

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-168-173>

УДК 621.45.038.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

Б. К. Рахадиллов¹, М. Б. Баяндинова^{2*}, Д. Б. Буйткенов^{1,2},
Д. Н. Кәкімжанов^{1,2}, Л. Г. Журерова^{1,2}, Г. У. Ерболатова³

¹ Plasma Science LLP, Усть-Каменогорск, Казахстан

² Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

³ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*E-mail для контактов: shohmanova_m@mail.ru

Детонационное напыление является одним из наиболее перспективных вариантов термического напыления для нанесения износостойких покрытий. Данное исследование направлено на изучение трибологических свойств покрытий, осажденных детонационным методом, на примере WC-12%Co и Al₂O₃ – двух распространенных материалов покрытий, широко применяемых в износостойких областях. Для нанесения покрытий использовалась компьютеризированный комплекс детонационного напыления CCDS2000 (Computer-Controlled Detonation Spraying). Параметр шероховатости покрытия WC-Co имеет значение Ra = 3,95 мкм, а покрытия Al₂O₃ – Ra = 2,53 мкм. Для исследования детонационных покрытий охарактеризованы материалы покрытий и проведены измерения микротвердости. Микротвердость для нержавеющей стали 12X18H10T – 392,32 Hv; для покрытий WC-12Co – 1332,3 Hv и Al₂O₃ – 805,50 Hv. По результатам исследований наибольшую стойкость всем видам износа имеют покрытия WC-12%Co. Для работы в условиях износа скольжения покрытия также можно рекомендовать покрытия из Al₂O₃.

Ключевые слова: детонационное напыление, покрытие, износостойкость, микротвердость.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко используются различные методы нанесения покрытий, такие как газотермическое напыление [1], плазменное напыление [2]. Однако они могут не удовлетворять требуемым свойствам. Относительно низкая адгезия покрытий к подложке ограничивает их применение в транспортном оборудовании и их механизмах. Детонационное напыление является одним из наиболее перспективных методов термического напыления для получения высококачественных износостойких покрытий [3, 4]. Покрытия с высокой износостойкостью позволяют продлить срок службы изделия без существенного увеличения стоимости изделия. Поэтому большой интерес представляют методы детонационного напыления.

Детонационное напыление обычно используется для нанесения износо-, коррозионно- и жаростойких покрытий, в основном сплавов на основе оксида алюминия и карбида вольфрама [5]. В связи с этим в настоящем исследовании было интересно провести сравнительное исследование трибологических свойств (шероховатость, пористость, твердость и износостойкость) детонационного напыления для двух типов покрытий: керамического (Al₂O₃) и керметного (WC-12Co).

Целью данной работы являлось определение износостойкости, твердости и исследование механизмов изнашивания детонационных покрытий из сплава оксида алюминия и карбида вольфрама в условиях

сухого вращательного трения и сравнение с сталью 12X18H10T.

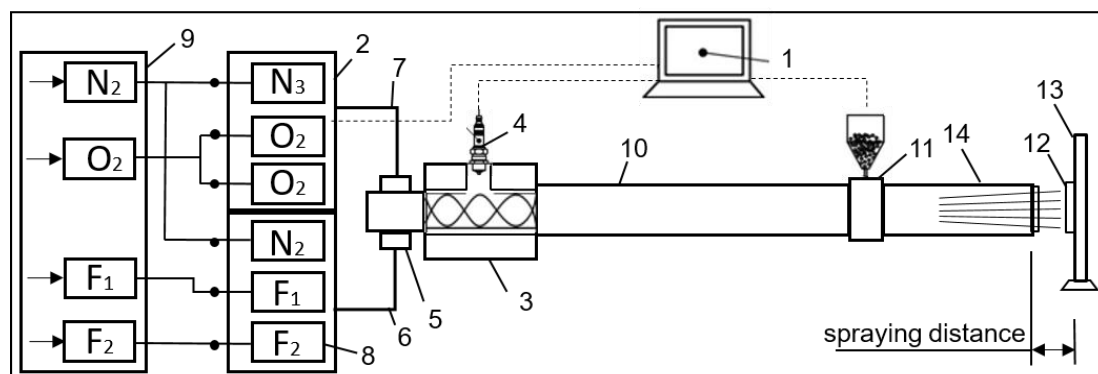
МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этом исследовании в качестве подложки была использована нержавеющая сталь 12X18H10T. Для нанесения покрытий были применены сферические порошки на основе карбида вольфрама WC-12Co со средним размером частиц в диапазоне от 10 до 38 мкм, а также оксида алюминия Al₂O₃ с размерами частиц около 34±6 микрон.

Для нанесения покрытий использовалась компьютеризированный комплекс детонационного напыления CCDS2000 (Computer-Controlled Detonation Spraying). Процесс нанесения покрытий осуществлялся с использованием промышленных газов в качестве горючего вещества. В частности, для получения покрытия были применены кислород, ацетилен и пропан. Эти газы служили источниками энергии для детонации и формирования покрытий на поверхности материала. Принципиальная схема процесса детонационного напыления представлена на рисунке 1. Основные параметры нанесения покрытия приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры нанесения покрытия

Порошок	Объем заполнения ствола, %	Дистанция напыления, мм	Количество выстрелов	Соотношение O ₂ /C ₂ H ₂
WC-Co	64	150	15	1,028
Al ₂ O ₃	63	250	15	1,856



1 – управляющий компьютер; 2 – газораспределитель; 3 – камера смешения-зажигания; 4 – свеча зажигания; 5 – ствольный клапан; 6 – топливная линия; 7 – кислородная линия; 8 – газовые клапаны; 9 – блок подачи газов; 10 – казенная часть ствола; 11 – дозатор порошка; 12 – обрабатываемая деталь; 13 – манипулятор; 14 – дульная часть ствола

Рисунок 1. Принципиальная схема детонационного комплекса CCDS2000

Для оценки абразивного износа детонационных покрытий была измерена скорость убыли массы в единицу времени в процессе абразивного износа. Испытания проводились с использованием установки для абразивного износа, в соответствии с методом, описанным в источнике [6]. Условия испытания: нагрузка 18 Н, время выдержки 15 мин., абразивный материал – порошок корунда зернистостью <100 мкм.

Для измерения коэффициента трения использовался универсальный трибометр TRB³ (Anton Paar, Австрия) с применением схемы трения «шар–диск» с линейной скоростью 0,03 м/с при комнатной температуре 25±1 °С [7]. Вертикальная нагрузка 5 Н. Материал контртела – 100Cr6. Коэффициент трения испытуемых материалов определяли после прохождения пути трения (L) равного 60 м.

Объем износа и шероховатость поверхности образцов исследовали с помощью профилометра модели 130.

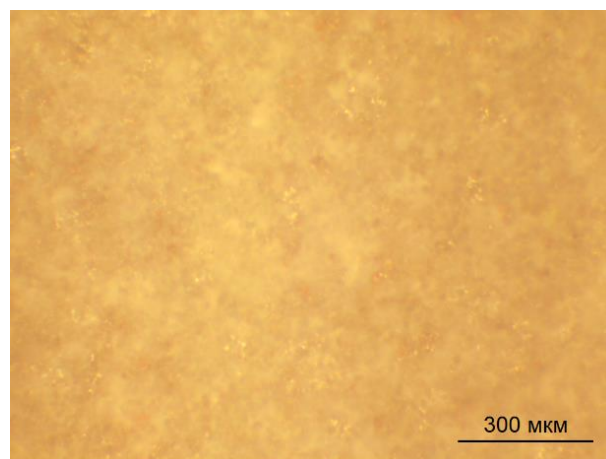
Микротвердость образцов измерялась с использованием прибора Металаб 502 по методике Виккерса [8]. Параметры измерения: нагрузка 100 г, время выдержки 10 с. Число Виккерса (HV) рассчитывается по формуле:

$$HV = 1,854 \cdot P/d^2,$$

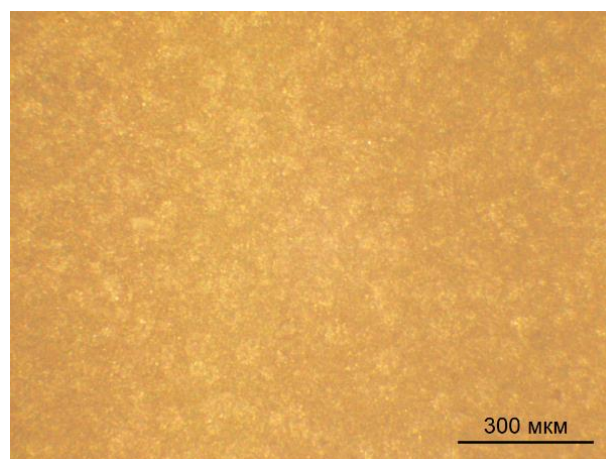
где P – приложенная нагрузка; d – диаметр отпечатка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2а и 2б представлены изображения поверхности образцов покрытий WC-12Co и Al₂O₃. Видно, что в покрытиях отсутствуют трещины, поры и другие поверхностные дефекты. Из рисунка 2в и 2г видно, что покрытия имеют достаточно плотную структуру и высокую адгезию к материалу основы, о чем свидетельствует отсутствие следов отслоения покрытия от материала подложки. Толщина покрытий Al₂O₃ меньше, чем толщины покрытий WC-12Co. Аналогично обнаружено [9], что при прочих равных условиях суммарная толщина слоев закономерно увеличивается при меньшем расстоянии от мишени до подложки.

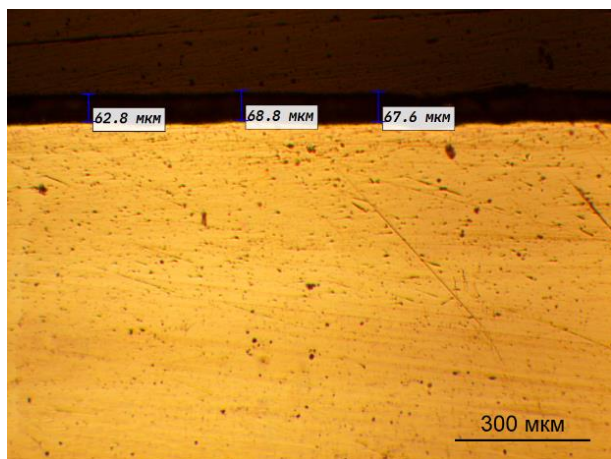


а)

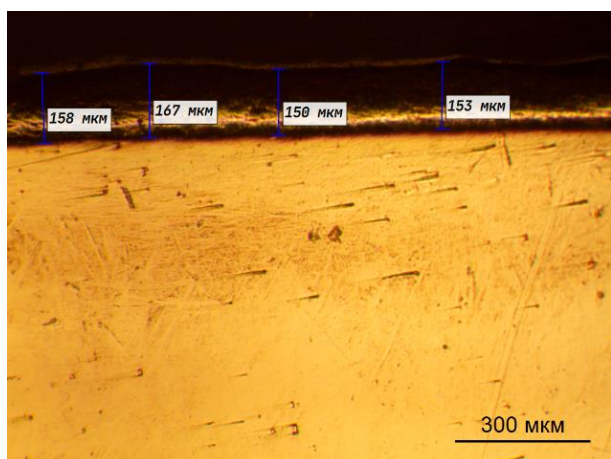


б)

Рисунок 2. Морфология поверхности покрытий Al₂O₃ (а), WC-Co (б) и поперечное сечение покрытий Al₂O₃ (в), WC-Co (г)



в)



г)

Рисунок 2 (продолжение). Морфология поверхности покрытий Al_2O_3 (а), WC-Co (б) и поперечное сечение покрытий Al_2O_3 (в), WC-Co (г)

Опираясь на полученные экспериментальные данные (рисунок 3), можно сказать, что абразивная износостойкость образцов, упрочненных покрытием WC-12Co – в 4 раза, а Al_2O_3 – в 3 выше, чем у стали 12X18H10T.

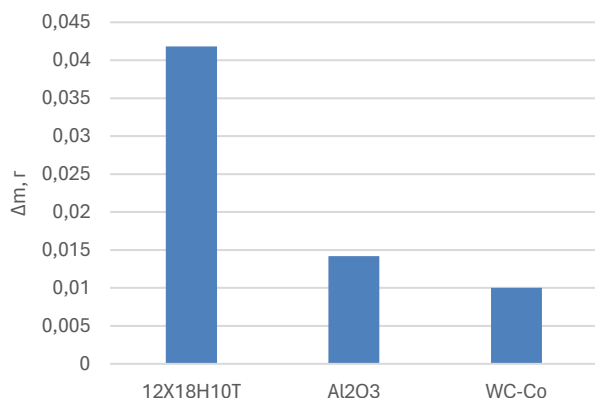


Рисунок 3. Абразивная стойкость образцов в условиях воздействия абразивных частиц

Результаты исследования износа (рисунок 4а и 4б) показали, что при абразивном износе материала детонационных покрытий на поверхности отсутствуют следы отслоения и выкрашивания частиц, формирующих покрытия, что говорит о достаточно высокой когезии покрытий. На рисунке 4в видно, что на поверхности износа нержавеющей стали 12X18H10T имеются многочисленные глубокие царапины, что свидетельствует о низкой износостойкости поверхностного слоя.



а)



б)



в)

Рисунок 4. Поверхность образцов WC-Co (а); Al_2O_3 (б) и стали 12X18H10T (в) после абразивного износа

На рисунке 5 приведен график зависимости коэффициента трения от дистанции для нержавеющей стали марки 12X18H10T и детонационных покрытий WC-12Co и Al_2O_3 , в условиях сухого вращательного трения. Кривые показывают, что процесс трения можно разделить на режим приработки и стационарный режим. Детонационные покрытия выходят на режим стационарного трения спустя 3–4 м. Коэффициент трения детонационных покрытий достаточно стабилен в стационарном режиме, чего нельзя сказать о нержавеющей стали. Резкие скачки коэффициента трения нержавеющей стали в стационарном режиме связаны с низкой твердостью материала. Средние значе-

ния коэффициента трения покрытий выше: для WC-12Co (0,52), для Al_2O_3 (0,60), по сравнению с нержавеющей сталью (0,62).

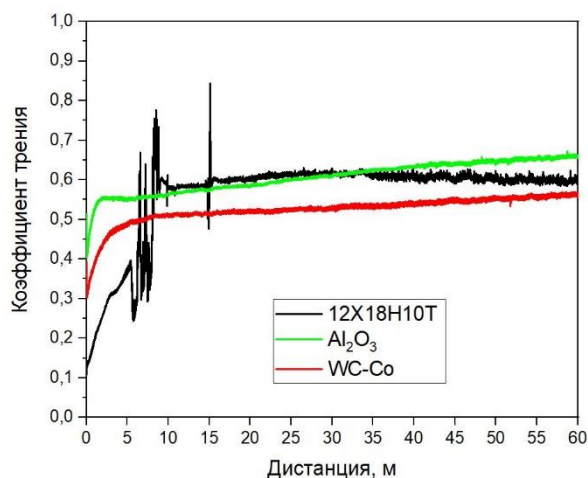


Рисунок 5. Изменение коэффициента трения при сухом трении скольжения

На рисунке 6 показаны объем износа и удельная скорость изнашивания покрытия. Как видно, износостойкость детонационных покрытий Al_2O_3 намного выше, чем у нержавеющей стали 12X18H10T, но ниже, чем WC-12Co. В работе [10] были получены аналогичные результаты.

На рисунке 7 приведены результаты измерения шероховатости поверхности материала покрытий на основе WC-12Co и Al_2O_3 . Параметр шероховатости покрытия WC-12Co имеет значение $R_a = 3,95$ мкм (рисунок 7а), а покрытия Al_2O_3 – $R_a = 2,53$ мкм (рисунок 7в), то есть покрытие на основе WC-12Co имеет более высокую шероховатость, чем покрытие на

основе Al_2O_3 . Металлографический анализ показывает, что в структуре покрытия присутствуют мелкие поры. При этом количество пор в покрытии Al_2O_3 (рисунок 7г) больше, чем в покрытии WC-12Co (рисунок 7б). Высокая шероховатость и пористость покрытия обусловлены воздействием ударной волны и обусловленной этим разницей в уплотнении покрытия.

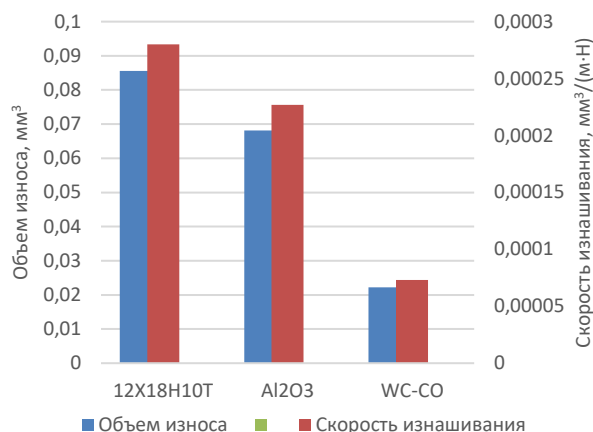
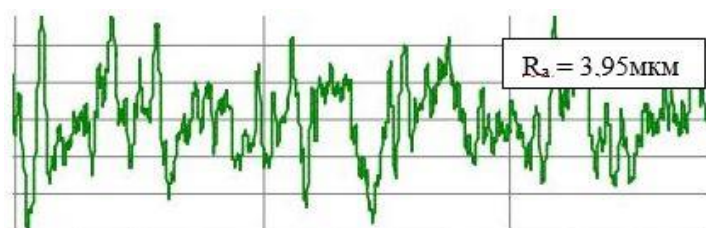
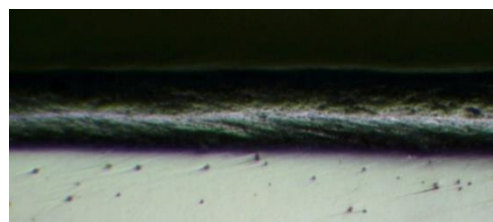


Рисунок 6. Объем износа и удельная скорость изнашивания покрытия

На рисунке 8 показаны результаты исследования микротвердости нержавеющей стали 12X18H10T и покрытий WC-12Co и Al_2O_3 . Твердость для нержавеющей стали 12X18H10T – 392,32 Hv; для покрытия WC-12Co – 1332,3 Hv и Al_2O_3 – 805,50 Hv. В литературе [11] имеются данные о влиянии пористости покрытий на их твердость. Снижение твердости покрытий связано с увеличением уровня пористости.



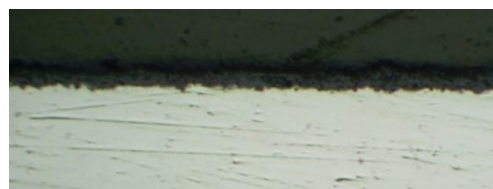
а)



б)



в)



г)

Рисунок 7. Результаты измерения шероховатости и поверхности материала покрытия на основе WC-Co (а, б) и Al_2O_3 (в, г)

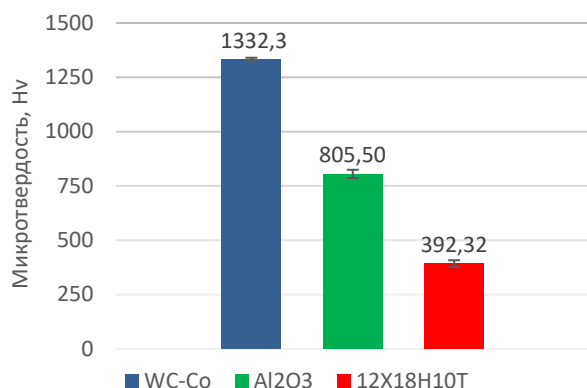


Рисунок 8. Микротвердость нержавеющей стали 12X18H10T и покрытий WC-Co и Al₂O₃.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При нанесении детонационных покрытий из твердых сплавов на основе карбида вольфрама оптимальными свойствами с точки зрения сопротивления всем видам износа обладает сплав, содержащий 12% кобальта. Для работы в условиях износа скольжения также можно рекомендовать покрытия из Al₂O₃. Установлено, что шероховатость покрытия WC-12Co имеет значение Ra = 3,95 мкм, покрытия Al₂O₃ – Ra = 2,53 мкм, то есть покрытие на основе WC-12Co имеет более высокую шероховатость, чем покрытие на основе Al₂O₃. Определена микротвердость нержавеющей стали 12X18H10T – 392,32 Hv; покрытия WC-12Co – 1332,3 Hv и Al₂O₃ – 805,50 Hv. По результатам экспериментальных данных и обсуждения была получена следующая взаимосвязь: меньшая пористость, более высокая микротвердость и более высокая износостойкость.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP09058568).

ЛИТЕРАТУРА

1. Skakov M., Ocheredko I., Tuyakbayev B., Bayandinova M., Nurizinova M. Development and studying of the technology for thermal spraying of coatings made from ultra-high-molecular-weight polyethylene // *Coatings* 2023, 13, 698. <https://doi.org/10.3390/coatings13040698>
2. N. Kantay, B. Rakhadilov, S. Kurbanbekov, D. Yeskermessov. Influence of detonation-spraying parameters on the phase composition and tribological properties of Al₂O₃ coatings // *Coatings* 2021, 11, 793. <https://doi.org/10.3390/coatings11070793>
3. Б.К. Рахадиллов, Н. Муктанова, Л.Г. Журерова. Применение технологии HVOF для получения износостойких покрытий на основе WC – обзор // *Вестник НЯЦ РК*. – 2023. – Выпуск 1. С. 4–14. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-4-14>
4. В.Ю. Ульяницкий, А.А. Штерцер, С.Б. Злобин. Структура и трибологические свойства износостойких детонационных покрытий // *Физическая мезомеханика*. – 2006. Т. 9.4. – С. 87–92.

5. М.В. Ненасhev, Д.А. Деморецкий, И.Д. Ибатулин, И.В. Нечаев. Технология и свойства наноструктурированных детонационных покрытий // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – Т. 13. № 1(2), 2011.
6. M. Roy, C.V.S. Rao, D.S. Rao & G. Sundararajan. Abrasive wear behaviour of detonation sprayed WC–Co coatings on mild steel // *Surface Engineering*. – P. 129–136. Published online: 2013 <https://doi.org/10.1179/026708499101516470>
7. Bauyrzhan Rakhadilov, Daur Kakimzhanov, Daryn Baizhan, Gulnar Muslimanova, Sapargali Pazylbek, Laila Zhurerova. Comparative Study of Structures and Properties of Detonation Coatings with α -Al₂O₃ and γ -Al₂O₃ Main Phases / *Coatings* 2021, 11, 1566. <https://doi.org/10.3390/coatings11121566>
8. Michael Factor, Itzhak Roman. Vickers microindentation of WC–12%Co thermal spray coating: Part 1: statistical analysis of microhardness data // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – Vol. 132. – P. 181–193.
9. G. Sundararajan, D. Srinivasa Rao, G. Sivakumar & S. V. Joshi. Detonation Spray Coatings // *Encyclopedia of Tribology*. – 2013. – P. 736–742.
10. G. Sundararajan, K.U.M. Prasad, D.S. Rao, and S.V. Joshi. A comparative study of tribological behavior of plasma and d-gun sprayed coatings under different wear modes // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 1998. – Vol.7(3). –P. 343–351.
11. Tie-Gang Wang, Sheng-Sheng Zhao, Wei-Gang Hua, Jun Gong, Chao Sun. Design of separation device used in detonation gun spraying system and its effects on the performance of WC–Co coatings // *Surface & Coatings Technology* 203 (2009). P. 1637–1644.

REFERENCES

1. Skakov M., Ocheredko I., Tuyakbayev B., Bayandinova M., Nurizinova M. Development and studying of the technology for thermal spraying of coatings made from ultra-high-molecular-weight polyethylene // *Coatings* 2023, 13, 698. <https://doi.org/10.3390/coatings13040698>
2. N. Kantay, B. Rakhadilov, S. Kurbanbekov, D. Yeskermessov. Influence of detonation-spraying parameters on the phase composition and tribological properties of Al₂O₃ coatings // *Coatings* 2021, 11, 793. <https://doi.org/10.3390/coatings11070793>
3. B.K. Rakhadilov, N. Muktanova, L.G. Zhurerova. Prime-nenie tekhnologii HVOF dlya polucheniya iznosostoykikh pokrytiy na osnove WC – obzor // *Vestnik NYaTs RK*. – 2023. – Issue 1. P. 4–14. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-4-14>
4. V.Yu. Ul'yanitskiy, A.A. Shtertser, S.B. Zlobin. Struktura i tribologicheskie svoystva iznosostoykikh detonatsionnykh pokrytiy / *Fizicheskaya mezomekhanika*. – 2006. T. 9.4. – P. 87–92.
5. M.V. Nenashev, D.A. Demoretskiy, I.D. Ibatulin, I.V. Nechaev. Tekhnologiya i svoystva nanostrukturirovannykh detonatsionnykh pokrytiy // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. – T. 13. No. 1(2), 2011.
6. M. Roy, C.V.S. Rao, D.S. Rao & G. Sundararajan. Abrasive wear behaviour of detonation sprayed WC–Co coatings on mild steel // *Surface Engineering*. – P. 129–136. Published online: 2013 <https://doi.org/10.1179/026708499101516470>

7. Bauyrzhan Rakhadilov, Daur Kakimzhanov, Daryn Baizhan, Gulnar Muslimanova, Sapargali Pazylbek, Laila Zhureroova. Comparative Study of Structures and Properties of Detonation Coatings with α - Al_2O_3 and γ - Al_2O_3 Main Phases / Coatings 2021, 11, 1566. <https://doi.org/10.3390/coatings11121566>
8. Michael Factor, Itzhak Roman. Vickers microindentation of WC-12%Co thermal spray coating: Part 1: statistical analysis of microhardness data // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 132. – P. 181–193.
9. G. Sundararajan, D. Srinivasa Rao, G. Sivakumar & S. V. Joshi. Detonation Spray Coatings // Encyclopedia of Tribology. – 2013. – P. 736–742.
10. G. Sundararajan, K.U.M. Prasad, D.S. Rao, and S.V. Joshi. A comparative study of tribological behavior of plasma and d-gun sprayed coatings under different wear modes // Journal of Materials Engineering and Performance. – 1998. – Vol.7(3). –P. 343–351.
11. Tie-Gang Wang, Sheng-Sheng Zhao, Wei-Gang Hua, Jun Gong, Chao Sun. Design of separation device used in detonation gun spraying system and its effects on the performance of WC-Co coatings // Surface & Coatings Technology 203 (2009). P. 1637–1644.

АЛЮМИНИЙ ОКСИДІ МЕН ВОЛЬФРАМ КАРБИДІ НЕГІЗІНДЕГІ ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ЖАБЫНДАРДЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

**Б. К. Рахадиллов¹, М. Б. Баяндинова^{2*}, Д. Б. Буйткенов^{1,2},
Д. Н. Кәкімжанов^{1,2}, Л. Г. Журерова^{1,2}, Г. У. Ерболатова³**

¹ Plasma Science LLP, Өскемен, Қазақстан

² Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, 070020, Өскемен, Қазақстан

³ Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Байланыс үшін E-mail: shohmanova_m@mail.ru

Детонациялық бүрку – тозуға төзімді жабындарды термиялық бүркудің ең перспективалы нұсқаларының бірі. Бұл зерттеу тозуға төзімді аймақтарда кеңінен қолданылатын екі жалпы жабын материалдары WC-12%Co және Al_2O_3 мысалында детонациялық тұндырылған жабындардың трибологиялық қасиеттерін зерттеуге бағытталған. Жабындар CCDS2000 (компьютерлік басқарылатын детонациялық бүрку) компьютерлік детонациялық бүрку кешенін қолдану арқылы қолданылды. WC-Co жабынының кедір-бұдырлық параметрі $R_a = 3,95$ мкм, ал Al_2O_3 – $R_a = 2,53$ мкм. Детонациялық жабындарды зерттеу үшін жабын материалдары сипатталады және микроқаттылықты өлшеу жүргізіледі. Тот баспайтын болат үшін микроқаттылық 12X18H10T – 392,32 Hv; жабу үшін WC-12Co – 1332,3 Hv және Al_2O_3 – 805,50 Hv. Зерттеу нәтижелері бойынша WC-12%Co жабындары тозудың барлық түрлеріне ең жоғары төзімділікке ие. Сондай-ақ Al_2O_3 жабындары сырғанау тозу жағдайында жұмыс істеу үшін ұсынылуы мүмкін.

Түйін сөздер: детонациялық бүрку, жабу, тозуға төзімділік, микроқаттылық.

INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF DETONATION COATINGS BASED ON ALUMINUM OXIDE AND TUNGSTEN CARBIDE

**B. K. Rakhadilov¹, M. B. Bayandinova^{2*}, D. B. Buitkenov^{1,2},
D. N. Kakimzhanov^{1,2}, L. G. Zhureroova^{1,2}, G. U. Yerbolatova³**

¹ Plasma Science LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

² Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

³ Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

*E-mail for contacts: shohmanova_m@mail.ru

Detonation spraying is one of the most promising variants of thermal spraying for the deposition of wear-resistant coatings. This study aims to investigate the tribological properties of coatings deposited by the detonation method using WC-12%Co and Al_2O_3 as examples. These are two common coating materials widely used in wear resistant applications. A computerized detonation spraying system CCDS2000 (Computer-Controlled Detonation Spraying) was used for coating deposition. The roughness parameter of the WC-Co coating has a value of $R_a = 3.95$ μm and that of the Al_2O_3 coating has a value of $R_a = 2.53$ μm . To investigate the detonation coatings, the coating materials were characterized and microhardness measurements were carried out. Microhardness for stainless steel 12X18H10T (AISI 321, 321H) – 392.32 Hv; for WC-12Co coating – 1332.3 Hv and Al_2O_3 – 805.50 Hv. By results of researches the greatest resistance to all kinds of wear has coatings WC-12%Co. Al_2O_3 coatings can also be recommended for operation under sliding wear conditions.

Keywords: detonation spraying, coating, wear resistance, microhardness.