

Контроль и стабилизация уровня жидкого металла в кристаллизаторе при электронно-лучевой плавке.

В.Г. Соловьев, канд.техн.наук., Ю.Н.Ланкин, докт. техн.наук

(Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

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

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 изменяется. Это происходит вследствие неравенства скорости вытягивания слитка и скорости поступления расплавленного металла в кристаллизатор. Относительно стабильная скорость поступления расплавленного металла в кристаллизатор имеет место только в случае редко применяемой в настоящее время схеме 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 и порция жидкого металла через него сливается в кристаллизатор. На установках большой производительности скорость поступления металла в кристаллизатор в идеале постоянная, но на практике подвержена значительным колебаниям вследствие непостоянства пропускной способности сливного носка, изменения вязкости жидкого металла в промежуточной емкости и тому подобное. Непрерывное вытягивание слитка из кристаллизатора с постоянной скоростью практически не применяется из-за проблем с качеством поверхности получаемого слитка. Как правило, вытягивание слитка производится оператором периодически, когда уровень расплавленного металла достигнет некоторого верхнего предела. Вытягивание прекращается, когда уровень металла достигнет желаемого нижнего уровня. Уровень жидкого металла относительно верхней кромки кристаллизатора определяется оператором визуально по границе раздела между светящейся поверхностью жидкого металла и относительно темной стенкой

кристаллизатора. Все эти операции производятся оператором вручную и по определению не могут выполняться с высокой точностью и повторяемостью. Превышение уровня расплавленного металла выше 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 приводит к нестабильности структуры металла слитка и качества поверхности слитка.

В ИЭС им. Б.О.Патона давно ведутся работы по созданию систем контроля и автоматического регулирования уровня жидкого металла в кристаллизаторе при ЭЛП. Из-за специфических особенностей ЭЛП из множества возможных датчиков предпочтение было отдано телевизионным благодаря их высокой информативности, надежности контроля и возможности визуализации регулируемого объекта[1,2,3,4]. Во всех этих системах обработка видеоизображения осуществлялось специально созданными дискретно-аналоговыми контроллерами, что существенно ограничивало их функциональные возможности.

Развитие современной вычислительной техники предоставляет широкие возможности по числовой обработке видеоизображений на управляющем компьютере. Такая обработка позволяет производить операции улучшения изображения, выделения области интереса, 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 ведется через смотровое окно 5 с помощью установленной снаружи плавильной камеры 1 ПЗС видеокамеры 6. Для предохранения от напыления стекла смотрового окна 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 7 производит захват кадра, оцифровывает видеосигнал и передает его в компьютер. Компьютер 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 поступают на устройства управления, сигнализации и контроллер привода вытягивания слитка 13. Используется световая 10 и звуковая 11 аварийная сигнализация системы, а также переключатель 12 “Автомат / Ручной” для выбора режима регулирования уровня ванны.

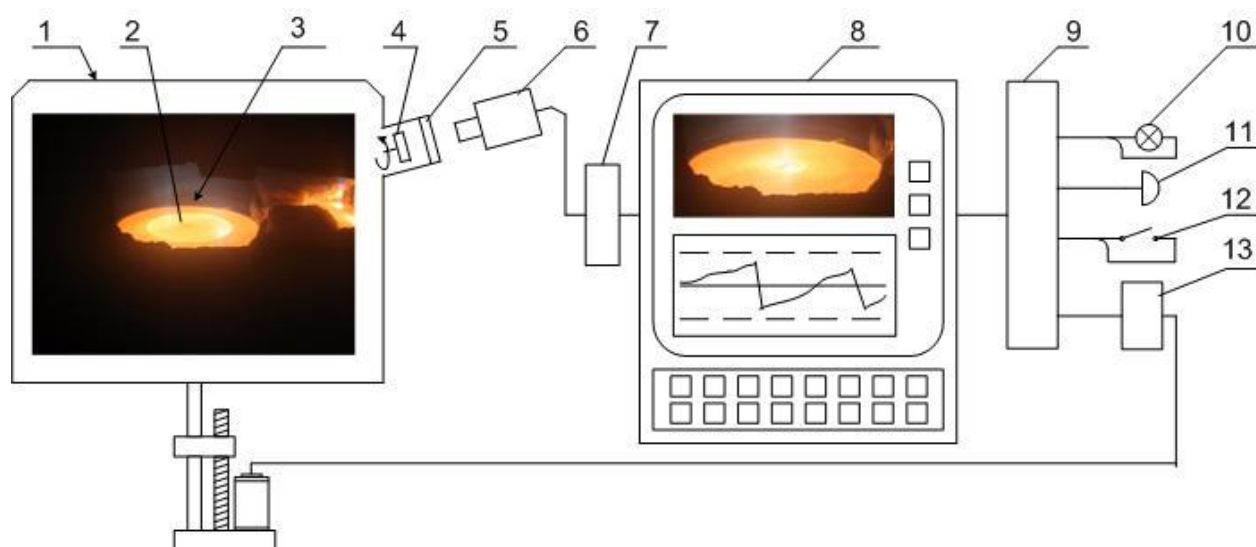


Рис. 1

Испытания системы проводились на электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью типа ТИКО-15М. 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 – это холодная темная стенка кристаллизатора и детали 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 изменяющее его яркость. На рис.2, а и приведено изображение кристаллизатора при нагреве поверхности жидкого металла электронным лучом, перемещающимся по

круговой траектории с максимальным, а на рис.3, а – с минимальным диаметром. Соответствующие гистограммы яркостей пикселей изображений приведены на рис.2, б и рис.3, б.

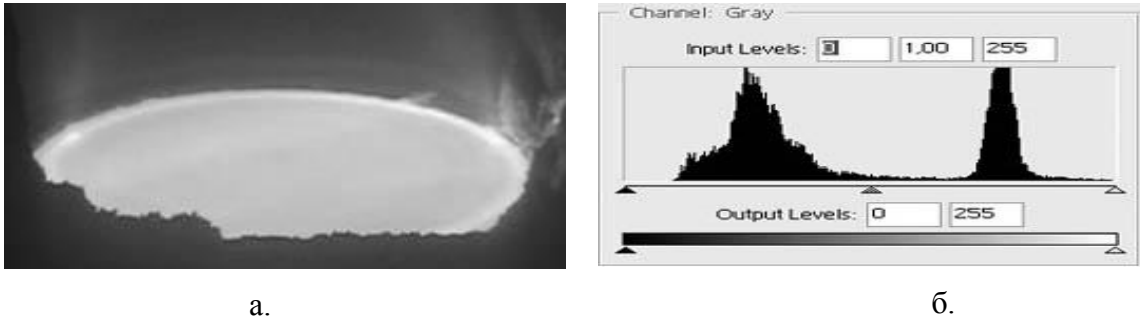


Рис.2. а)- изображение кристаллизатора $d=650$ мм, переплав титана. б)- яркостная гистограмма изображения а).

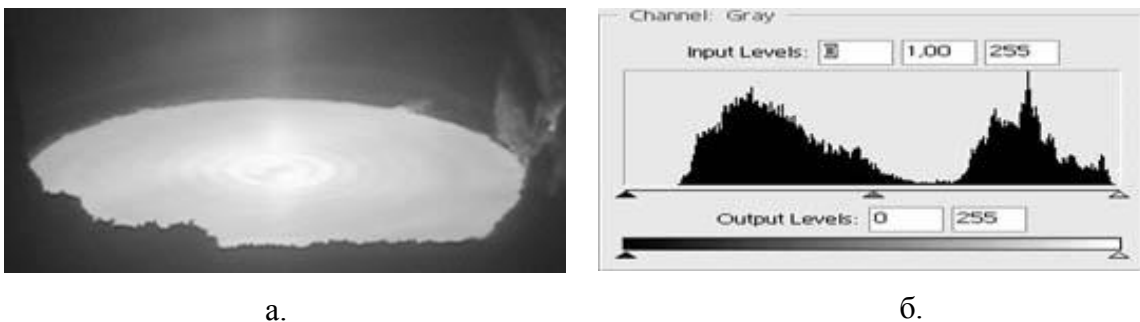


Рис. 3. а)- изображение кристаллизатора $d=650$ мм, переплав титана. б) - яркостная гистограмма изображения а).

Другим фактором, влияющим контрастность изображения, является значение диафрагмы объектива. При сильном открытии диафрагмы относительно «нормального» происходит насыщение по яркости большого количества пикселей изображения, и гистограмма смещается вправо с потерей информации о яркости большого количества ярких пикселей (см. рис.4). И, наоборот, при сильном прикрытии диафрагмы относительно «нормального» происходит смещение гистограммы влево с потерей информации о темных пикселях (см. рис.5). Аналогично уменьшению значения диафрагмы действует запыление парами переплавляемого металла стекла смотрового окна.

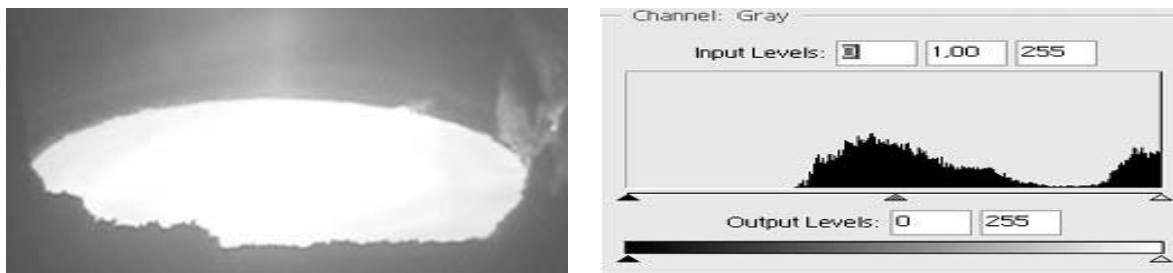


Рис. 4 Смещение гистограммы вправо при увеличении открытия диафрагмы объектива на 20% относительно изображения по рис.3.

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

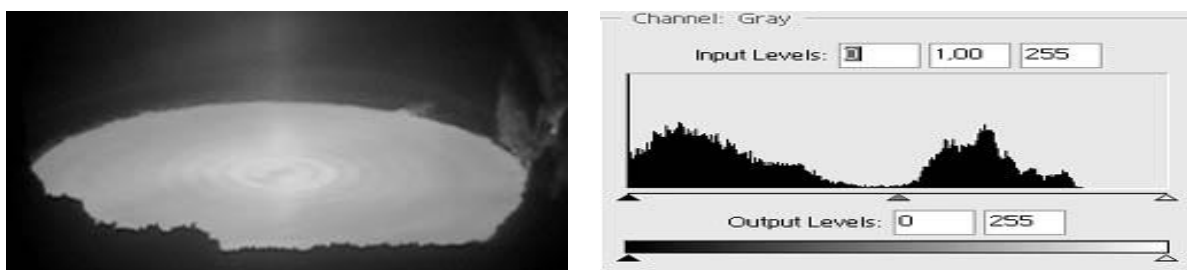


Рис. 5. Смещение гистограммы влево при закрытии диафрагмы объектива на 20% относительно изображения по рис. 3.

Для выделения из изображения контура ванны жидкого металла, необходимого для расчета уровня, 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), если яркость соответствующих пикселей исходного изображения меньше порога бинаризации $J_{\text{пор}}$, и значение 255 (белый цвет), если яркость соответствующих пикселей исходного изображения больше или равна порогу бинаризации. После бинаризации изображения, на границе «белого» и «черного» мы получим контур пятна расплавленного металла, который можно будет использовать для расчета уровня. Проведенные эксперименты по бинаризации изображений с различными значениями границ бинаризации даже для одного и того же изображения свидетельствуют о том, насколько важно правильно определить границу бинаризации для точности определения уровня ванны (см. рис.6). Эмпирическим путем определено «место» ГБ, отмеченное стрелкой на рис.7, 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 – рис.5, порог бинаризации необходимо варьировать в широких пределах. Чтобы избежать этого, можно нормализовать гистограмму яркости с помощью гамма-коррекции исходного изображения. 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 $J_{\text{пор}} = J_{f \max} \times k_{\text{bin}}$, где k_{bin} - экспериментально устанавливаемый коэффициент пропорциональности. Анализ большого числа изображений ванны жидкого металла в кристаллизаторе показал, что k_{bin} изменяется в достаточно узком диапазоне: 0.68 - 0.72.

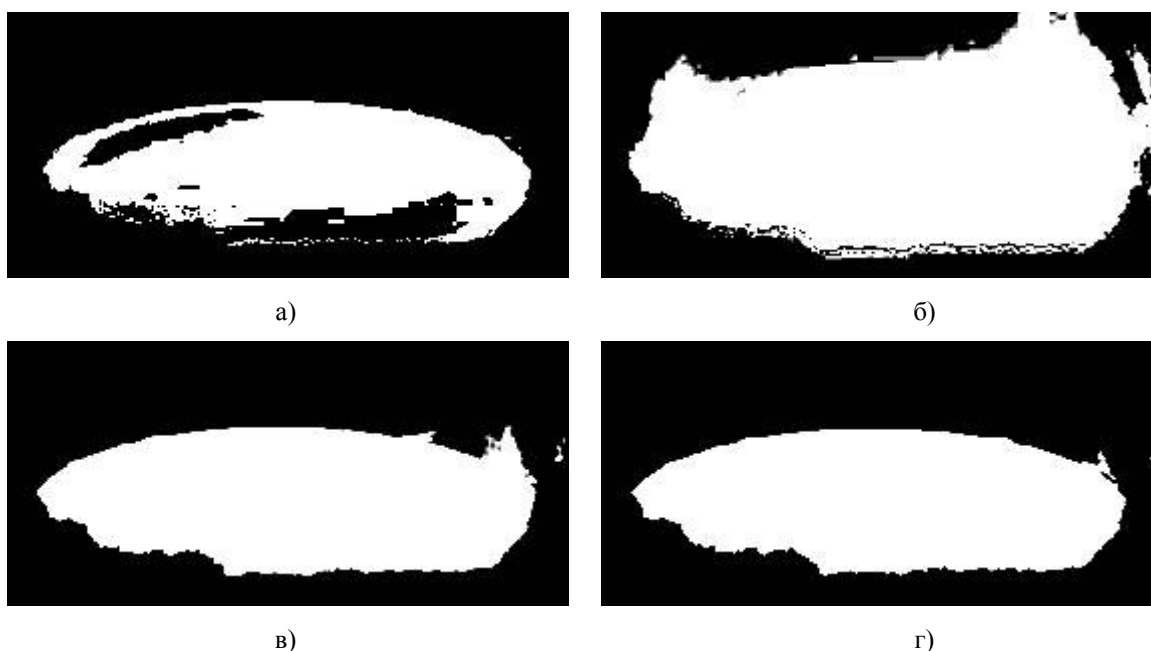


Рис.6. Результаты бинаризации изображения по рис.2 при различных границах бинаризации
а) $J_{\text{пор}}=200$; б) $J_{\text{пор}}=60$; в) $J_{\text{пор}}=110$; г) $J_{\text{пор}}=170$.

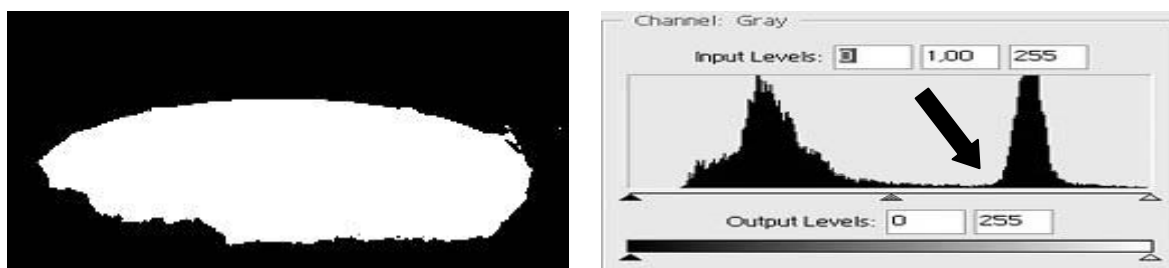


Рис.7. Результаты бинаризации изображения рис.2 при значении $J_{\text{пор}}=180$

В результате обработки бинаризованного изображения ванны получаем n значений координат верхней границы ванны $u^g(i)$, $i=1...n$. Используя соответствующие им координаты верхней кромки кристаллизатора $u^k(i)$, получаем n значений уровня ванны $h(i) = u^g(i) - u^k(i)$. Для фильтрации помех, воздействующих на изображение ванны, усредняем полученные значения уровня ванны. Простое усреднение 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, со следующим алгоритмом работы. Искажения типа НРМ, при бинаризации изображения ванны, приводят к повышению уровня ванны относительно истинного и, практически, не наблюдаются явления (например, резкое локальное охлаждение поверхности ванны), которые приводили бы к обратному результату – к понижению уровня. Поэтому из расчета среднего значения уровня H исключаются значения уровня, которые меньше на некоторую величину Δh максимального значения уровня $h_{\max}$ из анализируемого набора значений $h(i)$:

$$H = \frac{1}{M} \sum_i^N h(i), \text{ где } h(i) \geq (h_{\max} - \Delta h), \quad M - \text{число суммируемых значений } h$$

(i) из общего количества N , $M \leq N$.

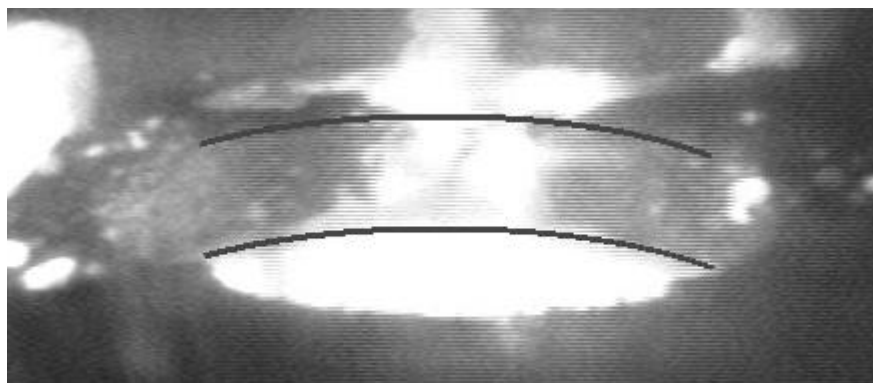


Рис.8.

На рис.8 приведен пример обработки очень зашумленного изображения ванны, иллюстрирующего эффективность описанного алгоритма. На рисунке приведено изображение кристаллизатора с потоком расплавленного металла во время слива его из промежуточной емкости в кристаллизатор. Несмотря на значительные помехи, система уверенно определила величину уровня ванны H относительно верхней кромки кристаллизатора (верхняя кривая), что хорошо иллюстрирует нижняя кривая - граница ванны жидкого металла, построенная в соответствии с найденным уровнем.

Для фильтрации помех, переменных во времени, использован нелинейный фильтр (ФН), ограничивающий производную сигнала уровня. Порог ограничения выбран на

уровне максимально возможной скорости изменения полезного сигнала, имеющей место при вытягивании слитка на максимальной скорости.

Работа фильтра описывается системой уравнений [5]:

$$H_j^{\Phi H} = H_{j-1}^{\Phi H} + a_j;$$

$$a_j = \begin{cases} B, & \text{при } |H_j - H_{j-1}^{\Phi H}| > B \text{ и } H_j > H_{j-1}^{\Phi H}; \\ H_j - H_{j-1}^{\Phi H}, & \text{при } |H_j - H_{j-1}^{\Phi H}| \leq B; \\ -B, & \text{при } |H_j - H_{j-1}^{\Phi H}| > B \text{ и } H_j < H_{j-1}^{\Phi H}; \end{cases} \quad (3)$$

где $H_j^{\Phi H}$ - сигнал на j-ом такте измерения на выходе фильтра; H_j - сигнал на j-

ом такте измерения на входе фильтра; $B = \frac{\partial H_{max}}{\partial t}$ - максимальная скорость изменения

полезного сигнала (уровня ванны) между двумя измерениями.

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

$$H_j^{\Phi ЭС} = \eta \times (H_j - H_{j-1}^{\Phi ЭС}) + H_{j-1}^{\Phi ЭС},$$

а ФСС –

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

где η - параметр фильтра, определяющий степень сглаживания, m – период фильтра.

Для исследования качества фильтрации была создана видео-модель объекта измерения, построенная на видеосъемке реальной ванны расплавленного металла в ЭЛТУ типа ТИКО-15М. Уровень ванны на видео-модели мог по заданному закону изменяться с учетом реальных показателей технологического процесса. Кроме того, можно было применить заданное искажение значения уровня, имитируя тем самым помеху с заданными свойствами. Изображение ванны видеомодели экспонировалась на экране монитора компьютера и контролировалась с помощью видеокамеры. Сигнал видеокамеры поступал на вход системы, которая производила обработку видеосигнала с целью получения параметра отражающего значение уровня ванны. Эксперимент проводился при изменении значения уровня модели в пределах 0...20 мм, период дискретизации видеопотока - $\Delta\tau = 0.35$ с. Такой период квантования выбран из условия обеспечения заданной точности измерения уровня ванны ± 1 мм при максимальной скорости опускания

(подъема) слитка 150 мм/мин. В качестве критерия оценки качества использовался критерий среднеквадратичной ошибки σ_{cp} . Период измерения определялся по моменту, когда дисперсия среднеквадратичного отклонения уже не изменялась в третьем знаке. Результаты эксперимента приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Показатели Фильтр	Оптимальный параметр	Среднеквадратичная ошибка, σ_{cp} мм ²
Фильтр скользящего среднего ФСС	$m=11$	0,876
Фильтр экспоненциального сглаживания ФЭС	$\eta=0.75$	0,743
Фильтр с переменной структурой ФПС	$B=0.875$	0,112

Как видно из Таблицы 1, наиболее приемлемым для выделения сигнала уровня из зашумленного входного сигнала является нелинейный фильтр ФН.

В качестве видеооптической системы была применена монохромная видеокамера STS-480X, обеспечивающая разрешение 512x582 пикселя, с установленным объективом Tamron 13VM550T, имеющим изменяемое фокусное расстояние 5 – 20 мм. В качестве устройства ввода телевизионного сигнала в компьютер выбрано 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 значение расстояния 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. При достижении уровня расплавленного металла заданного нижнего значения, команда вытягивания слитка прекращается и процесс повторяется. Измеренные значения уровня ванны запоминаются в памяти компьютера для документирования и выводятся на экран дисплея в виде графика в реальном масштабе времени. На рис.9 приведен пример записи изменения уровня ванны расплавленного металла в кристаллизаторе во время работы системы в режиме автоматического управления. Белый фон графика соответствует

рабочей зоне регулирования уровня, темно серый – зоне предупредительной сигнализации и светло серый – аварийной зоне.

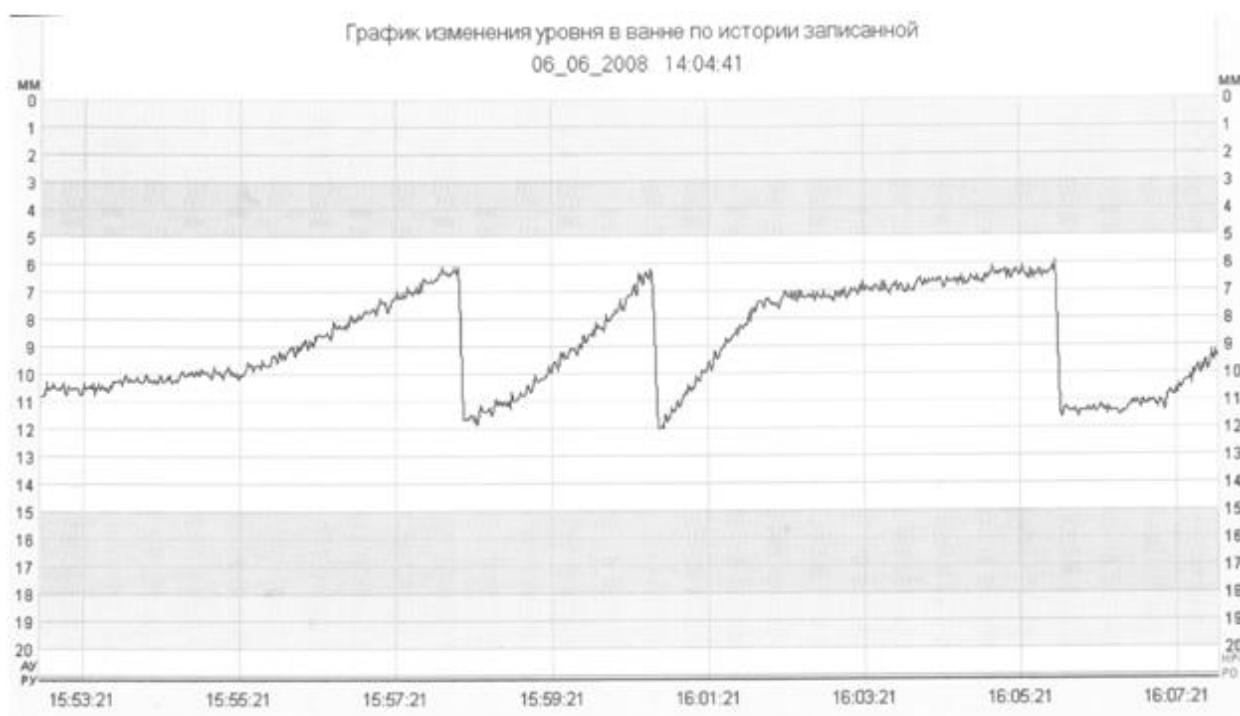


Рис. 9

Самодиагностика системы решает следующие задачи:

- контроль возможности распознавания образа объекта системой;
- контроль работоспособности видеоканала;
- контроль зависания программ расчета уровня;
- контроль зависания компьютера;
- контроль наличия питания на компьютере;
- контроль логичности результатов работы расчетных программ.

По результатам самодиагностики система формирует звуковую и световую сигнализацию, формирует сигнал 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 обеспечивает следующие технические параметры:

- точность измерения уровня ванны не хуже ± 1 мм;
- диапазон контроля уровня ванны $0 \div 20$ мм на расстоянии 2000 мм;
- диапазон задания уровней ванны, при достижении которых формируются команды на вытягивание и прекращение вытягивания слитка, $6 \div 14$ мм;
- дискретность задания уровней $\div 1$ мм;
- фильтрация помех от светящегося гарнисажа на стенке кристаллизатора;

- фильтрация помех от волнообразных возмущений на поверхности ванны;
- формирование файла данных измерения уровня ванны в течение плавки с периодичностью 1 с;
- формирование световой, звуковой и текстовой аварийной и предупредительной сигнализации.

Система реализуется на электронно-лучевой промышленной установке ТИКО-15М на ООО «Стратегия БМ» в Киеве. Информацию можно получить на сайте <http://svarka.ho.ua>.

Заключение

Разработанная система позволяет: автоматически измерять расстояние от поверхности ванны расплавленного металла до верхней кромки кристаллизатора; стабилизировать величину верхнего и нижнего значения уровня ванны при периодическом вытягивании слитка. В принципе 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 соответственно постоянным стабильным качеством по высоте. Помимо этого имея информацию о текущем значении уровня ванны можно реализовать множество различных алгоритмов автоматического управления процессом плавки, практически не реализуемых при современном ручном управлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мищенко В.Б., Подола Н.В., Воробьев В.Н., Тарасов С.С. Автоматизированная система управления процессом электронно-лучевого нанесения покрытий. /Проблемы специальной электрометаллургии, 1985, № 3
2. Мищенко В.П. Измерение уровня металлической ванны в установках для электронно-лучевого испарения и плавки. /Проблемы специальной электрометаллургии, 1988, № 2
3. Николаев Ю.В., Преподобный В.С. Датчики уровня жидкой металлической ванны для электронно-лучевых технологических установок. /Роботизация производства сварных конструкций: Сб. науч. тр. АН УССР. ИЭС им. Е.О.Патона, Киев, 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, Киев, 1988. – 150 с.
5. Соловьев В.Г., Капелистый А.И., Федас В.Н., Удовенко Т.Н. Нелинейный фильтр, ав.свид. № 1190361, 30.05.1984 г.