

данного параметра для немодифицированного твердого сплава ВК8. Более высокое содержание ИА в композите на основе сплава ВК8 (до 25 об. %) приводит к уменьшению его износостойкости вследствие снижения механических характеристик алмазосодержащего композита.

Л и т е р а т у р а

1. Синтез и спекание сверхтвердых материалов для производства инструмента / под общ. ред. П. А. Витязя и В. З. Туркевича. – Минск : Беларус. навука, 2021. – 337 с.
2. Синтез наноструктурного алмаз-лонсдейлитного инструментального композита для абразивной обработки / П. А. Витязь, В. Т. Сенюць, В. И. Жорник [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. ОИМ НАН Беларуси, 2019. – Вып. 8. – С. 352–356.

УДК 621.793

МНОГОСЛОЙНЫЕ НИТРИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ «ТИТАН–ХРОМ»

О. И. Посылкина, И. А. Сечко

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск

Технология вакуумно-дугового осаждения покрытий является перспективной для формирования покрытий различного функционального назначения, соответствующих новейшим концепциям градиентных, метастабильных, многокомпонентных, многослойных покрытий. Среди основных направлений совершенствования функциональных покрытий наиболее многообещающим является концепция многослойных покрытий с наноразмерными зёрнами и толщинами слоёв, так как такие покрытия удовлетворяют гамме зачастую противоречивых требований (обеспечение низкого трения, высокой износостойкости, барьерных функций диффузии, тепловым потокам в системе резания при соблюдении высокой прочности межслойной адгезии, снижении уровня внутренних напряжений, сбалансированности твердости и вязкости и т. д.). Кроме того, появляется возможность формирования комбинированных покрытий, включающих чередующиеся метастабильные и многокомпонентные структуры, сочетающие различные свойства отдельных слоёв в одном покрытии. Для многослойно-композиционных наноструктурированных покрытий межзёрненные и межслойные границы являются зоной интенсивной диссипации энергии и отклонения трещин от направления движения, частичного или полного их торможения, что ведет к упрочнению материала. Поэтому покрытия с наноразмерной структурой и многослойной архитектурой имеют существенно более длительный срок работы до разрушения, максимально повышая срок работоспособного состояния инструментов, особенно в условиях действия циклических термо-механических напряжений [1, 2].

На основе анализа механизма разрушения покрытий в процессе работы режущего инструмента [3], многочисленных экспериментальных и теоретических исследований разрабатывалась конструкция многослойного покрытия, включающего адгезионный подслоя, промежуточный слой и защитный слой (износо-, коррозионностойкий).

Адгезионный подслоя должен иметь максимальную кристаллохимическую совместимость и обеспечивать прочную адгезию с материалом подложки. Промежуточный слой должен сглаживать различие кристаллохимических свойств верхнего и нижнего слоёв. При этом промежуточный слой должен иметь большую твердость по сравнению с выше- и нижележащими слоями. Защитный слой должен иметь мини-

мальную совместимость кристаллохимических свойств с обрабатываемым материалом, максимальную сопротивляемость изнашиванию и коррозионному разрушению. Причем каждый из этих слоев может иметь многослойную структуру либо возможно чередование «мягких» и «твердых» слоев, что обеспечит снижение уровня напряжений в покрытии, высокую трещиностойкость, что будет способствовать повышению сопротивляемости покрытия хрупкому разрушению.

В данной работе разработана архитектура композиционного нитридного покрытия на основе системы «титан–хром» (рис. 1). Исходя из концепции чередования «мягких» и «твердых» слоев, в качестве адгезионного слоя был выбран титан, следующий за ним нитрид титана предлагался для снижения тепловых и упругих напряжений, в качестве «твердого» слоя был выбран (Ti, Cr)N с концентрацией хрома 20 %. Также предлагалось вводить внешний менее твердый слой (Ti, Cr)N с содержанием хрома около 15 % для повышения трещиностойкости композиционного покрытия. Технологически это решалось уменьшением тока дуги хромового катода в процессе вакуумно-дугового осаждения.

Также был рассмотрен вариант плавного наращивания концентрации хрома в промежуточном «твердом слое» путем введения переходного слоя (Ti, Cr)N (15 ат. %).

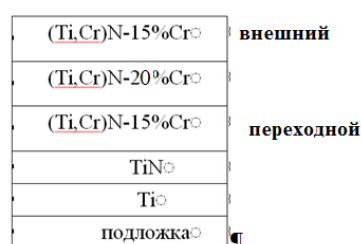


Рис. 1. Архитектура нитридного покрытия на основе системы «титан–хром»

Суммарная толщина слоев титана и нитрида титана была постоянной и составляла 0,5 мкм. Для оптимизации архитектуры покрытия варьировались толщины (Ti, Cr)N с различной концентрацией хрома. Результаты исследований приведены в таблице.

Микротвердость и стационарный электродный потенциал композиционных покрытий на основе системы «титан–хром»

Толщина слоя (Ti, Cr)N – 15% Cr, мкм (переходной)	Толщина слоя (Ti, Cr)N – 25% Cr, мкм	Толщина слоя (Ti, Cr)N – 15% Cr, мкм (внешний)	H, ГПа	φ, мВ
–	1,0	0,5	40,0	–320
0,1	0,5	0,9	39,0	–300
0,3	0,5	0,7	37,7	–235
	0,6	0,6	37,2	–225
	0,7	0,5	38,9	–250

Согласно электрохимической теории коррозии стационарный электродный потенциал системы является не только характеристикой ее коррозионной стойкости, но и откликом на напряженное состояние последней. Как показали проведенные исследования, необходимым условием обеспечения высоких защитных свойств является формирование промежуточного (между TiN и (Ti, Cr)N – 25 % Cr) слоя (Ti, Cr)N–15 % Cr,

причем толщина его должна быть 0,3 мкм. Смещение в отрицательную область электродного потенциала композиционного покрытия с увеличением толщины «твердого» слоя свидетельствует о нарастании уровня внутренних напряжений в покрытии.

Таким образом, как показали проведенные исследования, для снижения уровня внутренних напряжений в многослойных покрытиях необходимо формирование слоя (Ti, Cr)N с градиентом концентрации хрома.

Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ № T23РНФМ-012.

Литература

1. Multilayer Coatings for Tribology: A Mini Review / Liu Yanfei, Yu Shengtao, Shi [et al.] // *Nanomaterials*. – 2022. – N 12. – P. 1388.
2. Mechanical properties and the level of internal stresses of multilayer ion-plasma coatings Ti-TiN and Ti-TiVN for parts made of titanium alloys / A. M. Smyslov, Yu. M. Dyblenko, K. S. Selivanov [et al.] // *Vestnik UGATU*. – 2019. – Vol. 23. – № 4 (86). – P. 42–498.
3. Парфенов, В. Д. Износоразрушение покрытия инструмента в процессе резания / В. Д. Парфенов, Е. К. Толмачева // *Нефть и газ*. – 2015. – С. 121–123.

УДК 678.5.046:546.26

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В. М. Шаповалов¹, К. В. Овчинников¹, М. А. Коваленко¹, А. М. Валенков²

¹*ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель*

²*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»,
г. Гомель*

Широкое применение при создании приборов, оборудования, конструкционных изделий, металлических сооружений находят защитные полимерные покрытия, отличающиеся разнообразием свойств в зависимости от назначения и условий их эксплуатации [1]. Окраска изделий порошковыми красками – современная технология получения качественных защитно-декоративных покрытий, обеспечивающая экономические и экологические преимущества по сравнению с жидкими лакокрасочными материалами. Нанесение покрытий осуществляется с помощью распыления порошка в электростатическом поле с последующим спеканием по технологическим режимам, специально подобранным для данного типа краски и обрабатываемого металлоизделия. В современном полимерном материаловедении ведутся работы по созданию новых композиционных составов для получения покрытий триботехнического назначения. В то же время формирование такого рода покрытий и их эксплуатация в условиях высоких нагрузок и знакопеременных температур требуют проведения работ по улучшению их деформационно-прочностных свойств. Одним из способов, обеспечивающих повышение данных свойств материала, является использование порошкообразных термопластов, в частности, полиамидов с введением в полимерную матрицу ультрадисперсных наполнителей [2].

Цель работы – исследование влияния ультрадисперсных частиц структурированного углерода на деформационно-прочностные и триботехнические свойства покрытий на основе полиамида-6.

В качестве полимерного связующего применяли порошкообразный полиамид-6 с размером частиц не более 200 мкм, полученный криогенным измельчением гранулированного продукта производства ОАО «ГродноХимволокно». В качестве напол-