

УДК 621.934(043.3)

С.Д. Латушкина, канд. техн. наук;  
О.И. Посылкина, науч. сотр.  
(ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»)  
Д.В. Куис, доц., канд. техн. наук;  
П.В. Рудак, доц., канд. техн. наук;  
О.Ю. Пискунова, инж., М.В. Петровский, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

### **ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕМ**

В течение последних десятилетий упрочняющие покрытия, полученные физическими и химическими методами, нашли широкое применение в области защиты обрабатываемого инструмента от износа. В настоящее время развивается целое научное направление – трибология покрытий, способствующее получению новых знаний, связанных с повышением долговечности и надежности узлов трения машин, механизмов и инструментов.

В настоящей работе для формирования многокомпонентных покрытий использовалась вакуумно-дуговая модернизированная установка УРМЗ.279.048, оснащенная сепаратором макрочастиц.

Покрyтия формировались путем одновременного распыления двух катодов (титана и алюминия) в среде очищенного азота, потенциал смещения на подложке составлял – 60 В. Рентгеноструктурный анализ проводился с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3 в интервале углов 30-120° в фильтрованном  $\text{Cu-K}_\alpha$ -излучении. Использование основных характеристик дифракционных максимумов позволило рассчитать параметр решетки ( $d$ ), размер областей когерентного рассеяния ( $L$ ).

Микротвердость покрытия измеряли нанотвердомером Duramin 5 при нагрузке 25 г. Для проведения наноиндентирования в работе использовался зондовый комплекс NanoIndenter G200 «Agilent» для измерений механических параметров методом непрерывного вдавливания по методике Оливера-Фара, с применением трехгранного алмазного индентора Берковича с радиусом закругления при вершине 20 нм при вдавливании наноиндентора на глубину 500 нм

В результате рентгеноструктурного анализа покрытий с различным соотношением элементов обнаружено, что основной фазой в составе покрытий при содержании алюминия 10-25 ат. % является кристаллическая фаза твердого раствора  $(\text{Ti,Al})\text{N}$  с кубической структу-

рой типа NaCl, в то время как при содержании алюминия в покрытии 30 ат.% происходит образование гексагональной фазы  $Ti_3Al_2N_2$  (табл. 1). В результате проведенных исследования покрытий с атомным содержанием алюминия 40-55% было выявлено наличие двух фаз TiN и AlN (табл. 1).

Установлено, что размер кристаллитов в направлении роста составил от 1,5 до 13 нм в зависимости от концентрации алюминия в покрытиях.

**Таблица 1– Фазовый и элементный состав покрытий T-Al-N**

Технические параметры			Элементный состав, ат. %				Фазовый состав покрытий	
$I_{Ti}, A$	$I_{Al}, A$	$P_{N_2}, Pa$	Ti-Al-N система	Ti	Al	N		$C_{Al}/C_{Ti}$
70	50	$0,3 \times 10^{-2}$	$Ti_{0,90}Al_{0,10}N$	54,65	6,10	39,25	0,11	(Ti,Al)N
70	60	$0,3 \times 10^{-2}$	$Ti_{0,80}Al_{0,20}N$	51,65	13,13	35,22	0,25	(Ti,Al)N
50	60	$0,3 \times 10^{-2}$	$Ti_{0,70}Al_{0,30}N$	50,01	21,19	28,80	0,42	$Ti_3Al_2N_2$
50	65	$0,3 \times 10^{-2}$	$Ti_{0,60}Al_{0,40}N$	38,68	27,35	33,97	0,71	TiN, AlN
40	70	$0,3 \times 10^{-2}$	$Ti_{0,45}Al_{0,55}N$	31,66	37,63	30,71	1,19	TiN, AlN

В зависимости от способа и условий осаждения нитрида титана его микротвердость не превышает 20-22 ГПа. Введение в состав покрытий на основе нитрида титана алюминия приводит к повышению их микротвердости до 25-39 ГПа в зависимости от концентрации алюминия (табл. 2). Однако только высокая твердость покрытия не является достаточным условием обеспечения повышенных эксплуатационных свойств покрытий. Для повышения стойкости к упругой деформации материал должен обладать высокой твердостью ( $H$ ) при одновременном низком модуле упругости ( $E$ ). Высокая твердость гарантирует устойчивость к абразивному износу, а низкий модуль упругости обеспечивает высокую устойчивость к пластической деформации и позволяет заданной нагрузке распространяться в более широких пределах. Количественной сравнительной характеристикой сопротивления материала к упругой деформации разрушению служит величина отношения нанотвердости к эффективному модулю упругости ( $H/E^*$ ), называемая индексом пластичности. Таким образом, механические свойства нанокompозитных покрытий характеризуются как твердостью  $H$ , так и эффективным модулем упругости,  $E^* = E/(1 - \nu^2)$ , а также упругим восстановлением  $W_e = H^2/E^*$  ( $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона). Зная величины  $H$  и  $E^*$ , можно рассчитать соотношение  $H^3/E^{*2}$ , величина которого характеризует сопротивление материала пластической деформации. В настоящей работе данные величины были рассчитаны по кривым нагрузки/разгрузки, полученным с использованием нанотвердометра.

Исходя из анализа рассчитанных характеристик, следует, что покрытия системы Ti-Al-N, характеризуются высокими значениями, как упругого восстановления, так и сопротивления пластической деформации (табл. 2).

**Таблица 2 – Механические характеристики покрытий**

Покрытие	$H$ , ГПа	$E^*$ , ГПа	$H/E^*$	$W_e$ , ГПа	$H^3/E^{*2}$ , ГПа
Ti <sub>80</sub> Al <sub>20</sub> N	32,8	350	0,093	3,07	0,29
Ti <sub>70</sub> Al <sub>30</sub> N	34,3	345	0,994	3,410	0,339
Ti <sub>60</sub> Al <sub>40</sub> N	30,2	353	0,086	2,584	0,221
Твердый сплав ВКЗОМ	21,5	665	0,69	0,032	0,02

Высокая твердость покрытий в сочетании с высоким сопротивлением к деформации позволяет рекомендовать данные покрытия для упрочнения режущего инструмента с целью снижения его абразивного и адгезионного износа.