

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И НЕОБХОДИМОСТЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

В статье представлены результаты исследований дислокационной структуры материалов, микротвёрдости после обработки в тлеющем разряде. Показано, что 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. Обоснована необходимость в комплексной автоматизации технологической среды по плазменной обработке в тлеющем разряде вследствие быстротечности основных процессов.

Ключевые слова: *плазма, тлеющий разряд, дальноедействие, микротвёрдость, плотность дислокаций, самоорганизация, автоматизация*

Введение

Одним из новых направлений в разработке эффективных способов упрочнения металлов и сплавов является плазменная обработка в тлеющем разряде [1, 2]. Энергия заряженных частиц в тлеющем разряде не превышает энергию, необходимую для активного образования в металлах точечных дефектов, но нелинейные эффекты, заложенные в потенциальную энергию взаимодействия структурных элементов кристаллических решеток и обуславливают их модификацию. 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 [3, 4].

Важнейшим результатом обработки материалов в низкоэнергетической плазме является «эффект дальногодействия» [5–9], под которым понимается значительное превышение глубины модифицированного слоя в облученных мишенях

над величиной проективного пробега налетающих ионов [10, 11]. Процесс взаимодействия ионного потока с мишенью в тлеющем разряде представляет собой столкновение низкоэнергетических налетающих ионов с кристаллической решеткой облучаемых изделий, что приводит к упрочнению режуще-формообразующих инструментов и других изделий [12–14]. Разработку способов и технологических процессов обработки по активному дальнедействующему наноструктурированию облучаемых материалов необходимо проводить на основе исследования основных физических процессов, определяющих данное явление.

Исследования в области обработки в тлеющем разряде позволяют использовать все достоинства процессов взаимодействия частиц с твердым телом с целью получения материалов с требуемыми эксплуатационными характеристиками на основе вариации энергии частиц, температуры мишеней, материалов электродов и технологической среды в вакуумной камере [12–14]. В тлеющем разряде имеется возможность подвергать мишени воздействию ионного потока с широким спектром качества ионов и их энергий, при не обязательном формировании концентрированных ионных пучков.

Главной задачей работы явилось исследование основных самоорганизационных процессов в металлах и сплавах, подвергнутых воздействию тлеющего разряда, с целью разработки новых способов и технологий, обеспечивающих стабильную воспроизводимость их упрочнения используя комплексную автоматизацию технологической среды.

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

В качестве объекта экспериментального исследования использовали отожженные материалы и сплавы с гетерогенными структурами. Отожженное α -Fe отличается минимальным количеством дислокаций, и на его примере можно провести исследования по достижению максимальной глубины модифицированного слоя.

Быстрорежущие стали и твердые сплавы имеют резко выраженную гетерогенную структуру и обладают сложным характером химических связей с преимущественно ковалентной и ионной составляющей. Вольфрам в твердых сплавах растворяется в карбидах титана, формируя сложные карбиды (Ti, W)C во время спекания. Исходная твердость и хрупкость металлочерепичного соединения зависят от процентного содержания в быстрорежущей стали этих сложных карбидов [15]. На меди МЗ исследовали изменение дислокационной структуры и электрического сопротивления.

Образцы подвергались воздействию в тлеющем разряде ионов, образующихся из молекул газов воздуха (азота, кислорода, водорода и др.) и аргона с энергией 1...2,5 кэВ. Средняя интегральная температура образцов, помещенных на катод, во время обработки не превышала 373 К. Исследование зависимости микротвердости сплавов от времени, прошедшего после прекращения облучения (измерения проводились через сутки в течение двух месяцев), проводилось с использованием микротвердомера ПМТ-3. Измерение электрического сопротивления проводилось с точностью до 10-3 Ома.

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

Для проведения вычислительного эксперимента использовали метод молекулярной динамики. Для данной модели проводились расчеты в трехмерном и двумерном представлении, с использованием уравнений классической динамики. 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. Главная задача исследований – рассмотреть возбуждения нелинейных колебаний в системе и проследить за процессом стабилизации решеток после прекращения внешнего воздействия. Граничные условия, заложенные в программу, представлены в виде жестких и периодических. Величина передаваемой энергии от налетающего иона атому кристалла рассчитывалась по классическим формулам [16]. Она должна быть достаточной, чтобы создать условия для возбуждения нелинейных колебаний в атомных цепочках. Исследования по данной схеме проводили также с использованием потенциалов межатомного взаимодействия Борн-Майера, Тоде, Джонсона и Линдхарда. Для описания реального кристалла, отличающегося нелинейностью среды, многоямные потенциалы являются наиболее подходящими.

Исследование изменений физических и механических свойств материалов после воздействия тлеющего разряда

Наиболее значимый результат, установленный в результате электронно-микроскопического исследования тонкой структуры отожженного α -Fe после воздействия тлеющего разряда, состоит в том, что низкоэнергетическое облучение приводит к повышению плотности дислокаций на глубину, значительно превышающую проективный пробег ионов от поверхности облучения. Этот результат может быть представлен как дальнедействующий эффект [1, 2]. Подобный эффект с глубиной модифицированного слоя не более 100 мкм, наблюдался в [9] при имплантации ионов Hf и Ag в α -Fe и при энергии налетающих ионов 40...70 кэВ. Эффект многократного повышения плотности дислокаций наблюдается в хорошо отожженных образцах с малой исходной плотностью дислокаций (α -Fe, МЗ). Установлено, что после воздействия тлеющего разряда плотность дислокаций существенно возрастает, а структура соответствует состоянию глубоко деформированного материала (рис. 1).

В материалах с исходной повышенной плотностью дислокаций (быстрорежущая сталь, твердые сплавы) 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 меньшей глубине от поверхности облучения, чем у отожженного α -Fe. Обращает на себя внимание наличие существенных перестроек в карбидных фазах, в частности, их измельчение.

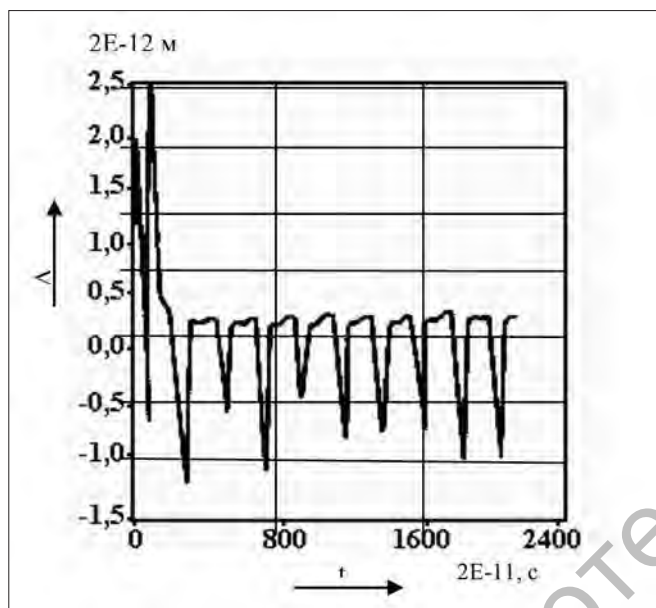


Рис. 5. Зависимость смещения атома, находящегося внутри облученной кристаллической решетки, от времени, прошедшего после прекращения облучения

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

Руководствуясь основными принципами автоматизации при создании технологической среды, главенствующее значение имеет стабилизация качества выпускаемой продукции на проектируемой технологической среде. Вследствие того, что процессы, протекающие при плазменной обработке в тлеющем разряде, отличаются быстротечностью и значительной вариантностью воздействия налетающих заряженных частиц, а также формируемых электрических и магнитных полей на упрочняемые изделия, то только автоматизированные электронные устройства, входящие в состав технологической среды, способны адекватно реагировать на изменяющиеся условия при обработке. Переход от вспомогательных процессов к основным при плазменной обработке в тлеющем разряде, особенно при их циклической повторяемости, невозможно осуществить без комплексного подхода к разработке автоматизированной технологической среды. Контроль параметров режима обработки, характеристик технологической среды, электрических и магнитных полей, времени основных процессов и вспомогательных переходов должен быть активным, поэтому автоматизация плазменной обработки в тлеющем разряде основывается на комплексном подходе к данному направлению. Исходя из вышеизложенного, планомерно вытекает острая необходимость в автоматизации имеющейся технологической среды по плазменной обработке в тлеющем разряде, основанной на ручном управлении многочисленными, одновременно протекающими процессами, использующей условное ранжирование их параметров. Поскольку уже имеется определённая достаточная база научных исследований по данному направлению, то вопросы автоматизации данной технологической среды становятся своевременными и актуальными [17].

Выводы

1. Обработка металлов и сплавов в тлеющем разряде приводит к повышению дислокационной плотности на глубину, значительно превышающую проективный пробег ионов от поверхности мишени, что можно связать с эффектом 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 в тлеющем разряде приводит к нелинейным колебаниям атомных осцилляторов, и в результате образуются новые метастабильные долгоживущие структуры решеток.

4. Низкоэнергетическое облучение в тлеющем разряде может быть использовано для создания новых технологий целенаправленного управления поведением материалов и элементов конструкций, используя комплексную автоматизацию технологической среды.

5. Для стабилизации воспроизводимости параметров модифицированного слоя при упрочнении в результате плазменной обработки в тлеющем разряде необходимо иметь возможность автоматического управления и поддержания основных параметров процесса в заданных интервалах.

