

Оглоблин Г.В., Мухин Д.И.

Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет.  
Комсомольск на Амуре. Россия. g-ogloblin@yandex.ru

Стулов В.В.

Институт металлургии и машиноведения ДВО РАН. Комсомольск-на-Амуре.  
Россия.

## ФОРМИРОВАНИЕ КОРОЧКИ ПАРАФИНОВОЙ ЗАГОТОВКИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ЛИТЕЙНО-КОВОЧНОЙ МАШИНЫ.

Кристаллизатор является одним из наиболее важных функциональных узлов, определяющих работу ЛКМ и оптимальное качество непрерывнолитой заготовки. Кристаллизатор выполняет функцию приема жидкого металла, попадающего в него из промковша, а также перевода части жидкой стали в твердое состояние посредством отвода тепла. При этом в кристаллизаторе происходит формообразование геометрии заготовки. В ходе пребывания металла в кристаллизаторе от заготовки отводится от 10 % до 30 % всего тепла, которое аккумулировано металлом. Усовершенствование конструкции кристаллизаторов охватывает методы оптимизации теплоотвода и управления однородностью толщины затвердевшей оболочки слитка, формирующейся в кристаллизаторе; предотвращение деформации кристаллизатора в процессе эксплуатации; удлинение срока службы; оперативное изменения сечения заготовки и пр.[1] Определение закономерностей теплообмена между заготовкой и кристаллизатором является актуальной задачей. Ее важность остается весьма высокой, поскольку от условий теплообмена в кристаллизаторе зависит скорость вытяжки и качество поверхностных и подповерхностных слоев заготовки. Знание закономерностей теплообмена между заготовкой и кристаллизатором позволяет оптимизировать конструкцию кристаллизатора для каждого конкретного случая. Обычно ослабление прочности корочки происходит, прежде всего, в местах, прилегающих к углам кристаллизатора. Вследствие усадки корочки вдоль ее граней происходит образование зазора, резко сокращающего теплоотвод от турбулентных потоков внутри затвердевающего каркаса непрерывной заготовки. Указанные обстоятельства также приводят к развитию неравномерной кристаллизации в поперечном сечении затвердевающей заготовки. В этой связи исследование процессов сопутствующих формированию корочки

представляет определённый интерес. На рис. 1 показан конический кристаллизатор 1 и рост корочки 2 на стенках кристаллизатора. В верхней части полости кристаллизатора чётко проявляется мениск 4 расплава и границы раздела корочки с жидким расплавом 3 и стенкой. Срез профиля полости кристаллизатора выполнен с помощью термостойкой плёнки типа ПЭТ.

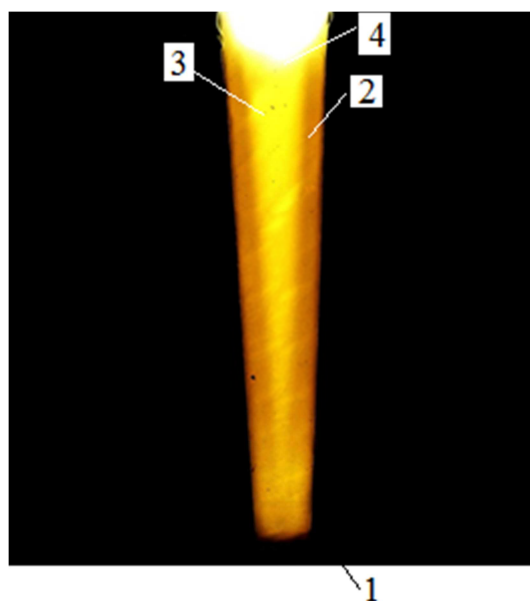


Рис.1. Срез профиля заготовки в коническом кристаллизаторе в период формирования корочки (парафин). 1.Конический кристаллизатор.2.Корочка. 3.Жидкая фаза расплава.4.Мениск.

На рис.2 показан кристаллизатор и динамика формирования корочки парафина по периметру полости кристаллизатора в пристеночной области прямых и наклонных стенок. Опыт проводится в реальном масштабе времени и отслеживается с помощью видеокамеры с таймером, термопар и жидких кристаллов. Для получения видимой картины роста корочки боковые стенки кристаллизаторов были заменены термостойкой плёнкой типа ПЭТ толщиной 10мк. Такой подход позволил дифференцировать рост корочки на широкой и узкой стенке кристаллизатора. Это значительно, замедляло образование корочки на боковых стенках кристаллизатора и давала возможность получить срез заготовки и полости кристаллизатора в плоскости профиля заготовки. Температурный режим в пристеночных областях визуализировался с помощью жидких кристаллов термотропного типа с мезофазой 40-45°C. Цветовая гамма жидких кристаллов отображает температуру, причём изотермы вырисовывают как целостную картину теплового поля, так и локальные участки. Температура по оси профиля и в

верхней пристеночной области фиксировалась термопарой типа ХК. Температура кристаллизатора 24°C. Начальная температура расплава 59°C.

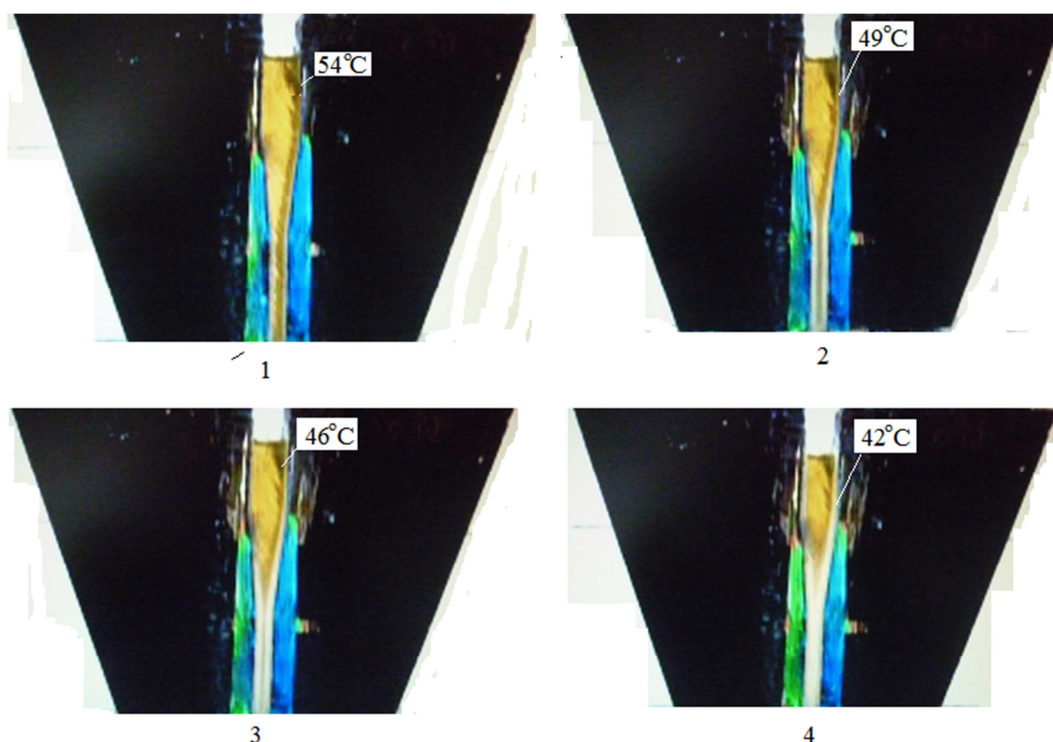


Рис 2. Динамика формирования корочки в кристаллизаторе переменного сечения. 1. Температура в пристеночной области в верхней части кристаллизатора 54°C. 2. 49 °С.3.46°C.4.42°C.

Как в первом, так и во втором случае корочка имеет разную толщину в нижней и верхней части кристаллизатора. Что характеризует различный теплообмен между заготовкой и кристаллизатором, об этом можно судить по тепловым полям (рис.2 кадры1,2,3,4), а также по распределению температур по осевой линии профиля заготовок рис.3. Изотермы зелёного и синего света характеризуют температуры от 42 до 44°C . Если сравнивать 1 и 4 кадр, то следует, отметить, что левая вставка кристаллизатора остывает быстрее – синий цвет 44°C переходит в зелёный 42°C цвет. Кроме того отдачи тепла вставками на границе раздела вставка – боёк минимальная по всей видимости это объясняется зазором между вставкой и бойком. Тогда тепловой поток от расплава к бойку блокируется вставкой, что существенно влияет на теплообмен. Этот вывод подтверждается модельным опытом со сплавами свинца и алюминия рис.3. В постановке опыта используется предварительно отлитая по профилю кристаллизатора заготовка с последующим её помещением в кристаллизатор предварительно нагрет до заданной температуры.

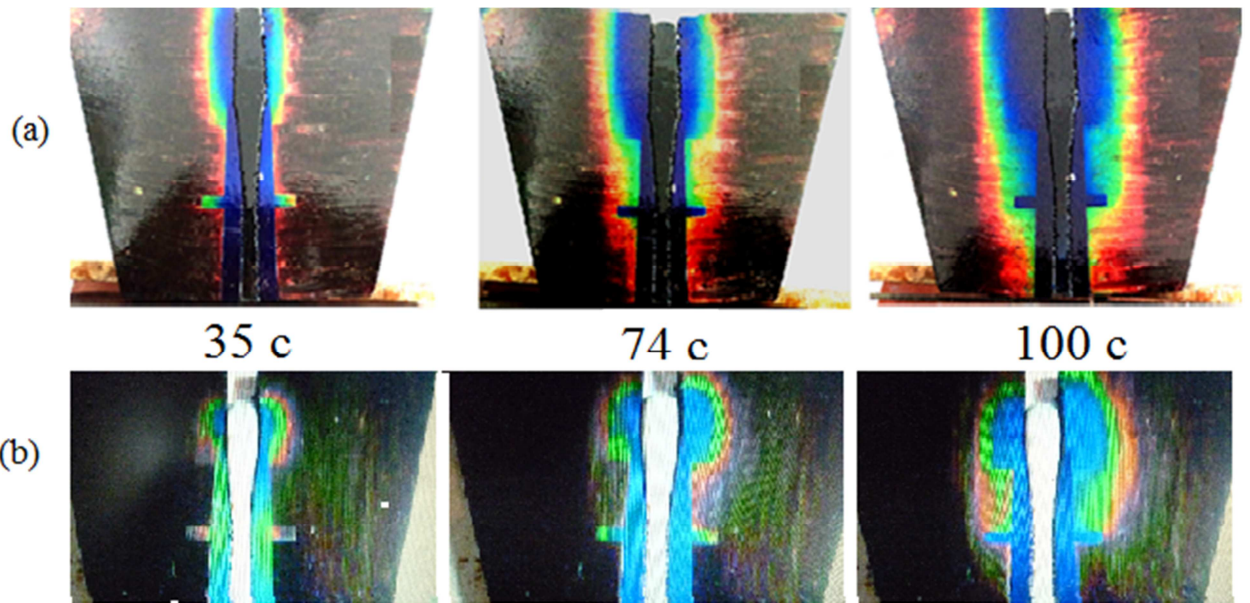


Рис.3. Температурные поля (а) свинцового и (б) алюминиевого сплавов в динамике от 35 до 100с.

Влияние вставок на теплообмен очевидно. Зависимость температуры заготовки по оси профиля кристаллизатора от расстояния между реперными точками 1-7 рис. 4 можно представить в виде графика рис. 5.

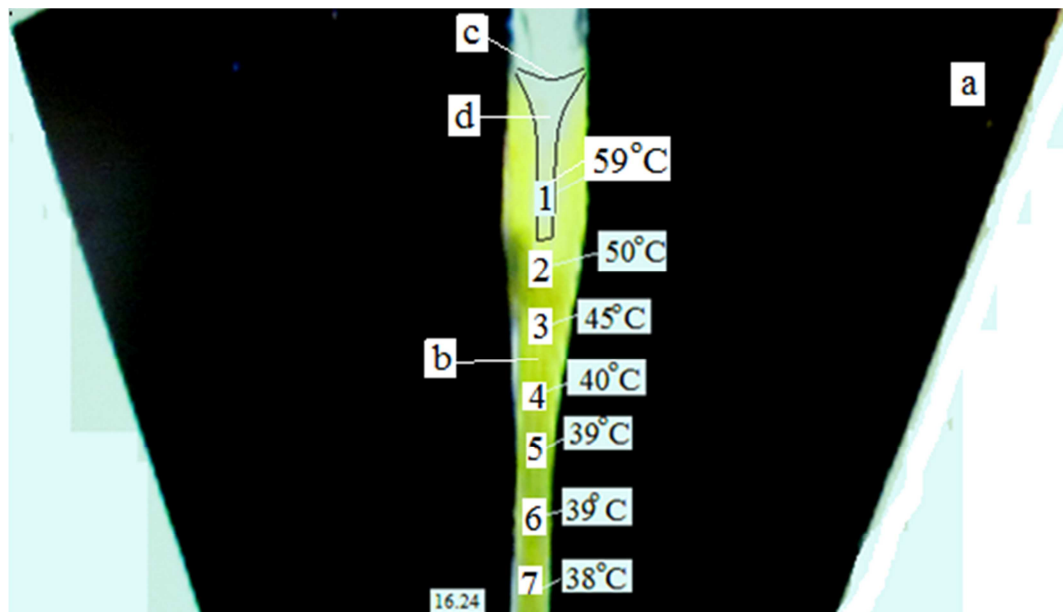


Рис. 4. Распределение температур по оси профиля заготовки за время 984с (парафин). а. Кристаллизатор. б. Заготовка. д. Жидкая фаза заготовки. с. Мениск. 1- 7 – Реперные точки температур по оси профиля заготовки.

Зависимость высоты столба заготовки от её температуры по оси профиля заготовки на графике рис.5.

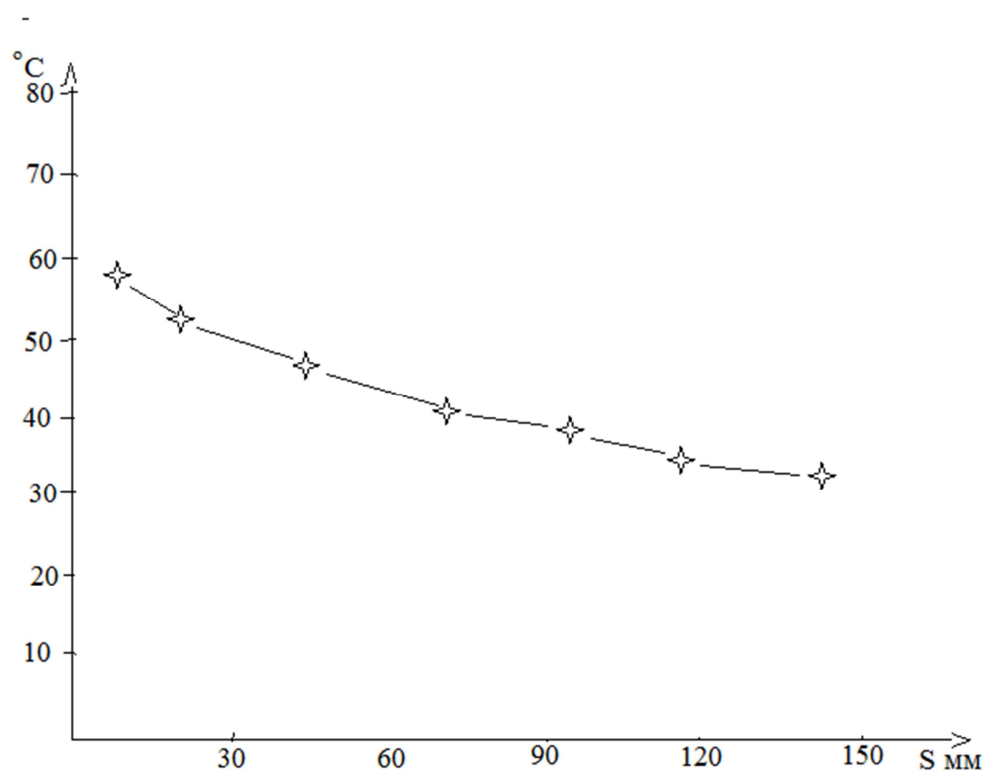


Рис.5. Зависимость температуры от величины столба расплава в кристаллизаторе переменного сечения (парафин)

По входному окну кристаллизатора то можно также проследить рост корочки в разные моменты времени. Так на рис.6 показана толщина корочки по истечению 240с и 720 с.

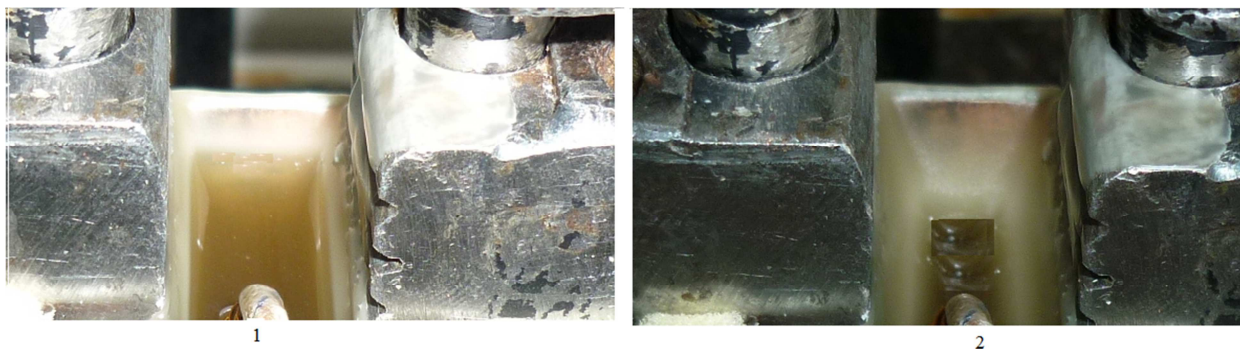


Рис. 6. Формирование корочки в верхней части натурального кристаллизатора переменного сечения (парафин). 1 В момент времени 240 с. 2. 720с.

Отмеченные выше этапы проведения опыта с парафином может быть заменена одним этапом, если использовать в качестве боковых стенок



детектор на жидких кристаллах плёночного или стеклянного пластинчатого типа с заданной мезофазой. Полученная термограмма даёт информацию о тепловых процессах, происходящих в кристаллизаторе. Зная коэффициент передачи температуры через стеклянную пластину плёнке жидкого кристалла можно рассчитать температуры в любой точке кристаллизатора. Расчёт коэффициента можно произвести, замерив термопарой температуру жидкой фазы расплава. Например: показания термопары в центральной зоне расплава  $59^{\circ}\text{C}$ , а зона имеет ультрафиолетовый цвет, что соответствует цвету жидких кристаллов  $33^{\circ}\text{C}$ , тогда коэффициент температуропередачи 1,78. Выбрав точку отсчёта можно рассчитать градиент температур в декартовой системе координат по  $X$  и  $Y$  или в полярной системе через радиус вектор и угол рис.7.

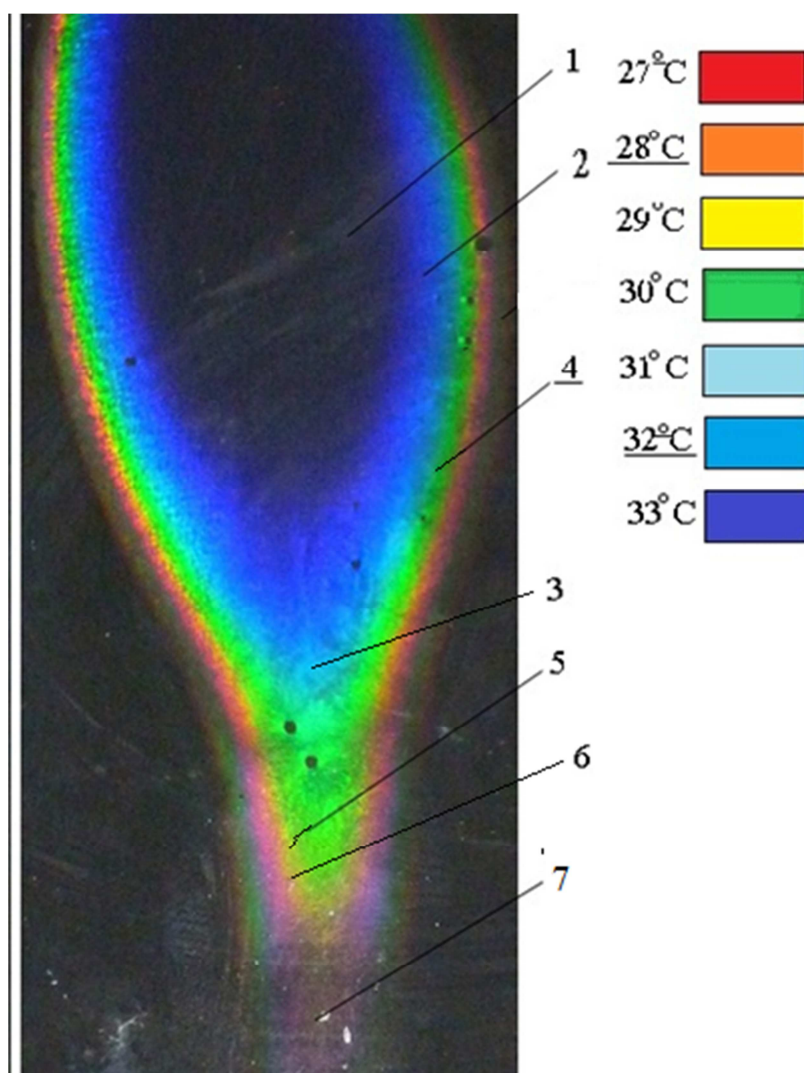


Рис.7. Термограмма распределения температур по профилю заготовки в момент формирования корочки полученная с помощью жидкокристаллического детектора с мезофазой  $27-33^{\circ}\text{C}$  за время 984 с. 1.  $59^{\circ}\text{C}$ , 2.  $56,96^{\circ}\text{C}$ , 3.  $55,18^{\circ}\text{C}$ , 4.  $53,4^{\circ}\text{C}$ . 5.  $51,62^{\circ}\text{C}$ . 6.  $49,84^{\circ}\text{C}$ . 7.  $48,06^{\circ}\text{C}$ .

Толщину корочки на наклонной стенке кристаллизатора определяем по следующему выражению:

$$\xi = \beta\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где  $\beta$  - коэффициент затвердевания парафина, м/с<sup>0,5</sup>;  $\tau$  – время, с.

Теплопередачу в жидком парафине рассматриваем через конвекцию, характеризующуюся коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ . В каждый момент времени  $\tau$  под действием конвективного движения температура жидкого парафина предполагается одинаковой. На фронте затвердевания  $\xi(\tau)$  имеется избыток тепла, поступающий из жидкости и от увеличивающейся по толщине корочки. В этом случае коэффициент затвердевания определяется по следующему выражению [2]:

$$\beta(\tau) = \frac{-\sqrt{\tau}(\alpha \cdot \Delta t - \lambda \cdot g)}{L \cdot \rho} + \sqrt{\frac{\tau(\alpha \cdot \Delta t - \lambda \cdot g)^2}{(L \cdot \rho)^2} + \frac{4 \cdot \lambda \cdot t_3}{L \cdot \rho}}, \quad (2)$$

Теплофизические параметры парафина определяются из литературы [3,4]:  $\lambda = 0,27$  Вт/(м · К);  $t_3 = 54^0$ С;  $L = 200 \cdot 10^3$  Дж/кг;  $\rho = 920$  кг/м<sup>3</sup>.

Из выражения (2) следует, что при  $\alpha \cdot \Delta t = \lambda \cdot g$  получаем максимальное значение коэффициента затвердевания

$$\beta = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot t_3}{L \cdot \rho}}. \quad (3)$$

После подстановки в выражение (3) исходных данных получаем значение  $\beta = 0,563 \cdot 10^{-3}$  м/с<sup>0,5</sup> и соотношение для определения максимальной толщины корочки

$$\xi = 0,563 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\tau}. \quad (4)$$

При  $\tau = 120; 240; 360; 480$  и  $600$  с по (4) получаем соответственно  $\xi = 6,2; 8,7; 10,7; 12,3$  и  $13,8$  мм соответственно.

Значение коэффициента теплоотдачи жидкого парафина и  $\Delta t$  принимаем из работы [2]:  $\alpha = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\Delta t = 5 \text{ }^\circ\text{С}$  случай рис.2, где температура расплава  $59^\circ\text{С}$ , а температура в пристеночной области  $54^\circ\text{С}$ . Тогда значение плотности теплового потока в корочку парафина  $\alpha \cdot \Delta t$  равняется  $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Принимаем, что тепло с поверхности слитка передается естественной конвекцией в окружающую среду. В этом случае при  $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  [3] и перепаде температур между поверхностью слитка и окружающей средой  $\Delta t = 25 \text{ }^\circ\text{С}$  плотность теплового потока с поверхности слитка равняется  $125 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Разность значений плотностей тепловых потоков в корочку и окружающую среду равняется  $875 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . В этом случае при  $\tau = 120; 300$  и  $600 \text{ с}$  по выражению (2) получаем соответственно значения  $\beta = 0,513; 0,487; 0,458 \text{ мм}/\text{с}^{0,5}$  и значения толщины корочки парафина при отсутствии ее деформации:  $\xi = 5,6; 8,43$  и  $11,2 \text{ мм}$ .

#### Выводы.

1. Показана эффективность применения жидкокристаллических детекторов для анализа пространственных тепловых полей кристаллизатора.

2. Отработана методика определения толщины корочки заготовки из парафина опытным и расчётным путём.

3. Предлагаемая методика может быть применена в моделировании тепловых процессов в натуральных кристаллизаторах для стали.

#### Литература.

1. Стулов В.В., Одинокоев В.И., Оглоблин Г.В. Физическое моделирование процессов при получении литой деформируемой заготовки – Владивосток: Дальнаука, 2009. - 175 с.

2. Соболев В.В., Трефилов П.М. Оптимизация тепловых режимов затвердевания расплава. Красноярск: КГУ, 1986. 152 с.



3. Ozawa M., Okano S., Matsuno J. et. Influence des conditions du jet de coulée sur la formation de la peau solidifiée en lingotière de brames de coulée continue // *Tensu to Hagane*. 1976. V. 62. N. 4. P. 86.

4. Larreaq M., Sagues C., Wanin M. Vodele mathématique de la solidification en coulée continue tenant compte de la convection à l'interface solide-liquide // *Revue de métallurgie*. 1978. V. 75. N. 6. P. 337 – 352.