

УДК 537.9

DOI: 10.17223/00213411/63/4/150

*Е.Е. СЛЯДНИКОВ^{1,2,3}, И.Ю. ТУРЧАНОВСКИЙ², П.П. КАМИНСКИЙ¹***КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕРАВНОВЕСНОГО ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА
ПРИ КРИТИЧЕСКОМ ПЕРЕГРЕВЕ НАНОСЕКУНДНЫМ ОБЪЕМНЫМ
ТЕПЛОВЫМ ИСТОЧНИКОМ***

Сформулирована кинетическая модель неравновесного плавления металла при критическом нагреве наносекундным объемным тепловым источником. Предлагаемый подход учитывает характерные особенности процесса: сильную неравновесность системы, термодинамические флуктуации параметра порядка, которые играют существенную роль в окрестности критической точки фазового превращения, особенно в случае достижения точки абсолютной неустойчивости системы. Проведены расчеты зависимости модельного термодинамического потенциала от параметра порядка для различных значений перегрева образца из меди. При критическом перегреве $T_* - T_c = 272$ К минимум, соответствующий твердому состоянию, исчезает, превращаясь в точку перегиба. Твердое состояние становится абсолютно неустойчивым.

Ключевые слова: кинетическая модель, объемный тепловой источник, неравновесная система, термодинамические флуктуации, неустойчивость системы.

Введение

При воздействии наносекундных тепловых источников на кристаллические образцы можно достичь таких параметров нагрева, при которых образцы, находясь в кристаллическом состоянии, нагреваются выше температуры его плавления. Результаты исследований вещества в твердом перегретом состоянии с помощью поверхностного теплового источника малой интенсивности приведены в [1, 2]. Однако в опытах с поверхностным нагревом наблюдался лишь незначительный эффект перегрева. С появлением электронно-лучевых и лазерных источников излучения с наносекундной длительностью импульсов [3, 4] был экспериментально получен значительный перегрев вещества в твердой фазе. Например, в работе [3] экспериментально исследовали плавление тонкой алюминиевой фольги толщиной 25 нм под действием наносекундного импульса излучения лазера. Равновесная точка плавления с температурой 932 К достигалась при плотности энергии 5 мДж/см². При дальнейшем увеличении энергии импульса наблюдалась задержка плавления на 180 пс, т.е. происходил перегрев твердой фазы, о чем свидетельствовало наличие дальнего порядка, фиксируемого на дифрактограммах.

Классический подход к моделированию квазиравновесного фазового перехода плавления в макроскопических системах [1] включает отслеживание границы раздела фаз, которая отделяет новую фазу от исходной фазы. Это требует решения нелинейной задачи Стефана со свободной границей раздела фаз, положение и форма которой являются частью решения. При описании малоразмерных систем эта модель не учитывает влияние такого важного фактора, как конечная ширина границы раздела, внутри которой одновременно сосуществуют исходная и растущая фазы.

В работе [5] использован метод фазового поля и сформулированы кинетические уравнения, описывающие плавление, а конечная ширина межфазной границы органично включена в рассмотрение. В [6] представлены математические результаты, которые значительно повышают вычислительную эффективность метода фазового поля для моделирования перехода первого рода в металле. Относительно недавно разработана теоретическая модель, описывающая динамику плавления и течения расплава в чистом металлическом порошке, нагреваемом движущимся лазерным лучом [7]. В работе [8] обсуждаются теоретические модели и результаты прямого лазерного наноструктурирования поверхности твердых тел. С учетом кинетики фазовых превращений на основе уравнения Колмогорова проведено моделирование процессов плавления кремния при воздействии на его поверхность наносекундным лазерным излучением [9]. Для объяснения процесса неравновесного плавления предложены различные механические и термодинамические теории [10]. Но они

* Работа выполнена по проекту III.23.2.8 Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>