

УДК 621.793.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А. А. Тулина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>angelatool@yandex.ru

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Поступила в редакцию 26.04.2023

**Аннотация.** В статье описано исследование физико-механических свойств покрытия на основе оксида алюминия, полученного методом вакуумно-дугового испарения на образцах из твердого сплава ВК8 с различными значениями напряжения смещения. Были проведены ряд испытаний, включая скретч-тест, трибологические испытания, с целью установить характер износа покрытия при использованной технологии нанесения покрытия. Результаты показали, что при использованных режимах напыления и испытаний данное покрытие пластически деформируется, не проявляя стандартную для керамических покрытий схему износа.

**Ключевые слова:** оксид алюминия, скретч-тест, трибология, покрытие, напряжение смещения, вакуумно-дуговое напыление, твердый сплав, фазовый состав, износ, ВК8.

### ВВЕДЕНИЕ

Нанесение покрытий является одним из перспективных и самых эффективных методов защиты поверхностных слоев изделий, работающих в агрессивных средах, при больших нагрузках, высоких температурах и в прочих тяжелых условиях.

Покрытия на основе  $Al_2O_3$  проявляют высокую термическую и химическую стабильность даже при температурах выше  $1000^\circ C$ , а также высокую твердость, низкую растворимость во многих рабочих материалах [1]. Благодаря этим свойствам покрытия находят широкое применение для режущих инструментов [2, 3].

Для получения кристаллических покрытий на основе соединения  $Al_2O_3$  наиболее широко используют химическое (CVD) и физическое (PVD) осаждение из паровой фазы, реакционное электронно-лучевое испарение, а также реакционное магнетронное распыление [4]. При физическом осаждении из паровой фазы (PVD) материал покрытия переходит из твердого состояния в газовую фазу в результате испарения под воздействием тепловой энергии или в результате распыления за счет кинетической энергии столкновения частиц материала [5]. Нанесение покрытий методом PVD производится при температуре до  $450^\circ C$ . Это существенно увеличивает перечень материалов, на которые можно наносить покрытие, в частности, на быстрорежущую сталь, так как температура процесса не превышает температуру отпуска закаленной стали [5, 6].

Оксид алюминия может быть получен в разных кристаллических модификациях, наиболее стабильными из которых являются  $\alpha-Al_2O_3$  и  $\gamma-Al_2O_3$ . Фаза  $\gamma-Al_2O_3$  стабильна при более мелком размере зерна, что приводит к преимущественному росту фазы  $\gamma-Al_2O_3$  в условиях интенсивного ионного ассистирования, которое способствует увеличению количества центров кристаллизации и уменьшению размера зерен [4]. Получение  $\alpha-Al_2O_3$  затрудняется тем, что для его образования требуются более высокие энергии [7].

## МЕТОДИКИ

В настоящей работе покрытия наносились вакуумно-дуговым методом на установке ННВ6.6-И1. Вакуумно-дуговое осаждение заключается в нанесении покрытий в вакууме путем конденсации на подложку требуемого материала из плазменных потоков, генерируемых на катоде в катодном пятне вакуумной дуги [8]. Покрытие наносилось на четыре образца из твердого сплава ВК8 в среде кислорода с интенсивным ионным ассистированием. При осаждении покрытия на первом образце значение напряжения смещения составляло 200 В, на втором – 150 В, на третьем – 100 В, на четвертом – 50 В. Время нанесения покрытий – 1 час.

После нанесения покрытий были проведены ряд испытаний. Скретч-тест был проведен на приборе CSM Scratch Test. Трибологические характеристики покрытия были исследованы с помощью трибометра Nanovea. Анализ химического состава покрытия проводили с помощью приставки для энергодисперсионного анализа на растровом электронном микроскопе модели JSM-6490LV. Кристаллическая структура и фазовый состав образцов изучались методом рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра Shimadzu XRD-7000S в конфигурации Брэгга-Брентано с  $\text{CuK}\alpha$ -излучением (длина волны  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ) при 40 кВ и 30 мА.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны рентгенограммы, демонстрирующие фазовый состав получившихся покрытий при различных напряжениях смещения на образцах из твердого сплава ВК8. Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что при осаждении алюминия вакуумно-дуговым методом в кислородной среде образуется покрытие с преобладанием  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ . На образцах не зафиксировано присутствие фазы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , что, скорее всего, связано с недостатком поверхностной энергии для ее образования.

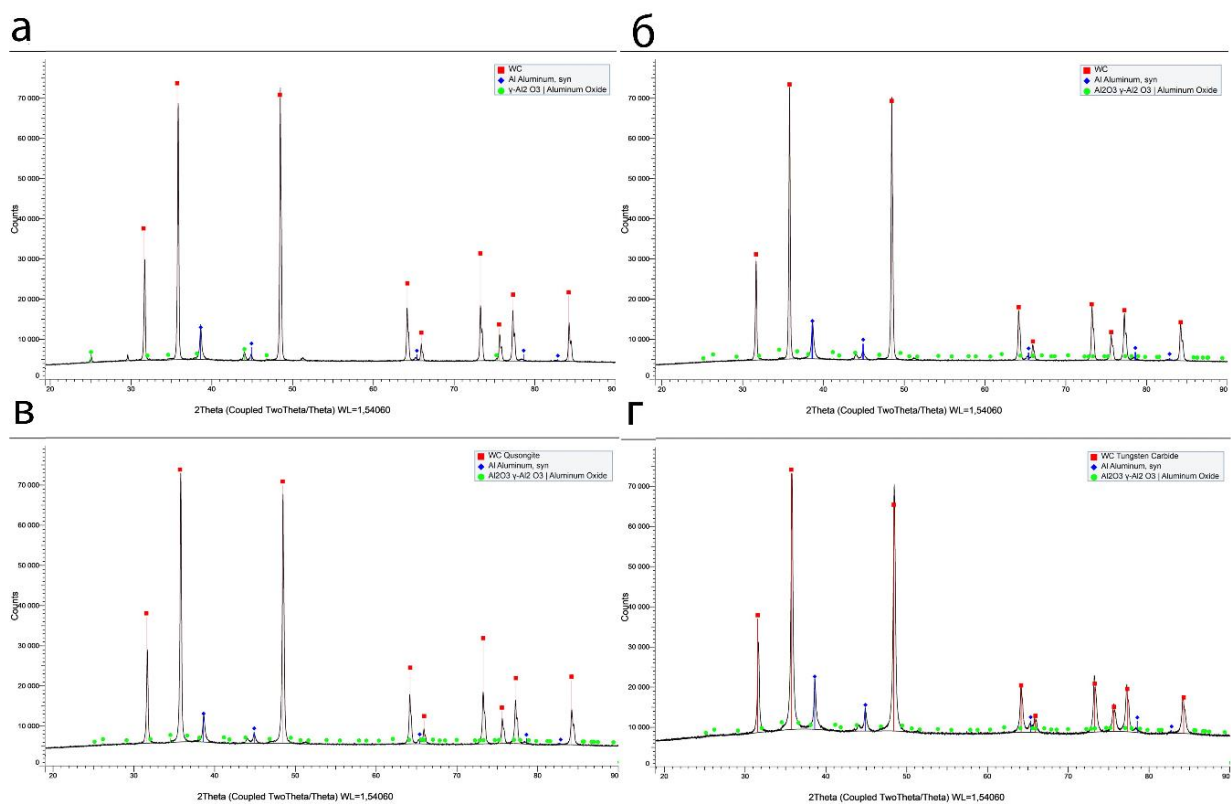
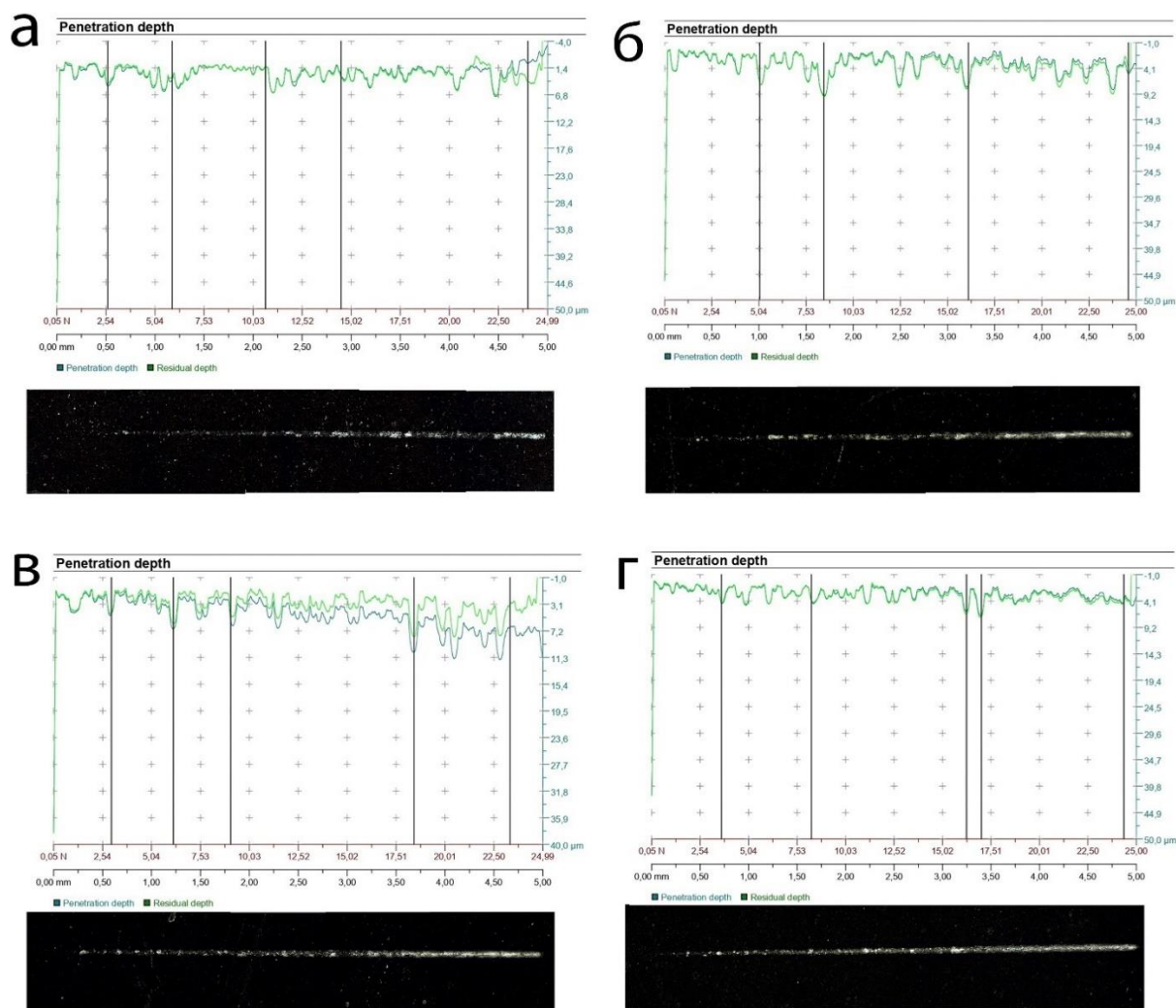


Рис. 1. Рентгенограммы образцов:

соответственно  $U_{\text{п}} = 200 \text{ В}, 150 \text{ В}, 100 \text{ В}$  и  $50 \text{ В}$ ), зеленый –  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ; красный карбид вольфрама WC; синий – Al

Снимки покрытия после скретч-теста показаны на рис. 2. В результате проведения испытания не было обнаружено признаков хрупкого разрушения, характерного для керамических покрытий. Это согласуется с химическим составом получившегося покрытия, который включает в себя высокую долю чистого алюминия, а также преобладание фазы  $\gamma$ - [Al]  $_2$  O $_3$ , которая сообщает покрытию более вязкие свойства.

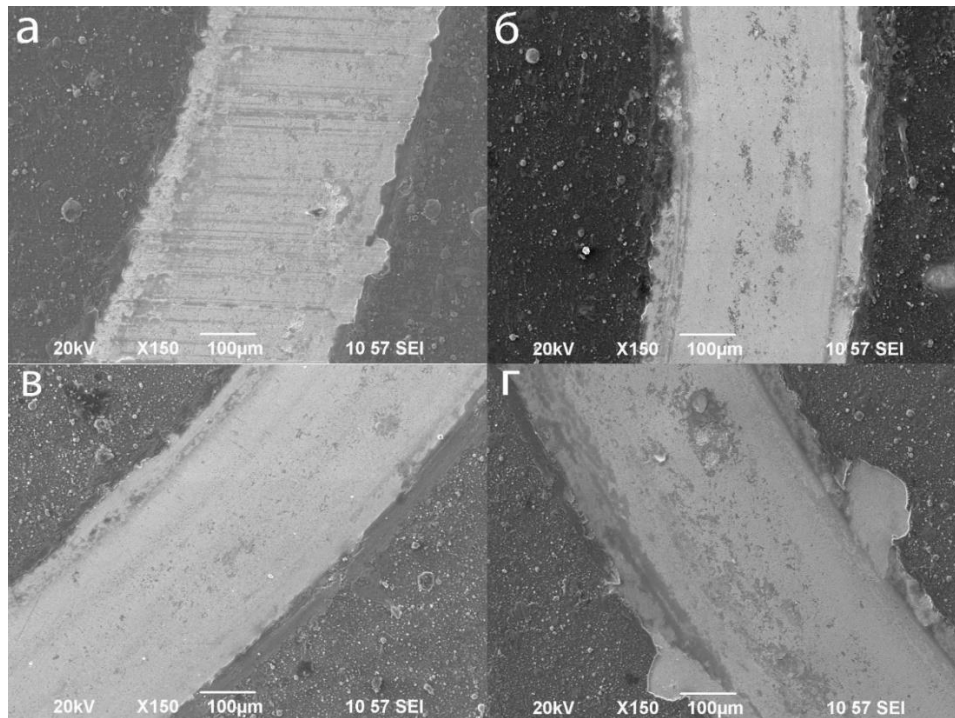


**Рис. 2.** Результаты скретч-теста образцов:  
*а* – образец K1; *б* – образец K2; *в* – образец K3; *г* – образец K4

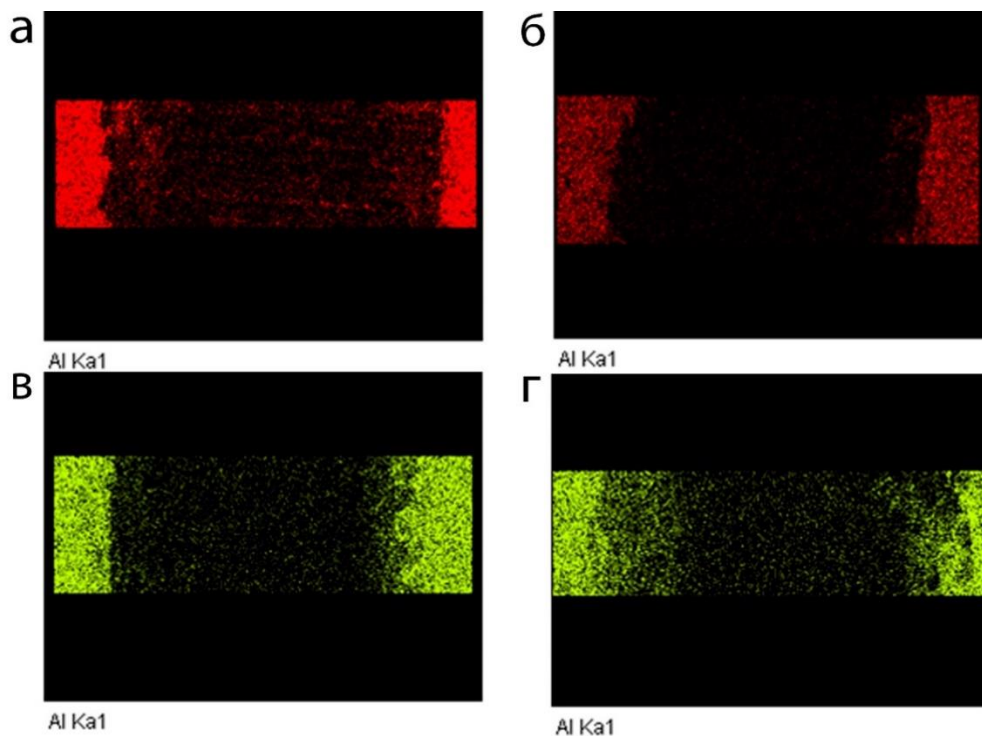
Структура износа покрытия на снимках электронного микроскопа в результате испытаний на трибометре показана на рис. 3. По фотографиям видно, что присутствуют места скалывания фазы чистого алюминия, а также зоны пластической деформации.

Подобранные режимы трибологического испытания привели к невозможности идентифицировать характер разрушения покрытия, что будет учтено в следующих исследованиях.

На рисунках показаны карты распределения химических элементов по структуре каждого из образцов в двух областях – вблизи пути износа после трибологического исследования, а также вблизи царапины, полученной после скретч-теста.



**Рис. 3.** Снимки износа после испытания на трибометре:  
*а* – образец *K1*; *б* – образец *K2*; *в* – образец *K3*; *г* – образец *K4*



**Рис. 4.** Снимки карт распределения химических элементов в результате анализа:  
*а* – образец *K1*; *б* – образец *K2*; *в* – образец *K3*; *г* – образец *K4*

Результаты показали, что на образцах в области износа после трибометрии в распределении элементов в зоне износа участвуют в основном только элементы подложки, а именно – найдены вольфрам, кобальт. Это свидетельствует о том, что в этой зоне покрытие практически полностью было удалено с образца под воздействием изнашивающего воздействия в течение времени трибологического исследования. По фотографиям карт распределения можно заметить, что границы распределения алюминия, кобальта и вольфрама становятся менее выра-

женными и менее резкими при следовании к четвертому образцу К4, а самая четкая наблюдается на образце К1. Это согласуется с тем, что напряжение смещения уменьшается от образца К1 к образцу К4, а при этом увеличивается толщина покрытия, что влияет на процесс износа, замедляя его.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты исследования покрытий на основе системы оксида алюминия, полученные вакуумно-дуговым методом.

Результаты показали, что при выбранной технологии нанесения покрытий приводит к пластической деформации покрытия, в частности, из-за избыточного количества алюминия в чистом виде в составе покрытия, а также подобранные режимы испытаний не позволили однозначно оценить характер износа.

Дальнейшие исследования будут направлены на получение покрытий с более однородным фазовым составом, будут проведены трибологические испытания и скретч-тест с режимами, позволяющими более подробно оценить характер износа. Также будут проведены исследования с нанесением данного покрытия на пластину режущего инструмента для испытаний практического применения покрытия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Åstrand M. et al. PVD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-coated cemented carbide cutting tools //Surface and Coatings Technology. 2004. Т. 188. С. 186–192.
2. Trinh D. H. et al. Phase transformation in  $\kappa$ - and  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings on cutting tool inserts //Surface and Coatings Technology. 2009. Т. 203. №. 12. С. 1682–1688.
3. Larsson A., Halvarsson M., Rupp S. Microstructural changes in CVD  $\kappa$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated cutting tools during turning operations //Surface and Coatings Technology. 1999. Т. 111. №. 2-3. С. 191–198.
4. Гаврилов Н. В. и др. Нанокристаллические покрытия  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученные реакционным термическим анодным испарением в дуговом разряде при низкой температуре //Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. №. 20.
5. Локтев Д., Ямашкин Е. Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий //Наноиндустрия. 2007. №. 4. С. 18–25.
6. Логинов Н. Ю., Дятлов Р. Ю., Салабаев Д. Е. Выбор износостойкого покрытия для концевых фрез //Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. 2021. С. 45–49.
7. Edlmayr V. et al. Thermal stability of sputtered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings //Surface and Coatings Technology. 2010. Т. 204. №. 9–10. С. 1576–1581.
8. Андреев А. А., Саблев Л. П., Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые покрытия. Харьков, ННЦ ХФТИ, 2010. 318 с.

### ОБ АВТОРАХ

**ТУЛИНА Анжела Александровна**, студент кафедры Технологии машиностроения Уфимского университета науки и технологий

### METADATA

**Title:** Investigation of tribological characteristics of vacuum-arc coatings based on aluminium oxide system.

**Authors:** A.A. Tulina<sup>1</sup>.

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> angelatool@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 3 (29), pp. 145-149, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract.** The article describes the study of a coating based on aluminum oxide, obtained by the method of vacuum-arc evaporation on samples of hard alloy VK8 with different values of the bias voltage. A number of tests were carried out, including a scratch test, tribological tests in order to establish the nature of the wear of the coating with the coating technology used. The results showed that under the spraying and testing modes used, this coating is plastically deformed without showing the wear pattern standard for ceramic coatings.

**Key words:** aluminium oxide; scratch test; tribology; coating; bias voltage; vacuum-smart-arc spraying; hard alloy; phase composition; wear; VK8

**About authors:**

**TULINA, Angela Aleksandrovna**, student of Department of Mechanical Engineering of Ufa University of Science and Technology.