

САМООРГАНИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАТЕРИАЛАХ ПОСЛЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

И. В. Терешко, В. И. Ходырев, В. В. Глущенко, Ж. В. Рымкевич,
А. М. Терешко, А. А. Руссиян

*Могилевский Государственный Технический Университет,
212005, ул. Ленина 70, Могилев, Беларусь,
E-mail: tereshko@phys.belpak.mogilev.by*

Низкоэнергетическое ионное облучение ведет к очень существенной модификации материалов. В частности, дислокационная плотность металлов и сплавов повышается вплоть до глубины 10 мм от поверхности облучения. Это описано как “эффект дальнего действия”. Низкоэнергетическое ионное облучение приводит к нелинейным колебаниям атомов в кристаллических решетках, в результате которых формируются новые неравновесные долгоживущие структуры. Эти структуры определяют новые механические и физические свойства материалов.

1. Введение

Исследование процессов воздействия потоков различных энергий на поверхность материалов и сплавов является перспективным как в научном, так и в прикладном плане. Еще до недавнего времени считалось, что эффективная модификация материалов возможна только при высокой энергии бомбардирующих частиц и чем больше эта энергия, тем больше глубина модифицированного слоя. Однако нами было показано, что низкоэнергетическая бомбардировка ионами остаточного вакуума в плазме тлеющего разряда образцов различных металлов и сплавов приводит к повышению дислокационной плотности вплоть до глубины 10 мм от облученной поверхности [1-4]. Это значительное превышение глубины модифицированного слоя, считая от поверхности облучения, над величиной проецированных пробега ионов в облученных материалах описано как “дальнедействующий эффект” [4]. Фактически, это почти объемная модификация. Подобный эффект, но в значительно меньших масштабах (глубина модифицированного слоя не превышала 100 мкм), наблюдался в [5] при имплантации ионов Hf и Ag в α -Fe. Энергия ионов при этом соответствовала интервалу 40-70 кэВ, что уже приводит к ионной имплантации. Дальнедействующие изменения микротвердости в пленках из меди и пермаллоя при ионном и электронном облучении с низкими дозами исследовались также в работе [6]. Сверхглубокое проникновение азота и существенное изменение микроструктуры инструментальных сталей на больших глубинах при сравнительно небольших энергиях ионов в процессе плазменно-иммерсионной ионной имплантации наблюдалось в работе [7].

Для объяснения такой модификации материалов авторы [8] предлагают гипотезу, базирующуюся на идее возбуждения нелинейных колебаний в кристаллических решетках, которые приводят к действию самоорганизационных процессов в ионной подсистеме облученных металлов.

Основная задача данной работы – исследование основных самоорганизационных процессов в металлах и сплавах после низкоэнергетического ионного воздействия в

плазме тлеющего разряда с целью прогнозирования и модификации их структурного состояния, а также их физических и механических свойств.

2. Образцы и методика исследования

В качестве объекта исследования были выбраны следующие материалы: армко-железо, быстрорежущая сталь Р6М5, техническая медь и металлокерамические твердые сплавы Т15К6. Все образцы помещались в специально сконструированный плазмогенератор и облучены в плазме тлеющего разряда при напряжении в разрядной камере $U = 2,5$ кВ и $U = 1$ кВ в среде остаточного вакуума. Энергия ионов (азота, кислорода, водорода и т.д.) не превышает, соответственно, 1–2,5 кэВ. Доза облучения $2 \cdot 10^{17}$ ион/см². Время обработки образцов составляло от 15 до 90 мин. Температура образцов во время облучения не превышала 343 К. Исследовалась зависимость микротвердости сплавов от времени, прошедшего после прекращения облучения (измерения проводились по суткам в течение двух месяцев). Аналогично измерялась температурная зависимость электросопротивления облученных образцов.

Вычислительный эксперимент был проведен с использованием метода молекулярной динамики. В качестве потенциала атомного взаимодействия в кристаллических решетках мы выбрали потенциал Морзе:

$$U(r) = J \{ \exp[-2\alpha(r-r_0)] - 2 \exp[-\alpha(r-r_0)] \},$$

где J , α – соответственно параметры энергии диссоциации пары атомов и степень асгармонизма потенциала, $\Delta r = (r - r_0)$ – смещение атомов из положения равновесия. Разлагая потенциал в ряд Тейлора, имеем:

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

$$K = 2\alpha^2 J, A = 3\alpha^3 J, B = 2.3\alpha^4 J, C = 1.25\alpha^5 J, D = 1.1\alpha^6 J,$$

где K , A , B , C , D – коэффициенты упругости, квадратичной, кубической нелинейности и нелинейностей четвертого и пятого порядка, соответственно. Они вычислялись с использованием параметров потенциала Морзе [9] для конкретного материала. Потери энергии ионов в твердых телах на единицу длины пробега и проецированные пробеги были вычислены, используя программу TRIM-92.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена зависимость проецированных пробегов ионов водорода, азота, кислорода в сплаве Р6М5 от энергии ионов, полученная с использованием программы TRIM-92.

Энергия ионов варьировалась от 1 до 100 кэВ с интервалом 10 кэВ и от 1 до 10 кэВ с интервалом 1 кэВ. Разность между величинами пробега ионов водорода и азота (или кислорода) возрастает с увеличением энергии ионов. При достаточно малых энергиях (ниже 5 кэВ) эта разница не является очень существенной. Отметим, что проецированные пробеги в исследуемом нами интервале энергий (1–5 кэВ) очень малы. Они не превышают 0,004 микрометра для азота и кислорода и 0.02 микрометра для ионов водорода. Следовательно, ионная имплантация таких низкоэнергетических ионов не может привести к мощной дальнедействующей модификации материалов. Расчеты показывают, что величины проецированных пробегов ионов в армко-железе и инструмен-

тальном сплаве Т15К6 мало отличается от приведенных выше, особенно в области малых энергий.

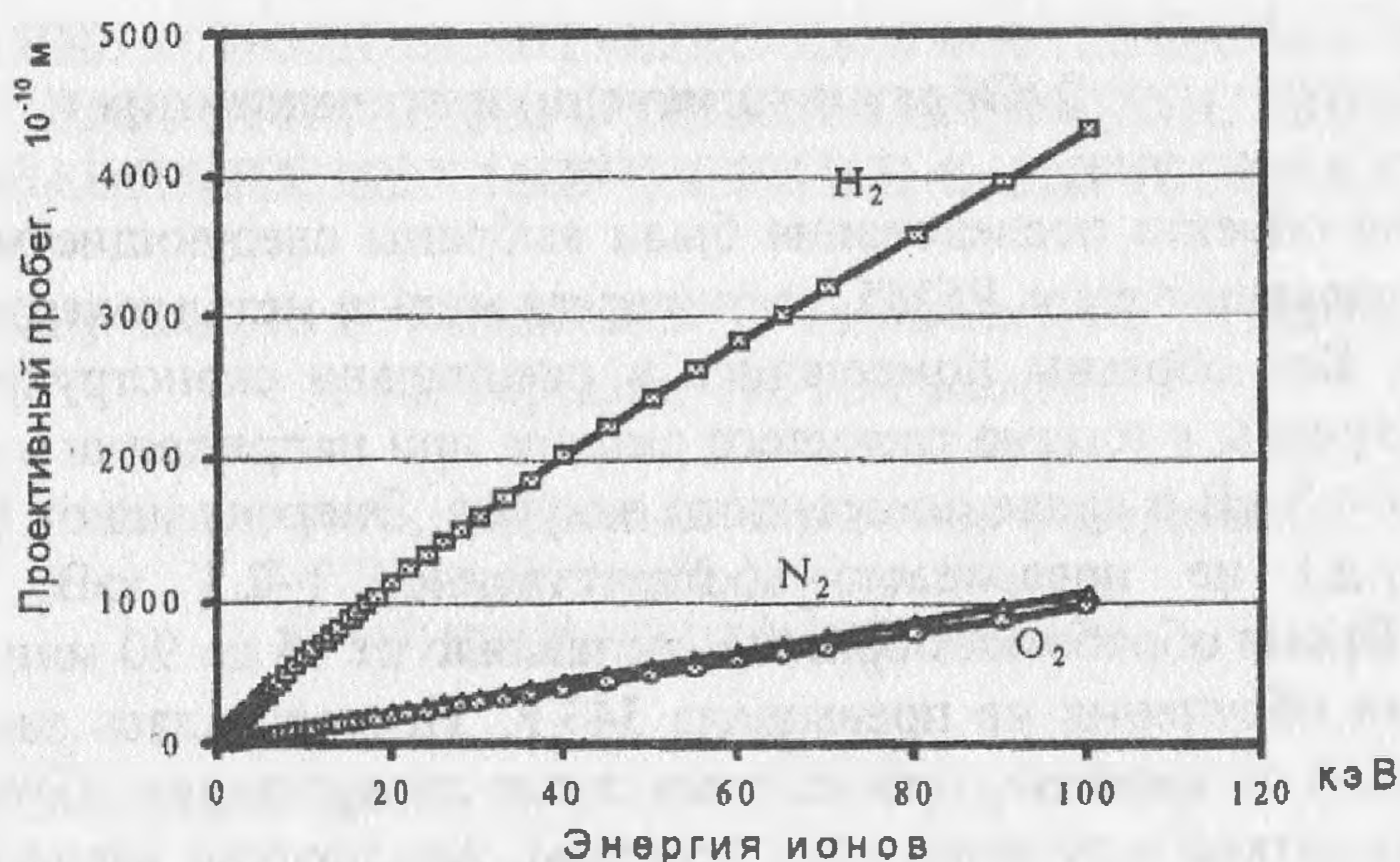


Рис. 1 Зависимость проецированных пробегов ионов H_2 , N_2 , O_2 в сплаве Р6М5 от энергии ионов

Изменение средней скалярной плотности дислокаций с расстоянием от поверхности облучения после различных режимов облучения для армко-железа представлено в работе [3]. В этой работе подчеркнуто, что дальноедействующая модификация имеет место при значительно больших расстояниях, чем проецированные пробеги ионов и при понижении энергии ионов эффект дальногодействия усиливается.

Рис. 2 представляет 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_{μ} — микротвердость образцов после облучения, $H_{\mu 0}$ — исходная микротвердость необлученных образцов.

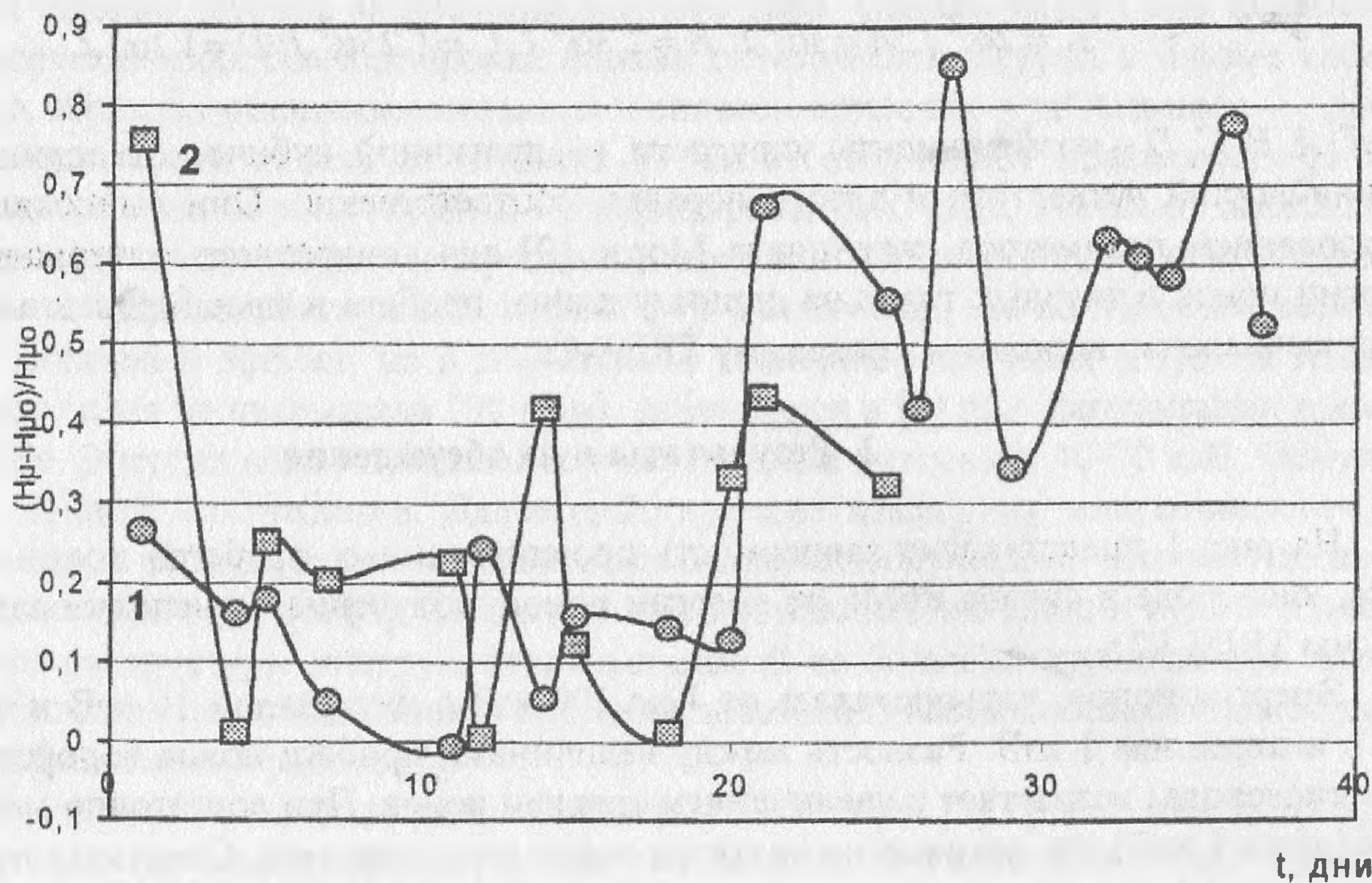


Рис. 2 Зависимость относительного изменения микротвердости сплава Р6М5 от времени, прошедшем после облучения: 1 - измерение на облученной стороне, 2 - обратная сторона образца

Кривая 1 соответствует измерениям, проведенным на облученной поверхности, кривая 2 представляет результаты измерений на обратной стороне образцов, не подвергнутой непосредственно воздействию низкоэнергетическими ионами в процессе облучения. Следует заметить, что высота образцов была равна 1 см и обратная сторона образцов очень плотно прилегала к поверхности катода, что практически полностью исключает обработку обратной стороны образцов плазмой тлеющего разряда. Следует заметить, что сильные осцилляции значений микротвердости со временем, прошедшем после прекращения облучения, ярко выражены как для облученной, так и обратной стороны образцов, что свидетельствуют о сильно неравновесном долгоживущем состоянии облученных образцов. Аналогичные результаты получены нами для твердого сплава Т15К6. Имеется ярко выраженная тенденция к общему возрастанию микротвердости образцов с увеличением времени, прошедшего после их облучения в плазме тлеющего разряда, а также наблюдается временное разупрочнение образцов, где микротвердость становится ниже исходного уровня. Подобные кривые позволяют прогнозировать механическое поведение материалов после облучения в течение достаточного большого времени.

Такие же сильные осцилляции с течением длительного времени после прекращения облучения наблюдаются нами при измерении электрического сопротивления образцов из технической меди (рис. 3).

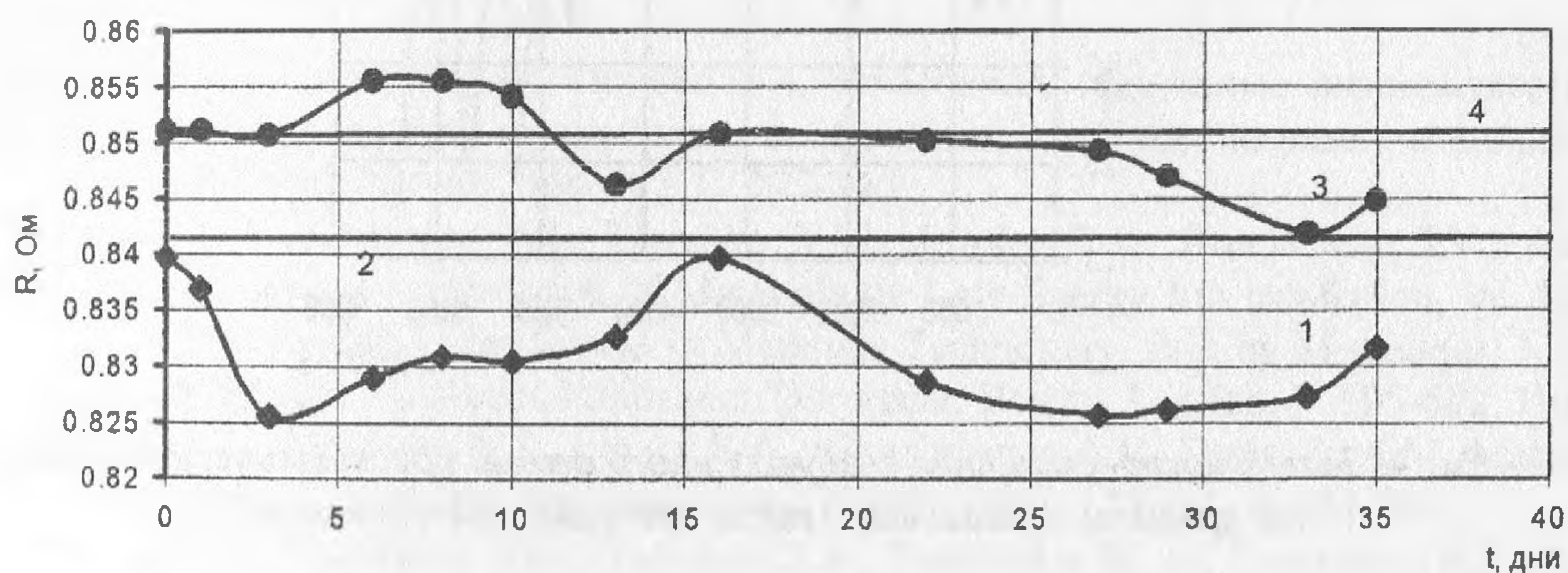


Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления технической меди от времени, прошедшего после прекращения облучения, $U=2,5$ кВ:

- 1 – облученный образец; 2 – необлученный образец (1, 2 – измерения при 20°C);
3 – облученный образец; 4 – необлученный образец (3, 4 – измерения при 90°C).

В данной работе проведено компьютерное моделирование процесса релаксации в трехмерных кристаллических решетках после внешнего низкоэнергетического воздействия, представленного в виде беспорядочного "ионного дождя", а также единичного ионного удара. Атомы на поверхности мишени получают случайные по величине и направлению импульсы от бомбардирующей поверхность ионов одного сорта, но падающих на поверхность под различными углами и с различной энергией. Энергия, переданная атомам мишени, меньше пороговой (необходимой для образования точечных дефектов), но она достаточна для возбуждения нелинейных колебаний в ионной подсистеме решетки. Исследовалась динамическая реакция системы атомов твердого тела, как сложной нелинейной системы, на внешнее низкоэнергетическое воздействие. Основная задача при этом – показать, как путем слабого воздействия вызвать внутренние процессы усложнения систем с образованием новых устойчивых структур, т.е. развить процессы самоорганизации системы.

Мы показали, что время стабилизации в системе нелинейно связанных атомных осцилляторов на два – три порядка выше, чем время обычных атомных релаксаций. В результате формируются новые долгоживущие структурные состояния кристаллической решетки. В частности, образуются атомные кластеры с нерегулярным расположением атомов, бегущие и пульсирующие солитоны (в реальном кристалле аналогом солитонов являются дислокации), фрагментированные структуры с нанометрической размерностью и т.д.

Рис.4 иллюстрирует зависимость смещения атома, исходно получившего ничтожно малое смещение, от времени, прошедшего после прекращения внешнего низкоэнергетического воздействия. Достаточно большое смещение его в конечном состоянии есть результат нелинейных коллективных колебаний всех атомов решетки после низкоэнергетического воздействия. Очень важно, что процесс нелинейных колебаний захватывает весь объем облученных кристаллов, фактически мы наблюдаем объемную модификацию облученных образцов.

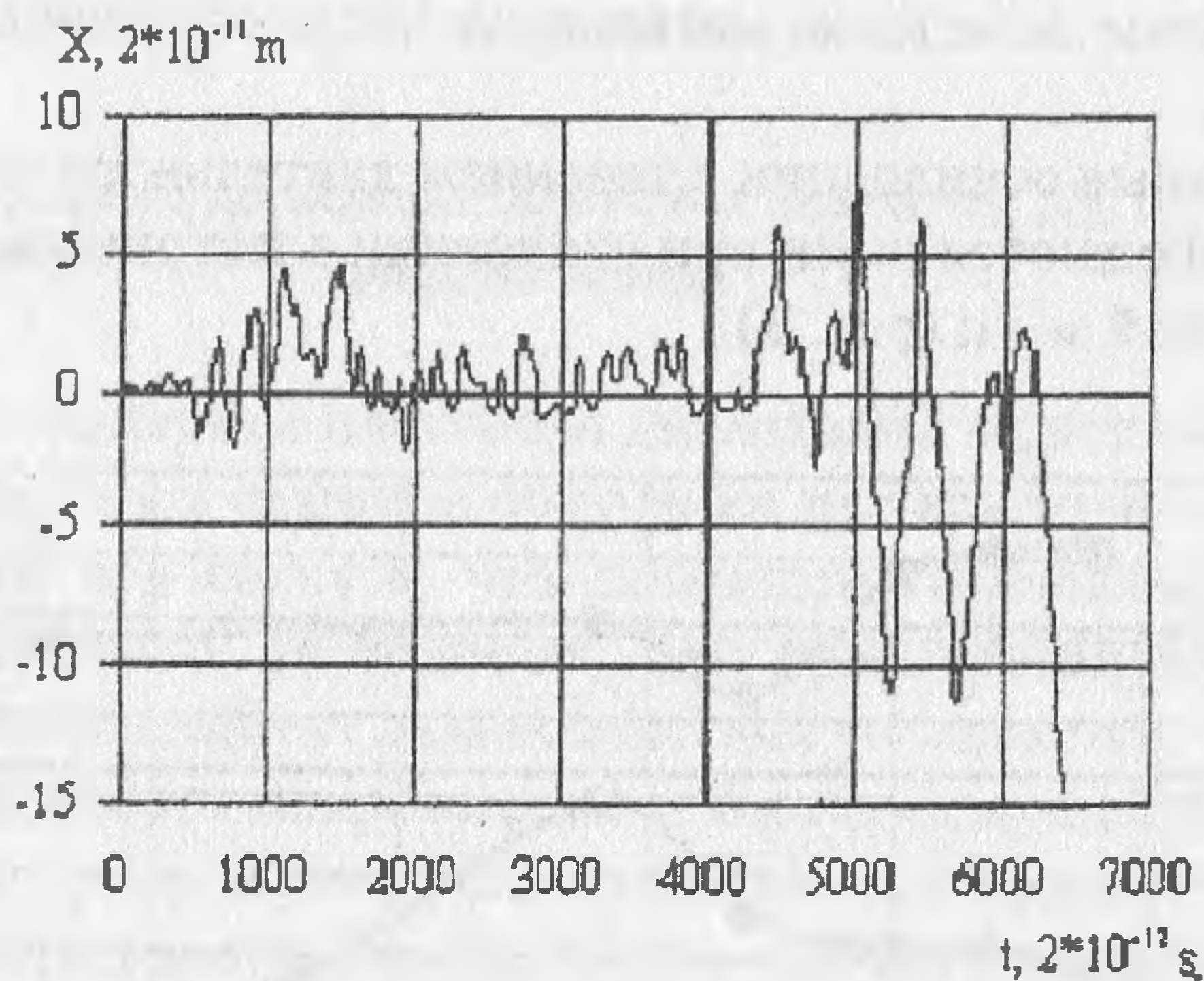


Рис.4. Зависимость смещения возбужденного атома кристаллической решетки от времени, прошедшего после прекращения облучения.

Так рис. 5 показывает, что к моменту времени, когда нелинейные колебания прекращаются, практически все атомы стабилизируются в новых позициях.

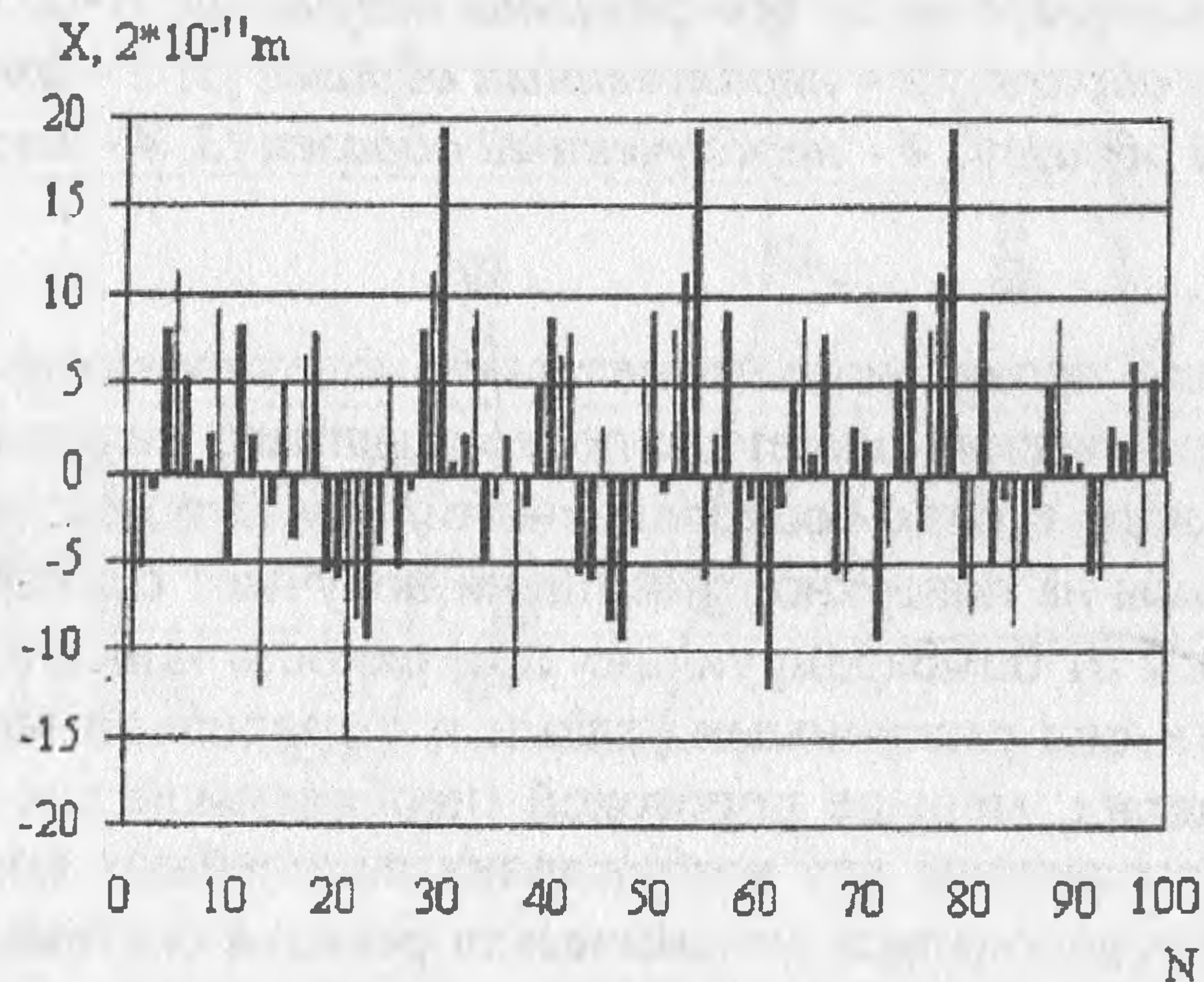


Рис. 5. Смещение группы атомов кристаллической решетки в состоянии стабилизации после прекращения нелинейных колебаний.

Однако в течение достаточно большого времени решетка представляет собой "дышащий кристалл", или "активную зону".

Выводы

1. Облучение металлов и сплавов низкоэнергетическими ионами в плазме тлеющего разряда приводит к сильному изменению дислокационной плотности на большой глубине от облученной поверхности (до 10 мм). Это, фактически, объемная модификация.

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

3. Низкоэнергетическое облучение приводит к возбуждению нелинейных колебаний атомных осцилляторов и развитию самоорганизационных процессов в ионной подсистеме облученных металлов.

4. Полученные результаты дают возможность прогнозировать механическое и физическое поведение облученных материалов.

Список литературы

1. Козлов Э.В., Терешко И.В., Попова Н.А. Изменения, вызванные низкоэнергетической плазмой в поверхностных слоях и объемные свойства металлов и сплавов // Известия ВУЗов, физика. 1994. N5, С. 127-140.
2. Tereshko I.V., Khodyrev V.I., Tereshko V.M., Lipsky E.A., Romanenko I.V., Active Modification and Amorphisation of Materials by Low-Energy Ion Irradiation, In: Application of Particle and Laser Beams in Materials Technology, Edit by Misaelides, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, P. 595-602, 1995
3. Tereshko I.V., Khodyrev V.I., Lipsky E.A., Goncharenya A.V, Tereshko A.M. Materials modification by low-energy ion irradiation // NIMB, 1997, 127/128, P. 861-864.
4. Терешко И.В., Ходырев В.И., Липский Э.А., Рымкевич Ж.А., Глущенко В.В., Кончаленко В.Н., Виноградов Д.Л. Эффект дальнего действия в материалах при низкоэнергетическом ионном облучении // Вестник Нижегородского университета, серия Физика Твердого Тела, Вып. 2, 1998, С. 131-139.
5. Didenko A.N., Kozlov E.V., Sharkeev Yu.P., Tailashev A.S., Ryabthikov A.I., Pranyavichus L. and Augulis L. Observation of deep dislocation structures and "long-range effect" in ion-implanted α -Fe // Surf. and Coat. 1993. Vol.56, P.97-104
6. Тетельбаум Д.И., Сорвина В.П., Курильчик Е.В., Щербакова И.А., Семин Ю.А., Сидорова А.И. О механизме дальнего действия при облучении твердых тел // Известия РАН. 1996. N 4. С 234-236
7. Tetelbaum D.I., Kurulthik E.V, Latisheva N.D. Long-range effect at low-dose ion and electron irradiation of metals // Proc. of the Tenth Intern. Conf. on IBMM, editors. J.C. Barbour and M. Nastasi, Albuquerque, NM, USA, 1996. P. 153-156.
8. Tereshko I.V., Khodyrev V.I., Lipsky E.A. and others, Self Organizing processes in metals by Low-energy ion beams // Nucl. Instr. and Meth. in Phisics Research NIMB.- 1993.- B 80/81. P. 115-119.
9. W. Eckstein, Computer Simulation of Ion-Solids Interaction, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991.