

Волнообразные фрезы со сдвинутыми вдоль оси зубьями реализуют схему срезания стружки, при которой каждый участок данного лезвия снимает стружку в направлении, отличающемся от направления на предыдущем лезвии, что меняет все показатели процесса.

Экспериментально показано, что фрезы с волновыми зубьями по сравнению со стандартными фрезами для обработки титановых сплавов дают меньшую удельную силовую нагрузку, большую стойкость и меньший наклеп поверхностного слоя.

Волновые фрезы способствуют эффективному ломанию стружки по ширине срезаемого слоя, что значительно облегчает ее дальнейшую переработку.

Список литературы

1. Кривоухов В. А. Обработка резанием титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. – 180 с.
2. Петруха П. Г. Резание труднообрабатываемых материалов. - М.: Машиностроение, 1972. – 176 с.
3. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов. - М.: Высшая школа, 1985. - 304 с.
4. Emmanuel O/ Ezugwu, Rosenmar Batista Da Silva, Wisley Falco Sales. Overview of the Machining of Titanium Alloys. Encyclopedia of Sustainable Technologies. 2017. Pp.487-506
5. Каталог режущего инструмента URL:[http:// www. minicut.com/wp-content/uploads/catalogues/catch_the_wave_titanium.pdf](http://www.minicut.com/wp-content/uploads/catalogues/catch_the_wave_titanium.pdf).
6. Каталог режущего инструмента
7. URL: [https:// www. heritagecutter.com/BrubakerWeldon/PublicStore/catalog/M42-Multi-Flute-CC,228.aspx](https://www.heritagecutter.com/BrubakerWeldon/PublicStore/catalog/M42-Multi-Flute-CC,228.aspx).
8. Каталог режущего инструмента URL:<http://www.endmill.com/pages/software.html>.
9. Каталог режущего инструмента URL:https://www.widia.com/content/dam/kennametal/widia/common/resources/downloads/literature/WIDIA%20Catalogs/Hanita-Rubig_A-09-02077EN_mm.pdf.
10. Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х. Схема образования стружки при несвободном резании // Станки и инструменты. №2, 2018. С.35-40.
11. Коровин Г.И., Филиппов А.В., Проскоков А.В., Горбатенко В.В. Влияние геометрических параметров режущего лезвия на формирование области пластической деформации при резании титанового сплава ОТ-4.// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроения.- 2016.-№17. с.56-64.
12. Cotterel I M., Byrne G. Characterisation of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V. CIRP. Journal Manufacturing. Science. Technology, 1 (2008), pp. 81-85.
13. Abdulhakim Ali Sultan, A. Chukwujekwu Okafor. Effects of geometric parameters of wavy-edge bull-nose helic on cutting force prediction in end-milling of Inconel end-mill under MQL cooling strategy718. Journal of Manufacturing Processes 23 (2016) 102-114

ОСОБЕННОСТИ АДГЕЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

И.С. Ардашева¹, студент, П.О. Куминов¹, студент, И.М. Гончаренко^{1,2}, к.т.н., доц.

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

634050, г. Томск, пр. Ленина 30, тел. (3822)-70-16-19

²Институт сильноточной электроники СО РАН

634055, г. Томск, пр.-т Академический, 2/3, тел. (3822)-49-13-00

E-mail: inkar_love.ms.22@mail.ru, pavelkuminov@mail.ru

Представлены результаты исследования зависимости адгезии и твердости нанокристаллических нитридных покрытий Ti-Al-N, нанесенных на различные подложки, от величины и времени импульсного отрицательного смещения, подаваемого на обрабатываемые образцы. Проведено сопоставление регистрируемых параметров с эволюцией структуры и химического состава поверхностного слоя.

При разработке технологических процессов ионно-плазменных методов нанесения покрытий с требуемыми структурой и свойствами, необходимо учитывать влияние условий осаждения на такие основные механические характеристики материала, как твердость, модуль Юнга и адгезию системы покрытие/подложка.

Например, покрытия системы Ti-Al-N отличаются высокой стабильностью к окислению, как при обычных, так и при повышенных температурах [1, 2]. Однако, обеспечение хорошей адгезии [3] данного типа покрытия к материалам, из которых выполнены конкретные детали зависит от большого числа факторов. Как правило, материалы защитного покрытия и формообразующего субстрата различаются по структуре, кристаллохимическим, физико-механическим и теплофизическим свойствам. Вследствие чего, основной причиной снижения прочности на границе раздела и разрушения покрытий

является рост внутренних остаточных напряжений. Количественно величина этих напряжений зависит от упругопластических свойств материалов конденсата и субстрата [4]. Управляя параметрами процесса при нанесении функциональных пленок, и тем самым, изменяя химическое взаимодействие, скорость роста, термические условия на поверхности конденсации разных материалов, можно попытаться прийти к результату, когда нанокomпозитные покрытия с одинаковой твердостью могут различаться по величине модуля упругости (E), по стойкости к упругой деформации разрушения (H/E) и сопротивлению пластической деформации (H^3/E^2) [5-6]. По этим параметрам можно контролировать механическое поведение пленки и оценивать связь между растрескиванием и вязкостью.

Основная идея настоящей работы заключалась в экспериментальном изучении комплекса физико-механических характеристик функциональной поверхности, полученной в результате напыления пленки TiAlN по разным режимам на подложки из материалов, сильно отличающихся по составу и механическим свойствам (аустенитная сталь 12X18H10 и твердый сплав ВК-8). Покрытия Ti-Al-N толщиной 2 мкм были получены методом вакуумно-дугового распыления порошкового спеченного катода Ti-Al в газоразрядной плазме азота. Ток дугового разряда испарителя металла составлял 50 А, ток дугового газового разряда был в пределах 5-10 А., давление газа в камере – 0,266 Па. Изучали влияние материала субстрата и потенциала отрицательного смещения, подаваемого на образцы при нанесении пленки, в диапазоне 0-300 В на изменение значений твердости и адгезии нанокристаллических покрытий.

Определение твердости (H) и модуля упругости (E) пленок измерялись динамическим методом Оливера-Фарра на приборе NHT-S-AX-000X (CSEM Instruments) с помощью четырехгранной пирамиды Виккерса при нагрузке 50 мН. Толщину покрытий определяли с помощью прибора Calotest фирмы CSEM Instruments, а адгезию – скретч-тестером Micro-Scratch Tester MST-S-AX-000. На основе этих измерений был проведен анализ зависимости адгезии от механических характеристик поверхности и, соответственно, от условий формирования покрытия.

Все пленки TiAlN имели одинаковую толщину $h \sim 2$ мкм. Зависимость механических свойств нанокomпозитного покрытия TiAlN от величины отрицательного смещения, характеризующую энергию ионов, бомбардирующих поверхность в процессе конденсации пленки на подложках выполненных из двух различающихся по свойствам материалов, представлена на рис.1. Видно, что пленки, полученные при одинаковых условиях, но на разные материалы поверхности их формирования, имеют отличия по твердости и модулю упругости. Кроме того, мы видим, что с ростом энергии ионов соотношения данных величин изменяются неодинаково. Для подложки, выполненной из стали, существует некоторое строгое соотношение между H и E , а именно H почти линейно возрастает с увеличением E (рис.1б) при росте напряжения смещения. Напротив, для подложки из твердого сплава с изменением величины смещения поведение указанных параметров носит немонотонный характер (рис.1а).

Экспериментальные значения H и E позволили нам рассчитать соотношения (H/E) и (H^3/E^2) (таблица 1). Видно, что эти механические характеристики зависят как от материала подложки, так и от параметров физического осаждения.

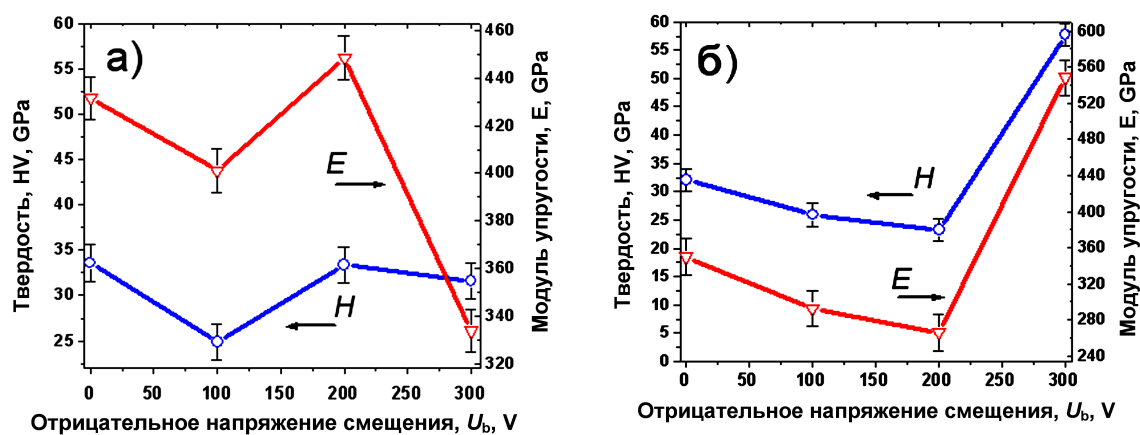


Рис.1. Экспериментальные значения твердости и модуля Юнга, как функции от величины отрицательного смещения, подаваемого на обрабатываемые образцы в процессе конденсации пленки TiAlN. (а) – для образца из твердого сплава ВК8 с покрытием (TiAl)N; (б) – для стального образца с покрытием (TiAl)N.

Таблица 1.

Сравнение механических характеристик нанокompозитных пленок TiAlN одинаковой толщины $h \sim 2$ мкм, полученных в настоящей работе.

Смещение, U, В	H, GPa		W_e , %		H/E, GPa		H^3/E^2 , GPa	
	BK8	Сталь	BK8	Сталь	BK8	Сталь	BK8	Сталь
0	33,6	32,1	58,8	60,4	0,0787	0,0866	0,204	0,234
100	24,9	25,9	51,4	60,9	0,0655	0,0886	0,117	0,204
200	33,4	23,2	61,0	63,0	0,0743	0,0873	0,191	0,187
300	31,6	57,8	64,2	78,9	0,0869	0,1052	0,247	0,659

Материалом с наиболее высокими отношениями H/E и H^3/E^2 является пленка, полученная на стальной подложке при $U_b = -300$ В. Эта же пленка обладает максимальным значением упругости W_e .

Результаты обработки сигналов акустической эмиссии «скретч-теста» для образцов с покрытиями TiAlN, полученными при напряжении смещения $U_b = -300$ В показали следующее. Разрушение покрытия, нанесенного на поверхность стали, начинается при критической нагрузке $L_C = 1,8$ Н, а поверхности сплава BK8 – $L_C = 6,5$ Н. Повышенная хрупкость и низкая стойкость покрытия на стальном образце обусловлена большим значением модуля E, чем на твердом сплаве.

Таким образом, установлено, что осажденные методом электродугового распыления наноструктурные пленки TiAlN обладают различным отношением между твердостью и модулем упругости в зависимости от материала подложки и энергии ионов, бомбардирующих поверхность. Для прогнозирования склонности материала покрытия к отслоению при локализованной деформации следует определять показатель стойкости его к пластической деформации, который рассчитывается из данных, полученных в результате наноиндентирования. Снижение стойкости сцепления покрытия с подложкой следует ожидать в случае высоких значений параметра H^3/E^2 . Ориентируясь на данную закономерность и управляя параметрами процесса осаждения, можно получать сверхтвердые нанокристаллические покрытия с различным сочетанием упругих и пластических характеристик, обеспечивающих их применение в конкретных практических задачах.

Список литературы

1. Y. Yin, L. Hang, S. Zhang, X.L. Bui. Thermal oxidation properties of titanium nitride and titanium–aluminum nitride materials — A perspective for high temperature air-stable solar selective absorber applications. *Thin Solid Films* 515 (2007), pp. 2829–2832
2. J.H. Hsieh, A.L.K. Tan, X.T. Zeng. Oxidation and wear behaviors of Ti-based thin films. *Surface & Coatings Technology* 201 (2006), pp. 4094–4098.
3. Тарбоков В.А., Ремнев Г.Е. Увеличение адгезии TiN покрытия на твердосплавном инструменте, предварительно обработанном мощным ионным пучком. // ФХОМ, 2003, № 6, с. 40-43.
4. Mayrhofer H., Mitterer C. et al. Microstructural design of hard coatings // *Prog. Mater. Sci.* 51 (2006) 1032-1114.
5. Ribeirj E., Malczyk A., Carvalho S.A. et al. Effects of ion bombardment on properties of d.c. sputtered superhard (Ti, Si, Al)N nanocomposite coatings. // *Surf. Coat. Technol.* 151/152 (2002) 515-520.
6. Штанский Д.В., Кулинич С.А., Левашов Е.А., Moore J.J. Особенности структуры и физико-механических свойств наноструктурных тонких пленок. // *Физика твердого тела*, 2003, Том 45, вып 6, с. 1122-1129.