

---

УДК 621.77.016:62178.061

*И. В. Терешко, В. А. Логвин, В. П. Редько*

## ЭФФЕКТ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКЛАСТЕРОВ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

---

UDC 621.77.016:62178.061

*I. V. Tereshko, V. A. Logvin, V. P. Redko*

## ON-BOARD SYSTEM ALGORITHM FOR DIAGNOSING BRAKES OF LINEHAUL VEHICLE

---

### Аннотация

В статье представлены результаты исследований дислокационной структуры материалов, микро-твёрдости сплавов от времени, прошедшего после прекращения облучения, температурной зависимости их электросопротивления после обработки низкоэнергетической плазмой тлеющего разряда. Показано, что изменение физико-механических свойств материалов, подвергнутых обработке низкоэнергетической плазмой, не может быть объяснено в рамках классической физики радиационных дефектов твердого тела. Повышение дислокационной плотности на глубине, превышающей проективный пробег ионов от поверхности мишени, происходит вследствие нелинейных колебаний атомных осцилляторов и приводит к образованию новых метастабильных долгоживущих структур с формированием наноразмерных комплексов и кластеров.

### Ключевые слова:

плазма, тлеющий разряд, дальное действие, микротвёрдость, плотность дислокаций, нанокластер, самоорганизация, солитон.

### Abstract

The paper gives the results of a research into the dislocation structure of materials, microhardness of alloys from the time which has elapsed after the termination of exposure to radiation; the temperature dependence of their electrical resistance after low-energy glow-discharge plasma processing. It is shown that the change of physical and mechanical properties of the materials subjected to low-energy plasma processing cannot be explained within the limits of classical physics of radiation defects of a solid body. The increase of dislocation density at the depth exceeding a projective range of ions from the target surface occurs as a result of nonlinear fluctuations of atomic oscillators, and leads to the formation of new metastable long-lived structures with the formation of nanodimensional complexes and clusters.

### Key words:

plasma, glow discharge, long-range action, micro-hardness, dislocation density, nanocluster, self-organization, soliton.

---

Одним из новых направлений в разработке эффективных способов упрочнения или пластификации металлов и сплавов является формирование в них нанокластеров низкоэнергетическим воздействием плазмы тлеющего разряда [1–5]. Энергия заряженных частиц разряда не должна превышать энергию, не-

обходимую для активного образования в металлах точечных дефектов. Данные технологии базируются на нелинейных эффектах, генетически заложенных в потенциальную энергию взаимодействия структурных элементов кристаллических решеток и определяющих их модификацию при низкоэнергетическом

воздействии плазмы тлеющего разряда. При этом особое значение приобретает знание нелинейных характеристик облучаемых мишеней, учитывая которые, можно путем слабого воздействия вызвать внутренние процессы перестройки систем с образованием новых метастабильных долгоживущих структур. Структуры данного типа могут быть пространственными, временными или пространственно-временными. Способность открытых систем создавать автономные временные и пространственно-временные структуры при наличии внешнего потока энергии рассматриваются как самоорганизация систем [6, 7].

Наиболее важным результатом низкоэнергетической плазменной обработки материалов является «эффект дальнего действия» [8–12], под которым понимается значительное превышение глубины модифицированного слоя в облученных материалах над величиной проективного пробега налетающих ионов в мишенях [13–19]. Активно проводились исследования на разных материалах и при различных энергиях заряженных частиц, значительно превышающих энергию плазмы тлеющего разряда, что относится к направлению ионной имплантации.

Проведение исследований в области обработки плазмой тлеющего разряда позволит использовать все достоинства процессов взаимодействия частиц с твердым телом с целью получения материалов с требуемыми эксплуатационными характеристиками на основе вариации: энергией частиц, дозой облучения, температурой мишеней, материалами электродов и формируемой среды в вакуумной камере [20–22]. Использование плазмы тлеющего разряда позволяет подвергать мишени воздействию ионного потока с широким спектром качества ионов и их энергий и не требует формирования концентрированных ионных пучков. Это процесс взаимодействия хаоса налетающих ионов и кристаллических решеток облучаемых мишеней. Разработку способов и технологиче-

ских процессов обработки по активному, дальнедействующему наноструктурированию облучаемых материалов необходимо проводить на основе исследования основных физических процессов, определяющих данное явление.

Главной задачей работы являлось исследование основных самоорганизационных процессов в металлах и сплавах, подвергнутых низкоэнергетическому воздействию плазмы тлеющего разряда, с целью разработки новых способов и технологий их упрочнения или пластификации.

#### ***Методика исследования изменений физико-механических свойств материалов при воздействии плазмы тлеющего разряда***

В качестве объекта экспериментального исследования были выбраны следующие материалы:  $\alpha$ -Fe, быстрорежущая сталь Р6М5, электролитический никель, шарикоподшипниковая сталь ШХ-15, техническая медь МЗ, медно-графитовые вставки типа ВТКМГ, образцы янтаря и двухкарбидный твердый сплав Т15К6. Твердые сплавы имеют резко гетерогенную структуру и обладают сложным характером химических связей с преимущественно ковалентной и ионной составляющей. Вольфрам растворяется в карбидах титана, формируя сложные карбиды (Ti, W)C во время спекания. Исходная твердость и хрупкость металлокерамического соединения зависят от процентного содержания в сплаве этих сложных карбидов [21].

Все образцы подвергались обработке плазмой тлеющего разряда с варьированием времени обработки. При этом образцы облучались ионами, образующимися из молекул газов воздуха (азота, кислорода, водорода и др.) с энергией 1...2,5 кэВ. Доза облучения соответствовала  $2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Средняя интегральная температура образцов во время облучения не превышала 343 К. Образцы при облучении помещались на катод. Исследовалась зависимость

микротвёрдости сплавов от времени, прошедшего после прекращения облучения (измерения проводились по суткам в течение двух месяцев). Микротвёрдость материалов измерялась прибором ПМТ-3.

Тонкая структура всех материалов была изучена послойно электронно-микроскопическим методом. Дислокационная структура материалов до и после облучения на разных глубинах от облученной поверхности исследовалась с помощью трансмиссионных электронных микроскопов EM-125 и TESLA-540.

Температурная зависимость электросопротивления облученных материалов исследовалась на образцах технической меди, а также на графитовых образцах с примесями меди и свинца.

Для проведения вычислительного эксперимента использовали метод молекулярной динамики. В качестве потенциала атомного взаимодействия в кристаллических решетках принимали потенциал Морзе

$$U(r) = J \left\{ \exp[-2\alpha(r-r_0)] - \frac{1}{2} \exp[-\alpha(r-r_0)] \right\} \quad (1)$$

где  $J$ ,  $\alpha$  – параметры энергии диссоциации пары атомов и степень ангармонизма потенциала соответственно;  $\Delta r$  – смещение атомов из положения равновесия,  $\Delta r = r - r_0$ .

Проведя разложение потенциала в ряд Тейлора, имеем

$$F = - \frac{dU(r)}{dr} = -K \Delta r + A \Delta r^2 - B \Delta r^3 + C \Delta r^4 - D \Delta r^5, \quad (2)$$

$$K = 2\alpha^2 J, \quad A = 3\alpha^3 J, \quad B = 2,3\alpha^4 J, \\ C = 1,25\alpha^5 J, \quad D = 1,1\alpha^6 J,$$

где  $K$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  – коэффициенты упругости, квадратичной и кубической нелинейностей, а также коэффициенты

нелинейностей четвертого и пятого порядка соответственно.

Коэффициенты  $K$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  определены с помощью параметров потенциала Морзе для  $\alpha$ -Fe [22]. При этом была разработана специальная модель для расчета смещения атомов кристаллической решетки под действием внешнего низкоэнергетического ионного облучения, базирующаяся на представлении трехмерных решеток как сети нелинейных атомных цепочек (рис. 1).

Для модели проводились расчеты в трехмерном и двухмерном представлениях с использованием уравнений классической динамики. Результаты расчетов контролировали выделением из трехмерной решетки одной цепочки атомов, которую возможно описать дифференциальными уравнениями [5].

Для цепочки атомных осцилляторов, состоящей из  $n$  элементов, составлена система дифференциальных уравнений второго порядка, которая решалась с помощью метода Рунге-Кутты, что позволило исследовать зависимость смещения каждого атома решетки от времени, прошедшего после прекращения внешнего воздействия. На основе вычислений строились графики для наблюдений процесса релаксации каждого атома после начального воздействия и для наблюдения соответствующей локализации атомов всей решетки, вытянутой в цепочку для заданного времени. Для внешнего воздействия задавался единичный ионный удар, а также хаотический ионный поток, имеющий ионы одного вида, но взаимодействующий с поверхностью под различными углами в случайные моменты времени и с различными энергиями, отнесенными к классу низкоэнергетических.

Размеры модельного кристалла можно варьировать в широких пределах по количеству атомов в отдельных цепочках ветвей кристалла (от  $1 \times 1 \times 1$  до  $1000 \times 1000 \times 1000$ ). Выбор больших объемов атомов кристалла приводит лишь к большим затратам расчетного времени.

Главная задача исследований – достигнуть возбуждения нелинейных колебаний в системе и проследить за процессом стабилизации решеток после прекращения внешнего облучения. Граничные условия, заложенные в программу, представлены в виде жестких и перио-

дических. Величина передаваемой энергии от налетающего иона атому кристалла определяется по классическим формулам [22]. Она должна быть достаточной, чтобы создать условия для возбуждения нелинейных колебаний в атомных цепочках.

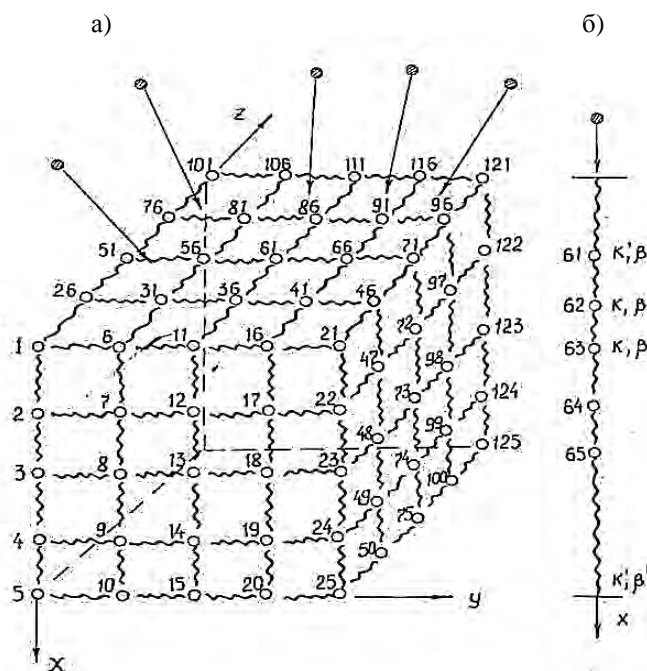


Рис. 1. Схема взаимодействия ионного пучка с кристаллической решеткой: а – трехмерное представление; б – одномерная нелинейная цепочка

Исследования по схеме проводили также с использованием потенциалов межатомного взаимодействия Борн-Майера, Тоде, Джонсона и Линдхарда. Показано, что коэффициенты  $K, A, B, C, D$  изменяются в зависимости от вида потенциала. Для нелинейной среды, что характерно для реального кристалла, многоямные потенциалы являются наиболее подходящими.

### **Исследование изменений физических и механических свойств материалов после воздействия плазмы тлеющего разряда**

Наиболее значимый результат электронно-микроскопического исследования тонкой структуры материалов

после воздействия плазмы тлеющего разряда состоит в том, что низкоэнергетическое облучение металлических образцов приводит к повышению плотности дислокаций на глубину, значительно превышающую проективный пробег ионов от поверхности облучения. Этот результат может быть представлен как дальнедействующий эффект [1–5].

Подобный эффект, но в значительно меньших масштабах – глубина модифицированного слоя не превышала 100 мкм – наблюдался в [15] при имплантации ионов Hf и Ar в  $\alpha$ -Fe. Энергия ионов при этом соответствовала интервалу 40...70 кэВ, что, по сути, является ионной имплантацией. Достаточно большая глубина модифицированного

слоя в работе связывается с напряжениями, полученными при ионной имплантации внедренных ионов.

Результаты сравнительных исследований представлены на рис. 2, где показано изменение средней скалярной плотности дислокаций в зависимости от расстояния от поверхности облучения при различных режимах. Зависимости 2 и 4 получены при напряжении  $U = 0,8$  кВ,

зависимость 3 – при напряжении 2 кВ. Зависимость 1 приведена для сравнения дальнего действующего эффекта, наблюдаемого Ю. Шаркеевым для  $\alpha$ -Fe, облученного ионами Hf с энергией 100 кэВ с эффектом при низкоэнергетическом воздействии плазмы тлеющего разряда. Очевидно, что эффект дальнего действия более значителен, если энергия ионов понижается почти на два порядка.

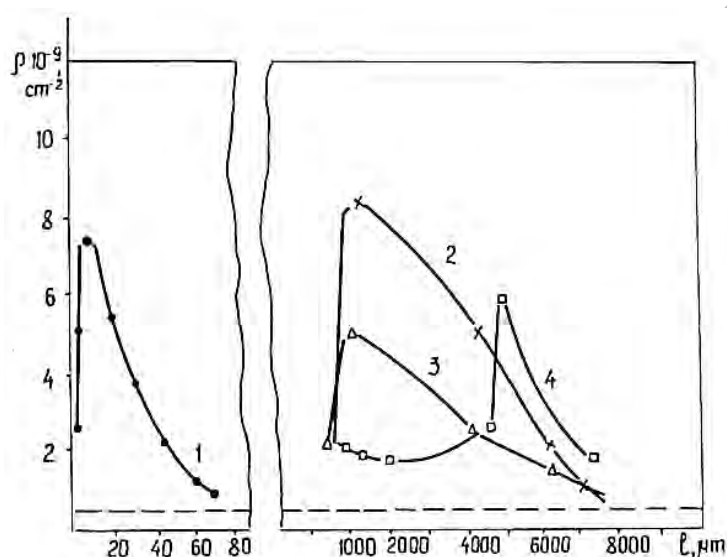


Рис. 2. Зависимость скалярной плотности дислокаций от расстояния до облученной поверхности: 1 –  $\alpha$ -Fe, имплантированное ионами гафния с энергией 100 кэВ; 2 –  $\alpha$ -Fe, энергия ионов 0,8 кэВ, время облучения 90 мин; 3 –  $\alpha$ -Fe, энергия ионов 2 кэВ, время облучения 90 мин; 4 –  $\alpha$ -Fe, энергия ионов 0,8 кэВ, время облучения 60 мин. Штриховая линия соответствует начальному состоянию

Эффект значительного повышения плотности дислокаций наблюдается только в хорошо отожженных образцах с небольшой исходной плотностью дислокаций ( $\alpha$ -Fe). На рис. 3 представлена дислокационная структура  $\alpha$ -Fe в исходном (необлученном) состоянии и после воздействия низкоэнергетической плазмы тлеющего разряда. Установлено, что после воздействия плазмы тлеющего разряда плотность дислокаций существенно возрастает даже на глубине 8,19 мм от поверхности облучения, а структура соответствует состоянию глубоко деформированного материала [10].

В материалах с исходной повышенной плотностью дислокаций (неотожженная медь и быстрорежущая сталь Р6М5 и др.) наиболее значимыми будут происходящие перестройки имеющейся дислокационной структуры, заключающиеся в интенсивном образовании дислокационных фрагментов или измельчении фрагментов с соответствующим увеличением их взаимных ориентаций. Причем эти перестройки происходят на большой глубине от поверхности облучения. Обращает на себя внимание наличие существенных перестроек в карбидных фазах, в частности, их измельчение после плазменного воздействия (сталь Р6М5 и сплав Т15К6).

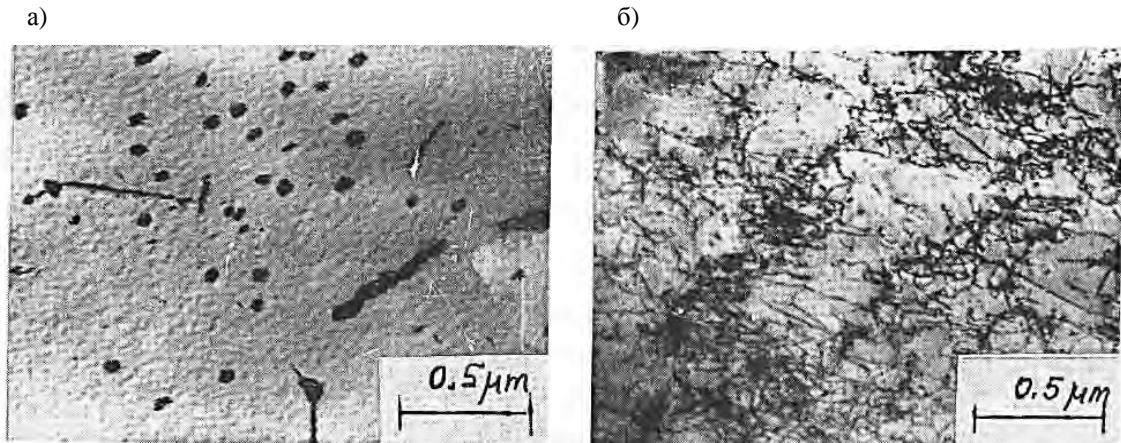


Рис. 3. Дислокационная структура  $\alpha$ -Fe: а – необлученное состояние; б – после облучения в плазме тлеющего разряда при напряжении 1 кВ на расстоянии 8,19 мм от поверхности облучения

На рис. 4 представлена зависимость микротвердости быстрорежущей стали Р6М5 от времени, прошедшего после прекращения облучения. На оси ординат отложены относительное изменение микротвердости  $(H_{\mu} - H_{\mu 0}) / H_{\mu 0}$ , где  $H_{\mu}$  – микротвердость образцов после облучения,  $H_{\mu 0}$  – исходная микротвердость необлученных образцов. Облучение проводилось при напряжении  $U = 2,5$  кВ, и время обработки составляло 90 мин. Зависимость 1 соответствует измерениям, проведенным на облучен-

ной поверхности, зависимость 2 представляет результаты измерений на обратной стороне образцов, не подвергавшейся непосредственно воздействию низкоэнергетической плазмы тлеющего разряда в процессе облучения. Высота образцов составляла 10 мм, и обратная сторона плотно прилегала к поверхности катода. Следует отметить, что величина микротвердости на обратной стороне образцов мало отличается от величины на облученной поверхности.

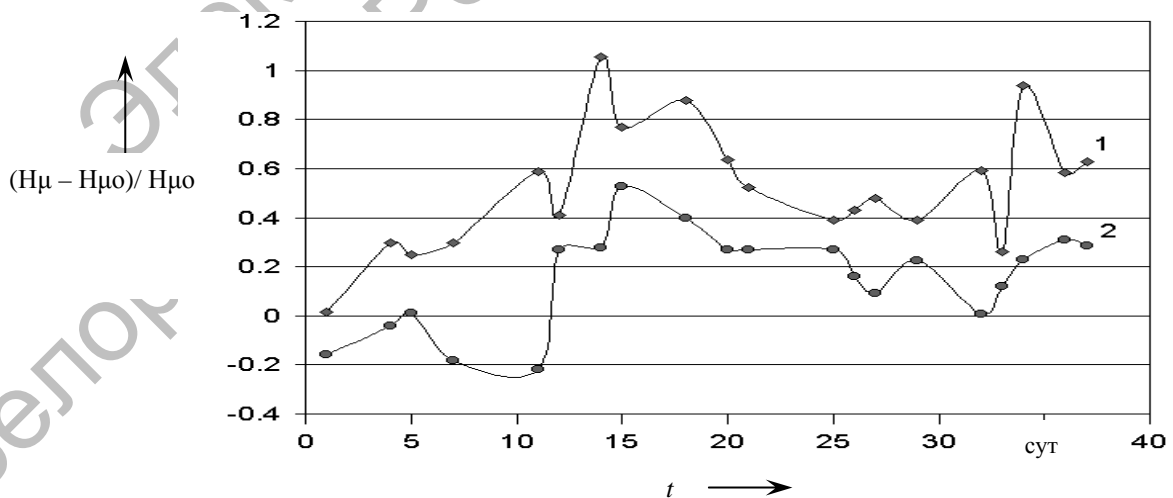


Рис. 4. Зависимость относительного изменения микротвердости образцов из быстрорежущей стали Р6М5 от времени, прошедшего после прекращения облучения: 1 – облученная поверхность образца; 2 – обратная сторона образца

Можно выделить следующие особенности: в течение длительного времени (до 1,5 месяцев) после прекращения облучения наблюдаются очень сильные осцилляции значений микротвердости во времени, которые превосходят во много раз погрешность измерения. Эти осцилляции ярко выражены как для облученной, так и обратной стороны образцов (имеется ярко выраженная тенденция к возрастанию микротвердости образцов с увеличением времени, прошедшего после их облучения плазмой тлеющего разряда). Приблизительно через месяц наблюдается возрастание микротвердости на 80...90 % относительно исходного уровня необлученных образцов. Этот факт свидетельствует о

долгоживущем сильно неравновесном состоянии образцов после низкоэнергетического облучения. Осцилляции значений микротвердости получены также при облучении твердых сплавов Т15К6 и электролитического никеля.

На рис. 5 представлена зависимость микротвердости образцов янтаря от времени, прошедшего после облучения плазмой тлеющего разряда.

Из рис. 5 видно, что после низкоэнергетического облучения наблюдается уменьшение микротвердости янтаря (волнистая линия на графике) по сравнению с величиной микротвердости в необлученном состоянии (сплошная линия).

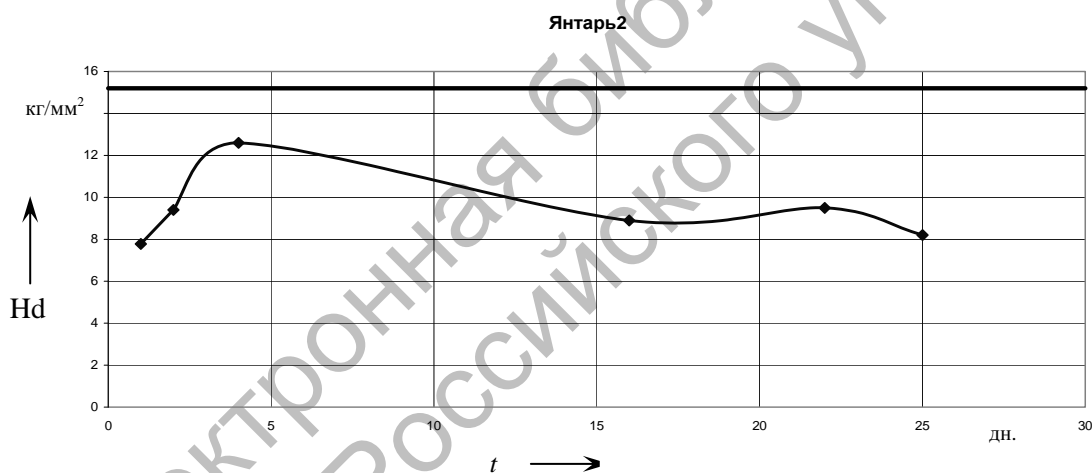


Рис. 5. Зависимость изменения микротвердости янтаря от времени, прошедшего после прекращения облучения: 1 — необлученный янтарь; 2 — после облучения

Результаты представленных исследований позволяют применять рассматриваемые технологии для повышения пластичности образцов с целью улучшения их обрабатываемости.

На рис. 6 представлена зависимость относительного изменения микротвердости электролитического никеля от времени, прошедшего после прекращения облучения. Показано, что выявленные осцилляции могут приводить

как к упрочнению материалов, так и к их разупрочнению в зависимости от режима облучения. Сильное влияние на величину микротвердости оказывает степень исходной фазовой неоднородности облучаемых образцов. Повышение фазовой неоднородности приводит, как правило, преимущественно к упрочнению образцов во всем исследуемом интервале времени.

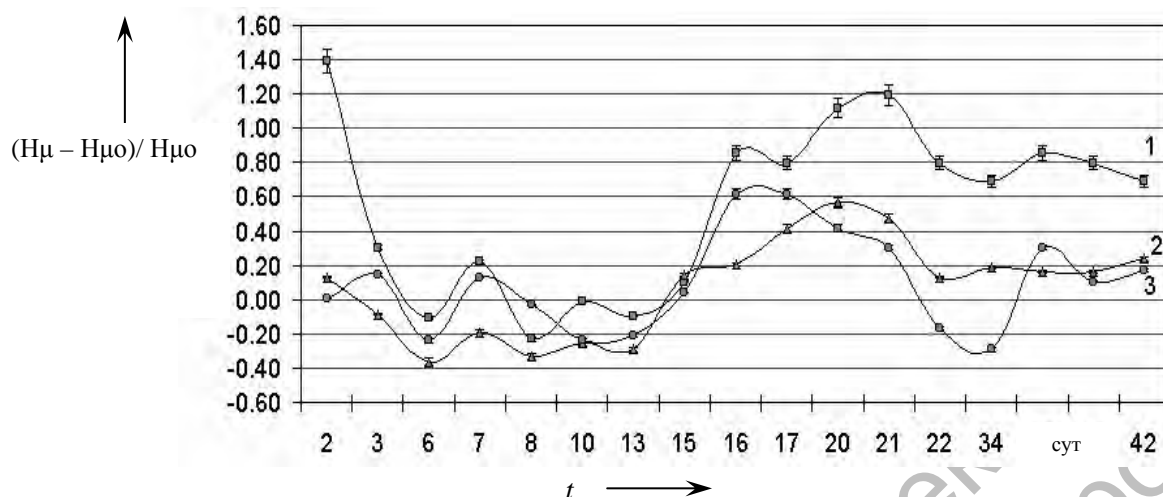


Рис. 6. Зависимость относительного изменения микротвердости электролитического никеля от времени, прошедшего после прекращения облучения, при различных режимах облучения: 1 –  $U = 2,5$  кВ, время обработки  $t = 90$  мин; 2 –  $U = 2,5$  кВ, время обработки  $t = 45$  мин; 3 –  $U = 1$  кВ, время обработки  $t = 45$  мин

Совместно с предприятиями Германии выполнены измерения изменений микротвердости нержавеющей стали после обработки их низкоэнергетической плазмой тлеющего разряда. Все измерения проводились непосредственно на одном из предприятий Германии. Подтверждены общие закономерности кинетики изменения микротвердости, установленные на быстрорежущих сталях и твердосплавных режущих элементах. Следует обратить внимание на изменение микротвердости образцов, предварительно обработанных по методу колстеризации (разработанному профессором Колстером, Нидерланды). Показано, что на колстеризованных образцах после облучения плазмой тлеющего разряда можно повысить или понизить имеющуюся начальную микротвердость в зависимости от режима облучения.

Осцилляции электрического сопротивления с течением времени после прекращения облучения наблюдались авторами при измерении образцов из технической меди (рис. 7). Следует отметить, что в целом электросопротивление образцов после облучения понижается, что противоречит факту повыше-

ния плотности дислокаций и, следовательно, свидетельствует о включении дополнительных способов переноса тока в облученных образцах. Представленные результаты не могут быть объяснены исходя из традиционных представлений физики радиационных дефектов. В работе с помощью программы TRIM-92 рассчитаны пробеги ионов кислорода, азота и водорода, а также энергетические потери ионов при электронном и ядерном торможении как в однокомпонентном материале  $\alpha$ -Fe, так и в многокомпонентных мишенях из твердого сплава T15K6. Показано, что ионная имплантация не может привести к дальнедействующей модификации материалов твердых тел.

Для объяснения данного явления необходимо принять во внимание нелинейные эффекты нарушения трансляционной симметрии кристаллических решеток во время бомбардировки поверхности твердых тел заряженными частицами. Предлагается гипотеза, базирующаяся на идее возбуждения нелинейных колебаний в кристаллических решетках, которые приводят к действию самоорганизационных процессов в ионной подсистеме облученных металлов и, как следствие, к



образованию новых структурных коллективных состояний атомов кристаллических решеток на мезоуровне.

ских решеток на мезоуровне.

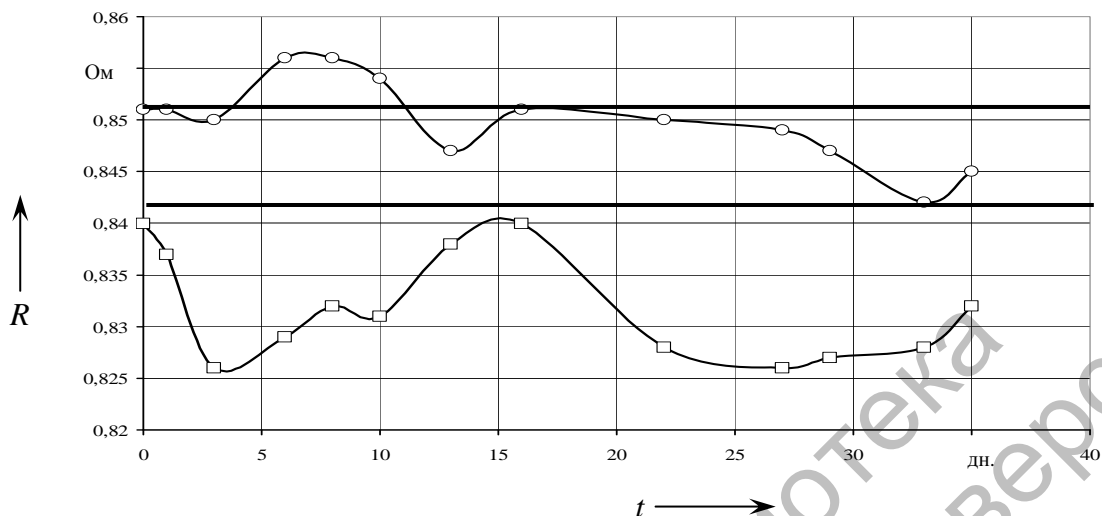


Рис. 7. Зависимость электросопротивления технической меди от времени, прошедшего после прекращения облучения,  $U = 2,5$  кВ: 1 – облученный образец; 2 – необлученный образец (1, 2 – измерения при  $20$  °C); 3 – облученный образец; 4 – необлученный образец (3, 4 – измерения при  $90$  °C)

Проведено компьютерное моделирование процесса релаксации в трехмерных и одномерных кристаллических решетках после внешнего низкоэнергетического воздействия, представленного в виде беспорядочного ионного потока, а также единичного ионного удара. При этом исследовалась динамическая реакция системы атомов твердого тела как сложной нелинейной системы на внешнее низкоэнергетическое воздействие.

Показано, что к моменту времени, когда нелинейные колебания прекращаются, атомы кристаллической решетки мишеней стабилизируются в новых позициях. Время стабилизации на несколько порядков выше, чем время обычных атомных релаксаций. В результате формируются новые долгоживущие метастабильные структурные состояния кристаллической решетки. Формируется целый спектр новых коллективных состояний атомов в решетках после затухания нелинейных колебаний. Конкретный вид этих новых гетерогенных структур зависит от потенциала, характеризующего связи между

атомными осцилляторами, и величины внешнего возбуждения. В зависимости от типа потенциала или типа облучаемого вещества меняются коэффициенты нелинейностей и, следовательно, дополнительные состояния в многоямных потенциалах, характеризующих межатомные связи. В частности, для потенциала Морзе с параметрами нелинейности, рассчитанными для  $\alpha$ -Fe, показано, что после внешнего низкоэнергетического воздействия в нелинейных решетках образуются солитоны, движущиеся вдоль определенных атомных цепочек. На рис. 8 представлены результаты вычислительного эксперимента, описывающие зависимость случайно выбранного атома кристаллической решетки (см. рис. 1, атом б3) от времени, прошедшего после прекращения облучения в плазме тлеющего разряда. Следует отметить, что незатухающие пульсации при движении солитона передаются на достаточно большую глубину от облученной поверхности. В реальном кристалле аналогом солитонов являются дислокации. Следовательно, в рамках

нелинейной теории находит объяснение экспериментально выявленный факт повышения плотности дислокаций на достаточно больших расстояниях от поверхности облучения.

Смещение атомов в конечном состоянии есть результат нелинейных коллективных колебаний всех атомов решетки после низкоэнергетического воздействия. Таким образом, путем слабого внешнего воздействия можно вызвать внутренние процессы усложнения

систем с образованием новых долгоживущих структурных состояний. При этом в течение достаточно длительного времени решетка представляет собой активную зону.

Результаты вычислительного эксперимента для большого количества атомов показывают, что конечное состояние кристаллической решетки, облученной плазмой тлеющего разряда, есть высокофрагментированная структура.

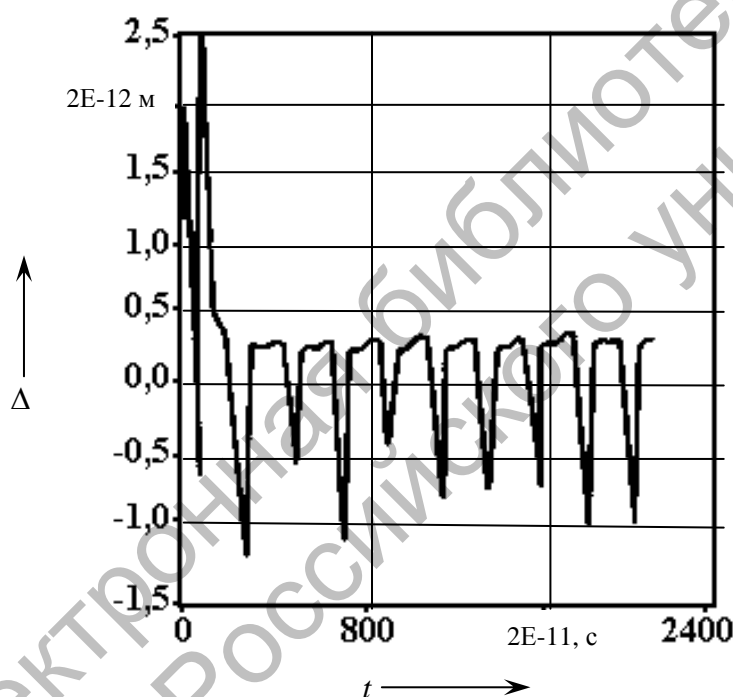


Рис. 8. Зависимость смещения атома, находящегося внутри облученной кристаллической решетки, от времени, прошедшего после прекращения облучения. Незатухающие пульсации представляют собой бегущий солитон

В цепочке возбуждаются нелинейные колебания; в результате все атомы стабилизируются в новых положениях, которые можно интерпретировать как образование новых долгоживущих метастабильных групп нанокластеров.

Выражаем благодарность за проведение исследований по электронной микроскопии сотрудникам ТГСА г. Томск проф. Э. В. Козлову и доц. Н. А. Поповой.

### Выводы

1. Обработка металлов и сплавов низкоэнергетической плазмой тлеющего разряда приводит к повышению дислокационной плотности на глубину, значительно превышающую проективный пробег ионов от поверхности мишени. Это явление определено как эффект дальнего действия.

2. Под действием потока низкоэнергетических ионов изменяются физико-механические свойства облученных материалов, и эти изменения не могут быть объяснены в рамках классической физики радиационных дефектов твердого тела.

3. Низкоэнергетическое ионное облучение кристаллических решеток плазмой тлеющего разряда приводит к нелинейным колебаниям атомных ос-

цилляторов, и в результате образуются новые метастабильные долгоживущие структуры решеток, включая наноразмерные кластеры.

4. Низкоэнергетическое облучение в плазме тлеющего разряда может быть использовано для создания новых технологий целенаправленного управления поведением материалов и элементов конструкций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tereshko, I. V.** Self Organizing processes in metals by Low-energy ion beams / I. V. Tereshko, V. I. Khodyrev, E. A. Lipsky // Nucl. Instr. And Meth. In Physics Research NIMB. – 1993. – В 80/81. – Р. 115–117.
2. The formation of nanoclusters in metals by the low-energy ion irradiation / I. V. Tereshko [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2007. – V. 201. – Р. 8552–8556.
3. Nanostructural evolution of steel and titanium alloys exposed to glow discharge / I. V. Tereshko [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2007. – V. 261. – Р. 678–681.
4. Cell adhesion study of the titanium alloys exposed to glow discharge / V. Abidzina [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2007. – V. 261. – Р. 624–626.
5. **Терешко, И. В.** Эффект дальнего действия в материалах при низкоэнергетическом ионном облучении / И. В. Терешко // Вестн. Нижегородского ун-та. Сер. Физика Твердого Тела. – 1998. – Вып. 2. – С. 131–139.
6. **Хакен, Г.** Синергетика / Г. Хакен. – М. : Мир, 1980. – 404 с.
7. **Николис, Г.** Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. – М. : Мир, 1977. – 512 с.
8. Формирование дефектной структуры при воздействии на металлы плазмы газового разряда / Э. В. Козлов [и др.] // Изв. вуз. Сер. Физика. – 1992. – № 1. – С. 14–19.
9. **Козлов, Э. В.** Изменения, вызванные низкоэнергетической плазмой в поверхностных слоях и объемные свойства металлов и сплавов / Э. В. Козлов, И. В. Терешко, Н. А. Попова // Изв. вуз. Сер. Физика. – 1994. – № 5. – С. 127–140.
10. Active Modification and Amorphisation of Materials by Low-Energy Ion Irradiation / I. V. Tereshko [et al.] // In : Application of Particle and Laser Beams in Materials Technology, Edit by Misaelides, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. – 1995. – Р. 595–602.
11. Materials modification by low-energy ion irradiation / I. V. Tereshko [et al.] // NIMB. – 1997. – V. 127/128. – Р. 861–864.
12. Модификация материалов после низкоэнергетического ионного облучения в плазме тлеющего разряда / И. В. Терешко [и др.] // Быстрозакаленные материалы и покрытия : сб. тр. IV Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф., Москва. – 2005. – С. 210–215.
13. **Морозов, Н. П.** Глубокое проникновение радиационных дефектов из ионно-имплантированного слоя в объем полупроводников / Н. П. Морозов, Д. И. Тетельбаум // Физика и техника полупроводников. – 1983. – Т. 17. – Вып. 3/31. – С. 95–102.
14. **Гольцев, В. П.** Радиационное нарушение структуры переходных металлов при ионном облучении / В. П. Гольцев, В. М. Анищик, В. В. Углов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1983. – Вып. 1. – С. 52–53.
15. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах / А. Н. Диденко [и др.]. – Томск : РАНБ, 2004. – 326 с.
16. **Овчинников, В. В.** Мессбауровские методы анализа атомной и магнитной структуры сплавов / В. В. Овчинников. – М. : Физматлит, 2002. – 256 с.
17. **Быков, В. Н.** Эффекты дальнего действия при ионном облучении / В. Н. Быков, В. Г. Малышкин, В. С. Хмелевская // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1989. – Вып. 3. – С. 45–52.

18. **Логвин, В. А.** Рациональное использование ресурса режущих инструментов – резерв повышения производительности / В. А. Логвин, Ж. А. Мрочек // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 12–13 апр. 2011 г. – Минск : Бизнесофсет, 2011. – С. 117–119.

19. Режущее-формообразующий инструмент : пат. 7535 Респ. Беларусь, МПК В 26 D 1 / 00, С 21 D 1 / 78 / В. А. Логвин, Ж. А. Мрочек, Е. В. Логвина, В. М. Никитин, С. В. Никитин ; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № и 20110009 ; заявл. 10.01.11 ; опубл. 30.08.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 4. – С. 180.

20. Способ упрочнения изделий : пат. 15569 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 14 / 8, С 23С 8 / 00 / В. А. Логвин, А. А. Жолобов, Е. В. Логвина ; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20100453 ; заявл. 22.03.10 ; опубл. 30.10.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5. – С. 27.

21. Фазовый состав и тонкая структура стали Р6М5 / Ю. П. Хараев [и др.] // Ползуновский альманах. – 2004. – № 4. – С.47–51.

22. **Eckstein, W.** Computer Simulation of Ion-Solids Interaction / W. Eckstein. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. – 1991. – 320 p.

*Статья сдана в редакцию 15 октября 2012 года*

**Ирина Васильевна Терешко**, канд. физ.-мат. наук, Белорусско-Российский университет.

**Владимир Александрович Логвин**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0295-41-77-00.

**Всеволод Петрович Редько**, д-р физ.-мат. наук, проф. Белорусско-Российский университет.

**Irina Vasilyevna Tereshko**, PhD (Physics and Mathematics), Belarusian-Russian University.

**Vladimir Aleksandrovich Logvin**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0295-41-77-00.

**Vsevolod Petrovich Redko**, DSc (Physics and Mathematics), Prof., Belarusian-Russian University.