

УДК 621.317.32:621.65

В. Н. Фикссен

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

РАСЧЕТ ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЗАЛИВКИ

Разработан метод расчета закона регулирования напряжения на электромагните магнетодинамической установки МДН-6А, обеспечивающий заданный режим заливки. Приведены примеры графиков, рассчитанных при реальных параметрах с использованием математической системы Mathcad 15. Показано, что для исключения влияния понижения уровня расплава в тигле на режим заливки в систему управления необходимо ввести вычислительное устройство, выполняющее коррекцию закона регулирования. Метод применим для любых типов электромагнитных заливочных устройств.

Ключевые слова: магнетодинамическая установка, металлопровод, литейная форма, литье под электромагнитным давлением, электромагнитная заливка, дифференциальное уравнение, закон регулирования.

Розроблено метод розрахунку закону регулювання напруги на електромагніті магнетодинамічної установки МДН-6А, який забезпечує заданий режим заливки. Наведено приклади графіків, розрахованих при реальних параметрах з використанням математичної системи Mathcad 15. Показано, що для запобігання впливу пониження рівня розплаву в тиглі на режим заливання в систему управління необхідно ввести обчислювальний пристрій, який коректує закон регулювання. Метод застосовний для будь-яких типів електромагнітних заливальних пристроїв.

Ключові слова: магнетодинамічна установка, металопровід, ливарна форма, лиття під електромагнітним тиском, електромагнітне заливання, диференційне рівняння, закон регулювання.

The method of calculation of a law of voltage regulation on an electromagnet in the magnetodynamic MDH-6A providing the set mode of pouring is worked out. Examples of the charts expected at the real parameters with the use of mathematical software Mathcad 15 are given. It is shown that for the exception influence of lowering of a melt level in a crucible on the mode of pouring it is necessary to introduce a computing device, realizes correcting of the regulation low in a control system. The method is applied for different types of electromagnetic filling device.

Keywords: magnetodynamic device, metal-duct, casting mould, electro-magnetic low-pressure casting, electromagnetic filling, differential equation, law of control.

В последние десятилетия наблюдается устойчивая тенденция к расширению области применения средств магнитной гидродинамики в металлургии и литейном производстве. Прогресс в этой области происходил и происходит медленно, однако к настоящему времени в некоторых технологиях достигнуты существенные

Гидродинамика процессов литья

успехи, в частности, в литье под электромагнитным давлением [1, 2, 3]. Для управления процессом заполнения литейных форм при электромагнитной заливке как по схеме литья под низким давлением, так и при электромагнитном дозировании, необходимо знать функцию регулирования электрического напряжения, которая обеспечивает заданный режим течения металлического расплава – закон регулирования. Поскольку электромагнитному воздействию на металлический расплав противодействуют инерция расплава, гидравлические сопротивления и напор столба расплава, находящегося над его уровнем в тигле, то очевидно, что функция силового воздействия находится в сложной взаимосвязи с функцией течения расплава по металлопроводу.

Процесс подъема расплава в металлопроводе от его начального уровня описывается дифференциальным уравнением (1) [4], которое соответствует магнитодинамической установке типа МДН-6А для алюминиевых сплавов (рис. 1, а) и выведено согласно расчетной схеме (рис. 1, б). Величины, входящие в уравнение, выражены в единицах системы СИ.

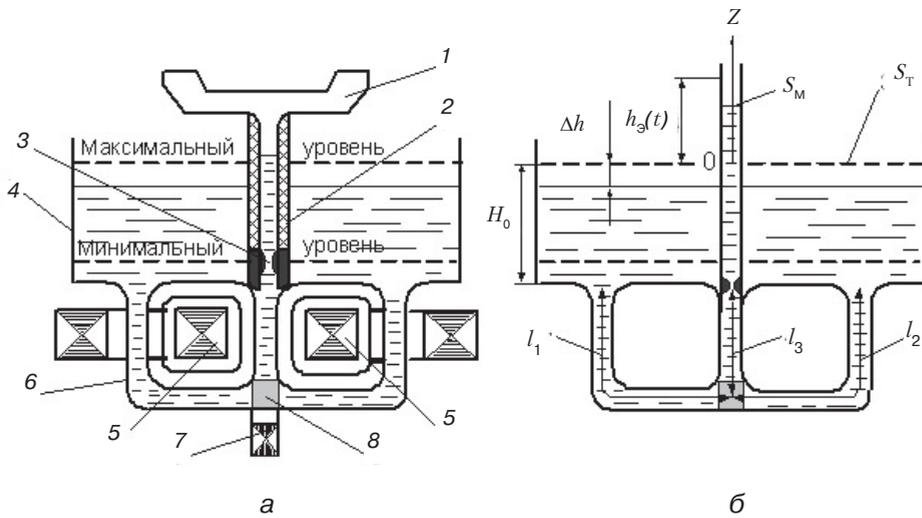


Рис. 1. Схема установки литья под электромагнитным давлением (а) и расчетная схема (б) ее гидравлической системы тигель-канал-металлопровод: 1 – полость литейной формы; 2 – металлопровод; 3 – дросселирующее сужение на входе в металлопровод; 4 – тигель с жидким металлом; 5 – индукторы; 6 – Ш-образный индукционный канал; 7 – электромагнит; 8 – рабочая зона (область полости канала, в которой создается электромагнитное давление)

$$(A + Bz) \cdot z'' + (D + \lambda \cdot z) \cdot \frac{z'^2}{2} + g \cdot B_1 \cdot z = g \cdot h_3(t); \quad (1)$$

$$A = \left(1 + \frac{S_M}{S_T}\right) \cdot H_0 + S_M \cdot \int_l \frac{dl}{S(l)}; \quad B = 1 - \left(\frac{S_M}{S_T}\right)^2;$$

$$B_1 = \left(1 + \frac{S_M}{S_T}\right)^2; \quad D = (B + q \cdot \sum \zeta + \lambda \cdot H_0) \cdot q,$$

где z – координата уровня расплава в металлопроводе, отсчитанная от уровня в тигле, являющаяся функцией от времени t ; g – ускорение свободного падения;

$h_3(t)$ – функция изменения электромагнитного давления, выраженная в единицах напора, эквивалентного создаваемому электромагнитному давлению; S_M – площадь зеркала расплава в металлопроводе; S_T – площадь зеркала расплава в тигле; H_0 – высота уровня расплава в тигле, соответствующая началу очередной заливки; Δh – понижение уровня расплава в тигле после одной заливки; l_1, l_2, l_3 – длины осевых линий канала; $S(l)$ – функция изменения площади поперечных сечений канала, приведенная к одной линии l ; D – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления к «тигель-канал-дрессель металлопровода» при отсутствии тока в канале; q – коэффициент, учитывающий увеличение гидравлического сопротивления от взаимодействия электрического тока с собственным магнитным полем; λ – коэффициент гидравлического сопротивления на единицу длины металлопровода, отсчитываемой от выхода из дресселирующего сужения металлопровода до уровня текущего значения координаты z .

Особо следует подчеркнуть, что динамическое состояние расплава в гидравлической системе тигель-канал-металлопровод полностью определяется координатой $z(t)$ уровня расплава в металлопроводе и скоростью его перемещения $v(t) = z'(t)$. Именно к этим двум функциям приведены все остальные величины уравнения.

Физический смысл членов уравнения (1) состоит в следующем.

Правая часть это функция электромагнитной силы, выраженная через гидравлический напор, соответственно плотности металлического расплава, находящегося в установке. Несмотря на то, что, в конечном счете, требуется найти закон регулирования электрического напряжения, функция напора более универсальна, и при ее использовании уравнение приобретает удобный для анализа вид, поэтому в уравнение не введены электрические величины, а используется результат их действия, преобразованный в гидравлический напор. Электромагнитное давление, создаваемое установкой, определяется по формуле

$$P_{\text{Э}} = \rho \cdot g \cdot h_{\text{Э}} \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

где $P_{\text{Э}}$ – электромагнитное давление, кПа; ρ – плотность металлического расплава, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $h_{\text{Э}}$ – гидравлический напор, м.

Левая часть уравнения содержит функции, отражающие три физических фактора, противодействующих электромагнитной силе: инерция, гидравлическое сопротивление и напор столба расплава, находящегося над его уровнем в тигле. Все члены уравнения имеют размерность м²/с², которая представляет собой произведение ускорения метров в секунду за секунду на метр. Смысл этого состоит в том, что сомножитель $A + Bz$ в первом члене выражен в метрах и является переменной приведенной массой расплава в установке. Произведение массы на ускорение согласно второму закону Ньютона является силой. То есть все члены уравнения выражены в единицах приведенной силы. Следует отметить, что при выводе уравнения до сокращения всех его членов на общий сомножитель, размерность каждого члена выражалась в единицах силы – Ньютонах. Если все члены уравнения умножить на плотность расплава, то они станут выражаться в единицах давления – Паскалях, однако наиболее рациональный вид уравнение имеет при размерности приведенной силы – м²/с².

Физический смысл коэффициента q состоит в том, что в металлтрактах, по которым протекает электрический ток, гидравлическое сопротивление больше, чем без тока. В монографии [5] показано, что вследствие взаимодействия тока с собственным магнитным полем, происходит турбулизация расплава. Из-за этого коэффициент гидравлического сопротивления возрастает в среднем в 1,4 раза.

Уравнение (1) с определенными изменениями непринципиального характера пригодно для описания динамики течения любых металлических расплавов по металлопроводу в электромагнитных заливочных устройствах различных типов. В зависимости от конкретных технологических условий роль некоторых учитываемых

параметров может существенно уменьшаться, поэтому уравнение в таких случаях можно упростить за счет пренебрежения ими, однако упрощать общий вид уравнения недопустимо, поскольку при изменении условий роль этих параметров может значительно возрасти.

Для определения функции регулирования электрического напряжения, подаваемого на электромагнит (рис.1, а, поз. 7), обеспечивающей заданный режим течения расплава в металлопроводе, необходимо использовать известные экспериментальные зависимости: напряжение на электромагните-гидравлический напор. В рабочем диапазоне они являются практически линейными и в общем виде выражаются эмпирической формулой

$$h = \beta \cdot U_{\text{Э}} - h_{0\text{Э}}, \quad (3)$$

где h – напор, метров столба расплава, β – коэффициент пропорциональности м/В; $U_{\text{Э}}$ – напряжение, В, поданное на электромагнит от источника питания, $h_{0\text{Э}}$ – отрицательный напор (всасывание), м, создаваемый напряжением, индуцированным в обмотке электромагнита жидкометаллическим витком при $U_{\text{Э}} = 0$. Необходимо отметить, что величины β и $h_{0\text{Э}}$ постоянны только при неизменном напряжении на индукторах (рис. 1, а, поз. 5). Каждой ступени напряжения, поданного на индукторы, соответствует своя пара значений β и $h_{0\text{Э}}$. Поскольку в процессе заливки это напряжение не изменяют, формула (3) для каждого конкретного варианта подключения индукторов является вполне определенной. Для электромагнитной заливки плавное регулирование является наилучшим, а наиболее рациональной представляется система линейного роста напряжения. Следует попутно отметить, что механическая инерционность металлического расплава минимум на порядок превышает электрическую инерционность электромагнитных систем установки, поэтому в расчетах допустимо пренебречь переходными электрическими процессами. Принцип создания электромагнитной силы в рабочей зоне и математические выражения, включающие электромагнитные величины, приведены в монографии [6].

Уравнение (1) является нелинейным, неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка с переменными коэффициентами и правой частью. В правой части уравнения находится функция гидравлического напора $h_{\text{Э}}(t)$, изменяющаяся под действием электромагнитной силы, создаваемой в рабочей зоне МДН-6А (рис. 1, а, поз. 8). Уравнение невозможно проинтегрировать и получить удобные для анализа и расчета формулы, как функции $z(t)$ и $v(t)$, поэтому приходится применять численные методы решения. В данном случае использовалась математическая система Mathcad 15. При расчетах в уравнение вводили параметры, характерные для основных модификаций магнитодинамической установки МДН-6А (таблица).

Значения параметров, входящих в уравнение (1), при которых рассчитывались графики (рис. 2)

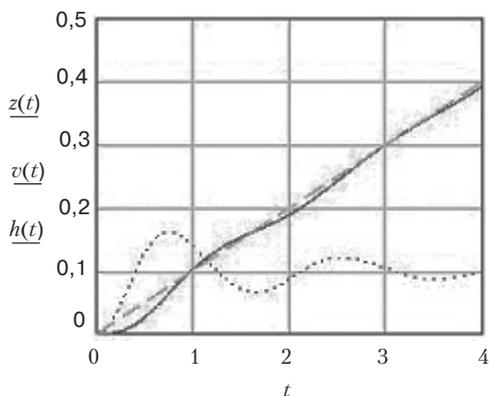
№	A, м 0,5-0,75	D, б/р 3-20	q, б/р 1,1-1,8	λ, 1/м 0,1-0,3	B, б/р 0,95-1,0	B _г , б/р 1,01-1,03	κ, м/с 0,1-0,2	Функция h(t), м
1	0,6	2,0	1,4	0,12	1,0	1,01	0,1	kt
2	0,6	15	1,4	0,12	1,0	1,01	0,1	kt
3	0,6	15	1,4	0,12	1,0	1,01	0,2	kt
4	0,6	15	1,4	0,12	1,0	1,01	1,0	kt
5	0,6	15	1,4	0,12	1,0	1,01	0,1	kt + 0,2
6	0,6	15	1,4	0,12	1,0	1,01	0,15	kt + 0,2

Под обозначением параметров указаны их рабочие диапазоны и размерность (б/р – безразмерная величина)

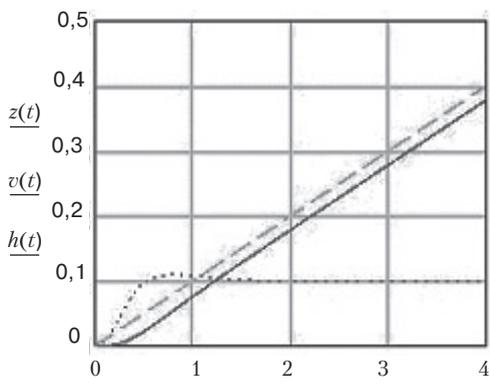
Гидродинамика процессов литья

Рассмотрим графики (рис. 2), рассчитанные при данных параметрах как примеры реальных практических вариантов. Во всех случаях задан линейный рост напора. На всех графиках $z(t)$ – сплошная линия, $v(t)$ – пунктирная линия, $h(t)$ – штриховая линия.

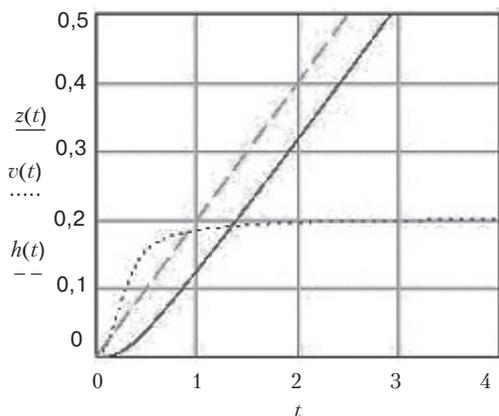
№ 1. В металлопроводе нет дросселирующего сужения, поэтому гидравлическое сопротивление металлотракта минимально, и происходит колебание скорости фронта потока. Высота столба расплава в металлопроводе то опережает величину возрастающего гидравлического напора, то отстает от нее, однако функции $h(t)$ и $z(t)$ практически синхронны с момента $t = 1$ с.



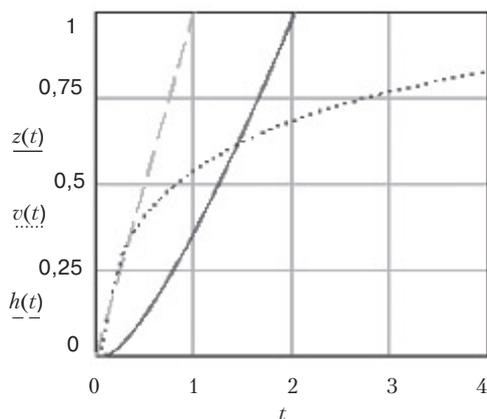
№ 1



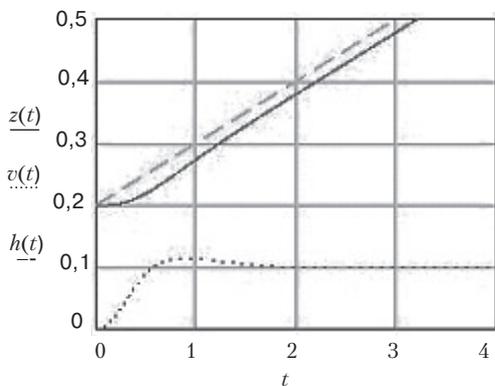
№ 2



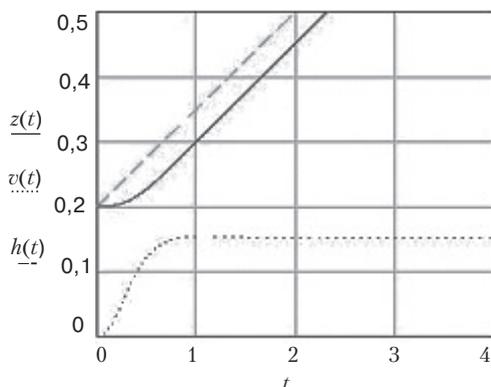
№ 3



№ 4



№ 5



№ 6

Рис. 2. Зависимости координаты $z(t)$, скорости $v(t)$ и гидравлического напора $h(t)$ от времени t , рассчитанные по уравнению (1) при параметрах, приведенных в таблице

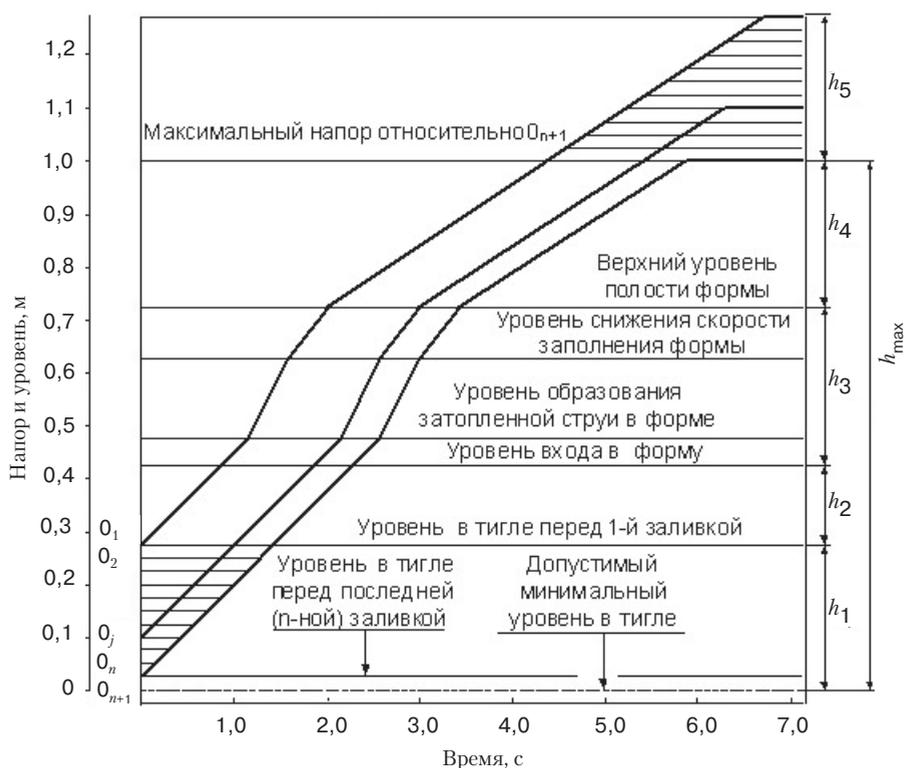


Рис. 3. Пример закона регулирования гидравлического напора при получении отливок способом литья под электромагнитным давлением с учётом понижения уровня расплава в тигле

№ 2. Гидравлическое сопротивление увеличено в 7,5 раза. При той же скорости роста напора, составляющей 0,1 м/с, скорость фронта потока $v(t)$ стабилизируется через 1,2 с и становится равной скорости роста напора. При этом уровень расплава $z(t)$ в металлопроводе отстаёт от значения $h(t)$ примерно на 0,02 м.

№ 3. При условиях, соответствующих № 2 скорость роста напора увеличена в два раза, что привело к увеличению разности между мгновенными значениями $h(t)$ и $z(t)$ до 0,075 м. Скорость $v(t)$ стабилизируется через 1,5 с.

№ 4. При условиях, соответствующих № 2 и № 3, скорость роста напора увеличена до 1,0 м/с. График показывает, что в этих условиях в первую секунду $z(t)$ отстаёт от $h(t)$ на 0,36 м. На практике динамика процесса такая же, как при скачкообразном росте напора. Расчетные данные можно использовать при ступенчатом регулировании напряжения на электромагните.

№ 5. Особенность этого варианта в том, что начальный уровень металла в металлопроводе z установлен на 0,2 м выше нулевого уровня. Этот прием направлен на то, чтобы уменьшить путь пробега фронта потока расплава по металлопроводу и за счет этого снизить его окисление по пути в литейную форму. Важно знать, как такое начальное условие сказывается на динамике подъема расплава в сравнении с вариантом № 2, где при тех же прочих условиях подъем расплава начинается с нулевого уровня. График показывает, что в этих условиях в первую секунду скорость стабилизируется и становится практически равной скорости роста напора. При этом $z(t)$ отстаёт от $h(t)$ на 0,027 м так же, как на графике № 2.

№ 6. Сохранены все параметры варианта № 5, кроме скорости роста напора, которая увеличена с 0,1 до 0,2 м/с. В данном случае стабилизация скорости достигается тоже практически за 1 с. Однако разность между $h(t)$ и $z(t)$ увеличивается до 0,05 м.

Рассмотрим два способа заливки при линейном росте напора со скоростью до

0,2 м/с: литье под электромагнитным давлением и дозирование открытой струей. В обоих случаях необходимо исключить фонтанирование на выходе из металлопровода при заданном расходе. Для этого требуется вычислить минимальный внутренний диаметр металлопровода по формуле

$$d_M = 2 \cdot \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot \rho \cdot v}}, \quad (4)$$

где d_M – внутренний диаметр металлопровода, м; Q – массовый расход, кг/с; ρ – плотность металлического расплава, кг/м³; v – заданная скорость расплава в металлопроводе, м/с.

Снижение уровня в тигле, ведущее к уменьшению приведенной массы, мало сказывается на динамике процесса при параметрах, указанных в табл. Линейный рост напора обеспечивает постоянство скорости фронта потока в металлопроводе при обоих способах заливки. Если в момент достижения расплавом уровня слива остановить рост напора, то за счет кинетической энергии потока выплеснется некоторое количество расплава, и затем, поколебавшись, он остановится на уровне слива. Для того, чтобы расплав вытекал с заданным расходом при дозировании открытой струей необходимо чтоб гидравлический напор, после достижения уровня слива, превысил достигнутую величину. Используя металлопровод с рассчитанным внутренним диаметром, несложно экспериментально определить величину превышения, поскольку расчетным путем это сделать сложно.

В способе литья под электромагнитным давлением литейную форму нужно рассматривать как металлопровод с переменным сечением. На первом этапе рассчитывается подъем расплава с заданной скоростью до уровня входа в полость формы. Второй этап – заполнение формы. Для расчета закона регулирования на втором этапе необходимо полость формы разделить горизонтальными плоскостями на участки, а затем с помощью уравнения (1) произвести расчет скорости изменения гидравлического напора для каждого из них. Следует отметить, что реализация процесса заполнения облегчается тем, что скорость течения расплава в форме может отклоняться от заданного значения в определенных допустимых пределах как в меньшую, так и в большую сторону, без образования литейных дефектов. При линейном росте гидравлического напора со скоростью до 0,2 м/с, скорость фронта потока на выходе из металлопровода не зависит от уровня расплава в тигле, однако время подъема расплава с понижением уровня возрастает, что обязательно должно быть учтено при реализации режима заливки. При каждой очередной заливке начало координат смещается вниз на одинаковую величину Δh , определяемую массой одной отливки M :

$$\Delta h = M / \rho \cdot S_T. \quad (5)$$

Закон регулирования гидравлического напора не может быть универсальным, поскольку определяется конфигурацией конкретных отливок. На графике (рис. 3) в качестве примера показан один из вариантов его реализации, как функция $h_3(t)$, включающая неотъемлемые этапы формирования отливок по технологической схеме (рис. 1, а). Для нахождения функции $U_3(t)$ необходимо воспользоваться экспериментальными зависимостями (3). Вид графика при этом останется таким же, изменится только шкала и наименование оси ординат. Использована линейная функция изменения напора (напряжения) с разными скоростями её роста на этапах заливки: подъем расплава по металлопроводу и создание затопленного уровня для предотвращения фонтанирования; заполнение полости формы примерно на 2/3 ее высоты; снижение скорости фронта потока для уменьшения величины гидравлического удара; наращивание напора до максимального значения с пониженной скоростью, при которой не происходит проникновение расплава в зазоры между

элементами заполненной литейной формы; остановка роста напора и выдержка отливки под избыточным давлением до полного затвердевания. Максимальное рабочее давление, создаваемое магнитодинамической установкой, составляет 25 кПа, что эквивалентно напору в 1,0 м столба чистого жидкого алюминия плотностью 2500 кг/м³, отсчитанного от уровня расплава в тигле. При расчетах необходимо учитывать, что плотность различных марок жидких алюминиевых сплавов может заметно отличаться от 2500 кг/м³, поэтому при одном и том же электромагнитном давлении гидравлический напор может отклоняться от значения 1,0 м как в большую, так и меньшую сторону.

Согласно графику, при полном тигле начало координат находится на уровне 0_1 , а при минимальном количестве расплава, на уровне 0_n . Один из произвольно выбранных промежуточных уровней обозначен 0_j . Всего показано n понижений уровня, что соответствует n заливкам. Так же на графике обозначено: h_1 – понижение уровня расплава в тигле от максимального до минимального; h_2 – расстояние от максимального уровня до входа в литейную форму; h_3 – высота полости литейной формы; h_4 – напор, действующий на верхнюю поверхность полости формы при получении последней n -ной отливки, (h_4+h_5) – напор, действующий на верхнюю поверхность полости формы при получении 1-й отливки, h_{\max} – максимальный рабочий напор. Если напор h_4 достаточен для бездефектного формирования отливки, то с целью экономии электроэнергии имеет смысл все отливки получать при избыточном напоре h_4 относительно верха отливки и, соответственно, (h_3+h_4) относительно зоны подвода расплава в форму. Для этого в схему управления необходимо ввести устройство, которое автоматически будет выполнять данное условие, используя сигнал, характеризующий уровень расплава в тигле. К сожалению, в настоящее время нет достаточно надежных датчиков уровня для алюминиевых сплавов, поэтому самым простым способом выработки такого сигнала представляется использование счетчика циклов. Каждый цикл соответствует уменьшению массы расплава в тигле на массу одной отливки или соответственно понижению уровня на Δh . Счет циклов должен начинаться после очередного пополнения тигля расплавом и сопровождаться обнулением счетчика. Известно также использование весового устройства для непрерывного определения массы расплава в тигле [7]. Этот способ имеет определенные перспективы применения для дискретного дозирования алюминиевых сплавов. Однако для литья под электромагнитным давлением его применение проблематично, поскольку в этом случае тигель, металлопровод и литейная форма зафиксированы относительно друг друга без свободы их взаимного перемещения. Взвешивание же всей установки целиком вместе с массивными электромагнитными системами, станиной, формой и механизмами, не обеспечит необходимой точности определения уровня расплава в тигле.

Выводы

- Уравнение (1) является эффективным инструментом для расчета динамики электромагнитной заливки с помощью магнитодинамической установки типа МДН-6А и создания технологических алгоритмов при получении конкретных отливок. С изменениями не принципиального характера уравнение пригодно для математического описания динамики заливки в других типах электромагнитных заливочных устройствах.

- Приведенные примеры (рис. 2) показывают, что линейная функция напора обеспечивает независимость режима заполнения от уровня в тигле при условии, что создаваемый установкой напор достаточен для получения отливки. При скорости роста напора до 0,2 м/с фронт потока в металлопроводе примерно через одну секунду после начала действия электромагнитной силы приобретает постоянную скорость, равную скорости роста напора.

- При предварительном создании в металлопроводе столба расплава высотой z , находящегося в покое, время достижения фронтом потока заданной скорости суще-

ственно сокращается. При использовании данного приема уменьшается окисление расплава благодаря сокращению его пути в металлопроводе.

• Закон регулирования напряжения на электромагните необходимо корректировать перед каждой очередной заливкой для соблюдения заданного режима заполнения литейной формы. Для этого требуется ввести в систему управления заливкой компактное вычислительное устройство, учитывающее понижение уровня расплава в тигле на основе алгоритмов, рассчитанных по уравнению (1).



Список литературы

1. *Don Randal*. Cosworth Process: Low-Turbulence way to Cast High Integrity Aluminium // *Modern Casting*. – 1987. – No 3. – P. 124-123.
2. *W. Fixsen, L. Ohm, V. Trefnjak*. Electro-magnetic low-pressure casting of Al alloys. *Casting Plant & Technology International*. – 2007. – № 2. – P. 38-39.
3. *Фикссен В. Н.* Тенденция к применению электромагнитных насосов для литья алюминиевых сплавов под низким регулируемым давлением // *Металл и литье Украины*. – 2004. – № 1 -2. С. 27 – 30.
4. *Фикссен В. Н.* Закономерности управления процессом литья под электромагнитным давлением // *МГД в литейном производстве*. – Киев : 1984. – С. 72 – 80.
5. *Колесниченко А. Ф.* Технологические МГД установки и процессы. – Киев : Наук. думка, 1980. – 192 с.
6. Магнитодинамические насосы для жидких металлов // В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. – Киев: Наук. Думка, 1989. – 256 с.
7. *Дубоделов В. И., Богдан К. С., Фикссен В. Н.* Дискретное дозирование металлических расплавов магнитовесовым методом // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2009. – № 5. – С. 8-13.



References

1. *Don Randal*. (1987). Cosworth Process: Low-Turbulence way to Cast High Integrity Aluminium. *Modern Casting*, № 3, pp. 124-123.
2. *W. Fixsen, L. Ohm, V. Trefnjak*. (2007). Electro-magnetic low-pressure casting of al alloys. *Casting plant and technology international*, № 2, pp. 38-39.
3. *Fikssen V. N.* (2004). Tendenciia k primeneniiu elektromagnitnykh nasosov dlia lit'ia aliuminievykh spлавov pod nizkim reguliruемым davleniem. [*To the use of electromagnetic pumps tendency for casting of aluminum alloys under low pressure regulated*]. *Metall i litio Ukrainy*, № 1-2, pp. 27-30. [in Russian].
4. *Fikssen V. N.* (1984). Zakonomernosti upravleniia protsessom lit'ia pod elektromagnitnym davleniem. [*Laws of the control molding protsess under pressure solenoid*]. *MGD v liteinom proizvodstve*, Kiev, p. 72-80. [in Russian].
5. *Kolesnichenko A. F.* (1980). Tehnologicheskie MGD ustanovki i protsessy. [*Process and installation processes MHD*]. Kiev : Naukova dumka, 192 p. [in Russian].
6. Polishhuk V. P., Cin M. R., Gorn R. K. et al. (1989). Magnitodinamicheskie nasosy dlia zhidkikh metallov. [*Magnetodynamic pumps for liquid metals*]. Kiev: Naukova Dumka, 256 p. [in Russian].
7. *Dubodelov V. I., Bogdan K. S., Fikssen V. N.* (2009). Diskretnoe dozirovanie metallicheskih rasplavov magnetovosovym metodom. [*Discrete dosage magnetic metal melts gravimetric method*]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. № 5, pp. 8-13. [in Russian].

Поступила 11.08.2016