

УДК 621.793.14

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ КАТОДОВ СОСТАВА Ti–B–Si–Ni, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА И ПРЕССОВАНИЯ

© 2023 г. В. М. Савостиков^{a, *}, А. А. Леонов^{a, **}, В. В. Денисов^a,
Ю. А. Денисова^a, А. Б. Скосырский^{a, b}, И. А. Шулепов^c

^aИнститут сильноточной электроники СО РАН,
Томск, 634055 Россия

^bНациональный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, 634050 Россия

^cИнститут физики прочности и материаловедения СО РАН,
Томск, 634055 Россия

*e-mail: svm.53@mail.ru

**e-mail: laa-91@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.08.2022 г.

После доработки 25.10.2022 г.

Принята к публикации 25.10.2022 г.

В статье отражены результаты исследования вакуумно-дуговых покрытий, полученных распылением катодов состава Ti–B–Si–Ni, изготовленных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с одновременным прессованием. Охарактеризованы приемы изготовления катодов указанного состава, описаны модернизированная установка ННВ 6.6-И1, условия и режимы нанесения покрытий в атмосфере аргона и в газовой смеси азот + аргон в соотношении 90/10. Для исследования физико-механических свойств получаемых покрытий измерена твердость при разных нагрузках на индентор; проведена оценка прочности сцепления с основой методом Роквелла; определен элементный состав катодов и покрытия (Ti–B–Si–Ni)N методом оже-спектроскопии и фазовый состав покрытия (Ti–B–Si–Ni)N методом рентгенофазового анализа; проведено исследование свойств покрытия (Ti–B–Si–Ni) методом царапания (скретч-тестирования). В результате комплексного анализа полученных результатов сделан вывод о том, что высокая твердость покрытия (Ti–B–Si–Ni)N (более 40 ГПа) обусловлена его составом, включающим как нитриды, так и высокотвердые бориды титана. Гетерофазность структуры указанного покрытия может служить вкладом в напряженное состояние материала. Покрытие имеет градиентно-слоистое строение. В материале присутствуют связующий с подложкой слой Ti–B–Si–Ni и основной функциональный слой (Ti–B–Si–Ni) N. Покрытие обладает одновременно и высокой твердостью, и достаточной прочностью сцепления с основой (адгезией), определенной методом скретч-тестирования. Сочетание этих свойств делает материал перспективным для его практического применения в производстве инструментов.

Ключевые слова: вакуумно-дуговая установка, катоды, покрытия, поверхности твердость, оже-спектроскопия, рентгеноструктурный анализ, нитриды, бориды, скретч-тестирование, адгезия.

DOI: 10.31857/S1028096023060146, EDN: DKLTND

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время эффективным способом создания поверхностных, защитно-упрочняющих тонкопленочных покрытий, является ионно-плазменное формирование в их составе набора соединений, обладающих различными, функционально целенаправленными, свойствами [1–4]. Известно, например, что существенное измене-

ние структуры и свойств нитридных покрытий можно обеспечить путем легирования такими элементами, как Si, B, Al, Ni и др. [5–9]. Такой технологический процесс реализуют или ионно-плазменным распылением набора катодов различного состава, или распылением композиционных катодов, изначально содержащих в своем составе набор заданных элементов и соединений.

В отличие, например, от использования составных катодов, представляющих набор металлических компонентов, более управляемым и перспективным для изготовления композиционных катодов является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), позволяющий изначально получать самые разнообразные сочетания не только элементов, но и соединений в катодных материалах и, соответственно, в осаждаемых покрытиях.

Процессы СВС материалов на сегодняшний день достаточно хорошо исследованы и уже находят широкое практическое применение [10, 11], включая изготовление катодов разнообразного состава для ионно-плазменного распыления и получения с их использованием покрытий с уникальными свойствами. В Национальном исследовательском технологическом институте «МИСиС» проводят работы по синтезу твердых и термостойких покрытий для упрочнения рабочих поверхностей металлоизделий с использованием распыления многокомпонентных СВС-катодных мишеней [12–14]. Для нанесения покрытий в этих работах применяли метод магнетронного распыления. В работах Томского государственного университета также использовали многокомпонентные катоды, полученные методом СВС (СВС-катоды), для магнетронного нанесения покрытий [15–17]. Однако, вследствие низкой производительности, этот метод ограничен для применения в промышленном масштабе. Гораздо более производительным и эффективным является метод вакуумно-дугового напыления покрытий, широко применяемый в отечественном производстве и известный как метод конденсации с ионной бомбардировкой. В этом случае нам представляется также перспективным использование многокомпонентных СВС-катодов наперед заданного состава. В частности, в работах Самарского государственного университета исследованы процессы изготовления катодов методом СВС на базе сочетания порошков титана с бором и кремнием для вакуумно-дугового распыления и доказана в производственных испытаниях достаточно высокая эффективность упрочняющего действия покрытий, получаемых с их использованием, на повышение износостойкости режущего инструмента [18, 19]. Очевидно, это обусловлено высокой вероятностью синтеза высокотвердых боридов и термостойких силицидов в осаждаемом покрытии [19].

Целью настоящей работы является оптимизация состава и технологических параметров изготовления СВС-катодов на базе порошковых композиций титана, бора, кремния и никеля и последующая отработка условий и режимов их вакуумно-дугового распыления с осаждением многокомпонентных покрытий. Планируемые исследования физико-механических свойств полученных покрытий позволят оценить эффективность

их защитно-упрочняющего действия на инструментальном твердом сплаве и перспективность использования в производстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изготовление опытных образцов пресованных СВС-катодов

Для получения катодного материала Ti–B–Si в работах [18, 19] в качестве связующего материала образующихся соединений боридов и силицидов использовали избыточное (от 10 до 35%) по сравнению со стехиометрическим составом содержание титана в синтезируемой композиции при экзотермической реакции. Отличительной особенностью нашего подхода является использование в качестве связующего компонента никеля, инертного по отношению к бору и кремнию при экзотермической реакции. По нашему мнению, кроме выполнения связующей роли между образующимися при СВС зернами боридов и силицидов титана, никель способствует и благоприятному уменьшению размера зерен этих образующихся соединений вследствие ограничивающего воздействия на их рост. Кроме того, в отличие от указанных работ [18, 19], мы использовали в качестве опорного основания при синтезе катодного материала не нержавеющей сталь типа 12Х18Н9Т, а титановый сплав ВТ-1-0 в виде стакана-оболочки. Это, на наш взгляд, упрощает технологию, т.к. не требует добавления связующего с основанием слоя вследствие химико-физического сродства составляющих композиции, участвующей в СВС, с материалом основания.

В настоящей работе были изготовлены СВС-катоды на основе сочетания элементов Ti, B, Si в соотношении 2Ti : 2B : Si (10–15 ат. %) и введения во всех вариантах Ni в качестве связки в пределах 10 ат. % от общего содержания элементов в порошковой композиции. В исходной смеси были использованы: порошок титана ПТМ, бор аморфный Б99А, кремний металлический, порошок никеля ПНЭ1. Смешивание порошков осуществлено в смесителе карусельного типа в течение 1 ч. Для качественного смешивания к смеси добавляли стальные шары. Титановый стакан-оболочка заполняли указанной порошковой смесью, которую предварительно спрессовывали с помощью разборной пресс-формы и гидравлического прессы Dezimalpresse DP 36. Далее проводили воспламенение смеси с помощью электрической спирали и одновременное прессование синтезируемого материала.

Условия и режимы вакуумно-дугового осаждения покрытий

Испытания СВС-катодов и нанесение покрытий с их использованием осуществлено на модер-

низированной установке ННВ 6.6-И1 (рис. 1), содержащей в рабочей камере два электродуговых испарителя и источник газовой плазмы “ПИНК” [20, 21]. Для исследования свойств наносимых покрытий использовались образцы подложек двух типов: квадратной формы, размером 15×15 мм, из штамповой стали 4ХМФС и круглые, диаметром 8 мм, из твердого сплава ВК-8, применяемого для изготовления металлорежущего инструмента – фрез и резцов. Образцы подложек крепили на поворотном столе с помощью специального держателя (рис. 1). Скорость вращения поворотного стола составляла 3.5 об./мин. На первой стадии вакуумно-плазменного процесса осуществляли очистку и нагрев образцов в атмосфере аргона с помощью источника газовой плазмы [20] до температуры порядка 420°C при увеличении потенциала смещения U_c от 600 до 900 В. В первой серии экспериментов далее формировали слой Cr в атмосфере Ar в течение 2 мин при $U_c = 900$ В с дальнейшим понижением U_c до 100 В и одновременным подключением дугового испарителя с катодом Ti–B–Si–Ni также в течение 2 мин. Ток дугового разряда испарителя с хромовым катодом составлял 90 А, а испарителя с катодом Ti–B–Si–Ni – 80 А. После этого испаритель с хромовым катодом отключали, а в качестве рабочего газа переходили на смесь аргона и азота в соотношении 10/90 при общем давлении в камере 0.6 Па. Процесс осаждения покрытия (Ti–B–Si–Ni)N протекал в течение 90 мин при $U_c = 100$ В. Охлаждение образцов с покрытием в камере проводили с предварительным выключением турбомолекулярного насоса. Покрытия Ti–B–Si–Ni осаждали по аналогичному алгоритму, но полностью в атмосфере аргона. С целью увеличения толщины покрытия (Ti–B–Si–Ni)N и расширения возможностей его исследования на втором этапе работ нанесение покрытия выполняли с одновременным распылением двух СВС-катодов Ti–B–Si–Ni. Вначале формировали слой Ti–B–Si–Ni в атмосфере Ar в течение 2 мин, а затем осуществляли переход на газовую смесь аргона и азота в соотношении 10/90 при общем давлении в камере 0.6 Па. Время напыления составляло, как и ранее, 90 мин. Токи дуговых разрядов испарителей составляли 80 А. Потенциал смещения при осаждении был увеличен до 150 В с целью оценки влияния значения потенциала смещения на показатели твердости покрытия. Остальные приемы и параметры процесса были идентичными предыдущим.

Приборы и методы исследования

Методом калотестирования измеряли толщину осажденных покрытий на стальных подложках, позволяющим более точно выявить ее значение при шаровом истирании по сравнению с более твердой подложкой из сплава ВК-8. На подлож-

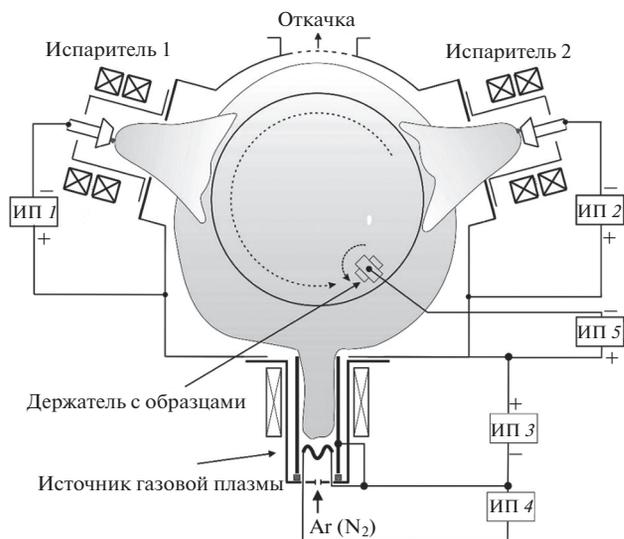


Рис. 1. Схема модернизированной установки ННВ 6.6-И1: ИП 1 – источник электропитания дугового испарителя 1; ИП 2 – источник электропитания дугового испарителя 2; ИП 3 и ИП 4 – источники электропитания разряда и накала источника газовой плазмы; ИП 5 – источник электропитания потенциала смещения на подложке.

ках из твердого сплава измерялась микротвердость на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0.5 Н на первом этапе исследований и на приборе KBW1 с алмазной пирамидой Виккерса при нагрузке на индентор 0.1 Н на втором этапе. Значение твердости определено как среднее по результатам 10 измерений. Покрытие Ti–B–Si–Ni и покрытие (Ti–B–Si–Ni)N были оценены на адгезионную прочность и хрупкость методом идентификации на твердомере Роквелла (при нагрузке 1471 Н. Затем методом царапания (скретч-тестирования) было проведено исследование покрытия (Ti–B–Si–Ni)N на приборе Revetest RST (CSM Instruments, США) с применением индентора в виде алмазного конуса Роквелла. Нагрузка на индентор линейно возрастала от 0 до 150 Н. Оптическое изображение дорожки износа покрытия (Ti–B–Si–Ni)N после скретч-тестирования получали с помощью инвертированного микроскопа Leica DMi8M (Leica Microsystems, Германия). Элементный состав катодов и покрытия (Ti–B–Si–Ni)N был исследован на модернизированном оже-спектрометре 09-ИОС-10 [22] с энергией электронов 3 кэВ и разрешением по энергии 0.7%. Для распыления поверхности исследуемых образцов использовали пучок ионов аргона. Состав покрытия (Ti–B–Si–Ni)N определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Shimadzu XRD-7000S с использованием излучения $\text{CuK}\alpha$. Анализ фазового состава проведен с использованием баз данных PDF 4+ и программы Crystallographica Search-Match [23–25].

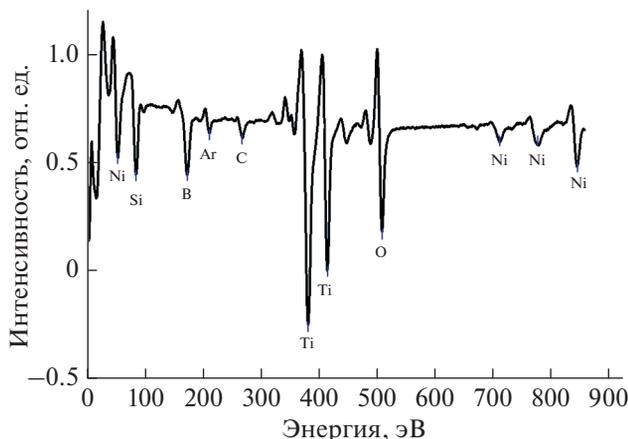


Рис. 2. Результаты оже-спектрального анализа образца СВС-катода Ti–B–Si–Ni.

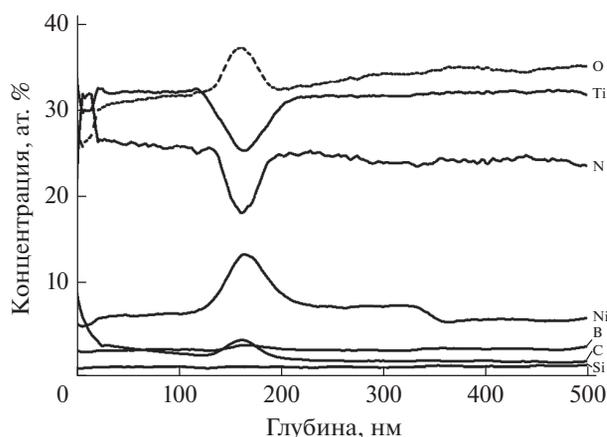


Рис. 3. Профиль распределения элементов по толщине покрытия (Ti–B–Si–Ni)N.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оже-спектральный анализ образцов катодного материала Ti–B–Si–Ni позволил обнаружить все элементы, заложенные в исходную порошковую смесь (рис. 2).

Результаты измерений толщины покрытий t и микротвердости $H_{0,5}$ на приборе ПМТ-3 представлены в табл. 1. При таких малых толщинах покрытий и относительно большой нагрузке на индентор (следовательно, и большой глубины его проникновения) следует говорить о твердости композиции подложка–покрытие в целом. Однако показатели твердости свидетельствуют об эффективности конкретного вида покрытия в качестве упрочняющего. Как видно из полученных результатов, синтез покрытий в смеси азот + аргон позволяет значительно повысить твердость композиции подложка из твердого сплава ВК-8–покрытие (Ti–B–Si–Ni)N по сравнению с композицией ВК-8 + покрытие Ti–B–Si–Ni (табл. 1). Очевидно, это обусловлено, в первую очередь, образованием нитридов в составе покрытий. Возможность реализации процесса образования нитридов в покрытии (Ti–B–Si–Ni)N следует из данных оже-спектрального анализа, которые указывают на распределение азота наряду с титаном вплоть до глубины травления 500 нм (рис. 3). Следует отметить заметное увеличение концентрации никеля в пределах глубины травления 125–200 нм, которое, очевидно, обусловлено его присутствием в этой области в виде капельной составляющей.

На рис. 4 приведены изображения отпечатков индентора Роквелла на покрытиях Ti–B–Si–Ni и (Ti–B–Si–Ni)N. Из изображений отпечатков видно, что отслоение твердого азотосодержащего покрытия (Ti–B–Si–Ni)N носит лепестковый характер, что свидетельствует о его напряженном состоянии. На обоих изображениях обнаружена капельно-кусковая составляющая покрытий. Следует отметить, что размеры и плотность распределения капель на покрытии (Ti–B–Si–Ni)N заметно меньше, чем на покрытии Ti–B–Si–Ni. Вероятно, это может быть обусловлено образованием нитридов на поверхности распыляемого катода в присутствии ионизированного азота и увеличением скорости перемещения катодного пятна, т.е. снижением локального разогрева распыляемого материала. По-видимому, в дальнейшем следует исследовать возможность снижения токов дуговых разрядов при распылении СВС-катодов и применения фильтров, сепарирующих капельную составляющую в рабочем потоке осаждаемого вещества.

Как указано ранее, с целью увеличения толщины покрытия (Ti–B–Si–Ni)N и расширения возможностей исследования его свойств покрытие было нанесено путем одновременного распыления двух изготовленных СВС-катодов в течение 90 мин. Тестирование методом шарового истирания (калотест) подтвердило, что по сравнению с первой стадией экспериментов толщина покрытия была увеличена с 1.2 до 2.8 мкм. Значение твердости полученного покрытия, определенное на приборе KBW1 как среднее по результатам 10

Таблица 1. Характеристики покрытий Ti–B–Si–Ni и (Ti–B–Si–Ni)N

Покрытие	Толщина t , мкм	Микротвердость $H_{0,5}$, ГПа
Ti–B–Si–Ni	0.6	15.7
(Ti–B–Si–Ni)N	1.2	31.0

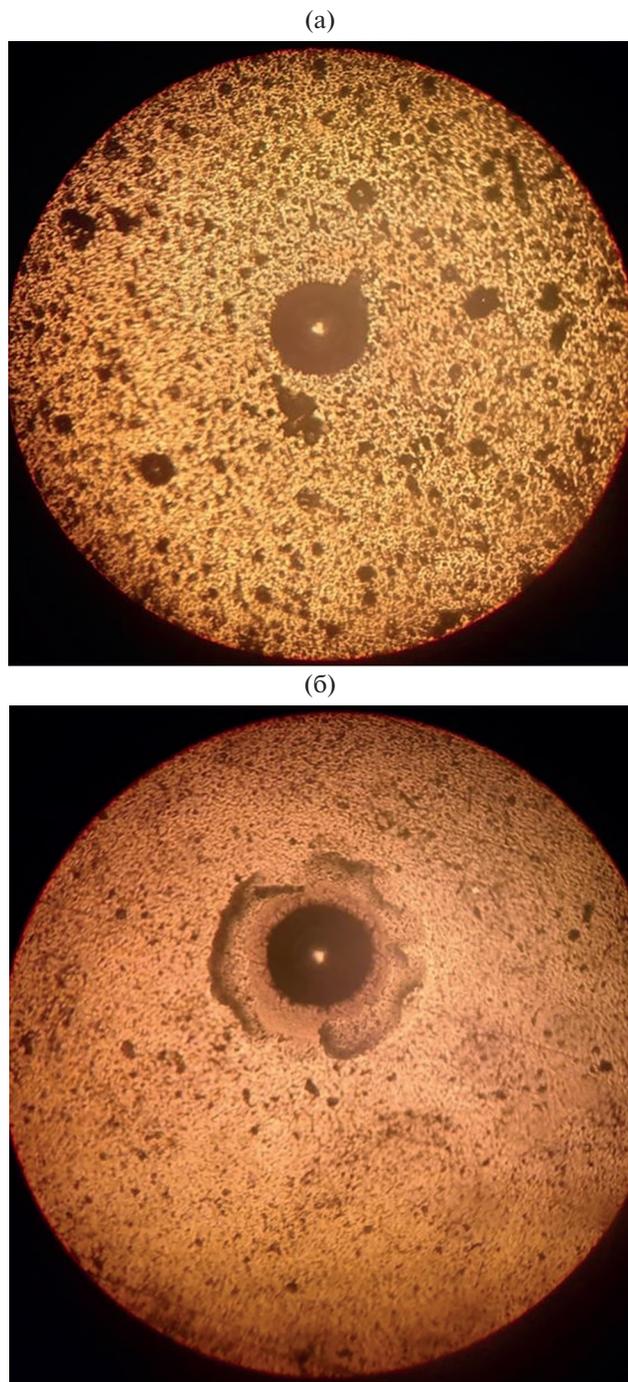


Рис. 4. Вид отпечатков индентора Роквелла на покрытиях Ti–B–Si–Ni (а) и (Ti–B–Si–Ni)N (б).

измерений при малой нагрузке 0.1 Н, составило 41 ГПа. Вычисленная глубина проникновения индентора при всех 10 измерениях не превышала 10% от толщины покрытия. Такое высокое значение твердости обусловлено образованием как нитридов, так и высокотвердых боридов [26] в формируемом покрытии, что подтверждается результатами рентгенофазового анализа (рис. 5).

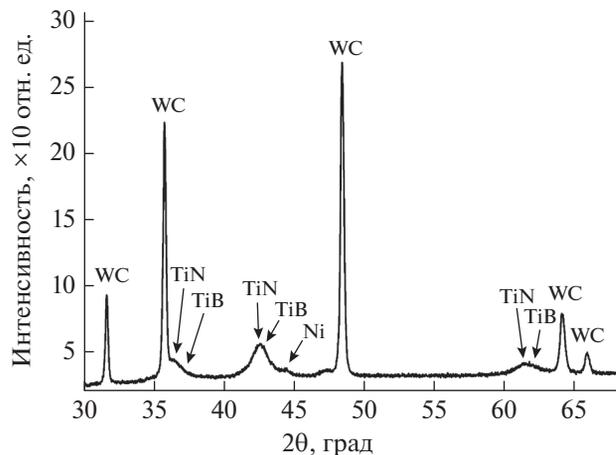


Рис. 5. Рентгеновская дифрактограмма покрытия (Ti–B–Si–Ni)N.

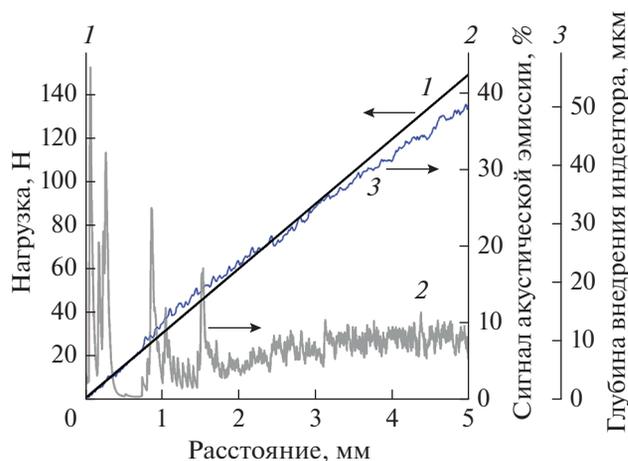


Рис. 6. Зависимости нагрузки (1), сигнала акустической эмиссии (2) и глубины проникновения индентора (3) от расстояния, которое прошел индентор вдоль покрытия (Ti–B–Si–Ni)N.



Рис. 7. Изображение дорожки износа покрытия (Ti–B–Si–Ni)N после скретч-тестирования.

Вследствие высокой твердости покрытия, только при увеличении максимальной нагрузки на индентор до 150 Н при скретч-тестировании покрытие было разрушено до основы с проникновением индентора в поверхностный слой твердосплавной подложки. На рис. 6 и рис. 7 приведены график сигнала акустической эмиссии и изображение дорожки износа покрытия (Ti–B–Si–Ni)N

при скретч-тестировании. Результаты скретч-теста свидетельствуют о высокой адгезионной прочности исследованного покрытия. Его отслоение от твердосплавной подложки начинается при высокой степени нагрузки на индентор — в области 60–80 Н. При этом подтверждается напряженное состояние формируемого многофазного покрытия, о чем свидетельствует появление выраженных сигналов акустической эмиссии еще при малых нагрузках на индентор и до полного его изнашивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ полученных результатов материаловедческих исследований позволяет сделать вывод о возможности и перспективности использования СВС-прессованных катодов базовой композиции Ti–B–Si–Ni для нанесения вакуумно-дуговых покрытий. Результаты исследования покрытия (Ti–B–Si–Ni)N позволяют сделать вывод о том, что высокая твердость указанного покрытия (более 40 ГПа) обусловлена его составом, включающим как нитриды, так и высокотвердые бориды титана. И это имеет важное практическое значение для использования данного покрытия в инструментальном производстве. Абразивное изнашивание поверхности инструмента обусловлено как взаимодействием ее с твердыми частицами, изначально присутствующими в обрабатываемых конструкционных сплавах, так и вследствие возникновения “температурных всплесков” в местах локализованного триботехнического контакта при трении и образования новых частиц по типу окислов, карбидов, силицидов на обрабатываемой поверхности. А как известно, интенсивность абразивного изнашивания поверхности обратно пропорционально ее твердости [27]. Разработанное покрытие имеет градиентно-слоистое строение. В его составе присутствуют связующий с подложкой слой Ti–B–Si–Ni и основной функциональный слой (Ti–B–Si–Ni)N, что одновременно обеспечивает и высокую твердость, и достаточно высокую прочность сцепления с основой. Необходимы дальнейшие исследования для оптимизации технологических параметров изготовления материалов покрытий с целью обеспечения их конкретных функциональных свойств: термостойкости, жаростойкости, стойкости к разным видам износа — абразивному, адгезионному, усталостно-деформационному. Исследованное в настоящей работе покрытие (Ti–B–Si–Ni)N, ввиду высокой его твердости, целесообразно использовать в многослойных структурах с дополнительным целевым применением легирования или функционально ориентированных прослоек, например, демпфирующих при ударных нагрузках, термостойких при эксплуатации в области высоких температур, коррозионно-стойких и т.п.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 1.1.14.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колубаев А.В., Сизова О.В., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Терюкалова Н.В., Новицкая О.С., Белый А.В. // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25. № 2. С. 35. https://www.doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_2_35
2. Колубаев А.В., Сизова О.В., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Терюкалова Н.В., Белый А.В. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. № 4. С. 137. <https://www.doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.4-137-150>
3. Филиппов А.В., Шамарин Н.Н., Москвичев Е.Н., Новицкая О.С., Князев Е.О., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Денисов В.В. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24. № 1. С. 87. <https://www.doi.org/10.17212/1994-6309-2022-24.1-87-102>
4. Тересов А.Д., Денисова Ю.А., Денисов В.В., Леонов А.А., Петрикова Е.А., Ковальский С.С. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2021. Т. 64. № 11(768). С. 164. <https://www.doi.org/10.17223/00213411/64/11/164>
5. Штанский Д.В., Левашов Е.А. // Известия вузов. Цветная металлургия. 2001. № 3. С. 52.
6. Musil J. // Surf. Coat. Technol. 2000. V. 125. P. 322. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00586-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00586-1)
7. Daniel R., Musil J., Zeman P., Mitterer C. // Surf. Coat. Technol. 2006. V. 201. P. 3368. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.206>
8. Mayrhofer P.H., Stoiber M. // Surf. Coat. Technol. 2007. V. 201. P. 6148. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.132>
9. Martin P.J., Bendavid A., Cairney J.M., Hoffman M. // Surf. Coat. Technol. 2005. V. 200. P. 2228. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.012>
10. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика. Черноголовка: ИСМАН, 2002. 234 с.
11. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов. М.: Машиностроение, 2007. 567 с.
12. Патент 2305717 (РФ). Мишень для получения функциональных покрытий и способ ее изготовления / Московский государственный институт стали и сплавов. Левашов Е.А., Курбаткина В.В., Штанский Д.В., Сенатулин Б.Р. // 2007. № 25. С. 19.
13. Кирюханцев-Корнеев Ф.В. // Нанотехнологии: наука и производство. 2017. № 3. С. 19.
14. Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Сытченко А.Д., Левашов Е.А., Лобова Т.А. // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2020. № 2. С. 64. <https://www.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-2-64-72>
15. Патент 2370570 (РФ). Способ комбинированной ионно-плазменной обработки изделий из сталей и твердых сплавов / Томский государственный

- университет. Савостиков В.М., Сергеев С.М., Пинжин Ю.П. // 2009. № 29. С. 9.
16. Патент 2502828 (РФ). Способ нанесения антифрикционного износостойкого покрытия на титановые сплавы / Томский государственный университет. Савостиков В.М., Табаченко А.Н., Потекаев А.И., Дударев Е.Ф. // 2013. № 36. С. 19.
 17. Потекаев А.И., Табаченко А.Н., Савостиков В.М., Дударев Е.Ф., Бакач Г.П., Скосырский А.Б. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 2. С. 77.
 18. Алтухов С.И., Ермошкин А.А., Сметанин К.С., Федотов А.Ф., Лавро В.Н., Латухин Е.И., Амосов А.П. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4. С. 77.
 19. Алтухов С.И., Амосов А.П., Асмолов А.Н., Богданович В.И., Ермошкин А.А., Захаров Д.А., Круцило В.Г., Латухин Е.И., Федотов А.Ф. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6(3). С. 568.
 20. Денисов В.В., Денисова Ю.А., Варданян Э.Л., Островерхов Е.В., Леонов А.А., Савчук М.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2021. Т. 64. № 1(757). С. 125. <https://www.doi.org/10.17223/00213411/64/1/125>
 21. Савостиков В.М., Денисова Ю.А., Денисов В.В., Леонов А.А., Овчинников С.В., Савчук М.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2021. Т. 64. № 12(769). С. 43. <https://www.doi.org/10.17223/00213411/64/12/43>
 22. Panin V.E., Shulepov I.A., Narkevich N.A., Botaeva L.B. // Physical Mesomechanics. 2021. V. 24. P. 131. <https://www.doi.org/10.1134/S1029959921020028>
 23. Леонов А.А., Абдульменова Е.В., Калашников М.П., Ли Ц. // Вопросы материаловедения. 2020. № 4(104). С. 132. <https://www.doi.org/10.22349/1994-6716-2020-104-4-132-143>
 24. Leonov A.A., Abdulmenova E.V., Kalashnikov M.P. // Inorganic Materials: Appl. Res. 2021. V. 12. P. 482. <https://doi.org/10.1134/S2075113321020313>
 25. Леонов А.А., Абдульменова Е.В., Рудмин М.А., Ли Ц. // Письма о материалах. 2021. Т. 11. № 4(44). С. 452. <https://www.doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-452-456>
 26. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения. Москва: Металлургия, 1976. 560 с.
 27. Крагельский И.В., Добыгин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

Study of the Physical and Mechanical Properties of Coatings Obtained by Vacuum-Arc Spraying of Ti–B–Si–Ni Cathodes Manufactured Using Self-Propagant High-Temperature Synthesis and Pressing

V. M. Savostikov^{1, *}, A. A. Leonov^{1, **}, V. V. Denisov¹, Yu. A. Denisova¹,
A. B. Skosyrsky^{1, 2}, I. A. Shulepov³

¹Institute of High Current Electronics, Siberian Branch RAS, Tomsk, 634055 Russia

²National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050 Russia

³Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch RAS, Tomsk, 634055 Russia

*e-mail: svm.53@mail.ru

**e-mail: laa-91@yandex.ru

The article presents the results of a study of vacuum-arc coatings obtained by sputtering Ti–B–Si–Ni cathodes, manufactured by the method of self-propagating high-temperature synthesis with simultaneous pressing. The techniques for manufacturing cathodes of the indicated composition were characterized; the modernized NNV 6.6-II device, the conditions and modes of coating deposition in an argon atmosphere and in a nitrogen + argon gas mixture in a ratio of 90/10 were described. To study the physical and mechanical properties of the resulting coatings, the hardness was measured at different loads on the indenter; the strength of adhesion to the base was assessed by the Rockwell method; the elemental composition of the cathodes and the (Ti–B–Si–Ni)N coating was determined by Auger spectroscopy and the phase composition of the (Ti–B–Si–Ni)N coating was determined by X-ray phase analysis; a study of the properties of the coating (Ti–B–Si–Ni) was carried out by the scratching method (scratch testing). As a result of a comprehensive analysis of the results obtained, it was concluded that the high hardness of the (Ti–B–Si–Ni)N coating (more than 40 GPa) is due to its composition, which includes both nitrides and highly hard titanium borides. The heterophasic nature of the structure of this coating can serve as a contribution to the stressed state of the material. The coating has a gradient-layered structure. The material contains a Ti–B–Si–Ni layer bonding with the substrate and the main functional layer (Ti–B–Si–Ni) N. The coating has both high hardness and sufficient adhesion to the substrate (adhesion) determined by the scratch testing. The combination of these properties makes the material promising for its practical application in the production of tools.

Keywords: vacuum arc unit, cathodes, coatings, hardness, Auger spectroscopy, X-ray diffraction analysis, nitrides, borides, scratch testing, adhesion.