

ВЛИЯНИЕ КРИВИЗНЫ ВЕРШИНЫ ДЕНДРИТА НА КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЕГО РОСТА ИЗ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО РАСПЛАВА

А. А. Бугримов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель И. А. Концевой

Изучено влияние кривизны вершины дендрита на кинетические параметры фронта высокоскоростной кристаллизации чистого вещества. Расчеты выполнены для никеля.

Ключевые слова: высокоскоростная кристаллизация, неустойчивость линии роста, кривизна фазовой границы, дендритный рост.

Рассмотрим высокоскоростной дендритный рост кристалла из глубоко переохлажденного расплава чистого вещества. В настоящее время экспериментально достигнуты скорости роста 20–70 м/с в расплавах, переохлажденных до 300 К [1]. Прикладное значение этих исследований связано с технологиями получения материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами.

Цель данной работы – выполнить анализ кинетических свойств фазовой границы кристаллизации (ФГК) в чистом расплаве никеля (переохлаждение $\Delta T \geq 166$ К).

Теплоотвод от твердой фазы. Уравнение роста дендрита при глубоких переохлаждениях расплава получено в [2, 3] с учетом локально-неравновесных свойств теплопереноса. Анализ этого уравнения показывает, что объемный сток энергии $q_v < 0$, который моделирует отвод тепла от кристалла, определяется следующей зависимостью:

$$|q_v| = \frac{L_1}{\gamma} + N_m \left(K_0 L_1 + \frac{c}{\gamma \mu} \right) + K_0 N_m^2 \frac{c}{\mu}; \quad (1)$$

$$L_1 = L_* + K_0 U_2, \quad L_* = L - c_* \Delta T, \quad U_1 = U / L, \quad U_2 = c T_c U_1,$$

где γ – время релаксации теплового потока; K_0 – кривизна ФГК; c – объемная теплоемкость кристалла; c_* – объемная теплоемкость расплава; L – теплота фазового перехода единицы объема вещества; U – поверхностная энергия границы раздела фаз; T_c – равновесная температура кристаллизации. При проведении расчетов применяются полуэмпирические зависимости [4] для скорости роста $N_m = N_m(\Delta T)$ и кинетического коэффициента $\mu = \mu(\Delta T)$. Выполнен анализ возмущения ФГК вида

$$f(y, t) / H = \exp(-rt) \cos(ky),$$

где y – координата, поперечная направлению роста; t – время; H – малая постоянная первого порядка малости; r – параметр затухания; k – частота. Обнаружено, что режим апериодической устойчивости наблюдается в интервале $r^{(1)} < r < r^{(2)}$, где левая и правая границы (подробная запись не приводится) зависят от физических параметров процесса (см. формулу (1)) и от величины переохлаждения ΔT . В соот-

ветствии с этим интервалом устойчивости получена верхняя граница значений кривизны K_f вершины дендрита, при которых линия роста морфологически устойчива: не возникает складка, являющаяся предвестником боковой ветви.

Результаты расчетов. Приведем результаты расчетов высокоскоростной кристаллизации переохлажденного расплава никеля. Зависимости $|q_v|$ и K_f от ΔT даны на рис. 1 в размерных величинах; параметр затухания r и полупериод колебаний π/k – в безразмерных (на рис. 2, 3). Масштабы величин: $y_b = 10^{-6}$ м, $t_b = 10^{-7}$ с. Расчеты выполнены для значений кривизны в интервале $K_0, \text{ м}^{-1} \in [1 \cdot 10^6; 3 \cdot 10^6]$. Значения теплофизических параметров расплава и кристалла приведены в [4]. Анализ полученных результатов показывает существенное влияние величины переохлаждения ΔT и кривизны вершины дендрита K_0 на кинетические свойства ФГК.

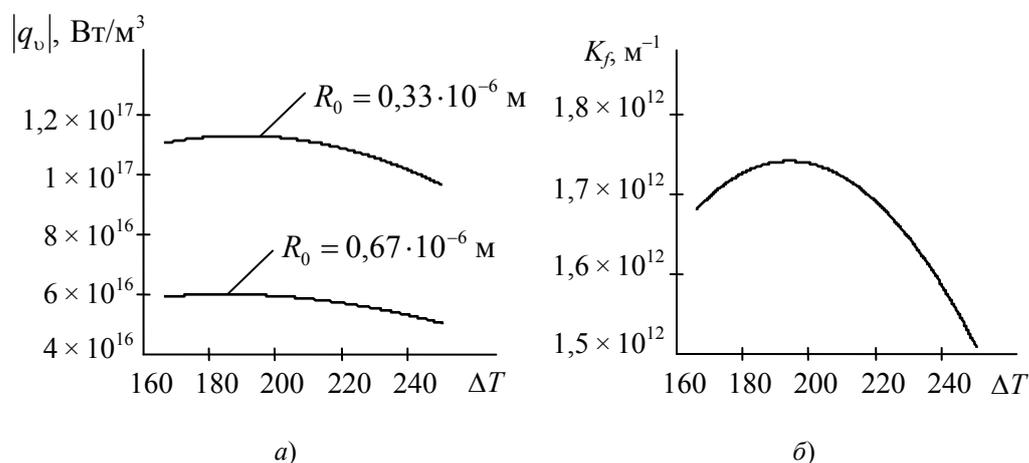


Рис. 1. Свойства теплоотвода $|q_v|$ и верхней границы K_f значений кривизны вершины дендрита

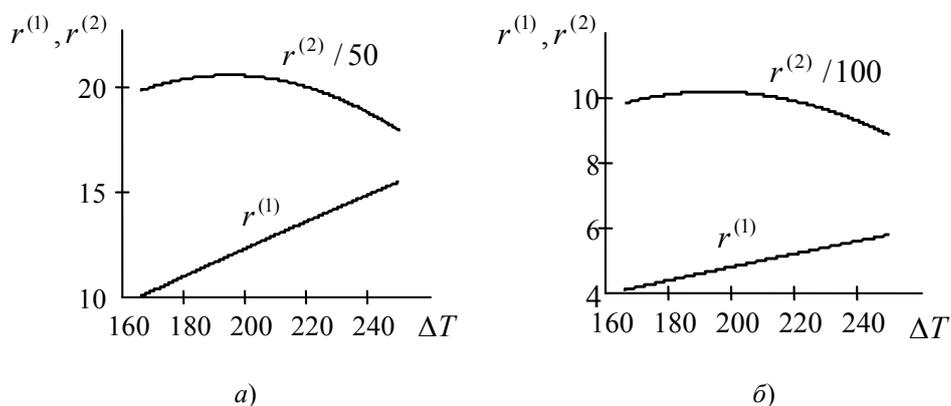


Рис. 2. Влияние переохлаждения расплава на границы интервала аperiodической устойчивости фазовой границы кристаллизации:
 а – $R_0 = 0,33 \cdot 10^{-6}$ м; б – $R_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ м

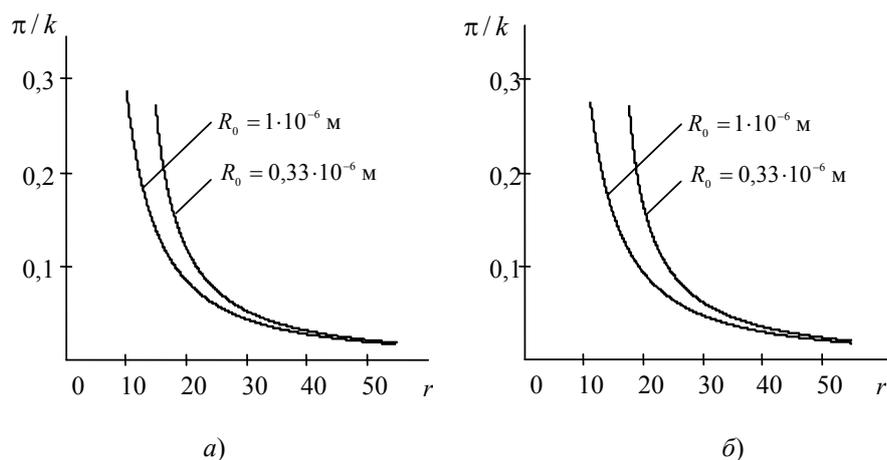


Рис. 3. Корреляция «параметр затухания по времени – параметр пространственной неоднородности возмущения»:
 а – $\Delta T = 200$ К; б – $\Delta T = 250$ К

Таким образом, показано, что интенсивность теплоотвода и границы устойчивого роста нелинейным образом зависят от переохлаждения расплава и от кривизны вершины дендрита.

Работа выполнена в рамках НИР «Динамика неравновесных тепловых структур и проблемы деформирования твердых тел в современных технико-технологических системах». Научный руководитель темы профессор О. Н. Шабловский.

Литература

1. Herlach, D. M. Metastable Solids from Undercooled Melts / D. M. Herlach, P. Galenko, D. Holland-Moritz. – Oxford : Pergamon, 2007.
2. Шабловский, О. Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть 1. Уравнение фазовой границы кристаллизации / О. Н. Шабловский // Успехи приклад. физики. – 2013. – Т. 1, № 6. – С. 680–685.
3. Шабловский, О. Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть II. Аналитическая структура возмущений линии роста / О. Н. Шабловский // Успехи приклад. физики. – 2014. – Т. 2, № 1. – С. 12–17.
4. Шабловский, О. Н. Динамика неустойчивости волновых возмущений и боковое ветвление дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль // Успехи приклад. физики. – 2022. – Т. 10, № 2. – С. 189–202.

РАСЧЕТ ОДНОПЕТЛЕВОЙ ДИАГРАММЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ ВАКУУМА ФОТОННОГО ПРОПАГАТОРА

А. Д. Тамков

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель В. Ю. Гавриш

Изложена методика расчета однопетлевой диаграммы поляризации фотона с использованием размерной регуляризации и параметризации Фейнмана. Проведены предварительные расчеты петлевых интегралов с последующей постановкой задачи о разложении гамма-функции Эйлера в ряд с использованием постоянной Эйлера–Маскерони.

Ключевые слова: фотон, петля, размерная регуляризация, поляризация вакуума.