

**СРАВНЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ И  
МЕХАНИЧЕСКОГО УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА АМОРФНЫЙ  
СПЛАВ  $Fe_{72,5}Cu_1Nb_2Mo_{1,5}Si_{14}B_9$**

Романов И.Ю.<sup>1,2</sup>, Ушаков И.В.<sup>1</sup>, Макаров Е.В.<sup>2\*</sup>, Овчинников В.В.<sup>1,2</sup>, Чолах С.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>)Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>)Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

\*E-mail: [efre-m@yandex.ru](mailto:efre-m@yandex.ru)

**COMPARISON OF THE ION BOMBARDMENT INFLUENCE AND SHOCK  
MECHANICAL LOADING ON AMORPHOUS ALLOY  
 $Fe_{72,5}Cu_1Nb_2Mo_{1,5}Si_{14}B_9$**

Romanov I.Yu.<sup>2</sup>, Ushakov I.V.<sup>1</sup>, Makarov E.V.<sup>2\*</sup>, Ovchinnikov V.V.<sup>1,2</sup>, Cholakh S.O.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>) Institute of Electrophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

В работе [1] установлено, что изменения микроструктуры холоднодеформированных сплавов ВД1 и В95 системы Al-Cu-Mg в результате механического ударного нагружения полностью аналогичны изменениям, инициируемым ионной бомбардировкой ( $Ar^+$ , 20 – 40 кэВ) при относительно невысоких флюенсах ( $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ), набираемых за 1 – 8 с.

А именно, в том и другом случае наблюдается процессы трансформации ячеистой дислокационной структуры в субзеренную, а также растворение исходных интерметаллидов и образование идентичных новых фаз (в случае ионного облучения на глубине, в  $10^4 - 10^5$  раз превышающей проективные пробеги ионов).

Ранее была высказана гипотеза [2] о том, что эффекты дальнего действия в метастабильных средах при низкодозном ионном облучении могут быть связаны с запуском посткаскадных ударно-волновых процессов.

Иницилирующим фактором при этом являются нанообласти каскадов атомных смещений, так называемые “термические пики” (thermal spikes), являющиеся зонами взрывного энерговыделения. Термализуемые в течение  $\sim 10 - 12$  с быстро расширяющиеся каскадные области, разогреваемые до 5000 – 6000 К и выше, могут являться причиной эмиссии посткаскадных мощных ударных или упругих волн, способных инициировать на своем фронте структурно-фазовые превращения [2].

Аморфный сплав является идеальным объектом для проверки возможности его кристаллизации при пониженных температурах не за счет термического, а за счет механического ударного воздействия.

Нами были проведены эксперименты по ударному нагружению аморфных лент сплава  $Fe_{72,5}Cu_1Nb_2Mo_{1,5}Si_{14}B_9$  толщиной 25 мкм с использованием разработанной в РФЯЦ ВНИИТФ одноступенчатой газовой пушки для изучения

динамических свойств конструкционных материалов, способной генерировать нагружающие импульсы в диапазоне от 1 до 40 ГПа. Диапазон скоростей снаряда с ударником от 80 до 1620 м/с. Скорость ударника подбиралась таким образом, чтобы в процессе неупругого взаимодействия температура аморфной ленты не превышала 350 °С.

Проведенные исследования методами рентгено-структурного анализа и атомной силовой микроскопии показали, что механическое ударное нагружение приводит к мгновенной нанокристаллизации фольги аморфного сплава. Время процесса образования порядка 10 – 5 с. Процесс ударного нагружения сопровождается кратковременном нагревом образцов до 350 °С (что на 150 °С ниже термического порога кристаллизации) и приводит к полной кристаллизации аморфного сплава (во всем объеме лент толщиной 25 мкм) с выделением кристаллов твердого раствора  $\alpha$ -Fe(Si), близкого по составу к  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_{20}$ , стабильной фазы  $\text{Fe}_3\text{Si}$  и метастабильных гексагональных фаз. Полученный результат является еще одним косвенным доказательством возможности посткаскадных динамических эффектов при ионной бомбардировке.

1. Овчинников В.В. и др., Известия Вузов. Физика, 59, 3-8 (2016).
2. Овчинников В.В., УФН, 178, 991-1001, (2008).
3. Овчинников В.В., Махинько Ф. Ф., Гущина Н. В., ФММ, 118, 158-166, (2017).
4. Романов И.Ю. и др., Известия Вузов. Физика, 60, 157-165 (2017).

## MATHEMATICAL MODELING OF NONLINEAR GROWTH RATES OF CRYSTALS WITH ALLOWANCE FOR MEIRS KINETICS

Makoveeva E.V.<sup>1\*</sup>, Alexandrov D.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

\*E-mail: [eugenyalm@gmail.com](mailto:eugenyalm@gmail.com)

The process of nucleation and growth of crystals in a metastable medium is studied theoretically in the presence of Meirs kinetics. The removal of crystals and their “diffusion” in the space of radii are taken into account in the Fokker-Planck equation for the distribution function. The time-dependent external heat (or mass) flux which controls the level of system metastability is included in the heat (mass) balance equation. The effect of nonlinear growth rate for spherical crystals is shown.

The present work is concerned with a mathematical description of the phase transition process in a crystallizer when the kinetic equation takes into account the crystal withdrawal rate and the balance equation contain the heat (mass) source term. The distribution function  $f$  accounting for the particle fluctuations and crystal withdrawal rate takes the form [1, 2]

$$\frac{\partial f}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial r}(gf) + h(r)f = \frac{\partial}{\partial r}\left(D \frac{\partial f}{\partial r}\right), \quad r > r_*. \quad (1)$$