

Научная статья

Original article

УДК 66.041



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА В ПЕЧИ-МИКСЕРЕ ПУТЕМ  
ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИНДУКТОРА МГД ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ  
С ПОПЕРЕЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ**

**SIMULATION OF A MELT FLOW IN A MIXER FURNACE BY CHANGING  
THE POSITION OF THE INDUCTOR OF THE MHD MIXER WITH A  
TRANSVERSE MAGNETIC FLOW**

**Боякова Татьяна Алексеевна**, доцент, к.т.н., Московский  
Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва,  
[boyakova\\_ta@mail.ru](mailto:boyakova_ta@mail.ru)

**Tatyana A. Boyakova**, Associate Professor, Ph.D., Moscow State Technical  
University. N.E. Bauman, Moscow, [boyakova\\_ta@mail.ru](mailto:boyakova_ta@mail.ru)

**Аннотация.** В данной работе рассматривается задача получения различной конфигурации распределения магнитных потоков при воздействии на расплав алюминия поперечным, бегущим магнитным полем. Перемешивание расплава позволяет получить качественные сплавы. Для большего охвата застойных зон при перемешивании необходимо менять конфигурацию электромагнитного поля. Созданная математическая модель в трехмерной

постановке позволяет получить различные картины распределения поля при стандартном положении индуктора МГДП и его повороте на  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $60^\circ$ .

**Annotation.** In this paper, we consider the problem of obtaining a different configuration of the distribution of magnetic fluxes when an aluminum melt is exposed to a transverse, traveling magnetic field. Stirring of the melt makes it possible to obtain high-quality alloys. For greater coverage of stagnant zones during mixing, it is necessary to change the configuration of the electromagnetic field. The created mathematical model in a three-dimensional setting makes it possible to obtain different patterns of field distribution at the standard position of the MGDП inductor and its rotation by  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $60^\circ$ .

**Ключевые слова:** МГД перемешивание, конфигурация распределения магнитного поля.

**Keywords:** MHD mixing, magnetic field distribution configuration.

Приготовление высококачественных сплавов цветных металлов является актуальной задачей. Для этого наиболее эффективная технология связана с использованием магнитогидродинамических перемешивателей (МГДП). Перемешивание при приготовлении сплавов, является практически обязательным условием. Магнитогидродинамические (МГД) технологии, просты, надежны и имеют высокую эффективность. Повышается производительность плавильно-литейных агрегатов (ПЛА) за счет сокращения времени приготовления сплавов [1]. Одним из основных направлений совершенствования процессов плавки литейных сплавов является интенсификация теплообмена в ванне плавильных печей при помощи принудительного перемешивания расплава. Температурные перепады в ванне по высоте расплава приводят к образованию неоднородности состава расплава. Кроме того, легирующие компоненты сплава подаются в ванну обычно в твердом виде при плотности, значительно отличающейся от плотности расплава, что приводит к дополнительной физико-химической неоднородности.

Суть технологии МГДП заключается в создании электромагнитного поля (ЭМП) [2]. Поле подразделяется на бегущее и пульсирующее, по-разному проявляющихся в разных зонах индуктора, под действием которых расплавленный металл перемешивается в одной части печи. В другой части перемешивается за счет изменения направления электромагнитного поля (реверса) [3].

Наиболее целесообразно устанавливать МГДП под днищем ванны. Это позволяет эффективно перемешивать расплав как при полной, так и малой глубине расплава. Не всегда возможно установить индуктор МГДП под днище ванны, так как это связано с конструктивными и экономическими трудностями. В таких случаях целесообразно устанавливать индукторы с боковой стороны печи-миксера.

В устройство МГДП входит источник питания, индуктор, система автоматического управления и охлаждения. Индукторы МГДП представляют собой линейные индукционные машины (ЛИМ). ЛИМ в свою очередь делятся на машины с продольным и поперечным магнитным потоком [3]. В обоих случаях индукторы создают бегущую электромагнитную волну. В статье рассматривается МГДП с поперечным магнитным потоком. У этих машин магнитный поток замыкается в плоскости, перпендикулярной распространению бегущей электромагнитной волны. Бегущим магнитным полем в расплаве наводятся вихревые токи, которые замыкаются в плоскости, перпендикулярной, замыканию магнитного потока [4].

Целью работы являлось повышение технико-экономических показателей печей-миксеров за счет организации эффективного перемешивание расплава во всем объеме ванны, исключая застойные зоны. Для достижения этой цели была разработана математическая модель в пакете ANSYS. Задача была оставлена в трехмерной постановке и решалась методом конечных элементов с использованием системы уравнений, описывающих электромагнитное поле. Многофазный индуктор МГДП был установлен с боковой стороны печи-миксера. На расплавленный металл воздействовали поперечным бегущим

магнитным полем [5]. Немагнитный зазор между индуктором и миксером составлял 0,3 м, частота питающего тока – 1 Гц. Размеры миксера: длина – 6 м, ширина – 3 м, высота – 0,8 м.

На рисунках 1 и 2 приведены картины распределения удельных электромагнитных сил и вихревых токов при стандартном расположении индуктора МГДП.

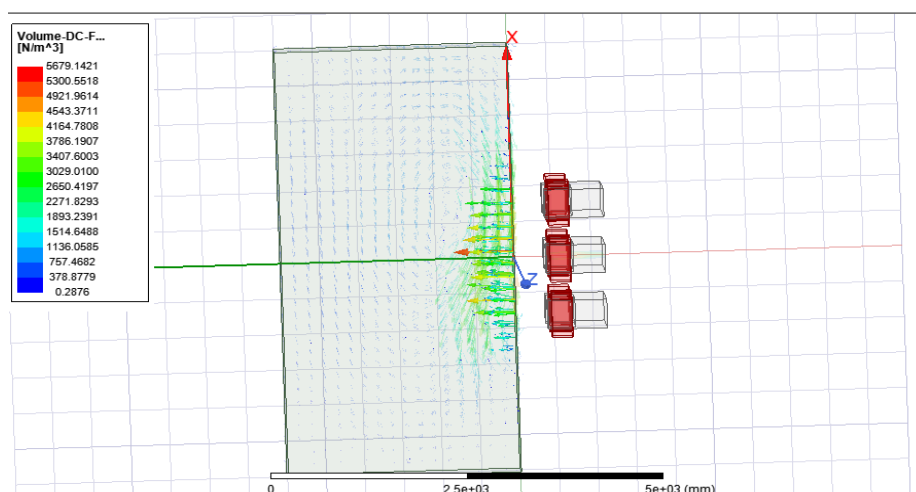


Рисунок 1 – Значения удельных электромагнитных сил в расплаве при стандартном расположении индуктора

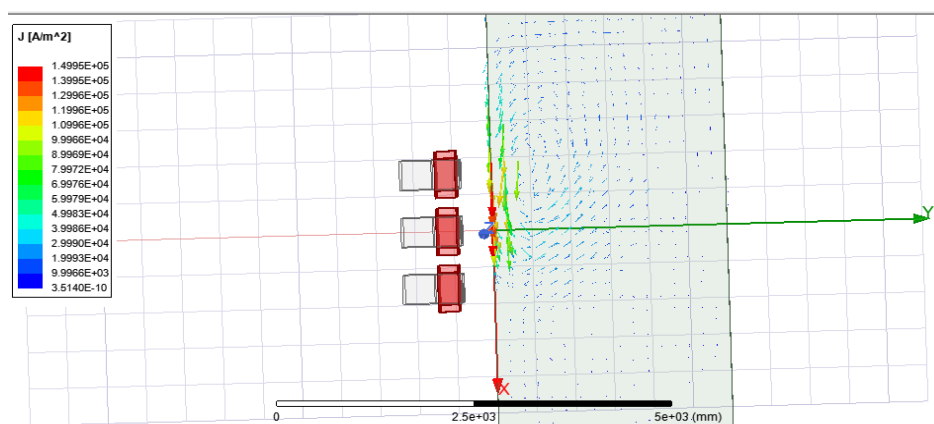


Рисунок 2 – Векторное поле вихревых токов в расплаве при стандартном положении индуктора

Изменяя угол поворота индуктора МГД перемешивателя относительно печи-миксера, можно получить электромагнитное поле различной конфигурации и интенсивности, реализующее многокомпонентное движение расплава в печи-миксере, наиболее эффективно удовлетворяющее технологическим задачам перемешивания – увеличению скорости плавления загрузки и растворению легирующих добавок в жидком металле при приготовлении сплавов.

Угол поворота индуктора изменялся от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ . Полученные результаты суммарной силы и ее составляющих при разных углах поворота приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета сил при повороте индуктора относительно его оси

Угол поворота, град	Суммарная сила, Н	Тангенциальная сила, Н	Поперечная сила, Н	Нормальная сила, Н
	Поперечный поток	Поперечный поток	Поперечный поток	Поперечный поток
0	852,874	289,756	0,253	613,861
30	796,849	269,054	67,321	553,716
45	731,749	209,827	103,223	489,847
60	682,348	152,849	145,19	402,628

На рисунке 3 представлены графики зависимости сил от угла поворота индуктора. Как видно из графика, при увеличении угла поворота индуктора показатели тянущего усилия немного ухудшаются.

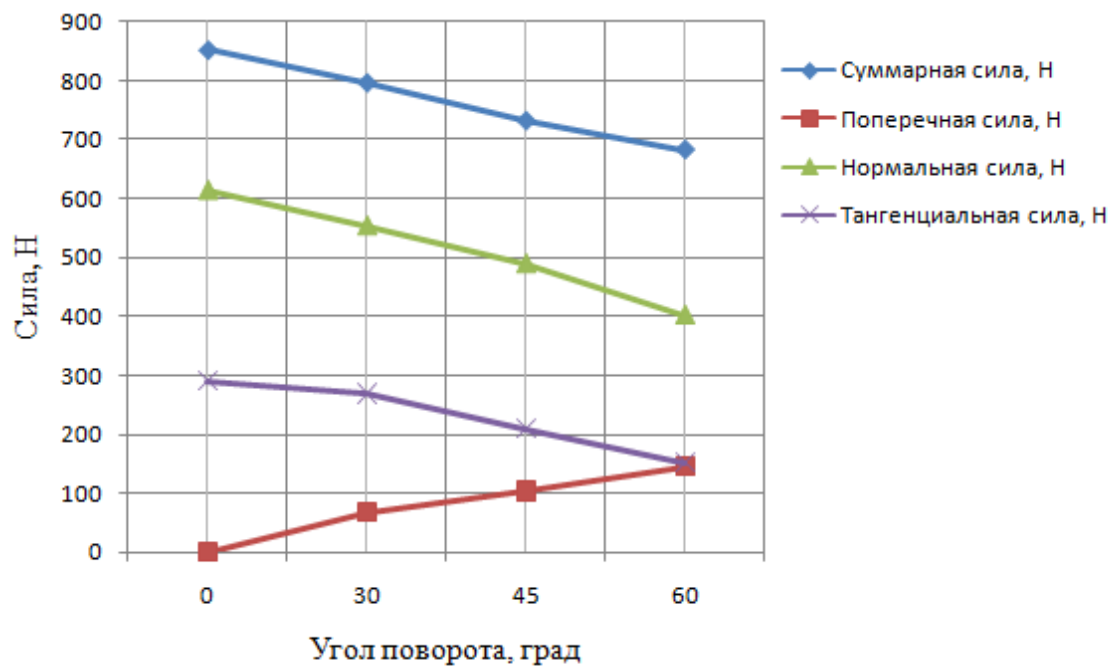


Рисунок 3 – Зависимость составляющих силы от угла поворота индуктора

При этом изменение угла поворота позволяет получить совершенно другую картину распределения удельных электромагнитных сил (рисунок 4) и вихревых токов (рисунок 5).

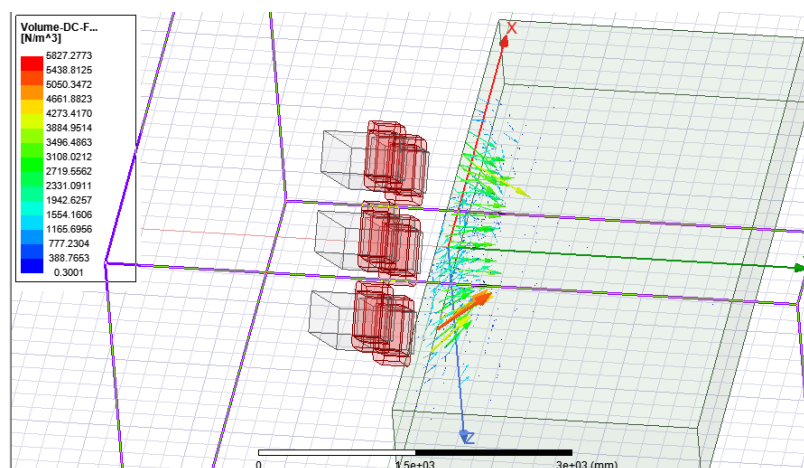


Рисунок 4 – Значения удельных электромагнитных сил в расплаве при повороте индуктора

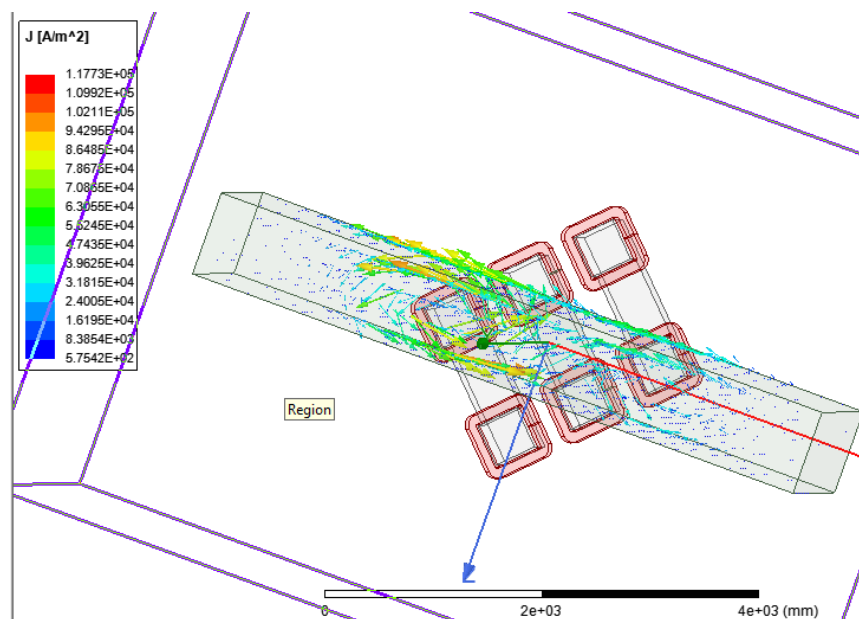


Рисунок 5 – Векторное поле вихревых токов в расплаве при повороте индуктора

Сравнить картины распределения электромагнитного поля можно по конфигурации вихрей, образующихся в ванне миксера. Созданные вихри при повороте индуктора позволяют охватить большее пространство застойных зон.

В процессе проведения исследовательских работ были получены картины магнитных потоков при стандартном расположении индуктора и при разных углах поворота индуктора МГДП. Изменение конфигурации электромагнитного поля позволяет охватить застойные зоны расплава. В дальнейшем, созданная математическая модель, может служить образцом при проектировании установок МГДП промышленного назначения и использование изменения угла поворота индуктора для изменения конфигурации течения расплава.

#### Литература:

1. Пат. RU 2543022 С1, МПК F27В3/20, Печь миксер / патентообладатель ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики», заявл. 11.11.2013, опубл. 27.02.2015.
2. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. – М.:Гардарики, 2001. – 317 с.

3. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. - Ленинград, «Энергия», 1970. – 272с/
4. Калнинь Т.К. Линейные индукционные машины с поперечным магнитным потоком. – Рига: Зинатне, 1980. – 170 с.
5. Верте Л.А. Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла / Л.А. Верте. М.:Металлургия, 1967. – 208 с.

#### **References:**

1. Pat. RU 2543022 C1, IPC F27B3/20, Furnace mixer / Patent holder ООО SPC Magnetohydrodynamics, Appl. 11/11/2013, publ. 02/27/2015.
2. Bessonov, L.A. Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field / L. A. Bessonov. - М.: Gardariki, 2001. - 317 p.
3. Voldek A.I. Induction magnetohydrodynamic machines with liquid metal working fluid. - Leningrad, "Energy", 1970. - 272p.
4. Kalnin T.K. Linear induction machines with transverse magnetic flux. - Riga: Zinatne, 1980. - 170 p.
5. Verte L.A. Electromagnetic pouring and processing of liquid metal / L.A. Verte. М.: Metallurgy, 1967. - 208 p.

© Боякова Т. А., 2023 *Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral" №3/2023*

**Для цитирования:** Боякова Т. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА В ПЕЧИ-МИКСЕРЕ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИНДУКТОРА МГД ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ С ПОПЕРЕЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ// *Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral" №3/2023*