

5. Пат. UA 82838: МПК C08J 11/04 Спосіб одержання полімерного композиційного матеріалу: / О. Й. Шинський та ін. – Опубл. 12.08.2013, Бюл. 15.
6. Дорощенко С. П., Шинский О. И., Дорощенко В. С. Тривийний підхід к формированию направленных газового, усадочного и противопригарнопрочностного режимов при литье в песчаную форму // Процессы литья. – 2007. – № 3. – С. 9-13.

Поступила 11.06.2014

УДК 621.746.2:66.028

А. Ю. Кизилова

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ РЕАЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ*

Проведен комплексний аналіз основних технологічних можливостей конкурентоспроможного магнітодинамічного обладнання для алюмінієвих сплавів. Систематизовано існуючі на сьогоднішній день способи контролю та управління технологічними параметрами роботи МГД-установок при реалізації основних технологічних процесів обробки та лиття алюмінієвих сплавів. Виділені та на основі практичних прикладів обґрунтовані концептуальні підходи щодо створення та впровадження систем динамічного контролю технологічних параметрів роботи МГД-установок.

Ключевые слова: магнітодинамічна установка, алюмінієвий сплав, електромагнітні системи, обробка, дозування, розливка, динамічний контроль, масова витрата, математична модель.

Проведено комплексний аналіз основних технологічних можливостей конкурентоспроможного магнітодинамічного обладнання для алюмінієвих сплавів. Систематизовано існуючі на сьогоднішній день способи контролю та управління технологічними параметрами роботи МГД-установок при реалізації основних технологічних процесів обробки та лиття алюмінієвих сплавів. Виділені та на основі практичних прикладів обґрунтовані концептуальні підходи щодо створення та впровадження систем динамічного контролю технологічних параметрів роботи МГД-установок.

Ключові слова: магнітодинамічна установка, алюмінієвий сплав, електромагнітні системи, обробка, дозування, розливка, динамічний контроль, масова витрата, математична модель.

A comprehensive analysis of the major technological capabilities competitive magnetodynamic equipment for aluminum alloys in this article. Currently existing techniques for monitoring and control of process parameters of MHD - units in the implementation of the ground handling process and casting of aluminum alloys are systematized. The creation of conceptual approaches are justified and implementation of dynamic control of technological parameters of MHD – installations are selected and based on practical examples.

* Работа выполнена под руководством канд. техн. наук Н. А. Слазнева

Keywords: *magnetodynamic installation, aluminum alloy, electromagnetic systems, handling, dosing, casting, dynamic control, mass flow, the mathematical model.*

Введение

Повышение размерной точности и качества литья заготовок из алюминиевых сплавов неразрывно связано с возможностями заливочно-дозировочного оборудования, применяемого в технологических процессах литейного производства. Наилучшие результаты могут быть достигнуты при использовании многофункциональных устройств, обеспечивающих вместе с высокоточной заливкой расплавов их предварительное доведение до заданных требований по химическому составу и выпечную обработку. К таким литейным агрегатам относится оригинальная многофункциональная магнитодинамическая установка (миксер-дозатор), созданная в ФТИМС НАН Украины, которая хорошо зарекомендовала себя в разных технологиях приготовления и разливки черных сплавов и цветных металлов и сплавов [1, 2].

Проблема сочетания автоматизации непрерывного контроля основных информативных технологических параметров (масса, температура, массовый расход расплава) и управления процессом заливки на сегодняшний день является актуальной практически для всех заливочных устройств. Ее решение позволит улучшить воспроизводимость результатов и эффективность обработки расплава, оптимизировать работу такого оборудования, снизить энергозатраты, повысить конкурентоспособность создаваемого многофункционального литейного оборудования.

Анализ существующего оборудования

За последние два десятилетия были предложены новые разработки по созданию автоматизированного литейного оборудования [1-4]. В частности, для реализации непрерывного контроля фактической массы расплава, находящегося в МГД-установке, разработаны и внедрены весоизмерительная система (ВИС), система контроля дискретного дозирования алюминиевого расплава в литейную форму открытой струей по массе, система автоматического регулирования электромагнитного давления в зависимости от фактического уровня расплава в тигле, системы реализации технологических режимов разливки с использованием финишной доливки, торможения процесса инерционного слива и т. п. На базе микропроцессорной техники создана новая система автоматического управления процессом электромагнитной разливки жидкого металла из магнитовесовой установки (МВУ), а также разработаны и внедрены локальные системы контроля и управления температурой расплава в период выдержки, обработки и рафинирования алюминиевого расплава.

Анализ аналогичных МГД-установкам по технологическим возможностям, применяемых в мире агрегатов, в частности среди ведущих компаний-производителей литейного оборудования (плавильно-раздаточных печей, заливочных устройств) Германии, Франции, Италии, США, Японии, показал, что для обеспечения современного уровня конкурентоспособности МГД-установок для алюминиевых сплавов необходимо осуществить ряд технологических и функциональных усовершенствований благодаря которым:

- напорные характеристики агрегата (как насоса) должны быть повышены с 1250 мм алюминиевого столба (для существующей МДН-6А) не менее чем до 2000 мм;
- диапазон расходных характеристик должен быть расширен как в нижнем пределе с обеспечением стабильности процесса ниже 0,3 до 0,05 кг/с для технологий непрерывной разливки алюминиевых заготовок), так и в верхнем, выше достигнутых 10 – до 15 кг/с.

С точки зрения обеспечения высокой точности дозированной разливки как в современном литейном производстве, так и на ведущих компаниях по изготовлению металлопродукции в машиностроении используют роботизированные заливочные устройства с ограниченным диапазоном дозы (регламентируется емкостью ковша) и погрешностью до 1 % [5].

Пневматические системы подачи жидкого металла в металлоприемники автоматизированы по принципу регулирования расходных характеристик и в целом не ограничены в дозировании, но не позволяют реализовывать комплекс процессов внепечной обработки расплава, хотя по напорными характеристиками значительно преобладают над МГД-установкой (до 3000 мм).

По сравнению с раздаточными печами, МГД-установка ограничена максимальным значением емкости по жидкому алюминию (от 160 до 630 кг) и максимальным значением массового расхода (до 10 кг/с). Наряду с этим МГД-установка по сравнению с вышеприведенным оборудованием является комплексным многофункциональным и универсальным агрегатом, объединяющим в себе функциональные возможности, предопределяющие ее конкурентоспособность в современном литейном производстве [1].

Систематизация существующих способов контроля и управления технологическими процессами обработки и разлива алюминиевых сплавов МГД-установками

Технологический процесс получения качественного алюминиевого литья в современном литейном производстве нуждается в контроле качества расплава непосредственно перед его подачей в металлоприемник (песчаная форма, кокиль, промежуточная емкость пресс-формы и т. п.), температуры, массового расхода при заливке, электромагнитного давления и управления этими параметрами по технологически заданным алгоритмам.

В частности, контроль качества расплава можно осуществлять несколькими способами: отбором проб для экспресс-анализа, для определения технологических и литейных свойств (жидкотекучесть, горячеломкость, физико-механические свойства, неметаллические включения, и т. п.) и специальными методами диагностики структурного состояния расплава. Среди них актуальными являются методы оценки параметров качества расплава непосредственно в металлургическо-литейном агрегате без отбора проб. Это важно для оптимального использования МГД-установки в серийном и многосерийном производствах ввиду того, что МГД-установка является непрерывно работающим агрегатом.

Непрерывное измерение, контроль и регулирование температуры в МГД-установке осуществляется с использованием датчика температуры (термопары), погружаемого в расплав, и термоконтролера, работающего в дискретном режиме или по законам ПИД-регулирования. Управление же режимами нагрева алюминиевого расплава в Ш-образном индукционном канале МДН-6А осуществляется за счет регулирования напряжения, подаваемого на обмотки индукторов, а в период выдержки – путем включения/выключения одного из индукторов.

Напряжение регулируют в полуавтоматическом или ручном режимах, а включение/выключение – только в режиме выдержки («хранения»). При разливе или внепечной обработке управление осуществляется только в ручном режиме, в некоторых случаях в полуавтоматических. В частности, система электропитания индукторов в МГД-установке реализована в виде понижающих пятиступенчатых трансформаторов с электроконтактной коммутацией (с дискретностью 12 %) от 40 до 80 В на каждый из них. Существующая система питания индукторов фактически работает в дискретном режиме и не реализует плавного/гибкого пропорционального регулирования и перегружена электрокоммутационным оборудованием. С точки зрения энергосбережения и реализации непрерывного плавного/гибкого регулирования и поддержания температуры расплава на заданном уровне перспективно использование современных тиристорных регуляторов напряжения.

Выбор и задание параметров нагревания алюминиевого расплава в МГД-установке осуществляется путем экспериментального или ручного подбора параметров питания индукторов в зависимости от фактической массы расплава, содержащегося в тигле. В частности, для типичного алгоритма поддержания температуры расплава (по принципу включения/выключения одного из индукторов) выбор напряжения на постоянно работающий индуктор устанавливается экспери-

ментально и постоянно подлещит нескльким этапам коррекции в зависимости от массы расплава (минимальный уровень, средний и полный тигель). Напряжение, подаваемое на второй индуктор, устанавливается на том же уровне, что и на первый, а это иногда приводит к перегреву расплава выше заданной температуры более чем на 50°C , вследствие чего могут возникать нарушения технологического цикла и снижение качества расплава при его перегреве, насыщение водородом, интенсивное окисление и т. п. В аналогичном оборудовании современного литейного производства рациональным и технологически обоснованным является реализация режимов нагревания в соответствии с фактической массой расплава. Таким образом можно существенно повысить эффективность, энерго- и ресурсосбережение литейного оборудования при его эксплуатации.

При реализации дискретной и непрерывной разливки, когда в качестве параметра для контроля используется масса расплава m и ее изменение во времени dm/dt , перспективным является использование весоизмерительных устройств [7]. Это дает возможность контролировать не только дозирование порции расплава с высокой точностью и заданной массой m_d , но и осуществлять контроль и регулирование параметров (Q, t) непосредственно в режиме разливки. Особое внимание уделяется массовому расходу как технологическому параметру.

Среди широко применяемых измерительных устройств в литейном производстве известны такие, как расходомеры (бесконтактные), уровнемеры (контактные, бесконтактные, оптические), и т. п. Однако оснащение литейного оборудования специальными датчиками и устройствами контроля массового расхода может привести к значительному повышению цены оборудования. В целом в работе идет речь о создании на базе датчиков весоизмерительного устройства систем динамического контроля изменения массы во времени, температуры во времени и т. п. Эти подходы являются основой для разработки современных систем автоматического управления (САУ) с использованием минимального количества датчиков контроля основных параметров.

Главными требованиями являются: обеспечение поддержки заданной температуры расплава и режимов перемешивания при коррекции его химического состава, управление массовым расходом металла при его электромагнитной разливке по разнообразным технологиям литья (открытой струей, под низким регулируемым электромагнитным давлением и т. п.).

Для комплексного управления работой МГД-установки такое оборудование оснащается системами весового контроля с целью осуществления непрерывного измерения массы металла в тигле установки, изменения ее количества в процессе электромагнитной подачи в литейную форму [8].

Созданная специалистами ФТИМС НАНУ магнитовесовая установка (МВУ) реализует контролируемый процесс дискретного дозирования расплава по методу отсоединения массы [7].

Магнитовесовая установка реализует следующие режимы заливки в литейные формы: традиционный режим заливки при постоянном массовом расходе расплава с введением упреждения в программу дозирования; двухстадийный режим заливки с доливкой расплава при пониженном массовом расходе в выходной фазе дозирования; режим дозирования и заливки при постоянном массовом расходе расплава с торможением в выходной фазе дозирования; режим дозирования и заливки с доливкой расплава при уменьшенном массовом расходе и торможении в выходной фазе дозирования.

При реализации управляемого электромагнитной дискретной разливки алюминиевых расплавов, например по технологиям литья открытой струей [1], литья под низким электромагнитным давлением – ЛЕМД [4] и с использованием специального способа литья – РАСЛИТ-ЛЭМД [2], часть вопросов непрерывного контроля и их использования для автоматического управления процессами разливки уже решена [4-8].

Наряду с базовыми процедурами в САУ приготовления/обработки заложены стандартные технологии, часто используемые на практике: дегазация, фильтрование, модифицирование, легирование, плавление, термовременная обработка (ТВО) и др.

Учитывая иерархию построения САУ МВУ [8], система обрабатывает процессы регулирования режимов разлива по статическому принципу (без учета инерционных процессов заливки) в начале, в процессе разлива и конце. К таким относятся: колебания уровня металла в МГД-установке (дает погрешность измерения фактической массы расплава в тигле МДУ до 1-2 кг), осцилляции напорных и расходных характеристик (от 5 до 10 % от номинальной величины) и их влияние на этап дозированной разлива. Указанные осцилляции напорных характеристик являются результатом возникновения и взаимодействия вихревых и циркуляционных структур в рабочей зоне МГД-установки, которые оказывают существенное влияние на гидродинамические и напорные характеристики. Наряду с этим наблюдается ощутимое влияние (от 5 до 10 % от номинального создаваемого электромагнитного давления) действия таких вихревых структур при развитии линейных скоростей движения расплава от 1 до 3 м/с, а при достижении максимальных значений электромагнитного давления осцилляции напорных характеристик они могут достигать 10-20 % от напора (от 60 до 120 мм алюминиевого расплава).

Картина осцилляции напорных характеристик, и как результат расходных, в случае для конкретной геометрии и особенностей работы *T*-образной (тройниковой) рабочей зоны МДН-6А исследована в [9] и характеризуется основными тремя гармониками (Гц): 1 – 0,4-0,8; 2 – 2,5-3,0; 3 – 3,0-4,4. Закономерность частотноамплитудных характеристик описывается линейными законами и зависит от составляющих электромагнитной силы $F_{эм}$, плотности тока в канале j и индукции магнитного поля B , проецируемой на р. з.

Для осуществления поддержки на заданном уровне и стабилизации расходных характеристик МГД-установки независимо от уровня металла в тигле, который собственно формирует перепад между имеющимся уровнем металла $H_{мет}$ и местом подачи расплава в литейную форму $H_{зат}$ специалисты ФТИМС НАН Украины разработали и внедрили автоматическую систему стабилизации и поддержания заданного значения расходных характеристик независимо от уровня металла в тигле [8].

Сущность реализации регулирования параметра массового расхода, согласно указанной разработке, заключается в непрерывном определении фактического значения уровня металла в тигле $H_{мет-текущ} = f(m_{мет})$, определении фактического перепада уровней между поверхностью металла в тигле и собственно уровнем нижнего торца сливного желоба металлопровода $\Delta H = H_{зал} - H_{мет} - \Delta P_{эм,давл}$.

Соответственно изменению уровня металла в тигле МВУ и создаваемого МГД-установкой напора, массовый расход расплава подаваемого в металлоприемник из металлопровода следующий:

$$Q(H) = \rho \varepsilon_b \varepsilon \varphi b \sqrt{2g} (H - L_{мет-пров} + h_{ур})^{3/2}, \quad (1)$$

где $Q(H)$ – массовый расход расплава как функция напора (H), создаваемого в МГД-установке, кг/с; ε_b – коэффициент вертикального сжатия потока; b – ширина сливного носка, м; ε – коэффициент бокового сжатия потока при $h/b \leq 1$, $\varepsilon = 0,8-0,9$ [6]; φ – коэффициент скорости потока ($\varphi = 0,9$).

Контроль фактического уровня металла в данном случае реализуется с помощью прогрессивного метода с использованием весоизмерительной системы (ВИС) путем определения текущего значения массы расплава в тигле и каналах МГД-установки и перерасчета ее значения в величину уровня (высоту ванны) расплава.

В качестве системы регулирования напряжением, подаваемым на обмотки электромагнита, использовали стандартные (имеющиеся в схеме управления МДУ) системы регулирования напряжения, обеспечивающие дискретное повышение или уменьшение его величины с дискретностью 6 %. Особенностью развития и совершенствования разработанной системы может быть реализация процесса плавного пропорционального регулирования напряжения, подаваемого на обмотки электромагнита (например, с тиристорного регулятора напряжения), в частности с применением системы определения динамики изменения контролируемых параметров (массы расплава, уровня металла в тигле, температуры, напряжения в промышленной электросети и т. п.).

Обобщая вышеизложенное для разработки и совершенствования существующих систем автоматического управления технологическими параметрами работы МГД-установки при реализации процессов литья или обработки расплавов с их использованием, последующие исследования направлены на создание законов ПИД-регулирования и установление рациональных путей осуществления поддержки на заданном уровне и регулирования постоянных во времени величин.

Практические примеры обоснования применения систем динамического контроля технологических параметров работы МГД-установок

Рассмотрен процесс дозированной разливки алюминиевого расплава из МГД-установки в литейную форму с точки зрения практического обоснования реализации динамического контроля. Изменение массы расплава, поступающего в литейную форму, регистрировали с использованием ВИС, на которую установлена МГД-установка. Экспериментальная закономерность изменения во времени массы расплава при дозировании порции массой $m_{\text{доз}} = 2,0$ кг на протяжении временного интервала $\tau_{\text{залив}} = 2,5$ с со средним массовым расходом $Q = 0,8$ кг/с приведена на рис. 1.

Зависимость изменения массы заливаемой порции во времени можно разложить на несколько участков: 1 – включение МГД-установки в режим заливки (насос); 2-3 – разгон расплава в металлопроводе и выход на стабильный процесс заливки; 3-4 – постоянный (по величине массового расхода) процесс заливки; 4-5 – инерционный слив расплава после выключения МГД-установки; участок 5-6 характеризует слив остатков расплава из системы подачи в литейную форму (желоб).

Участок 2-3 характеризует процесс нарастания массового расхода и очень важен для дозирования по методу контроля «по времени». Участок 3-4 важен с точки зрения обеспечения технологических требований по поддержке заданного значения массового расхода и характеризуется абсолютным значением параметров осцилляции. Что касается участка 4-5, – это выходной этап, который зависит от текущего значения массового расхода (на момент выключения электромагнитного давления), вязкости расплава, а также от геометрических особенностей металлопровода, гидравлических сопротивлений такой системы и собственно инерционных свойств системы, подающей расплав из МГД-установки в литейную форму.

Особый интерес, с точки зрения реализации динамического контроля, в данном случае имеет закономерность изменения во времени значения массового расхода и способ его определения.

Зависимость $m' = f(\tau)$, как первая производная изменения величины массы во времени, определенная путем пересчета изменения параметра массы ($m_{i+1} = m_i$) за соответствующий интервал времени ($\tau_{m_{i+1}} - \tau_{m_i}$), $- Q_i = m'i = (m_{i+1} - m_i) / (\tau_{m_{i+1}} - \tau_{m_i})$, где период времени задавался равным 0,5 с, показана на рис. 1.

В частности, параметр величины временного промежутка ($\tau_i = (\tau_{m_{i+1}} - \tau_{m_i})$) корректируется в соответствии с параметрами работы ВИС, блока регистрации мгновенного значения массы заливаемого расплава и с соотношением массы дозы к массовому расходу $\chi = m_{\text{доз}} / Q_{\text{зал}}$, и для большинства типичных процессов разливки обеспечивает погрешность не выше 2 % и должен составлять $\tau \geq 2$ с.

Эти ограничения характеризуются параметрами работы ВИС и устанавливаются

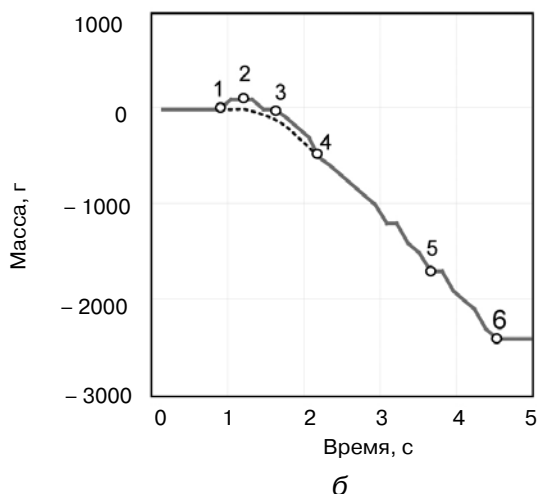
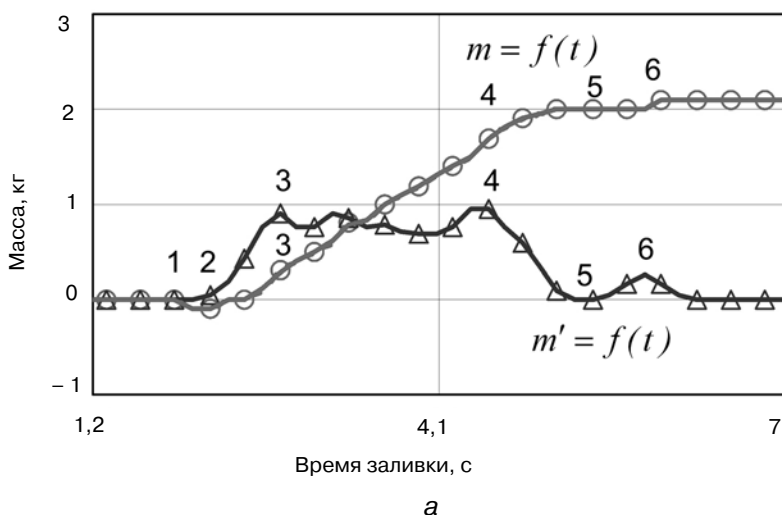


Рис. 1. Изменение массы заливаемого расплава $m = f(t)$ и массового расхода во времени: а – дозированная заливка порции алюминиевого расплава $m = 2$ кг; б – характеристика отсоединения массы от массы МГД-установки при разливании расплава

частотой опроса датчиков массы (50 Гц), а также и зависимостью скорости реакции ВИС от величины скорости нагрузки и разгрузки. Графические зависимости таких параметров ВИС, используемых МГД-установкой, показаны на рис. 2.

Аналитический анализ взаимосвязей аппаратных и технологических (контролируемых) параметров указывает на необходимость разработки на базе алгоритмов вычислительной части программы МБ, которые давали бы возможность осуществлять адаптивный метод вычисления задаваемого массового расхода с изменяемым значением Δt в зависимости от заданного значения массового расхода и соответствия к фактическому значению в процессе заливки. В частности, такой подход касается процесса дозированной разливки, в котором главным фактором, предопределяющим погрешность, является значение массы инерционного слива в выходной части заливки.

Фактором повышения погрешности дозирования в этом случае является длительность переходных процессов (разгона, стабилизации, инерционного слива), которая

в данном случае по рис. 2. составляет от 0,5 до 1 с. Силовое влияние «импульса», регистрируемого на начальном этапе дозирования и воспроизводимого в процессе инерционного слива (1), характеризует количество алюминиевого расплава, сливаемого под действием сил инерции в конце заливки

$$j_m = \frac{m Q}{S_m \rho_{Al}}, \quad (2)$$

где m – масса расплава, находящегося в системе тигель-канал-металлопровод, кг; Q – мгновенное значение массового расхода ($Q = \chi_m S_m \rho_{Al}$), кг/с; χ_m – линейная скорость движения расплава в металлопроводе, м/с; S_m – площадь поперечного сечения металлопровода, м²; ρ_{Al} – плотность алюминиевого сплава, кг/м³.

Величина мгновенного значения массового расхода по выражению (2) является самым весомым аргументом, влияющим на массу инерционного слива и, собственно, погрешность при дозированной разливке, поэтому для устранения негативного неконтролируемого процесса дозирования и осуществления возможности упреждающего экстраполяции режима заливки в выходном этапе путем управления параметрами питания электромагнитных систем такого оборудования, реализации операций доливки и т. п. [3] следует проводить высокоточное измерение (прямое или косвенное) мгновенного значения массового расхода $Q(t)$ с целью быстрого осуществления корректировки величины электромагнитного давления, создаваемого в МГД-установке.

Величина массового расхода расплава дополнительно может контролироваться путем дублирующего расчета по выражению (1) – $Q(H)$ при условии постоянных параметров системы тракта металлопровода, по которому подается расплав в литейную форму с помощью расчета создаваемого электромагнитного напора (H) или его прямого измерения с использованием интегрированной ВИС (ИВИС).

В таком случае система динамического контроля массового расхода может быть записана в виде взаимодополняющей системы уравнений (3), которые могут быть запрограммированы в микропроцессорном блоке и вычисляться в процессе литья в реальном масштабе времени

$$\left. \begin{aligned} Q(m) &= m'_i = (m_{i+1} - m_i) / (\tau_{m_{i+1}} - \tau_{m_i}) \\ Q(H) &= \rho \varepsilon_v \varepsilon \varphi b \sqrt{2g} (H - L_{мет-пров} + h_{ур})^{3/2} \\ Q(v_{мет})^* &= v_{мет} S_{мет} \rho_{Al} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

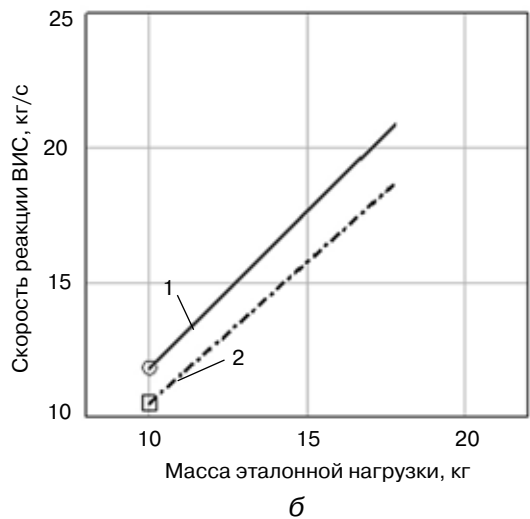
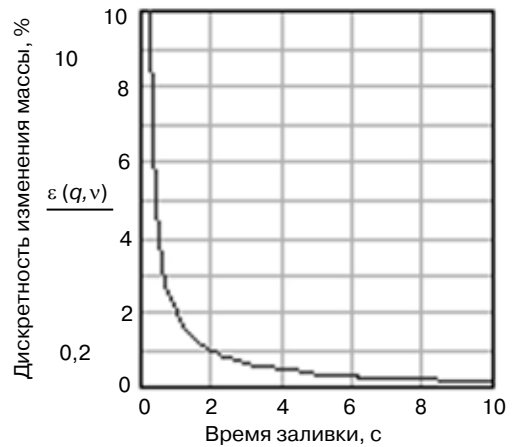


Рис. 2. Зависимость дискретности изменения массы от времени заливки для ВИС с частотой опроса датчиков 50 Гц (а) и границ соответствия скорости реакции ВИС и скоростей заливки металла из МГД-установки (б): 1 – скорость ВИС, кг/с; 2 – скорость заливки, кг/с

где $Q(v_{мет})^*$ – компонента уравнения, которая может быть измерена с использованием вспомогательных устройств, входящих в комплект оборудования МВУ с интегрированной ВИС.

Для коррекции контролируемого параметра должно осуществляться непрерывное вычисление главных параметров работы МГД-установки по уравнению (3).

В таком случае алгоритм, например для процесса двухстадийной дискретной разливки открытой струей [9], может быть откорректирован по алгоритму, представленному на рис. 3.

Наряду с реализацией метода динамического контроля в случае применения алгоритма системы «отслеживания» динамики изменения во времени массового расхода, реализуемого согласно алгоритму 5-стадийного определения величины, показан на рис. 4.

Анализ зависимости (рис. 4) показал, что для создания алгоритма системы отслеживания и непрерывной коррекции массового расхода следует использовать первую составляющую $(i + 1) - i$ в качестве «сигнала старта» отработки режима коррекции и 5-ю составляющую $\sum_{n=4} [(i+n) - i]/n$ как выходную величину коррекции.

Аналогичный подход прямого (или косвенного) динамического контроля технологических параметров может быть применен во многих литейных технологиях, в частности ЛЭМД.

Что касается реализации технологий ЛЭМД, главной является задача прямого контроля процесса заполнения полости литейной формы, особенно при изготовлении деталей сложной геометрии с тонкими стенками (до 2 мм), выдержке с заданным значением избыточного электромагнитного давления и т. п.

Среди перспективных разработок, представляющих практическую ценность и направленных на создание систем динамического контроля, является разработка математических моделей, отображающих реальную сущность тех или иных технологических процессов, в частности при приготовлении, обработке и разливке алюминиевых сплавов.

Среди математических моделей могут быть такие, которые получены, в первую очередь, регрессионными методами статистического анализа [10] в привязке к конкретным технологическим процессам и проверены с точки зрения их адекватности и воспроизводимости.

Для создания автоматической системы управления технологическими процессами в основу положены математические модели, которые будут воспроизведены в виде физических моделей работы МГД-установки.

Физическая модель как средство воспроизведения технологических параметров должна содержать собственно «симуляционную часть» МГД-установки, ее электромагнитных систем и режимов их работы, которые с высоким уровнем адекватности должны отвечать реальному образцу опытного оборудования. Следующем уровнем разработки физической модели будет разработка компьютерной системы, где для симуляции будут использованы алюминиевый расплав, воссоздание уровня его свойств при обработке из использования электрофизических методов и комплексная оценка воспроизведения транспортировки сплава в литейную форму по существующим технологиям литья.

Осуществление динамического контроля массового расхода и температуры заливаемого расплава является целесообразным с целью существенного повышения

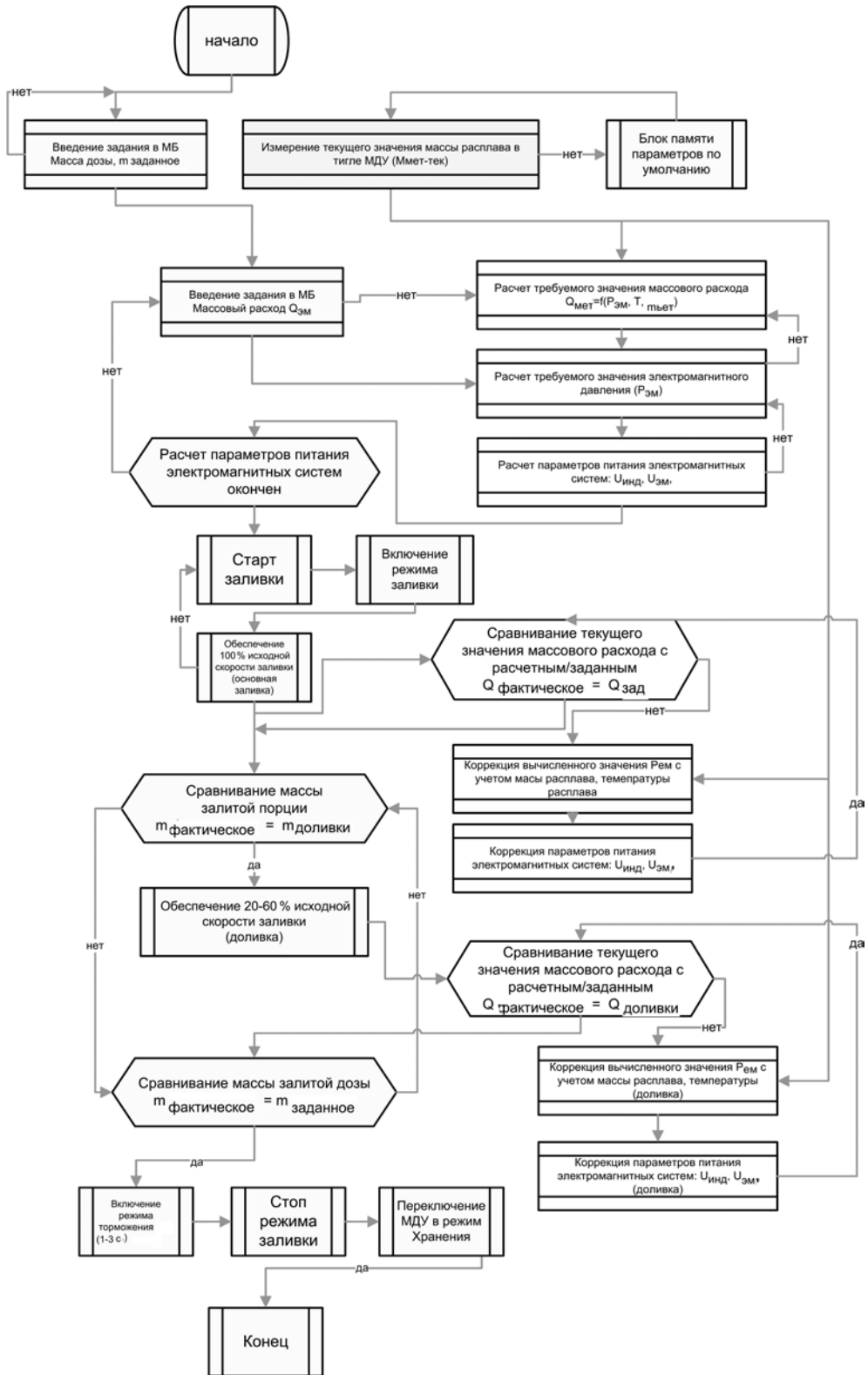


Рис. 3. Откорректированный алгоритм работы системы управления, реализующий режим доливки с торможением в выходной фазе дозирования и блоком системы отслеживания динамики изменения массового расхода во времени

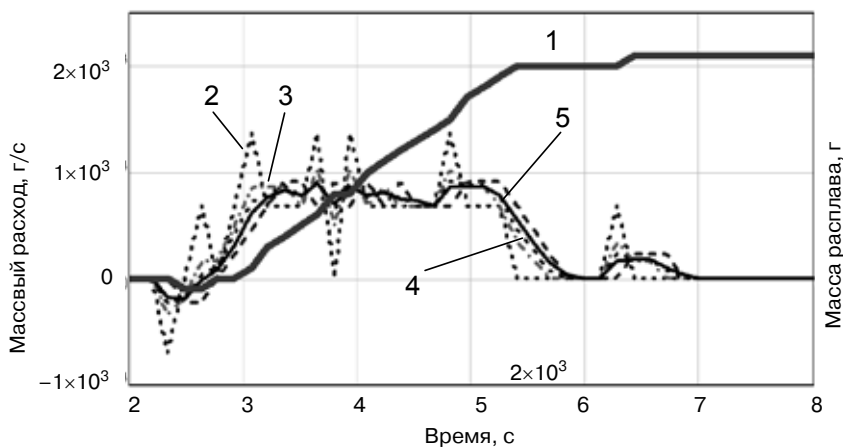


Рис. 4. Зависимость изменения массового расхода во времени (определяемого динамической системой отслеживания по алгоритму 1-4 интервального вычисления): 1 – масса расплава, г; 2 – $Q_{i,i+1} = (m_{i+1} - m_i) / (\tau_{m_{i+1}} - \tau_{m_i})$;

3 – $Q_{i,i+2} = (m_{i+2} - m_i) / (\tau_{m_{i+2}} - \tau_{m_i})$; 4 – $Q_{i_3} = \sum_{n=3} Q_{i,i+n} / n$;

5 – $Q_{i_4} = \sum_{n=4} Q_{i,i+n} / n$

точности дозирования до уровня, отвечающего точности роботизированных систем дозирования (не более 1 % в диапазоне доз от 0,1 до 100 кг). При этом полученный опыт адаптивного регулирования параметра массового расхода расплава может послужить основой создания систем регулирования процессами заполнения литейной формы для технологий ЛЕМД, РАСЛИТ-ЛЕМД.

Выводы

- На основе анализа основных технологических возможностей магнитодинамического оборудования обосновано применение систем динамического контроля технологических параметров их работы с целью стабилизации величины массового расхода (от 0,3 до 10 кг/с $\pm 1\%$), напорных характеристик (до 1250 мм $\pm 1\%$), температуры ($\pm 1,5\%$).

- Разработан алгоритм динамического контроля системы «отслеживания» динамики изменения во времени массового расхода, реализуемого путем 5-стадийного определения величины.

- Теоретически показано, что разработанный способ динамического контроля путем непрерывного определения величины массового расхода по 1-й составляющей (в качестве сигнала старта отработки режима коррекции) и 5-й может быть использован при создании системы автоматической коррекции и обеспечит воспроизведение адаптивного регулирования параметра массового расхода расплава в периоды начала заливки, при заливке и доливке заданной дозы с погрешностью не более 1% в диапазоне доз от 0,1 до 100 кг.

- Показано, что среди перспективных и представляющих практическую ценность разработок, направленных на создание систем динамического контроля, является разработка физических моделей, отражающих реальную сущность технологических процессов, в частности при приготовлении, обработке и разливке алюминиевых сплавов.



Список литературы

1. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 256 с.
2. Средства и системы автоматизации литейного производства / К. С. Богдан, В. Н. Горбенко, В. М. Денисенко и др. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
3. Дубоделов В. И., Богдан К. С., Фикссен В. Н. Дискретное дозирование расплавов магнитовесовым методом // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 5. – С. 8-13.
4. Дубоделов В. И. Разработки ФТИМС НАН Украины в области магнитной гидродинамики и их применение в литейных и металлургических технологиях // 50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС. – Киев: ФТИМС НАН Украины (редакция журнала «Процессы литья»), 2008. – С. 126-149.
5. Верте Л. А. Магнитная гидродинамика в металлургии. – М.: Металлургия, 1975. – 288 с.
6. Электротермическое оборудование: Справочник / Под ред. А. П. Альтгаузена. – М.: Энергия, 1980.
7. Слажнев Н. А., Дубоделов В. И., Богдан К. С. Магнитовесовая установка с микропроцессорным контролем и управлением дозированной разливкой алюминиевых расплавов // Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – № 1 (27) – С. 36-41.
8. Слажнев Н. А. Система коррекции расходных характеристик магнитовесовой установки при переменном уровне расплава в тигле // Металл и литье Украины. – 2011. – № 8. – С. 34-40.
9. Влияние магнитогидродинамических процессов в рабочей зоне магнитодинамических установок на их эксплуатационные характеристики / В. И. Дубоделов, Ю. В. Моисеев, Н. А. Слажнев и др. // Процессы литья. – 2013. – № 3. – С. 64-73.
10. Математический анализ / И. И. Ляшко, А. К. Боярчук, Я. Г. Гай и др. – Киев: Вища школа, 1983.

Поступила 18.06.2014

**К сведению читателей
и подписчиков!
Телефон редакции
журнала «Процессы литья»:
(044) 424-04-10**