

PACS numbers: 61.46. – w, 62.20.Qr, 62.25. – q

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНЫХ
КОМБИНИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ Ti-N-Si/WC-Co-Cr И
Ti-N-Si/(Cr₃C₂)₇₅-(NiCr)₂₅**

**А.Д. Погребняк^{1,2}, М.В. Ильяшенко¹, М.В. Каверин^{1,2}, А.П. Шпиленко¹,
А.В. Пшик¹, В.М. Береснев³, Г.В. Кирик⁴, Н.К. Ердьбаева⁵,
Н.А. Махмудов⁶, О.В. Колисниченко⁷, Ю.Н. Тюрин⁷, А.П. Шпак⁸**

¹ Сумский институт модификации поверхности,
п/я 163, 40030, Сумы, Украина
E-mail: apogrebnjak@simp.sumy.ua

² Сумской государственной университет,
ул. Римского-Корсакова 2, 40007 Сумы, Украина

³ Научный физико-технический центр (НФТЦ) МОН и НАН Украины,
Площадь Свободы 6, 61022 Харьков, Украина

⁴ Концерн «Укрросметалл»,
Проспект Курский 6, 40020 Сумы, Украина

⁵ Восточно-Казахстанский государственный технический университет,
ул. Протазанова 69, 070004 Усть-Каменогорск, Казахстан

⁶ Самаркандский государственный университет,
Университетский бульвар 15, Самарканд, Узбекистан

⁷ Институт электросварки НАН Украины имени Е.О. Патона,
ул. Боженко 11, 03680 Киев, Украина

⁸ Институт металлофизики НАН Украины имени Г.В. Курдюмова,
Бульвар Вернадского 36, 03680 Киев, Украина

Получено два вида комбинированных нанокompозитных покрытий (Ti-N-Si/WC-Co-Cr; Ti-N-Si/(Cr₃C₂Ni)₇₅-(NiCr)₂₅) толщиной 160 ÷ 320 мкм с использованием двух технологий осаждения: кумулятивно-детонационным с последующим осаждением с помощью вакуумно-дугового источника в ВЧ разряде. Что даёт возможность, при помощи комбинированного покрытия восстанавливать размер изношенных участков изделий с защитой их от коррозии, износа, при этом увеличить твердость, модуль упругости, индекс пластичности. Состав верхнего покрытия изменяли от Ti = 60 %, N ≈ 30 %, Si = 10 % до Si = 5 %; N = 20 %, Ti = 75 %. В первой серии покрытий обнаружены фазы (Ti;Si) и TiN в тонком верхнем покрытии и WC и W₂C в толстом нижнем покрытии.

Во второй серии, в верхнем покрытии были получены (Ti, Si)N и TiN, а в нижнем покрытии Cr₃Ni₂, чистый Cr; небольшое количество Ti₁₉O₁₇ в переходной области между тонким и толстым покрытием.

Размер, зерен в первом варианте тонкого покрытия, составлял 25 нм, при твердости 35 ГПа, а во втором варианте размер зёрен кристаллитов составлял 15 нм при твердости H = 42 ± 3,6 ГПа. Показано, что коррозионная стойкость в солевом растворе и кислотной средах увеличивается при уменьшении износа в результате трения цилиндра по поверхности комбинированного покрытия.

Ключевые слова: НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ, МОДУЛЬ УПРУГОСТИ, ИНДЕКС ПЛАСТИЧНОСТИ, КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ.

(Получено 05.11.2009, в отредактированной форме – 02.12.2009)

1. ВВЕДЕНИЕ

Наноконпозиты как класс наноматериалов характеризуются гетерогенной структурой образований в материале практически невзаимодействующими фазами со средними размерами, в интервале (5 ÷ 35) нм [1-3]. Как правило, такими структурными элементами являются аморфная матрица и включения нанокристаллической фазы.

При этом, аморфная составляющая наилучшим образом согласовывается с поверхностью нанокристаллитов и обеспечивает хорошее сцепление, что приводит к значительному увеличению прочности, а высокие механические свойства такого композита обеспечиваются малым размером второй фазы в сочетании с хорошей прочностью межзеренных границ. На сегодняшний день принято делить наноконпозитные материалы на 3 класса по величине твердости: твердые наноконпозиты с твердостью от 20 до 40 ГПа, сверхтвердые, твердость которых находится в интервале от 40 до 80 ГПа, и ультратвердые наноконпозитные покрытия с очень высокой твердостью (выше 80 ГПа) [3-4].

Кроме того, для выполнения ряда задач в химической, машиностроительной и других отраслях кроме решения прямых защитных функций покрытия, необходимо восстанавливать размер деталей (уже работающих в производстве). Поэтому, для получения размера изделия из материала наносится достаточно толстое покрытие, которое по своему составу имеет физико-механические свойства выше, чем у основного металла. Обычно, в таких покрытиях используются сплавы (порошки) из Ni-Cr-Mo [5], твердые сплавы WC-Co-Cr [8]; Cr₃C₂-Ni; оксидная керамика, Al₂O₃; Al₂O₃ + Cr₂O₃ [5,7]. Таким образом, если создать комбинацию покрытия по меньшей мере из 2-х слоев покрытий, например, из твердого сплава на основе WC-Co-Cr толщиной свыше 100 мкм (кумулятивно-детонационным или детонационным способом), а затем конденсировать верхнее тонкое наноконпозитное покрытие толщиной в единицы микрометров, например, из Ti-Si-N, которое имеет более высокие физико-механические характеристики по сравнению с толстыми покрытиями. В результате мы получили комбинированное наноконпозитное покрытие, имеющее высокие физические и физико-механические свойства, такие как твердость H , модуль упругости E , величина упругого восстановления W_e , сопротивление материала пластической деформации H/E и индекс пластичности H_2/E_2 [3].

Таким образом, целью настоящей работы было создание наноконпозитных покрытий на основе Ti-Si-N и комбинированных наноконпозитных покрытий на основе Ti-Si-N/WC-Co-Cr; Ti-Si-N/Cr₃C₂-NiCr с высокой твердостью, а также исследование их физико-химических и механических свойств.

2. ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

На полированные образцы из стали толщиной 4 мм и 20 мм в диаметре, осаждали покрытия вакуумно-дуговым источником с высокочастотным разрядом (ВЧ). Использовали сплавной спеченный катод из Ti с содержанием Si (5 ÷ 10) вес.% в установке Булат ЗТ, с вакуумом 5 ÷ 10⁻⁵ Па,

ток катода 100 А. На другую серию цилиндрических образцов из стали 3 (0,3 % С) размером 20 мм в диаметре и толщиной 4 ÷ 5 мм, наносили покрытие с помощью кумулятивно-детонационной установки «CDS-1» [17] с параметрами: расстояние от среза сопла 65 мм, скорость перемещения 14 мм/с, количество проходов 5, частота следования импульсов $f = 12$ Гц (для WC-Co-Cr). Толщина толстого покрытия составила 160 ÷ 320 мкм. После нанесения покрытия, поверхностный слой оплавливали плазменной струей (без порошка) с эродирующим электродом из W. Толщина оплавленного слоя составила 45 ÷ 60 мкм. Затем на толстое покрытие, в той же установке Булат 3Т осаждали тонкое покрытие толщиной около 3 мкм из Ti-Si-N.

Для покрытия из $(Cr_3C_2)_{75}(NiCr)_{25}$, основная фракция порошка 37,8 мкм. Расстояние от среза сопла 70 мм, скорость перемещения ствола 4 мм/с, количество проходов – 4, частота следования импульсов 10 и емкость конденсаторных батарей – $C = 200$ мкФ, напряжение на конденсаторных батареях 3,2 кВ.

Для анализа элементного состава использовали следующие методы: Резерфордское обратное рассеяние ионов (РОР) ${}^4He^+$ с энергией 1,76 МэВ, растровая электронная микроскопия (РЭМ) с (ЭДС) на установке РЭММА-103М (Selmi, Украина), дифракция рентгеновских лучей на установке ДРОН-3 и Advantage 8 (USA).

Измерение твердости и модуля упругости проводили на нанотвердомере Nanoindenter G 200, MTS System Corporation, Oak Ridge TN (USA) с пирамидкой Берковича. Модуль упругости определяли из кривых «нагрузка-разгрузка» по методике Оливера-Фарра [15].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В кумулятивно-детонационном устройстве реализован режим детонационного сгорания горючих смесей (и газов).

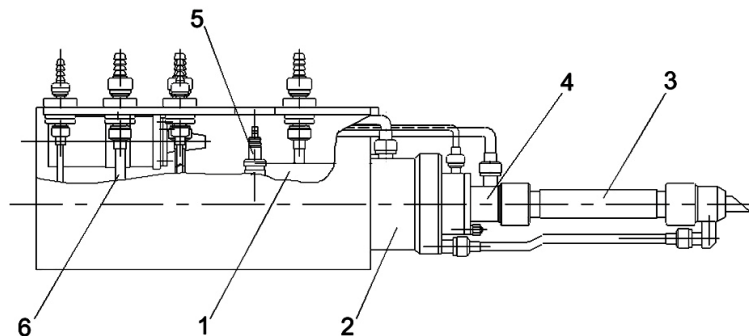


Рис. 1 – Кумулятивно-детонационная пушка CDS-1

Устройство состоит (рис. 1) из детонационной камеры (1), где реализуется детонационный режим сгорания горючей газовой смеси. Кроме того, устройство содержит кумулятивно-детонационную камеру (2), работающую с использованием горючих смесей любой концентрации, что позволяет формировать высокоскоростную струю газа с избытком азота, углерода. Цилиндрическое сопло (3) предназначено для нагрева и ускорения порошковых материалов. Оно изготовлено из медных трубок и

может иметь любую конфигурацию сечения и выходной диаметр от 10 до 33 мм. Кроме того, CDS-1 имеет узел (4) для ввода и газовой отсечки (перекрывать) газопорошковой смеси, автомобильной свечи зажигания (5) для инициирования детонационного режима сгорания, и системы трубопроводов (6) для ввода компонентов горючей газовой смеси. Основным отличием работы кумулятивно-детонационного устройства от детонационного является то, что в нем осуществляется суммирование энергии продуктов детонационного сгорания газовых смесей от двух камер. Кумуляция энергии позволяет сформировать высокоскоростной поток рабочего газа, имеющий несколько ударных волн, что обеспечивает эффективное взаимодействие их с порошковым материалом. Это обеспечивает рациональное использование энергии горючей и газовой смеси.

Скорость и температура продуктов сгорания зависит только от режима сгорания в каждой из камер.

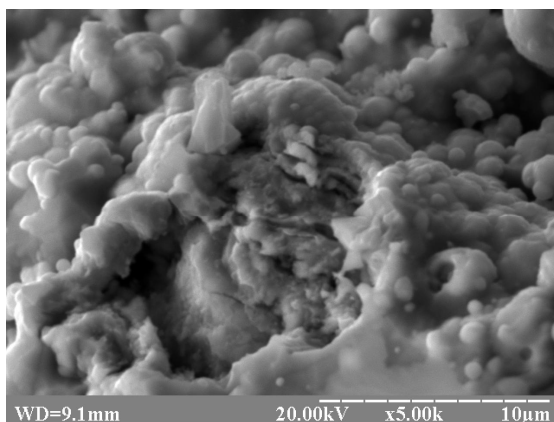


Рис. 2 – Изображения участка поверхности нанокompозитного комбинированного покрытия $Ti-Si-N/(Cr_3C_3-Ni)_{75}-(NiCr)_{35}$

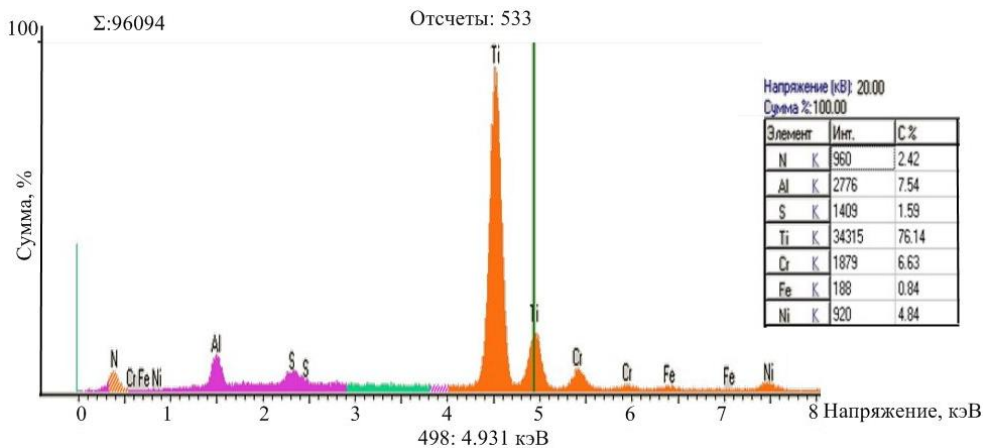


Рис. 3 – Элементный состав покрытия, полученный с помощью энергодисперсионного рентгеновского анализа с участка поверхности комбинированного покрытия

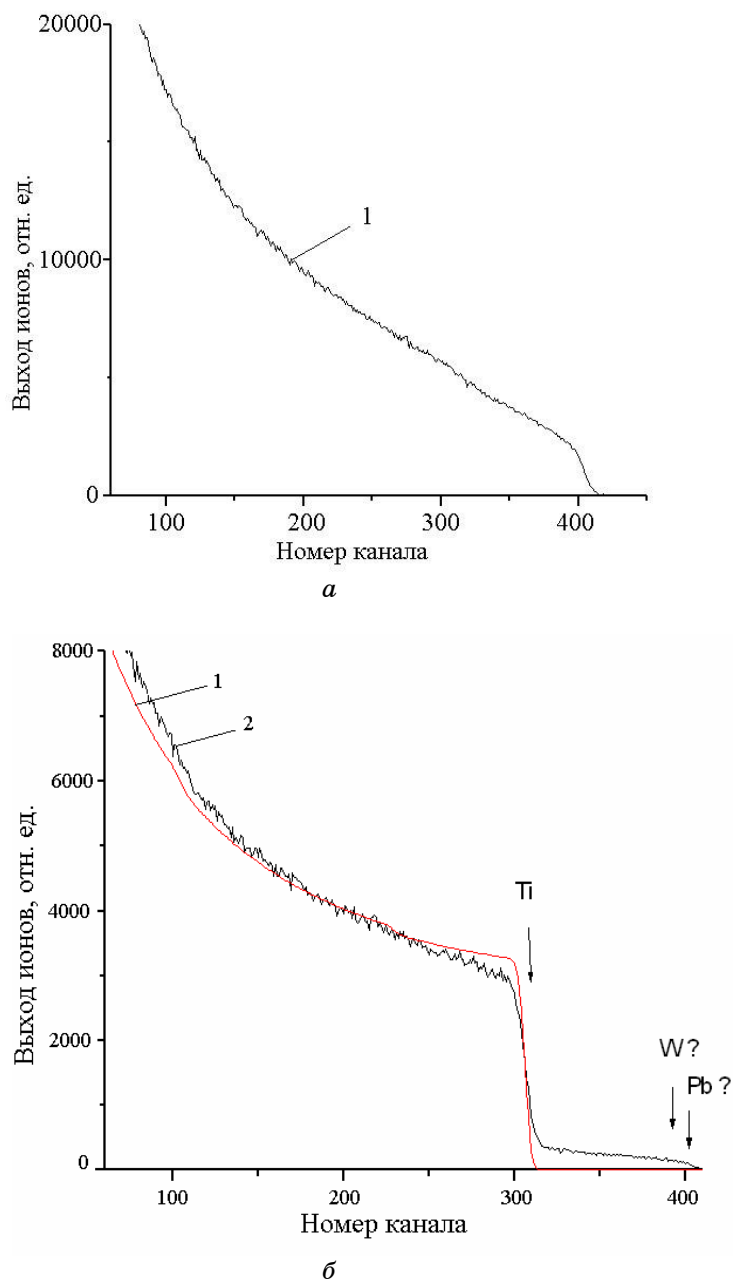


Рис. 4 – Энергетический спектр обратного Резерфордского рассеяния ионов (РОР): на толстом покрытии WC-Co-Cr (1 – Экспериментальный спектр W-Cr-Co) (а); полученный со стороны верхнего тонкого покрытия из Ti-Si-N/WC-Co-Cr (1 – Смоделированный спектр; 2 – Экспериментальный спектр Ti-Si) (б)

Сопла для кумулятивно-детонационного устройства работают не менее 1000 часов, высокая частота инициирования сгорания ($15 \div 30$) Гц в CDS-1 обеспечивает возможность осуществления квазинепрерывной технологии нанесения покрытий.

На рисунке 2 представлено изображение поверхности нанокompозитного, комбинированного покрытия из Ti-Si-N/WC-Co-Cr/ЧС-43 (43% Ni).

Тонкое покрытие, полученное с помощью плазменно-детонационной технологии. Средний размер шероховатости – $14 \div 22$ мкм (после оплавления и после нанесения тонкого покрытия с помощью вакуумно-дугового источника). Ниже (рис. 3) представлено изображение рентгеновского энергодисперсного спектра, из которого следует, что концентрация N ~ $7,2 \div 7,52$ вес. %; Si ~ 0,57 %; Ti ~ 76,70 %; и Fe ~ 0,7 вес. %, Ni, Cr, Fe из толстого покрытия элементов имеет небольшой разброс.

На рис. 4а представлены результаты POP анализа для толстого покрытия WC-Co-Cr (без тонкого покрытия из Ti-Si-N), а справа представлены результаты, полученные с комбинированного покрытия (рис. 4б).

Как видно из результатов расчетов (распределения элементов) по стандартной программе [5], оценки концентрации показывают, что N = 30 %; Si \approx (5 \div 6) ат. %, а Ti \approx (64 \div 63) ат. %. Из энергетического спектра, полученного на толстом покрытии трудно оценить концентрацию элементов из-за высокой шероховатости поверхности покрытия полученного плазменно-детонационным методом.

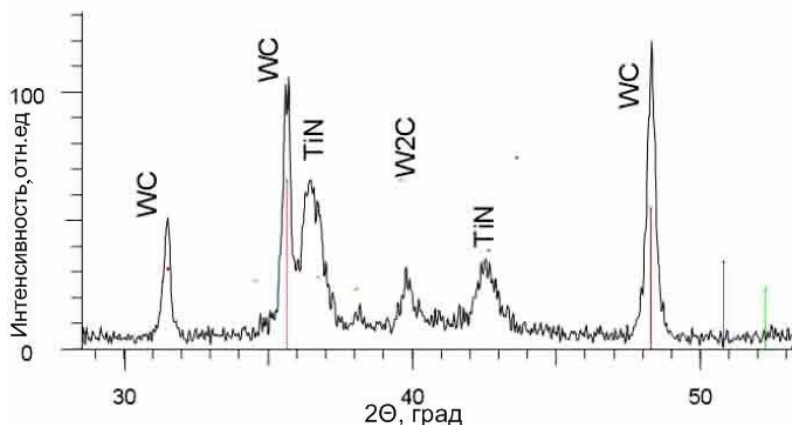


Рис. 5 – Фрагменты дифрактограммы полученные с участка поверхности нанокompозитного комбинированного покрытия Ti-Si-N/WC-Co-Cr, нанесенного на подложку из стали ЧС-42

Результаты рентгенофазового анализа, полученный для комбинированного нанокompозитного покрытия, показали (см. рис. 5.), что в составе двухслойной структуры сформированы фазы: (Ti, Si)N, TiN в тонком нанокompозитной пленке; WC, W₂C. Последние фазы, сформировались в толстом покрытии. Для измерения твердости были приготовлены специальные образцы, поверхность которых шлифовалась, а затем полировалась. После нанесения толстого покрытия из WC-Co-Cr, толщина сформировавшегося слоя составляла 120 мкм, в результате

шлифовки его толщина уменьшалась до $80 \div 90$ мкм. И на полированную поверхность конденсировалась пленка из Ti-Si-N толщиной около 3 мкм. В результате исследований оказалось, что твердость в различных участках поверхности значительно изменяется от 29 ± 4 ГПа до 32 ± 6 ГПа. Возможно, это связано с тем, что покрытие, полученное плазменно-детонационным методом, неоднородно по поверхности из-за разброса значений твердости в толстом покрытии от (17,3 ГПа до 11,5 ГПа). Возможно, это соотношение значений твердости сохраняется после конденсации тонкого покрытия из Ti-Si-N. При этом модуль упругости так же ведет себя неординарным способом, а именно с увеличением нагрузки он увеличивается и выходит на насыщение при глубине продавливания индентора ≥ 200 нм.

Твердость тонкого покрытия, нанесенного на полированную поверхность СТ-45, имеет максимальное значение 48 ГПа, а среднее значение $H_{cp} = 45$ ГПа. Как видно из результатов разброс величины твердости значительно меньше, чем в комбинированном покрытии.

На рис 6. представлены зависимости «нагрузки-разгрузки» для различных глубин продавливания индентора. Как видно из этих зависимостей и расчетов, проведенных согласно методике Оливера и Фара [15], твердость покрытий из Ti-Si-N, нанесенных на толстое покрытие из $(Cr_3C_2)_{75}-(NiCr)_{25}$, составляет $37,0 \pm 4,0$ ГПа, при модуле упругости $E = 483$ ГПа.

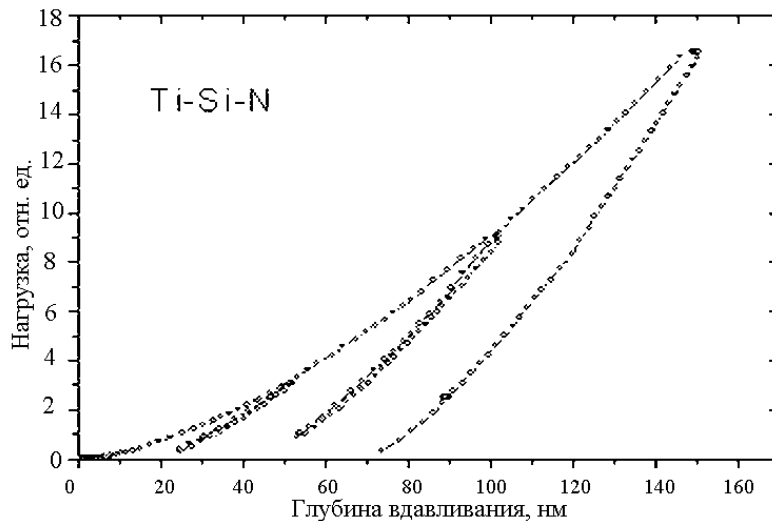


Рис. 6 – Кривые «нагрузка-разгрузка» для разной глубины вдавливания индентора Берковича в нанокompозитном покрытии из Ti-Si-N/ $(Cr_3C_2)_{75}-(NiCr)_{25}$

Ниже, на рисунке 7, представлены фрагменты дифрактограмм, полученные на нанокompозитном комбинированном покрытии Ti-Si-N/ $(Cr_3C_2)_{75}-(Ni-Cr)_{25}$. Что видно из дифрактограмм и результатов расчетов параметров структуры покрытий в таблице 1.

В покрытии основными фазами являются Cr_3Ni_2 (нижнее-толстое покрытие) и (Ti, Si)N и TiN (верхний слой покрытия). Съемка проходила в кобальтовом излучении. Кроме того, есть дополнительные фазы чистого

Cr, а также тонкое-толстое покрытие присутствует в небольшой концентрации оксид титана Ti_9O_{17} , на межфазной границе.

Ввиду малого содержания Si происходит наложение дифракционных пиков фазы (Ti,Si)N и TiN, а (Ti,Si)N представляет из себя твердый раствор на основе TiN (внедрение Si). Данные фазы хорошо разделяются на углах $72-73^\circ$.

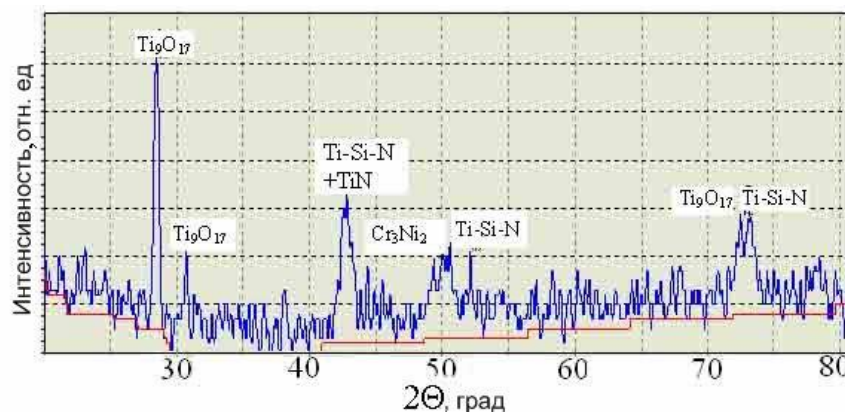


Рис. 7 – Участок дифрактограммы комбинированного нанокompозитного покрытия из Ti-Si-N/(Cr₂C₂-Ni)₇₅-(NiCr)₂₅

Таблица 1 – Результаты расчетов параметров и структуры покрытий

№ \ Пар	Угол	Площадь	Интенс.	Полушир.	Межполск.	% Макс.	Фаза	hkl
1	28,437	8,511	37	0,4512	3,6416	100,00	Ti ₉ O ₁₇	106 004
2	30,648	3,083	13	0,4518	3,3845	36,84	Ti ₉ O ₁₇	0210 123
3	42,771	10,885	20	1,0490	2,4530	65,79	Ti-Si-N + TiN	111 111
4	49,332	13,862	13	1,9890	2,1433	34,21	Cr ₃ Ni ₂ Ti-Si-N	321 200
5	49,993	17,418	15	2,2322	2,1168	39,47	TiN Ti ₉ O ₁₇	200 1223 110
6	50,533	6,528	12	1,0335	2,0956	44,74	Cr ₃ Ni ₂	330
7	52,134	2,782	15	0,3553	2,0355	39,47	Cr ₃ Ni ₂ Cr Ni	202 110 111
8	72,500	18,056	18	1,8950	1,5127	47,37	Ti ₉ O ₁₇ Ti-Si-N	3130 220
9	73,040	11,106	13	1,5950	1,5030	52,63	TiN	220

На рис. 8 представлены участки покрытия из (Cr₃C)₇₅-(NiCr)₂₅ толстого (нижнего покрытия) и распределение интенсивностей рентгеновского излучения основных элементов. Основной состав этого покрытия: никель и хром (Ni ~ 36 % и Cr ~ 64 %), присутствует также C, O и Si.

Из-за того, что тонкое (верхнее) покрытие имеет очень малую толщину, трудно на поперечных шлифах его выделить из-за большой ширины детонационного покрытия. В покрытии имеются области, отвечающие чистому никелю и хрому. В матрице никеля (белая область) присутствует

значительное количество включений (зерна) хрома: мелкие ($< 1 \mu\text{м}$), средние ($4 \div 5 \mu\text{м}$) и крупные ($15 \div 20 \mu\text{м}$). Белая область богатая Ni (до 90 ат. %). Серая область Cr (до 92 ат. %). Из-за маленькой толщины слоя Ti-Si-N в этих экспериментах с помощью микроанализа не удалось определить состав и толщину, а также ввиду ограничения приема обнаружения элементного состава (азот, углерод и кислород). Однако, при получении косых шлифов под углом 7° , удалось выявить элементный состав тонкого покрытия из Ti-Si-N и композицию нижнего толстого покрытия из $(\text{Cr}_3\text{-C}_2)_{75}\text{-(NiCr)}_{25}$ по (10 \div 12) точкам косого шлифа используя другой растровый микроскоп с более лучшим энергетическим разрешением.

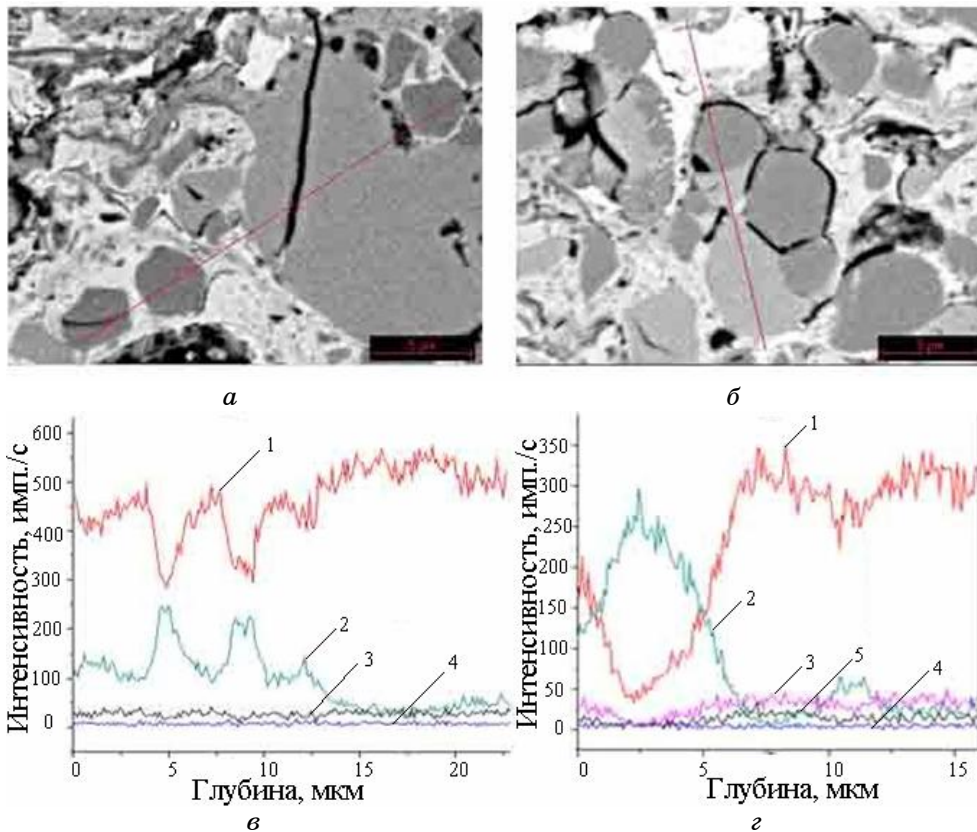


Рис. 8 – Участки поперечного сечения комбинированных покрытий полученные методом РЭМ: (а, б) показаны линии элементного анализа полученные с помощью ЭДС (1 – Cr; 2 – Ni; 3 – C; 4 – Fe); (в, г) показано распределение элементов по глубине комбинированного покрытия из Ti-Si-N($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$)-(NiCr) $_{25}$ на участках, изображенных на рис. а, б (1 – Cr; 2 – Ni; 3 – C; 4 – Fe; 5 – O)

4. ВЫВОДЫ

Получены и исследованы нанокompозитные комбинированные покрытия толщиной свыше 100 мкм состава Ti-Si-N/ WC-Co-Cr и Ti-Si-N/ $(\text{Cr}_3\text{C}_2)_{75}$ (NiCr) $_{25}$. Обнаружено, что размер зерен тонких покрытий,

сформированный из фаз (Ti, Si)N и TiN, при твердости 38 ГПа составлял ≈ 25 нм для первой серии образцов. Для второй серии, размер зерен получили меньше, около 15 нм, при твердости покрытия $42 \div 44$ ГПа при таком же составе фаз (Ti, Si)N и TiN. Концентрация Si и N изменялась от 10 ат.% (Ti) до 5 (Si) и N от 30 ат.% до 20 ат.%.

Обнаружено значительное повышение стойкости к износу при истирании цилиндра на плоскости образца, и увеличение коррозионной стойкости, при повышении других механических характеристик.

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE NANOCOMPOSITE AND COMBINED COATINGS Ti-Si-N/WC-Co-Cr/ AND Ti-Si-N/(Cr₃C₂)₇₅-(NiCr)₂₅

A.D. Pogrebnjak^{1,2}, *M.V. Il'yashenko*¹, *M.V. Kaverin*^{1,2}, *A.P. Shypulyenko*¹,
*A.V. Phsyk*¹, *V.M. Beresnev*³, *G.V. Kirik*⁴, *N.K. Erdybayeva*⁵, *N.A. Makhmudov*⁶,
*O.V. Kolisnichenko*⁷, *Yu.N. Tyurin*⁷, *A.P. Shpak*⁸

¹ Ukraine Sumy Institute for Surface Modification,
P.O. Box 163, 40030, Sumy, Ukraine
E-mail: apogrebnjak@simp.sumy.ua

² Sumy State University,
2, Rimsky-Korsakov St., 40007, Sumy, Ukraine

³ Science Center for Physics and Technology,
6, pl. Svobody, 61022, Kharkov, Ukraine

⁴ Concern «Ukrrosmetal»,
6, Kursky Ave, 40020, Sumy, Ukraine

⁵ East-Kazakhstan State Technical University,
69, A.K. Protazanov St., 070004, Ust-Kamenogorsk City, The republic of
Kazakhstan

⁶ Samarkand State University,
15, University Boulevard, 140104, Samarkand, Uzbekistan

⁷ O.E. Paton Welding Institute, NAS of Ukraine,
11, Bozhenko St. 03680, Kiev, Ukraine

⁸ G.V. Kurdyumov Institute of Metal Physics NAS of Ukraine,
36, Vernadsky boulevard, 03680, Kiev, Ukraine

Two types of nanocomposite coatings Ti-Si-N/WC-Co-Cr and Ti-Si-N/(Cr₃C₂)₇₅(NiCr)₂₅ of 160 to 320 μ m thickness were manufactured using two deposition technologies: cumulative-detonation and vacuum-arc deposition in HF discharge. The combined coatings restored worn areas of tools and demonstrated high corrosion and wear resistance, increased hardness, elastic modulus, and plasticity index. The composition of top coating changed from Ti = 60 at.%, N \approx 30 at.%, and Si = 5at.% to N = 20at.% and Ti – the rest. The first series of coatings indicated the following phases: (Ti, Si)N and TiN for thin coating and WC, W₂C for thick one. The second series indicated (Cr₃Ni₂), pure Cr, and little amount of Ti₁₉O₁₇ (in transition region) for thick coating and (Ti, Si)N, TiN for thin one. For the first series, grain dimensions reached 25 nm and hardness was 38 GPa. For the second series, grain dimensions were 15 nm and hardness essentially exceeded 42 GPa \pm 4 GPa. Corrosion resistance in salt solution and acidic media increased and cylinder-surface friction wear decreased.

Keywords: NANOCOMPOSITE, PLASTICITY INDEX, ELASTIC MODULUS, CORROSION RESISTANCE, CYLINDER-SURFACE.

**ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОКОМПОЗИТНИХ
КОМБІНОВАНИХ ПОКРИТТІВ Ti-N-Si/WC-Co-Cr ТА
Ti-N-Si/(Cr₃C₂)₇₅-(NiCr)₂₅**

*О.Д. Погребняк^{1,2}, М.В. Ил'яшенко¹, М.В. Каверін^{1,2}, А.П. Шипиленко¹,
А.В. Пшик¹, В.М. Береснев³, Г.В. Кирик⁴, Н.К. Єрдибасва⁵, Н.А. Махмудов⁶,
О.В. Колісніченко⁷, Ю.Н. Тюрін⁷, А.П. Шпак⁸*

- ¹ Сумський інститут модифікації поверхні,
п/с 163, 40030, Суми, Україна
E-mail: apogrebnjak@simp.sumy.ua
- ² Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова 2, 40007 Суми, Україна
- ³ Науковий фізико-технічний центр (НФТЦ) МОН та НАН України,
пл. Свободи 6, 61022 Харків, Україна
- ⁴ Концерн «Укрросметалл»,
пр. Курський 6, 40020 Суми, Україна
- ⁵ Східно-Казахстанський державний технічний університет,
вул. Протазанова 69, 070004 Усть-Каменогорськ, Казахстан
- ⁶ Самаркандський державний університет,
Університетський бульвар 15, 140104 Самарканд, Узбекистан
- ⁷ Інститут електродварювання НАН України імені Є.О. Патона,
вул. Боженко 11, 03680 Київ, Україна
- ⁸ Інститут металофізики НАН України імені Г.В. Курдюмова,
Бульвар Вернадського 36, 03680 Київ, Україна

Отримано два види комбінованих наноконкомпозитних покриттів (Ti-N-Si/WC-Co-Cr; Ti-N-Si/(Cr₃C₂Ni)₇₅-(NiCr)₂₅) товщиною 160 ÷ 320 мкм з використанням двох технологій осадження: кумулятивно-детонаційним з подальшим осадженням за допомогою вакуумно-дугового джерела у ВЧ розряді. Що дає можливість, за допомогою комбінованого покриття, відновлювати розмір зношених ділянок виробів із захистом їх від корозії, зносу, при цьому збільшити твердість, модуль пружності, індекс пластичності. Склад верхнього покриття змінювали від Ti = 60 %, N ≈ 30 %, Si = 10 % до Si = 5 %, N = 20 %, Ti = 75 %. У першій серії покриттів виявлені фази (Ti, Si) і TiN в тонкому верхньому покритті і WC і W₂C в товстому нижньому покритті.

У другій серії, у верхньому покритті були отримані (Ti, Si) N і TiN, а в нижньому покритті Cr₃Ni₂, чистий Cr; невелика кількість Ti₁₉O₁₇ в перехідній області між тонким і товстим покриттям.

Розмір зерен в першому варіанті тонкого покриття складав 25 нм, при твердості 35 ГПа, а в другому варіанті розмір зерен кристалітів складав 15 нм при твердості H = 42 ± 3,6 ГПа. Показано, що корозійна стійкість в сольовому розчині і кислотному середовищах збільшується, при зменшенні зносу в результаті тертя циліндра по поверхні комбінованого покриття.

Ключові слова: НАНОКОМПОЗИТНІ ПОКРИТТЯ, МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ, ІНДЕКС ПЛАСТИЧНОСТІ, КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Gleiter, *Acta Mater.* **48**, 1 (2000).
2. S. Veprek, M. Veprek-Heijman, P. Karvankova, S. Prochazka, *Thin Solid Films* **476**, 1 (2005).
3. J. Musil, *Physical and mechanical properties of hard nanocomposite films prepared by reactive magnetron sputtering* (New York: Nanostructured Hard Coatings: 2005).
4. А.Д. Погребняк, А.П. Шпак, Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, *УФН* **179** №1, 35 (2009) (A.D. Pogrebnyak, A.P. Shpak, N.A. Azarenkov, V.M. Beresnev, *Phys.-Usp.* **52** No1, 29 (2009)).
5. К.К. Кадыржанов, Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк, *Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов* (М: МГУ: 2005).
6. A. Gavaleiro, J.T. De Hosson, *Nanostructured Coating*, (Berlin: Springer-Verlag: 2006).
7. Р.А. Андриевский, А.М. Глезер, *УФН* **179** №4, 337 (2009) (R.A. Andrievski, A.M. Glezer, *Phys. Usp.* **52** No4, 315 (2009)).
8. Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, *Структура и свойства защитных покрытий и модифицированных слоев 560* (Харьков: ХНУ: 2007).
9. В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Н.А. Азаренков, Г.В. Кирик, В.И. Фареник, В.В. Понарядов, *Успехи физ. мет.* **3**, 171 (2007).
10. Г.П. Глазунов, А.А. Андреев В.М. Шулаев, *Харьковская нанотехнологическая асамблея 1*, 187 (Харьков: НИЦ ХФТИ: 2006).
11. Е.А. Левашов, Д.В. Штанский, *Успехи химии* **76** №5, 501 (2007) (E.A. Levashov, D.V. Shtansky, *Russ. Chem. Rev.* **76** No5, 463 (2007)).
12. R.F. Zhang, S. Veprek, A.S. Argon, *Phys. Rev. B* **79**, 245436 (2009).
13. S. Veprek, A.S. Argon, R.F. Zhang, *Phil. Mag. Lett.* **12**, 955 (2007).
14. J. Musil, P. Barozh, P. Zeman, *Plasma Surfaces Engineering and its Practical Applications* (Research Signpost Publisher: 2007).
15. С.Н. Дуб, Н.В. Новиков, *Сверхтвердые материалы* **6**, 16 (2004).
16. А.Д. Погребняк, Ю.А. Кравчеко, *Поверхность* №11, 74 (2006).
17. А.Д. Погребняк, Ю.Н. Тюрин, *УФН* **175**, 515 (2005) (A.D. Pogrebnyak, Yu.N. Tyurin, *Phys.-Usp.* **48**, 487 (2005)).