

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ PVD-ПОКРЫТИЙ

М. В. ЧУПРОВ

Научный руководитель Е.С. СОТОВА, канд. техн. наук, доц.
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

Введение. Для высокотехнологичных отраслей обработка резанием конструкционных материалов (нержавеющие стали, жаропрочные и титановые сплавы) является важной и технологически сложной задачей. При обработке металлообрабатывающий инструмент подвержен интенсивному износу. В целях повышения долговечности инструмента применяют нанокompозитные износостойкие PVD-покрытия, которые, в свою очередь, способны придать поверхностному слою режущего инструмента, изготовленному из твердого сплава, уникальный комплекс функциональных характеристик: повышенную твердость, устойчивость к окислению, термомеханическую стабильность, более низкий коэффициент трения.

Перспективные нанокompозитные износостойкие PVD-покрытия. Объектом исследования выступали тестовые образцы, представляющие собой диски диаметром 30 мм толщиной 5 мм из твердого сплава марки BK10XOM, с нанесенными экспериментальными нанокompозитными износостойкими PVD-покрытиями (табл. 1), выбранными на основе анализа современных научных публикаций и патентных данных.

Табл. 1

Наименование образца с покрытием	Средняя плотность микрокапельной фазы на поверхности покрытия $\bar{P} \pm 3\sigma$, %	Результат исследования поверхности лунок износа тестовых образцов с покрытиями		
		Толщина покрытия, мкм	Объем изношенного материала, мм ³	Скорость износа, мм ³ /мин
AlTiN-G	$4,70 \pm 1,57$	1,487	$0,144 \cdot 10^{-3}$	$4,81 \cdot 10^{-6}$
TiAlN-ML	$0,48 \pm 0,21$	1,383	$0,100 \cdot 10^{-3}$	$5,02 \cdot 10^{-6}$
TiAlCrSiN	$1,33 \pm 0,20$	0,307	$0,306 \cdot 10^{-3}$	$15,29 \cdot 10^{-6}$
TiN	$1,36 \pm 0,54$	1,681	$0,208 \cdot 10^{-3}$	$10,38 \cdot 10^{-6}$

Продолжение табл. 1

Наименование образца с покрытием	Микротвердость покрытия $H_{\mu 50}$, ГПа	Класс адгезионной прочности по стандарту ISO 26443	Трещиностойкость и адгезионная прочность покрытия, Н
AlTiN-G	$48,0 \pm 7,6$	HF3	~16
TiAlN-ML	$38,5 \pm 1,6$	HF2	~18
TiAlCrSiN	$22,2 \pm 0,7$	HF1	~20
TiN	$33,1 \pm 1,3$	HF1	~24

Твердосплавные образцы: AlTiN-G (с градиентным покрытием AlTiN), TiAlN-ML (с многослойным покрытием TiAlN), TiAlCrSiN (с монослойным

покрытием TiAlCrSiN), TiN (с монослойным покрытием TiN). Износостойкие нитридные покрытия были нанесены методом физического осаждения из паровой фазы (PVD) на установке $\pi 311$, Platin AG (Швейцария).

Также для образцов проводился анализ химического состава покрытий и определение коэффициента трения.

Плотность микрокапельной фазы на поверхности нанесенного покрытия оценивали по отражающей способности поверхности образцов. В результате анализа выявлено, что на величину плотности существенное влияние оказывает количественное соотношение тугоплавких и легкоплавких компонентов в покрытии. При этом многослойная архитектура покрытия (TiAlN-ML) способствует снижению образования микрокапель.

Оценка износостойкости в условиях абразивного износа. Оборудование Calowear (CSM Instruments SA, Peseux, Швейцария). Исследованные покрытия демонстрируют, что увеличение толщины покрытия не гарантирует снижение скорости износа и указывает на доминирующую роль физико-механических свойств и фазового состава покрытия по сравнению с его геометрической толщиной.

Адгезионная прочность покрытий к твердосплавной подложке. Метод Роквелла, стандарт ISO 26443. Выявлено, что для применений, требующих высокой адгезионной прочности, предпочтительны покрытия TiAlCrSiN или TiN, а покрытие AlTiN-G рекомендовано для условий с умеренными нагрузками.

Трещиностойкость и адгезионная прочность покрытия по оценке критической нагрузки. Оборудование Nanovea M1 (Ирвин, Южная Калифорния, США), стандарт ASTM C1624. Для исследуемых покрытий не зафиксировано критического отслаивания от подложки, разрушение носило характер повреждения самого покрытия. Тонкие покрытия (TiAlCrSiN) демонстрируют ранний контакт индентора с подложкой, что маскирует истинную прочность покрытия. Относительно низкие значения по сравнению с литературными данными могут быть объяснены отсутствием предварительной полировки образцов, что увеличивает шероховатость и создает концентраторы напряжений.

Микротвердость износостойких покрытий. Метод Виккерса. Малое значение твердости покрытия (TiAlCrSiN) можно объяснить его малой толщиной: под действием нагрузки на индентор происходит влияние материала основания на деформацию покрытия, хотя визуально «прорыва» индентором покрытия не наблюдалось.

Коэффициент трения. Оборудование Ducom POD 4.0 (Ducom Instruments, Индия), стандарт ASTM G99. Коэффициент трения образцов в условиях сухого трения скольжения в первую очередь определяется химическим составом покрытия, при этом толщина покрытия оказывает влияние на его износостойкость. Так, наименьший коэффициент трения (около 0,15) как при нагрузке 5 Н, так и при 10 Н продемонстрировали покрытия TiN и TiAlCrSiN. Однако меньшее время до истирания у многокомпонентного покрытия TiAlCrSiN (80 с против 460 с у TiN) указывает на то, что уменьшение толщины покрытия снижает его долговечность, несмотря на низкий коэффициент трения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 075-03-2025-702/5 от 11.11.2025, шифр проекта FSFS-2025-0010.