

лов и их размеры увеличивались (до 150 мкм), они образовывали скопления, их форма трансформировалась с округлой в овальную и розеточную с округлыми ветвями. Соответственно сокращалась площадь, занятая более мелкими зёрнами алюминия, среди которых увеличивалось количество дендритоподобных. Размеры дендритных ячеек в среднем были 12 мкм. Отливки, полученные под воздействие ЭМОС до $\sim 30 \cdot 10^4$ Н/м³ были полностью погружены под поверхность охладителя. В структуре наблюдалась зона столбчатых кристаллов, аналогичная предыдущему случаю, а зона равноосных зёрен характеризовалась их средним размером ~ 10 мкм. Увеличение размера зёрен по сравнению с вариантом неполного погружения в охладитель, вероятно, вызвано термическим действием электротока. При увеличении плотности тока свыше $20 \cdot 10^4$ А/м² отливка растягивалась в направлении протекания тока и в её центральной части появлялись полости. Таким образом, с помощью ЭМОС возможно управление макро- и микроструктурой отливок, полученных в жидкометаллическом охладителе.

УДК 621.746: 669.18

Л. А. Соколовская

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И ПЛАВЛЕНИЯ

При совершенствовании существующих и разработке новых технологий литья для повышения качества металлопродукции необходимо исследовать теплофизические процессы охлаждения и затвердевания, нагрева и плавления.

Процессы внешнего и внутреннего теплообмена необходимо изучать: при затвердевании слитка в изложнице; при остывании слитка на воздухе после его извлечения из изложницы; при нагреве слитков под ковку или прокатку; при затвердевании непрерывного слитка в кристаллизаторе; при затвердевании отливки в металлическом кокиле или неметаллической форме; при охлаждении отливки после выбивки из формы; при охлаждении капель расплава в воде или на воздухе для получения литой дроби; при нагреве и плавлении в расплаве металлической шихты, лигатуры, инокуляторов, модификаторов, дроби и др.

Процессы нестационарного теплообмена можно описать обобщенной задачей теплопроводности. Математическая модель процессов теплообмена, в том числе с учетом фазовых переходов (плавление и затвердевание), состоит из нелинейных дифференциальных уравнений теплопроводности и уравнений для краевых (граничных и начальных) условий в исследуемых системах. Формулировка математической модели теплообмена в конкретных условиях теплового взаимодействия тел позволяет исследовать [1] характер изменения переменного температурного поля в пространстве и во времени.

Для решения системы уравнений математической модели теплообмена необходим обоснованный выбор граничных условий I, II, III и IV рода [1, 2]. Граничное условие I-го рода – когда на поверхностях взаимодействующих тел задана температура; II-го рода – когда на этих поверхностях задан тепловой поток; III-го рода – когда тепловой поток задан в виде закона конвективного теплообмена (закон Ньютона); IV-го рода – когда в контактной зоне заданы условия сопряжения двух тел в виде равенства температур и тепловых потоков.

В математической модели можно учесть зависимость от температуры и времени теплофизических коэффициентов в уравнении теплопроводности и в граничных условиях. Однако в литературе недостаточно данных (иногда они противоречивы) для создания математической модели теплообмена, которая максимально приближена к реальным условиям затвердевания и плавления.

Для изучения процессов теплообмена применяются методы электро- и гидротепловой аналогии. Хотя быстродействие и вычислительные возможности интеграторов ограничены [3, 4], они с достаточной для практики точностью позволяют определять зависимость от времени и температуры коэффициентов теплопередачи в исследуемых системах и коэффициентов теплоотдачи в окружающую среду путем решения обратных задач теплопроводности с использованием экспериментальных данных температурных измерений [4].

Теплофизические задачи плавления и затвердевания можно решать численными методами, например, методом конечных разностей [1, 2], который позволяет решать задачи нагрева и охлаждения с учетом фазовых переходов (задача Стефана) с разными граничными и начальными условиями [5]. При этом полезно использовать одномерные задачи для решения двумерных и трехмерных задач нестационарного теплообмена. Применение ПЭВМ при математическом моделировании температурных полей исследуемых систем может быть эффективнее по сравнению с

использованием дорогостоящих экспериментальных методов в металлургии и литейном производстве.

Список литературы

1. *Коздоба Л.А.* Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1975. – 228 с.
2. *Никитенко Н.И.* Исследование нестационарных процессов тепломассообмена методом сеток. – К.: Наукова думка, 1971. – 260 с.
3. *Карножицкий В.Н.* Контактный теплообмен в процессах литья. – К.: Наукова думка, 1978. – 300 с.
4. Исследование кинетики кристаллизации слитка низкоуглеродистой кипящей стали, отлитого с применением металлической дроби / В.И. Легенчук, В.Н. Сапко, В.В. Шепелев и др. // Теплофизика стального слитка. – К.: ИПЛ АН УССР, 1980. – С. 99 – 102.
5. *Соколовская Л.А., Осипов В.П., Мамишев В.А.* Использование математического моделирования при исследовании теплофизических процессов взаимодействия расплава с твердыми добавками // Процессы литья. – 2000. – № 4. – С. 72 – 78.

УДК 621.771.11

Н.В. Сусло, А.Н. Панченко

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

Криворожский металлургический институт, Кривой Рог

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОМОДИФИКАТОРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЧУГУННЫХ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ

Основные характеристики шаров – это высочайшая прочность, ударостойкость, износостойкость, которые необходимы для измельчения довольно твердых материалов без значительной потери эксплуатационных свойств шаров.

С целью повышения твердости, ударо– и износостойкости чугунных мелющих шаров используют легирование и модифицирование чугуна. Легирование такими элементами как хром, никель, молибден позволяет значительно повысить требуемые эксплуатационные свойства шаров, однако является дорогостоящим, поэтому были проведены исследования по модифицированию чугуна различными наномодификаторами.