А. В. Дроботов, И. С. Торубаров, И. В. Мартынович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕНИ ВКЛЮЧЕНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ НА ПОДАЧУ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО НАСОСА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: Alexey.Drobotov@gmail.com

Исследованы различные подходы к аддитивному производству металлических объектов. Предложен способ подачи материала, основанный на принципе действия магнетогидродинамического насоса индукционного типа. Исследовано влияние времени включения обмоток насоса на его производительность.

Ключевые слова: аддитивные технологии, магнетогидродинамика (МГД), литье металла, расплав, насос, метод конечных элементов.

A. V. Drobotov, I. S. Torubarov, I. V. Martinovich

INVESTIGATION OF THE COIL SWITCHING TIME EFFECT ON A MAGNETIC HYDRODYNAMIC PUMPFLOW RATE

Volgograd State Technical University

Various approaches to additive manufacturing of metal objects are investigated. A method for feeding material based on the principle of operation of an induction magnetohydrodynamic pump is proposed. The influence of the switching time effect on the pump flow rate is investigated.

Keywords: additive technology, magnetohydrodynamic (MHD), metal casting, melt, pump, finite element method.

Аддитивные технологии (АТ) производства конечных изделий из металлов находят все большее применение в различных областях: медицине, машиностроении (особенно авиационной и космической промышленности), литейном производстве. Их ключевым преимуществом является возможность получения изделий со сложной формой и внутренней структурой.

В работе [1] были рассмотрены различные способы аддитивного производства металлических объектов, такие как наиболее распространенная технология селективного лазерного плавления (Selecting Laser Melting, SLM) специально подготовленного металлического порошка, а также группа подходов, основанных на дискретной подаче металлического расплава («Drop-on-demand» способ). Альтернативой технологии SLM является метод, получивший название «Bond and Powder Extrusion» (BPE) и получивший при-

менение в установках компании Markforged[2]. Метод основан на совмещении технологий литья под давлением и 3D печати путем наплавления материала (Fused Filament Fabrication, FFF): перед началом процесса подготавливается гранулированный материал, представляющий собой смесь металлического порошка и термопласта, затем разогретый до тягучей массы материал выдавливается на платформу в форме изделия. Полученную заготовку погружают в ванну с растворителем, а после – в печь, в результате чего полимер растворяется и выжигается, оставляя на выходе полностью металлическое изделие. Данная технология по сравнению с SLM позволяет экономить на подготовке материала (за счет снижения требований к металлическому порошку), однако все равно требует длительного, сложного и дорогостоящего процесса, состоящего из множества операций.

Результаты предыдущих исследований по тематике микрокапельной подачи жидкостей показали, что широко используемые в струйных принтерах и производстве электроники Drop-on-demand методы термической (Thermal Ink Jet или Bubble Jet) и пьезоэлектрической (Piezoelectric Ink Jet) подачи не способны обеспечить генерацию капель металлических высокотемпературных сплавов (выше 600 °С) из-за температурных ограничений. Ряд зарубежных научных коллективов в настоящее время ведут исследования, направленные на поиск нового метода генерации капель металлических расплавов, основанный на принципах магнитной гидродинамики.

Рис. 1. Геометрия модели МГД насоса

На основе существующий разработок в области магнитогидродинамической подачи рас-

Рис. 2. Зависимость максимального расхода Q от времени t_2 включения

Из графика видно, что если включить две обмотки одновременно, то максимальный расход будет практически такой же, как и при одной. Однако, если вторую обмотку подключить на 1,5 мс позже, то максимальный расход возрастет в 1,35 раза, а если через 2 мс, то в 1,5 раза.

плава алюминия [3] предложена схема магнитогидродинамического (МГД) насоса (рис. 1), состоящего из камеры 1 с полостью внутри, сопла 2 и трех катушек 3, 4, 5. В силу сложной формы канала расчет сил Лоренца, возбуждаемых в потоке расплава при включении катушек, и скорости самого потока проблематичен, поэтому исследование предложенного устройства проводилось на основе имитационной модели, созданной в пакете COMSOL Multiphysics.

От конструктивных и рабочих параметров очень сильно зависит эффективность насоса. Неправильный порядок подачи напряжения на обмотки катушек приводит не только к полной неработоспособности насоса, но и к тому, что он перемещает расплав в противоположном направлении. В связи с этим было произведено исследование влияния порядка и моментов времени включения обмоток катушек на подачу МГД насоса.

Моделирование проводилось со следующими значениями параметров установки: диаметр сопла – 0,5 мм; диаметр медного провода катушки – 2 мм, число витков в каждой катушке – 4; подводимое к катушке номинальное напряжение – 1,5 В. Для начала задействовалась только первая катушка (п. 3 на рис. 1). Тогда на выходе достигалась максимальная подача $Q=98 \text{ мм}^3/\text{с}$. Затем, через некоторое время t_1 включалась вторая обмотка (п. 4 на рис. 1). Зависимость максимального расхода Q от времени t_2 включения второй катушки показана на рис. 2. График изменения тока катушек при этом показан на рис. 3.

Рис. 3. Изменение тока I катушек индуктивности: 1 – первой; 2 – второй

Затем было зафиксировано время t_2 включения второй катушки равным 1 мс и проведена серия моделирований (рис. 4) для изучения влияния времени t_3 включения третьей катушки (п. 5 на рис. 1) на максимальный расход Q . В результате установлено, что если включить

третью катушку вместе со второй, то максимальный расход возрастет в 1,33 раза, а если через 1,9 мс после первой (через 0,9 мс после второй), то в 1,8 раза. Таким образом, произ-

водительность двух дополнительных катушек, включаемых в нужные моменты времени, увеличивает производительность МГД насоса в 2,41 раза.

Рис. 4. Зависимость максимального расхода Q от времени t_2 включения

Рис. 5. Изменение тока I катушек индуктивности: 1 – первой; 2 – второй; 3 – третьей

Включение 2 и 3 катушек индуктивности создает наиболее сильные пульсации давления в выходном сопле МГД насоса, что показано на рис. 6. Характер изменения потребляемой мощ-

ности первой катушкой индуктивности показан на рис. 7. Колебания мощности вызваны «наводками» от других катушек индуктивности.

Рис. 6. Изменение давления P в выходном сопле МГД насоса

Рис. 7. Изменение мощности W катушек индуктивности

Полученная модель подтверждает работоспособность предложенной схемы подачи металлического расплава с помощью МГД насоса. Дальнейшая работа по моделированию будет направлена на варьирование конструктивных параметров для повышения эффективности МГД насоса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дроботов, А. В. Magnetohydrodynamic pump application in complex form aluminum parts additive manufacturing [Электронный ресурс] / А. В. Дроботов, А. Р. Авдеев, А. А. Швец // MATEC Web of Conferences. Vol. 224 : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2018 (ICMTME 2018) (Sevas-

topol, Russia, 10-14 September, 2018) : conference proceedings / ed. by S. Bratan [et al.] ; Sevastopol State University, National University of Science and Technology «MISiS», Polzunov Altai State Technical University, Inlink Ltd., International Union of Machine Builders. – [Publisher: EDP Sciences], 2018. – 6 p. – URL : https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/83/mateconf_icmtme2018_01076.pdf (дата обращения: 17.02.2020)

2. The Markforged Metal Additive Manufacturing Process [Электронный ресурс] URL : <https://markforged.com/learn/metal-additive-manufacturing-process/> (дата обращения: 17.02.2020)

3. Thirumangalath, S. Liquid Metal 3D Printing: A Magnetohydrodynamic Approach [Электронный ресурс] / S. Thirumangalath, S. Vader, Z. Vader // URL: <https://docplayer.net/54679479-Liquid-metal-3d-printing-a-magnetohydrodynamic-approach.html> (дата обращения: 17.02.2020)