

05;10;12

©1995

ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В СТАЛИ ПРИ ОДНОКРАТНОМ И ПЕРИОДИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Г.Е.Ремнев, Ю.Ф.Иванов, М.С.Опекунов, А.Г.Пузыревич

В зависимости от плотности мощности в импульсном ионном пучке (длительность импульса $\sim 10^{-7}$ с) при его взаимодействии с металлами можно условно выделить два режима обработки: с оплавлением поверхности и без оплавления поверхности ($P < 10^6 - 10^7$ Вт/см²) [1,2]. В первом случае их взаимодействие схоже с другими импульсными концентрированными потоками энергии (импульсное лазерное излучение: нано- и микросекундные электронные пучки, импульсная плазма и др.). Во втором случае, варьируя плотность мощности в импульсе, можно соответственно варьировать температуру поверхностного слоя, доводя ее вплоть до температуры плавления.

Числом импульсов и током ионов в импульсе можно варьировать внедренную дозу, как при имплантации непрерывными пучками. При этом прямого аналога такому воздействию нет. И это направление представляется интересным не только в плане изучения взаимодействия с материалами, но и в плане практического использования таких пучков.

Нагрев поверхностного слоя толщиной порядка пробега ионов происходит со скоростями $\sim 10^{11}$ К/с. Остывание в глубь мишени происходит в основном за счет теплопроводности со скоростями $\sim 10^7 - 10^9$ К/с. Темп остывания определяется величиной расстояния от поверхности мишени, временем, величиной поглощенной энергии, материалом мишени.

В данной работе рассматриваются отличия в образовании дислокационной структуры в конструкционной стали при воздействии импульсных и непрерывных ионных пучков с сопоставимыми параметрами.

Исследования проводились с использованием высокоточного короткоимпульсного имплантера "Мук" [3] и ионного ускорителя на базе генератора Ван-де-Графа — ЭСГ-2.5, имеющих сопоставимые параметры пучка по энергии и массе ионов, дозе, условиям облучения (табл. 1).

Таблица 1.

Ускоритель	Режим	Род ионов	Энергия, кэВ	Доза	Температура мишени, °С	Давление в вакуумной камере, мм рт. ст.
ЭСГ-2.5	I	N	400	10^{13}	< 100	10^{-5}
	II	N	400	$2 \cdot 10^{16}$	< 100	10^{-5}
"Мук"	I	C	120-400	10^{13}	< 100	10^{-5}
	II	C	120-400	$2 \cdot 10^{16}$	< 100	10^{-5}

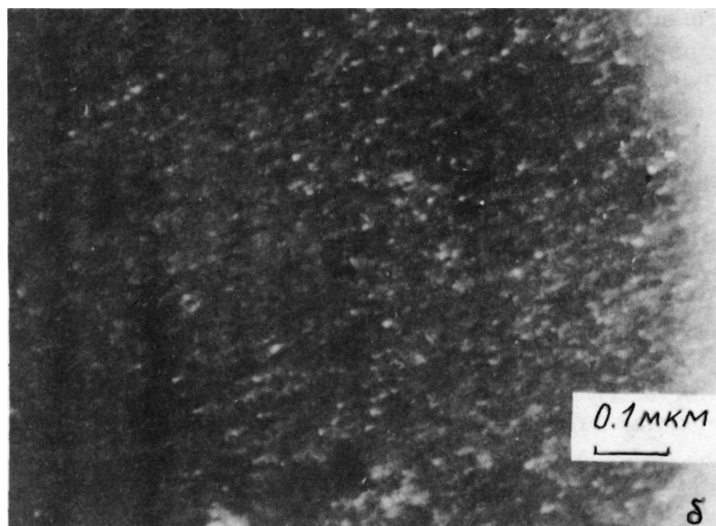
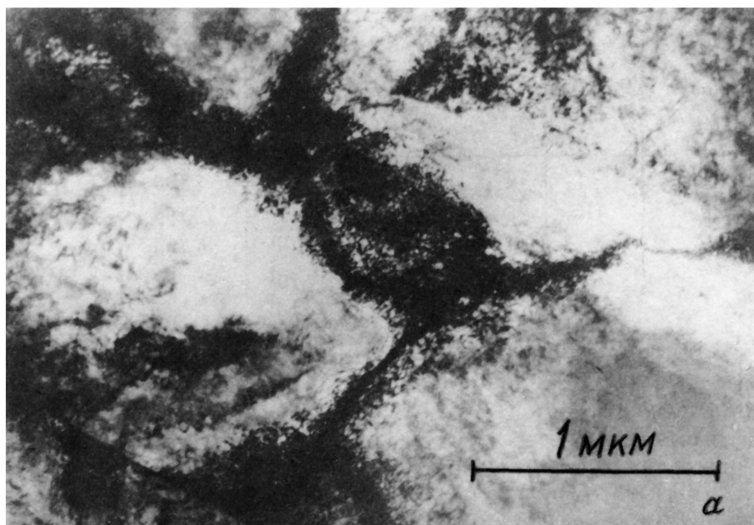
На ускорителе "Мук" [2] ионы имели зарядность ионов углерода от 1 до 4, ускоряющее напряжение на магнитоизолированном диоде до 10 кэВ. Основное количество ионов (95%), фиксируемое спектрометром Томсона, имело энергию в диапазоне, указанном в табл. 1. Температура мишени контролировалась в процессе облучения термопарой и во всех режимах облучения на том и другом ускорителе не превышала 100°C. Доза ионов измерялась по методикам, описанным в работах [2,3].

Исследование фазового состава материала и его дефектной структуры осуществляли методом тонких фольг на электронном микроскопе ЭМ-125 К. Скалярную плотность дислокаций измеряли методом секущей [4], избыточную плотность дислокаций и величину дальнедействующих полей напряжения — по методике, изложенной в [5], фазовый анализ осуществляли путем идентификации микроэлектроннограмм [6].

В исходном состоянии исследуемый материал представляет собой смесь ферритных зерен и колоний пластинчатого перлита. В ферритной составляющей стали наблюдается дефектная структура в виде хаотически распределенных дислокаций. Скалярная плотность их в ферритных зернах и в перлитных колониях практически одинакова. Дислокаций в пластинах цементита мы не наблюдали.

Действие МИП. После однократного воздействия в приповерхностном слое толщиной 0.2-0.3 мкм формируется слоистая дислокационная структура. Скалярная плотность дислокаций при переходе от слоя к слою изменяется от исходной плотности дислокаций (на границе анализируемого слоя) до плотности, на порядок превышающей исходную. В слое с максимальной плотностью дефектов дислокации сгруппированы в сетки (см. рисунок, а).

Увеличение числа импульсов обработки до 2000 ($D = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$) приводит практически к полному возврату дис-



Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 40, обработанной мощным импульсным ионным пучком наносекундной длительности (а, в) и пучком ионов в режиме статической имплантации (б); а — 1 импульс; в — 2000 импульсов.

локационной структуры приповерхностного слоя к исходному состоянию. Релаксация дефектной структуры сопровождается образованием дислокационных петель. Плотность их довольно низка и составляет $(2-4) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$.



Продолжение рисунка.

Воздействие непрерывного пучка ионов азота. Имплантация протекает сравнительно длительное время в условиях неизменности температуры образца, позволяет выделить эффекты, связанные непосредственно с внедрением ионов в кристаллическую решетку металла. Сравнительный анализ дефектной структуры приповерхностного слоя образцов стали, обработанных в режиме имплантации непрерывным ионным пучком, выявил их близкое сходство с образцами, подвергшимися воздействию МИП на установке "Мук". Как в описанном выше случае, статическая имплантация способствует формированию многослойной дислокационной структуры, трансформирующейся по мере нарастания плотности дислокаций от хаоса к сеткам. Дислокационная структура частично поляризована — наблюдаются изгибные экстинкционные контуры. Количественный анализ дислокационной структуры выявил, однако, значимые различия (табл. 2).

Во-первых, степень дефектности структуры при обработке стали пучком ионов за один импульс выше, чем при статическом режиме имплантации, даже когда доза внедренных атомов $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Во-вторых, статическая имплантация ионов не способствует поляризации дислокационной структуры. Следовательно, собственно имплантация ионов в кристаллическую решетку металлов приводит к деформированию материала, что отражается в весьма суще-

Таблица 2.

Способ обработки	$\rho \cdot 10^{10}, \text{см}^{-2}$		$\rho_+ \cdot 10^{10}, \text{см}^{-2}$		$\sigma_g, \text{кг/мм}^2$		Д, $\text{см}^{-2} \cdot 10^{13}$
	ρ_{max}	$\langle \rho \rangle$	$\rho_+ \text{ max}$	ρ_+	$\sigma_g \text{ max}$	σ_g	
“Мук”, $N = 1$	12	5.5	4.8	3.1	46	37	1.0
“Мук”, $N = 2000$	2.5	1.5	1.2	0.8	23	18	2000.0
“ЭСГ”	9.6	4.8	1.4	0.8	26	18	2000.0
Исходная структура	1.9	1.9	0.9	0.9	19	19	нет

ρ — скалярная плотность дислокаций; ρ_+ — избыточная плотность дислокаций; σ_g — амплитуда действующих полей напряжения.

ственном повышении плотности дислокаций в приповерхностном слое. Обработка МИП, кроме этого, способствует значительному упругопластическому деформированию кристаллической решетки и дополнительно разогреву приповерхностного слоя материала, приводящему к релаксации дефектной структуры.

Изложенные выше результаты относятся к изменению дефектной структуры стали. Дифракционный анализ обработанных образцов выявил изменения и в фазовом состоянии материала. При статической имплантации ионов азота в приповерхностном слое наблюдается формирование дисперсных частиц, являющихся нитридами железа (см. рисунок, б). Частицы имеют округлую форму и средние размеры 4.0 нм. Установлена корреляция между величиной скалярной плотности дислокаций и плотностью частиц второй фазы: максимальная плотность частиц отмечается в участках материала с минимальной плотностью дислокаций. В участках фольги с максимальной плотностью дислокаций частицы второй фазы не наблюдались ни при визуальном анализе светлопольных изображений, ни при микродифракционном анализе структуры.

Импульсная ионная обработка пучками наносекундной длительности при дозе внедренных атомов $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ не приводит к образованию новых фаз, но способствует изменению морфологии цементита. Особенно это отчетливо заметно при многоимпульсной обработке и выражается, во-первых, в коагуляции пластин (вытеснении пластин из ферритной матрицы на границы) и, во-вторых, в существенном изменении формы пластин. Так, на рисунке, в приведено электронно-микроскопическое изображение перлитной колонии, пластины цементита в которой имеют винтообразную форму (т. е. закручены в спираль наподобие “сверла”).

Если в первом случае налицо температурный эффект, указывающий еще раз на значительный разогрев поверхностного слоя образца при многоимпульсной обработке мощными ионными пучками, то для второго случая реальных объяснений на данный момент нет.

Таким образом, показано, что имплантация пучками ионов наносекундной длительности в отличие от имплантации непрерывными ионными пучками приводит к отжигу дефектов (дислокаций), имеет также ряд других особенностей в образовании новых фаз и морфологии цемента.

Список литературы

- [1] *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов*. Справочник. М.: Машиностроение, 1985.
- [2] *Remnev G.E., Shulov V.A.* // *Laser and Particle Beams*. 1993. V. 11. P. 707-731.
- [3] *Isakov I.F., Matvienko V.M., Remnev G.E. et al.* // *Vacuum*. 1991. V. 42. N 1/2. P. 159-162.
- [4] *Электронная микроскопия тонких кристаллов* / П. Харш, Р. Хови, Р. Николсон. М.: Мир, 1968. 574 с.
- [5] *Конева Н.А., Козлов Э.В.* Изв. вузов. Физика. 1982. № 8. С. 3-14.
- [6] *Эндрюс Л., Дайсон Д., Киоун С.* Электронограммы и их интерпретация. М.: Мир, 1971. 256 с.

Научно-исследовательский
институт ядерной физики
при Томском
политехническом университете

Поступило в Редакцию
15 августа 1995 г.