УДК 537.8:517.1

ДВИЖЕНИЕ РАСПЛАВА В ТИГЛЕ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ СИЛЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Мусаева Д.А., Ильин В.К., Синявин А.А., Гежа В., Бакке Э.

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия
Ганноверский Университет им. Лейбница, Институт Электропроцессов, Ганновер, Германия
Латвийский Университет, Рига, Латвия

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается влияние пульсирующей силы электромагнитного (ЭМ) поля на движение расплава металла Вуда в тигле методами компьютерного моделирования в программной среде ANSYS. Проводится анализ изменения картины распределения средней скорости в вертикальном сечении тигля, при этом влияние пульсирующей силы рассматривается в сравнении с движением металла под воздействием условно стационарной силы ЭМ поля. Импульсное воздействие осуществляется при помощи моделирования прерываемого протекания переменного тока (f_{ac}=400 Гц) в индукторах печи, создающего электромагнитное поле. Под стационарным воздействием понимается постоянное протекание тока в индукторах. При этом в обоих случаях соблюдается равенство прикладываемой силы ЭМ поля. Показано повышение интенсивности перемешивания металла в занимаемом объеме при пульсационном воздействии.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальным является вопрос применения пульсирующих магнитных полей, с целью повышения качества затвердевающего металла в процессе кристаллизации, а также изучение нестационарного процесса плавления с периодическим подводом энергии [1, 2].

Данный способ периодического воздействия на материал, во многих случаях, приводит к повышению эффективности протекания процесса в период подведения энергии, а также к эффекту экономии энергоресурсов в связи с временным отсутствием их затрат в период действия сил инерции.

Исходя из мирового опыта применения пульсирующего электромагнитного поля для получения эффекта повышения качества затвердевающего металла, наибольший интерес представляют пульсации поля с низкой частотой [3], что обуславливается инертностью жидкости.

Рядом авторов отмечается значительное улучшение микроструктуры затвердевающего материала под воздействием электромагнитных пульсаций, по сравнению с процессом кристаллизации в условиях отсутствия электромагнитного воздействия [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ влияния низкочастотных пульсаций силы ЭМ поля (f_{puls}=[0; 1] Гц) на развитие структуры потока проводился на основании распределения скоростей, получаемых в течение процесса моделирования.

На первом этапе проведения численного эксперимента в приложении Mechanical APDL программного пакета Ansys для двух- и трёхмерной постановки рассчитывалось распределение силы ЭМ поля, проникающей в расплав в плоском среднем осесимметричном сечении, при заданных параметрах силы и частоты тока. Далее рассчитанные силы загружались в приложение для моделирования течений Fluent того же программного пакета, где для двухмерной модели имелось плоское распределение силы ЭМ поля, а для трёхмерного случая сила распределялась по всему

© Мусаева Д.А., Ильин В.К., Синявин А.А., Гежа В., Бакке Э.

объёму и также имела осесимметричный характер.

В приложении Fluent в первом численном эксперименте сила ЭМ поля действовала постоянно, в процессе развития потока в различных точках геометрии замерялись значения скоростей, давлений и других параметров. Каждый опыт продолжался до достижения колебания величины скорости около одного значения.

Проверка адекватности математической модели проводилась путём сопоставления значений скоростей в различных точках объёма расплава со скоростями, полученными в ходе физического эксперимента [5] для стационарного воздействия.

Для моделирования пульсирующей силы ЭМ поля повторялась процедура загрузки силы в трёхмерную сетку, представляющую собой объём, занимаемый металлом, но при этом прописывалось, что сила действует с перерывами, в соответствии с заданной частотой импульсов и их скважностью. Также как и в случае со стационарной силой в точках геометрии снимались значения параметров.

В процессе численного эксперимента каждые две секунды развития потока сохранялись картины распределения скоростей, как для стационарного, так и для импульсного воздействия.

Из представленных ниже картин распределения в сечении скоростей для стационарного и прерываемого воздействия силы ЭМ поля (рис. 1.а – 1.в) видно:

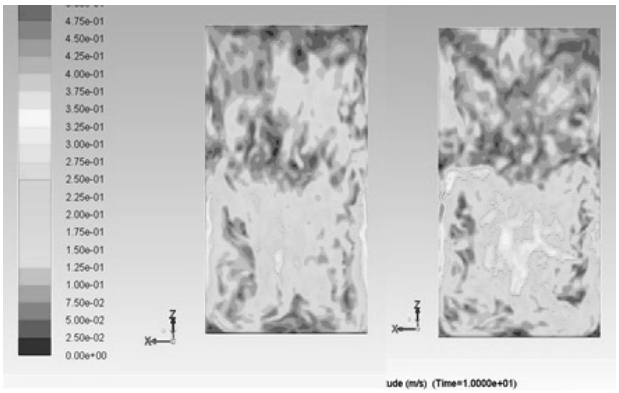

Рис.1.а. Распределение средних скоростей в среднем вертикальном сечении тигля при стационарном (слева) и импульсном (справа) воздействии: 10-ая секунда развития потока.

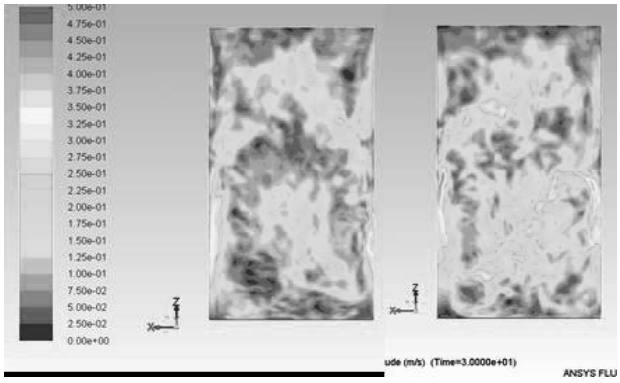

Рис.1.б. 30-ая секунда развития потока.

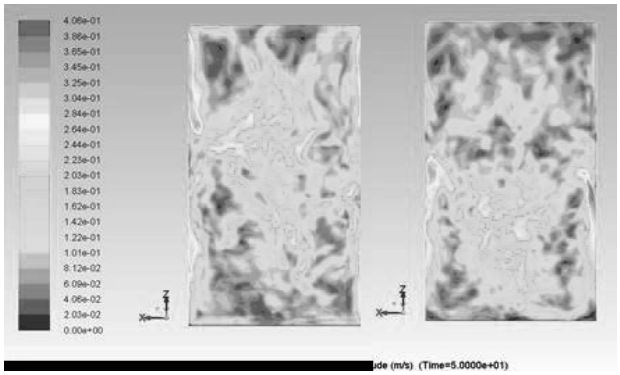

Рис.1.в 50-ая секунда развития потока.

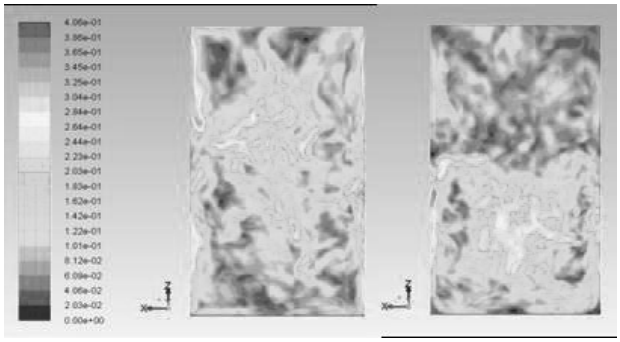

Рис.2 Сравнение распределения средних скоростей в среднем вертикальном сечении тигля при стационарном (50-ая сек. развития потока слева) и импульсном (10-ая сек. справа) воздействии.

при импульсном воздействии наблюдается большее количество мелко- и среднемасштабных вихрей (образования жёлтого и красного цвета; светло-серые образования в черно-белом виде);

сокращено количество зон застоя (зоны темного цвета);

картина хорошо развитого потока со множеством вихрей, полученная для стационарной силы ЭМ поля только на 50-ой секунде воздействия, для импульсов силы может наблюдаться уже на 10-ой секунде (рис. 2).

ВЫВОДЫ

Для оценки влияния нестационарных условий на движение расплава в печи проводилось не только сопоставления картин распределения скоростей в процессе развития потока, но и сравнение величин турбулентных пульсаций и соотнесения турбулентных спектров вихрей в расплавах. На основании полученных при численном эксперименте данных были сформулированы выводы о влиянии несиацонарных условий и изменения частоты импульсного воздействия.

Импульсы с частотой f_{puls}=0.2 Гц имеют более выраженное влияние на перемешивание и турбулизацию потока, чем пульсации с частотой 1 Гц.

Данные, полученные для различных скважностей пульсаций, показали, что изменение степени несимметричности импульсов для частот f_{puls}=1 Гц и f_{puls}=0.2 Гц не оказывает значительного влияния на значение величин турбулентных пульсацій, ответственных за перемешивание, что возможно, связано с высокой инертностью металла.

Предполагается, что эффект повышения интенсивности перемешивания связан с кратковременным, но интенсивным сообщением энергии расплаву, благодаря чему образуются вихри, обладающие высокой скоростью, а соответственно и большей продолжительностью жизни. В связи с этим, несмотря на незначительную, в сравнении с геометрическими размерами тигля, толщину проникновения магнитного поля в металл, распространение энергонесущих вихрей по объёму расплава происходит активнее в сравнении со стационарным случаем за счёт инерции. Также при прерываемом характере воздействия наблюдается разрушение двух основных тороидальных вихря, формирующихся во время воздействия ЭМ поля, что в свою очередь способствует распространению вихрей по объёму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Inaba, T., Kubo.T. (1993), “Enhanced heat transfer through oscillatory flow”. *Journa. Heat Transfer, Japanese Research,* Vol.22. № 5, pp. 480-492.
2. Olayiwola B.O., Walzel P. (2007), “Flow pulsation and modified duct surface for process heat transfer intensification” *International Journal of Chemical Reactor Engineering,* Vol.5, pp. 10-12.
3. A. Radjai, K. Miwa, (2000), “Effects of the intensity and frequency of electromagnetic vibrations on the microstructure refinement of hypereutectic A1–Si alloy”, *Melt. Mat. Mater. Trans*, Vol. 31A, pp. 755–762.
4. Xiaoping Ma, Yingju Li, Yuansheng Yang, (2009), “Refinement effect of pulsed magnetic field on superalloy IN718: from numerical simulation to experiment investigation”. *Journal of materials research*, Vol.27, pp. 115-120.
5. M. Kirpo, (2008), “Modeling of Turbulence Properties and Particle Transport in Recirculated Flows”, Abstract of Ph.D. dissertation, University of Latvia, Riga, 169 p.