

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

Д-445

P14-88-63

А.Ю.Дидык, В.Р.Регель\*, В.А.Скуратов,  
Н.Ю.Михайлова

РАДИАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ,  
ОБЛУЧЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Направлено в "Журнал технической физики"

---

\* Институт кристаллографии АН СССР, Москва

1988

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей физики радиационных повреждений является исследование низкотемпературного радиационного упрочнения металлов и сплавов. Такие исследования проводятся в нейтронных потоках <sup>1,2/</sup>, кроме того, осуществляется моделирование нейтронного воздействия на пучках различных заряженных частиц — электронов <sup>2/</sup>, легких ионов (альфа-частиц и протонов <sup>3/</sup>) и тяжелых ионов различных энергий <sup>2, 4-6/</sup>. Использование нейтронов и легких заряженных частиц в изучении радиационного упрочнения встречает значительные трудности, поскольку облучение исследуемых образцов в высокопоточных каналах реакторов затруднено из-за высокой температуры, а облучение в периферийных каналах требует длительных времен экспозиции, кроме того, образцы сильно активируются. Облучение материалов на пучках легких заряженных частиц из-за низкой дефектообразующей способности ( $\sim 10^{-19}$  с.н.а./част.) вызывает необходимость высокой плотности потока частиц, что в конечном счете приводит к длительным временам облучения и создает проблемы снятия выделяемого тепла.

Перечисленные выше трудности в значительной степени упрощаются при изучении низкотемпературного радиационного упрочнения с использованием пучков тяжелых ионов с энергиями от 1 до 10 МэВ/нуклон, что дает ряд преимуществ: во-первых, тяжелые ионы имеют более высокую скорость дефектообразования, во-вторых, пробег таких ионов в материалах составляет от 5 до 100 мкм, что позволяет считать исследуемые образцы макроскопическими <sup>7/</sup> и использовать для изучения радиационного упрочнения традиционные методы, например получивший широкое распространение метод измерения микротвердости <sup>1,4,5/</sup>, в-третьих, условия облучения (температуру, плотность потока ионов) можно надежно контролировать.

Целью настоящей работы является исследование дозовых зависимостей изменения механических свойств и микроструктуры ряда чистых металлов, облученных ионами ксенона с энергией 124 МэВ, а также изучение влияния температуры облучения на степень радиационного упрочнения металлов.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе были использованы образцы Al (99,99%), V (99,6%), Ni (99,96%) и Cu (99,99%). После механической шлифовки и электролитической полировки все образцы отжигались в вакууме  $10^{-3}$  Па

при температурах 300° С (Al), 1100° С (V), 700° С (Ni и Cu). Облучение образцов осуществлялось ионами Xe<sup>129</sup> с энергий 124 МэВ при температурах, близких к комнатной, за исключением случая изучения радиационного упрочнения в зависимости от температуры облучения при постоянной дозе повреждений. Плотность потоков ионов при облучении V, Ni и Cu составляла 2x10<sup>9</sup> ион/см<sup>2</sup> с и 2,5x10<sup>11</sup> ион/см<sup>2</sup> с при облучении Al.

Величина радиационного упрочнения определялась методом измерения микротвердости при нагрузках, приводящих к проникновению индентора в материал не более чем на 3,5 мкм (см. также<sup>4,5/</sup>). Поскольку глубина внедрения индентора во всех случаях была в несколько раз меньше длины пробега ионов, можно считать, что измерявшаяся микротвердость характеризовала механические свойства слоя, упрочненного облучением.

Наряду с изучением механических свойств было проведено исследование микроструктуры облученных до различных доз повреждений образцов меди с использованием просвечивающего электронного микроскопа JСХ-100 (эта работа выполнена в лаборатории структурных исследований радиационных дефектов ИЯФ АН КазССР).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 приведены зависимости изменения микротвердости Al, V, Ni и Cu с дозой облучения, которые достаточно хорошо описываются выражением вида

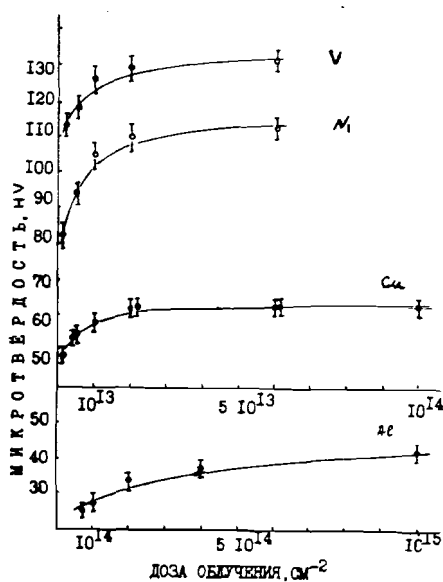
$$\Delta H = H_0 \cdot (1 - \exp(-aD))^{1/2} \quad (1)$$

для случаев V, Ni и Cu и выражением

$$\Delta H = H_0 \cdot (1 - \exp(-aD)) \quad (2)$$

для Al. В (1) и (2) D — доза облучения в единицах ион/см<sup>2</sup>, H<sub>0</sub> — предельная величина, к которой стремится прирост микротвердости ΔH при дозах D ≫ 1/a. В таблице приведены величины a и H<sub>0</sub>, полученные при обработке экспериментальных данных по методу наименьших

Рис.1. Зависимости прироста микротвердости ванадия, никеля, меди и алюминия, облученных ионами ксенона с энергией 124 МэВ, от флюенса.



Материал	a	H <sub>0</sub>
Медь	5,4 · 10 <sup>-10</sup>	20,4
Никель	5,9 · 10 <sup>-10</sup>	41,5
Ванадий	4,3 · 10 <sup>-10</sup>	25,1
Алюминий	1,9 · 10 <sup>-13</sup>	19,0

квадратов. Точки на рис.1 — экспериментальные значения, а гладкие кривые получены при использовании выражений (1) и (2) с параметрами из таблицы.

Из рис.1 видно, что величины пороговых доз, т.е. доз, начиная с которых наблюдается значительное изменение микротвердости, близки для V, Ni, Cu и составляют ~ 10<sup>12</sup> ион/см<sup>2</sup> в то же время для Al величина пороговой дозы ~ 9x10<sup>13</sup> ион/см<sup>2</sup>. Абсолютная величина прироста прочностных свойств имеет наибольшее значение для Ni.

Облученные образцы меди были просмотрены методами просвечивающей микроскопии. При исследовании обнаружены дислокационные петли и тетраэдры дефектов упаковки (см. также<sup>8/</sup>). На рис.2 показаны фрагменты фотографий, на которых видны кластеры точечных дефектов, возникшие в материале под действием облучения. Кроме того, приведены распределения относительных концентраций кластеров по их размерам и абсолютные концентрации кластеров при трех различных уровнях повреждений: в области максимального прироста микротвердости и на участке насыщения эффекта радиационного упрочнения. Дефектная структура изучалась на глубине 1 мкм от облученной поверхности. Для расчета распределения точечных радиационных дефектов по пробегу ионов Xe использовалась программа EDEP-1<sup>9/</sup> (версия 1985 года). Ошибка в определении концентраций дефектных кластеров не превышала ± 20%. Из анализа микроструктуры облученных образцов можно сделать вывод о преобладании кластеров с размерами до 5 нм. Определяющий вклад кластеров с подобными размерами в изменения механических свойств материалов, облученных при температурах до 0,3 T<sub>пл</sub>, характерен и в случае облучения легкими ионами и нейтронами<sup>3/</sup>.

На рис.3 показаны экспериментальная и расчетная зависимости микротвердости меди с дозой облучения. Расчет выполнялся по формуле (см., например,<sup>7/1</sup>)

$$\Delta H = \frac{\sqrt{3}Gb}{3,27\beta} \left( \sum_i \rho_i d_i \right)^{1/2}, \quad (3)$$

полученной в рамках "барьерной" модели, объясняющей радиационное

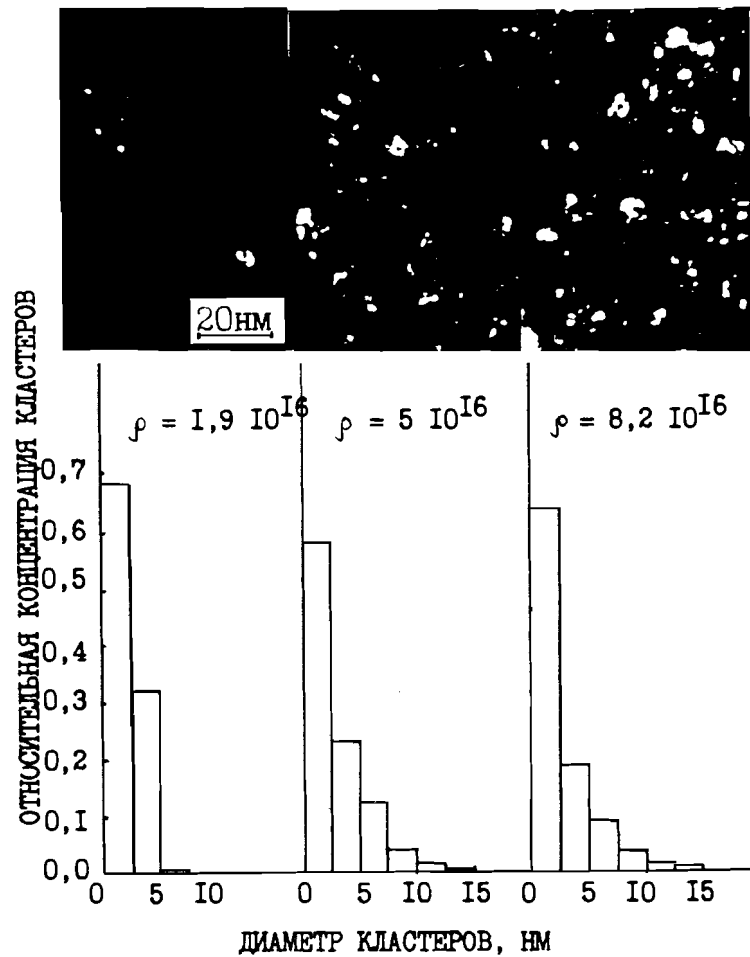


Рис.2. Зависимости относительных концентраций кластеров от их размеров при трех флюенсах —  $10^{12}$ ,  $2,2 \times 10^{13}$  и  $6 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> и соответствующие им фотографии микроструктуры, полученные методами просвечивающей электронной микроскопии.

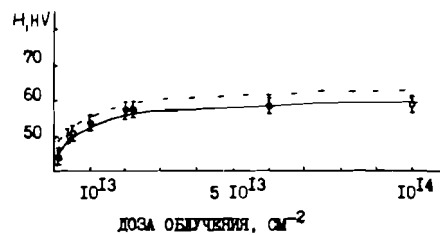


Рис.3. Дозовая зависимость прироста микротвердости меди (нижняя кривая) и расчетная кривая, полученная на основе выражения (3) (верхняя кривая).

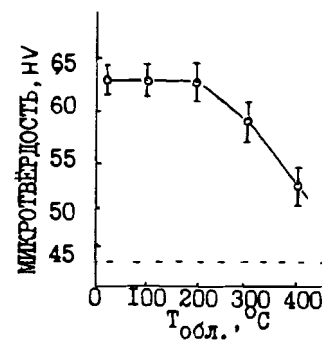


Рис.4. Температурная зависимость прироста микротвердости меди при флюенсе  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>.

упрочнение твердых тел контактным и упругим взаимодействием образовавшихся во время облучения скоплений точечных дефектов с дислокациями. В (3)  $G$  — модуль сдвига,  $b$  — вектор Бюргера,  $\beta$  отражает эффективность кластеров как стопоров при движении дислокаций,  $\rho_i$  — абсолютная концентрация кластеров с характерными размерами  $d_i$ . Для меди эти величины имеют значения  $G=4,1 \times 10^{11}$  МПа,  $b=2,558 \times 10^{-8}$  см, а  $\beta$  выбиралось равным 4. Из рис.3 видно, что расчетная зависимость в пределах точности определения концентрации и размеров скоплений дефектов достаточно хорошо описывает экспериментальные данные. Систематическое завышение расчетных значений  $H$ , по-видимому, связано с неоднородностью распределения дефектов по глубине слоя, в который внедрялся индентор при измерении микротвердости, и завышением вклада от кластеров с размерами менее 2,5 нм, связанным с неточностью измерения этих размеров.

На рис.4 приводится зависимость микротвердости меди, облученной до дозы  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>, соответствующей насыщению эффекта радиационного упрочнения, от температуры облучения. Видно, что в области температур до 200°C радиационное упрочнение не изменяется с температурой, а с дальнейшим увеличением температуры происходит понижение степени упрочнения вплоть до температур 400°C, когда, по данным авторов, определяющую роль в процессах формирования дефектной структуры начинают играть вакансионные поры (процессы радиационного распухания). Такая температурная зависимость микротвердости меди согласуется с экспериментальными данными по изменению концентрации и размеров кластеров дефектов в меди, облученной ионами меди с энергиями 14 МэВ в области температур от  $0,2 \times T_{пл}$  до  $0,6 \times T_{пл}^{1/8}$ .

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Для ряда чистых металлов (Al, V, Ni и Cu) показано, что дозовая зависимость степени радиационного упрочнения имеет тенденцию к насыщению (интервал доз повреждений  $10^{-4} \div 10^{-2}$  с.н.а.).
2. Определена температурная зависимость радиационного упрочнения меди при дозе, соответствующей насыщению эффекта упрочнения. Показано, что уменьшение радиационного упрочнения наблюдается начиная с температур выше 200°C, что согласуется с ходом температурной зависимости концентрации и размеров кластеров дефектов<sup>[9]</sup> и, по-видимому, объясняется возрастанием подвижности вакансий.

3. Электронно-микроскопические исследования показали, что при облучении тяжелыми ионами, как и другими частицами (нейтронами и легкими ионами), радиационное упрочнение обусловлено кластерами радиационных дефектов с размерами до 5 нм.

Авторы благодарят академика Г.Н.Флерова и профессора Ю.Ц.Оганесяна за полезные обсуждения и С.П.Вагина, В.Ф.Реутова и П.А.Чикрова за помощь, оказанную в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Panayotou N.F. – *J. Nucl.Mater.*, 1982, 108-109, p.456-462.
2. Альтовский И.В. – В кн.: *Итоги науки и техники. Серия: Металловедение и термическая обработка. М.: ВИНТИ, 1987, т.21, с.3-52.*
3. Ибрагимов Ш.Ш., Реутов В.Ф., Фархутдинов Г.Г. – *АЭ, 1983, т.54, вып.5, с. 339-342.*
4. Дидык А.Ю. и др. *Сообщение ОИЯИ 14-86-410, Дубна, 1986.*
5. Гомозов Л.И. и др. *Сообщение ОИЯИ 14-86-409, Дубна, 1986.*
6. Хаванчак К. и др. – *ФММ, 1986, т.62, с.390.*
7. Miyazaki S., Shibata K., Fujita H. – *Acta Metallurgica, 1979, 27, p.855-862.*
8. Zinkle S.J., Kulcinski G.L., Knoll R.W. – *Nucl.Mater., 1986, 138, p.46-56.*
9. Davisson C.M., Manning I. – *Comp.Phys.Commun., 1986, 42, p.137.*

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 января 1988 года.

Дидык А.Ю. и др.  
Радиационное упрочнение металлов,  
облученных тяжелыми ионами

P14-88-63

Методами измерения микротвердости и просвечивающей электронной микроскопии исследована дозовая зависимость радиационного упрочнения Al, V, Ni и Cu, облученных ионами ксенона с энергией 124 МэВ в интервале  $10^{-4} \div 10^{-2}$  с.н.а. Показано, что радиационное упрочнение чистых металлов обусловлено кластерами дефектов с характерными размерами до 5 нм, как и в случае облучения нейтронами и легкими заряженными частицами.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод авторов

Didyk A.Yu. et al.  
Radiation Hardening of Metals  
Irradiated by Heavy Ions

P14-88-63

The damage dose dependence in the  $10^{-4} \div 10^{-2}$  dpa region of radiation hardening of Al, V, Ni, Cu irradiated by xenon ions with 124 MeV energy is investigated using the microhardness technique and transmission electron microscope. It is shown that the pure metals radiation hardening is stimulated for defects clusters with the typical size less than 5 nm, as in the case of neutron and the light charge ion irradiation.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988