

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЛИНИИ РОСТА ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ РАСПЛАВЕ

А. А. БУГРИМОВ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – И. А. КОНЦЕВОЙ, СТАРШИЙ ПРЕПОДАВАТЕЛЬ

В работе получено уравнение роста кристалла, содержащее информацию об отклонении температуры фазовой границы от ее равновесного значения и учитывающее неоднородность переохлаждения вдоль линии роста. Точное решение этого уравнения дает клиновидный стационарный контур. Линеаризация уравнения роста на таком контуре позволила получить физически интересные варианты возмущений фазовой границы.

Ключевые слова: релаксация теплового потока; переохлаждение; фазовая граница.

Для моделирования теплопереноса в переохлажденном расплаве используем релаксационную модель Максвелла переноса тепла в неподвижной среде. Уравнение для теплового потока и уравнение баланса энергии [1]:

$$\mathbf{q} + \gamma \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = -\lambda \text{grad} T, \quad \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div} \mathbf{q} = q_v. \quad (1)$$

Фазовую границу кристаллизации моделируем поверхностью сильного разрыва теплового поля.

Изучены несколько решений, определяющих волновой характер распространения возмущения по пространственно неоднородному фону. Основные результаты состоят в следующем. Волна движется от вершины дендрита на периферию, и процесс роста устойчивый, если характерный размер зоны неоднородности фона меньше критического (порогового) значения; условие перехода через порог является предвестником возникновения боковой ветви дендрита. Волна движется с периферии к вершине дендрита: вычислена скорость волны, при которой процесс роста устойчив; найдена зависимость параметра затухания возмущения от угла заострения линии роста. Указан класс возмущений, для которых устойчивость/неустойчивость роста зависит от направления движения волны (к вершине либо от вершины); вычислено пороговое значение ширины зоны неоднородности фона. Определена нелинейная связь скорости устойчивой волны с параметром неоднородности фона; указан критерий появления/отсутствия волнового фронта возбуждения. Даны оценки параметров процесса, при которых начинается боковое ветвление – возникает неустойчивость возмущения, распространяющегося от вершины на периферию. Обнаружена принципиальная роль мультипликативного взаимодействия скорости фазовой границы кристаллизации и угла заострения вершины дендрита. Построены два варианта точечного возмущения линии роста: монотонный (экспоненциальный по координате) и немонотонный (имеющий вид уединенной волны). Обнаружено, что при переходе от острой к квазиплоской вершине дендрита относительная величина возмущения возрастает.

Расчеты проведены для четырех веществ (никель, медь, германий, серебро), имеющих отчетливо выраженные различия теплофизических свойств. Построены пространственно-временные портреты возмущений. Определено влияние основных физических параметров задачи (угол заострения, скорость фазовой границы, ширина зоны неоднородности фона) на скорость волны.

Данная работа является продолжением исследований [2].

Библиографические ссылки

1. Жоу Д., Касас-Баскес Х., Лебон Дж. Расширенная необратимая термодинамика. М. ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006.
2. Шабловский О. Н. Эволюция и разрушение линии роста кристалла в переохлажденном расплаве // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Сер. «Математика. Механика. Физика». 2025. Т. 17, № 1. С. 61–75.