

2. Kenzhebayeva Y, Kulachenkov N, Rzhevsky S. Light-driven anisotropy of 2D metal-organic framework single crystal for repeatable optical modulation // Communications materials. - 2024. V. 5 № 48.

УДК 621.793.182

**С.Д. Латушкина¹, Д.В. Куис², О.И. Посылкина¹, И.А. Сечко¹,
Д.Д. Гордиенко², А.С. Раковец², О.Ю. Цынкович²**

¹ Физико-технический институт НАН Беларуси

² Белорусский государственный технологический университет

Минск, Беларусь

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ti-Cr-N, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ

***Аннотация.** Работа посвящена разработке архитектуры многослойных наноструктурных покрытий системы Ti-Cr-N с чередующимися слоями, обладающими различными механическими свойствами. По результатам исследований предложена архитектура многослойных наноструктурных покрытий TiN-(Ti-Cr-N) с высоким уровнем микротвердости и эксплуатационных свойств режущего инструмента за счет увеличенной протяженности межфазных границ в многослойном покрытии и повышенной энергии межатомной связи в многокомпонентном слое Ti-Cr-N.*

**S.D. Latushkina¹, D.V. Kuis², O.I. Posylkina¹, I.A. Sechko¹,
D.D. Gordienko², A.S. Rakovets², O.Y. Tsynkovich²**

¹ Physical and Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

² Belarusian State Technological University

Minsk, Belarus

DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURE OF MULTILAYER COATINGS OF THE Ti-Cr-N SYSTEM, FORMED BY THE METHOD OF VACUUM-ARC DEPOSITION

***Abstract.** The work is devoted to the development of the architecture of multilayer nanostructured coatings of the Ti-Cr-N system with alternating layers possessing different mechanical properties. Based on the research results, the architecture of multilayer nanostructured TiN-(Ti-Cr-N) coatings with a high level of microhardness and operational properties of the cutting tool due to the increased length of the interphase boundaries in the multilayer coating and the increased energy of interatomic bonding in the multicomponent Ti-Cr-N layer is proposed.*

В инструментальной промышленности актуальной задачей является разработка металлообрабатывающего инструмента нового поколения, позволяющего выполнять операции механообработки материалов при повышенных скоростях подачи и достигать более высоких точностных параметров при надежном его функционировании. Повышение эффективности эксплуатации инструмента осуществляется в основном по трем направлениям – снижение энергоемкости процесса резания, повышение качества поверхностей обработки и увеличение износостойкости инструмента. При этом основные исследования ведутся в области совершенствования режущей зоны инструмента. В этой связи важная роль отводится разработке технологий по направленной модификации поверхности, в том числе с помощью новых функциональных покрытий, получаемых различными методами физического и химического осаждения из газовой фазы [1]. Наиболее распространенные и известные покрытия нитридной керамики на основе титана не оказывают особого эффекта в случае упрочнения инструмента, к которому предъявляются высокие требования по надежности и работающего в условиях больших либо знакопеременных нагрузок и повышенных температур. Поэтому актуальным является поиск новых решений при формировании покрытий, обладающих особыми физико-механическими свойствами для работы в тяжелых условиях эксплуатации.

Одним из перспективных направлений совершенствования функциональных покрытий является разработка многослойных наноструктурных покрытий, причем толщина отдельных слоев может составлять от нескольких нанометров до единиц микрон [2]. Такие покрытия могут удовлетворять гамме высоких, зачастую противоречивых требований. Слоистая структура позволяет поднять твердость покрытий, существенно снизить уровень остаточных напряжений и улучшить их структуру. Весьма важным свойством многослойных образований структуры является увеличение ударной вязкости из-за подавления межфазными границами развития трещинообразования. Однако эффективность многослойных покрытий существенным образом зависит от четкой границы между слоями. Такую задачу возможно решить при использовании слоев в составе покрытия с различной структурой, например, чередованием монослойных слоев со столбчатой структурой и многокомпонентных нитридов с наноразмерной структурой. В этом случае каждый слой представляет собой самостоятельное керамическое покрытие со своим набором положительных свойств,

не присущих другим слоям. В совокупности они должны обеспечить набор требуемых характеристик для покрытия, применяемого на инструменте (высокие твердость и ударную вязкость, низкую шероховатость, термодинамическую стойкость).

Целью настоящей работы является разработка архитектуры многослойных покрытий системы Ti-Cr-N с чередующимися слоями, обладающих различными механическими свойствами (микротвердость, модуль упругости), формируемых методом вакуумно-дугового осаждения.

Для повышения эксплуатационных свойств изделий, работающих в условиях высоких механических нагрузок и под воздействием коррозионных сред предложено формирование двухслойных покрытий, что должно привести к снижению уровня остаточных напряжений в покрытии и повышению их эксплуатационных свойств.

Для получения покрытий в работе использовали двухкатодную установку нанесения упрочняющих покрытий, оснащенную системой магнитной сепарации плазменного потока [3]. В данной конструкции потоки плазмы от различных источников смешиваются и конденсируются на подложке синхронно, что актуально при синтезе многокомпонентных соединений. Для получения покрытий были использованы катоды титана марки ВТ1-0 и хрома, реакционным газом являлся азот чистоты 99,98. В результате эксперимента была получена серия экспериментальных образцов двухслойных покрытий TiN-(Ti-Cr-N) толщиной 1-4 мкм с различным соотношением толщин слоев на подложках из кремния для структурных исследований, твердого сплава для исследования механических свойств и трибологических испытаний, а также нержавеющей стали для коррозионных испытаний. Исследования полученных образцов проводили методами рентгеновской дифракции, микроскопии и испытаниями физико-механических свойств.

Методом растровой электронной микроскопии определено, что в структуре двухслойных покрытий на основе системы Ti-Cr-N вне зависимости от технологических параметров осаждения наблюдается четкая граница между переходным слоем титана, слоем TiN со столбчатой структурой и многокомпонентным слоем Ti-Cr-N с дисперсной структурой (рис. 1).

Исследованиями установлено, что увеличение толщины верхнего слоя Ti-Cr-N приводит к снижению периода кристаллической решетки и повышению микротвердости двухфазных покрытий TiN-(Ti-Cr-N) всех толщин от 1 мкм до 4 мкм, что, вероятно, связано с ростом

объемной доли в покрытии твердого раствора Ti-Cr-N с нанокристаллической структурой. Наибольшие значения микротвердости (40 ГПа) имеют двухслойные покрытия TiN-(Ti-Cr-N) общей толщиной 3 мкм при соотношении толщин слоев TiN и Ti-Cr-N 1 мкм и 2 мкм, соответственно. При этом двухслойные покрытия TiN-(Ti-Cr-N) общей толщиной 1–4 мкм характеризуются ростом адгезионной прочности при равных толщинах слоев TiN и Ti-Cr-N либо большей толщине нижнего слоя TiN. Причем, увеличение общей толщины покрытия до 4 мкм приводит к значительному снижению силы адгезионного разрушения.

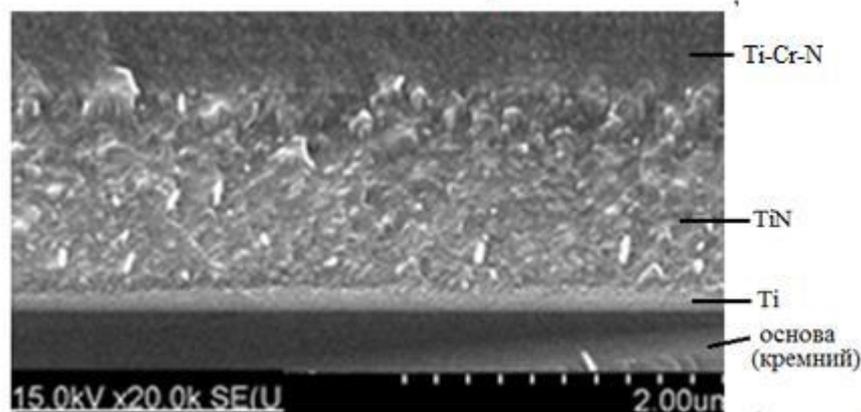


Рис. 1 - Фрактограмма двухслойного покрытия

Анализ приведенных результатов показывает, что для обеспечения оптимального соотношения твердости и адгезии двухслойных покрытий системы Ti-Cr-N необходимо, чтобы общая толщина покрытий не превышала 2–3 мкм, а соотношение толщины верхнего (Ti-Cr-N) и нижнего (TiN) слоев составляло 1:2.

Для улучшения износо- и коррозионной стойкости многослойных покрытий при упрочнении режущего инструмента предлагается архитектура покрытий, включающая последовательно чередующиеся слои нанометровой толщины (30–200 нм) на основе титана и его тугоплавких соединений в количестве от 4 до 50 (рис. 2). Идея такой архитектуры состоит в том, что при прикладывании к поверхности покрытия нормальной силы многослойная архитектура покрытия с чередующимися слоями различной твердости, модулем упругости будет способствовать снижению максимального напряжения при изгибе, пластической деформации твердых слоев, особенно в условиях циклических нагрузок и усталости. Чередование слоев TiN и Ti-Cr-N различной структурированности позволит снизить напряжения, как на границах слоев, так и покрытия в целом. Увеличение количества слоев приведет к росту протяженности

межфазных границ и, следовательно, к торможению процесса разрушения в покрытии, что в совокупности позволит повысить эксплуатационные характеристики инструмента – стойкость при работе в условиях ударных нагрузок и деформаций.

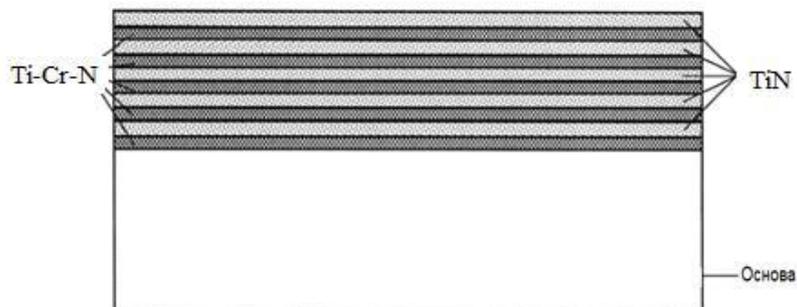


Рис. 2 - Схема многослойного покрытия

Выбор толщины слоев многослойного покрытия в интервале 30–200 нм обусловлен тем, что при толщинах менее 30 нм формируемое покрытие с учетом шероховатости поверхности основы не всегда будет сплошным, что не позволит обеспечить требуемые свойства покрытия. Толщина более 200 нм может быть нецелесообразной в связи с возможностью заметного роста размеров зерна покрытия, приводящего к увеличению внутренних напряжений и снижению эксплуатационных характеристик покрытия в целом.

Вывод: Предложена архитектура многослойных наноструктурных покрытий TiN-(Ti-Cr-N) с высоким уровнем микротвердости (до ~35 ГПа) и эксплуатационных свойств режущего инструмента за счет увеличенной протяженности межфазных границ в многослойном покрытии и повышенной энергии межатомной связи в многокомпонентном слое Ti-Cr-N.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта БРФФИ № T23RHFM-012.

Список использованных источников

1. Инженерия вакуумно–плазменных покрытий / Азаренков Н.А. [и др.]. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2011. –343 с.
2. S. Latushkina , D. Kuis , O. Posylkina , A. Kasperovich , E. Panin Synthesis of Al-Ti-Fe-Cr-Ni-N protective coatings by the method of vacuum-arc deposition from a separated vacuum flow // Materials Letters 303 (2021) 130527.
3. Latushkina, S., Posylkina, O., Kuis, D., Joglik, I., Sechko, I., Gordienko, D., Rakovets, A., Panin, E., Lezhnev, S. Formation of Corrosion-Resistant Nitride Coatings Based on Ti–Al–Cr–Fe–Ni High-Entropy Alloy // Steel Research International, 2024, 2300691, 6 p.