



КОНТРОЛЬ И СТАБИЛИЗАЦИЯ УРОВНЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКЕ

В. Г. Соловьев, Ю. Н. Ланкин

Представлены результаты исследования условий для автоматического видеоконтроля уровня ванны при электронно-лучевом переплаве. Дан анализ видеоизображений ванны расплавленного металла и изложены принципы измерения его уровня с помощью видеокамеры. Указаны способы борьбы с помехами, предложены принципы повышения точности измерения. Рассмотрены вопросы повышения надежности измерения, описаны способы диагностики работоспособности системы видеоконтроля.

Results of investigation of conditions for automatic video monitoring of pool level in electron beam remelting are presented. Analysis of video imaging of molten metal pool is given and principles of measuring its level using video cameras are described. Methods of disturbances elimination are shown and principles of improving the measurement accuracy are suggested. The problems of increasing the reliability of measurements are considered and methods of diagnostics of performance of video monitoring system are described.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; уровень ванны расплавленного металла; видеоконтроль; цифровая обработка изображения; стабилизация уровня

При электронно-лучевой плавке (ЭЛП) уровень расплавленного металла относительно верхней кромки кристаллизатора постоянно меняется. Это происходит вследствие неравенства скоростей вытягивания слитка и поступления расплавленного металла в кристаллизатор. Относительно стабильная скорость поступления расплавленного металла в кристаллизатор имеет место только в случае редко применяемой в настоящее время схемы переплава расходуемой заготовки непосредственно в кристаллизатор.

При ЭЛП с промежуточной емкостью на установках с малой производительностью металл поступает в кристаллизатор периодически. После наполнения промежуточной емкости оператор прогревает электронным лучом сливной носок, через который порция жидкого металла сливается в кристаллизатор. На установках большой производительности скорость поступления металла в кристаллизатор считают постоянной, но на практике она подвержена значительным колебаниям вследствие непостоянства пропускной способности сливного носка, изменения вязкости жидкого металла в промежуточной емкости и т. п.

Непрерывное вытягивание слитка из кристаллизатора с постоянной скоростью практически не применяют из-за проблем с качеством поверхности по-

лучаемого слитка. Как правило, вытягивание слитка производится оператором периодически, когда уровень расплавленного металла достигает некоторого верхнего предела и прекращается после достижения желаемого нижнего уровня.

Уровень жидкого металла относительно верхней кромки кристаллизатора оператор определяет визуально по границе раздела между светящейся поверхностью жидкого металла и относительно темной стенкой кристаллизатора. Все эти операции выполняются оператором вручную и по определению не могут осуществляться с высокой точностью и повторяемостью.

Превышение уровня расплавленного металла верхней кромки кристаллизатора или понижение его ниже уровня начала конусности кристаллизатора приводит к аварийной ситуации — вытеканию жидкого металла из кристаллизатора. Нестабильность периода заливки и вытягивания слитка из кристаллизатора способствует нестабильности структуры металла слитка и качества поверхности слитка.

В ИЭС им. Е. О. Патона давно ведутся работы по созданию систем контроля и автоматического регулирования уровня жидкого металла в кристаллизаторе при ЭЛП. Вследствие специфических особенностей ЭЛП среди множества возможных датчиков предпочтение отдано телевизионным благодаря их высокой информативности, надежности контроля и возможности визуализации регулируемого объекта [1–4]. Во всех этих системах обработку видеоизображения осуществляли специально

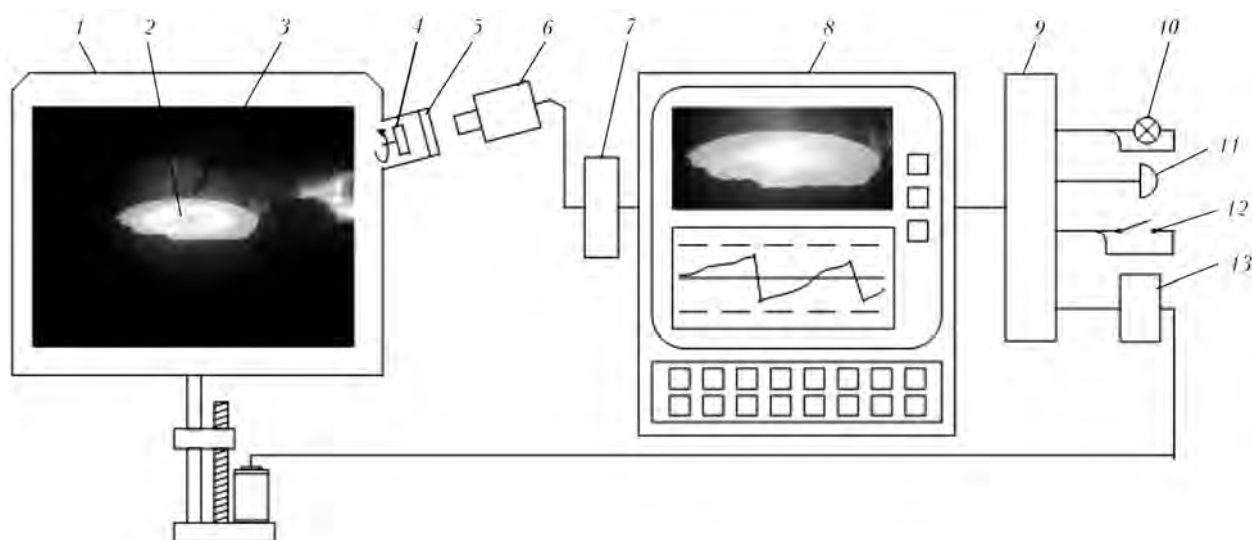


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического регулирования уровня ванны жидкого металла

созданными дискретно-аналоговыми контроллерами, что значительно ограничивало их функциональные возможности.

Развитие современной вычислительной техники предоставляет широкие возможности по числовой обработке видеоизображений на управляющем компьютере, позволяющей улучшать изображения, выделять области интереса, выполнять пороговое разделение, выделение границы расплавленного металла и кромок кристаллизатора, фильтрацию с помощью эвристических алгоритмов значительных помех, например от светящегося гарнисажа на стенках кристаллизатора или потока жидкого металла из промежуточной емкости, рассчитывать расстояние от поверхности расплавленного металла до верхней кромки кристаллизатора, вырабатывать управляющие воздействия на исполнительный механизм вытягивания формируемого слитка.

Ниже описана новая компьютерная телевизионная система контроля и стабилизации уровня жидкой металлической ванны при ЭЛП. Структура системы приведена на рис. 1. Контроль уровня жидкого металла сводится к определению границы раздела между светящейся поверхностью жидкого металла 2 и темной стенкой кристаллизатора 3. Наблюдение осуществляется через смотровое окно 5 с помощью установленной снаружи плавильной камеры 1, прибора с зарядовой связью видеокамеры 6.

Для предохранения стекла смотрового окна от напыления применена стробоскопическая система 4, представляющая собой вращающийся с большой скоростью диск с узкими прорезями.

Сформированный видеокамерой видеосигнал поступает на устройство видеозахвата 7 промышленного компьютера 8. Устройство видеозахвата 7 оцифровывает видеосигнал и передает его в компьютер. Последний выделяет из кадра зону интереса, в которой содержится полезная информация, фильтрует изображение от помех, создает бинарное изображение ванны расплавленного металла, используя отсечение по порогу яркости, выделяет границы ванны, рассчитывает расстояние поверхности ванны от верхнего среза кристаллизатора, отображает всю

текущую информацию на экране монитора и записывает ее в память.

Управляющие сигналы компьютера через параллельный порт поступают на устройство связи с объектом 9. Сформированные устройством 9 сигналы передаются на устройства управления, сигнализации и контроллер привода вытягивания слитка 13. Используется световая 10 и звуковая 11 аварийные сигнализации системы, а также переключатель «Автомат/Ручной» для выбора режима регулирования уровня ванны 12.

Испытания системы осуществляли на промышленной электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью на установленной мощности 1,2 МВт. Диаметр кристаллизатора составляет 650 мм, расстояние от защитного стекла смотрового окна до видимого участка дальней кромки кристаллизатора — 1700 мм.

Основным признаком для распознавания образа объекта контроля является наличие светящегося пятна жидкого металла, имеющего характер цельности и относительно равномерной яркости. Остальное пространство изображения составляет темное обрамление пятна расплавленного металла, являющееся холодной темной стенкой кристаллизатора и деталями конструкции плавильной камеры. Точность определения уровня в значительной степени определяется контрастностью изображения.

Одним из факторов, влияющих на контрастность изображения, является траектория электронного луча, перемещающегося по поверхности жидкого металла и изменяющего его яркость. На рис. 2, а приведены изображения кристаллизатора при нагреве поверхности жидкого металла электронным лучом, перемещающимся по круговой траектории с максимальным I и минимальным II диаметрами. Соответствующие гистограммы яркостей пикселей изображений показаны на рис. 2, б.

Другим фактором, влияющим на контрастность изображения, является значение диафрагмы объектива. При сильном открытии диафрагмы относительно «нормального» значения происходит насыщение по яркости большого количества пикселей

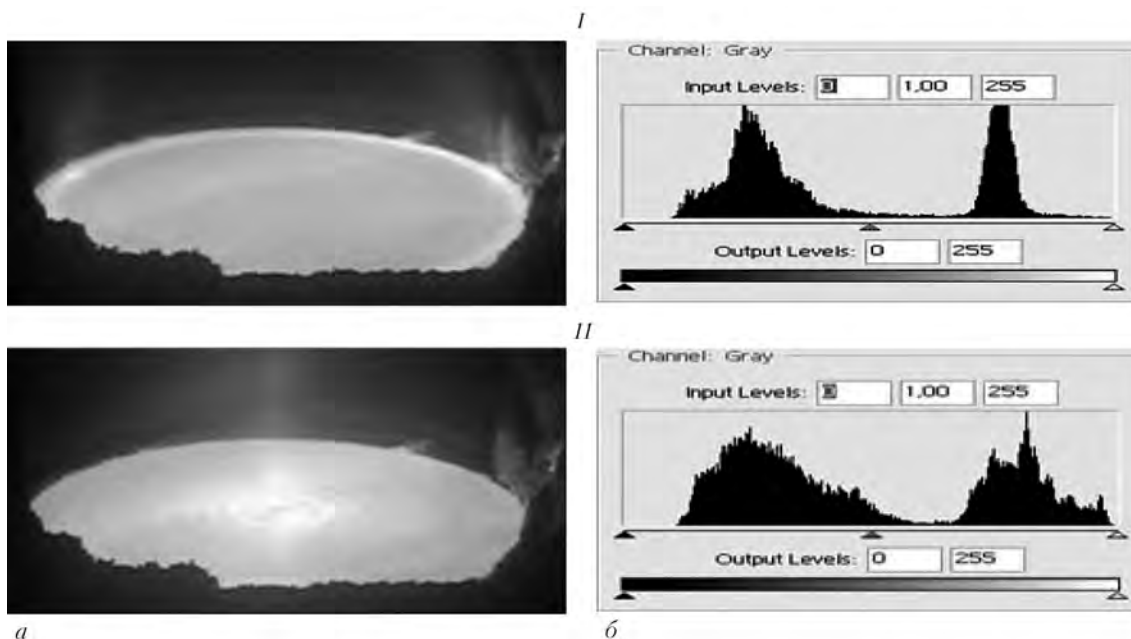


Рис. 2. Изображения кристаллизатора $d = 650$ мм: *a* — переплав титана; *б* — яркостные гистограммы изображения

изображения, и гистограмма смещается вправо с потерей информации о большом количестве ярких пикселей (рис. 3, *I*). И наоборот, при сильном прикрытие диафрагмы относительно «нормального» значения происходит смещение гистограммы влево с потерей информации о темных пикселях (рис. 3, *II*). Аналогично уменьшению значения диафрагмы действует запыление парами переплавляемого металла стекла смотрового окна.

Критерием оптимальности значения диафрагмы может быть условие соблюдения границ разрядной сетки яркости изображения (0...255), с одной стороны, и максимальное использование всего диапазона разрядной сетки яркости, с другой.

Для выделения из изображения контура ванны жидкого металла, необходимого для расчета уровня

ванны, производится преобразование полутонового изображения с диапазоном яркости 0...255 в бинарное, имеющее только два значения яркости — 0 и 255. Ключевым моментом в операции бинаризации является выбор порога бинаризации $J_{\text{пор}}$. Пиксели бинарного изображения принимают значение 0 (черный цвет), в случае если яркость соответствующих пикселей исходного изображения меньше порога бинаризации $J_{\text{пор}}$, и 255 (белый цвет), если яркость соответствующих пикселей исходного изображения больше или равна порогу бинаризации. После бинаризации изображения на границе белого и черного мы получаем контур пятна расплавленного металла, который можно будет использовать для расчета уровня ванны. Эксперименты по бинаризации с различными значениями их границ даже для одного и того же изображения свидетельствуют

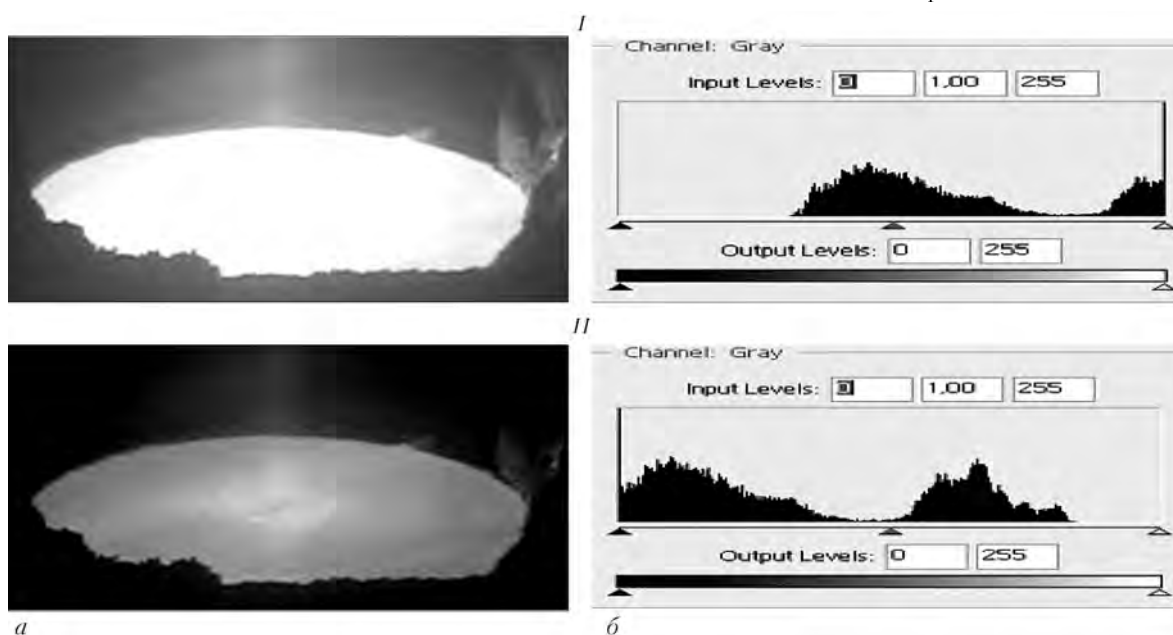


Рис. 3. Смещение гистограммы вправо для изображения (*I, a*) при открытии (*I, б*) и влево для изображения (*II, a*) при закрытии (*II, б*) диафрагмы объектива на 20 % относительно изображения на рис. 2, *II, a*

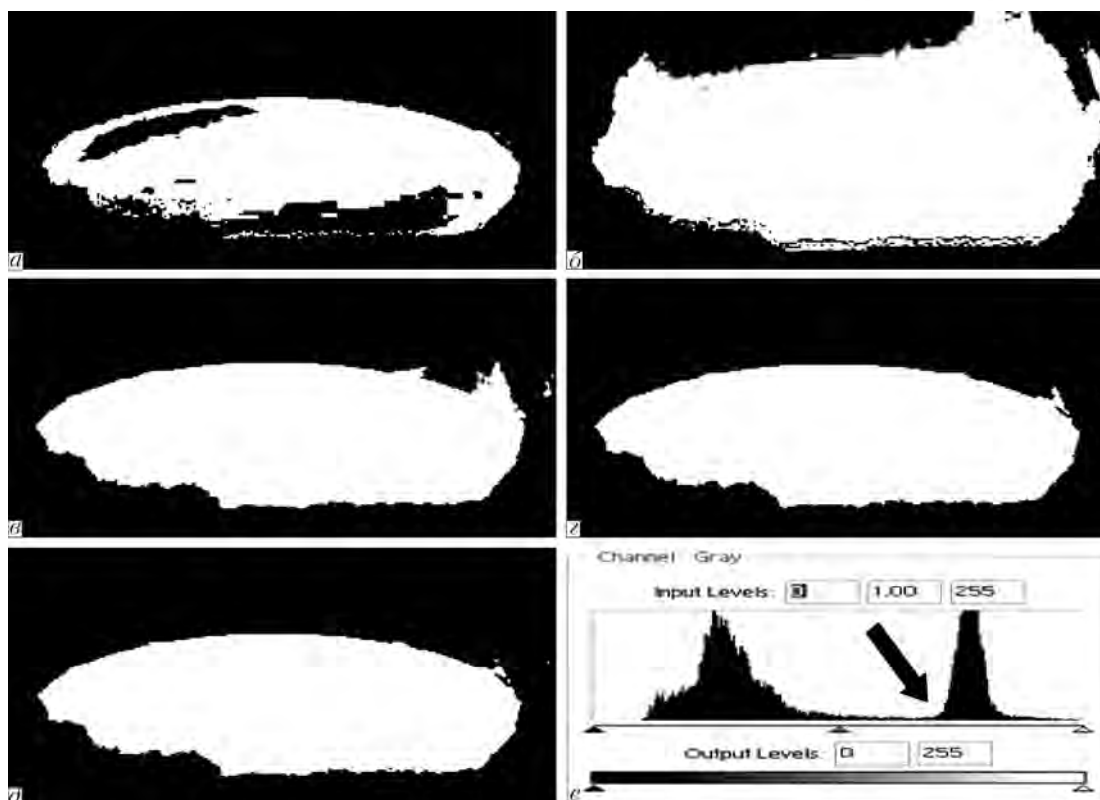


Рис. 4. Результаты бинаризации изображения рис. 2 при различных ее границах и следующих значениях $J_{\text{пор}}$: а – 200; б – 60; в – 110; г – 170; д – 180; е – гистограмма изображения (д)

о том, насколько важно правильно установить границу бинаризации для точности определения уровня ванны (рис. 4, а–д).

Эмпирическим путем определено «место» порога бинаризации, отмеченное стрелкой на рис. 4, е, которое размещается на левом склоне правого максимума в точке перегиба.

Порог бинаризации зависит от гистограммы изображения и в общем случае лежит в пределах между самой яркой областью вертикальной стенки кристаллизатора и самой темной областью поверхности жидкого металла. Как видно из рис. 2 и 3, порог бинаризации приходится варьировать в широких пределах.

Для данной системы применен простой способ вычисления порога бинаризации, инвариантного к изменению в определенных пределах гистограмм яркости изображений нашего объекта регулирования. Предложено порог бинаризации устанавливать как определенную часть яркости наиболее яркого пикселя изображения ($J_{\text{пор}} = J_{\text{fmax}}k_{\text{bin}}$, где k_{bin} – экспериментально определяемый коэффициент пропорциональности). Анализ большого количества изображений ванны жидкого металла в кристаллизаторе показал, что k_{bin} изменяется в достаточно узком диапазоне – 0,68... 0,72.

В результате обработки бинаризованного изображения ванны определяем n значений координат верхней границы ванны $u^B(i)$, $i = 1...n$. Используя соответствующие им координаты верхней кромки кристаллизатора $u^K(i)$, получаем n значений уровня ванны $h(i) = u^B(i) - u^K(i)$. Для фильтрации помех, воздействующих на изображение ванны, усредняем полученные значения уровня ванны. Простое усред-

нение удовлетворительно фильтрует малые помехи изображения, но оказывается совершенно недостаточным при действии значительных помех, вызванных налипанием расплавленного металла (НРМ) на стенках кристаллизатора.

Существенно ослабить эти помехи позволяет нелинейный фильтр (НФ) со следующим алгоритмом работы [5]. Искажения типа НРМ при бинаризации изображения ванны приводят к повышению уровня ванны относительно истинного и не фиксируются явления (например, резкое локальное охлаждение поверхности ванны), приводящие к обратному результату – понижению уровня. Поэтому из расчета среднего значения уровня H исключаются значения, меньшие на некоторую величину Δh максимального уровня h_{max} из анализируемого набора значений $h(i)$:

$$H = \frac{1}{M} \sum_i^N h(i),$$

где $h(i) \geq (h_{\text{max}} - \Delta h)$; M – суммируемые значения $h(i)$ из общего количества N , $M \leq N$.

На рис. 5 дан пример обработки очень зашумленного изображения ванны, иллюстрирующего эффективность описанного алгоритма. Приведено изображение кристаллизатора с потоком расплавленного металла в процессе слива его из промежуточной емкости в кристаллизатор. Несмотря на значительные помехи, система достаточно точно определила уровень ванны H относительно верхней кромки кристаллизатора (верхняя кривая), что хорошо иллюстрирует нижняя кривая – граница ван-

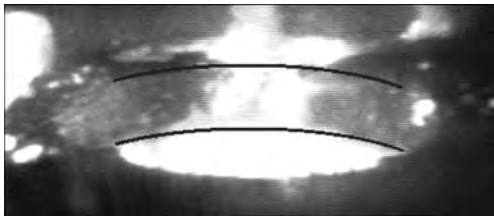


Рис. 5. Определение уровня ванны при очень высокой степени помех

ны жидкого металла, построенная в соответствии с установленным уровнем.

Для фильтрации помех, переменных во времени, использован НФ, ограничивающий производную сигнала уровня. Порог ограничения выбран на максимально возможной скорости изменения полезного сигнала при вытягивании слитка.

Работа фильтра описывается следующей системой уравнений [5]:

$$H_j^{НФ} = H_{j-1}^{НФ} + a_j;$$

$$a_j = \begin{cases} B & \text{при } |H_j - H_{j-1}^{НФ}| > B \text{ и } H_j > H_{j-1}^{НФ}; \\ H_j - H_{j-1}^{НФ} & \text{при } |H_j - H_{j-1}^{НФ}| \leq B; \\ -B & \text{при } |H_j - H_{j-1}^{НФ}| > B \text{ и } H_j < H_{j-1}^{НФ}, \end{cases}$$

где $H_j^{НФ}$, H_j — сигналы на j -м такте измерения соответственно на выходе и входе фильтра; $B = \frac{\partial H_{\max}}{\partial t}$ —

максимальная скорость изменения полезного сигнала (уровня ванны) между двумя измерениями.

При тестировании этот фильтр сравнивали с фильтрами экспоненциального сглаживания (ФЭС) и скользящего среднего (ФСС). Работа цифрового ФЭС описывается следующим разностным уравнением:

$$H_j^{ФЭС} = \eta(H_j - H_j^{ФЭС}) + H_j^{ФЭС},$$

а ФСС —

$$H_j^{ФСС} = \frac{(H_j - H_{j-m}^{ФСС})}{m} + H_{j-1}^{ФСС},$$

где η — параметр фильтра, определяющий степень сглаживания; m — период фильтрации.

Для исследования качества фильтрации создана видеомодель объекта измерения, построенная на видеосъемке реальной ванны расплавленного металла в электронно-лучевой плавильной установке. Уровень ванны на видеомодели может по заданному закону изменяться с учетом реальных показателей технологического процесса. Кроме того, можно вводить искажение значения уровня, имитируя тем самым помеху с заданными свойствами.

Изображение ванны видеомодели экспонировалось на экране монитора компьютера и контролировалось с помощью видеокамеры. Сигнал видеокамеры поступал на вход системы, обрабатывающей видеосигнал с целью получения параметра, отражающего значение уровня ванны. Эксперимент проводили при изменении значения уровня модели в пределах 0...20 мм, период дискретизации видеопотока составлял $\Delta r = 0,35$ с. Такой период кван-

Тип фильтра	Оптимальный параметр	Среднеквадратичная ошибка $\sigma_{\text{ср}}$, мм
ФСС	$m = 11$	0,876
ФЭС	$h = 0,75$	0,743
НФ	$B = 0,875$	0,112

тования выбран из условия обеспечения заданной погрешности измерения уровня ванны ± 1 мм при максимальной скорости опускания (подъема) слитка 150 мм/мин. В качестве критерия оценки качества использовали среднеквадратичную ошибку $\sigma_{\text{ср}}$. Период измерения определяли по моменту, когда дисперсия среднеквадратичного отклонения уже не изменялась в третьем знаке. Результаты эксперимента приведены в таблице.

Как видно из таблицы, наиболее приемлемым для выделения сигнала уровня из зашумленного входного сигнала является НФ.

В качестве видеооптической системы применили монохромную видеокамеру STS-480X, обеспечивающую разрешение 512×582 пикселя с установленным объективом Tamron 13VM550T и изменяемым фокусным расстоянием 5...20 мм. В качестве устройства ввода телевизионного сигнала в компьютер выбрали AVerMedia EZCapture. Управляющая часть системы выполнена на промышленном панельном компьютере PPC-5170GST.

Устройство связи с объектом по принимаемым от компьютера сигналам управляет приводом вытягивания слитка, аварийной сигнализацией и вводит в компьютер информацию о режиме работы системы.

Видеоизображения ванны расплавленного металла в кристаллизаторе обрабатываются компьютером по алгоритмам, описанным выше, в результате чего формируется расстояние поверхности расплавленного металла от верхней кромки кристаллизатора. Вследствие слива в кристаллизатор расплавленного металла из промежуточной емкости уровень ванны постепенно повышается. Если измеренный уровень ванны окажется выше заданного, то система выдает команду на вытягивание слитка.

По достижении уровня расплавленного металла заданного нижнего значения команда вытягивания слитка прекращается, и процесс повторяется. Измеренные значения уровня ванны сохраняются в памяти компьютера для документирования и выводятся на экран дисплея в виде графика в реальном масштабе времени.

На рис. 6 дан пример записи изменения уровня ванны расплавленного металла в кристаллизаторе в ходе работы системы в режиме автоматического управления. Белый фон графика соответствует рабочей зоне регулирования уровня, темно-серый — зоне предупредительной сигнализации, светло-серый — аварийной зоне.

Самодиагностика системы позволяет контролировать следующее:

- возможность распознавания образа объекта системой;
- работоспособность видеоканала;
- зависание программ расчета уровня;
- зависание компьютера;



Рис. 6. Работа системы в режиме автоматического управления вытягиванием слитком; h — уровень ванны

наличие питания на компьютере;

правдоподобность результатов работы расчетных программ.

По результатам самодиагностики система формирует звуковую и световую сигнализацию, а также сигнал «зависания» программы WD (watch dog). Обработка сигнала WD выполняется в устройстве связи с объектом на аппаратном уровне.

Разработанная система контроля и стабилизации уровня жидкого металла в кристаллизаторе при электронно-лучевой плавке регулирует следующие технические параметры:

погрешность измерения уровня ванны не хуже ± 1 мм;

диапазон контроля уровня ванны 0...20 мм на расстоянии 2000 мм;

диапазон задания уровней ванны 6...14 мм, при достижении которых формируются команды на вытягивание и прекращение вытягивания слитка;

дискретность задания уровней 1 мм;

фильтрацию помех от светящегося гарнисажа на стенке кристаллизатора;

фильтрацию помех от волнообразных возмущений на поверхности ванны;

формирование файла данных измерения уровня ванны в ходе плавки с периодичностью 1 с;

формирование световой, звуковой, текстовой аварийной и предупредительной сигнализации.

Система реализована на промышленной электронно-лучевой установке мощностью 1,2 МВт. Подобранны на сайте <http://svarka.ho.ua>.

Таким образом, разработанная система позволяет автоматически измерять расстояние от поверх-

ности ванны расплавленного металла до верхней кромки кристаллизатора; стабилизировать значения верхнего и нижнего уровней ванны при периодическом вытягивании слитка. После некоторой доработки систему можно использовать и для автоматической стабилизации скорости слива расплавленного металла в кристаллизатор, что сделало бы процесс формирования слитка строго периодическим с постоянным стабильным качеством по высоте. Помимо этого, на основании информации о текущем значении уровня ванны можно реализовать множество различных алгоритмов автоматического управления процессом плавки, практически не реализуемых при современном ручном управлении.

1. *Автоматизированная система управления процессом электронно-лучевого нанесения покрытий* // В. Б. Мищенко, Н. В. Подола, В. Н. Воробьев, С. С. Тарасов // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1985. — № 3. — С. 45–50.
2. *Мищенко В. П.* Измерение уровня металлической ванны в установках для электронно-лучевого испарения и плавки // Там же. — 1988. — № 2. — С. 50–54.
3. *Николаев Ю. В., Преподобный В. С.* Датчики уровня жидкой металлической ванны для электронно-лучевых технологических установок // Роботизация производства сварных конструкций: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1988. — 146 с.
4. *Мищенко В. Б., Воробьев В. Н., Николаев Ю. В.* Комплекс технических средств АСУТП электронно-лучевого испарения и переплава // Автоматическое управление процессами сварки и нанесения покрытий: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1988. — 150 с.
5. *А. с. 1190361 СССР.* МКИ G 05 В 5/01. Нелинейный фильтр // В. Г. Соловьев, А. И. Капельский, В. Н. Федас, Т. Н. Удовенко. — Опубл. 07.11.85, Бюл. № 41.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 22.09.2008