

ГИГАНТСКИЕ РАДИАЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ КОРПУСКУЛЯРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

В.В. Овчинников

*Институт электрофизики УрО РАН,
ул. Амундсена 106, 620016 Екатеринбург, Россия, viae05@rambler.ru*

Рассмотрены наномасштабные динамические эффекты и процессы, имеющие место при каскадообразующих видах облучения конденсированных сред тяжелыми ионами, нейтронами, осколками деления. Источником зарегистрированных эффектов являются области прохождения плотных каскадов атомных смещений, термализуемые за времена порядка одной триллионной доли секунды (thermal spikes), с гигантскими температурами и тепловыми давлениями в этих областях ($T=3000-6000$ К, $P=5-40$ ГПа). Построена модель иницируемых ионной бомбардировкой самораспространяющихся (теоретически на неограниченные расстояния) структурно-фазовых превращений в метастабильных средах. Роль этих процессов находится вне поля зрения классической радиационной физики конденсированных сред. Ударно-волновое воздействие необходимо учитывать при каскадообразующих видах облучений, наряду с ролью чисто миграционных процессов.

Ключевые слова: облучение ионами; радиационно-динамические эффекты; металлы и сплавы.

GIANT RADIATION-DYNAMIC EFFECTS UNDER CORPUSCULAR IRRADIATION

Vladimir Ovchinnikov

*Institute of Electrophysics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
106 Amundsen Str., 620016 Yekaterinburg, Russia, viae05@rambler.ru*

Nanoscale dynamic effects and processes occurring in cascade-forming types of learning of condensed matter by heavy ions, neutrons, and fission fragments are considered. The role of these processes is outside the field of vision of classical radiation physics of condensed matter. They were first considered in publications by the author and his colleagues and confirmed by joint work with German colleagues (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Germany). The sources of the recorded effects are the regions of passage of dense cascades of atomic displacements, thermalized in times of the order of one trillionth of a second (thermal spikes), with giant temperatures and thermal pressures in these regions ($T = 3000-6000$ K, $P = 5-40$ GPa). For this reason, it is necessary to take into account shock-wave effects in cascade-forming types of irradiation, together with purely migration processes with the participation of radiation defects, which are taken into account by classical radiation physics.

A theory of self-propagating (theoretically over unlimited distances) structural-phase transformations in metastable media initiated by ion bombardment is developed. In practice, this provides: 1) an increase by at least 3-5 orders of magnitude of the linear scale of the effect of ionizing radiation on materials (an increase in the depth of exposure for ions); 2) the temperature of the transformations initiated by irradiation decreases by tens and hundreds of degrees in comparison with similar thermally activated processes; and 3) their rate increases by several orders of magnitude in comparison with thermally and radiation-stimulated migration processes.

Keywords: ion irradiation; radiation-dynamic effects; metals and alloys.

Введение

В обзорах [1-4] рассмотрены наномасштабные динамические эффекты и процессы, имеющие место при каскадообразующих видах облучения конденсированных сред тяжелыми ионами, нейтронами, осколками деления. Роль этих процессов находится вне поля зрения классической радиационной физики конденсированных сред. Они были впервые рассмотрены в публикациях автора и его коллег и под-

тверждены совместными работами с немецкими коллегами [5, 6]. Источником зарегистрированных эффектов являются области прохождения плотных каскадов атомных смещений, термализуемые за времена порядка одной триллионной доли секунды (thermal spikes), с гигантскими температурами и тепловыми давлениями в этих областях ($T=3000-6000$ К, $P=5-40$ ГПа). В силу этого необходимо учитывать ударно-волновое воздействие при

каскадообразующих видах облучений, наряду с ролью чисто миграционных процессов с участием радиационных дефектов, рассматриваемых классической радиационной физикой.

В работах [1, 3] построена теория инициируемых ионной бомбардировкой самораспространяющихся (теоретически на неограниченные расстояния) структурно-фазовых превращений в метастабильных средах. На практике это обеспечивает: 1) повышение как минимум на 3-5 порядков линейных масштабов воздействия ионизирующих излучений на материалы (увеличение глубины воздействия для ионов); 2) на десятки и сотни градусов снижается температура превращений, инициируемых облучением, по сравнению с аналогичными термоактивируемыми процессами и 3) на несколько порядков величины повышается их скорость по сравнению с термо- и радиационно-стимулированными миграционными процессами.

Результаты и их обсуждение

В докладе обобщены оригинальные исследования автора и его коллег, относящиеся к экспериментальному и теоретическому исследованию геометрических ([7, 8] и энергетических (рис. 3) [9, 10] характеристик зон взрывного энерговыделения (плотных каскадов атомных смещений при ионной бомбардировке), а также энергии незатухающих посткаскадных волн в метастабильных средах $\varepsilon(x)$, $\varepsilon(\rho)$ (для случаев плоской и сферической геометрии) [3]:

$$\varepsilon(x) = \begin{cases} \varepsilon_0 \exp[-2\delta(x-x_0)/v], & \varepsilon_0 < \Delta f, \\ \varepsilon^* - (\varepsilon^* - \varepsilon_0) \exp[-2\delta(x-x_0)/v], & \varepsilon_0 \geq \Delta f, \end{cases} \quad (1)$$

и (для случая сферической волны, $\varepsilon_0 \geq \Delta f$)

$$\varepsilon(\rho) = \varepsilon^* - (\varepsilon^* - \varepsilon_0) \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^2 e^{-\frac{2\delta(\rho-\rho_0)}{v}} - \varepsilon^* \left\{ \frac{1}{\rho^2} \frac{v}{\delta} \left[\left(\rho - \frac{v}{2\delta} \right) - \left(\rho_0 - \frac{v}{2\delta} \right) e^{-\frac{2\delta(\rho-\rho_0)}{v}} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $\varepsilon^* = v\Delta F'/2kG\delta$, а ΔF – изменение свободной энергии системы при переходе из состояния 1 в состояние 2, Δf и $\Delta F' = -\Delta F -$

потенциальный барьер и выделение энергии на фронте волны, v – скорость, k – коэффициент формы и G – ширина фронта волны, δ – коэффициент поглощения.

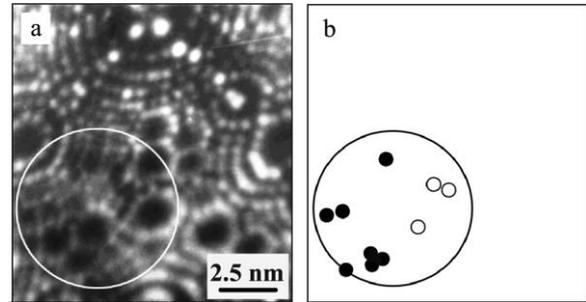


Рис. 1. Чистая Pt, облученная нейтронами ($E > 0.1$ МэВ, $F=3.5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$) [7]: изображение полевой ионной микроскопии (а); схема (б)

Fig. 1. Pure Pt, irradiated with neutrons ($E > 0.1$ MeV, $F=3.5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$) [7]: (a) field ion image; (b) diagram

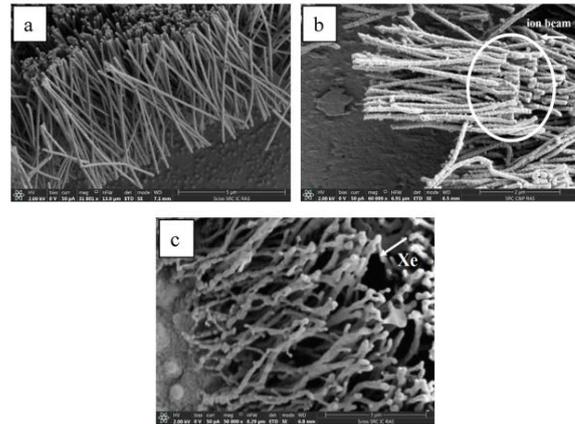


Рис. 2. Локальное плавление нанопроводок $\text{Fe}_{56}\text{Ni}_{44}$ толщиной 60 нм в области термических пиков при облучении ионами Ar^+ и Xe^+ : (а) – исходное состояние, (б) – облучение ионами Ar^+ , (в) – облучение ионами Xe^+ [11]

Fig. 2. Local melting of $\text{Fe}_{56}\text{Ni}_{44}$ 60 nm thick nanowires in thermal spikes area under Ar^+ and Xe^+ irradiation. (a) – initial state, (b) – Ar^+ irradiation, (c) – Xe^+ irradiation [11]

Важными являются данные о подобии результатов воздействия мощных посткаскадных волн и механического ударного нагружения. Впервые совместно с РФЯЦ ВНИИТФ установлено [12], что ионная бомбардировка и механическое ударное нагружение оказывают практически идентичное влияние на холоднодеформированные сплавы системы Al-Cu-Mg. И тот и другой вид воздействия приводит к трансформации ячеистой дис-

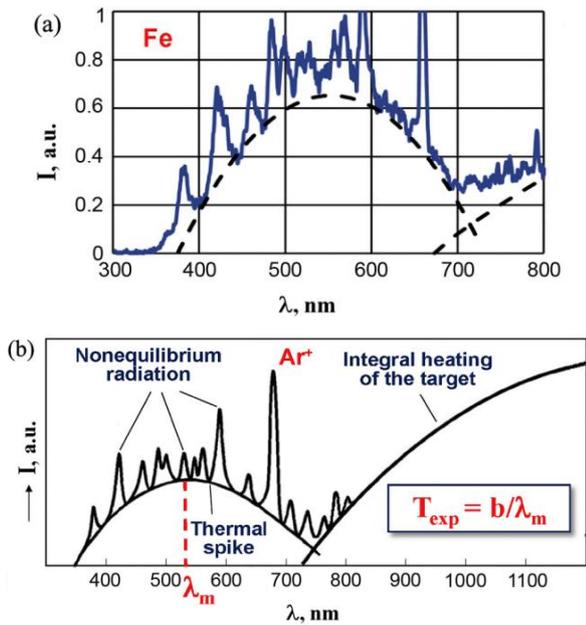


Рис. 3. Спектральный состав свечения мишени Fe при облучении ионами Ar^+ с энергией 15 кэВ [9, 10]: (а) эксперимент ($T = 5300 \text{ K}$, T мишени = 530 K); (б) диаграмма, иллюстрирующая формирование спектрального состава свечения

Fig. 3. Spectral composition of Fe target glow under Ar^+ 15 keV irradiation [9, 10]: (a) experiment ($T = 5300 \text{ K}$, T target=530 K); (b) a diagram illustrating the formation of the glow spectral composition

локационной структуры в субзеренную, растворению исходных интерметаллидов $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ и образованию наноразмерных интерметаллидов Al_2CuMg . Это является косвенным доказательством динамической (ударно-волновой) природы процессов при ионной бомбардировке, что связано с распространением посткаскадных мощных упругих и ударных волн с давлениями на их фронте, достигающими нескольких десятков ГПа. Такие волны способны кардинальным образом перестраивать метастабильные среды.

Обсуждаются результаты прямого наблюдения оплавленных каскадных областей. В ходе исследования нанопроволок (НП) из чистого Ni и сплава $\text{Fe}_{56}\text{Al}_{44}$ диаметром 60 и 100 нм методом сканирующей электронной микроскопии после облучения пучками ускоренных ионов впервые зарегистрировано образование на их поверхности наномасштабных ($R \sim 5 \text{ нм}$) оплавленных областей (рис. 2), являющихся областями остывших термиче-

ских пиков. Обнаружено искривление и разрушение НП в результате распространения в них мощных посткаскадных упругих и ударных волн. Более тяжелые ионы Kr^+ и Xe^+ воздействуют заметно более интенсивно по сравнению с ионами Ar^+ . Установлено, что снижение толщины нанобъектов может иметь своим следствием увеличение их радиационной стойкости.

Методом мессбауэровской спектроскопии показано, что в результате кратковременного (в течение 4 с) облучения холоднодеформированных фольг толщиной 25 мкм из сплава Fe-6.35 ат. % Mn ионами Ar^+ ($E = 15 \text{ кэВ}$, $j = 100 \text{ мкА/см}^2$, $F = 2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$), в диапазоне низких температур 300–450°C в них инициируется $\alpha \rightarrow \gamma$ фазовое превращение, в результате которого образуется аустенит с многократно повышенным содержанием Mn (от 23.8 до 38.0 ат. %) при обеднении α -фазы марганцем. Аналогичный температурно-временной режим нагрева фольг инфракрасным излучением не вызывает в них ни $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, ни образования ближнего атомного порядка типа расслоения. Обнаруженные факты не могут быть объяснены явлениями термически и радиационно-стимулированной диффузии в силу небольшого проективного пробега ионов Ar^+ ($\ll 1 \text{ мкм}$), малой продолжительности воздействия (и, соответственно, относительно небольшой глубины диффузии дефектов), а также из-за объемного характера наблюдаемого превращения (вклад узкой зоны дефектообразования в спектры пропускания < 0.001). В качестве объяснения были использованы защищаемые автором и его коллегами идеи о наномасштабных динамических эффектах, связанных с радиационным встряхиванием (тряской) среды посткаскадными мощными упругими и/или ударными волнами. Концентрации c_1 и c_2 , рассчитанные на основе анализа мессбауэровских спектров для всех температур нагрева: 311, 378 и 449°C, достаточно точно соответствуют кривым предельной растворимости Mn в

α - и γ -фазах и их продолжению в область низких температур (рис. 4).

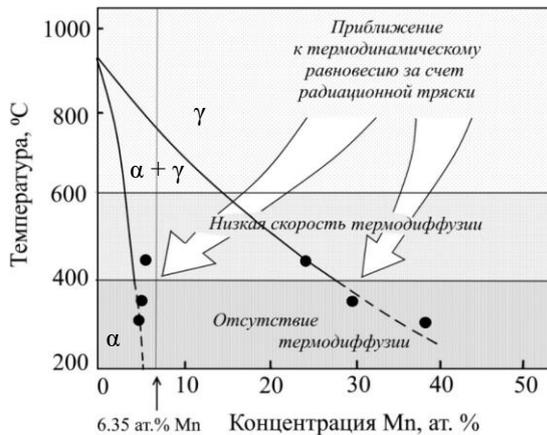


Рис. 4. Участок равновесной фазовой диаграммы железо-марганец; ● – рассчитанные значения предельной растворимости компонентов при температурах ниже порога активации термо- и радиационно-усиленной диффузии за счет использования эффекта гигантской миграционной подвижности атомов в условиях каскадной радиационной тряски

Fig. 4. Fragment of the equilibrium phase diagram of iron-manganese; ● – the values of the limiting solubility of the components determined in this work at temperatures below the activation threshold of thermo- and radiation-enhanced diffusion due to the use of the effect of giant migration mobility of atoms under conditions of cascade radiation shaking

Заклучение

При пониженных температурах (ниже $0.3-0.4 T_{пл}$) практически заморожены процессы с участием термо- и радиационно-стимулированной диффузии. В то же время, как показано в [1-4], генерируемые плотными каскадами атомных смещений мощные упругие и ударные волны способны перестраивать метастабильные среды теоретически на неограниченной глубине. Эти ударно-волновые эффекты, вызывающие гигантское увеличение подвижности атомов, условно названы нами «каскадной радиационной тряской» [2], в отличие от радиационной тряски, связанной с аннигиляцией пар Френкеля [13]. «Каскадная радиационная тряска», используемая взамен температуры, на несколько порядков увеличивает скорость операций отжига различных материалов,

многократно увеличивая подвижность атомов [1-6], и снижает на сотни градусов температурный порог операций отжига. В дополнение к этому, проведенное исследование показывает, что радиационная тряска посткаскадными волнами может являться инструментом для достижения равновесных состояний веществ при аномально низких температурах, когда термодиффузия отсутствует, и других способов достижения равновесия не существует.

Экспериментальные данные, касающиеся процессов ускоренного формирования аустенита в сплавах Fe-Mn, получены в рамках выполнения проекта Российского научного фонда (проект № 19-79-20173).

Библиографические ссылки

1. Овчинников В.В. Радиационно-динамические эффекты. Возможности формирования уникальных структурных состояний и свойств конденсированных сред. *Успехи физических наук* 2008; 178(9): 991-1001.
2. Ovchinnikov V.V. Nanoscale dynamic and long-range effects under cascade-forming irradiation. *Surface and Coating Technology* 2018; 355: 65-83.
3. Ovchinnikov V.V. Temperature decrease and multiple acceleration of structural and phase transformations in metastable metals and alloys under cascade-forming irradiation. Part 1 – General questions and theory. *Journal of Physics: Conference Series* 2018; 1115: 032046.
4. Ovchinnikov V.V. Temperature decrease and multiple acceleration of structural and phase transformations in metastable metals and alloys under cascade-forming irradiation. Part 2 – Experimental Results and Discussion. *Journal of Physics: Conference Series* 2018; 1115: 032047.
5. Ovchinnikov V.V., Goloborodsky B.Yu., Gushchina N.V., Semionkin V.A., Wieser E. Enhanced Atomic Short-Range Ordering of Alloy Fe-15 at.% Cr Caused by Ion Irradiation at Elevated Temperature and Thermal Effects Only. *Appl. Phys. A* 2006; 83: 83-88.
6. Gushchina N.V., Ovchinnikov V.V. Mücklich A. Acceleration of volume decomposition of supersaturated Al + 4 wt.%Cu solid solution under irradiation with Ar⁺ ions. *Phys. Status Solidi B* 2016; 253 (4): 770-777.
7. Козлов А.В., Щербачев Е.Н., Асипцов О.И., Ивченко В.А., Попова Е.В., Овчинников В.В., Чернов В.М. Первичная повреждаемость и накопление радиационных дефектов в ГЦК-

металлах при низкотемпературном нейтронном облучении. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы* 2006; 1(66): 47-53.

8. Ivchenko V.A., Medvedeva E.V., Ovchinnikov V.V. Structure of defects in Pt induced by neutron and ion irradiation. *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2009; 3: 592–597.
9. Ovchinnikov V.V., Makhin'ko F.F., Solomonov V.I., Kaigorodova O.A. Optical emission from metal targets bombarded by 5–20 keV argon ions. *Tech. Phys. Lett.* 2012; 38: 42–46.
10. Ovchinnikov V.V., Makhin'ko F.F., Solomonov V.I. Thermal-spikes temperature measurement in pure metals under argon ion irradiation (E=5–15 keV). *J. Phys. Conf. Ser.* 2015; 652: 012070.
11. Bedin S.A., Makhin'ko F.F., Ovchinnikov V.V., Gerasimenko N.N., Zagorskiy D.L. Radiation stability of metal nanowires. *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.* 2017; 168: 012096.
12. Овчинников В.В., Гущина Н. В., Кайгородова Л.И., Григорьев А.Н., Павленко А.В., Плохой В.В. Сравнительные эксперименты по ионной бомбардировке и механическому ударному нагружению сплавов системы Al-Cu-Mg. *Известия вузов. Физика* 2014; 57 (10/3): 196-200.
13. Инденбом В.Л. Новая гипотеза о механизме радиационно-стимулированных процессов. *Письма в ЖТФ* 1979; 5(8): 489-492.

References

1. Ovchinnikov V.V. Radiation-dynamic effects. Potential for producing condensed media with unique properties and structural states. *Physics-USpekhi* 2008; 51(9): 955-974.
2. Ovchinnikov V.V. Nanoscale dynamic and long-range effects under cascade-forming irradiation. *Surface and Coating Technology* 2018; 355: 65-83.
3. Ovchinnikov V.V. Temperature decrease and multiple acceleration of structural and phase transformations in metastable metals and alloys under cascade-forming irradiation. Part 1 – General questions and theory. *Journal of Physics: Conference Series* 2018; 1115: 032046.
4. Ovchinnikov V.V. Temperature decrease and multiple acceleration of structural and phase transformations in metastable metals and alloys under cascade-forming irradiation. Part 2 –

Experimental Results and Discussion. *Journal of Physics: Conference Series* 2018; 1115: 032047.

5. Ovchinnikov V.V., Goloborodsky B.Yu., Gushchina N.V., Semionkin V.A., Wieser E. Enhanced Atomic Short-Range Ordering of Alloy Fe-15 at.% Cr Caused by Ion Irradiation at Elevated Temperature and Thermal Effects Only. *Appl. Phys. A.* 2006; 83: 83-88.
6. Gushchina N.V., Ovchinnikov V.V. Mücklich A. Acceleration of volume decomposition of supersaturated Al + 4 wt.%Cu solid solution under irradiation with Ar⁺ ions. *Phys. Status Solidi B* 2016; 253 (4): 770-777.
7. Kozlov A.V., Sherbakov E.N., Asiptsov O.I. Ovchinnikov V.V. Pervichnaya povrezhdaemost' i nakoplenie radiatsionnykh defektov v GTsK-metallakh pri nizkotemperaturnom neytronnom obluchenii [Primary damage and accumulation of radiation defects in fcc metals under low-temperature neutron irradiation]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Materialovedenie i novye materialy* 2006; 66: 47-53. (In Russian).
8. Ivchenko V.A., Medvedeva E.V., Ovchinnikov V.V. Structure of defects in Pt induced by neutron and ion irradiation. *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2009; 3: 592-597.
9. Ovchinnikov V.V., Makhin'ko F.F., Solomonov V.I., Gushchina N.V., Kaigorodova O.A. Optical emission from metal targets bombarded by 5–20 keV argon ions. *Tech. Phys. Lett.* 2012; 38: 42-46.
10. Ovchinnikov V.V., Makhin'ko F.F., Solomonov V.I. Thermal-spikes temperature measurement in pure metals under argon ion irradiation (E=5–15 keV). *J. Phys. Conf. Ser.* 2015; 652: 012070.
11. Bedin S.A., Makhin'ko F.F., Ovchinnikov V.V., Gerasimenko N.N., Zagorskiy D.L. Radiation stability of metal nanowires. *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.* 2017; 168: 012096.
12. Ovchinnikov V.V., Gushchina N.V., Kaigorodova L.I., Sravnitel'nye eksperimenty po ionnoy bombardirovke i mekhanicheskomu udarnomu nagruzhениyu splavov sistemy Al-Cu-Mg [Comparative experiments on ion bombarding and mechanical shock loading of alloys of the Al-Cu-Mg system]. *Izvestiya vuzov. Fizika* 2014; 57 (10/3): 196-200. (In Russian).
13. Indenbom V.L. Novaya gipoteza o mekhanizme radiatsionno-stimulirovannykh protsessov [A new hypothesis about the mechanism of radiation-stimulated processes]. *Pis'ma v ZhTF* 1979; 5(8): 489-492. (In Russian).