

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЖИДКОЙ СТАЛИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРАХ**

### **Аннотация**

Рассмотрен вихретоковый преобразователь с постоянным полем возбуждения, предназначенный для контроля уровня жидкого металла в машинах непрерывной разливки стали. Постоянное поле возбуждения позволяет отстроиться от мешающих факторов, характерных для всех используемых сегодня типов приборов контроля уровня металла: радиоизотопного и вихретокового принципа действия. Предложен технический облик и изучены основные характеристики преобразователя с постоянным магнитным полем. Верность полученных данных проверена в промышленных условиях.

**Ключевые слова:** вихретоковый контроль, разливка стали, постоянный магнит, кристаллизатор

### **Введение**

Сегодня в черной металлургии применяется преимущественно непрерывная разливка с помощью кристаллизаторов. Жидкий металл непрерывно подается в медную трубу, открытую с двух сторон и называемую гильзой. В гильзе металл кристаллизуется, после чего сформировавшийся слиток вытягивают снизу кристаллизатора в зону вторичного охлаждения. Разливка автоматизирована: преобразователь, измеряющий уровень металла, контролирует заполнение кристаллизатора, его сигнал используется для управления расходом жидкого металла, либо скоростью вытягивания слитка. Чтобы металл не прилипал к гильзе, при разливке добавляют масло или шлакообразующую смесь (ШОС): смесь частично плавится при контакте с металлом и защищает его от окисления. Для равномерного распределения смеси по периметру слитка кристаллизаторы качают с амплитудой 3–4 мм и частотой 2–4 Гц. Подробно технология непрерывной разливки описана в [1].

Уровень металла в гильзе контролируют изотопными и электромагнитными приборами. Источник и приемник изотопного прибора расположены внутри кристаллизатора. Помимо радиационной опасности, изотопные приборы характеризуются чувствительностью к ШОС, слой которой достигает до 40–60 мм. Чувствительность к ШОС составляет от 50 до 80% чувствительности к металлу по данным производителя [2]. Периодическое добавление ШОС в кристаллизатор изотопный прибор воспринимает как повышение уровня металла, из-за чего система стабилизации быстро понижает истинный уровень металла, что может привести к браку заготовки [1].

В зависимости от типа кристаллизатора используют разные конфигурации электромагнитных приборов: с штативными, бортовыми или встроенными вихретоковыми преобразователями [3, 4]. Бортовые и штативные преобразователи используются только на кристаллизаторах большого сечения.

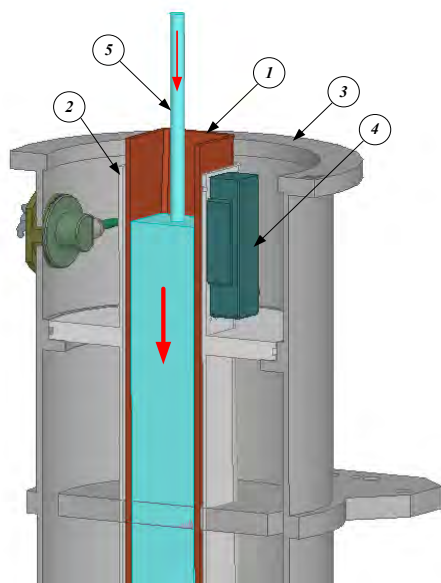


Рис. 1. Основные узлы сортового кристаллизатора: 1 – гильза, 2 – нержавеющая обечайка, 3 – корпус, 4 – датчик уровня металла, 5 – жидкий металл

Универсальным мог бы стать встроенный преобразователь [5, 6] (рис. 1), технических препятствий для его размещения в любом кристаллизаторе нет. Встроенный преобразователь контролирует уровень косвенно по величине электропроводности медной стенки: чем выше уровень металла, тем выше средняя температура стенки в области контроля. Прямой контроль металла таким преобразователем затруднен из-за малости полезного сигнала по сравнению с сигналом от нагрева стенки гильзы [6]. Косвенный принцип контроля является главным недостатком встроенного преобразователя: тепловой контакт между металлом и кристаллизатором осуществляется через слой ШОС. Повышение уровня сопровождается

захватом сухой ШОС и ее плавлением, из-за чего нагрев гильзы запаздывает относительно подъема уровня. В сигнале преобразователя возникает запаздывание до нескольких секунд – чем больше сечение кристаллизатора, тем больше запаздывание. В результате встроенные преобразователи используются с гильзами малого сечения, где в качестве смазки используют масло. С точки зрения металлургии, идеальным вариантом преобразователя представляется встроенный в кристаллизатор электромагнитный преобразователь, способный контролировать непосредственно уровень металла. Создать такой преобразователь на сегодняшний день никому не удалось, хотя потребность в нем высока, и задача его создания весьма актуальна.

#### **Чувствительный элемент с постоянными магнитами**

Принцип работы нового вихретокового преобразователя состоит в создании постоянного относительно кристаллизатора магнитного поля. При непрерывном качании кристаллизатора ЭДС и вихревой ток возникнут только в жидком металле, перемещающемся в постоянном магнитном поле.

Для создания постоянного магнитного поля удобно использовать постоянный магнит. Если в поле постоянного магнита перемещать электропроводный объект, то возникает вихревой ток, направленный перпендикулярно векторам магнитной индукции и скорости. Вихревой ток максимален под магнитом, вне магнита ток замыкается. П-образный магнит

(рис. 2) предпочтительнее, поскольку под разноименными полюсами возникают вихревые токи противоположной направленности. При верном подборе габаритов П-образного магнита в объекте возникает замкнутый контур вихревых токов.

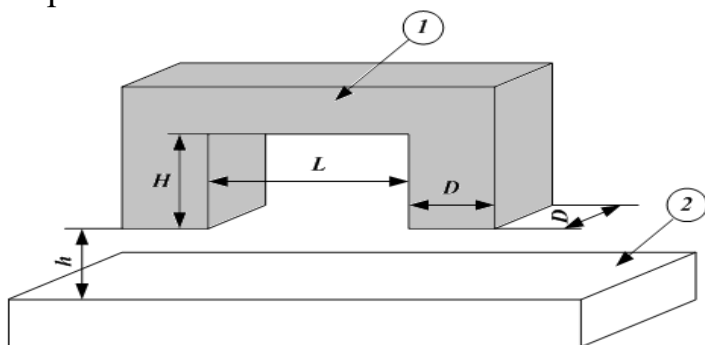


Рис. 2. Размеры постоянного магнита: 1 – П-образный магнит, 2 –электропроводный объект (жидкий металл)

Поле вихревых токов удобно фиксировать катушкой, помещенной между полюсов магнита, параллельно контуру вихревого тока. Качания кристаллизатора по форме близки к синусоидальным, и в измерительной катушке наведется ЭДС с частотой качаний, а амплитуда будет зависеть от положения уровня относительно чувствительного

элемента. Временное запаздывание сигнала ЭДС катушки относительно изменения уровня принципиально отсутствует. В силу конструктивных особенностей кристаллизаторов следует рассчитывать на расстояния 15–30 мм от магнитов до жидкого металла и на ширину магнитов до 80 мм, высота жестко не лимитирована. Для выбора размеров магнитной системы применялись математическое моделирование. Размеры магнита и расстояние до металла варьировались для нахождения оптимальных габаритов магнита. Электропроводность жидкого металла составляет чуть менее 1 МСм/м, размеры моделируемого объема металла  $100 \times 100 \times 500$  мм.

### Результаты моделирования

Моделирование постоянных П-образных магнитов показало, что для  $D < 30$  мм и высоты  $H < 50$  мм форму нормированного распределения вихревых токов под полюсом вдоль поверхности и по глубине объекта можно считать примерно одинаковыми (рис. 3), размеры магнитов влияют только на величину вихревого тока. Увеличение  $D$  от 10 до 35 мм приводит к линейному увеличению плотности вихревого тока по всей глубине объекта, а увеличение высоты  $H$  с 10 до 50 мм приводит к двукратному увеличению максимальной плотности тока. Свыше  $H = 30$  мм влияние высоты на вихревой ток уже незначительное. При любом габарите магнита контролируемая глубина составляет не менее 20 мм при любой частоте качания кристаллизатора. Влияние зазора  $h$  между постоянным магнитом и жидким металлом практически совпадает с зависимостью, приведенной на рис. 3, так как вихревые токи настолько малы, что практически не оказывают влияния на результирующее поле, и затухание токов с расстоянием определяется только убыванием индукцией поля магнита. Увеличение расстояния с 15 до 30 мм приводит к снижению плотности вихревого тока в 2 раза.

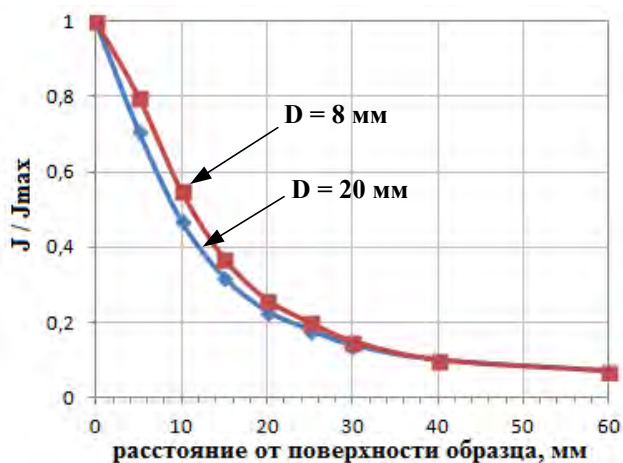


Рис. 3. Затухание вихревого тока по глубине образца при частоте качаний 4 Гц и амплитуде 3 мм

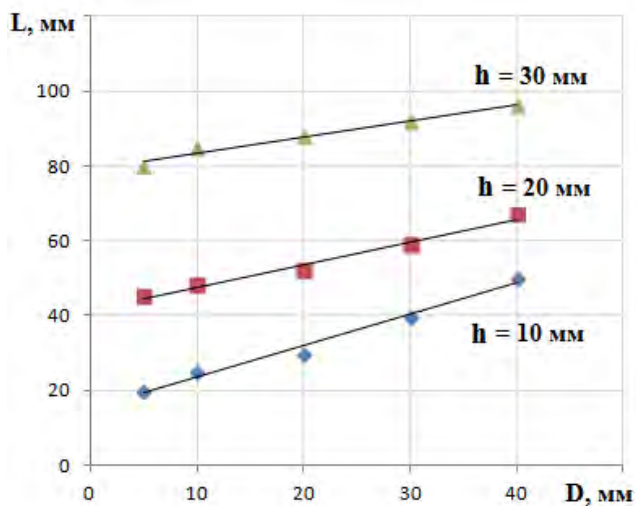


Рис. 4. Зависимость L от D и h

элемента – зависимость амплитуды напряжения в измерительной обмотке  $U$  от положения границы металла  $Z_m$ . Поскольку металл колеблется с амплитудой 4 мм, под  $Z_m$  нужно понимать среднее за период качаний положение поверхности металла. Выходная характеристика была получена расчетным и проверена экспериментальным способом (рис. 5). В лабораторном опыте использовалась измерительная катушка с 3000 витков диаметром 15 мм по среднему витку, напряжение усиливалось предварительным усилителем с ФНЧ в 10000 раз. Чувствительный элемент расположен с зазором 10 мм от неподвижной медной пластины толщиной 10 мм, имитирующей медную стенку кристаллизатора. В качестве имитатора жидкого металла использовалась пластина из немагнитной нержавеющей стали толщиной 10 мм (проводимости жидкой и нержавеющей сталей отличаются на 5%). В лабораторном опыте пластина перемещалась с помощью электропривода, амплитуда качаний составляла 4 мм, частота качаний 4 Гц.

Существует оптимальное расстояние между полюсами L. При малом расстоянии магнитное поле замыкается, не проходя через металл, а при большом расстоянии общего вихретокового контура между магнитами не возникает. Опытным путем была установлена зависимость оптимального размера L от h и D.

С помощью математической модели определялись полезный сигнал при полном перекрытии металлом чувствительного элемента и L, для которой амплитуда сигнала была максимальной, бралась как оптимальная. Оптимальное соотношение между L и D для  $h = 30$  мм показано на рис. 4. На практике удобно не подбирать всякий раз размеры магнитопровода под возможный зазор h, а обеспечивать нужное расстояние до металла h при фиксированных L и D.

Теперь рассмотрим выходную характеристику чувствительного

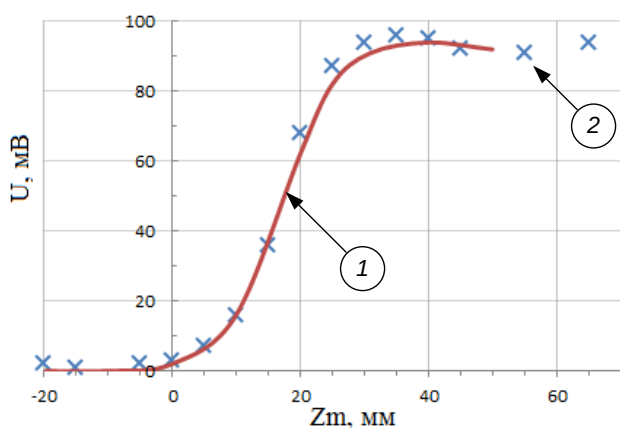


Рис. 5. Выходная характеристика чувствительного элемента: 1- результат моделирования, 2 – лабораторный эксперимент

Совпадение модели и лабораторного опыта хорошее. Максимум чувствительности находится под вторым полюсом П-образного магнита. По мере перемещения металла слева направо сначала металл перекрывает только один полюс П-образного магнита (координаты от -20 до 0 мм по рис. 5). Замкнутого контура вихревых токов нет, и ЭДС в измерительной катушке будет мала. Такое положение сохраняется до тех пор, пока

металл не попадает в зону второго полюса магнита. Когда под вторым полюсом возникает вихревой ток, образуется замкнутый контур тока в виде витка, расположенного под измерительной катушкой. Чем больше металл перекрывает второй полюс, тем больше вихревой ток по величине, что и приводит к росту напряжения. Зона чувствительности исследованного чувствительного элемента меньше его размера. Для увеличения зоны чувствительности можно использовать постоянные магниты с большим размером  $D$  и при большем расстоянии между полюсами  $L$ .

#### **Результаты промышленного исследования (Оскольский электрометаллургический комбинат)**

В опыте параллельно фиксировались показания штатного изотопного прибора контроля уровня, по показаниям которого стабилизируется уровень металла в кристаллизаторе. Сравнение показаний изотопного прибора и разработанного опытного образца электромагнитного преобразователя приведено на рис. 6.

Показания опытного электромагнитного преобразователя хорошо совпадают с показаниями изотопного прибора контроля уровня с учетом того, что изотопный прибор чувствителен к количеству ШОС, а также с учетом несовпадения зон контроля двух измерителей уровня в кристаллизаторе.

**Закключение.** Проведенные исследования показывают, что технически преобразователь с постоянным полем возбуждения реализуем. Его выходной сигнал содержит исключительно сигнал от металла и лишен мешающих факторов, связанных с кристаллизатором. Это основное достоинство перевешивает недостатки: физически малый сигнал, необходимость дополнительного встроенного вихретокового преобразователя для обеспечения требуемого диапазона измерения. Использование преобразователя с постоянным магнитным полем открывает возможность создания встроенных вихретоковых преобразователей для контроля уровня в кристаллизаторах любого типа и размера без погрешностей, характерных для существующих

приборов контроля уровня жидкой стали. На данном этапе предложенная конструкция чувствительного элемента нуждается в дальнейшей оптимизации и проведении серии испытаний в промышленных условиях.

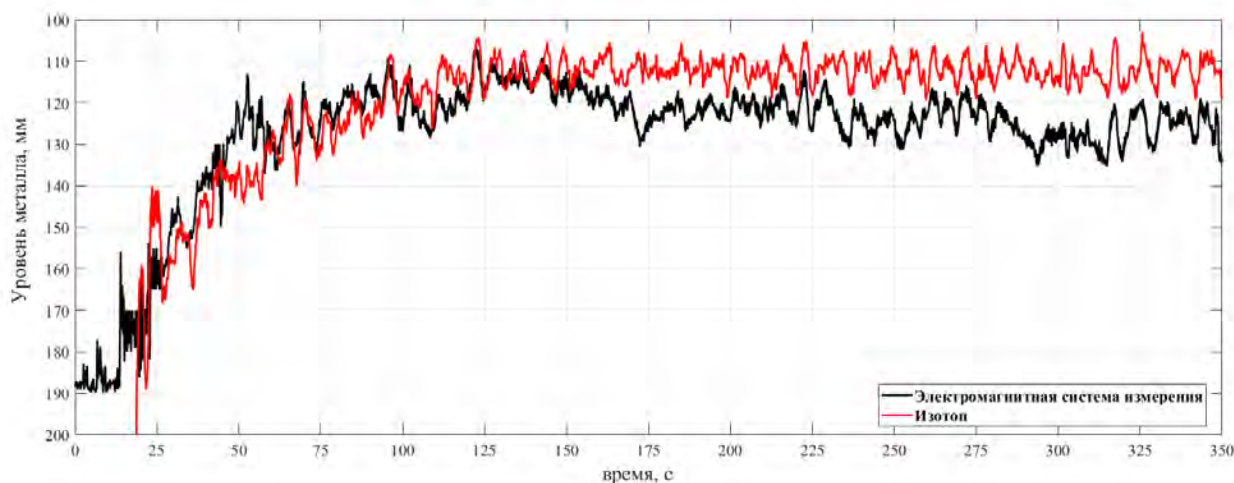


Рис. 6. Сравнение показаний двух систем измерения уровня на старте разливки

### Список литературы

1. **Thomas, B. G.** Continuous casting of steel / B. G. Thomas // Chapter. – 2001. – Т. 15. – С.499-540.
2. GAMMAcast radiometric mold level gauge LB 67xx /LB 6760. URL: <https://www.berthold.com/en/process-control/products/level-measurement/mould-level-measurement/gammacast/> (дата обращения 13.06.2024)
3. **Katankin, R. A.** An eddy-current probe for testing the level of molten steel / R. A. Katankin, A. D. Pokrovsky // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Т. 46. – С.216-221.
4. **Катанкин, Р. А.** Вихретоковые преобразователи в металлургическом производстве / Р. А. Катанкин и др. // Приборы. – 2011, №. 12. – С.1-6.
5. **Mörmann, D. S.** Recent progress in fast and accurate meniscus level measurement for continuous casting machines / D. Mörmann, J. Schmid, S. Spagnul // Proc. 7th European Continuous Casting Conference (ECCC) 2011, 27 June–1 July. – 2011.
6. **Savin, I.** Problems of Eddy Current SensorImbedded Type in Mould Level Control / I. Savin, I. Terekhin // INTERNATIONAL ACADEMIC FORUM AMO–SPITSE–NESEFF. – 2016. – С.27-27.

Контакты:

[terekhin.iv@mail.ru](mailto:terekhin.iv@mail.ru) (Терехин Иван Владимирович)

[slavinskayacatherine@yandex.ru](mailto:slavinskayacatherine@yandex.ru) (Славинская Екатерина Андреевна)