

УДК 621.74.011:669.018.28.017

Л.А. Орлов (асп. каф. ФХЛСП), В.М. Голод, к.т.н., проф.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОТЛИВКИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ РАВНООСНОЙ ДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ

Дендритный характер кристаллизации является наиболее характерным в условиях литья. Поскольку, в соответствии с классическими представлениями о дендритном росте, ветви дендритов в процессе роста утолщаются намного слабее по сравнению с удлинением в направлении роста, затвердевание отливки можно рассматривать как двухстадийный процесс. На первой стадии из зародышей кристаллизации начинают расти и развиваться дендриты, образуя локальную систему ортогональных ветвей почти равной толщины. При этом, поскольку рост происходит на сравнительно высокой скорости, концентрация жидкости вокруг дендрита не успевает выравняться, в связи с чем она определяется в соответствии с уравнениями Иванцова распределением примеси при устойчивом росте ветвей. В некоторый момент времени дендриты смыкаются, образуя глобальную дендритную сеть, которая может быть определена как «непрерывная твердая фаза» с распределенной внутри нее жидкой фазой, доля которой может превышать 0,6...0,8. Этот момент свидетельствует об окончании первой (дендритной) стадии кристаллизации и о начале второй стадии, когда происходит кристаллизация остаточной жидкости в междендритных промежутках. Переохлажденная жидкость затвердевает, наслаиваясь на уже сформировавшийся дендритный скелет, т.е. происходит утолщение дендритных ветвей в радиальном направлении. Данный этап, можно назвать затвердеванием без ветвления дендритов. Диффузия примеси в твердой фазе (внутри ветвей) ограничена, а сами ветви, в отличие от первой стадии, занимают весьма значительную часть объема. Наоборот, малая толщина междусосных участков способствует быстрому выравниванию концентрации в жидкости, т.е. полному протеканию диффузии в жидкой фазе. Следовательно, перераспределение примеси на данной стадии происходит аналогично модели нормальной неравновесной кристаллизации (модель Шейля).

Задачу кристаллизации отливки решали путем наложения пространственно–временной сетки на отливку и численного решения уравнения теплопроводности методом конечных разностей. Для простого случая, когда в расплаве образуются только равноосные дендриты, равномерно развивающиеся в трех направлениях, процесс кристаллизации на первой стадии моделировали как рост зерен глобулярной формы (дендритные зерна), внутри каждого из которых располагается один дендрит. Опираясь на результаты измерений, полученных на металлоподобной системе $\text{NH}_4\text{Cl} - \text{H}_2\text{O}$, дендритную структуру характеризовали параметрами: d – толщина ветвей (на первой стадии считали неизменной величиной, на второй – увеличивающейся со скоростью, зависимой от переохлаждения), λ – междусосное расстояние (принимали величиной, увеличивающейся со временем по линейному закону, вследствие диффузионного подавления и остановки роста ветвей).

В результате моделирования были получены данные об изменении различных параметров (полного времени затвердевания, относительного времени протекания стадий затвердевания, концентрации жидкой фазы и доли твердой фазы) в зависимости от времени, параметров дендритной структуры, а также по сечению отливки.

Итогом проделанной работы является построение многоуровневой модели кристаллизации, посредством которой анализируется формирование и развитие структуры различного уровня (отдельные дендритные ветви – ансамбль ветвей – отдельное дендритное

зерно – макростроение отливки) с оценкой ряда ее взаимосвязанных теплофизических и структурных параметров различного уровня.