

мониторинга локализации красителя в опухолях. Разработано программное обеспечение для управления гиперспектрометром с пространственным модулятором света на основе микрозеркального устройства и обработки гиперспектральных изображений. Показана принципиальная возможность проведения гиперспектрального мониторинга объекта с индотрикарбоцианиновым красителем, флуоресцирующим под воздействием полупроводникового лазера.

### Литература

1. Левшин Л. В., Салецкий А. М. Люминесценция и ее измерения. М., МГУ, 1989. — 279 с.
2. Паркер С. Фотолюминесценция растворов. — М.: Мир, 1972. — 512 с.
3. Спектрально-люминесцентные характеристики симметричного трикарбоцианинового красителя ТИКС в растворах / Е.С. Воропай, М.П. Самцов, К.Н. Каплевский и др. // Вестн. БГУ. Сер.1. Физ. Мат. Инф.— 2000.— №2.— С. 28–30.
4. Воропай Е. С., Самцов М. П., Каплевский К. Н. Особенности испускания и поглощения индотрикарбоцианиновых красителей при переходах в высокие возбужденные электронные состояния // Журн. прикл. спектр.— 2003.— Т. 70, №5.— С. 635–641.
5. RITMOS: a micromirror-based multi-object spectrometer // SPIE.—2004.— Vol. 1616, №1.— P. 200–219.

## РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЖЕЛЕЗЕ МОДИФИЦИРОВАННЫМ КОМПРЕССИОННЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ПОТОКОМ

**М. С. Чибирай, В. В. Углов**

Одним из перспективных направлений в науке является модификация поверхностных слоев металлов и сплавов. Как известно, долговечность и износостойкость деталей в большей степени зависит от поверхностных свойств образца. Поэтому их улучшение и является актуальной задачей современной науки [1].

Воздействие компрессионными плазменными потоками на поверхность образцов, приводящее к их существенной модификации, сопровождается протеканием совокупности сложных плазмодинамических и теплофизических процессов. Вследствие взаимодействия мощного потока с поверхностью материала происходит изменение механических свойств образца, структурного, элементного, фазового составов вещества, что ведет к проявлению неравновесности системы [2]. Поэтому целью данной работы был анализ релаксационных процессов и их влияние на микротвердость материала.

Индентирование является простым, оперативным и, в сущности, не разрушающим способом испытания материалов. Метод позволяет про-

водить измерения в весьма малых объемах, что делает его наиболее привлекательным для определения механических свойств слоев подвергшихся поверхностному воздействию. Динамические кривые снимались на динамическом ультромикротвердомере SHIMADZU DUH-2.

Объектами проведения исследований служили массивные образцы армко-железа, изготовленные в виде дисков диаметром 10 мм и толщиной 1,5 мм. Обрабатываемые поверхности подвергались полировке.

Обработка образцов железа осуществлялась в стандартном режиме с помощью газоразрядного МПК компактной геометрии, в котором ускорение плазмы в аксиально-симметричной системе двух электродов сопровождается её сжатием за счет взаимодействия продольной составляющей тока с собственным азимутальным магнитным полем [7].

Квазистационарный плазменный ускоритель работал в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанная вакуумная камера заполнялась рабочим газом (плазмообразующим веществом) до заданного давления. В качестве плазмообразующего вещества использовались азот и водород. Начальное напряжение на конденсаторной батарее составляло 4,0 кВ. Длительность разряда 120 мкс. Образцы располагали на расстоянии 12 см за срезом внутреннего электрода перпендикулярно набегающему потоку, при этом значение плотности мощности потока составило  $1,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>.

При воздействии на образцы железа компрессионным плазменным по-

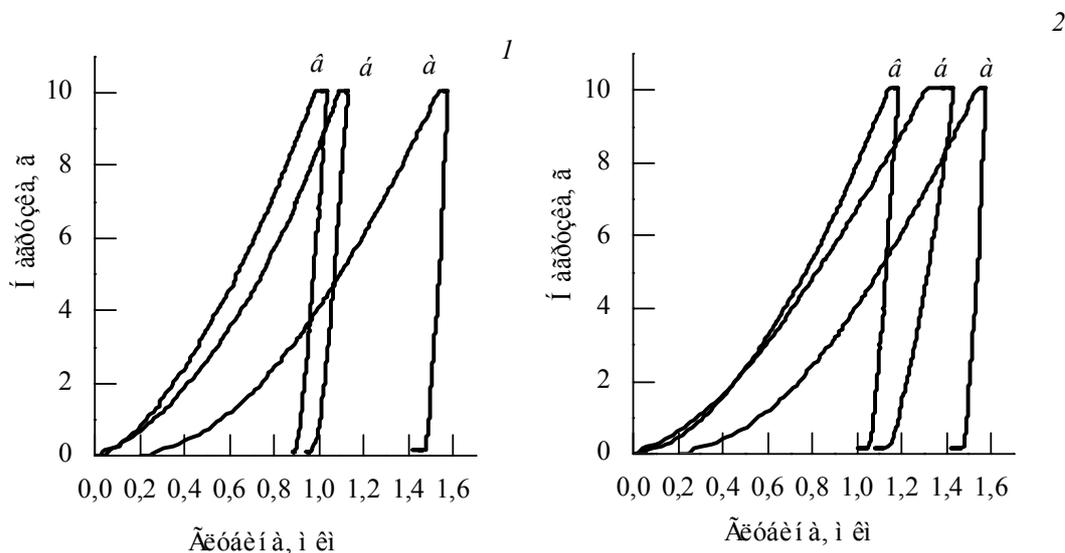


Рис. 1. Релаксация динамических кривых для армко-железа

1 – образец обработан азотосодержащей плазмой

2 – образец обработан водородосодержащей плазмой

*a* – вид динамической кривой до обработки; *b* – вид динамической кривой сразу после обработки;

*в* – вид динамической кривой через 5 суток;

током, генерируемым МПК, приводит к формированию глубоких модифицированных слоев, микроструктура которых формируется в результате скоростного нагрева с последующим охлаждением. В процессе воздействия на поверхность происходит насыщение легирующим элементом обрабатываемого материала. После воздействия азотосодержащей плазмы спектральный анализ показал, что в процессе воздействия компрессионного плазменного потока, генерируемого МПК, на железо происходит внедрение до 20 ат.% азота в  $\alpha$ -Fe решетку, определяющего фазовый состав модифицированного слоя. Глубина проникновения азота примерно 4 микрометра, для водорода эта величина не превышает 1 мкм.

Данные динамического твердомера представлены на рисунках.

В процессе плавления и кристаллизации на границе раздела кристалл-расплав будет возникать существенный градиент температур. Можно предположить, что в случае кристаллизации железа в поверхностных слоях будут возникать термоупругие напряжения как сжатия, так и растяжения. Подобные явления способствуют генерации дислокаций в поверхностном слое. Как следствие, эти области начинают притягивать атомы примесей, как внедренные, так и исходные, в результате чего движение дислокаций затрудняется. Таким образом внедренный в поверхностные слои водород препятствует движению дислокаций, что вызывает увеличение твердости.

В процессе внедрения азота имеет место формирование твердого раствора и при повышенных концентрациях преципитатов нитридных фаз.

С течением времени путем диффузии внутри зерен твердого раствора идет образование участков, обогащенных растворенным элементом (зон Гинье — Престона) и (или) дисперсных частиц избыточных фаз, чаще всего химических соединений. Упрочнение при старении — результат торможения дислокации теми выделениями, которые образовались при распаде пересыщенного твердого раствора.

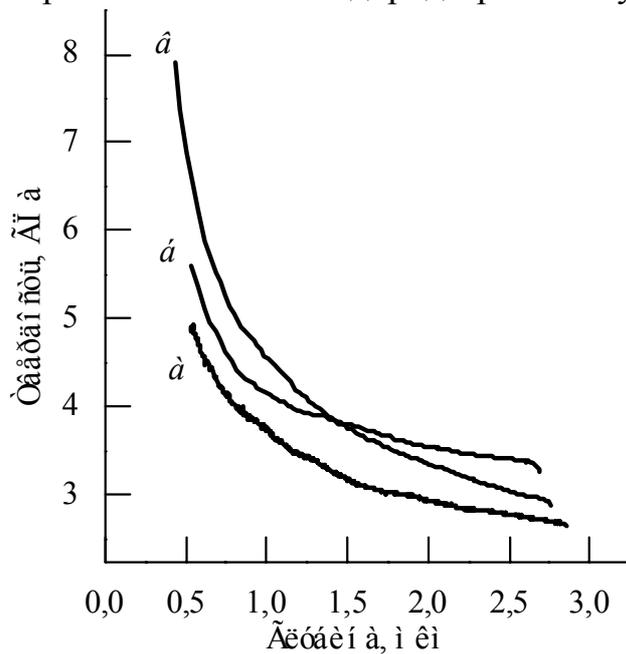


Рис. 2. Значения твердости для образцов армко-железа:  
 а — образец до обработки  
 б — образец обработан водородосодержащей плазмой  
 в — образец обработан азотосодержащей плазмой

Можно указать три главные причины упрочнения: 1) торможение дислокации полем упругих напряжений в матрице вокруг выделений; 2) «химическое» упрочнение при перерезании выделений дислокациями; 3) упрочнений при обходе частиц дислокациями.

Используя динамические кривые нагружения по методике С.Н. Дуба были построены зависимости твердости от глубины. На кривой для образца обработанного азотной плазмой видно увлечение твердости у поверхности с равномерным спадом с увеличением глубины. Значение 7 ГПа соответствует параметрам твердости азотистого мартенсита, для ферридно-нитридной смеси – 3,5-5,0 ГПа.

Что вполне соответствует литературным данным [6]. При обработке поверхности водородом таких высоких значений твердости не наблюдается. Можно говорить, что увеличение микротвердости связано в основном с деформационным упрочнением.

### Литература

1. *Асташинский В. В.* «Структурно-фазовое состояние приповерхностных слоев железа и углеродистых сталей, модифицированных компрессионными плазменными потоками»/Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук/ Мн. 2008 – 125с.
2. «Модификация материалов ионными и плазменными пучками»// В.В. Углов, В.М. Анищик/ Мн.:2003 – 190с.
3. *Федосов С. А., Пешек Л.* «Определение механических свойств материалов микроиндентированием»// М.:2004 – 97с.
4. *Бернштейн М. Л.* Термомеханическая обработка металлов и сплавов, т. 1–2, М., 1968.
5. *Дуб С. Н.* «Испытание тонких пленок на нанотвердость»// АН Украины – 2000
6. Thermal stability of laser-produced iron nitrides / M. Han [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2001. – Vol. 89, N 8. – P. 4619-4624.
7. «Физика и применение плазменных ускорителей»// ред. А.И. Морозов/ Мн.:1974 – 398с.