

УДК 59.13.15

## РАДИАЦИОННАЯ МОДИФИКАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ

**В. И. Иванов**

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики, Москва, Россия

*Представлены экспериментальные результаты по модификации металлов электронным пучком.*

Известно, что физические и химические свойства металлов определяются присутствием в них различных несовершенств кристаллической структуры таких, как дислокации и точечные дефекты и их взаимодействие друг с другом [1]. В разработанной теории Гранато-Люкке [2] радиационные дефекты могут служить "точками закрепления" дислокаций, что является причиной изменения механических свойств металлов. При облучении металлов ускоренными электронами с энергией не менее 0,5 МэВ можно получить большую концентрацию вакансий и межузельных атомов при сохранении дислокационной структуры. Такой способ позволяет создать дефекты в готовых изделиях без повышения температуры и изменения формы. Это обстоятельство дает определенные преимущества данному способу перед традиционными способами обработки металлов — деформации и закалки.

С помощью метода внутреннего трения изучалась природа радиационных дефектов и их взаимодействие с другими дефектами кристаллической структуры металлов. Исследования проводились на монокристаллических образцах чистой меди и двойных сплавов меди с 0,01 ат. % других элементов.

Для создания точечных дефектов образцы облучались электронами с энергией 5 МэВ, интенсивностью  $6 \cdot 10^{14}$  эл.  $\cdot$   $\text{см}^{-2}$   $\cdot$   $\text{с}^{-1}$ , дозой  $10^{18}$  эл.  $\cdot$   $\text{см}^{-2}$ , что соответствовало содержанию точечных дефектов — пар Френкеля  $10^{-2}$  ат. %. Схема облучения показана на рис. 1.

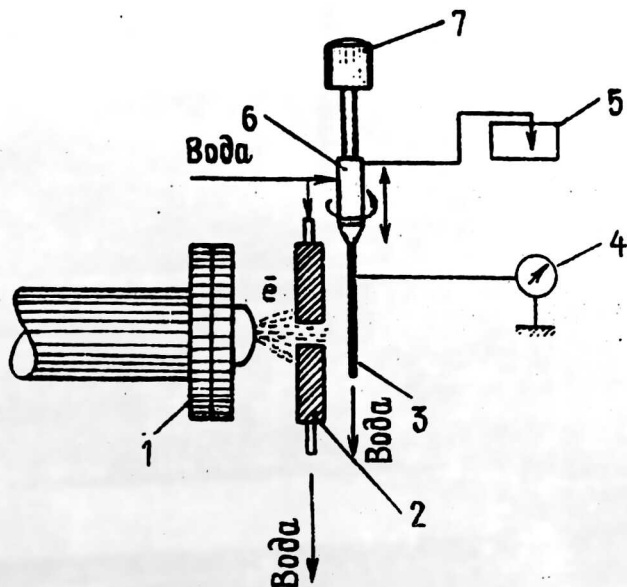


Рис. 1. Схема облучения:

- 1 — выходное окно ускорителя; 2 — коллиматор; 3 — образец;
- 4 — прибор контроля потока электронов; 5 — механизм перемещения образца;
- 6 — цанга; 7 — электродвигатель

На рис. 2 приведены кривые изменения внутреннего трения монокристалла чистой меди и сплава меди с алюминием в процессе изохронного отжига. Получено, что после облучения внутреннее трение увеличивается. Последующий отжиг приводит к трем стадиям изменения внутреннего трения (III, IV, V), которые соответствуют стадиям отжига радиационных дефектов. На III стадии отжига мигрируют межузельные атомы, а на IV стадии отжига мигрируют вакансии и закрепляют дислокации. На IV стадии отжига внутреннее трение увеличивается и возвращается к исходной величине до облучения для всех сплавов кроме сплава с алюминием. Это свидетельствует о полном исчезновении радиационных дефектов на дислокациях после отжига при 500 °С. Однако возврат внутреннего трения в сплаве медь — алюминий не наблюдается вплоть до 800 °С. Такой результат можно объяснить из предположения о миграции к дислокациям комплексов вакансия — атом алюминия, которые устойчивы до температуры 800 °С.

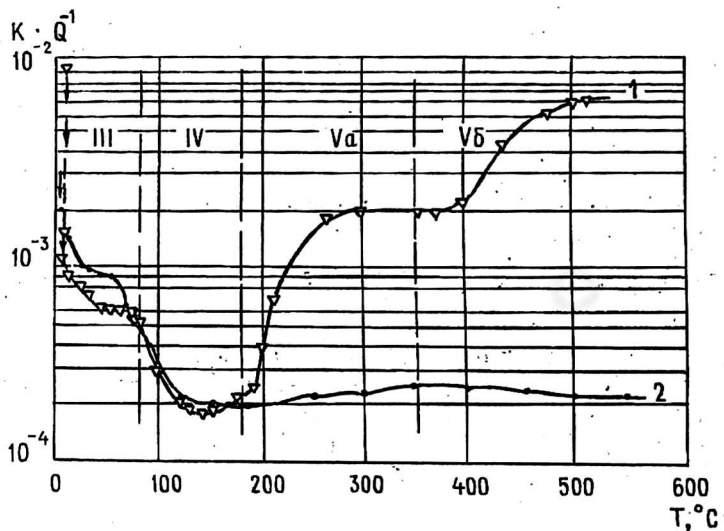


Рис. 2. Стадии изменения амплитудно-независимого внутреннего трения монокристаллов меди (1) и ее сплава с алюминием (2)

Информацию о влиянии облучения электронами на механические свойства металлов изучали микротвердости ( $H_{\mu}$ ) и зависимости «напряжение — деформация». На рис. 3 представлены результаты изменения  $H_{\mu}$  в процессе изохронного отжига облученных электронами образцов меди. Установлено, что после облучения при температуре 20 °С происходит увеличение  $H_{\mu}$  с 24 кг · мм<sup>2</sup> до 42 кг · мм<sup>2</sup>. Нагрев до температуры 100 °С приводит к дальнейшему увеличению  $H_{\mu}$  до 50 кг · мм<sup>2</sup>. Однако нагрев до температуры 200 °С уменьшает величину  $H_{\mu}$  до первоначального значения и приводит к исчезновению эффекта радиационного упрочнения. Данные результаты позволяют сделать важный для практики вывод — для достижения максимального эффекта радиационного упрочнения облученных объектов необходимо проводить дополнительный отжиг (для меди до 100 °С).

Для расширения температурного интервала существования эффекта радиационного упрочнения необходимо уменьшить подвижность радиационных дефектов. Один из способов уменьшения подвижности радиационных дефектов основан на введении незначительных примесей других элементов. Так, добавки алюминия или олова к меди в количестве 0,01 ат. % расширяют температурный предел существования эффекта радиационного упрочнения до 600 и 800 °С, соответственно (см. рис. 3).

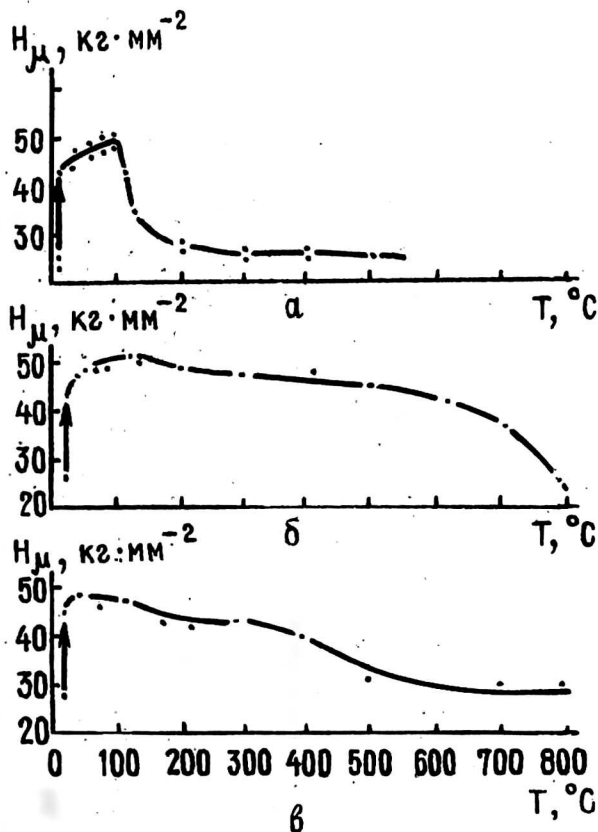


Рис. 3. Изменение микротвердости облученных электронами монокристаллов меди:  
 а — чистая медь; б — медь — алюминий; в — медь — олово.

Важные характеристики механических свойств металлов определяются при испытаниях на растяжение. Кривые “напряжение — деформация” образцов меди приведены на рис. 4. У облученного образца предел текучести ( $G_T$ ) возрос с  $2 \text{ кг} \cdot \text{мм}^2$  до  $3,5 \text{ кг} \cdot \text{мм}^2$ , т. е. в 1,7 раза. У облученного образца, подвергнутого отжигу,  $G_T$  возрос до  $7 \text{ кг} \cdot \text{мм}^2$ , т. е. примерно в 3,5 раза. Предел прочности у облученных образцов не изменился.

Для решения практических задач проводились исследования на медных трубках (медь марки МБ). На рис. 5 представлены изменения  $G_T$  медных трубок диаметром 2 мм, толщина стенки 0,2 мм от дозы облучения. Перед облучением трубки отжигались при температуре  $900^{\circ}\text{C}$  в течение 2 ч, а затем медленно охлаждались вместе с печью. При дозе  $10^{19} \text{ эл} \cdot \text{см}^2$   $G_T$  увеличился в 1,5 раза ( $5,2 \text{ кг} \cdot \text{мм}^2$ ). При дополнительном отжиге после облучения  $G_T$  увеличился в 1,8 раза ( $6,2 \text{ кг} \cdot \text{мм}^2$ ). Заметное изменение величины  $G_T$  начинается с дозы  $4 \cdot 10^{17} \text{ эл} \cdot \text{см}^2$ . У не обработанных технически трубок  $G_T$  нарастает значительно медленнее, что подтверждает необходимость проведения дополнительного отжига после облучения.

Изучалось влияние электронного облучения на механические свойства железа и сплавов на основе железа: результаты приведены в таблице.

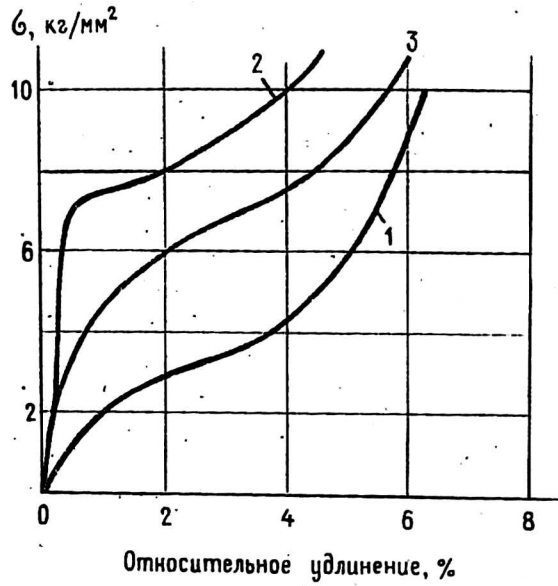


Рис. 4. Диаграмма растяжения монокристаллов меди:  
1 — необлученный образец; 2 — облученный и обожженный образец;  
3 — облученный образец

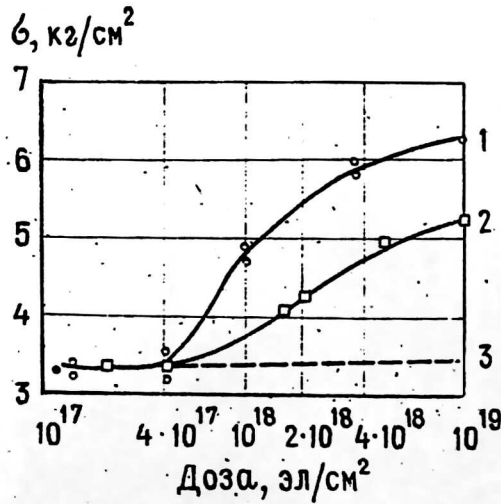


Рис. 5. Изменение предела текучести медных трубок от дозы облучения:  
1 — трубки после облучения отжигались в течение 1 ч при 100 °С;  
2 — трубки после облучения не отжигались;  
3 — уровень предела текучести необлученных трубок

**Изменение механических свойств металлов после облучения  
электронами с  $E = 5$  МэВ и нагрева до  $100\text{ }^\circ\text{C}$**

Металл	Доза облуче- ния, эл. / см <sup>2</sup>	Прирост, %:	
		микро- твердости	предела текучести
Медь (МВ)	$2 \cdot 10^{18}$	130	300
Медь (МБ)	$2 \cdot 10^{19}$	—	100
Cu — Al	$2 \cdot 10^{18}$	108	—
Cu — Sn	$2 \cdot 10^{18}$	74	—
Железо (аустенит)	$2 \cdot 10^{18}$	90	50
Г 13 (аустенит)	$2 \cdot 10^{18}$	33	—
Железо — никель (аустенит)	$2 \cdot 10^{18}$	30	—
Н 29 (аустенит)	$2 \cdot 10^{18}$	17	43
Н 32 (мартенсит)	$2 \cdot 10^{18}$	13	—
Н 29 (мартенсит)	$2 \cdot 10^{18}$	16	25
100 Н 13 (аустенит)	$2 \cdot 10^{18}$	17	—
100 Н 19 (аустенит)	$2 \cdot 10^{18}$	13	—
Железо + 28% марганца (аустенит)	$2 \cdot 10^{18}$	—	44

**Л и т е р а т у р а**

1. Динс Дж., Виньярд Дж. Радиационные эффекты в твердых телах. — М.: ИЛ, 1960. С. 244.
2. Гранато А., Люкке К. Физическая акустика. — М.: МИР, 1969. Ч. А. Т. IV. С. 261.

**RADIATING MODIFICATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF METALS**

*V. I. Ivanov*

Moscow Institute for Radio Engineering, Electronic and Automation, Moscow, Russia

*Paper presents the experimental results of metal modification by electron beam.*