

Кукареко В.А., Кушнеров А.В.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Введение. Наноструктурные покрытия имеют широкую область применения для деталей машин и инструментов, изготавливаемых из различных материалов. Использование покрытий позволяет объединить свойства двух материалов – подложки и самого покрытия и получить поверхностную слоистую композицию, обладающую характеристиками, которые не могут быть получены при использовании одного материала. Высокие твердость, износостойкость, а также химическая стабильность покрытий на основе нитрида титана обеспечили их широкое использование в различных отраслях промышленности [1,2]. Более перспективными являются многоэлементные нитридные покрытия, в частности TiCrN . Однако известно, что повышенная твердость покрытий часто сопровождается снижением их трещиностойкости [3,4]. Образование трещин в покрытиях существенно снижает их надежность и долговечность, поскольку позволяет кислороду легко проникать к поверхности подложки, вызывая ее интенсивное окисление, особенно при повышенных температурах. Кроме того, образование свободных краев покрытия по краям трещин приводит к возникновению в данных областях концентраторов сдвиговых и нормальных напряжений, что способствует отслоению и скалыванию покрытий [5,6]. Для улучшения свойств наноструктурных покрытий может применяться отжиг [7]. Поэтому представляет интерес исследовать влияние отжига покрытий TiCrN на их трещиностойкость.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования являются образцы покрытий TiCrN , сформированные методом сепарируемого вакуумно-дугового осаждения на подложку из сплава $\text{Zr}_{2,5}\text{Nb}$. Толщина покрытий составляет 6-7 мкм.

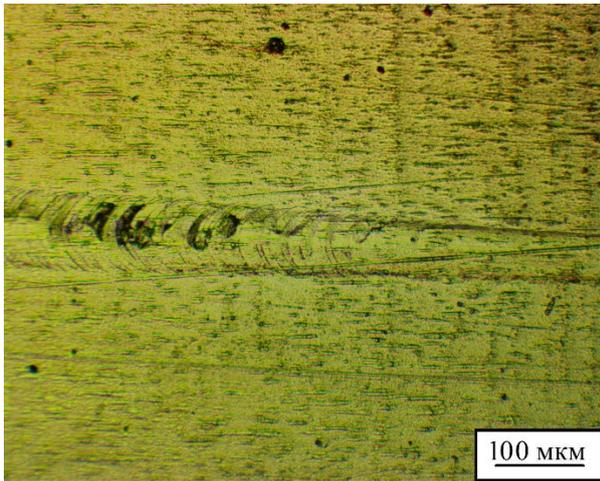
Отжиг покрытий TiCrN проводился на воздухе в муфельной печи SNOL 7,2/1100 при температурах 500 и 530 °С в течение часа

Скретч-тестирование проводилось на трибометре MFT-5000. К поверхности образца с покрытием подводится индентор Роквелла (алмазный наконечник с радиусом при вершине 20 мкм и углом 120°). Индентор перемещался вдоль поверхности на расстояние 5,0 мм и одновременно прикладывалась постепенно увеличивающаяся нагрузка в пределах 1...48 Н. В итоге на поверхности формировалась царапина переменной глубины. Скорость нагрузки индентора – 14 Н/мин, скорость перемещения индентора – 1 мм/мин.

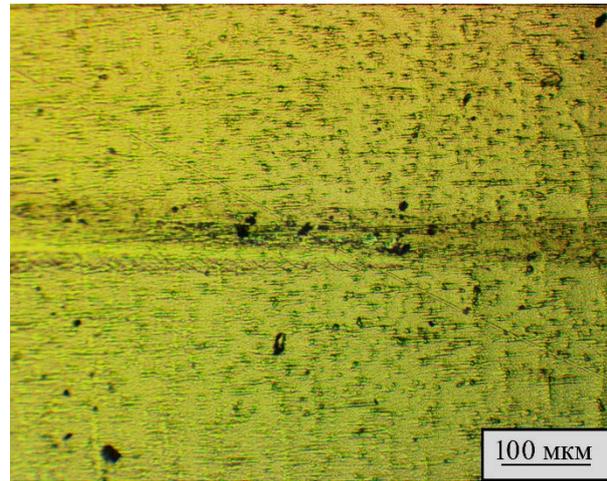
Исследование поверхности покрытий и царапин проводилось с помощью микроскопа Альтами MET 1MT и программного обеспечения AltamiStudio 3.3

Результаты и их обсуждение. Внешний вид царапин, полученных в результате скретч-тестирования, представлен на рисунке 1. Наименьшая нагрузка, при которой наблюдается характерное для покрытия разрушение, называется критической нагрузкой (L_c). L_{c1} обычно соответствует началу когезионного разрушения покрытия (трещинообразование), L_{c2} – первые отслоения (частичные или полные) покрытия от подложки, L_{c3} – полный износ или разрушение покрытия [8-10]. Характеристикой трещиностойкости выбрана нагрузка L_{c1} , при которой образовывались первые трещины на поверхности царапины.

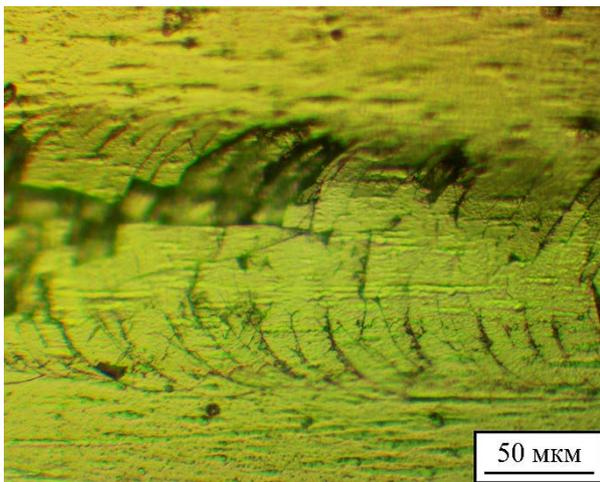
Формирование первых трещин происходит вдоль краев царапины. Это связано с тем, что в процессе царапания происходит пластическое отеснение материала подложки из области вдавливания индентора, и при этом возможно образование навалов по краям царапины. При достижении определенной нагрузки и глубины проникновения индентора в образец, высота навалов возрастает и в зонах максимальной локальной кривизны поверхности покрытия вдоль



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Изображения царапин на поверхности покрытий TiCrN в исходном состоянии (а, в) и после отжига в течении часа на воздухе при 500 °С (б)

краев царапины образуются трещины [11]. В исходном состоянии покрытия TiCrN критическая нагрузка L_{c1} составила 7,9 Н. После отжига при 500 °С, 6 Н, при 530 °С, 6 Н. Значительное уменьшение критической нагрузки связано с разупрочнением покрытия и (см. табл. 1) и увеличением пластического оттеснения материала. При дальнейшем увеличении нагрузки на индентор на дне царапины начинают образовываться трещины, направление которых, перпендикулярно направлению движения индентора (поперечные трещины). Это происходит, когда одновременный рост приложенной нагрузки и коэффициента трения обуславливает существенное увеличение растягивающих напряжений, вызванных трением [11]. Образование поперечных трещин покрытия TiCrN в исходном состоянии происходит при нагрузке 8,1 Н, а после отжига 500 °С, 1,0 ч. В таблице 1 представлены дюрометрические характеристики покрытий TiCrN.

Таблица 1 – Значения микротвердости покрытий TiCrN

Покрытие	HV 0,025
TiCrN исх. состояние	2600-2800
TiCrN отжиг 500 °С	2150-2250
TiCrN отжиг 530 °С	1800-2000

Таким образом, отжиг покрытий TiCrN приводит к снижению нагрузки трещинообразования, что связано с разупрочнением покрытия и уменьшением его микротвердости.

Заключение. Исследовано влияние отжига на трещиностойкость вакуумно-дуговых покрытий TiCrN.

Установлено, что в результате отжига покрытий TiCrN при 500 и 530 °С критичная нагрузка образования продольных трещин уменьшается, что связано с разупрочнением покрытия.

Литература

1. Musil, J. Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness / J. Musil // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 207. – P. 50–65.
2. Cavaleiro, A. Nanostructured Coatings / A. Cavaleiro, J. T. M. De Hosson (ред.) // Berlin: Springer-Verlag, – 2006. – 648 p.
3. Zhang, S. Ni-toughened nc-TiN/a-SiN, nanocomposite thin films / S. Zhang, D. Sun, Y. Fu, Y.T. Pei, J.Th.M. De Hosson // *Surf. Coat. Technol.* – 2005. – V. 200. – P. 1530-1534.
4. Wang, C. Toughness enhancement of nano structured hard coatings: Design strategies and toughness measurement techniques / C. Wang, K. Shi, C. Gross, J.M. Pureza, M. de M. Lacerda, Y.W. Chung // *Surf. Coat. Technol.* – 2014. – V. 257. – P. 206-212.
5. Панин, А.В. Влияние наноструктурирования подложки Cu разрушение теплозащитных покрытий SiAlN при одноосном растяжении Ti / А.В. Панин, М.С. Казаченок, А.Р. Шугуров, В.П. Сергеев // *ЖТФ*. -2012. – Т. 15. – № 6. – С. 44-52.
6. Chen, В.Ф. In situ observation of the cracking behavior of TiN coating on 304 stainless steel subjected to tensile strain / В.Ф. Chen, J. Hwang, G.P. Yu, J.H. Huang // *Thin Solid Films*. – 1999. – V. 352. – P. 173-178.
7. Константинов, В.М. Адгезия покрытий Ti-N на модифицированной стальной подложке / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, А.В. Ковальчук // *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып. 35 / ред. Колл.: В.И. Тимошпольский [и др.]*. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 272–281.
8. Матюнин, В.М. Определение механических свойств и адгезионной прочности ионно-плазменных покрытий склерометрическим методом / В.М. Матюнин, П.В. Быков, Р.Х. Сайдахмедов и др. // *МИТОМ*. – 2002. – № 3. – С. 36 – 39.
9. Гадалов, В.Н. К исследованию механических свойств защитных покрытий методом царапания / В.Н. Гадалов, Ю.В. Болдырев, Ю.Г. Алехин и др. // *Конструирование, использование и надежность машин с/х назначения: сб. науч. работ. межвуз. научн.-практ. конф. Брянск.: БрянскГСХА. – 2004. – С. 245-250.*
10. Хрущев, М.Н. Склерометрия / М.Н. Хрущев // М: Наука. – 1968. – 205 с.
11. Шугуров, А.Р. Исследование трещиностойкости покрытий TiAlN методом скретч-тестирования / А.Р. Шугуров, А.А. Акуликин, А.В. Панин [и др.] // *Физическая мезомеханика* – 2015 – Т.18 № 6,– С. 66-74