

Виноградов Василий Павлович

Директор предприятия,

АО «Северсталь Менеджмент»

(Череповец, Россия)

E-mail: vp.vinogradov@severstal.com

Vinogradov Vasily Pavlovich

Enterprise Chief Executive Officer,

АО “Severstal Management”

(Cherepovets, Russia)

E-mail: vp.vinogradov@severstal.com

Кузьминов Александр Леонидович

Доктор технических наук, профессор,

Череповецкий государственный университет

(Череповец, Россия)

E-mail: alkuzminov@chsu.ru

Kuzminov Alexander Leonydovich

Doctor of Technology, Professor,

Cherepovets State University

(Cherepovets, Russia)

E-mail: alkuzminov@chsu.ru

**РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫХ
ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ
КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ****DEVELOPMENT AND TESTING OF A
MEASURING COMPLEX FOR
MONITORING THERMAL
PARAMETERS OF THE CONTINUOUS
CASTING MOLD**

Аннотация. Авторы рассматривают методику проведения исследований тепловых параметров работы кристаллизатора с помощью измерительного комплекса двухзонных термопарных датчиков. В статье описывается опытно-экспериментальная работа по установлению взаимосвязи показателей качества поверхности слабовых заготовок и технологических параметров, теплотехнических показателей работы кристаллизатора и химического состава разливаемой стали.

Abstract. The authors consider the methodology for studying thermal parameters of the mold using a measuring complex of dual-zone thermocouple sensors. The article describes experimental work on establishing the relationship between the surface quality indices of slab billets and technological parameters, thermotechnical indicators of the mold and the chemical composition of cast steel.

Ключевые слова: термопарный датчик, теплообмен, кристаллизатор, слабовая заготовка

Keywords: thermocouple sensor, heat transfer, crystallizer, slab billet.

Введение

Процессы формирования качества непрерывнолитых слитков стали отличаются инерционностью, а практически все измеряемые характеристики являются не функциями, а функционалами технологических и теплофизических параметров¹. Задача исследования – с помощью методов теории случайных процессов и дисперсионного анализа проанализировать формирование качества металла во времени, описать из-

¹ Шестаков Н. И., Кузьминов А. Л., Калягин Ю. А. К вопросу управления теплообменом в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2012. – № 2 (39). – Т. 2. – С. 27–28.

менение состояния поверхности слитка при прохождении отдельных участков машины непрерывного литья заготовок (далее – МНЛЗ) вдоль технологической оси. Использование этой информации обеспечит повышение и стабильность качества непрерывнолитой заготовки, оптимизацию технологии разливки и, в частности, позволит разработать инструкции по выходу из нестандартных и аварийных ситуаций.

Основная часть

При проведении исследований с использованием разработанного измерительного комплекса фиксировались:

- 1) скорость разливки (вытягивания слябовой заготовки из кристаллизатора);
- 2) расход воды на охлаждение стенки кристаллизатора;
- 3) температура расплава в промковше МНЛЗ (результаты трех замеров по ходу разливки);
- 4) химический состав металла в промковше – содержание в стали С, Si, Mn, Cr, Ni, Cu, P, S, Al, Nb, Ti и Mo;
- 5) комбинации тепловых потоков и температуры точек на стенках кристаллизатора, рассчитанные по показаниям термопар в определенных точках его корпуса:
 - а) температура середины торцевой стенки Т1 в 190 мм от верха медных пластин;
 - б) температура в точке вблизи угла Т2 в 190 мм от верха медных пластин;
 - в) температура середины широкой стенки Т3 в 190 мм от верха медных пластин;
 - г) температура середины большой стенки Т4 в 360 мм от верха медных пластин;
 - д) температура середины большой стенки Т5 в 690 мм от верха медных пластин;
 - е) разность температур Т3 - Т1;
 - ж) отношение $(Т3 - Т1)/Т3$;
 - з) отношение $(Т3 - Т1)/Т4$.

Исследование тепловых потоков в медной стенке кристаллизатора и температур рабочей поверхности вблизи мениска расплавленного металла в середине и у края широкой грани проводилось на двух типах кристаллизаторов:

- кристаллизатор 1-го типоразмера серийного производства ПАО «Уралмашзавод» с петлевой схемой охлаждения и сечением 250х1070 мм, высотой рабочих стенок 1100 мм и круглыми каналами $\varnothing 15$ мм;
- кристаллизатор серийного производства ООО «Товарищество Южно-Уральских машиностроительных заводов» с прямоугольными каналами сечением 9х25 мм, размерами рабочей полости 200х980 мм и высотой рабочих стенок 1000 мм.

При исследовании теплообмена в кристаллизаторе с круглыми каналами в подготовленные отверстия устанавливали восемь однозонных термопар в защитной арматуре. Плотный контакт спая термопар с медью стенки обеспечивался путем вворачивания резьбовой части ее корпуса в резьбовые отверстия в стенке кристаллизатора. Схема установки термопарных датчиков в кристаллизатор с круглыми каналами показана на рис. 1.

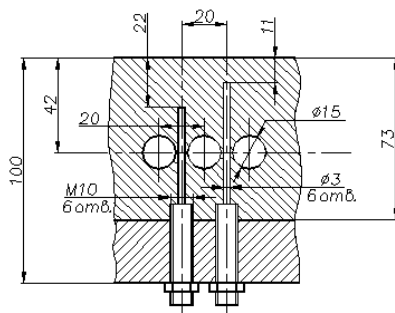


Рис. 1. Схема установки термопарных датчиков в рабочую стенку кристаллизатора с круглыми каналами

С целью повышения надежности измерительной схемы и выявления неоднородности распределения температур и тепловых потоков по широкой стенке кристаллизатора термопарные датчики устанавливались попарно и симметрично относительно друг друга.

Через компенсационные провода термопары соединялись с системой многоканальной регистрации, позволяющей одновременно производить измерения для 24 термопреобразователей. Структурно-функциональная схема такой системы показана на рис. 2.

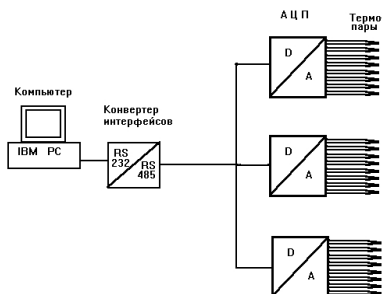


Рис. 2. Схема системы с многоканальной регистрацией

В системе многоканальной регистрации электрический сигнал термопар преобразовывался в цифровой код с помощью трех аналого-цифровых преобразователей (далее – АЦП). Количество входных каналов каждого АЦП равно восьми, а основная погрешность – 0,1 %. Считывание кодов АЦП производилось компьютером через конвертер согласования интерфейсов RS232/RS485 с частотой 1 раз в секунду. Было разработано специализированное программное обеспечение, которое давало возможность реализовать последовательный опрос датчиков и кодирование полученной информации. Кроме того, результаты измерения – дата и время (с интервалом не менее 1 секунды), а также сами значения температуры в °C записывали на жесткий диск персонального компьютера, входящего в состав системы.

В случае исследования теплообменных характеристик кристаллизатора с прямоугольными каналами использовались паспортизированные и специально изготовленные двухзонные термоэлектрические кабельные преобразователи типа КТХК (термоэлектроды «хромель-копель»). Отличием последних от ранее применяемых на

традиционном кристаллизаторе являются их совмещенные термоэлектроды, спаи которых разнесены по длине на 10 мм друг от друга и позволяют получить температуры в двух точках, распределенных по толщине стенки, но находящихся практически на одной линии, перпендикулярной рабочей поверхности кристаллизатора. Такая схема замера обеспечивает наиболее достоверное определение отводимых от слитка тепловых потоков по результатам измерений температур в местах расположения спаев многозонной термопары.

Тепловые потоки в этом случае определяли по разности фиксируемых парами датчиков температур, используя известную зависимость¹:

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta}, \quad (1)$$

где t_1 и t_2 – температуры, регистрируемые парными датчиками; δ – расстояние между ними (по глубине погружения в медную стенку); λ – коэффициент теплопроводности меди.

Погрешность определения теплового потока рассчитывалась по формуле:

$$\frac{\Delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{t_1 - t_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta}\right)^2}, \quad (2)$$

где Δq , $\Delta \lambda$, Δt , $\Delta \delta$ – погрешности определения плотности теплового потока, коэффициента теплопроводности, температуры и расстояния между термопарами: $\lambda = 385 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; $\Delta \lambda = 1 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$; $t_1 - t_2 \approx 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta t \approx 1^\circ\text{C}$; $\delta = 8 \text{ мм}$; $\Delta \delta \approx 0,2 \text{ мм}$.

При этих условиях погрешность определения теплового потока составила около 3 %.

Кроме того, была рассчитана температура на поверхности медной стенки по известной зависимости:

$$t_c = t_1 + q \frac{a}{\lambda}, \quad (3)$$

где t_c – температура рабочей поверхности стенки кристаллизатора; q – плотность теплового потока; t_1 – значение температуры, регистрируемое термопарой, ближайшей к рабочей поверхности; a – расстояние от этой термопары до рабочей поверхности; λ – коэффициент теплопроводности медной стенки кристаллизатора. Расчет данной температуры имеет важное прикладное значение для предупреждения возможной потери прочности медной стенки при ее перегреве и аварийного выхода из строя.

При исследованиях теплообмена в кристаллизаторе с прямоугольными каналами в подготовленные отверстия в широкой стенке устанавливались три, а в узкой – две двухзонные термопары в защитной арматуре. В места установки шпилек, которые предназначены для притягивания медной стенки к поверхности стального корпуса, в точках измерения фиксировали специально изготовленные резьбовые вставки. Плотный контакт спая термопар с медью стенки обеспечивался путем вворачивания

¹ Габеля Д. И., Кабаков З. К., Грибкова Ю. В. Теплофизические основы технологии непрерывной разливки стали. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 400 с.

резьбовой части ее корпуса в отверстия указанных вставок. Схема установки термопарных датчиков в рабочую стенку кристаллизатора с прямоугольными каналами показана на рис. 3, 4.

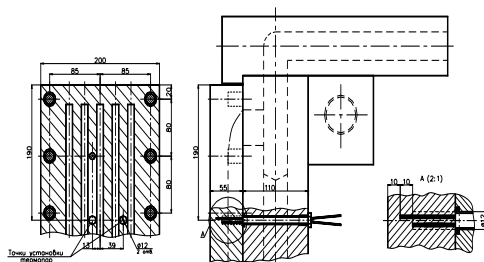


Рис. 3. Схема расположения термопарных датчиков в узкой стенке кристаллизатора с прямоугольными каналами

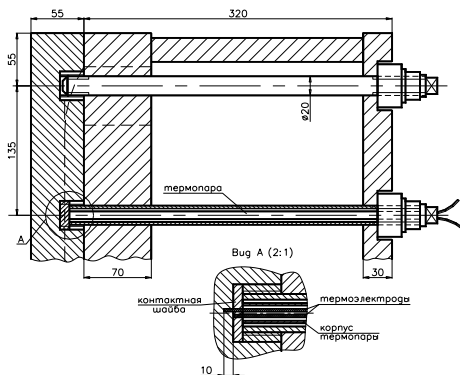


Рис. 4. Схема расположения термопарных датчиков в широкой стенке кристаллизатора с прямоугольными каналами

Исследование изменений температур и тепловых потоков в кристаллизаторе с прямоугольными каналами проводили при естественном ходе технологического процесса и изменениях расхода охладителя – 550, 600, 640 м³/ч.

На опытном ручье МНЛЗ № 1 цеха разливки электростали ПАО «Северсталь» установили кристаллизатор, оборудованный пятью двухзонными термопарами в соответствии со схемой установки, описанной выше. Места расположения термопар на стенках кристаллизатора обозначены на рис. 5.

При разливке стали контролировали расход воды, скорость разливки, текущую и мерную длину, уровень металла (визуально) и температуры поверхности стенки кристаллизатора в точках установки термопарных датчиков. По возможности поддерживали стабильный расход шлакообразующей смеси.

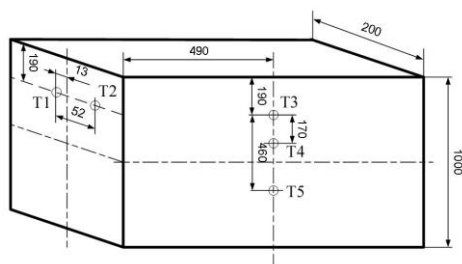


Рис. 5. Схема установки термопарных датчиков в рабочую стенку кристаллизатора с прямоугольными каналами

Из схемы следует, что пары датчиков T1, T2, а также T3, T4 и T5 устанавливались симметрично относительно друг друга. Такое расположение повышает надежность измерительной схемы и позволяет выявить неоднородность распределения температур и тепловых потоков по широкой и узкой стенкам кристаллизатора.

Для определения работоспособности и чувствительности измерительного комплекса проводили апробацию измерительной системы в течение одной плавки для кристаллизатора с круглыми каналами и серии плавков для кристаллизатора с прямоугольными каналами. Разливку всех марок стали производили в соответствии с действующей технологической инструкцией. Скорость разливки контролировали при помощи штатных датчиков, установленных на специализированном приборе для измерения скорости разливки и температуры поверхности слитка. Фрагменты диаграмм пробных измерений температур термопарными датчиками, расположенными в стенках кристаллизатора с круглыми каналами, показаны на рис. 6, кристаллизатора с прямоугольными каналами – на рис. 7.

Из анализа указанных диаграмм следует, что при начале разливки и в момент времени, соответствующий прохождению мениска металла через горизонты расположения термопар, на всех термодатчиках фиксируется определенное последовательное значительное повышение, а затем снижение температуры (участок 1 на рис. 7).

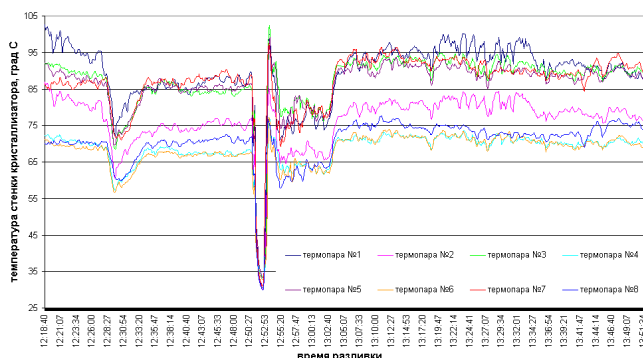


Рис. 6. Фрагмент диаграммы изменения температуры рабочей стенки кристаллизатора с круглыми каналами

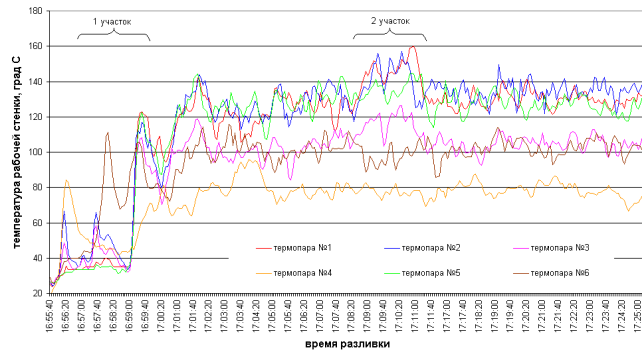


Рис. 7. Фрагмент диаграммы изменения температуры рабочей стенки кристаллизатора с прямоугольными каналами

Для проверки достоверности получаемой информации, а также оценки влияния положения мениска металла на изменение температур внутри стенки кристаллизатора проводили кратковременное его снижение на 50–70 мм ниже установленного технологической инструкцией уровня. При этом зафиксировано увеличение температур в верхних горизонтах расположения термопар, которое составляет 25–30 °C (участок 2 на рис. 7).

Исследование изменений температур и тепловых потоков в кристаллизаторе с круглыми каналами проводили при естественном ходе технологического процесса и изменениях скорости разлива в диапазоне от 0 до 0,45 м/мин.

Исходя из данных диаграмм измеренных температур поверхности стенок в точках контроля и расчетных значений тепловых потоков при эксплуатации опытного кристаллизатора, процесс изменения температур и тепловых потоков характеризуется значительной нестационарностью как при переходных режимах литья, так и при постоянных скоростях разлива.

Для опытного варианта измерительной системы был создан расчетный алгоритм, блок-схема которого показана на рис. 8. В этом алгоритме реализован цикл опроса датчиков измерительной системы и расчет параметров тепловой работы кристаллизатора: теплового потока и температуры поверхности стенки. Ввод исходных данных: расхода воды на охлаждение стенок кристаллизатора, температуры расплава (результаты трех замеров по ходу разлива) и химического состава металла в проковше – производится в соответствии с информацией из журнала паспорта плавки и текущих замеров при запуске программы вручную. Данные о скорости разлива вводятся с бесконтактного датчика скорости вытягивания слябовой заготовки. Использование алгоритма и реализующей его программы, помимо сбора данных о режимах работы зоны первичного охлаждения МНЛЗ, позволяет предупреждать технологический персонал разлива о перегреве стенок, что способствует предотвращению возможных аварийных ситуаций и снижает вероятность преждевременного выхода из строя дорогостоящего оборудования.

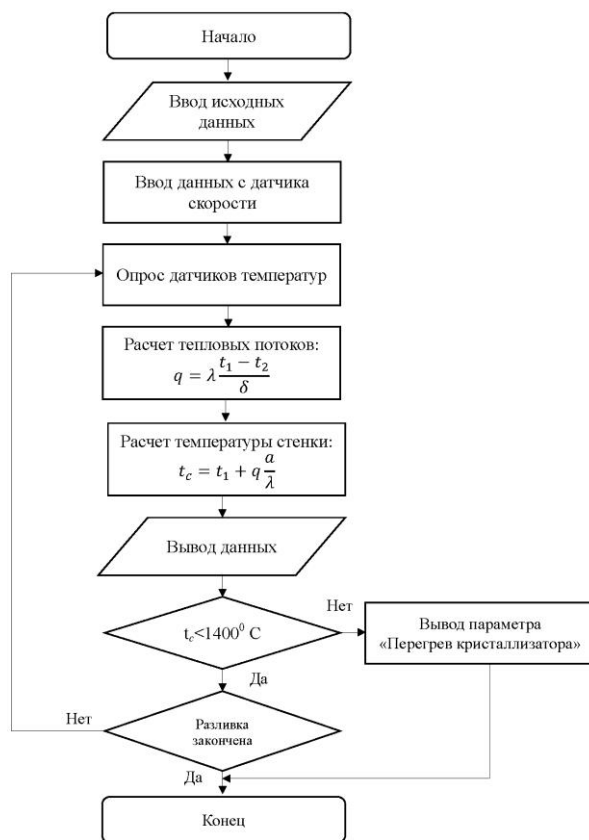


Рис. 8. Блок-схема алгоритма обработки информации

В целом полученные данные свидетельствуют о работоспособности принятой измерительной схемы и позволяют перейти к следующему этапу работы с применением переменных условий охлаждения кристаллизатора.

Выводы

Основные результаты выполненной работы заключаются в следующем:

1. Создана методика проведения исследований и измерений с применением в измерительном комплексе специально разработанных двухзонных термопарных датчиков.
2. Предложен новый способ установки термопарных датчиков в кристаллизатор без существенного изменения его конструкции. Данный способ обеспечивает простой доступ к датчикам (при необходимости их замены).
3. По проведенным экспериментальным промышленным исследованиям установлена взаимосвязь показателей качества поверхности слывовых заготовок и технологических параметров, теплотехнических показателей работы кристаллизатора и химического состава разливаемой стали.
4. Разработаны и реализованы в опытно-промышленном варианте система контроля температуры и тепловых потоков в медной стенке кристаллизатора, а также

программное обеспечение для накопления и обработки диагностической информации на ЭВМ. Применение этой системы в комплексе со средствами статистической обработки данных позволяет разработать систему оптимального управления режимами охлаждения слитка и установить различные технологические параметры разлива для разных марок стали. В частности, использование предложенного способа измерения тепловых потоков в стенках кристаллизатора дает возможность обособленно управлять подачей холодильников-иннокуляторов¹.

5. Результаты проведенных исследований и разработанные методики апробированы на производстве и переданы для промышленного использования в цех выплавки электростали ПАО «Северсталь».

Литература

Габеля Д. И., Кабаков З. К., Грибова Ю. В. Теплофизические основы технологии непрерывной разливки стали. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 400 с.

Туманов Д. В., Кузьминов А. Л., Кабаков З. К., Пешев И. Д., Виноградов В. П. Опытная промышленная реализация технологии и оборудования для подачи холодильников-иннокуляторов в кристаллизатор УНРС в условиях ПАО «Северсталь» // *Металлург*. – 2016. – № 7. – С. 41–46.

Шестаков Н. И., Кузьминов А. Л., Калягин Ю. А. К вопросу управления теплообменом в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок // *Вестник Череповецкого государственного университета*. – 2012. – № 2 (39). – Т. 2. – С. 27–28.

References

Gabelaia D. I., Kabakov Z. K., Gribkova Yu. V. *Teplofizicheskie osnovy tekhnologii nepreryvnoi razlivki stali* [Thermophysical fundamentals of continuous casting technology]. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriia, 2019. 400 p.

Tumanov D. V., Kuz'minov A. L., Kabakov Z. K., Peshev I. D., Vinogradov V. P. Opytno-promyshlennaiia realizatsiia tekhnologii i oborudovaniia dlia podachi kholodil'nikov-innokulyatorov v kristallizator UNRS v usloviakh PAO "Severstal'" [Pilot industrial implementation of technology and equipment for supplying refrigerators-inoculators to the mold of a CCS in the conditions of PAO "Severstal'"]. *Metallurg* [Metallurgist], 2016, no. 7, pp. 41–46.

Shestakov N. I., Kuz'minov A. L., Kaliagin Yu. A. K voprosu upravleniia teploobmenom v kristallizatore mashiny nepreryvno lit'ia zagotovok [On the issue of heat transfer control in a mold of a continuous casting machine]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2012, no. 2, vol. 2, pp. 25–26.

Для цитирования: Виноградов В. П., Кузьминов А. Л. Разработка и испытание измерительного комплекса для контроля тепловых параметров работы кристаллизатора МНЛЗ // *Вестник Череповецкого государственного университета*. – 2020. – № 4 (97). – С. 9–18. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-4-97-1

¹ Туманов Д. В., Кузьминов А. Л., Кабаков З. К., Пешев И. Д., Виноградов В. П. Опытная промышленная реализация технологии и оборудования для подачи холодильников-иннокуляторов в кристаллизатор УНРС в условиях ПАО «Северсталь» // *Металлург*. – 2016. – № 7. – С. 41–46.

For citation: Vinogradov V. P., Kuzminov A. L. Development and testing of a measuring complex for monitoring thermal parameters of the continuous casting mold. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2020, no. 4 (97), pp. 9–18. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-4-97-1