

## СВЕРХТВЕРДЫЕ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ nc-ZrCN/a-C ПОКРЫТИЯ

Онысько С.Р.<sup>1</sup>, Хвисевич В.М.<sup>1</sup>, Чекан Н.М.<sup>2</sup>, Акула И.П.<sup>2</sup>1) Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь, [osr@tut.by](mailto:osr@tut.by)2) Физико-технический институт НАН Беларуси,  
г. Минск, Республика Беларусь, [pec@bas-net.by](mailto:pec@bas-net.by)

Покрытие карбонитрида циркония осаждалось на полированную стальную подложку методом вакуумно-дугового распыления циркониевого катода в среде азота и ацетилена ( $P(N_2) = 2,1 \times 10^{-2}$  Па,  $P(C_2H_2) = 1,0 \times 10^{-2}$  Па) на серийной установке УВНИПА-1-001. Описание метода получения покрытий приводится в работе [1]. В качестве подложки использовалась высокохромистая сталь X12МФ, применяемая для изготовления пробивного инструмента штамповой оснастки. Твердость nc-ZrCN/a-C покрытия определялась при помощи анализа нагрузочных кривых, полученных при наноиндентировании по методике Оливера и Фарра [2, 3] с применением модифицированной пирамидки Берковича ( $\alpha = 65,27^\circ$ ) с радиусом закругления при вершине около 20 нм на приборе Ultra Nano Hardness Tester фирмы CSM Instruments (Германия). В процессе данных измерений с высокой точностью регистрировалась зависимость нормального перемещения трехгранной алмазной пирамидки от создаваемой нагрузки. Во время испытаний индентор нагружался/разгружался в трех точках на расстоянии 10 мкм друг от друга при нагрузке, возрастающей от 0 до 10 мН с глубиной информативного слоя 120 нм, что составляет величину меньшую, чем 0,1 от толщины покрытия, таким образом влиянием основы на твердость покрытия можно пренебречь. Точность измерения глубины отпечатка составила  $\pm 0,04$  нм.

На рисунке 1 показан фрагмент покрытия с местами воздействия трехгранной алмазной пирамиды и кривая нагрузки/разгрузки при наноиндентировании объекта исследования. Проведенные измерения позволили установить, что для образца с нанесенным ZrCN/a-C покрытием средняя величина нанотвердости составила  $H_{IT} = 56,4$  ГПа, что связано с максимальной глубиной индентирования ( $h_{max} = 113,51$  нм), которая в 1,7 раза меньше, чем для образца без упрочненного материала ( $h_{max} = 187,96$  нм).

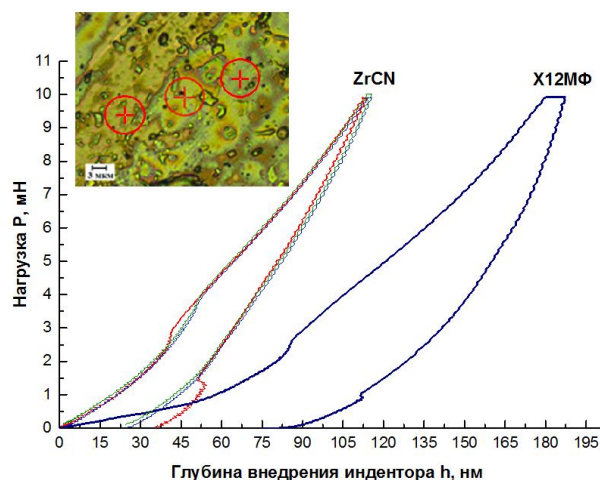


Рисунок 1 – Диаграмма нагрузки/разгрузки индентора Берковича

Результаты испытаний показывают, что полученные значения твердости существенно выше определенных микроиндентированием по методу Кнупа  $H_K = 43,2$  ГПа [4], для которого сказывается влияние подложки. Столь высокие значения твердости ZrCN/a-C покрытия объясняются его ультрадисперсной зеренной

структурой и реализацией механизма зернограницного упрочнения, а также композиционной структурой покрытия, содержащей алмазоподобный углерод [4], что в совокупности позволяет получить сверхтвердые (выше 40 ГПа) наноккомпозиты [5]. Кроме нахождения твердости метод наноиндентирования по разгрузочной кривой позволяет рассчитать приведенный модуль Юнга  $E^* = 483,11$  ГПа, необходимый для определения упругой составляющей в общей деформации покрытия.

Одним из параметров для быстрой и эффективной оценки степени упрочнения поверхности материалов является индекс вязкопластичности, который определяется отношением  $H/E$  [6] и характеризует структурное состояние материалов ( $H/E < 0,04$  – крупнокристаллические металлы и сплавы;  $H/E \approx (0,05 - 0,09)$  – мелкокристаллические и наноматериалы, покрытия, пленки;  $H/E \geq 0,1$  – аморфное или аморфно-кристаллическое). Для твердых покрытий нитрида циркония коэффициент Пуассона имеет величину порядка 0,186 [7], что в соответствии с данными приведенной выше таблицы позволяет определить модуль Юнга покрытий на уровне  $E = 466$  ГПа. В этом случае индекс вязкопластичности составляет 0,12, вплотную приближаясь к соответствующему известному показателю для аморфных материалов, оцененному на уровне 0,14, что является следствием ультрадисперсной структуры покрытия. Следует отметить, что полученное значение вязкопластичности является одним из самых высоких (для сравнения у покрытия TiN – 0,03 [8], а у ZrN – (0,07 - 0,08) [5]).

Другим важным параметром, основанным на модуле упругости и твердости, является соотношение  $H^3/E^2$ , которое определяет сопротивляемость материала к пластической деформации, трещинообразованию и разрушению, и часто служит своеобразным критерием эффективности функционирования покрытий на металлообрабатывающих инструментах. Для полученных наноккомпозиционных покрытий данный параметр составляет 0,82, что означает их способность выдерживать очень высокие нагрузки и возможность длительного функционирования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чекан, Н.М. и др. 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.
2. Oliver, W.C. Measurement of Hardness and Elastic Modulus by Instrumented Indentation: Advances in Understanding and Refinements to Methodology / W.C. Oliver, G.M. Pharr // Journal of Materials Research. – 2004. – Vol.19, iss. 1. – P. 3–20.
3. Oliver, W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G.M. Farr // J. Mater. Res. – 1992. – V. 7, №6. – P. 1564–1583.
4. Онысько, С.Р. Трещиностойкость композиционных покрытий ZrCN:a-C / С.Р. Онысько, В.М. Хвисевич, Н.М. Чекан // Перспективные материалы и технологии : монография : в 2 т. / под ред. чл.-корр. В. В. Рубаника. – Витебск : ВГТУ, 2019. – Т. 1, гл. 10. – С. 129–136.
5. Особенности структурного состояния и механических свойств покрытий ZrN и Zr(Ti)-Si-N, полученных ионно-плазменными методами / А.Д. Погребняк [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, вып. 19. – С. 103–110.
6. Finkin, E.F. Examination of abrasion Resistance Criteria for Some Ductile Metals. Journal of Lubrication Technology, 1974. 96(2). – P. 210–214.
7. Perry, A.J. X-ray residual stress measurement in TiN, ZrN and HfN films using the Seemann-Bohlin method / A.J. Perry, V. Valvoda, D. Rafaja // Thin Solid Films. – 1992. – Vol. 214, iss. 2. – P. 169–174.
8. Young's modulus of TiN, TiC, ZrN and HfN / E. Török [et al.] // Thin solid films. – 1987. – Vol. 153, iss. 1–3. – P. 37–43.