

величины радиационного дефектообразования в таких пленках. Проанализировано изменение отношения имплантированного азота к дефектам по глубине растущей пленки и даны рекомендации по изменению химического и фазового состава сопрягающих слоев пленки.

#### Библиографический список

1. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: Сб. / Под ред. Р. Бериша. – М.: Мир, 1984. – 335 с.

2. Марченко И.Г., Слепцов С.Н., Хирнов И.В. Моделирование ионноиндуцированной десорбции газа методом Монте-Карло // Радиационная физика твердого тела: Тезисы докладов межотраслевого совещания. 1-6 июля. – Севастополь, 1992. – С. 42-43.

3. Eckstein W., Computer Simulation of Ion-Solid Interactions, Springer Series. – Berlin, 1991. – 279p.

4. Гугля А.Г., Марченко Ю.А. Технология и оборудование высокоэнергетичной ионностимулированной обработки материалов // *Металловед. и терм. обраб. матер.* – 1996. – № 3. – С.29-30.

УДК 621.793.1

## ЗАВИСИМОСТЬ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В УГЛЕРОДНОМ АЛМАЗОПОДОБНОМ ПОКРЫТИИ ОТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА УГЛЕРОДА

*В.М. Никитин, А.Я. Колпаков, М.Е. Галкина*

г. Белгород, Белгородский государственный университет

Ионно-плазменные методы обработки поверхности и технология нанесения покрытий в вакууме с использованием низкотемпературной плазмы открывают новые возможности для модификации поверхности различных изделий с целью улучшения их служебных характеристик (микротвердости, снижения коэффициента трения, повышения термостойкости и т. д.) [1]. Выбор углеродного алмазоподобного покрытия в качестве объекта для исследований обусловлен его уникальными свойствами, во многом соответствующими свойствам природного алмаза [2].

Процесс формирования твердых алмазоподобных покрытий реализуется в условиях бомбардировки растущего конденсата ионами инертных газов или ионами углерода. Алмазоподобным покрытиям соответствуют аномально высокие значения внутренних напряжений сжатия, механизм возникновения которых связывают с радиационными дефектами [3].

Внутренние напряжения могут быть причиной растрескивания, потери адгезии и полного разрушения конденсата. Особенно негативные проявления внутренних напряжений наблюдаются при нанесении углеродного алмазоподобного покрытия на не-

жесткие подложки (майларовые пленки, фольга, эластичные мембраны).

В данной работе углеродное алмазоподобное покрытие было получено импульсным вакуумно-дуговым методом на установке УВНИПА-1-001. Нанесение покрытия осуществлялось с помощью импульсного источника углеродной плазмы, источником питания которого служит емкостной накопитель общей емкостью 2000 мкФ, заряжаемый до напряжения 300 В. Энергия ионов регулировалась путем изменения длительности импульса.

Величина внутренних напряжений определялась с помощью теневого метода по величине прогиба образцов, представляющих собой стальные пластинки толщиной 0,1 мм и длиной 37 мм с углеродным алмазоподобным покрытием толщиной 0,8 мкм. Суть теневого метода измерения величины прогиба иллюстрирует рис. 1. Свет от источника падает на поверхность, на которой располагаются образцы. Каждый образец дает теневую проекцию, по которой определяется величина прогиба (рис. 1а). Величина прогиба –  $x$ , а  $x' = k \cdot x$ , где  $k$  – коэффициент усиления данной системы. Чем меньше угол падения света, тем больше  $k$ . Коэффициент  $k$  определяют с помощью

концевой меры, которая представляет собой образец, на который нанесено покрытие с уже известной толщиной (рис.1б). Данный метод позволяет повысить точность измерения величины прогиба.

Внутренние напряжения рассчитывались по формуле Стоуни:

$$\sigma = \frac{E \cdot t^2}{6(l - \nu) \cdot R \cdot h} \quad (1),$$

где  $E$  – модуль упругости материала подложки;  $t$  – толщина подложки;  $R$  – радиус кривизны изогнутой пластинки;  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала;

$h$  – толщина пленки. Учитывая, что  $R \approx \frac{l^2}{8 \cdot f}$ , где  $l$  – длина пластинки,  $f$  – величина прогиба,  $\nu$  для стали = 0,3.

$$\sigma = \frac{E \cdot t^2 \cdot f}{0,525 \cdot h \cdot l^2} \quad (2).$$

В результате проведенных исследований была получена зависимость, представленная на рис. 2.

Анализируя полученную зависимость (кривая 2, рис. 2) и сравнивая с результатами, полученными в работе [4]

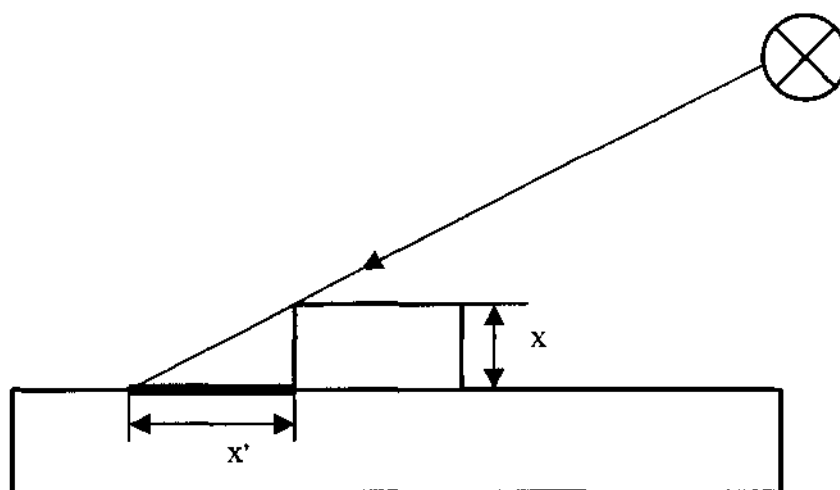


Рис. 1а

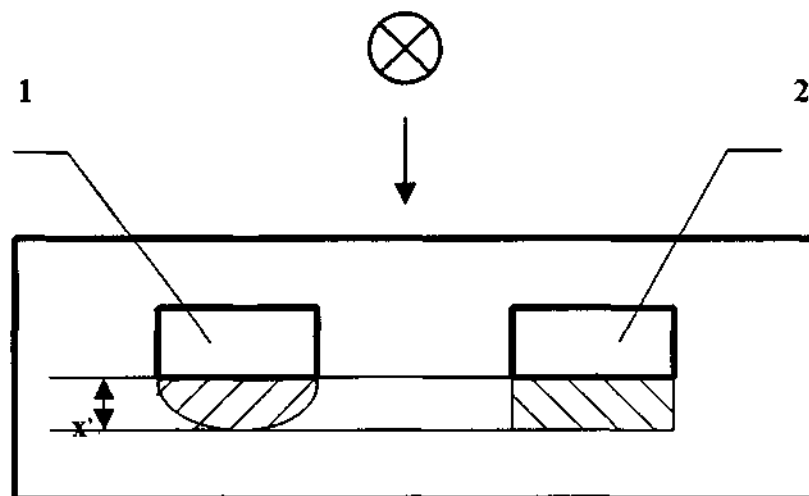


Рис. 1б

Рис 1. (а, б) Схема теневого метода измерения величины прогиба подложки: 1 – исследуемый образец; 2 – эталонный образец.

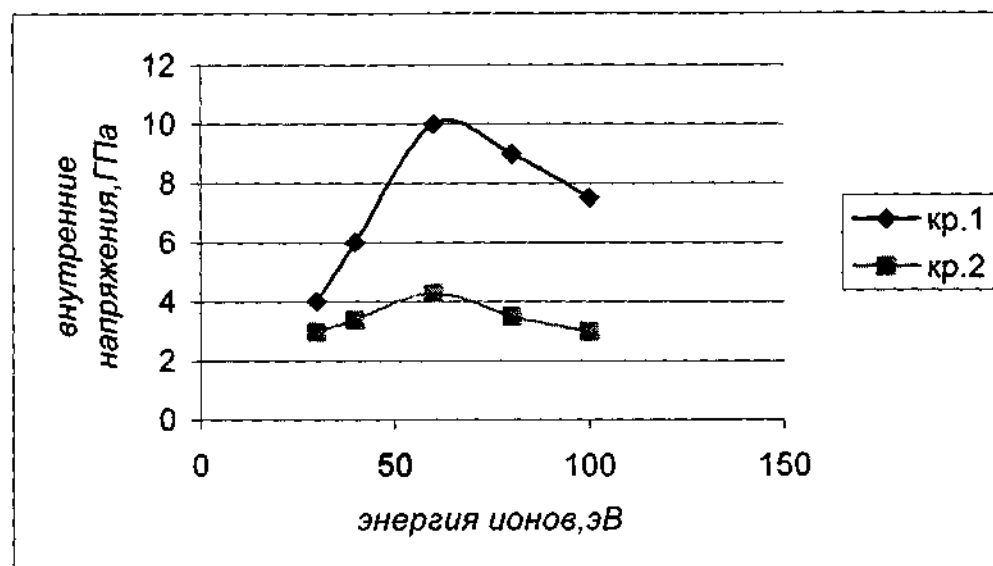


Рис 2. Зависимость внутренних напряжений в углеродном алмазоподобном покрытии от энергии ионов.

(кривая 1, рис. 2), можно сделать следующие выводы:

- приведенные кривые носят ярко выраженный экстремальный характер, соответствующий энергии 60 эВ ;
- по мере уменьшения величины энергии от 60-30 эВ наблюдается уменьшение величины внутренних напряжений. Это связано с уменьшением эффекта уплотнения, т.е. с уменьшением количества межузельных атомов [4], образующихся при бомбардировке растущего углеродного конденсата ионами углерода и обеспечивающими эффект уплотнения;
- по мере увеличения энергии от 60 до 100 эВ также наблюдается уменьшение величины внутренних напряжений, что связано с процессом образования избыточного количества вакансий, уменьшающих эффект уплотнения конденсата.

Сравнивая кривые 1 и 2, видим, что они носят аналогичный характер. Но величина внутренних напряжений на кривой 2 значительно ниже, чем на кривой 1. Это связано с тем, что в данной работе углеродное алмазоподобное покрытие наносилось на более тонкие подложки и температура образцов превышала значения, приведенные в работе [4]. В дальнейшем нами предполагается проведение исследований, связанных с поиском путей снижения внутренних напряжений в углеродных алмазоподобных покрытиях. Одним из возможных путей может

быть выбор температурного режима нанесения покрытия.

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы.

1. Теневой метод определения величины прогиба подложки позволяет уменьшить погрешность измерений и может быть использован для определения внутренних напряжений в углеродных покрытиях, полученных на подложках толщиной порядка 0,1 мм.

2. Получена экспериментальная зависимость внутренних напряжений в углеродном алмазоподобном покрытии от энергетических характеристик плазменного потока углерода, позволяющая задавать режим нанесения углеродного конденсата с заданными свойствами.

3. Повышение температуры подложки в процессе нанесения углеродного алмазоподобного покрытия позволяет снизить величину внутренних напряжений сжатия в конденсате.

#### Библиографический список

1. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. – М.: Радио и связь, 1986. – 232 с.
2. Камышанченко Н.В., Колпаков А.Я., Никитин В.М. Влияние радиационных дефектов на процессы формирования углеродных алмазоподобных покрытий // Вопросы атомной науки и техники. – Харьков, 2000.

3. Чайковский Э.Ф., Пузиков В.М., Семенов А.В. Алмазоподобные пленки углерода. Обзор. инф. Сер. Монокристаллы и особо чистые вещества. НИИТЭ-ХИМ, 1985.

4. Колпаков А.Я. Влияние радиационных дефектов на процесс формирования углеродного алмазоподобного покрытия: Автореф. дисс. – Белгород, 2000.

УДК 621.793.00

## **К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВАКУУМНО-ДУГОВОГО МЕТОДА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ**

*Н.В. Камышанченко, В.М. Никитин, А.Я. Колпаков,  
Л.П. Круглова, Н.В. Стригунов, В.А. Харченко*

г. Белгород, Белгородский государственный университет

*В.Н. Инкин, Г.Г. Кириленко*

г. Зеленоград, ЗАО «Патинор Коутингс Лимитед», НИИМВ

Физика поверхностных явлений является одним из наиболее интенсивно развивающихся разделов науки. Именно на фундаментальных исследованиях в области физики поверхности твердого тела основаны успехи микро- и нанoeлектроники, гетерогенного катализа, космических технологий и т. п. Исследование разнообразных электронных, атомных и молекулярных процессов, происходящих на поверхности твердых тел, остается актуальной задачей. Однако, по нашему мнению, наибольших успехов в этой области можно добиться, совмещая самые современные методы исследования поверхности с разработкой и исследованиями новых методов ее модификации.

Бурно развивающаяся область модификации поверхности – это нанокompозиты на основе сверхтонких слоев покрытий различных материалов. Покрытия, полученные по такой технологии, отличаются более высокими микротвердостью, модулем упругости, износостойкостью, термостойкостью и т. д. Уже определены в основном возможные области применения нанослоев. Это защитные покрытия на различных видах деталей, покрытия с улучшенными трибологическими характеристиками, термобарьеры, диффузионные барьеры, биосовместимые покрытия, полупроводниковые датчики и т. д.

В последние годы во всем мире значительно вырос интерес к вакуумно-дуговым методам получения покрытий. Это подтверждается большим количеством научных

исследований и публикаций, а также повышенным интересом к этой технологии отечественных и западных компаний, традиционно использовавших в своем оборудовании магнетронные источники. Во многом благодаря работам Харьковского физико-технического института была показана эффективность этой технологии для повышения срока службы различных видов инструментов и ответственных деталей машин. Вакуумно-дуговой метод получения углеродных алмазоподобных покрытий [1], разработанный в НИЦ ХФТИ в начале восьмидесятых годов прошлого столетия, позволил существенно снизить температуру деталей в процессе нанесения на них покрытия и таким образом расширить класс обрабатываемых материалов и области применения технологии до таких экзотических, как повышение биосовместимости имплантатов и повышение срока службы магнитных головок видеоманитофонов.

Остановимся на достоинствах технологии и недостатках, сдерживающих ее использование в некоторых весьма перспективных областях. Основное достоинство – это практически стопроцентная степень ионизации продуктов эрозии, что позволяет в широких пределах управлять энергетическими характеристиками ионного компонента плазмы для обеспечения оптимальных условий формирования конденсатов. Во-вторых, высокая скорость формирования покрытий, достигающая десятков микрон в час. И, наконец, отсутствие необходимости