

Таким образом, в статье представлен алгоритм и математическая модель кинематического анализа плоского рычажного механизма с группой Ассура IV класса. Получены числовые значения линейных скоростей и линейных ускорений точек шатуна. Данные результаты могут применяться при проведении силового и динамического расчета механизма.

#### Литература

1. Теория механизмов и машин : учеб. пособие для вузов / М. З. Коловский, А. Н. Евграфов, Ю. А. Семенов, А. В. Слоущ. – 2-е изд., испр. – Москва : Академия, 2008. – 558 с.
2. Hroncová, Darina Kinematical Analysis of Crank Slider Mechanism with Graphical Method and by Computer Simulation / Hroncová Darina, Frankovský Peter, Bettes Gabriel // American Journal of Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 4, N 7. – P. 329–343.
3. Yamamoto, Tatsuya. Automated Kinematic Analysis of Closed-Loop Planar Link Mechanisms / Tatsuya Yamamoto, Nobuyuki Iwatsuki and Ikuma Ikeda // Machines. – 2020. – № 8, 41. –P. 1–16.
4. Джолдасбеков, У. А. Графо-аналитические методы анализа и синтеза механизмов высоких классов / У. А. Джолдасбеков. – Алма-Ата, 1983. – 256 с.

УДК 548.232.4

### УСТОЙЧИВЫЕ РЕЖИМЫ ВОЗМУЩЕНИЯ ФАЗОВОЙ ГРАНИЦЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО РАСПЛАВА

И. А. Концевой, А. А. Бугримов

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

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

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

### STABLE MODES OF PHASE BOUNDARY PERTURBATION HIGH-SPEED CRYSTALLIZATION OF SUPERCOOLED MELT

I. A. Kontsevoy, A. A. Bugrimov

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The effect of melt supercooling on the kinetic parameters of the high-speed crystallization front of pure metal is studied. Calculations are performed for copper.*

**Keywords:** high-speed crystallization, growth line instability, phase boundary curvature, dendritic growth.

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. Вопрос о морфологической устойчивости линии роста дендрита рассматривался в [2, 3]. Цель данной работы – выполнить анализ кинетических свойств фазовой границы кристаллизации (ФГК) в чистом расплаве меди (переохлаждение  $\Delta T, K \in [180, 230]$ ).

**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  $f(y, t) / H = \exp(-rt) \cos(ky)$ , 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  $\Delta T$ . 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 меди при  $K_0 = 10^7 \text{ м}^{-1}$ . Значения теплофизических параметров расплава и кристалла приведены в [6]. Зависимости  $|q_v|$  и  $K_f$  от переохлаждения  $\Delta T$  даны на рис. 1 в размерных величинах.

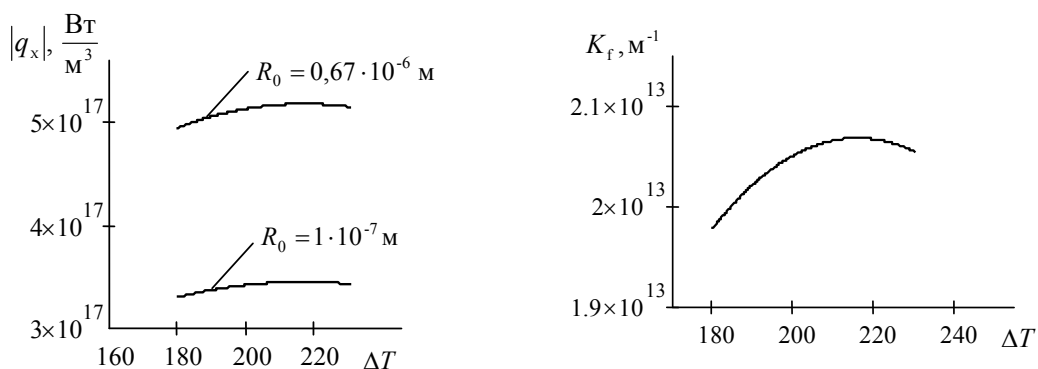


Рис. 1. Свойства теплоотвода  $|q_x|$  и верхней границы  $K_f$  значений кривизны вершины дендрита и от величины переохлаждения

Полученные в результате расчетов числовые значения  $K_f(\Delta T)$  говорят о том, что аperiodический режим (2) устойчив: верхняя граница  $K_f$  в данных условиях не

достигается. В безразмерном виде на рис. 2 показаны границы  $r^{(1)}$ ,  $r^{(2)}$  интервала устойчивости; на рис. 3 – полупериод колебаний по координате  $y$ . Масштабы величин:  $y_b = 10^{-6}$  м,  $t_b = 10^{-7}$  с.

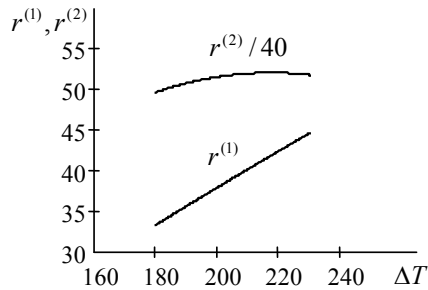


Рис. 2. Влияние переохлаждения расплава на границы интервала аperiodической устойчивости фазовой границы кристаллизации

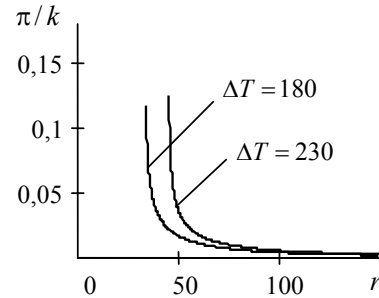


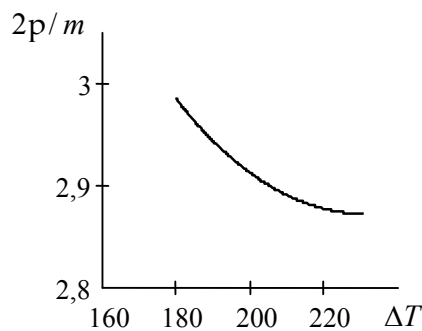
Рис. 3. Корреляция «параметр затухания по времени – параметр пространственной неоднородности возмущения»

**Волновой режим возмущения.** Незатухающая стоячая волна возмущения имеет вид:

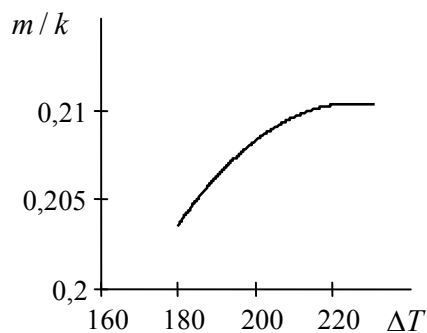
$$f(y, t)/H = \cos ky \sin mt, \quad t \geq 0, \quad y \in [0, y_1]; \quad (2)$$

$$k^2 = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2}, \quad m^2 = \frac{\beta_1 \beta_3}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2}, \quad w_2 = m/k = (v_3/v_2)^{1/2},$$

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 приведены на рис.4.



а)



б)

Рис. 4. Незатухающая стоячая волна возмущения: а – период колебаний во времени; б – скорость волны

Стоячая волна, затухающая с течением времени, определяется решением:

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

Некоторые результаты расчетов этого режима приведены на рис. 5. При  $r = 0$  данное решение принимает вид (2).

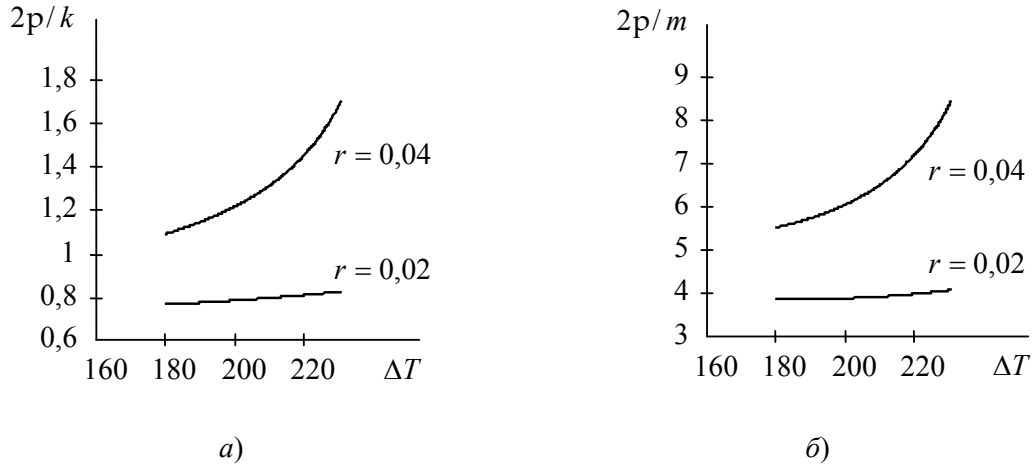


Рис. 5. Затухающая стоячая волна возмущения:  
 а – период колебаний по координате  $y$ ; б – период колебаний во времени

Таким образом, кинетические свойства фазовой границы высокоскоростной кристаллизации чистого расплава в значительной степени обусловлены локальной неравновесностью теплопереноса в твердой фазе. Выполнен анализ свойств возмущенной фазовой границы кристаллизации меди. Получены свойства теплоотода  $q_v(\Delta T)$  от твердой фазы и значения верхней границы кривизны  $K_f$ , обеспечивающей устойчивость аperiодического возмущения. Стоячая волна возмущения рассмотрена в незатухающем и затухающем режимах. Показано, что параметр затухания оказывает 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.

УДК 004.942+616.74

### ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ АРТЕРИИ ПРИ РАСКРЫТИИ СТЕНТА

А. И. Столяров, Е. В. Зайцев

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

*Выполнен расчет напряжений и деформаций в артерии и бляшке при раскрытии стента.*

**Ключевые слова:** артерия, атеросклеротическая бляшка, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, стент.

### ASSESSMENT OF THE STRESSED STATE OF THE ARTERY DURING STENT OPENING

A. I. Stolyarov, E. V. Zaitsev

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*In this work, the stresses and deformations in the artery and plaque were calculated when the stent was opened.*

**Keywords:** stent, artery, stress-strain state, finite element method.

Одним из наиболее распространенных сосудистых заболеваний является атеросклероз, который может привести к сужению и блокировке артерий. Для восстановления нормального кровотока применяются эндоваскулярные методы лечения, среди которых особое место занимает стентирование. Основной целью этой процедуры является устранение стенозов – сужений сосудов, которые ограничивают кровоток к сердечной мышце. Этот метод предполагает введение в артерию специального устройства – стента, которое позволяет удерживать стенки сосуда открытыми и восстанавливать проходимость.

Открытие стента вызывает изменения в напряженном состоянии стенки артерии, что, в свою очередь, может влиять на его функциональность и долговечность. Напряженное состояние стенки артерии в процессе раскрытия стента подвергается влиянию целого ряда факторов, таких как материал, из которого изготовлен стент, его геометрия, а также механические свойства артериальной стенки. Эти взаимодействия имеют значение для предотвращения таких осложнений, как рестеноз (вторичное сужение артерии) и тромбообразование.

Цель данной работы – провести оценку напряженного состояния артерии при раскрытии стента. Для достижения этой цели использован метод конечных элементов, позволяющий детализировать и визуализировать распределение напряжений и деформаций в артерии во время процесса раскрытия стента. Основное внимание в данной работе уделено анализу влияния на напряженное состояние конструкции стента и механических свойств атеросклеротической бляшки, а также выявлению критических точек, где возможно возникновение неблагоприятных последствий.