

## REFERENCES

1. Atanasiu, Gh. The Geometry of Jet Multi-Time Lagrange and Hamilton Spaces. Applications in Theoretical Physics / Gh. Atanasiu, M. Neagu, A. Oană. – Bucharest : Fair Partners, 2013.
2. Miron, R. Hamilton geometry / R. Miron // An. Șt. "Al. I. Cuza" Univ., Iași, Romania. – 1989. – Vol. 35. – P. 33–67.
3. Neagu, M. On dual jet  $N$ -linear connections in the time-dependent Hamilton geometry / M. Neagu, A. Oană // Annals of the University of Craiova – Mathematics and Computer Science Series, Romania. – 2021. – P. 1–16 (in press).

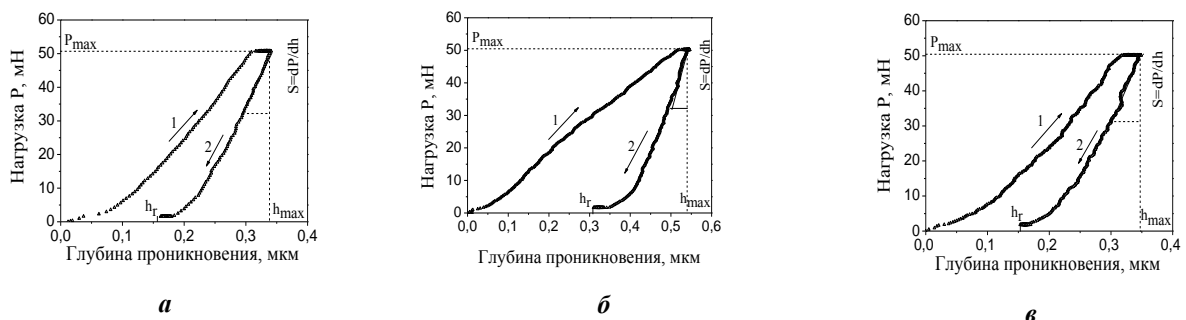
**М. М. БАРКОВСКАЯ, Р. А. ПУЛЯШКО**  
УО БрГТУ (г. Брест, Беларусь)

## СОВРЕМЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Твердость  $H$  и модуль Юнга  $E$  являются важными характеристиками, определяющими механические свойства покрытий. Так, твердость характеризует сопротивление материала упругой и пластической деформации при вдавливании индентора и определяется пределом текучести. Величина отношения твердости к модулю Юнга  $H/E$  определяется как стойкость материала к упругой деформации разрушения, которая является показателем вклада остаточной и упругой деформации покрытия при механическом воздействии, а параметр  $H^3/E^2$  применяется для оценки сопротивления материала пластической деформации [1]. Отсюда следует, что для повышения стойкости к упругой деформации разрушения и уменьшения пластической деформации формируемое покрытие должно обладать высокой твердостью и низким модулем Юнга.

В данной работе покрытия на основе системы Ti-Cr-N были сформированы вакуумно-дуговым методом при совмещении плазменных потоков Ti и/или Cr в среде реакционного газа – азота [2]. Механические характеристики сформированных покрытий исследовались методом непрерывного индентирования, информационные возможности которого намного превосходят возможности статического индентирования. Его сущность заключается в том, что в исследуемый материал внедряется индентор, и при этом регистрируют два параметра: нагрузку  $P$  и глубину внедрения индентора  $h$ . В результате получается состоящая из нагрузочной и разгрузочной ветвей диаграмма нагружения индентора ( $P$ - $h$  диаграмма), по которой определяется твердость покрытия. Кривая нагружения характеризует сопротивление материала внедрению жесткого индентора и отражает пластические деформации исследуемого материала. Разгрузочная кривая определяет, главным образом, упругие свойства.

На рисунке 1 приведены  $P$ - $h$  диаграммы для покрытий на основе системы Ti-Cr-N, осажденных на сталь Ст3, для анализа которых использовался метод Оливера-Фарра [1; 3]. Полученные из  $P$ - $h$  диаграмм значения твердости и модуля Юнга покрытий, а также результаты расчетов параметров  $H/E$  и  $H^3/E^2$  представлены в таблице. Наибольшее значение величины  $H/E$  – 0,11 имеет покрытие  $Ti_{0,6}Cr_{0,4}N$ , обладающее высокой твердостью 35,9 ГПа и минимальным модулем Юнга 285 ГПа. Это свидетельствует об увеличении удельного вклада остаточной деформации по сравнению с упругой деформацией. Следует отметить, что изменение механических характеристик, в частности твердости, связано с изменением структурного состояния покрытий (стехиометрией, размером зерна) [2].



1 – кривая нагружения; 2 – кривая разгрузки;  
а – покрытие TiN, б – покрытие CrN, в – покрытие  $Ti_{0,6}Cr_{0,4}N$

**Рисунок 1. –  $P$ - $h$  диаграммы покрытий при максимальной нагрузке на индентор Берковича равной 50 мН**

Таблица – Механические характеристики вакуумно-дуговых покрытий (измерено при максимальной нагрузке на индентор Берковича равной 50 мН)

Покрытие	$H$ , ГПа	$E$ , ГПа	$H/E$	$H^3/E^2$ , ГПа
Сталь Ст3	1,9±0,1	178±6	–	–
TiN	30,8±0,7	320±8	0,09	0,28
CrN	19,8±0,5	213±13	0,09	0,17
Ti <sub>0,6</sub> Cr <sub>0,4</sub> N	35,9±0,7	285±8	0,12	0,57

Анализ зависимостей  $H/E$  для различных материалов показал [4], что покрытия могут быть собраны в группу в соответствии со своим структурным состоянием. Так, к первой группе относятся кристаллические материалы с отношением  $H/E < 0,04$ , ко второй группе с отношением  $H/E 0,05–0,09$  – мелкокристаллические материалы, подвергнутые высоким степеням деформации, а третью группу представляют материалы в аморфном и нанокристаллическом состояниях с отношением  $H/E > 0,1$ . Тогда, согласно этой классификации, исследуемые покрытия TiN и CrN принадлежат второй группе – мелкокристаллические материалы; а покрытие Ti<sub>0,6</sub>Cr<sub>0,4</sub>N, имеющее нанокристаллическую структуру со средним размером зерна не менее 6–8 нм [2], – к третьей группе.

Параметр  $H^3/E^2$  является показателем стойкости материала к пластической деформации и позволяет оценить эффективность защиты покрытия, подвергнувшегося внешней нагрузке, т. е. стойкость покрытия к трещинообразованию. К настоящему времени не существует данных о том, какое максимальное значение должен иметь параметр  $H^3/E^2$ , при котором в покрытии не формировались бы трещины. Анализ литературных данных [1; 3; 5] показывает, что стойкость покрытия к трещинообразованию возрастает при увеличении параметра  $H^3/E^2$ . Кроме этого, стойкость покрытий к пластической деформации, т. е. параметр  $H^3/E^2$  должен быть максимален для того, чтобы улучшилось упругое восстановление покрытия  $W_e$  и его ударную вязкость. Полученные в данной работе покрытия имеют значение параметра  $H^3/E^2$  в диапазоне от 0,17 до 0,57 ГПа, где максимальное значение соответствует покрытию Ti<sub>0,6</sub>Cr<sub>0,4</sub>N.

Стоит отметить, что для многих материалов высокие значения  $H/E$  являются показателем высокой износостойкости [2; 4; 5]. Поскольку покрытие Ti<sub>0,6</sub>Cr<sub>0,4</sub>N имеет высокое значение параметра  $H/E – 0,12$ , а его модуль упругости составляет 285 ГПа и близок к модулю Юнга материала подложки (187 ГПа), то можно предположить, что данное покрытие обнаружит высокие эксплуатационные показатели при работе в условиях абразивного и ударного износа. Кроме этого, одним из бесспорных преимуществ сформированных покрытий с низким модулем упругости является их лучшее соответствие стальным подложкам ( $E = 1780$  ГПа), что приводит к минимизации упругих напряжений на границе раздела «покрытие-подложка» и внутренних остаточных напряжений в системе. Это, в свою очередь, может приводить к существенному уменьшению износа.

Таким образом, используя связь между параметрами  $H$ ,  $E$  и  $H^3/E^2$ , можно спрогнозировать механическое поведение сформированных вакуумно-дуговых покрытий, в частности, определить связь между износостойкостью покрытия и его структурно-фазовым состоянием. Важным преимуществом является возможность получения покрытий на основе системы Ti–Cr–N, обладающих одинаковой твердостью и различным модулем Юнга, что позволяет подбирать защитные покрытия для конкретных целей и задач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Головин, Ю. И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикронных, тонких приповерхностных слоях и пленках / Ю. И. Головин // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, Вып. 12. – С. 2113–2142.
2. Барковская, М. М. Состав и коррозионная стойкость покрытий на основе нитридов титана и хрома / М. М. Барковская, В. В. Углов, В. В. Ходасевич // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2011. – № 4. – С. 1–6.
3. Наноструктурные покрытия / под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона. – М. : Техносфера, 2011. – 752 с.
4. Сопоставление характеристик вакуумно-дуговых наноструктурных TiN покрытий, осаждаемых при подаче на подложку высоковольтных импульсов / В. М. Шулаев [и др.] // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5, № 1–2. – С. 94–97.
5. Musil, J. Hard and superhard nanocomposite coatings / J. Musil // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 125. – P. 322–330.