
НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ

УДК 621.746.2:66.088

К. С. Богдан, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: mgd@i.kiev.ua

В. Н. Фиксен, канд. техн. наук, ведущ. науч. сотр., e-mail: vfixsen@i.ua

А. Ю. Семенко, мл. науч. сотр., e-mail: mgd@ptima.kiev.ua

М. С. Горюк, канд. техн. наук, зам. зав. отд., e-mail: gormak72@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЗАПОЛНЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ ПРИ ЛИТЬЕ ПОД НИЗКИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Представлена магнитодинамическая установка для литья алюминиевых расплавов под низким электромагнитным давлением, оснащенная новыми устройствами для измерения уровня расплава в тигле и электромагнитного давления в процессе заполнения литейной формы. Описана структурно-функциональная схема установки, построенная с использованием современных средств микропроцессорной техники и обеспечивающая оптимальный режим заполнения формы в соответствии с требованиями технологического процесса. Показаны преимущества этой установки в сравнении с существующими и перспективы ее применения при производстве литых заготовок.

Ключевые слова: магнитодинамическая установка, силоизмерительный датчик, электромагнитное давление, металлопровод, микропроцессор, система управления.

Представлено магнітодинамічну установку для лиття алюмінієвих розплавів під низьким електромагнітним тиском, яку оснащено новим пристроєм для вимірювання рівня розплаву в тиглі та електромагнітного тиску в процесі заповнення ливарної форми. Описано структурно-функціональну схему установки, яка побудована з використанням сучасних засобів мікропроцесорної техніки і забезпечує оптимальний режим заповнення форми відповідно до вимог технологічного процесу. Показано переваги цієї установки порівняно з існуючими та перспективи її застосування при виробництві литих заготовок.

Ключові слова: магнітодинамічна установка, силовимірювальний датчик, електромагнітний тиск, металопровід, мікропроцесор, система управління.

The magnetodynamic installation for casting aluminum melts under low electromagnetic pressure was presented, equipped with a new device for measuring the melt pressure in the crucible and the electromagnetic pressure during filling of the mold. The structural-functional scheme of the installation, constructed with the use of modern means of microprocessor technology and providing the optimal mode of filling the form in accordance with the requirements of the technological process was described. The advantages of this installation in comparison with the existing ones and the prospects of its application in the production of cast billets were shown.

Key words: magnetodynamic installation, force-measuring sensor, electromagnetic pressure, metalduct, microprocessor, control system.

В настоящее время одним из наиболее перспективных применений магнитодинамических установок представляется развитие технологии литья алюминиевых сплавов под низким электромагнитным давлением (ЛЭМД). Ее отличие от обычного литья под низким давлением состоит в том, что газовое силовое воздействие на расплав заменено электромагнитным [1, 2]. Внедренные в производство процессы ЛЭМД были построены на базе магнитодинамической установки МДН-6А, рабочее и максимальное давления которой составляют соответственно 25 и 30 кПа. Более высокий уровень развития эта технология приобретает в сочетании с принципом рассредоточения литниково-питающей системы (РАСЛИТ-ЛЭМД процесс) [1]. При разработке установок, создающих давление до 50 кПа, метод ЛЭМД сможет быть применен для получения отливок высотой до 1 м и для ряда других сплавов, имеющих более высокую плотность, например, цинковых сплавов, латуни и чугуна. Для этого предложены новые устройства [3–5], которые, как предполагается, способны создать давление не менее 50 кПа при более рациональных режимах их работы, чем в существующих установках. Таким образом, в настоящее время имеются предпосылки для существенного расширения области применения процессов ЛЭМД и РАСЛИТ-ЛЭМД.

Целесообразность применения магнитодинамических установок для литья под низким давлением обусловлена рядом преимуществ. Очевидное преимущество способа ЛЭМД состоит в том, что устраняется газовое рабочее тело и, соответственно, неблагоприятные эффекты, связанные с необходимостью герметизации печного пространства и металлопровода. Как следствие, становится допустимым применение пористых огнеупорных материалов для изготовления металлопроводов, а также других неметаллических материалов, которые могут иметь микропоры и микротрещины. Второе преимущество заключается в повышении точности управления заданными режимами течения металла в форме, а также в возможности поддержания уровня расплава вблизи от входа в полость литейной формы без применения специальных средств его стабилизации [2].

Важнейшим этапом технологии получения отливки является период заполнения литейной формы. Этот элемент цикла литья должен быть выполнен с максимальным приближением к режиму, который определяется требованиями литейной технологии. Поэтому необходима разработка устройства для осуществления измерения и автоматического регулирования давления. В установке литья под низким газовым давлением его текущее значение в рабочей камере измеряют манометром, показания которого преобразуют в электрический сигнал, используемый в системе управления. В установке ЛЭМД давление создается в рабочей зоне в результате взаимодействия скрещенных электромагнитных полей. Измерять это давление напрямую в процессе получения отливок невозможно. Поэтому был разработан косвенный метод измерения, основанный на третьем законе Ньютона. Применительно к магнитодинамической установке этот закон можно сформулировать следующим образом: «Сила, приложенная к жидкому металлу, расположенному в рабочей зоне, равна противоположно направленной силе, действующей на электромагнит». Исследования показали, что величина напора, создаваемого электромагнитной силой, прямо пропорциональна измеряемой механической силе, действующей на электромагнит [6]. Данный принцип был положен в основу способа регулирования электромагнитного давления [7]. Благодаря возможности измерять текущее значение электромагнитного давления появилась возможность создать замкнутую систему автоматического регулирования, которая может обеспечить заполнение литейной формы по заданному закону.

В процессе литья уровень расплава в установке снижается, из-за чего возникает два неблагоприятных последствия. Возрастает расстояние от уровня расплава в тигле до входа в литейную форму и, соответственно, уменьшается его масса в установке. Первое влияет на режим процесса заполнения формы, в связи с чем необходима корректировка функции регулирования электромагнитного давления

по мере снижения уровня расплава. Второе вызывает необходимость снижения мощности индукторов, поскольку при уменьшении массы расплава возрастает удельная мощность притока тепловой энергии и значение температуры расплава может выходить за пределы заданного интервала. Эти задачи невозможно решить без датчика, вырабатывающего сигнал о количестве расплава в установке. Известные датчики уровня не надежны в работе, а измерение массы расплава методом взвешивания в этом технологическом процессе проблематично [8]. Необходимо найти способ измерения уровня, который не требует конструктивных изменений установки и использования дополнительных устройств, погружаемых в жидкометаллическую ванну. Эта задача может быть успешно решена путем использования линейного пинч-эффекта [9], который всегда имеет место в магнитодинамической установке. Сущность этого физического явления состоит в том, что электрический ток, протекающий по токонесущим участкам металлотректа, взаимодействует с собственным магнитным полем. В результате возникает электромагнитная сила, направленная от стенок металлотректа к его продольной оси. Если металлостатический напор прижимает расплав к стенкам металлотректа, то пинч-эффект, наоборот, отжимает расплав от них. В момент, когда электромагнитное давление от действия пинч-эффекта превышает металлостатический напор, жидкометаллический виток начинает периодически разрываться и смыкаться. При этом в цепи питания индукторов происходит периодическое скачкообразное изменение тока. Чем выше уровень расплава в тигле, тем больший ток необходим для разрыва витка. Таким образом, существует зависимость между уровнем расплава и величиной тока, при котором происходит разрыв витка. Идея способа состоит в том, чтобы использовать металлопровод в качестве датчика уровня расплава путем искусственного создания в нижнем участке металлопровода разрыва жидкого металла под действием линейного пинч-эффекта [10].

Для понимания физической сущности пинч-эффекта рассмотрим формулу, которая выведена для цилиндрического канала, по которому протекает постоянный электрический ток [9]. Давление в этом участке равно сумме давлений от пинч-эффекта и металлостатического давления, что выражается в системе СИ формулой:

$$p = -\frac{\mu_0 \mu}{4} \cdot j^2 \cdot r^2 + p_C, \quad (1)$$

где p – давление на оси цилиндрического канала, Па; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; μ – магнитная проницаемость расплава, безразмерная величина; j – плотность тока, А/м²; r – радиус рассматриваемого участка металлотректа, м; p_C – статическое давление расплава, Па.

Необходимо обратить особое внимание на то, что в формуле (1) слагаемые в правой части имеют разные знаки. Этим показано, что пинч-эффект отжимает расплав от стенок металлотректа, а статическое давление прижимает его к стенкам. Разрыв происходит при условии, что $p < 0$. Таким образом, каждому значению j однозначно соответствует значение p_C . Следует подчеркнуть, что формула (1) выведена для идеальных условий и постоянного тока и не пригодна для точных расчетов в рассматриваемом случае. Однако она верно отображает физическую сущность линейного пинч-эффекта. На практике необходимо получить экспериментальную зависимость между уровнем расплава h в тигле магнитодинамической установки и одним из электрических параметров – тока или напряжения на индукторах для моментов, когда $p = 0$. Иначе говоря, построить тарировочные зависимости $h = f(I)$ или $h = f(U)$ при $p = 0$.

Описываемый способ измерения уровня поясняется на рис. 1. Стрелками показаны два контура тока при симметричном противофазном включении индукторов б. Этот режим включения необходимо использовать в периоды времени между за-

ливками после сброса электромагнитного давления. Попутно отметим, что при заливке используется противофазный режим включения индукторов, который здесь не показан. Его описание приведено, например, в монографии [11]. На рис. 1 выделены три уровня h : минимальный ($h = 0$), максимальный и переменный текущий, находящийся между максимальным и минимальным уровнями.

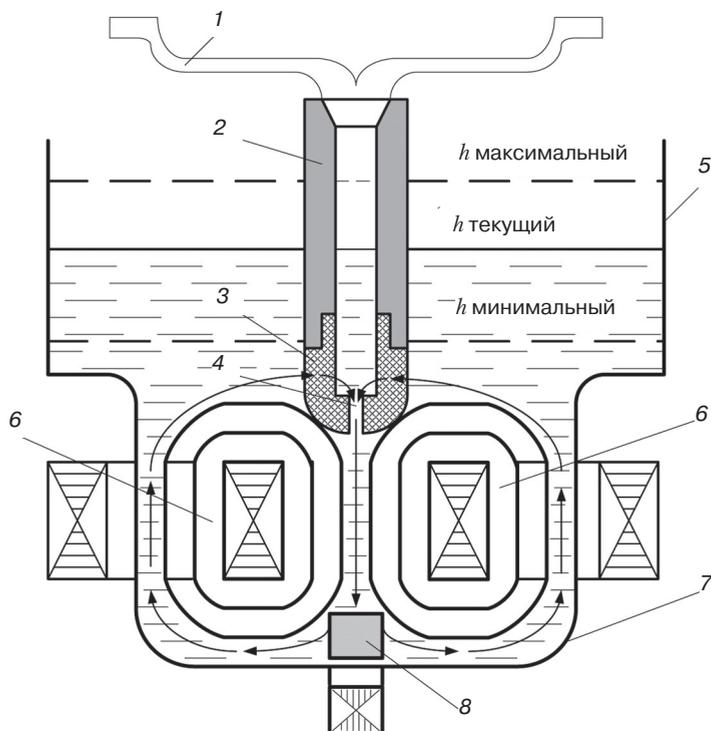


Рис. 1. Схема, поясняющая способ определения уровня расплава в магнитодинамической установке, основанный на использовании линейного пинч-эффекта: 1 – полость литейной формы; 2 – неэлектропроводная часть металлопровода; 3 – электропроводный наконечник металлопровода; 4 – дросселирующее сужение в наконечнике металлопровода; 5 – тигель магнитодинамической установки с жидким металлическим расплавом; 6 – индукторы; 7 – Ш-образный индукционный канал установки; 8 – рабочая зона установки

Определение текущего значения уровня производится следующим образом. После окончания затвердевания отливки электромагнитное давление сбрасывают, а индукторы 6 установки переключают в противофазный режим. При этом напряжение, подаваемое на индукторы от источника плавного регулирования напряжения, ниже того, которое может вызвать разрыв жидкометаллических витков в зоне дросселирующего сужения 4 в электропроводящем наконечнике 3 металлопровода при текущем уровне. Затем плавно повышают напряжение на индукторах 6 до тех пор, пока не появится пульсация тока в цепи их питания. В этот момент автоматически фиксируют ток или напряжение, при которых в дросселирующем сужении 4 начался разрыв жидкометаллических витков. Любой из этих параметров может быть использован как сигнал, соответствующий измеряемому уровню расплава в тигле. В соответствии с его величиной автоматическая система регулирования производит корректировку мощности индукторов в режиме хранения, включаемую в периоды между заливками. Необходимо отметить, что время определения уровня составляет всего несколько секунд, в связи с чем влиянием данного процесса на температуру

заливки можно пренебречь. Приведенный способ применим также для дозирования открытой струей.

Управление процессом заполнения литейных форм металлическим расплавом с требуемой точностью при электромагнитной заливке по схеме литья под низким давлением невозможно без изучения взаимосвязи между управляющим воздействием – изменением напряжения на электромагните и результатом этого воздействия – скоростью течения расплава в металлопроводе и литейной форме. Знание этой взаимосвязи, выраженной на математическом языке, обеспечивает возможность реализации заполнения литейных форм в соответствии с рекомендациями технологов-литейщиков. На практике эту технологическую задачу решают, как правило, методом проб и ошибок, который, несмотря на возможность достижения положительного результата, является нерациональным и дорогостоящим.

Таким образом, первостепенной задачей при создании системы управления процессом заполнения литейных форм при литье под электромагнитным давлением является определение закона регулирования электрического напряжения на электромагните магнитодинамического насоса (МДН) для обеспечения заданного режима течения металлического расплава в металлопроводе и в полости литейной формы.

В результате теоретических исследований, математического и физического моделирования процесса литья под низким электромагнитным давлением в ФТИМС НАН Украины получено дифференциальное уравнение движения потока расплава в металлопроводе МДН при заполнении литейной формы [8]. Это уравнение послужило основой разработки алгоритма и программы управления магнитодинамической установки для литья алюминиевых расплавов под низким электромагнитным давлением с микропроцессорной системой управления.

Структурно-функциональная схема магнитодинамической установки для литья под низким электромагнитным давлением представлена на рис. 2. Тигель 4 с Ш-образным каналом и металлопроводом 2, соединенным с литейной формой 1, установленной на плите 3, закрепленной на неподвижном основании. Индукторы 5, 6 и электромагнит 7, имеющие индуктивную связь с Ш-образным каналом через воздушные зазоры, также закреплены на неподвижном основании.

Для измерения электромагнитного давления p на расплав алюминия в металлопроводе 2 дополнительно введены силоизмерительные тензорезисторные датчики 12, расположенные между электромагнитом 7 и неподвижным основанием (нижней рамой внутреннего корпуса установки).

Расплав алюминия находится в тигле 4 и поступает по каналу и металлопроводу 2 в литейную форму 1, установленную на плите 3, укрепленную на внешней раме установки. В состав установки входит также микропроцессорный блок 13 измерения текущего значения электромагнитного давления в процессе заливки, термоконтроллер 14, подключенный к датчику 18 температуры расплава в тигле 4, цифровые индикаторы 15 и 16 температуры $t^{\circ}\text{C}$ и давления p соответственно, блок 10 управления напряжением, подаваемым на электромагнит 7, блок 11 управления напряжениями, подаваемыми на индукторы 5, 6, пульт управления 17, шкаф управления 9, блок питания 8 электромагнитных систем. Система управления установки построена на базе модулей для распределенных систем серии ADAM-4000 [12, 13], соединенных помехозащищенным интерфейсом RS-485.

Установка (рис. 2) работает следующим образом. В исходном состоянии тигель 4 с Ш-образным каналом и металлопроводом 2 заполнены расплавом, доведенным до заданной температуры. На цифровом индикаторе 15 высвечена температура расплава, а на индикаторе 16 нули во всех разрядах. Перед первой заливкой и всех последующих индикатор давления 16 обнуляется. Индукторы 5 и 6 находятся под напряжением, поддерживая заданную температуру расплава в тигле 4.

По команде с пульта управления 17 срабатывает пусковой элемент в шкафу 9 управления и на электромагните 7 повышают напряжение от блока питания 10. В

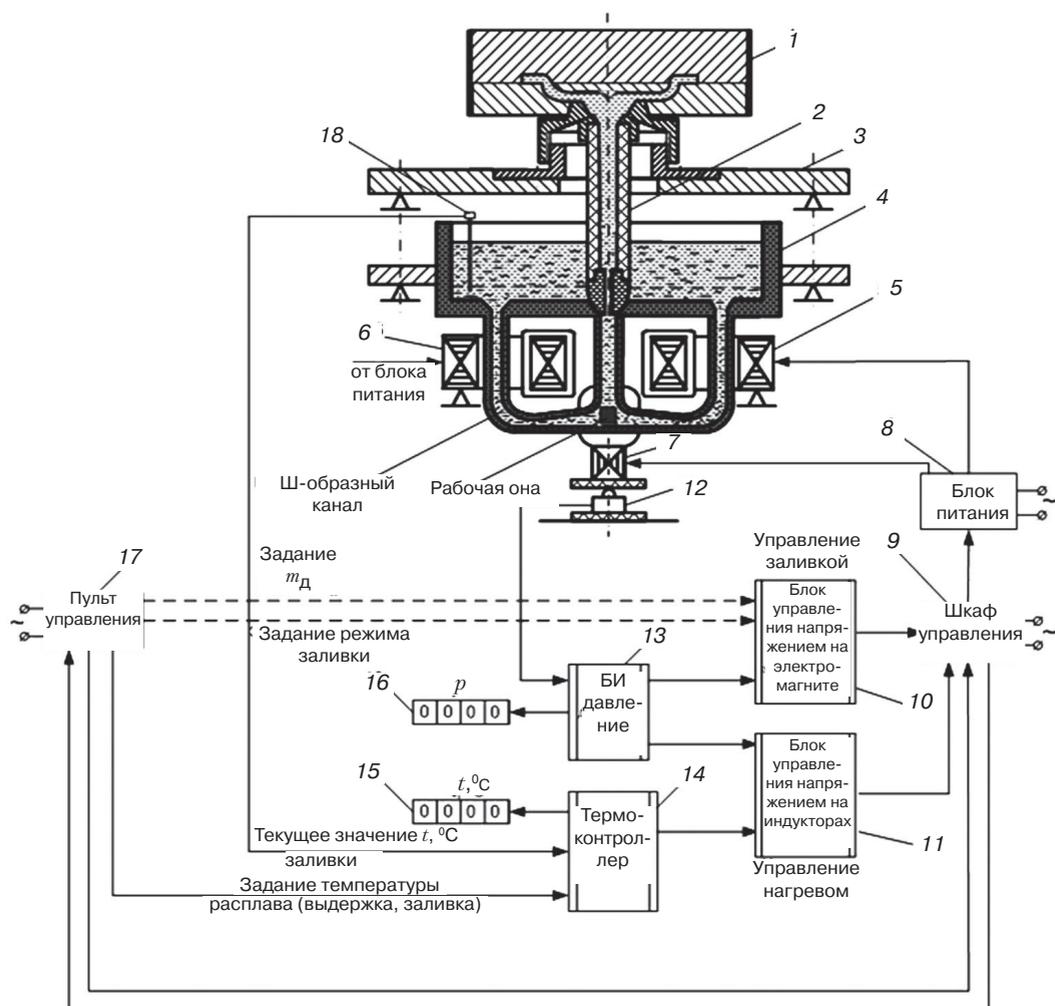


Рис. 2. Структурно-функциональная схема магнитодинамической установки для литья алюминиевых расплавов под низким электромагнитным давлением

результате этого в рабочей зоне возникает электромагнитная сила F , которая создает давление p , расплав поднимается по металлопроводу 2 и поступает в литейную форму 1. Одновременно с силой F возникает ее реакция R , пропорциональная силе F и действующая на датчик 12. После заполнения литейной формы расплавом на электромагните 7 повышают напряжение для улучшения питания отливки при ее затвердевании. После окончания затвердевания отливки из системы управления от микроконтроллера 13 поступает сигнал в шкаф управления 9, отключается электромагнит 7 от блока питания 10 и осуществляется перевод установки в режим «Хранение». При этом остаток расплава в металлопроводе 2 возвращается на исходный уровень, который соответствует уровню расплава в тигле 4 и проводится извлечение отливки из литейной формы. Перед началом следующего цикла заливки осуществляется контроль уровня h расплава в тигле 4. Фактическое значение уровня h поступает в микроконтроллер 13 и является исходным параметром для коррекции функции регулирования напряжения, подаваемого на электромагнит 7 при следующей заливке. Микроконтроллер 13 проводит расчет функции регулирования напряжения на электромагните с учетом величины понижения уровня расплава в тигле, в том числе и для обеспечения заданного избыточного давления после заполнения формы. Последующие циклы заполнения формы расплавом осуществляется аналогично.

Предложенная система автоматического управления способна обеспечить соблюдение заданных технологических режимов получения отливок, как под низким

электромагнитным давлением, так и при дозировании открытой струей при использовании магнитодинамической установки в качестве заливочного устройства.

Таким образом, в настоящее время существуют все необходимые условия для создания автоматической системы управления процессами электромагнитной заливки алюминиевых сплавов.



Список литературы

1. Фиксен В. Н., Дубоделов В. И., Котлярский Ф. М. и др. Получение отливок из алюминиевых сплавов с использованием электромагнитного давления // Процессы литья. – 1996. – № 4. – С. 64–72.
2. Фиксен 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.
3. Патент № 108335 Україна МПК В22D 35/00, В 22D 39/00, F27D 11/00, H05B 6/02, H05B 6/34. Заливальный пристрій магнітодинамічного типу / В. М. Фіксен. Опубл. 10.04.2015. Бюл. № 7.
4. Патент на корисну модель № 113617 Україна МПК (2016.01) В22D 35/00, В22D 39/00, В22D 27/02, F27D 11/00, H05B 6/02, H05B 6/34. Магнітодинамічна установка для лиття під електромагнітним тиском / В. М. Фіксен. Опубл. 27.02.2017, Бюл. № 4.
5. Патент № 114188 Україна МПК: В22D18/04, В22D37/00, H05B6/10. Електромагнітний заливальний пристрій / Фіксен В. М., Дубоделов В. І., Погорський В. К., Ященко О. В. Опубл. 10.05.17, Бюл. № 9.
6. Фиксен В. Н. Исследование электродинамического взаимодействия электромагнита с жидкометаллическим витком в установке МДН-6 / В сб.: Магнитодинамические установки для плавки, обработки и заливки литейных сплавов. – К.: Институт проблем литья АН УССР, 1989. – С. 51–55.
7. А. с. 1138238 СССР, МКИЗ В 22 D 17/32. Способ регулирования давления при литье под низким электромагнитным давлением / В. Н. Фиксен, В. П. Полищук, Ю. В. Моисеев и др. Опубл. 07.02.85. Бюл. № 5.
8. Фиксен В. Н. Расчет закона регулирования для электромагнитной заливки // Процессы литья. – 2016. – № 5. – С. 13–21.
9. Шерклиф Дж. Курс магнитной гидродинамики. – М.: Мир, 1967. – 320 с.
10. А.с. 1781929 СССР, В 22 D 39/00. Способ регистрации уровня металла в тигле магнитодинамического насоса / В. Н. Фиксен, М. Ф. Гаврутенко. ДСП. 04.12.90.
11. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / Полищук В. П., Цин М. Р., Горн Р. К. и др. – К.: Наук. думка, 1989. – 256 с.
12. Весовой магнитодинамический дозатор металлических расплавов / К. С. Богдан, В. И. Дубоделов, В. Н. Фиксен и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 5. – С. 31–34.
13. Модули распределения ввода/вывода серии ADAM-4000. URL: www.advantect.ru/products/remote-i-o-modules.



References

1. Fixsen, V. N., Dubodelov, V. I., Kotlyarskiy, F. M. et al. (1996) Poluchenie otlivok iz alyuminievykh spлавov s ispolzovaniem elektromagnitnogo davleniya [Preparation of castings from aluminum alloys using electromagnetic pressure]. Protsessy litya, no. 4, pp. 64–72. [in Russian].
2. Fixsen, V. N. (2004) Tendentsiya k primeneniyu elektromagnitnykh nasosov dlya litya alyumini-evykh spлавov pod nizkim reguliruemym davleniem [The tendency to use electromagnetic pumps for casting aluminum alloys under low controlled pressure]. Metall i lite Ukrainy, no. 1–2, C. 27–30. [in Russian].

3. Patent № 108335 Ukraina MPK B22D 35/00, B 22D 39/00, F27D 11/00, H05B 6/02, H05B 6/34. Zalyvalnyy prystriy mahnitodynamichnoho typu [*Magnetodynamic type flooding device*]. V. M. Fixsen. Opubl. 10.04.2015. Byul. no. 7. [in Ukrainian].
4. Patent na korysnu model № 113617 Ukraina MPK (2016.01) B22D 35/00, B22D 39/00, B22D 27/02, F27D 11/00, H05B 6/02, H05B 6/34. Magnitodinamichna ustanovka dlya littyia pid elektromagnitnim tiskom [*Magnetodynamic installation for electromagnetic pressure casting*]. V. M. Fixsen. Opubl. 27.02.2017, Biul. № 4. [in Ukrainian].
5. Patent № 114188 Ukraina MPK: B22D18/04, B22D37/00, H05B6/10. Elektromahnitnyi zalyvalnyi prystriy [*Electromagnetic flush device*]. V. M. Fixsen, V. I. Dubodielov, V. K. Pohorskyi, O. V. Yashchenko. Opubl. 10.05.17, Biul. № 9. [in Ukrainian].
6. Fixsen, V. N. (1989) Issledovanie elektrodinamicheskogo vzaimodeystviya elektromagnita s zhidkometallicheskim vitkom v ustanovke MDN-6 [*Investigation of the electrodynamic interaction of an electromagnet with a liquid metal winding in the installation of MDN-6*]. V sb.: Magnitodinamicheskie ustanovki dlya plavki, obrabotki i zalivki liteynykh splavov. – K.: Institut problem litya AN USSR, pp. 51–55. [in Russian].
7. A. s. 1138238 USSR, MKI3 B 22 D 17/32. Sposob regulirovaniya davleniya pri lite pod nizkim elektromagnitnym davleniem [*The method of pressure control at casting under low electromagnetic pressure*]. V. N. Fixsen, V. P. Polishchuk, Yu. V. Moiseev et al. Opubl. 07.02.85. Byul. № 5. [in Russian].
8. Fixsen, V. N. (2016) Raschet zakona regulirovaniya dlya elektromagnitnoy zalivki [*Calculation of the law of regulation for electromagnetic filling*]. Protsessy litya, no. 5, pp. 13–21. [in Russian].
9. Sherklif, Dzh. (1967) Kurs magnitnoy gidrodinamiki [*Course of magnetic hydrodynamics*]. M.: Mir, 320 p. [in Russian].
10. A. s. 1781929 СССР, B 22 D 39/00. Sposob registratsii urovnya metalla v tigle magnitodinamicheskogo nasosa [*Method for registering the metal level in a magnetodynamic pump crucible*]. V. N. Fixsen, M. F. Gavrutenko. DSP 04.12.90. [in Russian].
11. Polishchuk, V. P., Tsin, M. R., Gorn, R. K. et al. (1989) Magnitodinamicheskie nasosy dlya zhidkikh metallov [*Magnetodynamic pumps for liquid metals*]. K.: Nauk. Dumka, 256 p. [in Russian].
12. Bogdan, K. S., Dubodelov, V. I., Fixsen, V. N. et al. (2002) Vesovoy magnitodinamicheskiy dozator metallicheskih rasplavov [*Weighted magnetodynamic batcher of metallic melts*]. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost, no 5, pp. 31–34. [in Russian].
13. Moduli raspredeleniya vvoda/vyvoda serii ADAM-4000 [*ADAM-4000 series I/O distribution modules*]. URL: www.advantect.ru/products/remote-i-o-modules. [in Russian].

Поступила 19.07.2017