

ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ С УЧЕТОМ КОНВЕКЦИИ В ЖИДКОСТИ

Корозникова И.Е.¹, Глебова А.Е.¹, Александров Д.В.^{1,2}

¹⁾ Лаборатория стохастического транспорта наночастиц в живом организме, Лаборатория многомасштабного математического моделирования, Уральский Федеральный Университет, Ленина 51, Екатеринбург, 620000, Российская Федерация

²⁾ Департамент теоретической и математической физики, Уральский Федеральный Университет, Ленина 51, Екатеринбург, 620000, Российская Федерация
E-mail: irina.e.koroznikova@gmail.com

LINEAR ANALYSIS OF MORPHOLOGICAL AND DYNAMIC INSTABILITY OF SOLIDIFICATION PROCESS CONSIDERING CONVECTION IN LIQUID

Koroznikova I.E.¹, Glebova A.E.¹, Alexandrov D.V.^{1,2}

¹⁾ Laboratory of Stochastic Transport of Nanoparticles in Living Systems, Laboratory of Multi-Scale Mathematical Modeling, Ural Federal University, Lenin ave., 51, Ekaterinburg, 620000, Russian Federation

²⁾ Department of Theoretical and Mathematical Physics, Ural Federal University, Lenin ave., 51, Ekaterinburg, 620000, Russian Federation

Morphological and dynamic instabilities of the process of directional solidification in a limited region of space in the presence of convection in the melt are considered. As a result, the existence of morphological and dynamical instability was shown for a wide range of wave numbers.

Межфазная граница является одним из важных объектов исследования в процессах фазовых превращений, её изменения полностью определяют формирование различных структур во время протекания этих процессов [1-3]. Примерами могут быть такие межфазные границы как форма пламени в процессах горения, границы между различными жидкостями, полосчатые, ячеистые и дендритные структуры в процессах кристаллизации.

Конвективные течения жидкости могут по-разному сказываться на процессе фазового превращения из жидкого состояния в твердое. Так они могут выравнивать распределения температуры и концентрации в жидкости или, наоборот, создавать конвективные или холодные/горячие области в определенных местах у границы раздела «твердое тело – жидкость».

Морфологические и динамические возмущения развиваются из-за неоднородности температурных и концентрационных полей, конвекции или концентрационного переохлаждения. В результате такие возмущения полностью меняют процесс затвердевания и приводят к формированию различных микроструктур. К примеру, морфологическая неустойчивость фронта

кристаллизации влияет на развитие ячеистых структур, динамическая неустойчивость приводит к образованию полосчатых структур, а эволюция «дендритного леса» в целом порождает двухфазную область [4]. Линейный анализ морфологической устойчивости с приложениями к проблемам кристаллизации впервые был развит Маллинзом и Секеркой [5]. Затем их методика была расширена на описание различных особенностей процессов затвердевания.

Данное исследование посвящено линейному анализу морфологической/динамической неустойчивости процесса направленного затвердевания в ограниченной области пространства при наличии конвекции в расплаве. Разработана линейная теория морфологической неустойчивости стационарного процесса направленной кристаллизации с плоской границей раздела фаз «твердое тело – жидкость», с учетом наличия конвекции в жидкости. Выписаны уравнения для возмущений температурного поля и межфазной границы, построено решение этих уравнений, выведено дисперсионное соотношение. Его анализ показал существование морфологической неустойчивости в широком диапазоне волновых чисел и при различных параметрах кристаллизующейся системы. Существование этой неустойчивости обусловлено возмущениями, которые поступают на границу раздела «твердое тело – жидкость» от охлаждаемой стенки через твердую фазу. Помимо этого, в работе показано, что плоская граница раздела «твердое тело – жидкость» может быть неустойчива к динамическим возмущениям, то есть к возмущениям с нулевым волновым числом (к возмущениям установившейся скорости затвердевания). Также имеется ветвь устойчивого решения для динамических возмущений. Кристаллизующаяся система может выбрать одну из этих ветвей (неустойчивую или устойчивую) в зависимости от действия конвекции.

1. Dantzig J.A., Rappaz M. Solidification: 2nd Edition - Revised & Expanded. - EPFL Press, Lausanne, 2017. - 740 с.
2. Fisher D., Kurz W. Fundamentals of solidification //Fundamentals of Solidification. – 1998. – С. 1-316.
3. Alexandrov D. V., Zubarev A. Y. Patterns in soft and biological matters //Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2020. – Т. 378. – №. 2171. – С. 20200002.
4. Makoveeva E.V., Ivanov A.A., Alexandrova I.V., Alexandrov D.V. Directional crystallization with a mushy region. Part 1: linear analysis of dynamic stability //The European Physical Journal Special Topics. – 2023. – Т. 232. – С. 1119–1127.
5. Mullins W. W., Sekerka R. F. Stability of a planar interface during solidification of a dilute binary alloy //Journal of applied physics. – 1964. – Т. 35. – №. 2. – С. 444-451.