



ӘӨЖ 29.19.13

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2024-148-3-98-116>

Ғылыми мақала

Поверхностная модификация (DS) покрытий на основе Ni-Cr-Al методом импульсной плазменной обработки (PPT)

Д.К. Ескермесов¹, Б.К. Рахадиллов^{2,3}, Ж.Т. Толеуханова*¹, С. Пазылбек⁴,
А.С. Ескермесова³

¹НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева», Усть-Каменогорск, Казахстан

²НАО «Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова», Усть-Каменогорск, Казахстан

³ТОО «PlasmaScience», Усть-Каменогорск, Казахстан

⁴Университет имени Жумабека Ахметулы Ташенева, Шымкент, Казахстан

(E-mail: *ztoleukhanova@ektu.kz)

Аннотация. Для защиты материалов от абразивной коррозии можно использовать различные методы термического напыления для нанесения покрытий, такие, как порошковое напыление газовым пламенем, плазменное напыление, напыление и плавление, высокоскоростное кислородно-газовое напыление и детонационное напыление. Термическое напыление является одним из наиболее эффективных методов защиты материала от износа и коррозии, тем самым увеличивая срок службы материала. В данной статье представлено изменение поверхности покрытий на основе Ni-Cr-Al методом импульсной плазменной обработки с использованием плазменного генератора. Покрытия были получены методом детонационного напыления (DS), после чего прошли импульсную плазменную обработку (PPT). Изучены изменения структурно-фазового состояния покрытий под воздействием плазменного потока. В работе использовались сканирующая электронная микроскопия (SEM), рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия (EDX), рентгеноструктурный анализ (XRD), характеристика шероховатости поверхности, испытания на твердость и трибологические испытания для комплексного анализа изменений характеристик детонационных Ni-Cr-Al покрытий. Показано, что модификация поверхности покрытий импульсной плазменной обработкой приводит к увеличению износостойкости их поверхностного слоя за счет уменьшения коэффициента трения и увеличения микротвердости. Согласно результатам рентгеновского фазового анализа, улучшение трибомеханических свойств полученных поверхностей связано с увеличением содержания фаз CrNi₃, NiAl и NiCr в обработанных покрытиях.

Ключевые слова: покрытие, термическое напыление, детонационное напыление, импульсная плазменная обработка, коэффициент трения, шероховатость, микротвердость.

Введение

Защитные и функциональные покрытия используются в различных приложениях, включая автомобильные системы, компоненты котельного оборудования и силовое оборудование, химическое оборудование для процессов, авиационные двигатели, ортопедию и стоматологию, сухопутные и морские турбины, а также суда [1]. Среди коммерчески доступных методов термического напыления наиболее подходящими для получения желаемых твердых, плотных и износостойких покрытий являются детонационное напыление (DS) и напыление высокоскоростным кислородно-газовым пламенем (HVOF) [2].

Требуемые свойства покрытия могут быть достигнуты с помощью различных методов, одним из которых является термическое напыление. Термическое напыление - это нанесение материала на подложку в виде размягченных или расплавленных капель с образованием сплошного покрытия. Это эффективный и недорогой метод нанесения покрытий для изменения свойств поверхности материала, который стал важным инструментом в технологии обработки поверхностей [3]. Для нанесения покрытий используется множество методов термического напыления, таких, как газопламенное порошковое напыление [4], дуговое напыление проволокой [5], плазменное напыление [6, 7], высокоскоростное кислородно-топливное напыление (HVOF) [8] и напыление из детонационного пистолета [9]. Выбор способа зависит от функциональных требований, приспособляемости материала покрытия к предполагаемому способу, требуемого уровня адгезии, доступности метода и стоимости оборудования [10].

Покрытия, наносимые методом детонационного напыления, играют важную роль в защите материалов и сплавов от износа и коррозии [11]. Различные исследователи проводили работы по изучению характеристик покрытий, формируемых методом детонационного напыления [12-13]. Однако работ в области использования наноструктурированных порошков с детонационным напылением пока немного. Необходимы также дополнительные исследования для оптимизации технологических параметров процесса детонационного напыления, совершенствования конструкции устройства для распыления с помощью детонационного пистолета [14] и понимания того, как технологические параметры детонационного напыления влияют на микроструктуру, механические и другие свойства покрытий [15].

Разработанное исследователями устройство разделения с помощью детонационного пистолета позволило добиться хороших результатов распыления с помощью детонационного пистолета при высоких требованиях к производительности [16]. Процесс распыления с помощью детонационного пистолета, используемый в данной работе, аналогичен описанному авторами [17]. Материал для покрытия подается через дозатор в виде порошка одновременно со смесью горючих газов (например, кислорода и ацетилена). Затем свеча зажигания поджигает газ внутри камеры,

создавая детонационную волну, которая продвигает материал покрытия через металлический барабан к подложке с очень высокими скоростями. Как результат, при ударе частиц горячего порошка о подложку их высокая кинетическая энергия способствует формированию покрытия, отличающегося высокой твердостью, плотностью и долговечностью. Толщина покрытия зависит от различных технологических параметров, включая, но не ограничиваясь ими, размер частиц материала покрытия, соотношение используемых газообразных продуктов сгорания, расход газа и расстояние между выпускным отверстием цилиндра и подложкой. Цикл детонационного напыления можно повторять со скоростью от 1 до 10 циклов в секунду, пока не будет достигнута желаемая толщина покрытия [18].

Качество покрытий, получаемых методом детонационного напыления, определяется двумя ключевыми параметрами: скоростью u и температурой t_c частиц в момент их столкновения с поверхностью. Для оптимального формирования покрытия важно, чтобы распыляемые частицы (температура распыления, t_p) находились в полурасплавленном состоянии (при температуре, равной температуре расплавления ($t_c = t_p$)) перед столкновением с подложкой. Частицы, не достигшие полурасплавленного состояния, обычно отскакивают от поверхности, что приводит к снижению скорости осаждения. В случае, если такие частицы всё же проникают в слой, они ухудшают качество покрытия, вызывая появление дефектов и неровностей. Перегрев частиц также нежелателен, так как это вызывает разбрызгивание капель и, соответственно, ухудшение качества поверхности покрытия [19].

Предварительные исследования показали, что фазовый состав детонационных покрытий значительно зависит от температуры термического отжига. Однако такая термообработка имеет недостаток, связанный с размягчением материалов подложки. Эти недостатки традиционных методов термообработки можно устранить с помощью термической активации поверхности импульсными потоками плазмы [20]. Импульсная плазменная обработка (РРТ) обладает рядом преимуществ, включая высокие скорости нагрева и охлаждения поверхности материала (10^4 - 10^8 К/с) и возможность формирования слоистых структур с различным фазовым составом, что позволяет изменять их физико-химические свойства. Кроме того, данная методика позволяет осуществлять локальное воздействие на изделие. Таким образом, технология импульсной плазмы предоставляет возможность управления изменениями поверхностного слоя. В литературе до сих пор отсутствует единое мнение о том, как РРТ влияет на структурно-фазовые преобразования в покрытиях на основе Ni-Cr-Al, а также о том, каким образом расстояние от плазменной горелки до поверхности образца сказывается на механических и трибологических свойствах покрытий. В этой статье мы исследуем влияние продолжительности обработки при РРТ-модификации покрытий Ni-Cr-Al, полученных методом детонационного напыления, под воздействием потока плазмы, на механические и трибологические свойства получаемых поверхностей.

Методология

DS покрытия на основе Ni-Cr-Al были распылены с использованием детонационной установки «Детонационное распыление с компьютерным управлением (CCDS2000)» (Исследовательская лаборатория «Поверхностная инженерия и трибология», Усть-Каменогорск, Казахстан). В этой установке детонация происходит внутри ствола в результате взрывоопасной смеси, которая формируется благодаря постоянной подаче газовых компонентов через специальное смесительное устройство (смотреть рисунок 1а) [21].

Поверхностная модификация покрытий PPT осуществлялась с помощью метода импульсной плазменной обработки, используя генератор плазмы, разработанный Институтом электросварки им. Е.О. Патона (Национальная Академия наук, Украина). Особенностью данного плазмотрона является возможность переключения электрического тока через область ионизированного газа за фронтом детонационной волны, что позволяет генерировать импульсную плазму с частотой от 1 до 4 Гц и энергией до 7 кДж (смотреть рисунок 1б).

Для повышения шероховатости поверхности и, следовательно, улучшения адгезии перед напылением подложки проходили пескоструйную обработку (Подложка: сталь DIN 14MoV63, среднее арифметическое отклонение профиля $R_a = 1,25$ мкм). В качестве напыляемого материала был использован композитный порошок 584.054 производства H.C. Starck. В качестве исходного материала использовалась смесь, состоящая из 80 мас.% никелевого порошка (Ni20Cr80) и 20 мас.% алюминия (чистотой 99,99%). Размер частиц порошка составлял от 30 до 45 мкм. В качестве горючего газа использовалась смесь ацетилена с кислородом, которая является наиболее распространённым топливом для детонации распыляемых порошков. Распыление происходило при соотношении ацетилена и кислорода O_2/C_2H_2 , равном 1,856. Объем взрывчатой смеси в стволе детонационного пистолета составлял 60%, а в качестве газа-носителя использовался азот. Расстояние между обработанной поверхностью образца и детонационным стволом было 250 мм. Детонационные покрытия обрабатывались импульсной плазменной дугой прямого действия при следующих параметрах: емкость конденсатора 960 мкФ, напряжение 3,2 кВ, индуктивность 30 мкГн, частота 1,2 Гц, скорость прохождения 3,4 мм/с, выемка электрода $h = 10$ мм, количество проходов – 1. Режимы обработки выбирались путём изменения расстояния H между плазменной горелкой и закалённой поверхностью (смотреть таблицу 1).

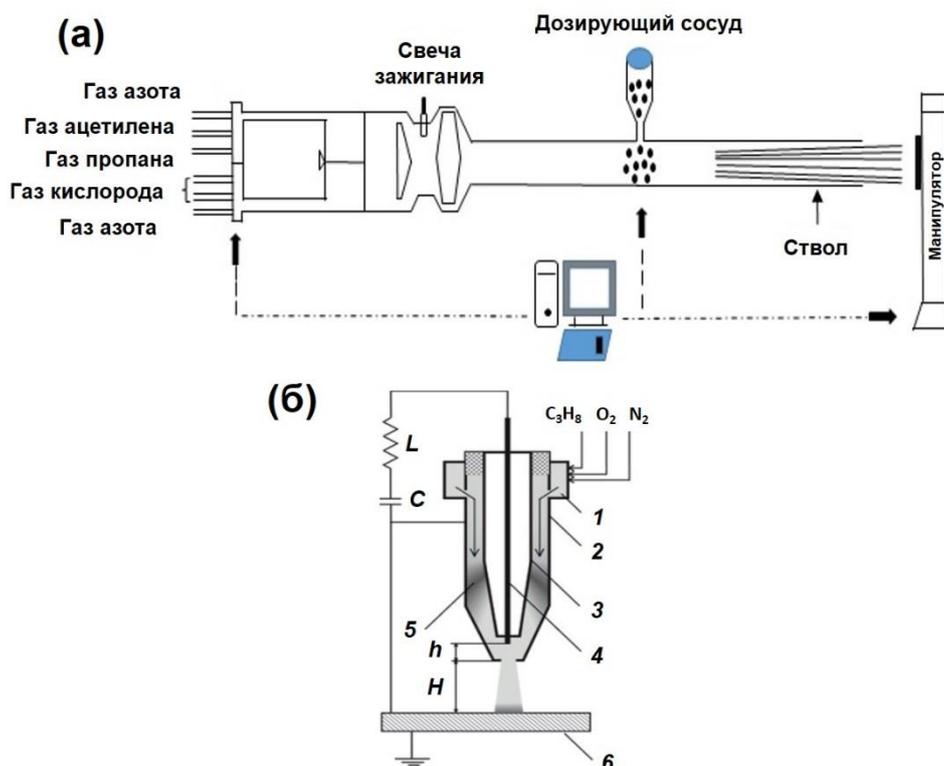


Рисунок 1. Принципиальная схема детонационного комплекса «CCDS2000» (а) и PPT (б): 1 – камера детонаций; 2, 3 – электроды с общим осевым направлением; 4 – изнашиваемый электрод; 5 – волна детонации; 6 – зона контакта плазмы [21]

Таблица 1. Технологические параметры обработки методом PPT для покрытий на основе Ni-Cr-Al

Номер образца	Покрытие	Расстояние от плазменной горелки до поверхности образца, Н (мм)	Средняя шероховатость (Ra) (мкм)	Микротвердость (ГПа)
1 (Исходное)	Ni-Cr-Al	-	9,83	4,1
2		40	4,47	7,4
3		50	6,12	6,2
4		60	3,82	7,6

Химический анализ состава и морфологию поверхности покрытия изучали с использованием рентгеновской энергодисперсионной спектрометрической системы «OXFORD INSTRUMENTS», растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (SEM/EDX) с аппаратами «VEGA³» (TESCAN), «SEM Solutions» (TESCAN) и «NeoScope JSM-5000» (JEOL) при напряжении 10-20 кВ.

Для изучения кристаллической структуры нанесенных покрытий была проведена рентгеновская дифракция (XRD) с помощью рентгеновского дифрактометра «D8 DISCOVER» (Bruker) при напряжении 40 кВ и токе 40 мА с медной мишенью ($\lambda = 154$ нм). Шаг сканирования составлял 0.02° в диапазоне углов от 10 до 90° . Для дифракции с изменяющимся углом падения был установлен многофункциональный адаптер.

Для анализа шероховатости поверхности R_a и объема удаленного материала покрытия мы измеряли сечение следа износа на поверхности образца с использованием профилометров модели «Model 130» (JSC Plant Proton) – контактный метод и «Alicona InfiniteFocus Model G5» (Bruker) – бесконтактный метод по стандарту ASTM D7127-05.

Определение микротвердости поверхности полученных DS покрытий выполнялись с использованием автоматизированного микротвердомера модели «METOLAB» по методике Виккерса с нагрузкой на индентор 0,2 Н (стандарт ASTM E384 11 охватывает измерение твердости по Виккерсу с использованием усилий в диапазоне от $9,807 \times 10^{-3}$ до 9,807 Н). Отпечатки индентором выполнялись на расстоянии 1 мм друг от друга по стандарту ASTM E384-11.

Трибологические исследования для определения коэффициента трения поверхности DS покрытий проводились при комнатной температуре 28°C в атмосфере воздуха по схеме «шарик-диск» на установке «Tribometer TRB3» (Anton Paar). В качестве контртела использовался шарикс диаметром 3 мм, изготовленный из прессованного сертифицированного материала – SHKh15. Нагрузка на шарик составляла 6Н, скорость скольжения – 2 см/с, радиус трека – 2,5 мм, общий пройденный путь встречного тела составлял 50 м. Условия анализа соответствовали международным стандартам ASTM G 133-95 и ASTM G99.

Результаты и Обсуждение

По полученным данным от растровой электронной микроскопии, процесс детонационного напыления и последующая обработка импульсной плазмой обладают определенными особенностями в формировании морфологии поверхности. На рисунке 2а показано РЭМ-изображение поверхности Ni-Cr-Al перед PPT. Покрытие имеет типичную структуру, характерную для методов термического напыления: высокую плотность, однородный состав и толщину слоя, а также наличие отдельных пор. На рисунке 2б-г показаны РЭМ-изображения поверхности Ni-Cr-Al после PPT. Видно, что поверхностный слой содержит сложный градиентный состав, модифицированный расплавленной плазмой. Перед нанесением PPT поверхностное покрытие демонстрирует значительные пространственные различия в элементном составе. На четырех участках, где проводился EDX для образца 1, атомный процент Ni колеблется от 15,49% до 64,82%, атомный процент Cr колеблется от 8,79% до 19,17%, а атомный процент Al колеблется от 8,74% до 70,10%. В результате импульсной плазменной обработки химический состав поверхности покрытий Ni-Cr-Al изменяется в зависимости от расстояния до плазмотрона с изменением интенсивности отдельных элементов, таких, как Al, Ni, Cr и Fe (см. таблицу 2 и рисунок 3).

Это хорошо согласуется со средним отношением Ni к Cr, измеренным при помощи EDX (с усреднением по 4 точкам), составляющим приблизительно 2.9 к 1. Появление пика Fe при 6.4 кэВ в спектрах EDX (Рисунок 4) показывает, что на поверхности покрытия содержится все больше Fe по мере уменьшения расстояния H между плазменной горелкой и поверхностью образца во время PPT. При расстоянии H 40 мм атомный процент Fe, измеренный EDX, составляет до 69.97%, по сравнению с 2.48% до PPT. Атомный процент Fe, измеренный EDX, остается присутствующим, но менее значимым для образцов 3 и 4, когда H равно 50 мм и 60 мм соответственно. Вполне вероятно, что в зоне реакции, где температура может достигать 3500 °С, происходит полное плавление нанесенного покрытия и частичное плавление содержащего Fe материала подложки. Фаза Al_2O_3 значительно более распространена после обработки PPT, которая проводится в атмосферных условиях, то есть в присутствии кислорода.

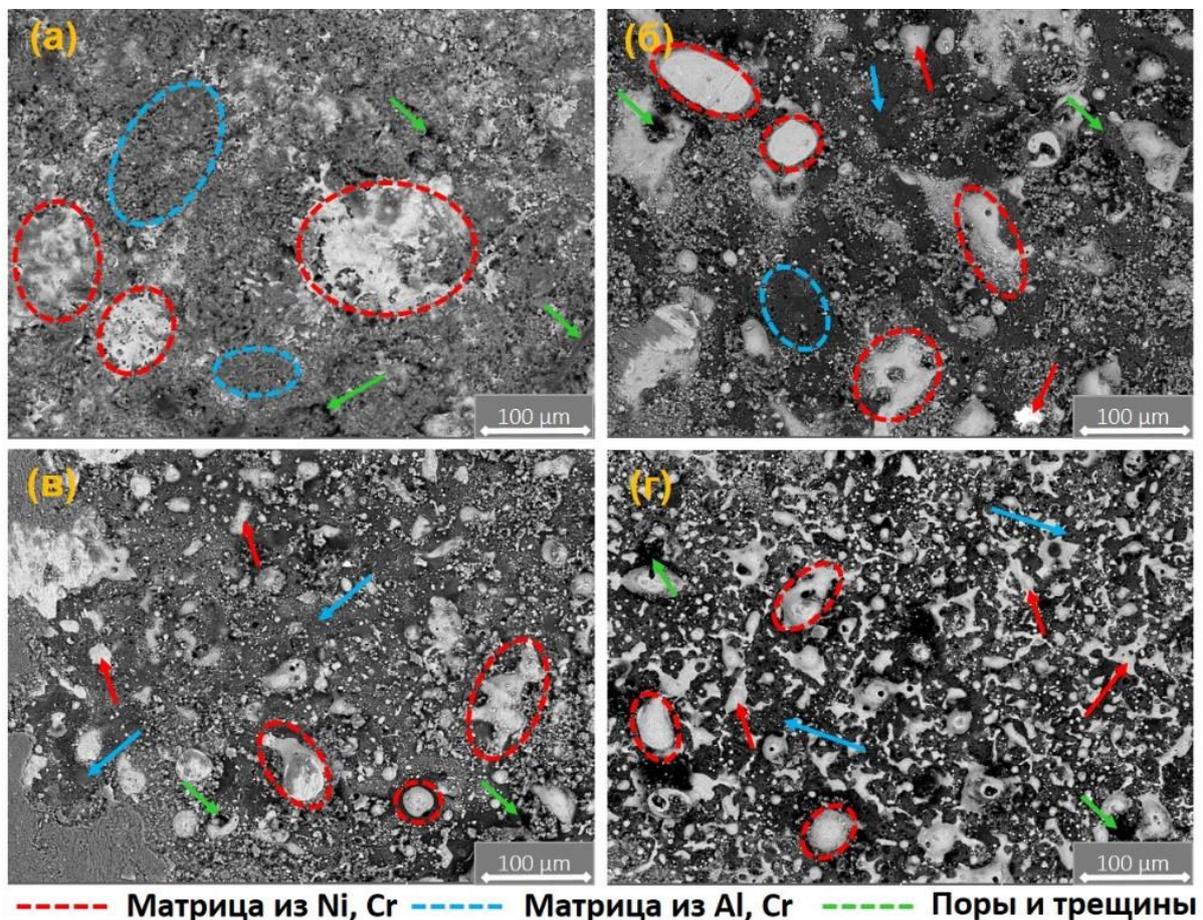


Рисунок 2. SEM-изображение поверхности Ni-Cr-Al покрытий (DS) до (а) и после (б), (в) и (г) PPT

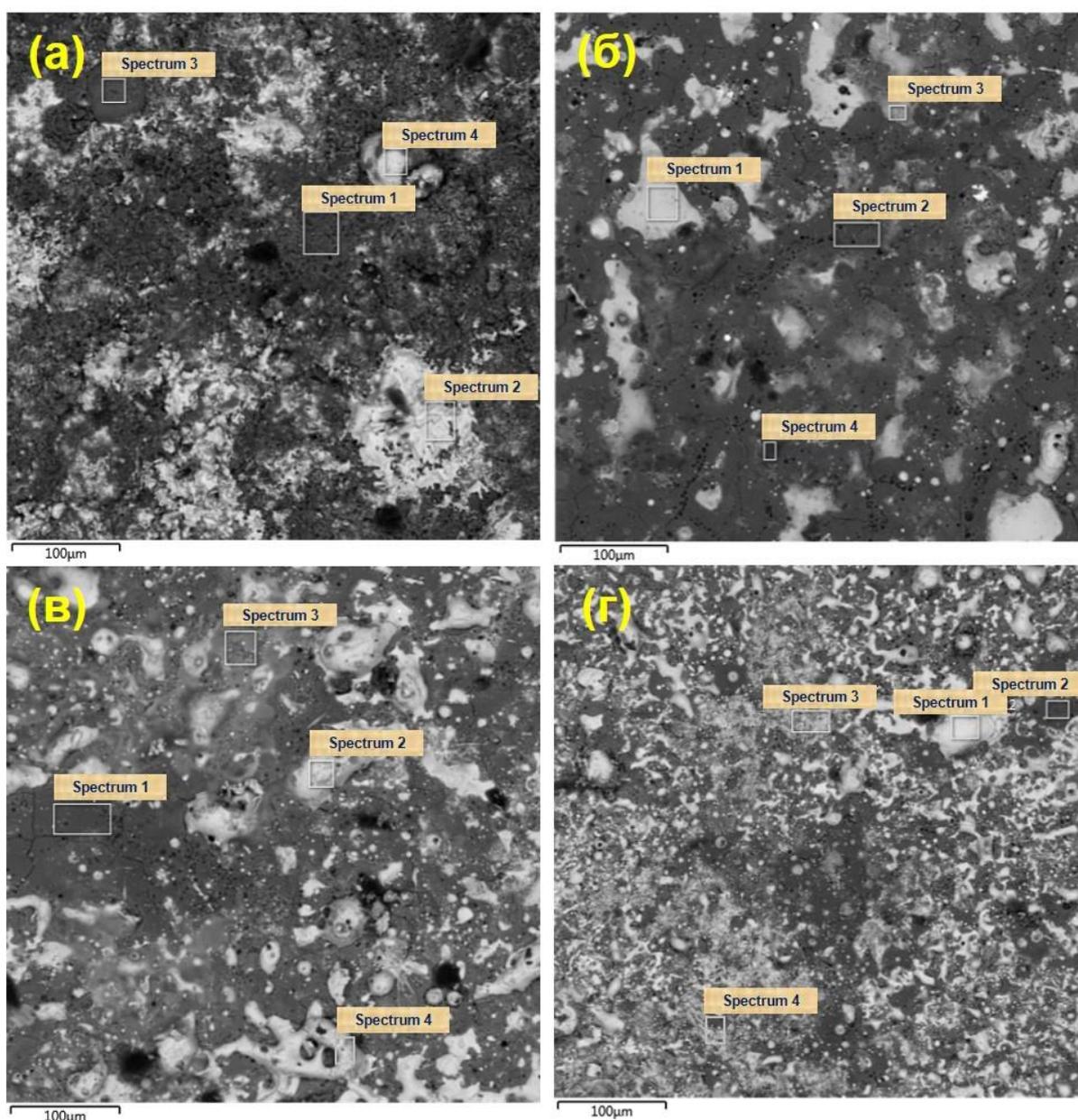


Рисунок 3. SEM-изображение областей спектра поверхности Ni-Cr-Al покрытий до (а) и после (б), (в) и (г) PPT (контраст фаз)

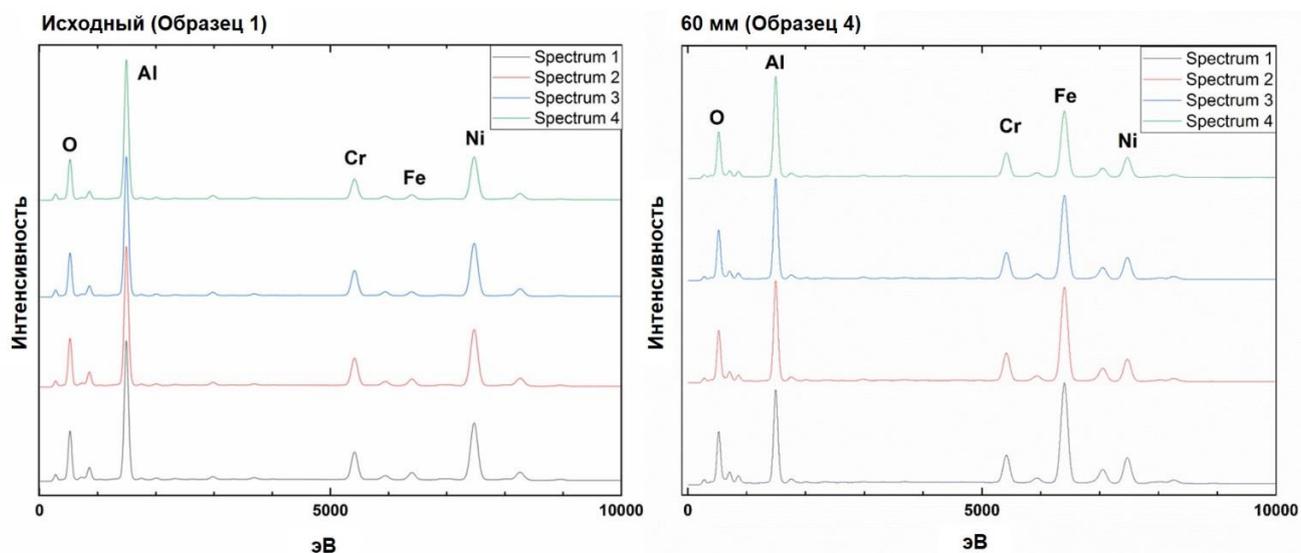


Рисунок 4. EDX-анализ поверхности покрытий на основе элементов Ni-Cr-Al

Таблица 2. Химический состав элементов в покрытиях Ni-Cr-Al по данным SEM/EDX

№	Область спектра	Химический состав, %						
		Ni (Никель)	Cr (Хром)	Al (Алюминий)	Fe (Железо)	O (Кислород)	C (Углерод)	Примеси
Образец 1	Спектр 1	34,46	10,91	50,70	0,52	2,46	0,72	0,23
	Спектр 2	64,82	19,17	8,74	2,48	3,17	1,38	0,24
	Спектр 3	15,49	8,79	70,10	0,48	8,79	1,02	0,29
	Спектр 4	52,90	16,01	13,37	0,90	6,25	10,07	0,28
Образец 2	Спектр 1	9,81	4,23	1,05	69,97	8,64	5,46	0,83
	Спектр 2	17,74	3,23	32,14	7,18	38,76	0,61	0,35
	Спектр 3	7,58	3,65	1,35	49,29	18,20	19,32	0,61
	Спектр 4	39,13	0,50	2,30	32,60	24,52	0,45	0,29
Образец 3	Спектр 1	42,72	10,59	38,24	2,86	3,83	1,39	0,37
	Спектр 2	44,64	15,13	7,02	18,01	10,31	1,95	0,38
	Спектр 3	6,61	14,76	35,29	20,80	14,92	6,85	0,42
	Спектр 4	26,54	2,93	47,66	8,05	11,95	2,43	0,10
Образец 4	Спектр 1	62,15	17,42	1,67	7,03	5,21	4,69	1,84
	Спектр 2	16,05	37,94	39,60	2,25	2,40	1,11	0,64
	Спектр 3	31,47	8,35	10,19	25,96	15,15	7,39	1,49
	Спектр 4	43,59	13,80	16,06	5,18	13,41	2,55	1,84

На поверхности полученных покрытий был проведен рентгеновский анализ (XRD). Глубина зондирования или проникновения рентгеновского луча составляет

приблизительно 0,3 мкм, в зависимости от угла падения луча. Наличие пика Al_2O_3 обнаруживаемого только в обработанных покрытиях, можно однозначно отнести на счет импульсной плазменной обработки в кислородсодержащей атмосфере. Фазовый анализ этих покрытий методом XRD показывает наличие фаз CrNi_3 , NiCr, Al и Al_2O_3 (смотреть рисунок 5). Скорее всего, во время распыления методом детонации и последующего PPT поверхность подложки нагревается до расплавления и из осажденных элементов Ni, Cr и Al образуются фазы CrNi_3 , NiAl и NiCr. До PPT нанесенные покрытия Ni-Cr-Al, по-видимому, состояли в основном из CrNi_3 с добавлением некоторых алюминийсодержащих фаз.

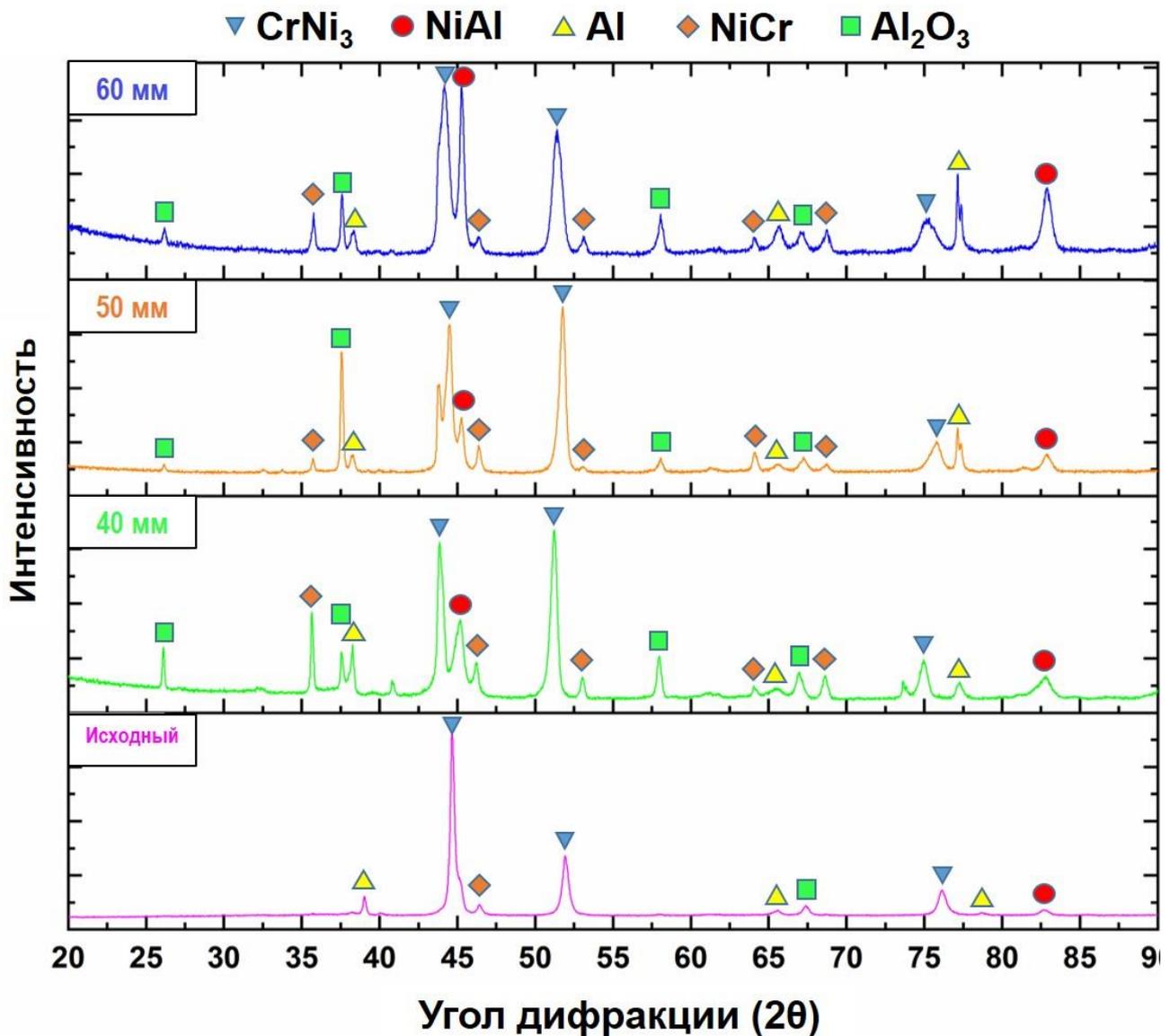


Рисунок 5. Дифракционные спектры метода рентгеноструктурного анализа (XRD) покрытий Ni-Cr-Al, нанесенных методом DS (исходное состояние) и после PPT (40, 50 и 60 мм)

На рисунке 6 показаны 3D-изображения поверхности покрытий Ni-Cr-Al до и после PPT расстояниями 40, 50 и 60 мм, полученные с помощью профилометрии. Видно, что PPT влияет на морфологию поверхности. В частности, значительно снижается шероховатость поверхности (см. таблицу 1); PPT разглаживает поверхность и уменьшает неровности. Среднее отклонение Ra до PPT составило 9,83 мкм, а среднее отклонение после PPT (для наибольшего расстояния 60 мм между поверхностью и плазменной горелкой) составило 3,82 мкм, что составляет уменьшение примерно на 39%. Это согласуется с предыдущими сообщениями в литературе [22].

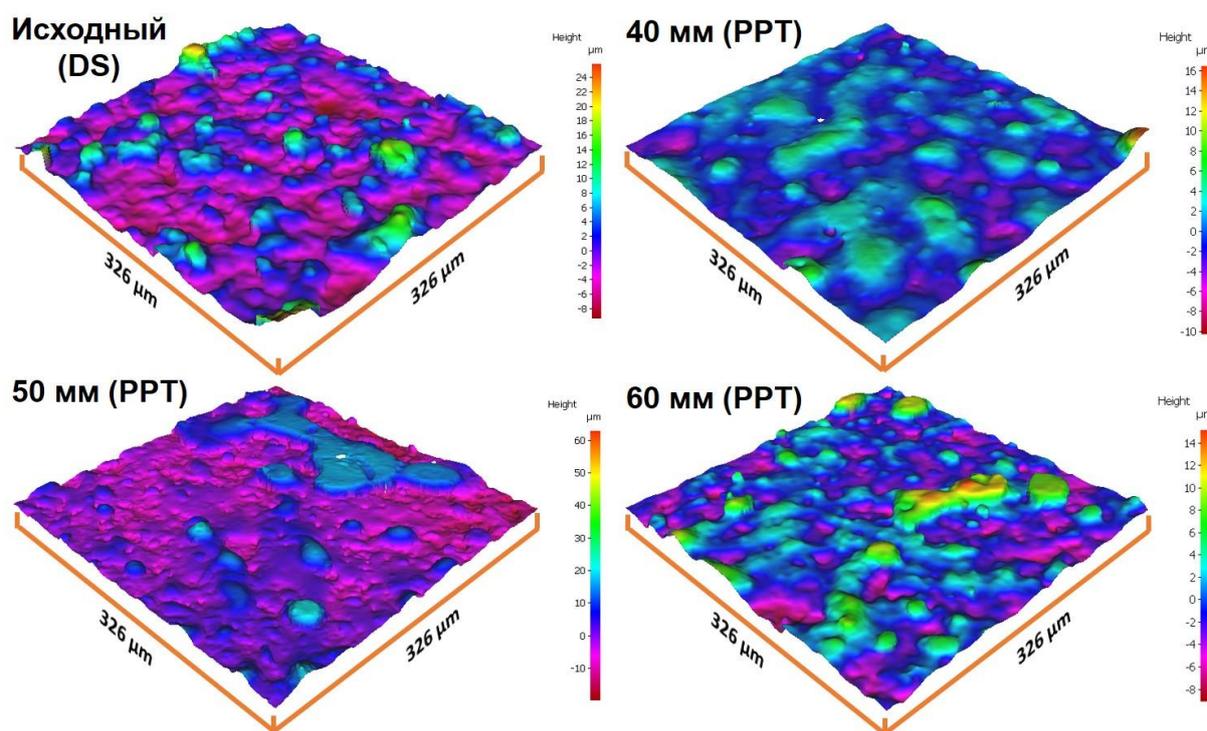


Рисунок 6. 3D цветные карты изображений шероховатости поверхности покрытий Ni-Cr-Al до (исходное состояние) и после (40 мм, 50 мм и 60 мм) PPT, полученные при увеличении окуляра оптического микроскопа в 50 раз

Один из самых универсальных способов быстрой оценки механических свойств покрытия – это измерение его микротвердости [23,24]. Средняя микротвердость покрытий Ni-Cr-Al до PPT (исходная) составляла 4,1 ГПа, а после PPT (40, 50 и 60 мм) – 7,4, 6,2 и 7,6 ГПа соответственно (смотреть таблицу 1). Максимальная твердость 7,6 ГПа достигается при расстоянии $H = 60$ мм между плазменной горелкой и поверхностью образца. Увеличенная твердость и износостойкость связаны с образованием сплава с фазой NiAl, который отличается относительно высокой температурой плавления, а также хорошей стойкостью к коррозии и окислению[25].

На рисунке 7 показаны кривые трения Ni-Cr-Al с покрытием до и после модификации методом PPT в зависимости от расстояния H между поверхностью и плазменной

горелкой. Эксперимент показал, что после PPT коэффициент трения снижается, среднее значение коэффициента трения на дистанции скольжения 50 м (для всех образцов одинаково) в покрытиях Ni-Cr-Al без обработки (образец 1, H = 0 мм) составляет $\mu = 0,545$. После обработки PPT с H = 40 мм (образец 2) средний коэффициент трения немного увеличивается до $\mu = 0,574$, однако при увеличении H до 50 (образец 3) и 60 мм (образец 4) во время PPT средний коэффициент трения снижается до $\mu = 0,480$ и $\mu = 0,415$ соответственно. Эти результаты ясно показывают, что коэффициент трения уменьшается с увеличением расстояния H между поверхностью и плазмотроном. Это согласуется с измеренной шероховатостью поверхностей: наименьший коэффициент трения соответствует наименьшему значению Ra (смотреть таблицу 1). Проведенные эксперименты показали, что PPT приводит к улучшению трибологических свойств Ni-Cr-Al покрытий. Этот эффект может быть достигнут путем устранения поверхностных дефектов (микротрещин и пор) и изменения структурно-фазового состояния покрытий. В процессе трения на поверхность воздействуют одновременно несколько характеристик, поэтому коэффициент трения не определяется строго значениями твердости. Однако одной из возможных причин снижения коэффициента трения может быть увеличение микротвердости. Согласно ссылке [25], упрочнение поверхности и снижение коэффициента трения имеют прямую корреляцию.

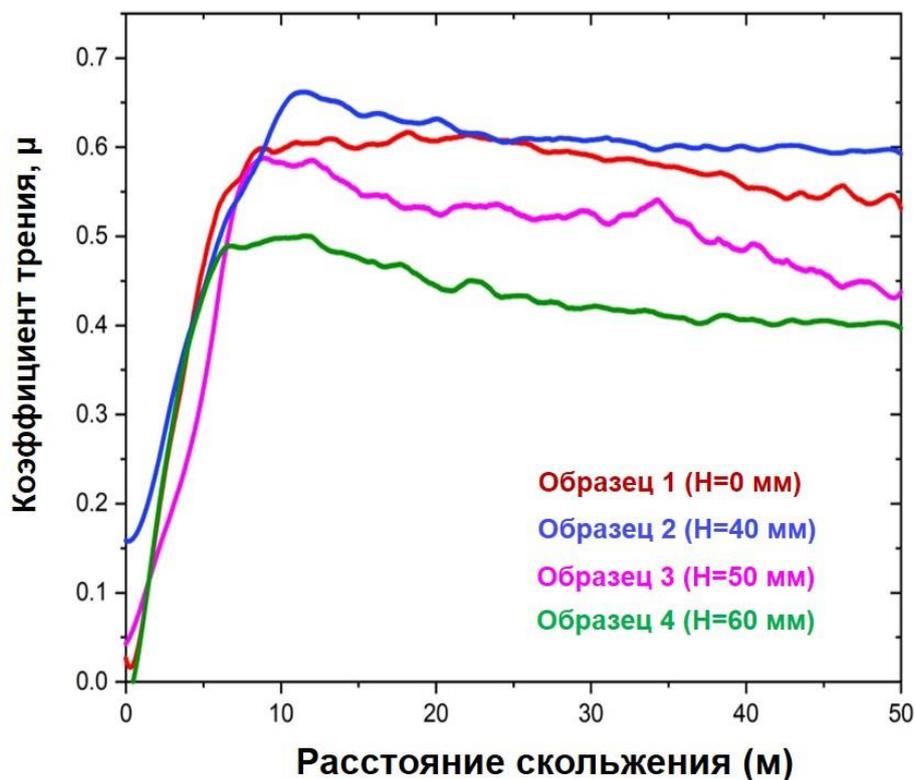


Рисунок 7. Результаты трибологических испытаний покрытий Ni-Cr-Al до и после PPT. Представленные данные были сглажены с помощью фильтра Савицки-Голея (с использованием полинома 4-го порядка и 3000 точек данных)

Известно [26], что твердость покрытий на металлической матрице зависит от измельчения зерен матрицы и дисперсионного упрочнения, что в данной работе было достигнуто с помощью РРТ. Согласно полученным данным, было выявлено, что образец с наименьшей шероховатостью поверхности и коэффициентом трения также имел наибольшее значение микротвердости (смотреть таблицу 1 и рисунок 6).

Рисунок 8 демонстрирует взаимосвязь между шероховатостью поверхности, коэффициентом трения и микротвердостью покрытий на основе Ni-Cr-Al до и после РРТ. Данные указывают на наличие зависимости между значениями микротвердости и как шероховатости, так и коэффициента трения поверхности: чем ниже шероховатость и коэффициент трения, тем выше значения микротвердости. Это наблюдается при сравнении поверхностной шероховатости образца 3 с образцами 2 и 4, где уменьшение значения микротвердости и повышение коэффициента трения соответствуют увеличению шероховатости. Известно, что микротвердость и сопротивление износу покрытий с металлической матрицей обычно зависят от количества и размера диспергированных фаз, в дополнение к матрице. Твердость покрытий с металлической матрицей зависит от двух основных факторов [26]: уточнения зерна матрицы и преципитационного упрочнения, которые были достигнуты благодаря РРТ (смотреть рисунок 2 и 3).

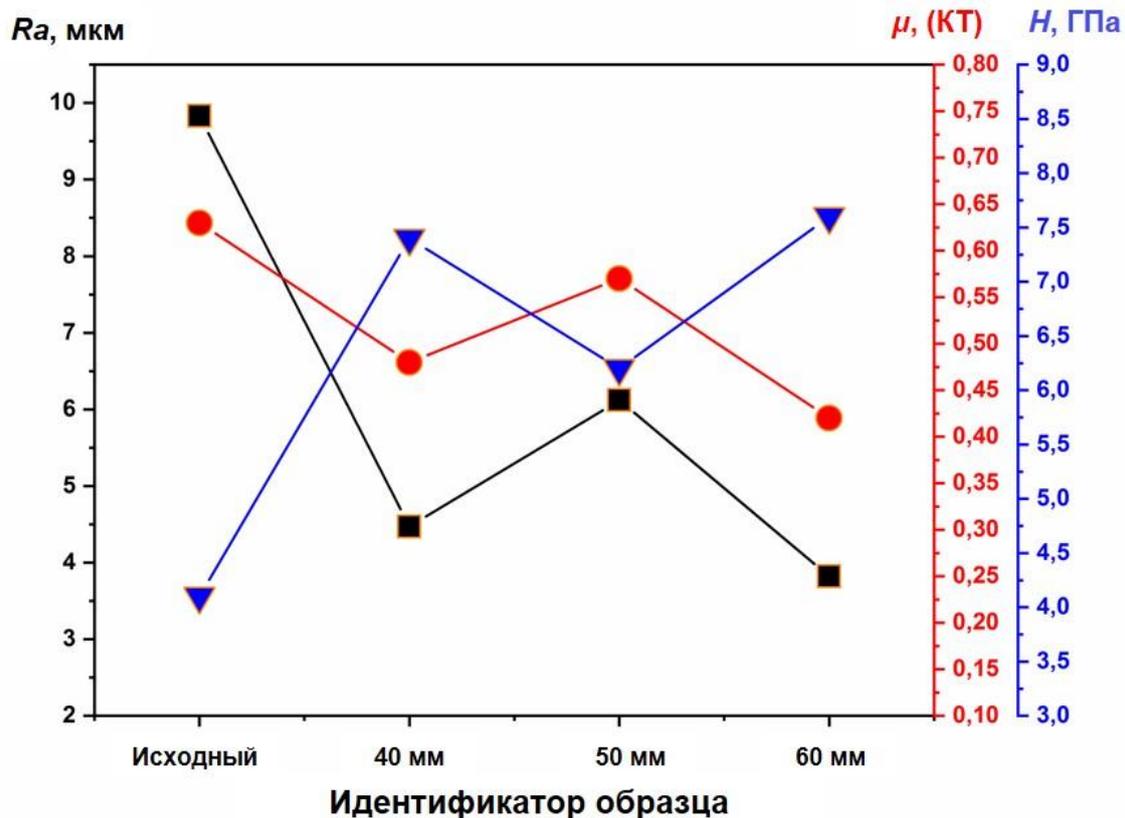


Рисунок 8. Изменение микротвердости (синие треугольники), шероховатости (черные квадраты) и коэффициента трения (красные круги) покрытий Ni-Cr-Al, нанесенных методом детонационного распыления, до (исходный) и после (40 мм, 50 мм и 60 мм) РРТ

Заключение

В данной работе было изучено влияние расстояния обработки импульсной плазмой при модификации поверхности покрытий на основе Ni-Cr-Al, полученных детонационным методом. Было установлено, что импульсная плазменная обработка снижает шероховатость поверхности и уменьшает неровности независимо от расстояния обработки. Шероховатость поверхности Ra после обработки импульсной плазмой была примерно на 39% ниже после обработки импульсной плазмой. Эксперимент, проведенный в этой работе, показал, что после обработки импульсной плазмой коэффициент трения уменьшается с 0,545 до 0,415 (для наибольшего расстояния обработки). Средняя микротвердость покрытий Ni-Cr-Al до обработки импульсной плазмой составляла 4,1 ГПа, а после обработки увеличивалась в 1,5-1,8 раза в зависимости от расстояния между поверхностью и плазмотроном. Таким образом, мы продемонстрировали, что импульсная плазменная обработка может быть использована для улучшения механических и трибологических свойств поверхности покрытий, полученных методом напыления из детонационной пушки, и что большее расстояние между поверхностью и плазмотроном приводит к более твердому поверхностному покрытию.

Благодарность, конфликт интересов

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP22683206).

Авторы выражают благодарность ТОО«PlasmaScience» (Усть-Каменогорск, Казахстан), Научно-исследовательскому центру «Поверхностная обработка и трибология» при ВКУ им. С.Аманжолова (Усть-Каменогорск, Казахстан).

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов. Д.К. Ескермесов, Б.К. Рахадиллов, Ж.Т. Толеуханова, С. Пазылбек и А.С. Ескермесова: концептуализация, исследование, методология, визуализация, написание оригинального текста, авторский надзор, ресурсы, рецензирование, редактирование и финансирование.

Список литературы

1. Lakhwinder Singh, Vikas Chawla, J.S. Grewal(2012) A review on detonation gun sprayed coatings. J Min Mater Char Eng 11 243 265. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2012.113019>
2. J.M. Guilemany, N. Espallargas, P.H. Suegama, A.V. Benedetti a b (2006) Comparative study of Cr3C2-NiCr coatings obtained by HVOF and hard chromium coatings. Corros Sci 48: 2998-3013. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.10.016>
3. Ionut Claudiu Roata, Catalin Croitoru, Alexandru Pascu, Elena Manuela Stanciu(2019) Photocatalytic coatings via thermal spraying: a mini-review. AIMS Mater Sci 6(3): 335-353. doi: 10.3934/matensci.2019.3.335

4. Czupryński Artur (2019) Flame Spraying of Aluminum Coatings Reinforced with Particles of Carbonaceous Materials as an Alternative for Laser Cladding Technologies. *Materials* 12: 3467(1-18). doi.org/10.3390/ma12213467
5. Gedzevicius Irmantas, Valiulis Argirdas Vaclovas (2006) Analysis of wire arc spraying process variables on coatings properties. *J Mater Process Technol* 175: 206-211. https://doi.org/10.1016/j.JMATPROTEC.2005.04.019
6. Liuyang Bai, Gewen Yi, Shanhong Wan, Wenzhen Wang, Huwei Sun (2023) Comparison of tribological performances of plasma sprayed YSZ, YSZ/Ag, YSZ/MoO₃ and YSZ/Ag/MoO₃ coatings from 25 to 800 °C. *Wear* 526-527: 204944. https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204944
7. Dmitrii Ushmaev, Andy Norton, James Kell (2023) Thermally sprayed coatings resistant to environmental degradation: Columnar-like coatings through laser ablation and surface melting approach. *Surf. Coat. Technol.* 460: 129394. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129394
8. Hai-Long Yao, Chao Yang, Deng-Liang Yi, Meng-Xian Zhang, Hong-Tao Wang, Qing-Yu Chen, Xiao-Bo Bai, Gang-Chang Ji (2020) Microstructure and mechanical property of high velocity oxy-fuel sprayed WC-Cr₃C₂-Ni coatings. *Surf. Coat. Technol.* 397: 126010. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126010
9. T.L.Talako, M.S.Yakovleva, E.A.Astakhov, A.I. Letsko (2018) Structure and properties of detonation gun sprayed coatings from the synthesized FeAlSi/Al₂O₃ powder. *Surf. Coat. Technol.* 353: 93-104. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.063
10. Buta Singh Sidhu, D. Puri, S. Prakash (2005) Mechanical and metallurgical properties of plasma sprayed and laser remelted Ni-20Cr and Stellite-6 coatings. *J Mater Process Technol* 159: 347-355. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.05.023
11. V.A.D Souza., Anne G. Neville (2007) Aspects of microstructure on the synergy and overall material loss of thermal spray coatings in erosion-corrosion environments. *Wear* 263: 339-346. https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.071
12. Xingli Wang, Deli Zhou, Zongxiao Guo, Fan Wang, Yunming Qiu, Jianjun Huang (2023) Manufacturing and the process-structure-property correlation of detonation sprayed iron coatings under an unconventional coating deposition mechanism. *Surf. Coat. Technol.* 466: 129634. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129634
13. Denis K. Rybin, Igor S. Batraev, Dina V. Dudina, Arina V. Ukhina, Vladimir Yu Ulianitsky (2021) Deposition of tungsten coatings by detonation spraying. *Surf. Coat. Technol.* 409: 126943. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126943
14. A.A.Sova, D.A.Pervushin, I Smurov (2010) Development of multimaterial coatings by cold spray and gas detonation spraying. *Surf. Coat. Technol.* 205: 1108-1114. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.07.092
15. NurgamitKantay, Bauyrzhan Rakhadilov, SherzodKurbanbekov, et al. (2021) Influence of Detonation-Spraying Parameters on the Phase Composition and Tribological Properties of Al₂O₃ Coatings. *Coatings* 11: 793. https://doi.org/10.3390/coatings11070793
16. Yu N. Tyurin, O.V.Kolisnichenko (2009) Plasma-detonation technology for modification of the surface layer of metal parts. *Open Surf. Sci. J.* 1: 13-19. https://doi.org/10.2174/1876531900901010013
17. Maulet M, Rakhadilov B.K., Sagdoldina Zh.B., et al. (2020) Influence of the detonation-spraying mode on the phase composition and properties of Ni-Cr coatings. *Eurasian Eurasian J. Phys. Funct. Mater.* 4: 184-189. https://doi.org/10.29317/ejpfm.2020040307

18. A. I. Potekaev, A. A. Chaplygina, P. A. Chaplygin, M. D. Starostenkov, V. V. Kulagina, A. A. Klopotov & L. S. Grinkevich (2019) The influence of grain size on low-stability pre-transitional structural-phase states of NiAl intermetallide. Russ. Phys. J. 62: 519–526. <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01740-w>
19. Ulianitsky V., Batraev I., Dudina D., Smurov I. (2017) Enhancing the properties of WC/Co detonation coatings using two-component fuels. Surf. Coat. Technol. 318: 244-249. <https://doi.org/10.1016/j.SURFCOAT.2016.08.008>
20. Alexander D Pogrebnjak, Maxim Il'jashenko, Olga P Kul'ment'eva, Vladimir S Kshnjakin, Alexander P Kobzev, Yurii N Tyurin, Oleg Kolisnichenko (2001) Structure and properties of Al₂O₃ and Al₂O₃ + Cr₂O₃ coatings deposited to steel 3 (0.3 wt% C) substrate using pulsed detonation technology. Vacuum 62: 21-26. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00109-9](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00109-9)
21. Bauyrzhan Rakhadilov, Dastan Buitkenov, Zhanat Idrisheva, Manira Zhamanbayeva, Sapargali Pazylbek, Daryn Baizhan (2021) Effect of Pulsed-Plasma Treatment on the Structural-Phase Composition and Tribological Properties of Detonation Coatings Based on Ti-Si-C. Coatings 11: 795. <https://doi.org/10.3390/coatings11070795>
22. Kakimzhanov D, Rakhadilov Bauyrzhan, Tyurin Yu.N., Zhurerova L.G.. (2021). Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr₃C₂-NiCr coatings. Eurasian j. phys. funct. mater. 5: 45-51. <https://doi.org/10.32523/ejpfm.2021050106>
23. Gabriela Strnad, Laszlo Jakab-Farkas (2014) Improving the Accuracy of Low-load Vickers Microhardness Testing of Hard Thin Films. Procedia Technol. 12: 289-294. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.488>
24. Lin-dong WANG, Min LI, Tai-hua ZHANG, Nai-gang LIANG (2003). Hardness Measurement and Evaluation of Thin Film on Material Surface. Chinese J. Aeronaut. 16: 52-58. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(11\)60171-4](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60171-4)
25. Bauyrzhan Rakhadilov, Meruyert Maulet, Madi Abilev, Zhuldyz Sagdoldina, Rauan Kozhanova (2021). Structure and Tribological Properties of Ni-Cr-Al-Based Gradient Coating Prepared by Detonation Spraying. Coatings 11: 218(1-13). <https://doi.org/10.3390/coatings11020218>
26. Xiuying Yang, Yuebo Zhou, Mingyu Zhao, Pai Liu, Hualong Qi, Yufang Yang (2023). Impact of Al nanoparticles upon the microstructure and wear properties of Ni-Cr-Al nanocomposite coatings. J of the Ind Chem Soc 100(1):100822. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100822>

Д.К. Ескермесов¹, Б.К. Рахадиллов^{2,3}, Ж.Т. Төлеуханова^{*1}, С. Пазылбек⁴, А.С. Ескермесова²

¹КЕАҚ «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті»,
Өскемен, Қазақстан

²КЕАҚ «Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті», Өскемен, Қазақстан

³ЖШС «PlasmaScience», Өскемен, Қазақстан

⁴Жұмабек Ахметұлы Тәшенев атындағы Университет, Шымкент, Қазақстан

Импульсті плазмалық өңдеу (PPT) әдісімен Ni-Cr-Al негізіндегі алынған (DS) жабындардың беттік модификациясы

Аңдатпа. Материалдарды абразивті коррозиядан қорғау үшін әр түрлі термиялық бүрку әдістерін қолдануға болады, мысалы, ұнтақты газ жалынымен бүрку, плазмалық бүрку, тұндыру

және балқыту, жоғары жылдамдықты оттегі-газ бүрку және детонациялық бүрку. Термиялық бүрку материалды тоздан және коррозиядан қорғаудың ең тиімді әдістерінің бірі болып табылады, осылайша материалдың қызмет ету мерзімін ұзартады. Бұл мақалада плазмалық генераторды қолдана отырып, импульсті плазмалық өңдеу әдісімен Ni-Cr-Al негізіндегі жабындардың бетінің өзгеруі келтірілген. Жабындар детонациялық бүрку (DS) әдісімен алынды, содан кейін импульсті плазмалық өңдеу (PPT) өтті. Плазмалық ағынның әсерінен жабындардың құрылымдық-фазалық күйінің өзгеруі зерттелді. Жұмыста сканерлеуші электронды микроскопия (SEM), рентгендік энергиялық дисперсиялық спектроскопия (EDX), рентгендік құрылымдық талдау (XRD), беттің кедір-бұдырлық сипаттамасы, қаттылық сынақтары және детонациялық Ni-Cr-Al жабындарының сипаттамаларының өзгеруін кешенді талдау үшін трибологиялық сынақтар қолданылды. Импульсті плазмалық өңдеумен жабындардың беткі модификациясы олардың беткі қабатының тозуға төзімділігінің жоғарылауына әкелетіні көрсетілген үйкеліс коэффициентінің төмендеуі және микроқаттылықтың жоғарылауымен сипатталады. Рентгендік фазалық талдау нәтижелеріне сәйкес, алынған беттердің трибомеханикалық қасиеттерінің жақсаруы өңделген жабындардағы CrNi₃, NiAl және NiCr фазаларының жоғарылауымен байланысты.

Түйін сөздер: жабын, термиялық бүрку, детонациялық бүрку, импульсті плазмалық өңдеу, үйкеліс коэффициенті, кедір-бұдырлығы, микроқаттылық.

D.K. Yeskermessov¹, B.K. Rakhadilov², Zh.T. Toleukhanova*¹, S. Pazylbek³, A.S. Yeskermessova²

¹NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²NJSC «Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

³LLP «PlasmaScience», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

⁴Zhumabek Tashenev University, Shymkent, Kazakhstan

Surface modification of (DS) coatings based on Ni-Cr-Al by pulsed plasma treatment (PPT) method

Abstract. To safeguard materials against abrasive corrosion, various thermal spraying techniques can be employed, including powder spraying with a gas flame, plasma spraying, deposition and melting, high-speed oxygen-gas spraying, and detonation spraying. Thermal spraying is highly effective for protecting materials from wear and corrosion, thus extending their service life. This article discusses the changes in the surface of Ni-Cr-Al coatings subjected to pulsed plasma treatment using a plasma generator. The coatings were initially applied via detonation spraying (DS) and then underwent pulsed plasma treatment (PPT). The study investigates alterations in the structural and phase states of the coatings under plasma exposure. A comprehensive analysis of the detonation Ni-Cr-Al coatings' characteristics was conducted using scanning electron microscopy (SEM), X-ray energy dispersive spectroscopy (EDX), X-ray diffraction (XRD), surface roughness measurements, hardness tests, and tribological assessments. The findings indicate that pulsed plasma treatment enhances the wear resistance of the coatings' surface layer by reducing the coefficient of friction and increasing microhardness. X-ray phase analysis reveals that the improved tribomechanical properties of the treated surfaces are linked to an increased presence of CrNi₃, NiAl, and NiCr phases in the coatings.

Keywords: coating, thermal spraying, detonation spraying, pulsed plasma treatment, coefficient of friction, roughness, microhardness.

Сведения об авторах:

Ескермесов Д.К. – доктор PhD, ассоциированный профессор Центра физики, ведущий научный сотрудник Международной Школы инженерии НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева», ул. Серикбаева, 19, 070004, Усть-Каменогорск, Казахстан.

Рахадиллов Б.К. – доктор PhD, ассоциированный профессор, Член правления- проректор по научной работе НАО «Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова», ул.30-ой Гвардейской дивизии,34, 070002, Усть-Каменогорск, Казахстан.

Толуханова Ж.Т. – автор для корреспонденции,руководитель проекта, постдокторант по проекту «Жас ғалым» 2024-2026, НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева», ул. Серикбаева, 19, 070004, Усть-Каменогорск, Казахстан.

Пазылбек С. – доктор PhD, ассоциированный профессор,заведующий кафедрой “Математика и информатика”, Университет имени Жумабека Ахметулы Ташенева, проспект Кунаева, 21, 160012, Шымкент, Казахстан.

Ескермесова А.С. – магистр естественных наук по специальности «Физика», научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», ул. Гоголя, 7г, 070018, Усть-Каменогорск, Казахстан.

Yeskermessov D.K. – PhD, Associate Professor at the Center of Physics, Leading Researcher at the International School of Engineering of the NJSC "D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University", 19 Serikbayev str., 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Rakhadilov B.K. – PhD, Associate Professor, Member of the Board - Vice-Rector for Scientific Work of NJSC Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, 34 30th Guards Division str., 070002, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Toleukhanova Zh.T. – correspondence author, project manager, postdoctoral fellow on the project "Zhas galim" 2024-2026, NJSC "D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University", 19 Serikbayev str., 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Pazyzbek S. – PhD, Associate Professor,Head of the Department of "Mathematics and Informatics", Tashenev University, Kunaev Avenue 21, 160012, Shymkent, Kazakhstan

Yeskermessova A.S. – Master of Natural Sciences in Physics, Researcher at PlasmaScience LLP, 7g Gogol str., 070018, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Ескермесов Д.К. – PhD докторы, физика орталығының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық Инженерия Мектебінің жетекші ғылыми қызметкері КЕАҚ «Д. Серікбаев ат. Шығыс Қазақстан техникалық университеті», Серікбаев көшесі 19, 070004, Өскемен, Қазақстан

Рахадиллов Б.К. – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, Басқарма мүшесі – ғылыми жұмыс жөніндегі іпроректоры КЕАҚ «Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті», 30-шы Гвардиялық дивизия көшесі, 34, 070002, Өскемен, Қазақстан

Төлеуханова Ж.Т. – хат-хабар авторы, жоба жетекшісі, «Жас ғалым» жобасы бойынша постдокторант 2024-2026, КЕАҚ «Д. Серікбаева ат. Шығыс Қазақстан техникалық университеті», Серікбаев көшесі 19, 070004, Өскемен, Қазақстан

Пазылбек С. – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, математика және информатика кафедрасының меңгерушісі, Жұмабек Ахметұлы Тәшенев атындағы Университет, Қонаев даңғылы 21, 160012, Шымкент, Қазақстан

Ескермесова А.С. – “Физика” мамандығы бойынша жаратылыстану ғылымдарының магистрі, “PlasmaScience” ЖШС ғылыми қызметкері, Гоголь көшесі 7г, 070018, Өскемен, Қазақстан



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).