

ДВИЖЕНИЕ РАСПЛАВА АЛЮМИНИЯ В КОВШЕ ПРИ ЕГО НАГРЕВЕ

Запорожская государственная инженерная академия

На основі математичного моделювання вивчено рух розплаву алюмінію у ковші, що обумовлено його нагріванням. Встановлено, що під час нагрівання у розплаві формуються гідродинамічні зони, які сприяють його перемішуванню. Нестационарний розвиток течій, що утворилися, приводить до коливань температури й, відповідно, концентрації домішок в об'ємі розплаву.

На основе математического моделирования изучено движение расплава алюминия в ковше, обусловленное его нагревом. Установлено, что при нагреве в расплаве формируются гидродинамические зоны, способствующие его перемешиванию. Нестационарное развитие образовавшихся течений приводит к колебаниям температуры и, соответственно, концентрации примесей в объеме расплава.

Введение. Моделирование с применением компьютерной техники и соответствующих математических пакетов обеспечивает детальное изучение процессов, протекающих в металлургических агрегатах, где из-за высоких температур и неблагоприятных условий затруднено выполнение практических измерений [1]. Решение задачи определения движения металлического расплава, относящейся к гидродинамическим задачам, как правило, осуществляют на основе уравнений Навье-Стокса, описывающих движение жидкости в неоднородном температурном поле в результате изменения ее плотности (приближение Буссинеска), а также уравнений тепло- и массопереноса [2,3]. Данные уравнения решают с помощью математических пакетов для компьютерного моделирования физических процессов (*ANSYS, FEMINA, Comsol* и др.), реализующих метод конечных элементов [1,4,5].

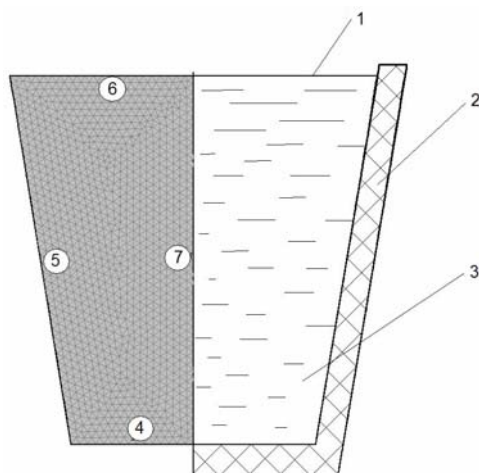
Цель работы. Задачей исследований является определение зоны гидродинамического перемешивания металлического расплава в ковше и скорости его движения при нагреве на основе математического моделирования.

Основная часть. При производстве алюминия и алюминиевых сплавов одной из основных операций является транспортирование расплава алюминия, извлекаемого из электролизеров, в ковшах к металлургическим печам или миксерам, где осуществляют его доводку по химическому составу [6,7]. При этом ковш подвергают обогреву для поддержания заданной температуры.

Моделирование движения расплава в ковше в зависимости от тепловых условий осуществляли при помощи программы *Comsol*. При работе в этой программе сначала задавали осесимметричную систему координат (переменные r и z), затем выбирали прикладные режимы *Heat Transfer in Fluids* и *Laminar Flow*, которые позволяют решить совместно уравнения Навье-Стокса и теплопереноса. Режим расчета – нестационарный, интервал времени, для которого осуществляли поиск решения, составляет 1800 с.

При решении задачи в качестве металлического расплава был выбран расплав алюминия, имеющий следующие свойства: теплоемкость – 1086 Дж/(кг·К); теплопроводность – 95 Вт/(м·К); динамическая вязкость – 0,012 Па·с; коэффициент теплового расширения – 0,0001 1/К. Зависимость плотности расплава от температуры задавали следующим образом: при 933 К – 2368 кг/м³, при 973 К – 2357 кг/м³, при 1173 К – 2304 кг/м³ [6,7].

В качестве расчетной области при создании геометрической модели принимали внутренний объем ковша, занимаемый расплавом алюминия (рис. 1). После автоматической разбивки изучаемой области количество конечных треугольных элементов составило 2070 штук.



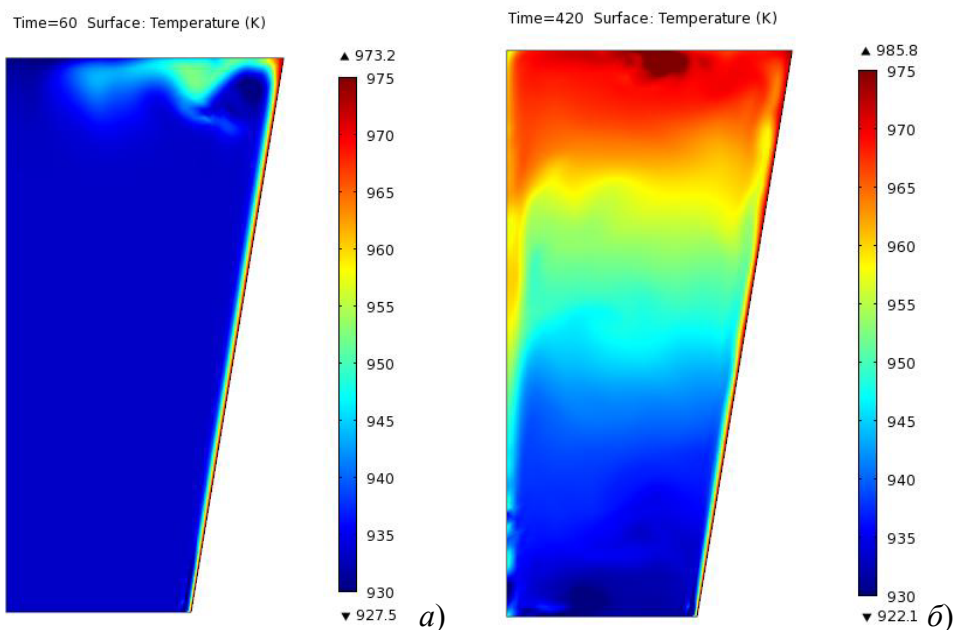
1 - свободная поверхность расплава; 2 - ковш; 3 - расплав алюминия;
 4 - граница между расплавом и дном ковша; 5 - граница между боковой стенкой ковша и расплавом; 6 - граница между расплавом и окружающей атмосферой; 7 - ось симметрии

Рисунок 1 – Схема изучаемой геометрической модели ковша с алюминиевым расплавом

Для учета влияния температуры на движение расплава, а движения расплава на распределение температуры в расплаве задавали объемную силу F_y в секции *Laminar Flow / Volume Force*:

$$F_y = g \cdot \rho \cdot \beta \cdot (T - T_{нач}), \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; ρ – плотность алюминиевого расплава; β – коэффициент теплового расширения; T – текущая температура расплава, К; $T_{нач}$ – начальная температура расплава, $T_{нач} = 933 \text{ К}$.



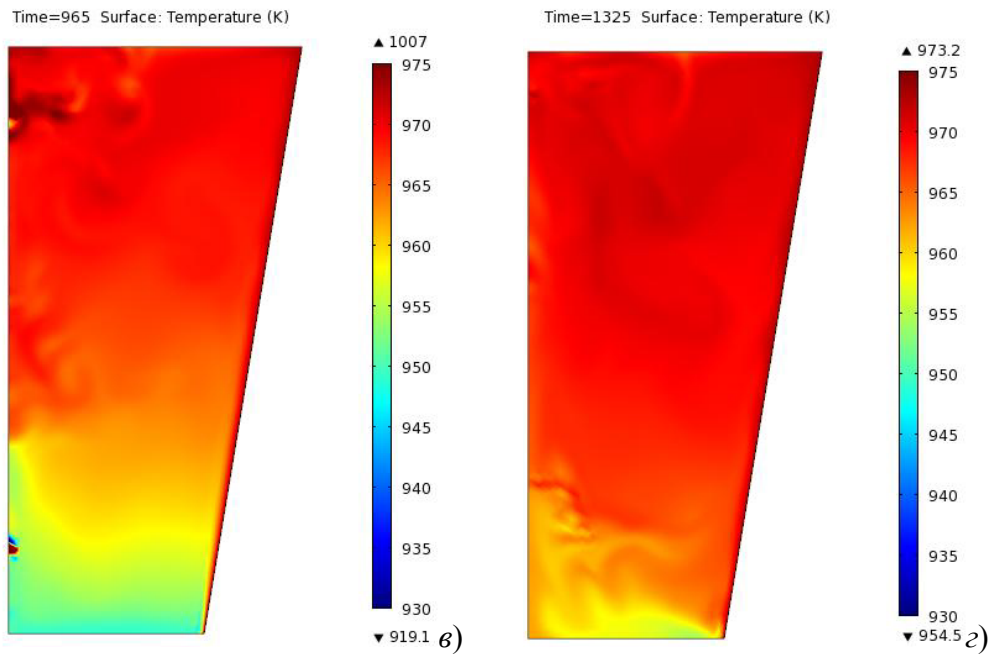
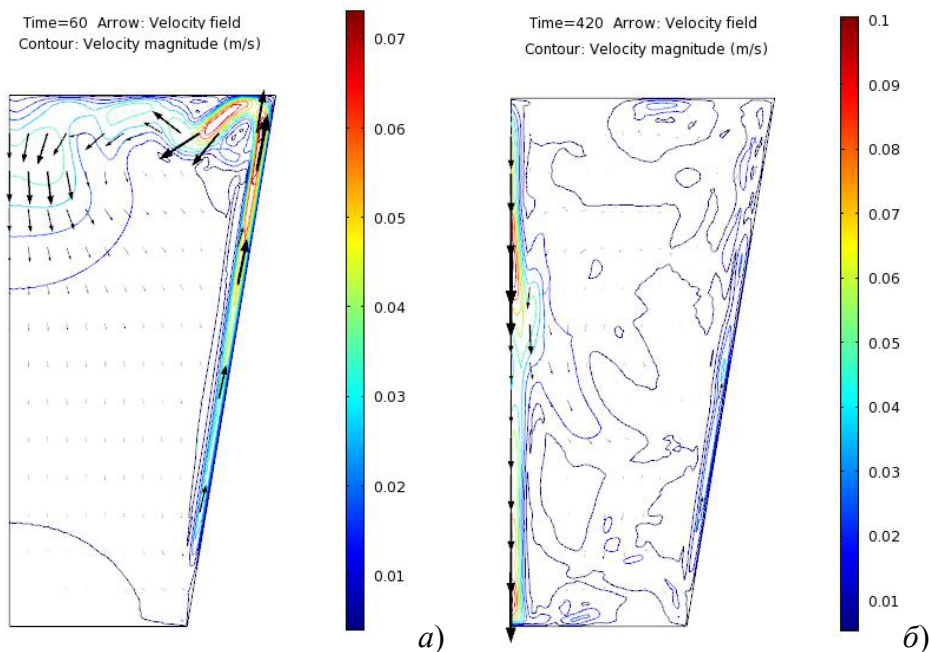


Рисунок 2 – Распределение температуры в расплаве при его нагревании через 60 (а), 420 (б), 965 (в) и 1325 (г) с

При решении поставленной задачи использовали следующие граничные условия:

- составляющие скорости на границах контакта расплава алюминия со стенками ковша, принимаются равными нулю;
- на боковой границе задана постоянная температура $T = 973$ К;
- на свободной поверхности расплава задано условие естественного конвективного охлаждения;
- на границе контакта расплава с дном ковша задано условие охлаждения за счет теплопроводности шамота.



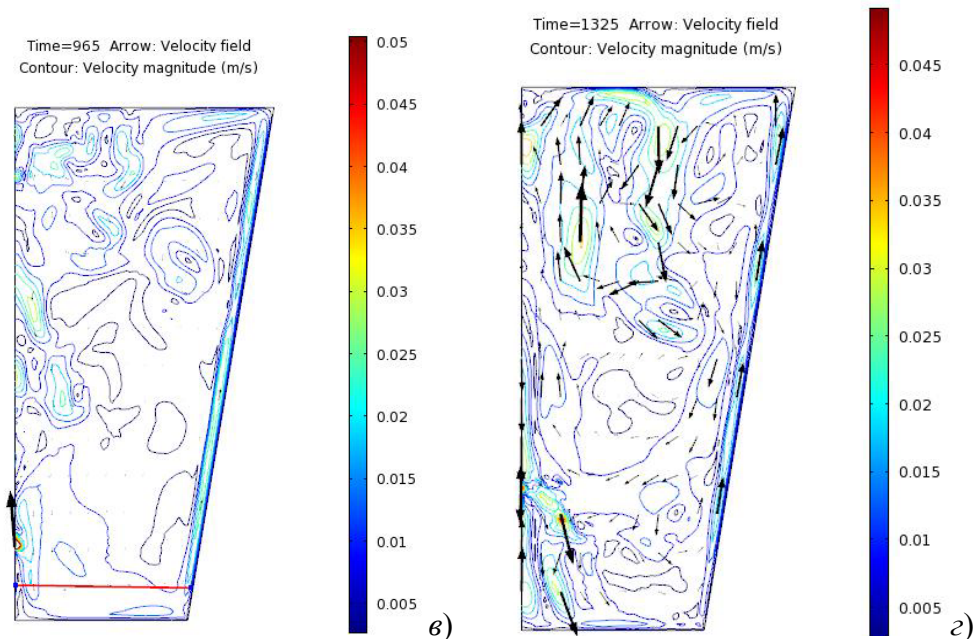


Рисунок 3 – Траектории движения расплава при его нагревании через 60 (а), 420 (б), 965 (в) и 1325 (г) с

После задания начальных и граничных условий осуществляли решение поставленной задачи для заданного временного диапазона. Результатами расчета были вектор скорости движения и температуры расплава алюминия.

На рис. 2 представлен процесс распространения теплоты в расплаве. Видно, что на начальном этапе порции расплава, нагретые у боковой стенки ковша, поднимаются к свободной поверхности (рис. 2,а). Здесь они охлаждаются и опускаются на дно ковша. Через определенный промежуток времени (рис. 2,б) прогревается верхняя область расплава при условии преобладания скорости подвода теплоты над теплоотдачей со свободной поверхности. При поддержании заданного режима нагрева достигается полный прогрев расплава в ковше (рис. 2,в,г).

Нагрев расплава вызывает его движение с формированием восходящих потоков (рис. 3,а), скорость которых тем больше, чем больше перепад температуры между нагреваемой и холодной областями. В расплаве образуется поток, имеющий максимальную скорость движения на оси симметрии (рис. 3,б). Однако при дальнейшем нагреве и перераспределении теплоты в объеме расплава перепад температуры снижается, что приводит к дроблению основного течения на несколько вихрей и снижению скорости движения расплава (рис. 3,в,г).

Температура и скорость движения расплава изменяются не только во времени, но и вдоль радиуса ковша (рис. 4). Наблюдается постепенное повышение температуры во всем объеме расплава и ее выравнивание (рис. 4,а), однако видны температурные минимумы и максимумы, вызванные колебаниями скорости движения расплава (рис. 4,б). Максимальную среднюю скорость движения расплава в расчетах наблюдали через 420 с после начала нагрева, что соответствует установившемуся движению расплава в ковше при перепаде температуры 20 градусов. Дальнейший нагрев приводит к снижению средней скорости движения расплава.

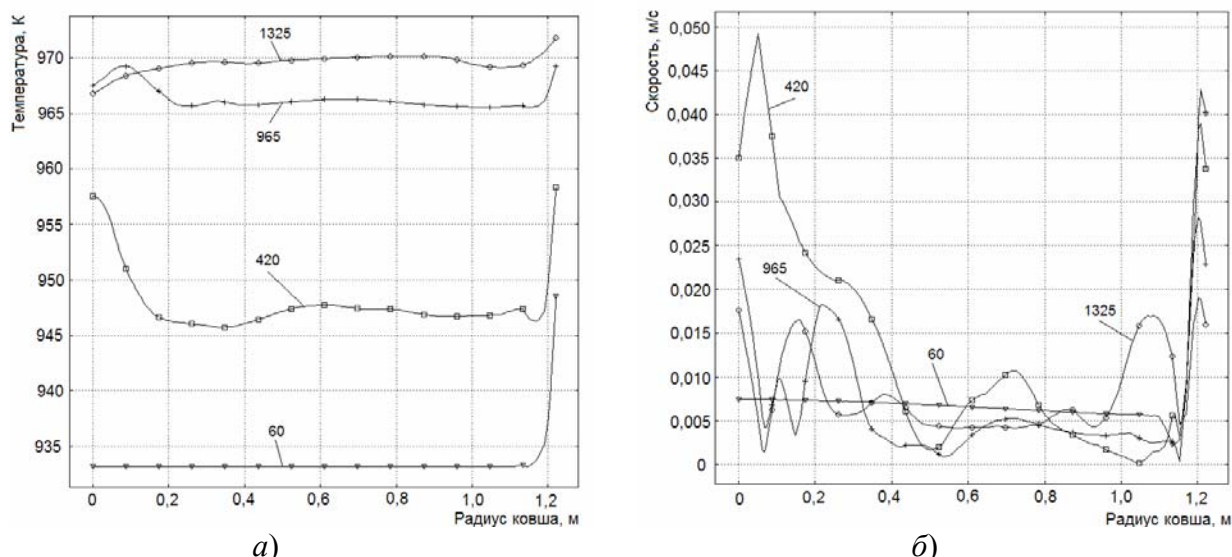


Рисунок 4 – Изменение температуры (а) и скорости движения (б) расплава вдоль радиуса в средней по высоте части ковша при нагреве

На основании результатов выполненных исследований были определены траектории движения расплава (рис. 3) и распределение температуры расплава алюминия в ковше при его нагреве (рис. 4).

Выводы. Результаты компьютерного моделирования позволили установить, что при нагреве расплава алюминия в ковше осуществляется его перемешивание в результате возникновения тепловой конвекции, которая сопровождается колебаниями температуры. Наличие информации о зонах перемешивания (температура и скорость движения расплава) позволяет прогнозировать распределение добавок, вводимых в расплав, и скорость их растворения для последующей оптимизации процессов перемешивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будилов И. Н. Моделирование магнитогидродинамических процессов в промышленных электролизерах с помощью ANSYS / И. Н. Будилов, Ю. В. Лукашук // ANSYS Solutions. Русская редакция. – 2007. – № 6. – С. 13-18.
2. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса / В. И. Полежаев, А. В. Бунэ, Н. А. Верезуб [и др.]. – М.: Наука, 1987. – 272 с.
3. Полежаев В. И. Метод конечных элементов в механике вязкой жидкости / В. И. Полежаев, А. И. Простомолотов, А. И. Федосеев // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. – М., 1987. – Т. 21. – С. 3-92.
4. Гидромеханика и теплообмен при получении материалов: [сб. науч. трудов / отв. ред. В. С. Авдеевский, В. И. Полежаев]. – М.: Наука, 1990. – 296 с.
5. Смирнов А. Н. Классификация режимов перемешивания стали в ковше с использованием математического моделирования / А. Н. Смирнов, И. Н. Салмаш, Е. В. Ошовская // Наукові праці ДонНТУ: сер. «Металургія». – 2009. – Вип. 11. – С. 73-86.
6. Галевский Г. В. Металлургия вторичного алюминия: [Учебное пособие для вузов] / Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин, М. Я. Минцис. – Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 289 с.
7. Металлургия алюминия / Ю. В. Борисоглебский, Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин [и др.]. – Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 438 с.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2010 р.
Рецензент, проф. І.Ф. Червоний