

диационных воздействиях.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Куликов, И.С., и др. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С. Куликов, Б.Е. Тверковкин. – Мн., 1984. – 143 с.
2. Тимошенко, С.П., и др. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М., 1979. – 576 с.
3. Коваленко, А.Д. Основы термоупругости / А.Д. Коваленко. - Киев: Наукова думка, 1970. – 239 с.

УДК 621.794.61

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ZrCN:DLC ПОКРЫТИЯ

Онисько С.Р.¹, Хвисевич В.М.¹, Чекан Н.М.², Акула И.П.²

- 1) Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь;
- 2) Физико-технический институт НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

Износостойкие покрытия стали неотъемлемым атрибутом современных металло- и деревообрабатывающих инструментов. Если до недавнего времени основным типом покрытия был нитрид титана, который использовался как универсальное покрытие для различных инструментов и условий обработки, то на сегодняшний день предпочтение отдается более специализированным покрытиям.

Авторами настоящей работы создан новый тип композиционных покрытий на основе нанокристаллического карбонитрида циркония и аморфного алмазоподобного углерода ZrCN:DLC [1]. В силу ряда особенностей роста твердых и сверхтвердых покрытий PVD методом, а также сильного различия температурных коэффициентов линейного расширения покрытия и основы, на которую оно наносится, в формируемом тонкопленочном материале возникают сильные внутренние напряжения, достигающие нескольких гигапаскалей.

Детальное описание метода получения ZrCN:DLC покрытия приводится в работе [2]. Покрытия осаждались на полированные пластины из инструментальной стали X12M и твердого сплава BK10.

Характер взаимодействия тонких пленок и покрытий с основой всецело определяет напряжения первого типа в такого рода системах. Отсутствие каких-либо сил в направлении нормали к основе и возможности свободной деформации в этом направлении позволяет рассматривать покрытие как двuosную напряженную систему. Для произвольно ориентированного кристаллита, развернутого в плоскости покрытия на угол ϕ и отклоненного от вертикали (нормали к плоскости основы) на угол ψ , величина относительной деформации определяется выражением [3]:

$$\frac{d-d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \sin^2 \psi (\sigma_x \cos^2 \phi + \sigma_y \sin^2 \phi) - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y), \quad (1)$$

где d_0 – межплоскостное расстояние для недеформированного кристаллита, E и ν модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно.

В условиях получения экспериментальных образцов покрытий использовались поликристаллические плоскопараллельные пластинки из стали и твердого сплава, расположенные перпендикулярно потоку плазмы. В таком случае можно предположить равенство напряжений, действующих вдоль осей x и y , что приводит к существенному упрощению выражения (1):

$$\frac{d - d_0}{d_0} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma \sin^2 \psi - \sigma \frac{2\nu}{E} . \quad (2)$$

Из (2) следует, что при равновеликих напряжениях вдоль двух указанных направлений исчезает зависимость от азимутального угла в положении кристаллитов относительно плоскости покрытия.

Величина межплоскостных расстояний однозначно связана с положением пика брегговской дифракции

$$2d \sin \theta = \lambda n , \quad (3)$$

где λ - длина волны рентгеновского излучения, n – порядок дифракции.

На рисунке 1 показаны совмещенные дифрактограммы при $\psi=0$ от образцов покрытий, полученных на основе стали и твердого сплава. На рисунке также присутствуют дифрактограммы для поликристаллического карбонитрида циркония стехиометрического состава $ZrC_{0,5}N_{0,5}$ [4], используемые в данном случае в качестве образца-сравнения.

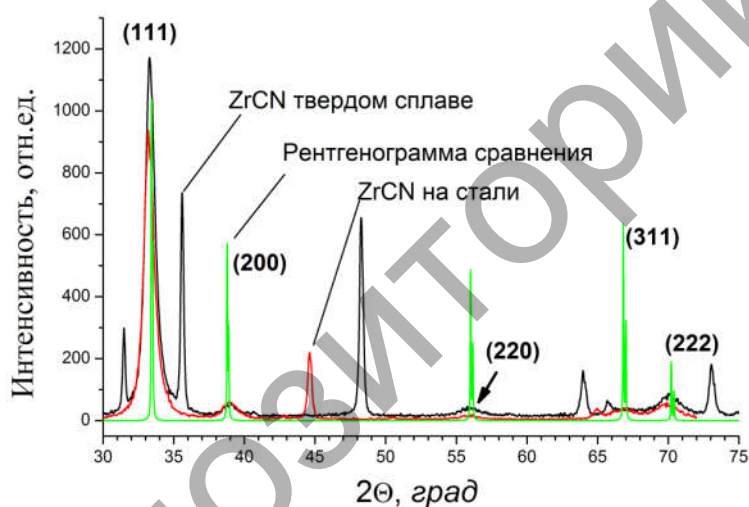


Рисунок 1 – Рентгенограммы покрытия ZrCN:DLC

Степень текстурирования покрытий η можно оценить по отношению интенсивности пика I_{111} к суммарной интенсивности всех учитываемых N пиков:

$$\eta = \left(\frac{Nr_{111}I_{111}}{\sum_{hkl} r_{hkl}I_{hkl}} - 1 \right) / (N - 1), \quad (4)$$

где r - относительная интенсивность пиков поликристаллического нетекстурированного покрытия.

Рассчитанные значения относительной интенсивности пиков поликристаллического нетекстурированного покрытия составляют следующие значения $r_{111}=1$, $r_{200}=1,85$, $r_{220}=2,08$, $r_{311}=1,61$ и $r_{222}=5,26$.

С учетом этих коэффициентов и значений интенсивностей пиков, полученных от экспериментальных образцов покрытий, расчет по формуле (4) дает $\eta=49\%$ для покрытия на твердом сплаве и $\eta=56\%$ для покрытий на стали. Это означает, что из всех имеющихся кристаллитов в покрытии приблизительно половина расположена так, что плоскость (111) направлена параллельно поверхности основы.

При исследовании деформации кристаллической решетки покрытия и связанного с ней напряжения необходимо максимально увеличить диапазон изменений угла Ψ для корректного выполнения указанного выше построения Преви и повышения точности определяемых величин.

На рисунке 2 приведены графики зависимости межплоскостного расстояния d_{220} от $\sin^2 \Psi$ для композиционного покрытия карбонитрида циркония и алмазоподобного углерода нанесенного на сталь и твердый сплав. Экспериментальные данные достаточно хорошо аппроксимируются линейной зависимостью и подтверждают корректность рассмотренной модели двусных напряжений, несмотря на то, что текстурированное покрытие не является изотропным континуумом, в приближении которого были выведены соотношения (1) и (2).

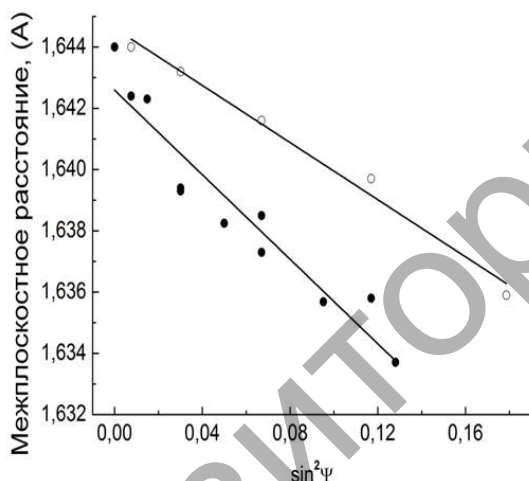


Рисунок 2 – Зависимость межплоскостного расстояния

Получаемый из графика коэффициент k линейной зависимости d от $\sin^2 \Psi$ позволяет рассчитать уровень напряжений в покрытии. Из (2) имеем:

$$d = k \sin^2 \psi + d_0(1 - 2\nu\sigma / E), \quad (4)$$

$$k = d_0\sigma(1 + \nu) / E \Rightarrow \sigma = \frac{kE}{d_0(1 + \nu)} \quad (5)$$

График рассматриваемой линейной функции пересекает ось ординат в точке:

$$d(0) = d_0(1 - 2\nu\sigma / E) \quad (6)$$

Комбинируя (5) и (6) получаем выражение для расчета напряжений:

$$\sigma = \frac{kE}{d(0)(1 + \nu) + 2\nu k}. \quad (7)$$

Рассчитанные напряжения в покрытии составили -6,9 ГПа и -9,9 ГПа для покрытия на стали и покрытия на твердом сплаве соответственно.

Полученные результаты показывают очень высокий уровень остаточных напряжений, и это требует особо тщательной подготовки поверхности основы для обеспечения достаточно сильной адгезии покрытия во избежание его отслаивания от основы.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Н.М. Чекан, С.Р. Онысько, В.В. Акулич, И.П. Акула, Е.В. Ладутько, Н.В. Логуновская. Упрочняющие градиентные покрытия на основе карбонитридов циркония для штамповой оснастки. / Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Материалы IV Международной научно-технической конференции. 19-21 октября 2009г., Минск, Беларусь // Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2009, книга 3, С. 185-190.
2. Н.М. Чекан, И.П. Акула, И.Б. Василевич, В.М. Хвисевич, С.Р. Онысько. Износостойкие нанокристаллические покрытия для штамповой оснастки. / Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Материалы IX Международной научно-технической конференции. 16-18 сентября 2014г., Минск, Беларусь // Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014, т. 2, С. 6-16.
3. P.S. Prevey. X-ray Diffraction Residual Stress Techniques, Metals Handbook. 10. Metals Park: American Society for Metals, 1986, 380-392.
4. V.V. Kosukhin, V.F. Funke, V.I. Minashkin, V.S. Smirnov, Y.P. Efremov. Zirconium nitride and carbonitrides coatings obtained by the chemical vapor deposition (CVD) method / INOMAF 1987, Vol. 23, P. 52-56.

УДК 539.3

К РЕШЕНИЮ ПЛОСКИХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕРМОУПРУГОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ПОТЕНЦИАЛА

Хвисевич В.М., Гарбачевский В.В., Веремейчик А.И.

Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь

Как известно, при создании элементов механизмов, машин первостепенным требованием является снижение их материалоемкости при одновременном обеспечении прочностных и жесткостных характеристик. Для решения такой проблемы важным обстоятельством является создание эффективных методов исследования НДС (напряженно-деформированного состояния) элементов, которые в реальных условиях подвергаются воздействию механических усилий и температурных полей. Часто рассматриваемые элементы представляют собой тела вращения.

При действии на тела высоких температур изменение температуры T приводит к существенному изменению модуля Юнга $E = E(T)$, коэффициента линейного расширения $\alpha = \alpha(T)$ при постоянном коэффициенте Пуассона ν [1].

В работе [2] показано, что максимальные напряжения в нагретой толстостенной трубе с учетом изменения модуля Юнга от температуры на 40% меньше, чем при постоянном модуле. Поэтому постановка и реализация такого рода задач актуальна и имеет практическую ценность.

Для исследования НДС в осесимметричных телах с непрерывной неоднородностью необходимо поставить краевую задачу теории упругости (термоуп-