакон с жидкими кристаллами.

Наиболее оптимальный вариант использовать жк-детектор, разработанный авторами[2], что позволит увеличить срок службы детектора до года в зависимости от чистоты исполнения и заполнения жидкими кристаллами стеклянной капсулы. Тогда одну из широких граней кристаллизатора заменяют детектором[2,3], что позволит многократно проводить эксперимент, и получить колеброванную плёнку жидких кристаллов по всей площади кристаллизатора. В качестве рабочего вещества выбрана вода, выбор неслучаен так как вода позволяет моделировать в широких пределах масштабирования и критериев подобия. При этом отслеживается гидродинамика струи для ламинарных потоков через число Рейнольдса:

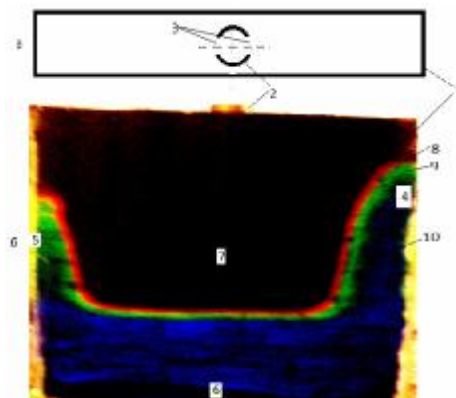


Рис.2. а. Кристаллизатор с установленным разливочным стаканом – вид сверху.б. Кристаллизатор в рабочем состоянии с отображением картины теплового поля – вид сбоку. 1. Кристаллизатор. 2. Погружной стакан. 3.Каналы погружного стакана. 4. Правая струя (вихрь). 5.Левая струя (вихрь). 6 .Дно кристаллизатора, в момент наполнения жидкостью окно перекрыто. 7. Полая часть кристаллизатора в данный момент.8. Красная

изотерма (27°C) характеризующая границу раздела между полой и заполненной областью кристаллизатора. Зелёная изотерма (30°C). Темно-синяя изотерма (33°C).

$Re = \frac{wd}{\nu}$ , где  $w$  - средняя скорость струи,  $d$  - внутренний диаметр канала или эквивалентный

диаметр канала,  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости расплава (жидкости). Если

$Re < 2300$  для круглых или эквивалентных каналов, а температура стенок канала есть величина постоянная то расчёт теплоотдачи производится по формуле [4]:

$$\bar{\alpha} = 1,55 \frac{\lambda}{d} \left( \frac{wd}{a} \cdot \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\eta_c}{\eta_{ж}} \right)^{-0,14} \cdot \epsilon,$$

будем считать, что на участке между каналом разливочного стакана и стенкой кристаллизатора теплообмен отсутствует или величина его незначительна. Что ей можно пренебречь то  $\epsilon = 1$ .

Для расчёта теплоотдачи можно воспользоваться методикой описанной в работе [5], где авторы решали подобную задачу

Температура кристаллизатора 23°C. Температура на входе в стакан 61°C. Температура рабочего вещества 56°C по истечению 40с.. Температура рабочего вещества в кристаллизаторе по истечению 300с 48°C. Температура стенки кристаллизатора для рис.2-б ультрафиолетовый цвет 33°C. Площадь излучающей поверхности  $S$  заключена между красной изотермой и нижней границей ультрафиолета - основание кристаллизатора 33°. В грубом приближении  $S$  будет равна

$$S = S_t + S_{л} + S_{п},$$

где  $S$  – общая площадь излучающей поверхности;

$S_t$  – площадь трапеции;

$S_{л}$  – площадь левого треугольника;

$S_{п}$  – площадь правого треугольника.

Или из общей площади стенки вычтем площадь незаполненной полости. Получим излучающую поверхность стенки.

Тогда тепловой поток через стеклянную стенку кристаллизатора выразится следующим образом:

$$Q = (t_1 - t_2) S / R_c(\text{Вт}),$$

где

$$R_c = \delta / \lambda$$

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности стекла в Вт/м · град

$\delta$  – толщина излучающей стенки.

$R_c$  – термическое сопротивление стенки.

Сведём все параметры в таблицу 1.

Таблица 1.

Динамика изменения излучения теплового потока через широкую стенку кристаллизатора

п/№ реперные точки	t <sub>1</sub> град	t <sub>2</sub> град	S м <sup>2</sup>	Q Вт	δ м	λ Вт/м град	R <sub>c</sub> град/Вт
1	56°C	33°C	0,0216	198,72	3 · 10 <sup>-3</sup>	1,16	25 · 10 <sup>-4</sup>
2	54°C	33°C	0,0226	189,84	3 · 10 <sup>-3</sup>	1,16	25 · 10 <sup>-4</sup>
3	52°C	33°C	0,0227	172,52	3 · 10 <sup>-3</sup>	1,16	25 · 10 <sup>-4</sup>
4	48°C	33°C	0,0237	142,2	3 · 10 <sup>-3</sup>	1,16	25 · 10 <sup>-4</sup>
5	47,5°C	33°C	0,0257	149,06	3 · 10 <sup>-3</sup>	1,16	25 · 10 <sup>-4</sup>

Таким образом, с увеличением излучающей поверхности тепловой поток падает, как следствие падения температуры с 56°C до 48°C. Разница составляет 8°C. А мощность потока излучения через стенку кристаллизатора для 4-го случая, Q=142,2 Вт. И для полностью заполненного 149,06 Вт. Таким образом, если для первого случая Q<sub>1</sub>=198,72 Вт, а для пятого Q<sub>5</sub>= 149,06 Вт то потери теплового потока составят порядка Q<sub>п</sub> =49,66 Вт. В тоже время на 4-5 реперной точке рис. 3-4 Q<sub>п</sub>= 7,18 Вт. Имея экспериментальный материал мы можем проследить динамику, характер потерь определить в результате чего они возникли. Вполне возможно, что эти потери обусловлены отдачей части тепла струи в

виде излучения в воздушную среду в процессе разливки. О характере этого излучения мы говорили в работе [5] когда изучали работу двухканального погружного стакана в воротнике кристаллизатора по его термограммам. Общий тепловой поток будет складываться из  $2Q_{ш} + 2 Q_y + Q_{п} = Q$ , где  $Q_{ш}$  – тепловой поток через широкие стенки кристаллизатора,  $Q_y$  – тепловой поток через узкие стенки кристаллизатора,  $Q_{п}$ –тепловой поток на отрезке выхода струи из канала разливочного стакана и до стенки кристаллизатора или расплава. Схематично это можно представить на рис. 2а.

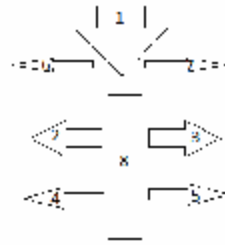


Рис.2а. Схема распределения теплового потока в кристаллизаторе в процессе его заполнения, где 1. Струя расплава, формирующая общий тепловой поток. 2. 3. Тепловой поток через широкие стенки кристаллизатора. 4. 5. Тепловой поток через узкие стенки кристаллизатора. 6. Поток от струи левого канала. 7. Поток от струи правого канала. 8 кристаллизатор.

Рассматривая, данную схему потоков мы опустили потери теплового потока в самом разливочном стакане.

Оценим, теплоотдачу  $\alpha$  нашей системы для чего воспользуемся формулой из источника [4] для движения жидкости в каналах постоянного сечения, где  $Re$  число Рейнольдса определяет режим.

$$Re = wd/v,$$

где  $w$ - средняя скорость течения жидкости,

$d$  – диаметр канала (или его эквивалент),

$v$  – кинематический коэффициент вязкости  $m^2/c$

При  $Re > 10^4$  расчёт производится по формуле

$$\alpha d / \lambda_{ж} = 0,022 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,4} \psi \epsilon,$$

где  $d$  можно положить равным  $d_3$  – эквивалентный диаметр.

Тогда

$$\alpha d_3 / \lambda_{ж} = 0,022 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,4} \psi \epsilon.$$

Расчёт эквивалентного диаметра произведём по входному окну исходя из площади канала  $S_0 = a b$ , где  $a$  - широкая сторона

канала,  $b$  – узкая. Это даст  $d_3 = \sqrt{S_0}$ .

Кроме того для определения числа Рейнольдса нам необходимо знать скорость истечения жидкости из канала погружного стакана. Динамика заполнения кристаллизатора через глухонный погружной стакан с двумя каналами, параметры: На входе вода 61°C. Температура кристаллизатора 23°C. Жидкие кристаллы мезофаза 27°-33°C. Скорость истечения жидкости из канала 0,178 м/с. Расход воды 16,13 см<sup>3</sup>/с. Высота стакана 182 мм. Диаметр внутренний 7мм. Высота канала 6мм. Ширина 1мм.

Если исходить из выражения  $Re = wd/v$ , то мы имеем: Скорость течения жидкости - 0,178 м/с. Эквивалентный диаметр -  $2,44 \cdot 10^{-3}$  м. Кинематический коэффициент вязкости воды при 60°C -  $0,478 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Тогда

$$Re = wd/v = 0,178 \times 2,44 \times 10^{-3} / 0,478 \times 10^{-6} = 908$$

$Re = 908$ , если  $Re < 2300$  то расчёт ведётся по формуле:

$$\alpha = 1,55 \lambda/d (wd/a \times d/l)^{1/3} (\eta_c / \eta_{ж})^{-0,14} \times$$

На рис.3 представлена динамика заполнения кристаллизатора от 40с до 300с.

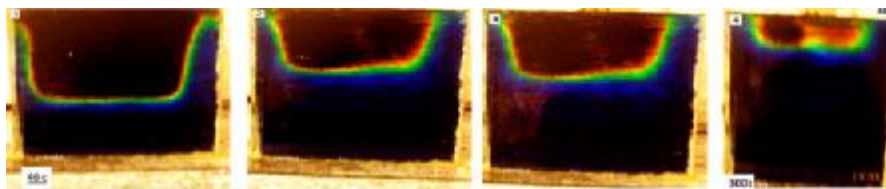


Рис. 3. Динамика заполнения кристаллизатора от 40с до 300с. 1., 2., 3., 4., снимки термограмм тепловых полей на стенке кристаллизатора в данный момент времени.

Входная температура воды 56°C по истечению 300с 48°C. Что характеризует снижение температуры на 8°C. Изотермы на термограммах дают представление о том, как работает разливочный двухканальный стакан при его ориентации параллельно широкой стенки кристаллизатора. Представлен градиент температур на границах раздела, в верхней части кристаллизатора она ниже мезофазы кристаллов в нижней выше. Расшифровка термограмм выполняется с помощью градуировочной шкалы. Усложним задачу и повернём погружной стакан таким образом. Чтобы его ось СВ проходящая через каналы составляли с линией АО рис .4А угол от 2 до 10° и повторим опыт рис.4Б. Струя расплава омывает стенки кристаллизатора таким образом, что её проекция на горизонтальную плоскость описывается в виде восьмёрки, что приводит к образованию двух вихрей. Было установлено, что угол поворота каналов приводит к формированию конкретного характерного только для данного угла теплового поля. Уменьшение угла ниже 2° приводит к смещению потока жидкости, вытекающей из каналов стакана, к противоположной по отношению к отверстию стенки кристаллизатора. В этом случае ухудшается перемешивание расплава в горизонтальной плоскости и возрастает неравномерность распределения скоростей и температур расплава в пристеночных слоях стенок. Увеличение угла больше 10° приводит к размыванию корочки на ограниченном участке, что увеличивает степень её разнотолщинности по периметру кристаллизатора.

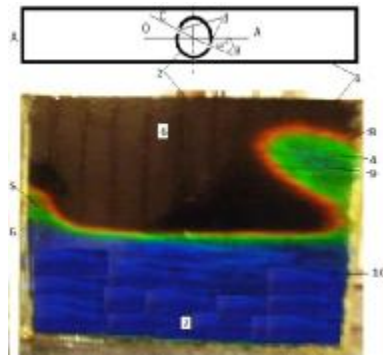
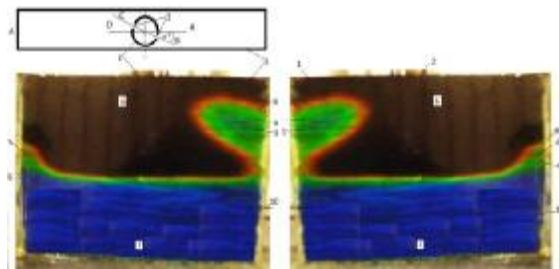


Рис.4. А. Ориентация каналов погружного стакана относительно широкой стенки кристаллизатора  $10^\circ$ . Б. Термограмма температурного поля кристаллизатора в момент времени 35с. 1 кристаллизатор.2.Погружной стакан.3. Каналы погружного стакана.4. Струя правого канала. 5. Струя левого канала. 6. Не заполненная часть кристаллизатора. 7. Заполненная часть кристаллизатора. 8.Красная изотерма  $27^\circ\text{C}$ . 9.Зелёная  $30^\circ\text{C}$ . 10.Темно-синяя  $33^\circ\text{C}$ .

Температурное поле развивается одновременно как на лицевой стороне широкой стенки кристаллизатора так и на обратной, картина получается симметричная рис.5 А,В.



А

Б

Рис. 5. Термограмма теплового поля на лицевой А и обратной Б стороне кристаллизатора.

Динамика формирования теплового поля во временном интервале представлена на рис.6. Граница раздела заполненной части кристаллизатора и полый очерчена красной изотермой форма, которой в зависимости от заполнения расплавом кристаллизатора меняется и в конечном итоге совпадёт с уровнем расплава.

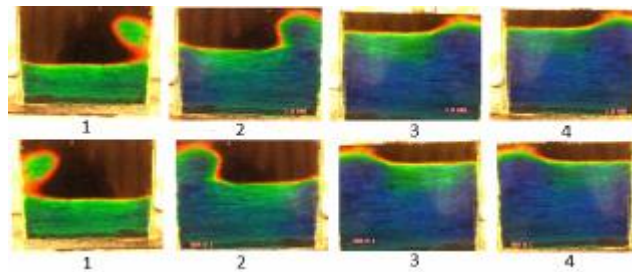
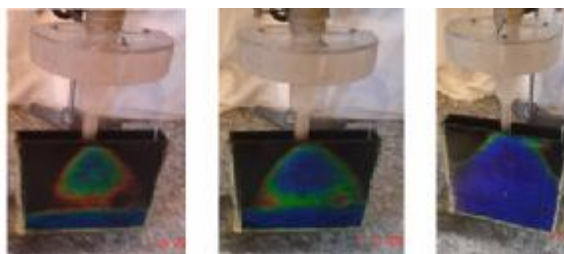


Рис.6. Динамика развития теплового поля на лицевой и обратной стороне кристаллизатора. Первый ряд (верхний 1,2,3,4) лицевая сторона кристаллизатора. Второй ряд(1,2,3,4) обратная сторона кристаллизатора.

Установим каналы погружного стакана перпендикулярно широким стенкам кристаллизатора. На рис. 7 представлена динамика заполнения кристаллизатора расплавом, температурное поле при этом формируется в виде колокола. Из термограмм следует, что температурное поле неоднородно так как поток расплава не омывает стенку, а отражается от неё о чём свидетельствует, на первом снимке, разрыв температурного поля. Красная изотерма характеризует низкую температуру  $27^{\circ}\text{C}$ , синяя  $33^{\circ}\text{C}$ . В начальный момент образуются две области с высокой температурой которые постепенно вырождаются в одну, но неоднородность температурного поля сохраняется. Это можно увидеть, если дать заполненному кристаллизатору остыть. Обратный процесс понижения температурного поля пройдёт все этапы прямого процесса в той же последовательности. Это возможно осуществить благодаря памяти жидких кристаллов.



А                      Б                      В

Рис.8 Динамика формирования теплового поля кристаллизатора при ориентации каналов погружного стакана перпендикулярно широким стенкам. Снимки выполнены с интервалом А 20с, Б 40с, В 60с.

Выводы.

Разработанная методика моделирования тепловых процессов в кристаллизаторе литейно - ковочной машины позволяет, в видимом формате, отобразить работу погружных стаканов. Проследить формирование температурного поля, в зависимости от ориентации каналов. Цветовая гамма температурного поля даёт информацию для качественного и количественного анализа. Полученные результаты можно перенести на натуральный процесс.

Литература.

1.Оглоблин Г.В. Никитин Д.А., Стулов В.В. Установка для моделирования работы погружных стаканов.// Актуальные вопросы развития образовательной области «Технология»: материалы У Международной электронной заочной научно-практической конференции...Комсомольск на Амуре 19октября-10 ноября 2009 г. –Комсомольск –на-Амуре. 2009.С.134-137.

2.Оглоблин Г.В., Стулов В.В. Моделирование работы погружных стаканов с помощью жидких кристаллов. //Высокие технологии, исследования, промышленность. Т1Hi-Tech. С - Петербург. 2010.С395-397.



3. Оглоблин Г.В., Стулов В.В. Жидкокристаллический детектор для электромагнитных волн. // теория и практика механической и электрофизической обработки материалов. Материалы м.н.н-п.к. Комсомольск –на- Амуре. 2009.С.61-65.

4. Оглоблин Г.В., Стулов В.В. Методика расчёта теплового потока через широкую стенку прямоугольной модели кристаллизатора.//Международный симпозиум «Образование, наука и производство:проблемы, достижения и перспективы»: материалы м н-п.к. Комсомольск-на Амуре, 27-30 сентября 2010г.Т.2 Комсомольск на Амуре.:ГОУВПО «КнАГТУ»,2010.С.393-395.

5. Стулов В.В., Одинокое В.В., Оглоблин Г.В. Физическое моделирование процессов при получении литой деформированной заготовки- Владивосток: Дальнаука,2009.-175 с.