

ВОЛНОВОЙ РЕЖИМ ВОЗМУЩЕНИЯ И МОРФОЛОГИЧЕСКИ УСТОЙЧИВЫЙ РОСТ ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ РАСПЛАВАХ НИКЕЛЯ И МЕДИ

И. А. Концевой

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

246029, г. Гомель, пр. Октября, 48

Тел.: (+37529) 114-67-22, e-mail: ivankon@yandex.by

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

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

Введение. В настоящее время экспериментально достигнуты скорости роста 20–70 м/с в расплавах, переохлажденных до 300 К, [1]. Дендритный рост кристаллов при высокоскоростной кристаллизации глубоко переохлажденных расплавов чистого вещества является одним из объектов современных исследований. Прикладное значение этих исследований связано с технологиями получения материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. Вопрос о морфологической устойчивости линии роста дендрита рассматривался в [2, 3]. Цель данной работы: выполнить анализ кинетических свойств фазовой границы кристаллизации (ФГК) в чистых расплавах никеля и меди.

Теплоотвод от твердой фазы. Уравнение роста дендрита при глубоких переохлаждениях расплава получено в [4, 5] 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:

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

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

Обозначения здесь такие же, как в [4, 5]. При проведении расчетов применяются полуэмпирические зависимости [6] для скорости роста $N_m = N_m(\Delta T)$ и кинетического коэффициента $\mu = \mu(\Delta T)$. Выполнен анализ возмущения ФГК вида [7]:

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

где H – малая постоянная первого порядка малости; t – время; y – координата, поперечная направлению роста; r – параметр затухания; k – частота. Обнаружено, что режим 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 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.

Границы морфологически устойчивого роста. Расчеты выполнены для никеля ($\Delta T, K \in [166; 312]$) и для меди ($\Delta T, K \in [180; 230]$) при $K_0 = 10^7 \text{ м}^{-1}$. Числовые значения теплофизических параметров следующие:

– Никель, Ni: $T_c = 172 \text{ К}$, $L = 2,14 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$, $U = 0,38 \text{ Дж/м}^2$, $\gamma = 1,3804 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, $c = 5,62 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м} \cdot \text{К)}$, $\lambda = 69 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\mu = 9,53 \text{ м/(К} \cdot \text{с)}$, $T_* = 156 \text{ К}$, $N_b = 5,3 \text{ м/с}$;

– Медь, Cu: $T_c = 135 \text{ К}$, $L = 1,77 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$, $U = 0,26 \text{ Дж/м}^2$, $\gamma = 4,7551 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, $c = 4,17 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м} \cdot \text{К)}$, $\lambda = 317 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\mu = 10,06 \text{ м/(К} \cdot \text{с)}$, $T_* = 117 \text{ К}$, $N_b = 1 \text{ м/с}$.

Зависимости объемного стока энергии $|q_v|$ и верхней границы значений кривизны K_f вершины дендрита от переохлаждения ΔT даны на рис. 1 в размерных величинах.

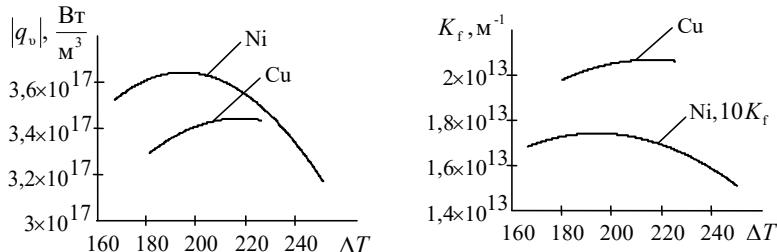


Рис. 1. Свойства теплоотвода $|q_v|$ и верхней границы значений кривизны K_f вершины дендрита

Полученные в результате расчетов числовые значения $K_f(\Delta T)$ говорят о том, что апериодический режим (2) устойчив: верхняя граница K_f в данных условиях не достигается. На рис. 2 показан в безразмерном виде полупериод колебаний по координате y . Масштабы величин: $y_b = 10^6 \text{ м}$, $t_b = 10^7 \text{ с}$. Для обоих металлов

$$\frac{\partial(\pi/k)}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial(\pi/k)}{\partial(\Delta T)} > 0.$$

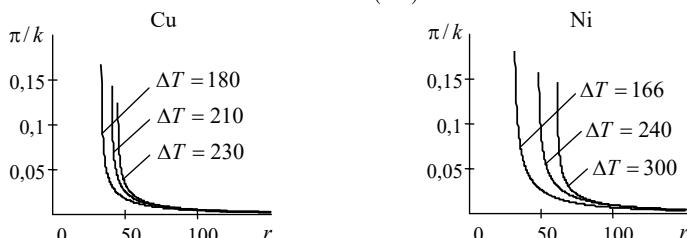


Рис. 2. Корреляция «параметр затухания по времени – параметр пространственной неоднородности возмущения»

Волновой режим возмущения. Незатухающая стоячая волна возмущения имеет вид

$$f(y,t)/H = \cos ky \sin mt, \quad t \geq 0, \quad y \in [0, y_1], \quad (2)$$

$$k^2 = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2}, \quad m^2 = \frac{\beta_1 \beta_3}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2}, \quad w_2 = m/k = (\beta_3 / \beta_2)^{1/2},$$

где m/k – скорость стоячей волны, перемещающейся со скоростью звука w_2 ; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ – безразмерные коэффициенты, зависящие от переохлаждения расплава посредством функций $N_m = N_m(\Delta T)$, $\mu = \mu(\Delta T)$. Результаты расчета этого режима возмущения демонстрируют отчетливые различия между никелем и медью (рис. 3). Для меди имеем:

$$\frac{\partial(2\pi/m)}{\partial(\Delta T)} < 0, \quad \frac{\partial(m/k)}{\partial(\Delta T)} > 0.$$

Для никеля хорошо видна немонотонная, имеющая максимум зависимость скорости волны m/k от величины переохлаждения ΔT , см. рис. 3 б.

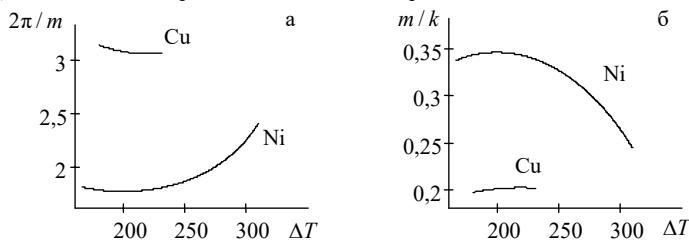


Рис. 3. Незатухающая стоячая волна возмущения:
а – период колебаний во времени; б – скорость волны.

Стоячая волна, затухающая с течением времени, определяется решением:

$$f(y,t)/H = \exp(-rt) \cos ky \sin mt, \quad (3)$$

$$k^2 = H_1/H_0, \quad m^2 = H_2/H_0, \quad H_0 = \beta_3 - \beta_0 \beta_2 + 2\beta_0 r,$$

$$H_1 = 9\beta_2 r^2 + \beta_1 \beta_2 - r(3\beta_1 + 9r^2 + 2\beta_2^2), \quad H_2 = \beta_1 \beta_3 + r[r(\beta_0 \beta_2 + 3\beta_3) - 2\beta_0 r^2 - 2\beta_2 \beta_3].$$

При $r = 0$ данное решение принимает вид (2). Эти выражения имеют физический смысл ($k^2 > 0$, $m^2 > 0$), соответствующий периодическому решению, в малой правой конечной окрестности $r = 0$. Для представленной на рис. 4–5 серии расчетов в безразмерных величинах $0 \leq r \leq 0,44$. Для никеля и меди периоды колебаний возмущения по координате y и по времени t ведут себя одинаково в качественном отношении:

$$\frac{\partial(2\pi/k)}{\partial(\Delta T)} > 0, \quad \frac{\partial(2\pi/m)}{\partial(\Delta T)} > 0.$$

Кроме того, по мере увеличения параметра затухания r оба эти периода колебаний монотонно растут, см. рис. 4–5. Так же, как в случае незатухающей волны (2), различия между никелем и медью наблюдаются в поведении скорости волны m/k при изменении ΔT : для никеля имеем $\partial(m/k)/\partial(\Delta T) < 0$, а для меди наоборот: $\partial(m/k)/\partial(\Delta T) > 0$ см. рис. 4 в, рис. 5 в.

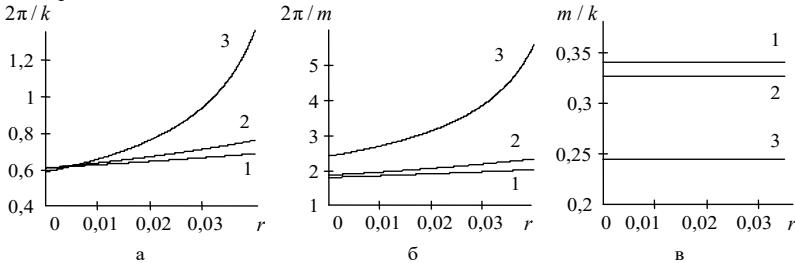


Рис. 4. Никель. Влияние параметра затухания на свойства стоячей волны возмущения

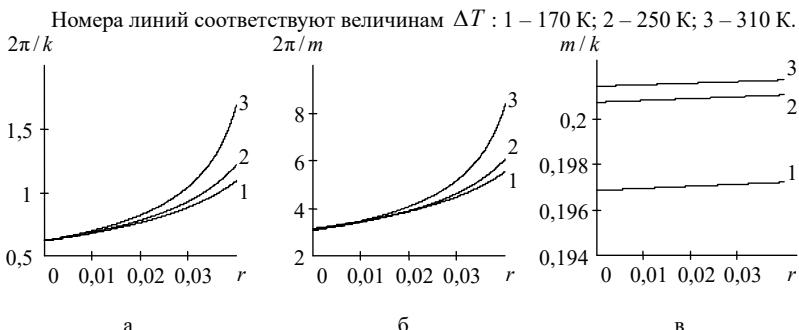


Рис. 5. Медь. Влияние параметра затухания на свойства стоячей волны возмущения.
 Номера линий соответствуют величинам ΔT : 1 – 180 К; 2 – 200 К; 3 – 230 К.

Заключение. Выполнен сопоставительный анализ свойств возмущенной фазовой границы кристаллизации никеля и меди при глубоких переохлаждениях расплава. Для никеля $\Delta T, K \in [166, 314]$, для меди $\Delta T, K \in [180, 230]$. Показано, что кинетические свойства фазовой границы высокоскоростной кристаллизации чистого расплава в значительной степени обусловлены локальной неравновесностью теплопереноса в твердой фазе. Получены свойства теплоотвода $q_v(\Delta T)$ от твердой фазы и значения верхней границы кривизны K_f , обеспечивающей устойчивость апериодического возмущения. Стоячая волна возмущения рассмотрена в незатухающем и затухающем режимах. Обнаружены важные в физическом отношении различия в поведении скорости стоячей волны для никеля и меди. Показано, что параметр затухания и величина переохлаждения оказывают значительное влияние на пространственно-временные свойства возмущенного состояния вершины дендрита.

Работа выполнена под научным руководством профессора О. Н. Шабловского.

Литература

1. Herlach D.M. Metastable Solids from Undercooled Melts / D. M. Herlach, P. Galenko, D. Holland-Moritz. – Oxford: Pergamon, 2007. – 448 p.
2. Шабловский О.Н. Тепловая градиентная катастрофа и рост двумерного свободного дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский // Прикладная физика. – 2007. – №3. – С. 29–37.
3. Шабловский О.Н. Производство энтропии на фазовой границе кристаллизации / О. Н. Шабловский // Поверхность, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – №12. – С. 81–87.
4. Шабловский О.Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть 1. Уравнение фазовой границы кристаллизации / О. Н. Шабловский // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1, № 6. – С. 680–685.
5. Шабловский О.Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть II. Аналитическая структура возмущений линии роста / О. Н. Шабловский // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2, № 1. – С. 12–17.
6. Шабловский О.Н. Динамика неустойчивости волновых возмущений и боковое ветвление дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль // Успехи прикладной физики. – 2022. – Т. 10, № 2. – С. 189–202.
7. Шабловский О.Н. Кинетические свойства вершины дендрита в переохлажденном расплаве чистого металла / О.Н. Шабловский, И.А. Концевой // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого: научно-практический журнал. – 2024. – № 1. – С. 5–14.