

КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФАЗОВОЙ ГРАНИЦЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО РАСПЛАВА

О. Н. Шабловский, И. А. Концевой

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,

Республика Беларусь, 246746, г. Гомель, проспект Октября, 48

E-mail: shablovsky-on@yandex.by

Изучено влияние переохлаждения расплава на кинетические параметры фронта высокоскоростной кристаллизации чистого вещества. Расчеты выполнены для никеля и меди.

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

Введение. 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 сравнительный анализ кинетических свойств фазовой границы кристаллизации (ФГК) в чистых расплавах никеля (переохлаждение $\Delta T \geq 166$ К) и меди ($\Delta T \geq 180$ 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 c – объемная теплоемкость кристалла; c_* – объемная теплоемкость расплава; γ – время релаксации теплового потока; K_0 – кривизна ФГК; 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 H – малая постоянная первого порядка малости; t – время; y – координата, поперечная направлению роста; r – параметр затухания; k – частота. Обнаружено, что режим аperiodической 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 соответствии 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. 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, рис. 2, 3. Масштабы величин: $y_b = 10^{-6}$ м, $t_b = 10^{-7}$ с. Расчеты выполнены при $K_0 = 10^7$ м⁻¹. Значения теплофизических параметров расплава и кристалла приведены в [4]. Сравнительный анализ представленных здесь графиков говорит о различиях кинетических свойств ФГК для никеля и меди. Например, существенно отличаются в качественном отношении свойства теплоотвода $q_v(\Delta T)$ и границы кривизны $K_f(\Delta T)$.

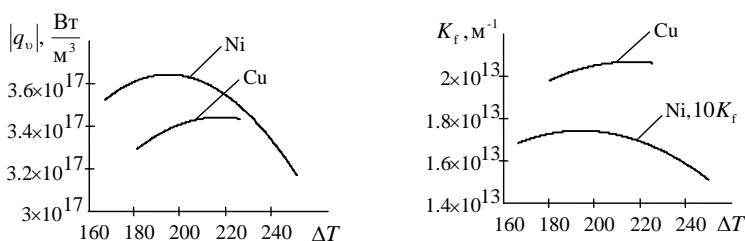


Рис. 1. Свойства теплоотвода $|q_v|$ и верхней границы K_f значений кривизны вершины дендрита

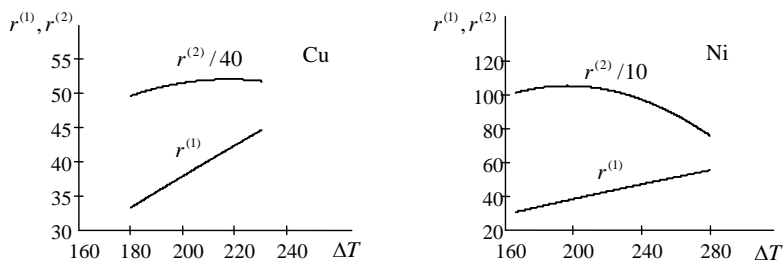


Рис. 2. Влияние переохлаждения расплава на границы интервала аperiodической устойчивости фазовой границы кристаллизации

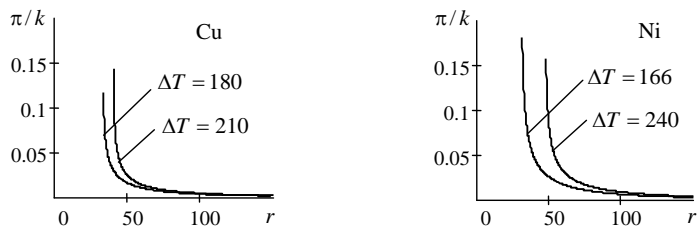


Рис. 3. Корреляция «параметр затухания по времени параметр пространственной неоднородности возмущения.

Заключение. Температурная область глубоких переохлаждений расплава требует применения модели, учитывающей неравновесные свойства теплопереноса. Показано, что интенсивность теплоотвода и границы устойчивого роста нелинейным образом зависят от переохлаждения расплава. Характеры этих зависимостей (возрастание, убывание, немонотонность) для никеля и меди различаются в значительной степени.

Литература:

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