

**Балым Әлібекқызы Әлібекова\*** – С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан Университетінің «Беттік инженерия және трибология» ҒЗО инженері, Өскемен, Қазақстан; e-mail: balymalibekova304@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7644-4527>.

#### Information about the authors

**Zhuldyz Bolatkizy Sagdoldina** – PhD, Associate Professor, senior Researcher at the Research Center for «Surface Engineering and Tribology» of the East Kazakhstan University named after Sarsen Amanzholov, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: sagdoldina@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6421-2000>.

**Mikhail Vyacheslavovich Ermolenko** – candidate of Technical Sciences, acting associate professor of the department «Technical physics and heat power engineering» Shakarim University of Semey, Semey, Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-8023>.

**Daniyar Nurzhanovich Nurgaliev** – master of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering» Shakarim University of Semey, Semey, Kazakhstan; e-mail: daniarsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1650-1077>.

**Sanzhar Daurenuly Bolatov** – junior researcher of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: sanzharbolatov94@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3136-0535>.

**Balym Alibekovna Alibekova\*** – engineer of Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology» at Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: balymalibekova304@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7644-4527>.

Поступила в редакцию 08.12.2024  
Поступила после доработки 10.12.2024  
Принята к публикации 12.12.2024

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4\(16\)-40](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-40)

MPHTI: 55.22.00



**Д.Н. Какимжанов\*, М.К. Даутбеков, Е.С. Турабеков, Р.М. Куанышбай, А.С. Рустемов**  
ТОО PlasmaScience,  
070018, Казахстан, г.Усть-Каменогорск, ул.Гоголя 7Г  
\*e-mail: dauir\_97@mail.ru

### ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАССТОЯНИИ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ $Cr_3C_2-NiCr$

**Аннотация:** Одним из наиболее перспективных методов повышения эксплуатационных свойств и увеличения срока службы изделий является нанесение функциональных покрытий с использованием различных технологий напыления. Учитывая высокую стойкость к износу и коррозии металлокерамической композиции  $Cr_3C_2-NiCr$ , такие покрытия начали активно использовать для защиты стальных элементов в горячих частях котлов, предназначенных для сжигания отходов, а также в электрических печах и оборудовании, работающем на природном газе. В этом исследовании рассматривается влияние расстояния при импульсно-плазменной обработке на структурные характеристики поверхностного слоя детонационных покрытий  $Cr_3C_2-NiCr$ . Мы изучаем процесс, включающий нанесение таких покрытий с применением детонационного устройства, а затем их обработку импульсно-плазменным методом. Результаты показывают, что после такой обработки происходит плавление и выравнивание структурных компонентов покрытий, не приводящее к их разрушению от воздействия плазменных импульсов. Микроструктура покрытий представляет собой расплавленный металлокерамический материал на основе  $Cr_3C_2-NiCr$ . После импульсно-плазменной обработки на поверхности обнаружены фазы оксида хрома  $Cr_2O_3$ , увеличивается интенсивность пиков  $Cr_3C_2$  и появляются новые рефлексы  $Cr_3C_2$ , что свидетельствует об увеличении содержания фазы  $Cr_3C_2$ . Также замечено, что после этой обработки микроструктура становится более однородной, что приводит к уплотнению детонационного покрытия на основе  $Cr_3C_2-NiCr$ .

**Ключевые слова:** *Металлокерамические покрытия, детонационное напыление, импульсно-плазменная обработка, твердость, износостойкость, фаза, трибология.*

## **Введение**

Актуальной задачей является повышение надежности и долговечности изделий, эксплуатационные характеристики которых определяются свойствами их рабочих поверхностей. Один из наиболее перспективных способов улучшения эксплуатационных свойств и повышения долговечности изделий – нанесение на их поверхности функциональных покрытий с применением различных технологий напыления. С учетом относительно высокой стойкости к износу и коррозии металлокерамической композиции  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ , данные покрытия начали широко применяться для нанесения износ-коррозионностойких покрытий на стальные элементы в горячей части котлов для сжигания отходов, а также в электрических печах и оборудовании, работающем на природном газе [1, 2].

Эти металлокерамические покрытия наносят с помощью разных способов газотермического напыления, таких как плазменное напыление, метод детонационного напыления, а также высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF, HVAF) [3-6].

Несмотря на высокое качество покрытий  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ , нанесенные методами HVOF и HVAF, данные процессы имеет определённые недостатки. Более низкие температуры процесса и более высокая скорость частиц создают еще один тип изменения химического состава, так как карбидные зерна склонны к отскоку при ударе, снижая содержание карбида в покрытии [4]. В работах [4, 5] также установлено, что потеря углерода и поглощение кислорода происходят в значительной степени в обоих процессах, так как водяной пар, образующийся при сжигании углеводородного топлива, действует как сильный окислитель [6]. Плазменный способ обеспечивает нагрев частиц до более высоких температур, чем детонационный. Ограничения о температуре при детонационном способе нанесения покрытий компенсируются более высокой кинетической энергией частиц, что позволяет наносить и тугоплавкие материалы.

В работе [9] было исследовано коррозионное поведение покрытий  $\text{Ni20Cr}$ , полученных с методами детонационного напыления (ДН), высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF) и холодного напыления. Сравнительный анализ трех различных покрытий показал, что детонационное напыление оказалась лучше с точки зрения защиты от горячего коррозионного разрушения. Это может быть связано с развитием защитной фазы  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  наряду с  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ . Кроме того, покрытие, полученное методом ДН более плотное по сравнению с холодным напылением и HVOF. В работе [10] было обнаружено, что покрытие  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ , полученное методом ДН значительно уменьшает скорость эрозионно-коррозионных процессов и окисления, по сравнению с покрытиями, полученными методом HVOF.

Повышение качественных характеристик газотермических покрытий может быть достигнуто внешним высокоэнергичным воздействием [11]. Наиболее эффективная технология – это комплексная импульсно-плазменная обработка (ИПО), включающая модифицирование поверхности: магнитным полем, электрическим током (поток заряженных элементарных частиц), высоко градиентной тепловой струей (плазмой), содержащей металлические и неметаллические легирующие элементы [8, 12].

С учетом изложенного выше критерием оптимизации импульсно-плазменной обработки покрытий  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  выбрана максимальная степень их оплавления и уплотнения, что достигается варированием дистанции воздействия [13]. Вместе с тем уменьшение дистанции ограничивается появлением признаков разрушения покрытий (например, развиваются трещины).

Целью настоящей работы является изучение влияние дистанции импульсно-плазменной обработки на структуру и свойство детонационных покрытий на основе  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ .

## **Материал и методы**

В качестве напыляемого материала использовали порошок  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  (75/25) (фирмы H.C. Starck: AMPERIT® 584.054) с дисперсностью 10-45 мкм. Покрытия наносили на образцы из стали 12X1МФ методом детонационного напыления (DS) на многокамерной детонационной

установке [14]. Для создания высоких параметров (давление, скорость) продуктов сгорания использовали многокамерную конструкцию устройства, в котором реализуется режим детонационного горения газовой смеси в специально спрофилированных камерах и последующее аккумулятирование энергии сгорания от этих камер в цилиндрическом стволе [14]. Устройство обеспечивает образование струи продуктов сгорания для ускорения и нагрева напыляемый порошка и нанесения высококачественных металлических и керамических покрытий [14, 15].

На рисунке 1 показан общий вид многокамерного детонационного устройства [14], которое было разработано в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. Устройство имеет три камеры: 1 – форкамера для инициирования процесса детонации; 2 – основная цилиндрическая камера, где происходит развитие детонационного режима сгорания; 3 – кольцевая полусферическая камера со щелевым выходом в коноидную камеру, соосную со стволом. Ускорение и нагрев дозы порошка осуществляется в цилиндрическом стволе – 4. Дозирование и подача порошка осуществляется через кольцевую щель 5. Инициирование детонации осуществляется автомобильной свечой – 6. Замеры давления и скорости продуктов сгорания осуществляется датчиками давления 7 и 8, установленных на концах ствола. В полусферической камере реализуется режим детонации в угловых концентраторах, что существенно повышает скорость и полноту сгорания компонентов горючей смеси. Продукты сгорания из камер аккумулятируются и обеспечивают их высокое давление и температуру. В конечном итоге это реализуется в высокую скорость и достаточно высокую температуру, обеспечивающую возможность напыления керамических покрытий [16].

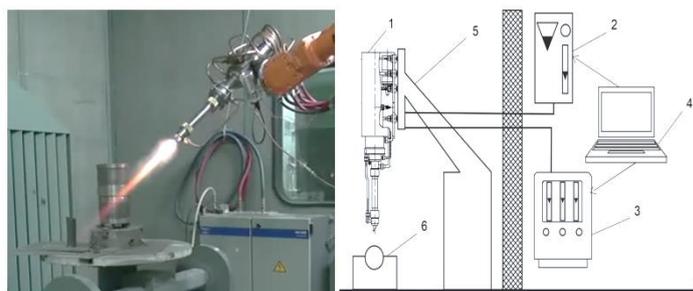


Рисунок 1 – Схема детонационного устройства

1 – форкамера; 2 – цилиндрическая камера; 3 - кольцевая полусферическая камера; 4 – ствол;  
5 – кольцевая щель; 6 – свеча для инициирования детонации; 7, 8 – датчики давления

Таблица 1 – Расход компонентов горючей смеси детонационного устройства

Компоненты смеси		Расход, м <sup>3</sup> /час
1 камера	O <sub>2</sub>	2,92
	воздух	1,33
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,66
2 камера	O <sub>2</sub>	2,93
	воздух	1,43
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,66
Транспортирующий газ:		0,9

Для модифицирования детонационного покрытия на поверхности изделия была применена импульсно-плазменная обработка (ИПО) [16]. Формирование высокоэнергетических импульсов осуществляется в плазматроне путем реализации в нем нестационарных детонационных режимов горения горючих газовых смесей (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> и O<sub>2</sub>) между двумя коаксиальными электродами. Энергетические параметры продуктов нестационарного детонационного горения (импульсной плазменной струи) определяли решением двумерной нестационарной задачи распространения детонационной волны (ДВ) в электрическом поле между двумя коаксиальными электродами плазматрона. На рисунке рисунке 2б импульсный плазматрон, который состоит из детонационной камеры 1, где осуществляется формирование горючей газовой смеси и инициирование детонационного ее сгорания. Плазматрон имеет центральный электрод – анод 3, конический электрод – катод 4, испаряемый электрод – 5.

Электроды включены в электрическую цепь к специальному источнику питания – 2, sample – 7

При инициировании детонации продукты сгорания поступают из детонационной камеры в межэлектродный зазор – 4 и замыкают электрическую цепь. Стационарное детонационное сгорание горючих газов переходит в нестационарное, которое получает дополнительную энергию через электропроводный слой продуктов сгорания – 7. При выбросе плазменной струи – 8 из плазматрона, она замыкает электрическую цепь между электродом – анодом и поверхностью изделия – катодом – 9. В результате прохождения по этой струе электрического тока, плазма дополнительно нагревается за счет Джоулева тепловыделения. Расходуемый электрод – 5 обеспечивает ввод в плазменную струю легирующих элементов. При напряженности электрического поля между электродами  $3.5 \times 10^5$  В/м скорость плазмы на выходе из плазматрона достигает 4 км/с, а температура 12000 К. В момент взаимодействия плазменного импульса с поверхностью изделия – 6 в зоне контакта образуется область ударно-сжатого плазменного слоя.

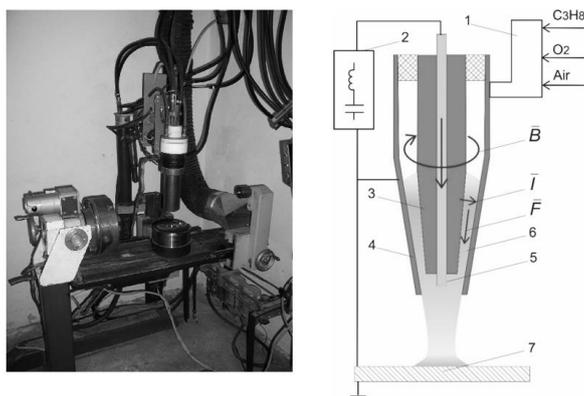


Рисунок 2 – Схема импульсно-плазменного устройства

1 – детонационная камера, 2 – источник питания, 3,4 – коаксиальные электроды, 5 – эродированный электрод, 6 – плазма, 7 – образец

Параметры импульсно-плазменной обработки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры ИПО

Параметр	Величина
Напряжение на конденсаторной батарее (В)	3200
Емкость конденсаторной батареи (мкФ)	960
Индуктивность разрядного контура (мкГн)	30
Частота плазменных импульсов (Гц)	1.2
Скорость перемещения (мм/сек)	3,4
Дистанция до образца (мм)	40, 50, 60, 70

Фазовый состав покрытий ДН и ДН/ИПО изучали с использованием метода рентгеноструктурного анализ на рентгеновском дифрактометре X'PertPRO с Cu-K $\alpha$ -излучением ( $\lambda = 2,2897 \text{ \AA}$ ), напряжение 40 кВ и ток 30 мА. Расшифровку дифрактограмм проводили с помощью программы HighScore, измерения проводились в диапазоне  $2\theta$ , равном  $20^\circ$ - $90^\circ$ , с шагом 0,02 и временем счета 0,5 с/шаг. Микроснимки поверхности покрытия получили с помощью металлографического микроскопа (модель Altami MET 5S, ООО «Альтами»). Шероховатость поверхности покрытий  $R_a$  оценивалась с помощью профилометра модели 130.

Твердость поперечного сечения образцов измеряли методом наноиндентирования на нанотвердомере НаноСкан-4D в соответствии с ГОСТ Р8.748-2011, с использованием индентора Берковича воспроизводили 15 уколов при нагрузке 100 мН.

Трибологические испытания на трение скольжения проводили на трибометре TRB<sup>3</sup> с использованием стандартной методики «шар-диск» (международные стандарты ASTM G 133-95 и ASTM G99), где в качестве контртела использовали шарик диаметром 6,0 мм, из стали с покрытием SiC, при нагрузке 6 Н и линейной скорости 15 см/сек, радиусом кривизны износа 5

мм, пути трения 1200м.

### Результаты и обсуждение

Фазовый состав покрытий изучали с использованием метода рентгеноструктурного анализ на рентгеновском дифрактометре X'PertPRO. На рисунке 3 представлены дифрактограммы поверхности покрытия до и после импульсно-плазменной обработки. В покрытиях до импульсно-плазменной обработки обнаружены следующие фазовые составляющие: NiCr, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> и Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> фазы (рис. 3). После ИПО на поверхности обнаружены фазы оксида хрома Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 3). При этом, после ИПО на рентгенограмме наблюдается рост интенсивности пиков карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> кроме того, на дифрактограмме выявлены многочисленные новые рефлексии, относящиеся к этой фазе, причиной которому является кратковременная активизация поверхности покрытия из за импульсной плазмы, где плазма содержащая активный углерод и кислород обуславливает протекания двух взаимоисключающих химико термических процессов окисления и карбюризации. Сочетание твердых фаз оксида и карбида хрома в упрочненной металлической матрице существенно повышает стойкость полученного материала в условиях абразивного износа. Большой рост интенсивности пиков карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> наблюдается при дистанции 40мм. А уже при дистанции 70 мм видно уменьшение интенсивности пиков Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Методом наноиндентирования определяли твердость детонационных покрытий Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr до и после импульсно-плазменной обработки. Результаты измерения твердости показаны на рисунке 4. Твердость покрытий после импульсно-плазменной обработки имеет высокое значение по сравнению с исходным покрытием. Величина твердости зависит от расстояния обработки. Высокая твердость наблюдается после импульсно-плазменной обработки на расстоянии 40 мм (~17,6 GPa), а по мере отдаления плазмотрона от обрабатываемой поверхности твердость снижается. Это может быть связано со степенью локализованного плавления материала, которая зависит от расстояния воздействия импульсной плазмы.

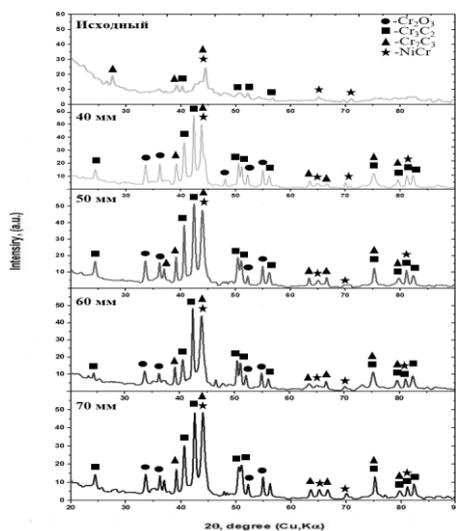


Рисунок 3 – Рентгенограммы поверхности материала покрытия Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr до и после импульсно-плазменной обработки

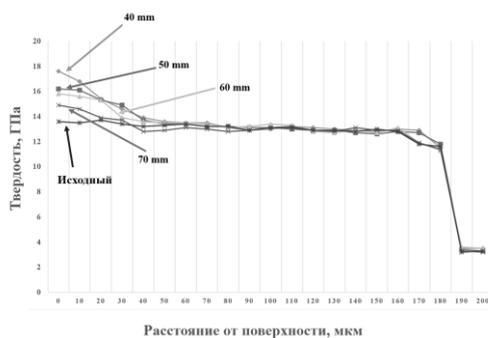


Рисунок 4 – График распределения твердости и по глубине покрытий Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr до (а) и после PPT (б)

На рисунке 5. отображены результаты измерения шероховатости поверхности материала покрытий на основе  $\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{NiCr}$ , согласно которым установлено что поверхность имеет неоднородную структуру с наличием пор. В качестве основного параметра оценки шероховатости поверхности покрытия была выбрана величина  $R_a$ , которая представляет собой среднее арифметическое отклонение профиля. Значение шероховатости зависит от расстояния обработки. Самая низкая шероховатость наблюдается после импульсно-плазменной обработки на расстоянии 40 мм (рис. 5б). Значения шероховатости поверхности на  $\approx 42\%$  по сравнению с параметрами шероховатости покрытия до РРТ. А также и других дистанциях видно снижение шероховатости (рис. 5с,d,e). Такое снижение показателя шероховатости обусловлено оплавлением импульсной плазмой выступающих фрагментов и пор шероховатости покрытия, которая способствовала снижению значения шероховатости.

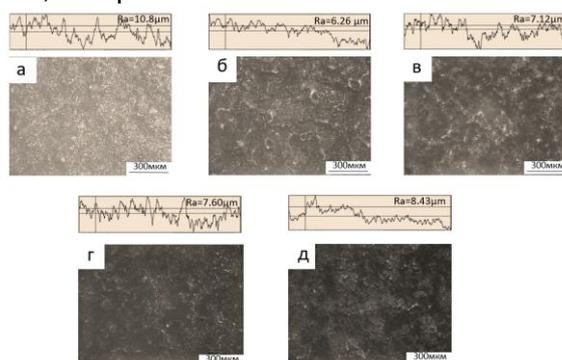


Рисунок 5 – Снимки рельефа и шероховатость поверхности покрытия  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  до (а) и после (б – 40 мм, в – 50 мм, г – 60 мм, д – 70 мм) импульсно-плазменной обработки

Одним из основных свойств отвечающих за долговечность изделий является трибологические параметры, которые в настоящей работе оценивались значением объема износа покрытий до и после ИПО по схеме «шар-диск» (рис. 6а). По полученным значениям профилометра были построены профилограммы, а так же с использованием специальной программы были получены значения для расчета объемов износа до и после ИПО (рис. 6б). Результаты испытания показали, что после РРТ покрытие имеет повышенную износостойкость согласно подтверждению РДА это вероятнее всего связано с повышением долей  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  карбидной фазы, которая обладает высокой стойкостью к износу. Согласно исследованию трибологических характеристик поверхности покрытия установлено, что импульсно плазменная обработка оказала существенное влияние на значение коэффициента трения поверхности покрытия и износостойкость (повышена почти в 2 раза по сравнению с значениями до ИПО). Износостойкость зависит от расстояния обработки. На основании полученных данных наиболее износостойким является покрытие обработанный на расстоянии 40 мм.

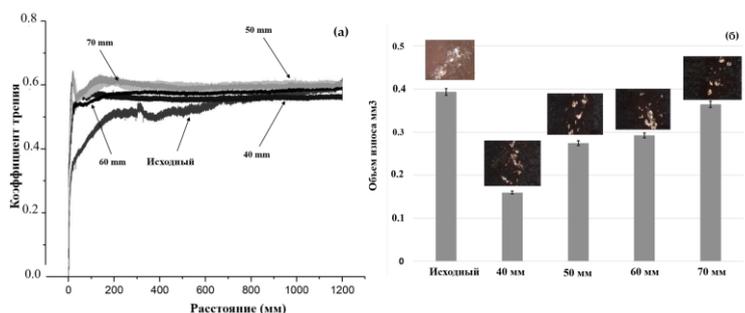


Рисунок 10 – Результаты трибологических испытаний покрытий  $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$  до и после ИПО

### Заключение

Изучено влияние дистанции импульсно-плазменной обработки на структуру и свойство детонационных покрытий на основе  $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$ . На основании анализа результатов исследования можно сделать следующие выводы:

- Установлено, что после ИПО на поверхности обнаружены фазы оксида хрома  $Cr_2O_3$ , а также увеличивается интенсивность пиков  $Cr_3C_2$  и появляются новые рефлексы  $Cr_3C_2$ , которые указывает на увеличение содержания  $Cr_3C_2$  фазы;
  - Покрытие, обработанное на расстоянии 40 мм, характеризуется минимальной пористостью по сравнению с другими режимами ИПО. Снижение показателя шероховатости обусловлено оплавлением импульсной плазмой выступающих фрагментов и пор шероховатости покрытия
  - На основании полученных данных наиболее оптимальной является импульсно-плазменная обработка на расстоянии 40 мм.
- Можно рекомендовать эту технологию нанесения покрытий, включающей детонационного напыления и последующей импульсно-плазменной обработки, как оптимальный способ защиты поверхностей деталей, работающих в экстремальных условиях эрозийного и абразивного износа

### Список литературы

1. Erosion and corrosion behavior of shrouded plasma sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating / Lu H. et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Т. 388. – С. 125534. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.043>.
2. Pogrebnyak A.D., Tyurin Y.N. Modification of material properties and coating deposition using plasma jets / A.D. Pogrebnyak, Y.N. Tyurin // *Physics-Uspekhi*. – 2005. – Т. 48, № 5. – P. 487. <https://doi.org/10.1070/pu2005v048n05abeh002055>.
3. Dominant effect of carbide rebounding on the carbon loss during high velocity oxy-fuel spraying of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr / C.J. Li et al // *Thin Solid Films*. – 2002. – Т. 419, № 1-2. – P. 137-143. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00708-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00708-3).
4. Janka L. et al. Influence of heat treatment on the abrasive wear resistance of a Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>NiCr coating deposited by an ethene-fuelled HVOF spray process / L. Janka et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Т. 291. – P. 444-451. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.066>.
5. Matikainen V. A study of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-based HVOF-and HVOF-sprayed coatings: abrasion, dry particle erosion and cavitation erosion resistance / V. Matikainen, H. Koivuluoto, P. Vuoristo // *Wear*. – 2020. – Т. 446. – P. 203188. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203188>.
6. High temperature oxidation of metal, alloy and cermet powders in HVOF spraying process / K. Korpiola et al / Helsinki University of Technology. – 2004.
7. Technology and properties of nanostructured detonation coatings / M.V. Nenashev et al // *Izv. RAS SamSC*. – 2011. – Т. 13. – P. 390-393.
8. Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coatings / D.N. Kakimzhanov et al // *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. – 2021. – Т. 5, № 1. – P. 45-51. <https://doi.org/10.32523/ejpfm.2021050106>.
9. The experience of research and application of technology for applying detonation coatings / V.Y. Ulianitsky et al // *Izv. RAS SamSC*. – 2010. – Т. 12. – С. 569-575. <https://doi.org/10.48081/YBCY7199>.
10. Modern techniques for automated acquiring and processing data of diffraction electron microscopy for nano-materials and single-crystals / V. Sydorets et al // *Materials Science Forum*. – Trans Tech Publications Ltd. – 2020. – Т. 992. – P. 907-915.
11. Автоматическая сварка / Л.И. Маркашова и др. // *Автоматическая сварка*. – 2017. – № 09. – С. 06.
12. Structural features and tribological properties of detonation gun sprayed Ti-Si-C coating / B. Rakhadilov et al // *Coatings*. – 2021. – Т. 11. – № 2. – P. 141. <https://doi.org/10.3390/coatings11020141>.
13. Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating / G.C. Ji et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Т. 200, № 24. – P. 6749-6757. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.10.005>.
14. Колисниченко О.В. Эффективность процесса напыления покрытий с использованием многокамерного детонационного устройства / О.В. Колисниченко, Ю.Н. Тюрин, Р. Товбин // *Автоматическая сварка*. – 2017.
15. Тюрин Ю.Н., Жадкевич М.Л. Плазменные упрочняющие технологии / Ю.Н. Тюрин, М.Л. Жадкевич // *Наукова думка, Киев*. – 2008. – 218 с.

16. Процессы залечивания микротрещин в металле под действием импульсов тока высокой плотности / К.В. Кукуджанов и др. // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. – Т. 78, № 3. – С. 300-310. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-3-300-310>.

### References

1. Erosion and corrosion behavior of shrouded plasma sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating / Lu H. et al // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 388. – S. 125534. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.043>. (In English).
2. Pogrebnyak A.D., Tyurin Y.N. Modification of material properties and coating deposition using plasma jets / A.D. Pogrebnyak, Y.N. Tyurin // Physics-Uspekhi. – 2005. – Т. 48, № 5. – R. 487. <https://doi.org/10.1070/ps2005v048n05abeh002055>. (In English).
3. Dominant effect of carbide rebounding on the carbon loss during high velocity oxy-fuel spraying of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr / C.J. Li et al // Thin Solid Films. – 2002. – Т. 419, № 1-2. – R. 137-143. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00708-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00708-3). (In English).
4. Janka L. et al. Influence of heat treatment on the abrasive wear resistance of a Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>NiCr coating deposited by an ethene-fuelled HVOF spray process / L. Janka et al // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Т. 291. – R. 444-451. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.066>. (In English).
5. Matikainen V. A study of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-based HVOF-and HVAF-sprayed coatings: abrasion, dry particle erosion and cavitation erosion resistance / V. Matikainen, H. Koivuluoto, P. Vuoristo // Wear. – 2020. – Т. 446. – R. 203188. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203188>. (In English).
6. High temperature oxidation of metal, alloy and cermet powders in HVOF spraying process / K. Korpiola et al / Helsinki University of Technology. – 2004. (In English).
7. Technology and properties of nanostructured detonation coatings / M.V. Nenashev et al // Izv. RAS SamSC. – 2011. – Т. 13. – R. 390-393. (In English).
8. Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coatings / D.N. Kakimzhanov et al // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2021. – Т. 5, № 1. – R. 45-51. <https://doi.org/10.32523/ejpfm.2021050106>. (In English).
9. The experience of research and application of technology for applying detonation coatings / V.Y. Ulianitsky et al // Izv. RAS SamSC. – 2010. – Т. 12. – S. 569-575. <https://doi.org/10.48081/YBCY7199>. (In English).
10. Modern techniques for automated acquiring and processing data of diffraction electron microscopy for nano-materials and single-crystals / V. Sydorets et al // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd. – 2020. – Т. 992. – R. 907-915. (In English).
11. Avtomaticheskaya svarka / L.I. Markashova i dr. // Avtomaticheskaya svarka. – 2017. – № 09. – S. 06. (In Russian).
12. Structural features and tribological properties of detonation gun sprayed Ti-Si-C coating / B. Rakhadilov et al // Coatings. – 2021. – Т. 11. – № 2. – R. 141. <https://doi.org/10.3390/coatings11020141>. (In English).
13. Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating / G.C. Ji et al // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Т. 200, № 24. – R. 6749-6757. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.10.005>. (In English).
14. Kolisnichenko O.V. Ehffektivnost' protsessa napyleniya pokrytii s ispol'zovaniem mnogokamernogo detonatsionnogo ustroystva / O.V. Kolisnichenko, YU.N. Tyurin, R. Tovbin // Avtomaticheskaya svarka. – 2017. (In Russian).
15. Tyurin YU.N., Zhadkevich M.L. Plazmennyye uprochnyayushchie tekhnologii / YU.N. Tyurin, M.L. Zhadkevich // Naukova dumka, Kiev. – 2008. – 218 s. (In Russian).
16. Protsessy zalechivaniya mikrotreshchin v metalle pod deistviem impul'sov toka vysokoi plotnosti / K.V. Kukudzhanov i dr. // Problemy prochnosti i plastichnosti. – 2016. – Т. 78, № 3. – S. 300-310. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-3-300-310>. (In Russian).

### Информация о финансировании

*Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №BR24992870).*

Д.Н. Кәкімжанов\*, М.К. Даутбеков, Е.С. Тұрабеков, Р.М. Қуанышбай, А.С. Рүстемов  
Plasma Science ЖШС,  
070018, Қазақстан, Өскемен қаласы, Гоголь көшесі 7Г,  
\*e-mail: dauir\_97@mail.ru

## ИМПУЛЬСТІ-ПЛАЗМАЛЫҚ ӨНДЕУ ҚАШЫҚТЫҒЫНЫҢ ӨЗГЕРУІНІҢ $Cr_3C_2$ -NiCr ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӨСЕРІ

Өнімнің өнімділік қасиеттерін арттыру және қызмет ету мерзімін арттырудың ең перспективалы әдістерінің бірі әртүрлі бүрку технологияларын қолдана отырып, функционалды жабындарды қолдану болып табылады.  $Cr_3C_2$ -NiCr металл-керамикалық композицияның тозуға және коррозияға жоғары төзімділігін ескере отырып, мұндай жабындар қалдықтарды жағуға арналған қазандықтардың ыстық бөліктеріндегі болат элементтерін қорғау үшін белсенді түрде қолданыла бастады, сонымен қатар электр пештері мен жұмыс істеп тұрған жабдықтарда табиғи газ бойынша. Бұл зерттеу импульсті-плазмалық өңдеудегі қашықтықтың  $Cr_3C_2$ -NiCr детонациялық жабындарының беткі қабатының құрылымдық сипаттамаларына әсерін қарастырады. Біз детонациялық құрылғыны қолдана отырып, осындай жабындарды қолдануды, содан кейін оларды импульстік-плазмалық әдіспен өңдеуді қамтитын процесті зерттейміз. Нәтижелер көрсеткендей, мұндай өңдеуден кейін жабындардың құрылымдық компоненттері балқып, тегістеледі, бұл олардың плазмалық импульстардың әсерінен жойылуына әкелмейді. Жабындардың микроқұрылымы  $Cr_3C_2$ -NiCr негізіндегі балқытылған металл керамикалық материал болып табылады. Импульсті-плазмалық өңдеуден кейін бетінде  $Cr_2O_3$  хром оксидінің фазалары анықталды,  $Cr_3C_2$  шыңдарының қарқындылығы артып, жаңа  $Cr_3C_2$  рефлекстері пайда болды, бұл  $Cr_3C_2$  фазасының жоғарылауын көрсетеді. Сондай-ақ, бұл өңдеуден кейін микроқұрылым біркелкі болып,  $Cr_3C_2$ -NiCr негізіндегі детонациялық жабынның тығыздалуына әкелетіні байқалды.

**Түйін сөздер:** Металл-керамикалық жабындар, детонациялық бүрку, импульсті-плазмалық өңдеу, жабынды өзгерту, қаттылық, тозуға төзімділік.

D.N. Kakimzhanov\*, M.K. Dautbekov, E.S. Turabekov, R.M. Quanyshbay, A.S. Rustemov  
Plasma Science LLP,  
070018, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Gogol Street 7g,  
\*e-mail: dauir\_97@mail.ru

## EFFECT OF VARYING THE PULSE-PLASMA TREATMENT DISTANCE ON THE PROPERTIES OF $Cr_3C_2$ -NiCr DETONATION COATINGS

One of the most promising methods to improve the operational properties and increase the service life of products is the application of functional coatings using various sputtering technologies. Considering the high resistance to wear and corrosion of  $Cr_3C_2$ -NiCr metal-ceramic composition, such coatings have started to be actively used to protect steel elements in hot parts of boilers designed for waste incineration, as well as in electric furnaces and equipment operating on natural gas. This study examines the effect of pulse-plasma treatment distance on the structural characteristics of the surface layer of  $Cr_3C_2$ -NiCr detonation coatings. We study a process involving the deposition of such coatings using a detonation device and then their treatment by pulse plasma. The results show that after such treatment, melting and levelling of the structural components of the coatings occurs without leading to their destruction by the plasma pulses. The microstructure of the coatings is a molten  $Cr_3C_2$ -NiCr based metal-ceramic material. After pulse plasma treatment,  $Cr_2O_3$  chromium oxide phases are found on the surface, the intensity of  $Cr_3C_2$  peaks increases and new  $Cr_3C_2$  reflections appear, indicating an increase in the  $Cr_3C_2$  phase content. It is also observed that the microstructure becomes more homogeneous after this treatment, which leads to the densification of the  $Cr_3C_2$ -NiCr-based detonation coating.

**Key words:** Ceramic metal coatings, detonation spraying, pulse-plasma treatment, coating modification, hardness, wear resistance.

### Сведения об авторах

Дауір Нуржанұлы Какимжанов\* – PhD, ассоциированный профессор, директор научно-производственной компании «Plasma Science», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: dauir\_97@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9453-0456>.

Мерхат Курметович Даутбеков – PhD, ассоциированный профессор, руководитель производственного центра «Volat», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: merkhatd@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0203-6050>.

Ернар Серикжанұлы Турабеков – инженер научно-производственной компании «Plasma Science», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: ernarturabekov28@gmail.com.

**Рашид Маратулы Куанышбай** – инженер научно-производственной компании «Plasma Scince», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: rashidmaratly08@gmail.com.

**Ануар Саятбекулы Рустемов** – инженер научно-производственной компании «Plasma Scince», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: anuarrustemovv05@gmail.com.

#### Авторлар туралы мәліметтер

**Дәуір Нұржанұлы Кәкімжанов\*** – PhD, қауымдастырылған профессор, «Plasma Scince» ғылыми-өндірістік компаниясының директоры, Өскемен, Қазақстан; e-mail: dauir\_97@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9453-0456>.

**Мерхат Курметович Даутбеков** – PhD, қауымдастырылған профессор, «Bolat» өндірістік орталығының басшысы, Өскемен, Қазақстан; e-mail: merkhatd@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0203-6050>.

**Ернар Серікжанұлы Тұрабеков** – инженер научно-производственной компании «Plasma Scince», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: ernarturabekov28@gmail.com.

**Рашид Маратулы Куанышбай** – инженер научно-производственной компании «PlasmaScince», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: rashidmaratly08@gmail.com.

**Ануар Саятбекулы Рустемов** – инженер научно-производственной компании «Plasma Scince», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: anuarrustemovv05@gmail.com.

#### Information about the authors

**Dauir Nurzhanuly Kakimzhanov\*** – PhD, Associate Professor, Director of the scientific and production company PlasmaScince, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: dauir\_97@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9453-0456>.

**Merkhat Kurmetovich Dautbekov** – PhD, Associate Professor, Head of the Bolat Production Center, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: merkhatd@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0203-6050>.

**Ernar Serikzhanuly Turabekov** – engineer of the scientific and production company «Plasma Scince», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: ernarturabekov28@gmail.com.

**Rashid Maratuly Kuanysbay** – engineer of the scientific and production company «Plasma Scince», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: rashidmaratly08@gmail.com.

**Anuar Sayatbekuly Rustemov** – engineer of the scientific and production company "PlasmaScince", Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: anuarrustemovv05@gmail.com.

Поступила в редакцию 11.10.2024  
Поступила после доработки 10.12.2024  
Принята к публикации 12.12.2024

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4\(16\)-41](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-41)



МРНТИ: 81.09.00.

**Ж.Б. Сагдолдина<sup>1,2</sup>, Д.Р. Байжан<sup>1,2\*</sup>.**

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова,  
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, пр. Шакарима 148

<sup>2</sup>Университет имени Шакарима города Семей,  
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

\*e-mail: daryn.baizhan@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**Аннотация:** Процесс остеоинтеграции в значительной степени зависит от шероховатости поверхности, структуры, химического состава и механических характеристик покрытия. В связи с этим важным направлением в развитии медицинских материалов является разработка новых технологий модификации поверхности и создания биоактивных керамических покрытий. Кальций-фосфатные материалы на основе гидроксипатита предлагаются в качестве биоактивных керамических покрытий на титановых имплантатах для эффективного ускорения заживления костной ткани. В статье рассмотрены результаты исследования процесса формирования