
ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 621.74.042

П. В. Русаков, К. С. Богдан

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ТРЕХЗОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИТЕЙНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК

Сформулирована концепция трехзонного управления литейной технологической системой центробежного литья биметаллических отливок. Установлены новые свойства результирующей структуры согласованного управления центробежной литейной машиной и разливочным устройством. Предложенная система управления позволяет вести адаптивный диалог в режиме дозирования расплавов в изложницу и добиваться необходимой точности биметаллической отливки.

Ключевые слова: центробежное литье, вращающаяся изложница, биметаллическая труба, трехзонное управление, литейно-технологические системы (ЛТС).

Сформульовано концепцію триконтурного управління ливарною технологічною системою відцентрового лиття біметалічних виливків. Встановлені нові властивості результируючої структури узгодженого управління відцентровою ливарною машиною і розливальним пристроєм. Запропонована система управління дозволяє вести адаптивний діалог в режимі дозування розплавів у ливарну форму і добиватися необхідної точності біметалевого литва.

Ключові слова: відцентрове литво, обертова виливниця, біметалічна труба, тризонне управління, ливарно-технологічні системи (ЛТС).

Formulated the conception of three-contour control of the technological system of the centrifugal casting of the bimetallic pipe. The new properties of resulting structure of the concerted management a centrifugal casting machine and casting device are set. Control the system allows to conduct an adaptive dialog in the period of dosage of metal in the rotating moulds and to labour for necessary exactness of the bimetallic pipe.

Keywords: centrifugal casting, rotating moulds, bimetallic pipe, three-area control, casting-technological systems (CTS).

Введение

Для обеспечения высоких и стабильных характеристик биметаллических изделий и минимизации количества брака технологический цикл центробежного литья дополняют операциями контроля свойств получаемых отливок. Это вызывает дополнительные затраты и необходимость проведения испытаний в лабораторных условиях, по результатам которых можно корректировать процесс литья. Сложная взаимосвязь отдельных технологических параметров в этих случаях фактически затрудняет выбор адекватного управляющего воздействия для устранения отклонения показателей отливок от заданных значений [1, 2]. Заданного уровня качества особенно трудно добиться во время пускового периода при возобновлении производства после остановки центробежной машины.

Факторами, определяющими качество центробежных биметаллических отливок при прочих равных условиях, являются характеристики литейно-технологической системы (ЛТС), параметры внешних воздействий, присутствие и вид упругих связей и элементов задержки, формирующих в системе зоны запаздывания [2, 3].

ЛТС обеспечивают преобразование электрической энергии в тепло и механическую работу, подачу ее к объекту, управление формированием литой структуры и прочностных свойств соединения наружного и внутреннего слоев биметаллической отливки. Последнее условие выполнимо при строгом соответствии технологических параметров процесса заливки [4-6].

Основная цель разработки трехзонного управления ЛТС центробежного литья, решение многокритериальной задачи оптимизации режимов заливки и формирования структуры биметаллической отливки путем сопряженного взаимодействия подсистем и модулей инструментальных средств обеспечиваются оперативной организацией оптимальных управляющих воздействий на процесс формирования отливки.

В работе рассматриваются особенности построения ЛТС с адаптивно ориентированным управлением, в которой сопряженные модули (каналы управления) поддерживают согласованное регулирование скорости вращения изложницы и параметров доз заливаемых расплавов.

Особенности процесса формирования отливки

Главные особенности процесса формирования отливки при центробежном способе литья заключаются в том, что заполнение вращающейся формы и затвердевание металла происходят в поле действия сил, превосходящих силы гравитации [7]. В соответствии с общими физико-химическими и термодинамическими представлениями возникновение связи между расплавом и поверхностью основы в формируемой биметаллической структуре определяется следующими факторами:

- смачиванием в результате молекулярного взаимодействия между ними;
- растворением и взаимной диффузией на границе раздела основы и расплава;
- кристаллизацией расплава.

Таким образом, первая особенность рассматриваемой проблемы или важнейший технологический параметр, влияющий на прочность связи между слоями, - это температура первого слоя заготовки на момент начала заливки второго слоя, которая для отдельных биметаллических пар имеет свое оптимальное значение.

Второй особенностью получения биметаллической центробежной отливки является функциональная зависимость оптимальной скорости вращения литейной формы от диаметра наплавляемой заготовки и плотности дозируемого расплава. Большинство работ, посвященных выбору оптимальных режимов вращения литейной формы, используют полуэмпирическую формулу Константинова

$$n = \frac{291}{\sqrt{\rho R}},$$

где ρ - плотность сплава, кг/м³; R - радиус формы, м, или формулу Кеммена [1]

$$n = \frac{K_0}{600\sqrt{R}},$$

где K_0 - коэффициент, выбираемый в зависимости от вида сплава.

В действительности на процесс кристаллизации отливки накладывается эффект вязкого проскальзывания в поле действия центробежных сил с изменяемым коэффициентом внутреннего трения и другие малопредсказуемые возмущающие воздействия, учесть которые можно лишь весьма приближенно.

Третьей особенностью процесса центробежного литья является рост требований к биметаллической отливке, в связи с чем соблюдение размерной точности литой биметаллической детали возможно лишь при точном дозировании расплавов первого и второго слоев.

Структура ЛТС при трехзонной декомпозиции управления

Ключевым моментом применения декомпозиции ЛТС по принципу выделения управляемых зон является установление присущих системе свойств к устойчивости объектов управления.

Обобщенная структура автоматического управления формированием двухслойной отливки представлена на рис. 1. Объект управления - литейная форма (ЛФ) и три подсистемы управления (П1, П2, П3) образуют центробежную ЛТС.

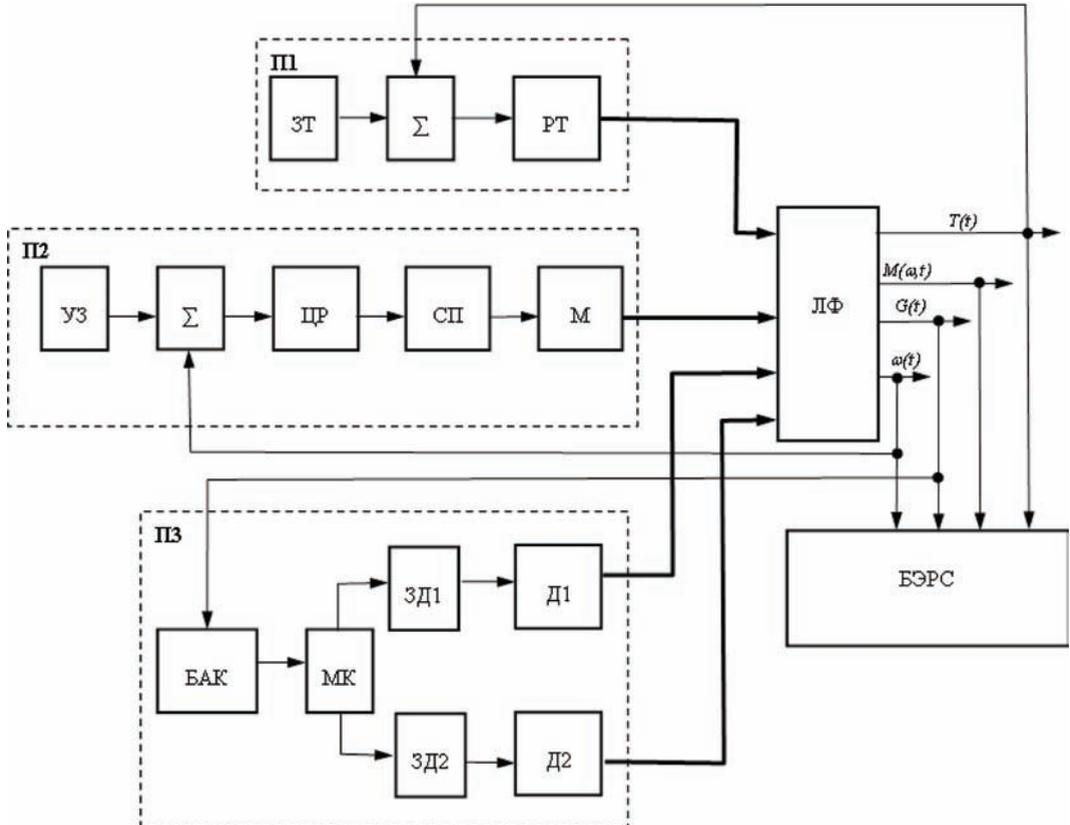


Рис. 1. Структурная схема трехзонного адаптивного управления ЛТС центробежного литья: П1 – подсистема управления температурным режимом центробежной формы; П2 – подсистема управления угловой скоростью вращения центробежной формы; П3 – подсистема управления подачей расплава в форму; БАК – блок адаптивной коррекции, БЭРС – блок электронной регистрации сигналов

Подсистема П1 выполняет роль автоматизированного блока управления температурным режимом ЛФ; в блок П1 поступает вся доступная для измерения информация по температуре $T(t)$ вращающейся литейной формы (ЛФ), ее обработка и выдача управляющих сигналов на регулятор температуры (РТ) в соответствии с заданием от программного задатчика температуры (ЗТ).

Вторая подсистема П2 является замкнутой системой подчиненного регулирования скорости вращения литейной формы, в состав которой входят электродвигатель вращения М, силовой преобразователь СП, цифровой регулятор ЦР, сумматор Σ , устройство задания скорости УЗ.

Структуру третьей зоны определяет подсистема управления подачей расплава в форму (П3), в состав которой входит блок адаптивной коррекции (БАК) дозируемых расплавов. В состав П3 также входят дозаторы расплавов Д1, Д2, задатчики доз ЗД1, ЗД2 и микроконтроллер, который по управляющему входу связан с БАК. Для текущей регистрации процессов формообразования в ЛТС предусмотрен блок электронной регистрации сигналов (БЭРС), который создает протокол по текущим параметрам процесса формирования двухслойной отливки: температуре литейной

формы $T(t)$, моменту вращения $M(\omega, t)$, угловой скорости $\omega(t)$, а также по измеряемой массе $m(t)$ вращающейся изложницы.

Адаптация управления по дозированию расплавов

Существуют различные приемы и способы определения момента начала заливки второго слоя. Наиболее распространенным из них является способ, предусматривающий расчет и соблюдение временного интервала перед заливкой второго слоя заготовки в зависимости от физико-химических характеристик той или иной пары сплавов [6]. Очевидно, что устанавливаемый интервал времени между окончанием заливки первого слоя и началом заливки второго слоя заготовки определяется расчетным путем либо экспериментально, не в полной мере удовлетворяет требованиям технологии и лишь приблизительно дает возможность управлять процессом биметаллического литья.

Более точным способом определения момента начала заливки второго слоя является способ, предусматривающий старт заливки второго слоя при достижении температуры первого, оптимальной для данной пары сплавов, что обеспечивает максимальную прочность соединения слоев, а следовательно, и качество биметаллической заготовки. Это подтверждают экспериментальные данные многих исследователей, а также опыт эксплуатации центробежных машин для производства биметаллических заготовок из различных комбинаций черных и цветных сплавов [7, 8].

Для повышения размерной точности биметаллических заготовок и прочности соединения в зоне переходного слоя разработан новый способ центробежного литья [9]. Суть этого способа управления заключается в том, что после заливки первого расплава происходит определение и запоминание отклонения его фактической дозы от расчетной, затем коррекция заданной дозы второго расплава в соответствии с величиной и знаком этого отклонения. При достижении оптимальной для данной пары сплавов температуры начинают заливку второго расплава. Сигнал отсечки струи второго расплава формируется при достижении скорректированной заданной дозы, после чего запоминается отклонение фактической дозы второго расплава от заданной. В дальнейшем, в каждом из последующих циклов получения заготовок заданные дозы обоих расплавов корректируются в соответствии с вероятными значениями их отклонений от расчетных, рассчитываемых на основе суммарных результатов дозирования в предыдущих циклах.

Согласно предложенному способу (рис. 2), динамика формирования двухслойного вала (сталь-чугун) центробежным литьем происходит следующим образом. В момент времени t_1 начинается заливка первого расплава во вращающуюся изложницу центробежной машины при номинальном расходе $Q'_н$. В момент времени t_2 расход уменьшается до величины составляющей $0,1 Q'_н$ и осуществляется выходная фаза дозирования. В момент времени t_3 при достижении массы расплава в изложнице заданного (расчетного) значения m_{p1} происходит отсечка струи первого расплава. В результате фактическая масса $m_{ф1}$ первого расплава в изложнице становится равной

$$m_{ф1} = m_{p1} \pm \Delta m'_{ф},$$

где $\Delta m'_{ф}$ - погрешность дозирования первого расплава.

В последующем погрешность $\Delta m'_{ф}$ запоминается и корректируется заданная доза второго расплава в соответствии с величиной и знаком $\Delta m'_{ф}$.

При достижении температуры $T^{(1)}$ первого слоя заготовки оптимального значения $T^{(1)}_{оп}$ для данной пары сплавов (рис. 3) в момент времени t_4 начинается заливка второго расплава с номинальным расходом $Q''_н$. В момент времени t_5 расход уменьшается до $0,1 Q''_н$, а в момент времени t_6 происходит отсечка струи второго расплава и процесс заливки заканчивается. При этом

$$m''_{ф} = (m_{p2} \pm \Delta m'_{ф1}) \pm \Delta m''_{ф2}, \quad (1)$$

где $\Delta m''_{ф2}$ - погрешность дозирования второго расплава.

Погрешность $\Delta m''_{ф2}$ также запоминается. Таким образом, суммарная масса

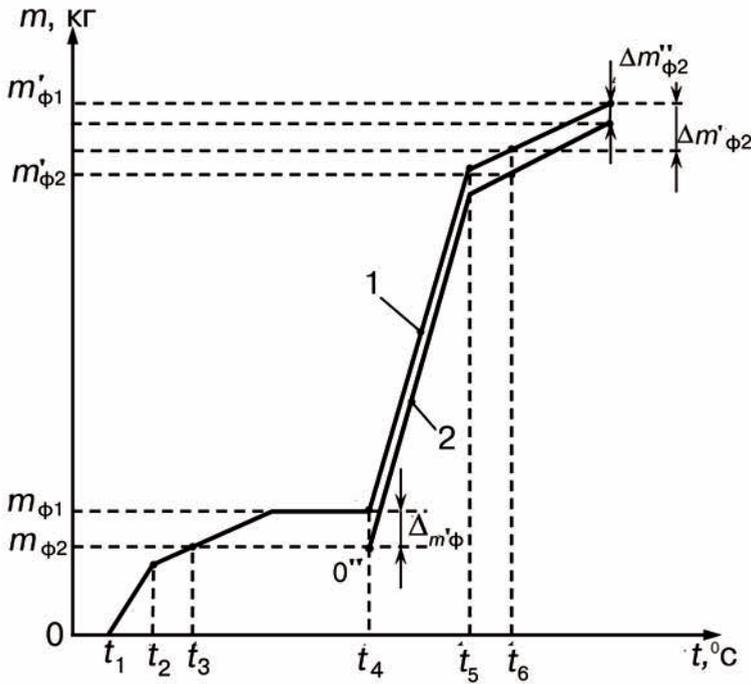


Рис. 2. Зависимость $m = f(t)$ в процессе центробежного литья биметаллических заготовок: 1 - без коррекции; 2 - с адаптивной коррекцией

m_{Σ} заготовки зависит только от погрешности $\Delta m''_{\phi 2}$ дозирования второго расплава, что обеспечивает повышение точности заготовки по массе и геометрическим размерам.

Зависимости $m = f(t)$ на рис. 2 характеризуют процесс заливки двух расплавов без коррекции (1) и с коррекцией (2), причем

$$\Delta m''_{\phi 2} = \Delta m'_{\phi 2} - \Delta m'_{\phi 1}, \quad (2)$$

где $\Delta m'_{\phi 2}$ - погрешность дозирования второго расплава без коррекции.

Каждый следующий цикл получения литых биметаллических заготовок проводят аналогично с той лишь разницей, что после каждого предыдущего цикла вычисляются вероятные значения погрешностей дозирования, при этом за основу берут статистическую обработку суммарных результатов дозирования расплавов в предыдущих циклах. Полученные результаты используются для коррекции заданных доз расплавов в каждом следующем цикле, что также способствует повышению точности дозирования.

Разработанный способ управления реализуется на установке центробежного литья биметаллических заготовок [10]. Структурно-функциональная система управления дозированием расплавов приведена на рис. 4. Центробежная машина с вращающейся изложницей и заливочным желобом установлена на грузоприемной

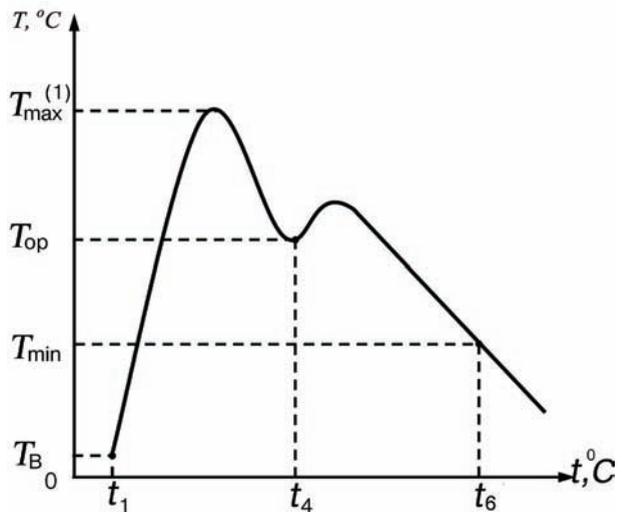


Рис. 3. Зависимость $T = f(t)$ в процессе центробежного литья биметаллических заготовок: T_B - начальная температура изложницы; T_{\min} - температура извлечения заготовки из изложницы

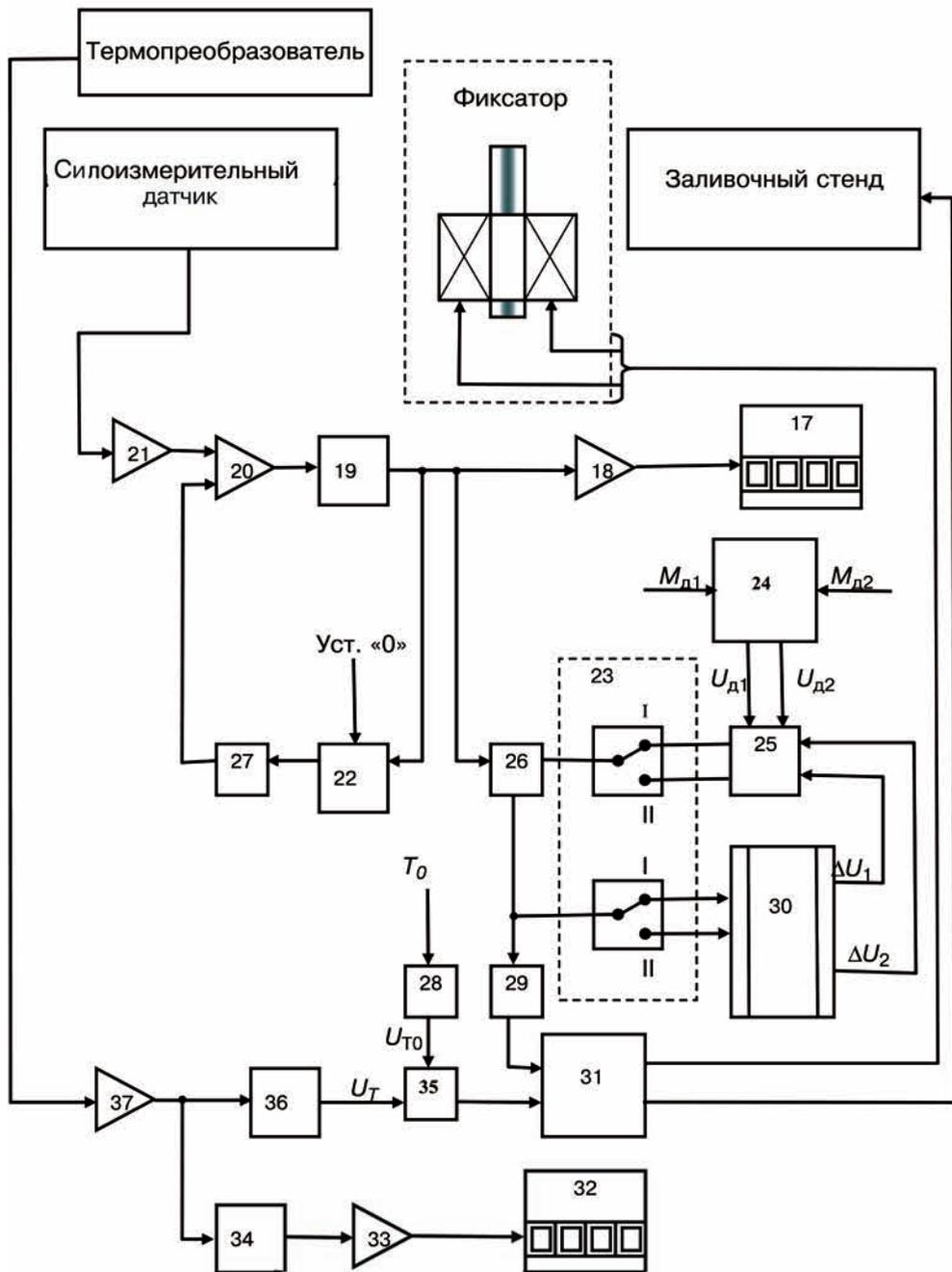


Рис. 4. Структурно-функциональная схема управления дозированием расплавов центробежной ЛТС

платформе электромеханических весов. Силоизмерительный датчик изложницы соединен через усилитель 21, дифференциальный усилитель 20, аналого-цифровой преобразователь 19 и усилитель-дешифратор 18 с цифровым индикатором 17 массы. Кроме того, выход блока 19 через регистр памяти 22 и цифро-аналоговый преобразователь 27 подключен ко второму входу усилителя 20 и непосредственно к блоку 26 определения погрешностей дозирования. Второй вход блока 26 соединен через переключатель 23 с выходом блока сравнения 25. Выход блока 26 через первый пороговый элемент 29 подключен к входу блока 31 управления, первый выход которого соединен с приводом заливочного станда 5, снабженного сливным желобом 4, а также через переключатель 23 подключен к входу микропроцессор-

ного блока 30, выходы которого вместе с выходами блока 24 задания массы дозы соединены с выходами блока 25 сравнения.

В состав блока измерения температуры расплава в изложнице центробежной машины входят световодный элемент и термопреобразователь, выход которого через усилитель 37, аналого-цифровой преобразователь 34 и усилитель-дешифратор 33 подключен к цифровому индикатору 32 температуры расплава в изложнице. Кроме того, выход усилителя 37 через функциональный преобразователь 34 подключен совместно с выходом блока 28 задания оптимальной для данной пары сплавов температуры первого слоя заготовки ко второму пороговому элементу 35, выход которого соединен со вторым входом блока 31 управления.

Установка работает следующим образом. В исходном состоянии изложница центробежной машины 2 нагрета до температуры 150-200 °С. Разливочный ковш (с первым расплавом) установлен на заливочном стенде 5, фиксатор электромеханических весов отключен, переключатель 23 находится в положении I. По команде из блока 31 фиксатор включается и центр жесткости платформы 11 через пластину 8 соединяется с силоизмерительным рычагом 10. После этого по команде Уст. «0» происходит обнуление весоизмерительной схемы и на индикаторе 11 высвечиваются нули во всех разрядах. Далее по команде из блока 31 включаются привод вращения изложницы (см. рис. 1) центробежной машины 2 и привод заливочного стенда 5. Расплав из заливочного ковша через сливной желоб начинает поступать в изложницу центробежной машины. При этом нагрузка на платформу 11 растет и измеряется весоизмерительной схемой. Масса расплава, поступающего в изложницу, высвечивается на индикаторе 17. При достижении массы расплава в изложнице $0,9 m$, из блока 29 подается команда в блок 31 на уменьшение расхода расплава из разливочного ковша до $0,1 Q'_n$ и осуществляется режим «доливки» расплава первого слоя заготовки. По достижении массы расплава в изложнице заданного значения из порогового элемента 29 в блок 31 подается команда на реверс привода стенда 5 и происходит отсечка струи первого расплава. При этом фактическая доза первого расплава может отличаться от расчетной. Погрешность дозирования первого расплава запоминается в микропроцессорном блоке 30 и учитывается при заливке второго расплава.

После заливки первого расплава в изложницу центробежной машины 2 ковш с первым расплавом снимают со стенда 5 и на его место устанавливают ковш со вторым расплавом. Затем обнуляют весоизмерительную схему и переключатель 23, переводят в положение II. Заливка второго расплава в изложницу начинается в момент времени, когда температура поверхности первого слоя достигнет значения, оптимального для данной пары сплавов (см. рис. 3). Это дает возможность снизить вероятность возникновения брака по некачественному соединению слоев. Дозирование второго расплава осуществляется таким же образом, как и первого, но с учетом погрешности дозирования первого расплава. Погрешность дозирования второго расплава запоминается в микропроцессорном блоке 30.

В первом цикле получения литой биметаллической заготовки ее масса и геометрические размеры будут зависеть только от погрешности дозирования второго расплава. В последующих циклах определяются, запоминаются и статистически обрабатываются погрешности дозирования обоих расплавов по результатам предыдущих циклов, чтобы в каждом следующем цикле корректировать дозы первого и второго расплавов по вычисленным вероятным (прогнозируемым) погрешностям дозирования. Для этого в микропроцессорный блок 30 запрограммирована специальная программа статистической обработки результатов измерений, что позволяет существенно повысить точность дозирования обоих расплавов. При использовании персонального компьютера вся система управления может быть реализована программно.

Элементы установки исследованы на лабораторном стенде и испытаны на опытном образце дозатора металлических расплавов [11,12]. Полученные результаты подтвердили надежность выбранных элементов системы (пружинно-тензометрических весов, микропроцессорного блока управления и других) и пригодность для реализации технологического процесса центробежного литья биметаллических заготовок.

Выводы

Сформулирована концепция ЛТС центробежного литья биметаллических отливок на основе теории построения электромеханических систем с трехзонным автоматическим управлением. Установлены новые свойства результирующей трехзонной структуры управления, которая обеспечивает адаптацию управления по дозированию расплавов, тем самым повышая литье центробежной отливки. Проведенные испытания биметаллических валков полностью подтвердили техническую и экономическую эффективности реализации предложенного способа управления и оборудования для центробежного литья.

Разработанная ЛТС для центробежного литья биметаллических заготовок позволяет повысить точность заготовок по массе и геометрическим размерам.

Коррекция заданных доз расплавов внешнего и внутреннего слоев в каждом цикле с учетом вероятных значений погрешностей дозирования, вычисленным по результатам предыдущих циклов, позволяет уменьшить вероятность возникновения брака по некачественному соединению слоев заготовки.

Благодаря определению момента начала заливки второго слоя по оптимальной для данной пары сплавов температуре поверхности первого слоя можно получить экономию производственных затрат за счет уменьшения припусков на механическую обработку заготовок.



Список литературы

1. Специальные способы литья: Справочник / В. А. Ефимов, Г. А. Анисович, В. Н. Бабич и др. // Под ред. В. А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
2. Становский А. Л., Лысенко Т. В. Носенко Т. В. Синхронизирующее замкнуто-разомкнутое управление системой отливка–песчаная форма // Литейн. пр-во. – 2008. – № 4. – С. 35-37.
3. Чиликин М. Г., Клюев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
4. А. с. 1358197 СССР. В 22 D 19/10. Способ наплавки деталей / В. Г. Горенко, П. В. Русаков, В. Л. Конопацкий и др. – Оpubл. 14.07.1982, Бюл. № 24.
5. Русаков П. В. Совершенствование процессов и машин для центробежного литья // Ювелирный бизнес. – 2005. – № 2. – С. 59-62.
6. Юдин С. Б., Левин М. М., Розенфельд С. Е. Центробежное литье. – М.: Машиностроение, 1972. – 280 с.
7. Степанов Ю. А. Технология литейного производства: Специальные виды литья (учебное пособие для вузов). – М.: Машиностроение, 1983. – 287 с.
8. Пат. 2254960 RU. 7В 22 D 13/02. Способ центробежного литья двухслойных прокатных валков / Н. А. Будагянц, И. А. Балаклеец, В. И. Кондратенко, В. С. Филиппов, Ю. В. Дяченко. – Оpubл. 27.06.2005, Бюл. № 18.
9. Пат. 51179А UA. 7В 22 D 13/00. Спосіб відцентрового лиття двошарових заготовок / К. С. Богдан, О. Й. Шинський, П. В. Русаков та ін. – Надр. 15.11.2002, Бюл. №11.
10. Пат. 51274А UA. 7В 22 D 13/02, 39/04, G01G 19/12 Пристрій для відцентрового лиття двошарових металевих заготовок / К. С. Богдан, О. Й. Шинський, П. В. Русаков та ін.). – Надр. 05.11.2002, Бюл. № 11.
11. Богдан К. С., Санкин А. А., Терновой С. А. Весовое дозирование металлических расплавов методом отсоединения массы при заливке литейных форм // Металл и литье Украины. – 2004. – № 6. – С. 14-18.
12. Богдан К. С., Терновой С. А., Санкин А. А. Система дискретного дозирования металлических расплавов с микропроцессорным управлением // Литейн. пр-во. – 2003. – № 9. – С. 28-30. Поступила 09.09.2009