



УДК 621.793.12

ЭРОЗИОННОСТОЙКИЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ КАРБИДА И НИТРИДА ТИТАНА С ПЛАСТИЧНЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ*

Е. В. Дабижа, А. А. Лещук, И. В. Бондарь, Н. Н. Борисова

Обоснованы перспективы использования ионно-плазменных способов для нанесения износо- и эрозионностойких многослойных защитных покрытий. Показано, что способы микроэлектродугового плазменного вакуумного и магнетронного вакуумного напылений, которые относятся к данной группе, являются наиболее многофункциональными. Приведены результаты модернизации вакуумной установки ВУ-700«Д»(М), в которой смонтированы три периферийных источника микроэлектродугового и один источник магнетронного распыления. Разработаны новые технологические и аппаратные решения, позволяющие наносить защитные эрозионностойкие многослойные покрытия общей толщиной до 30 мкм на компрессорные лопатки газотурбинных двигателей. Исследовано влияние толщины мягкой кобальтовой прослойки и температуры процесса осаждения на критическую толщину многослойных покрытий из карбида и нитрида титана, а также нанотвердость данных покрытий.

Prospects of application of ion-plasma methods for deposition of wear- and erosion-resistant multi-layer protective coatings are grounded. It is shown that the methods of micro electric arc plasma vacuum and magnetron vacuum coating depositions, which refer to the given group, are most multi-functional. Results of updating the vacuum installation VU-700«D»(M), in which three periphery sources of micro electric arc deposition and one source of magnetron sputtering are mounted, are given. New technological and hardware solutions have been developed, allowing deposition of protective erosion-resistant multi-layer coatings of total thickness of up to 30 m on compressor blades of gas turbine engines. The effect of thickness of a soft cobalt interlayer and temperature of deposition process on critical thickness of multi-layer coatings of carbide and titanium nitride, as well as on nanohardness of the mentioned coatings was investigated.

Ключевые слова: защитное износостойкое покрытие; плазменно-дуговой способ нанесения покрытий; магнетронное распыление; карбид и нитрид титана; лопатка; газотурбинный двигатель; износостойкость; эрозионная стойкость; пластичная прослойка; кобальт

Применение покрытий является одним из прогрессивных способов модификации поверхности деталей и улучшения их поверхностных свойств в машино- и приборостроении, повышения эксплуатационных характеристик инструмента, важным звеном во многих технологических циклах создания новых материалов. В связи с этим развитию способов и технологий нанесения покрытий и их всестороннему изучению уделяется особое внимание.

В настоящее время разработано большое количество способов нанесения покрытий, реализованных в ряде вакуумных установок, которые предназначены для осаждения покрытий из различных материалов на разнообразные изделия.

Среди всех современных способов получения покрытий наиболее многофункциональными и перспективными признаны способы нанесения пок-

крытий в низкотемпературной газоразрядной плазме, создающие, помимо пара металла, ионизированные частицы, которыми можно управлять с помощью электрического и магнитного полей. По сравнению с более энергоемкими способами термического и электронно-лучевого испарения, указанные позволяют более эффективно (т. е. с меньшими затратами энергии и реагентов) выполнять диспергирование материалов в атомарное, молекулярное, кластерное состояние и осуществлять их осаждение на поверхность изделий в виде тонких (до 10 мкм) функциональных, вспомогательных или декоративных покрытий [1].

При ионно-плазменном нанесении покрытий высокая адгезия их к основе обеспечивается физико-химическим взаимодействием потока плазмы с поверхностью подложки, которая находится под заданным потенциалом, в связи с чем наряду с конденсацией происходит ионная бомбардировка поверхности детали и ее активирование, а в результате этого — интенсивное внедрение в поверхностный слой подложки атомов требуемого материала.

* Статья подготовлена по результатам выполнения комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций сооружений и машин» (2007–2009 гг.).



К ионно-плазменным способам нанесения покрытия относятся магнетронное распыление, микроэлектродуговое испарение (распыление) и активированное реактивное испарение [2–4]. Наиболее перспективны в этой группе первые два способа. Последний является модификацией термического испарения, что расширяет его возможности, но полностью не устраняет имеющиеся недостатки.

Основные преимущества указанных способов нанесения покрытия обусловлены физическими принципами, лежащими в основе их реализации. Возможность распыления (испарения) материала из твердой фазы или зоны частичного расплавления позволяет отказаться от дорогостоящих испарительных элементов, изготовленных, как правило, из тугоплавких дефицитных материалов. Отсутствие испарительных элементов с ограниченным сроком службы и сравнительно небольшой загрузкой позволяет резко увеличить скорость роста покрытия и его толщину, а также общую поверхность покрываемых деталей. Возможность наращивания толстых слоев покрытия является определяющим условием для использования указанного способа при нанесении толстых эрозионностойких покрытий на различные изделия.

Распыление ионами материала катода или его взрывное микроиспарение открывают путь к созданию покрытий в виде сплава с сохранением стехиометрического состава исходного материала, а введение химически активного газа — к получению химических соединений. Благодаря наличию ионной составляющей в распыляемом материале появляется возможность ее ускорения при подаче на подложку с отрицательным потенциалом. В связи с этим на подложке происходят процессы активации поверхностных атомов, способствующие увеличению адгезии покрытия к подложке, распыления атомов с ее поверхности (ионное травление) и имплантации ионов.

Габариты систем ионно-плазменного распыления можно изменять в широких пределах, что позволяет наносить покрытия на изделия различных размеров, при этом достигается высокая воспроизводимость результатов и относительная простота управления процессом распыления.

Как известно, способ микроэлектродугового испарения с ионной бомбардировкой основан на инициировании микроэлектродугового разряда в вакууме на поверхности катода и образовании таким образом катодных пятен, имеющих исключительно высокие значения плотности и температуры [5–7].

Выделение большой мощности обусловлено бомбардировкой зоны катодного пятна ионами распыляемого материала. Благодаря высокой температуре и ионной бомбардировке в состав продуктов эрозии катода в зоне пятна входят капли расплавленного металла, атомы и ионы. Размер капель и их количество определяются теплофизическими свойствами материала катода и током дугевого разряда [5].

Как показано в работе [8], расход массы катода в ионной фазе на единицу переносимого заряда для данного материала является величиной постоянной, в то время как эрозия катода в капельной фазе (в каплях) зависит от технологических условий и увеличивается с ростом заряда, переносимого через единицу площади (ток микроэлектродугового разряда).

Испускаемые катодом капли в процессе их переноса от катода к подложке дополнительно нагреваются за счет бомбардировки их поверхности ионами и, испаряясь, служат основным источником нейтрального пара в объеме разрядного промежутка. При этом, если распыляется сплав, в состав которого входят металлы, имеющие существенное отличие от упругости пара, то испарение более летучего компонента происходит с большой скоростью, что приводит к изменению состава как капли, так и осаждаемого покрытия, по сравнению с составом материала катода [5].

В процессе бомбардировки испаряющегося пара ионами происходит также дополнительная ионизация его атомов, в результате чего доля ионов составляет 30...50 % общего потока, конденсируемого на поверхности изделия [8].

При подаче реакционного газа (азота, метана или кислорода) в разрядный промежуток происходит его взаимодействие с продуктами распыления металла катода и осаждение покрытия в виде соединений (нитридов, карбидов или оксидов переходных металлов), которые имеют высокую твердость, прочность и могут служить в качестве защитных износ- и эрозионностойких покрытий на различных изделиях.

Реализация процессов микроэлектродугового реактивного распыления достигается простыми способами при использовании в качестве источника питания стандартных сварочных выпрямителей, что является значительным преимуществом данного способа, по сравнению с другими [4]. Однако этот способ имеет и существенные недостатки, например наличие капельной фазы в покрытии.

Способ магнетронного распыления не имеет указанного недостатка, поскольку осаждение у него происходит в виде атомов распыляемого материала (частично в виде его ионов). Магнетронная распылительная система — это модификация широко известных систем диодного распыления. Кроме положительных свойств диодного распыления, магнетронное имеет свои преимущества: высокую скорость конденсации материалов; уменьшение загрязнений конденсатов газовойми включениями; снижение температуры разогрева подложки в процессе осаждения покрытия.

Физической основой магнетронной распылительной системы является самостоятельный аномальный тлеющий разряд в разреженном газовом пространстве в скрещенных электрическом и магнитном полях. Магнитная система создает над поверхностью катода магнитное поле арочной конфигурации напряженностью 0,03...0,13 Тл [3].

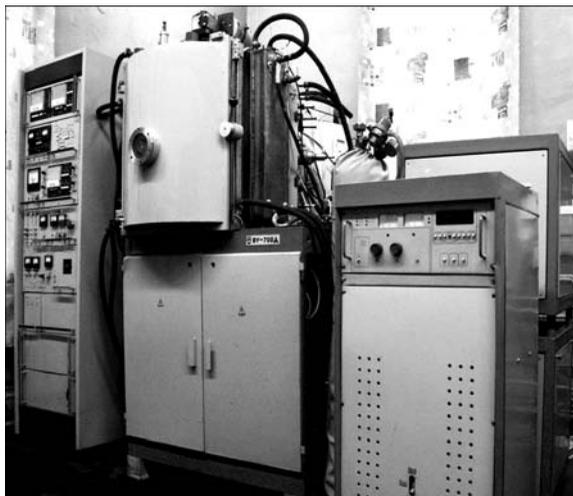


Рис. 1. Общий вид модернизированной вакуумной установки ВУ-700«Д»(М)

Имеющиеся в этой зоне электроны совершают сложное циклоидальное движение и при столкновении с молекулами газа ионизируют их, создавая положительные ионы, которые ускоряясь в электрическом поле, бомбардируют поверхность мишени-катода и выбивают из нее частицы материала.

При бомбардировке поверхности катода ионами распыляющего газа проявляются два основных эффекта – вторичная электронная эмиссия и ионное распыление мишени катода. Вторичная эмиссия электронов служит для поддержания разряда, а распыленные атомы конденсируются на подложке в виде покрытия.

Наличие концентрированной зоны плазмы в прикатодном пространстве позволяет получить более высокие, чем при диодном распылении, плотность ионного тока и скорость распыления, что связано с изменением механизма распыления от прямого соударения при бомбардировке ионами для диодного распыления до механизма распыления пиков для магнетронного распыления [9]. Для последнего, в отличие от механизма распыления прямым соударением, характерна линейная зависимость скорости осаждения от мощности магнетронного разряда, что позволяет легко автоматизировать

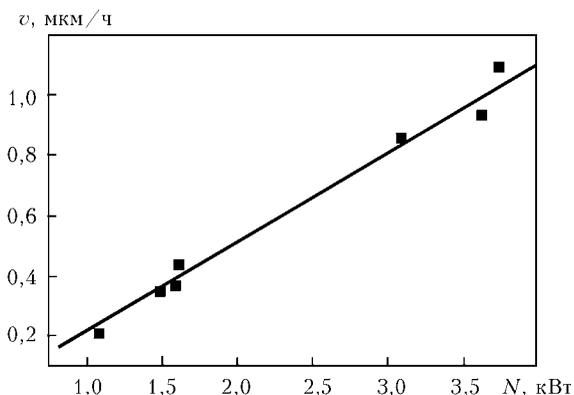


Рис. 2. Зависимость скорости v осаждения титана от мощности N , прикладываемой к магнетрону с косвенным охлаждением мишени-катода

Таблица 1. Состав износостойких покрытий и их свойства

Состав покрытий	Микротвердость, ГПа	Стойкость к окислению при наибольшей температуре на поверхности, °С	Коэффициент трения
TiN	19,3...22,0	600	0,50
TiC	28,0...30,0	400	Нет данных
TiCN	30,0	400	0,40
TiAlN	30,0...35,0	540	0,40
TiAlCrN	35,0	920	0,40
TiAlCrYN	27,0	950	Нет данных
CrN	16,5...21,5	700	0,50
Al ₂ O ₃	21,0...30,0	1200	Нет данных
ZrN	28,0	600	0,60
MoS ₂	15,0	–	0,02
WC/C	15,0	300	0,20

подачу реакционного газа при осаждении покрытий в виде химических соединений распыляемого металла и реакционного газа.

В качестве рабочего газа в магнетронных распылительных системах обычно используют аргон в режиме постоянного тока. Эти системы работают при давлении аргона от 0,01 до 100 Па и напряжении разряда 300...800 В [3].

Магнетронные распылительные системы позволяют получать покрытия практически из любых металлов, сплавов и полупроводниковых материалов без нарушения стехиометрического состава, что делает их весьма перспективными для применения в ряде областей науки и техники.

Наличие у этого способа ловушки для электронов, образующейся в скрещенных магнитных и электрических полях, обеспечивает высокую степень ионизации атомов газа. В связи с этим введение в разрядный газовый объем дополнительно реакционных газов (азота, метана, кислорода) в результате высокой степени их ионизации и активации позволяет получать пленки соединений переходных металлов (нитридов, карбидов и оксидов).

Наиболее распространенные составы защитных износо- и эрозионностойких покрытий и их свойства приведены в табл. 1 [10].

Для реализации вакуумных технологий нанесения покрытий использована модернизированная вакуумная установка Сморгонского завода оптического станкостроения ВУ-700«Д»(М), Беларусь, общий вид которой представлен на рис. 1.

Базовая установка представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру диаметром и высотой по 700 мм, на левой стенке которой в кармане смонтирован магнетрон с косвенным охлаждением мишени, а на правой находится электрод для очистки поверхности напыляемых изделий в косвенном тле-

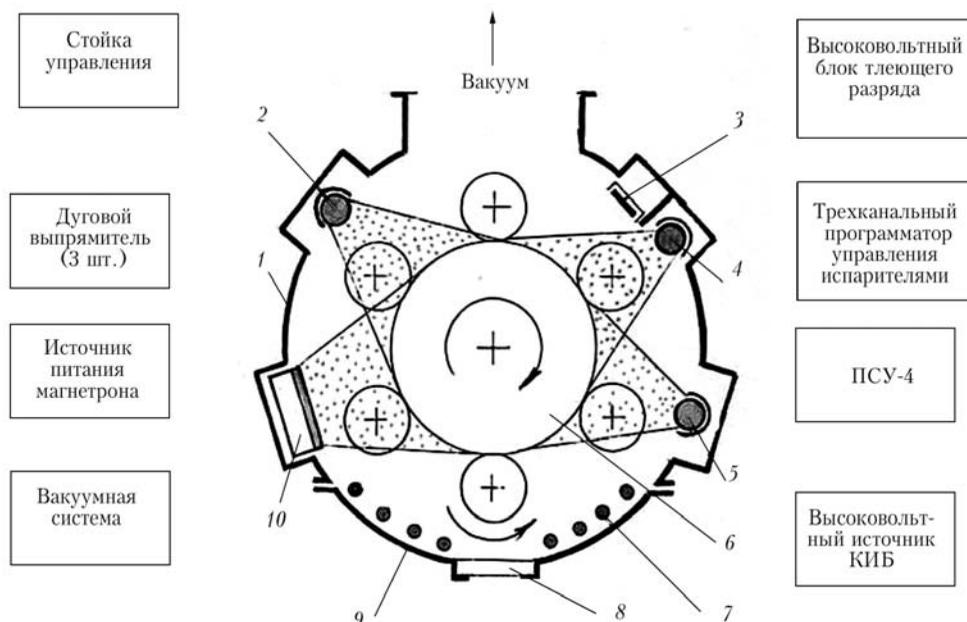


Рис. 3. Блок-схема модернизированной установки ВУ-700«Д»(М): 1 – вакуумная камера; 2, 5 – дуговые испарители (с титановым катодом); 3 – электрод косвенного тлеющего разряда; 4 – дуговой испаритель (с кобальтовым катодом); 6 – удерживающая оснастка двойного планетарного вращения; 7 – электронагреватель; 8 – смотровая система; 9 – дверь; 10 – магнетрон

ющем разряде. На верху камеры расположен вакуумный ввод вращения, на котором смонтирована шестипозиционная удерживающая оснастка двойного планетарного вращения изделий длиной до 500 мм и диаметром до 140 мм для экспонирования их поверхностей в паровом потоке.

Характеристики данной распылительной системы исследовали при реализации процесса распыления мишени из титана (рабочее давление аргона составляло 0,08 Па). Зависимость скорости осаждения титанового покрытия от подводимой к магнетрону мощности показана на рис. 2.

Как видно из рисунка, скорость осаждения покрытия представляет собой линейную зависимость от прикладываемой мощности. При мощности $N = 3,5$ кВт косвенное охлаждение мишени уже не справляется с ее охлаждением, а при выключении питания магнетрона в камере видно слабое малиновое свечение мишени катода.

Исследование скорости осаждения при большей мощности проводили при циклическом включении магнетрона (по 5 мин работы и остывания мишени магнетрона). Как показали результаты исследования, увеличение мощности, подводимой к магнетрону, более 3,5 кВт способствует еще большему разогреву мишени и некоторому ее короблению, что приводит к ухудшению охлаждения и увеличению разогрева мишени.

При разогреве мишени до температуры более 700 °С происходит снижение эффективности распыления атомов титанового катода атомами аргона. Поскольку скорость осаждения покрытия 0,9 мкм/ч не решает задачи по наращиванию толстых многослойных эрозсионстойких покрытий, потребовалась разработка магнетрона с прямым водяным охлаждением мишени-катода и модернизация вакуумной ка-

меры установки для введения дополнительных испарительных и распылительных систем.

На рис. 3 представлена блок-схема модернизированной установки ВУ-700«Д»(М). Как видно из рисунка, модернизированная установка оснащена нагревательными элементами, которые смонтированы на двери. Нагреватели закрытого исполнения предназначены для прогрева камеры и изделий в вакууме перед нанесением покрытий и поддержания температуры в процессе осаждения покрытий.

Общая мощность нагревателей составляет 5 кВт. На левой стороне цилиндрической стенки вакуумной камеры имеется «карман», в котором смонтирован линейный модернизированный магнетрон с прямым охлаждением мишени-катода.

Схема сборки катодного узла модернизированного магнетрона с прямым охлаждением мишени-катода представлен на рис. 4.

Общий вид модернизированного магнетрона представлен на рис. 5. Размер его мишени-катода составляет 145×520 мм. Из рисунка видно, что

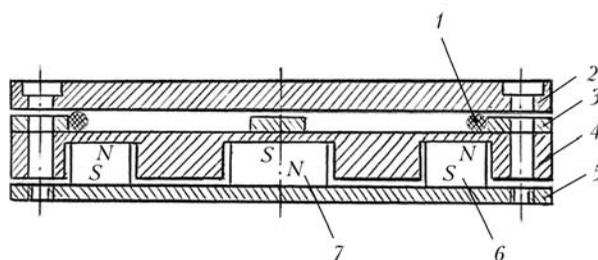


Рис. 4. Схема сборки катодного узла модернизированного магнетрона с прямым охлаждением мишени-катода: 1 – резиновый валик вакуумного уплотнения; 2 – мишень-катод; 3 – медная пластина водяного охлаждения; 4 – медный сепаратор для магнитов; 5 – нижний «башмак» магнитной системы; 6, 7 – соответственно периферийные и центральные магниты магнетрона



Рис. 5. Общий вид модернизированного магнетрона с прямым охлаждением мишени-катода

длина зоны распыления немного меньше длины мишени-катода (460 мм).

Зависимость скорости осаждения титанового покрытия от прикладываемой к магнетрону мощности для модернизированного магнетрона показана на рис. 6. Скорость осаждения покрытия имеет линейную зависимость и при мощности более 5 кВт, что свидетельствует о достаточно эффективном охлаждении мишени. Данная конструкция магнетрона позволяет ему работать при мощности до 10 кВт.

Как видно из рис. 3, в модернизированном варианте установки вакуумная камера имеет три дополнительных водоохлаждаемых кармана, в которых установлены два специально разработанных линейных периферийных дуготрона с титановым катодом и один периферийный с кобальтовым катодом, а также катодный узел для предварительной очистки изделий в тлеющем разряде. Общий вид дуготронов с титановым и кобальтовым катодами представлен соответственно на рис. 7 и 8.

Как показали исследования, упомянутые дуготроны и разработанные для них блоки управления и питания эффективно работают при токе микроэлектродугового разряда 120...200 А. Необходимое

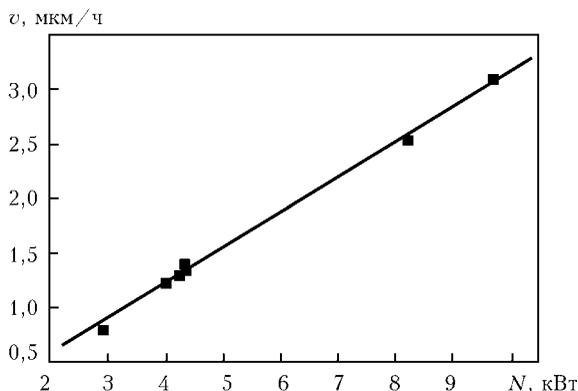


Рис. 6. Зависимость скорости v осаждения титана от мощности N , прикладываемой к магнетрону с прямым охлаждением мишени-катода

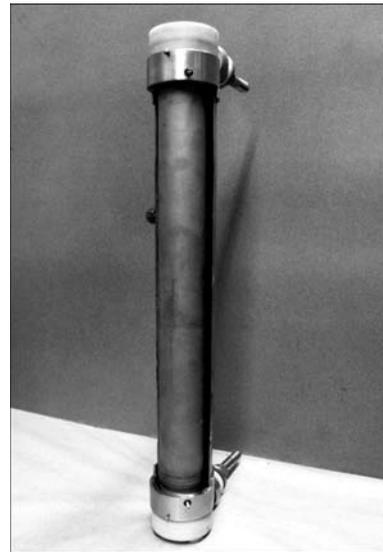


Рис. 7. Общий вид линейного периферийного дуготрона с титановым катодом

охлаждение стенок карманов дуготронов обеспечивается в процессе их работы при токе разряда 200 А. Скорость осаждения покрытия из нитрида титана при токе микроэлектродугового разряда 165 А и работе одного дуготрона составляет 3,1, двух — 6 мкм/ч.

Модернизированная установка укомплектована блоком питания магнетрона большей мощности БПМ-25 с общей мощностью 25 кВт. Для процесса катодной ионной обработки изделий смонтирован дополнительный блок питания общей мощностью 25 кВт, предназначенный для разогрева изделий до 500 °С. Для автоматического смешивания газов (распылителя аргона и реакционного газа) в заданной пропорции при магнетронном реакционном осаждении покрытий установка дополнительно оснащена системой спектрального анализа и автоматического управления напуском газов ПСУ-4.



Рис. 8. Общий вид блока катодного узла тлеющего разряда и дуготрона с кобальтовым катодом



Используя способы микроэлектродугового или магнетронного распыления можно получать различные защитные эрозионностойкие покрытия (табл. 1). Экспериментально доказано, что существует некоторая критическая толщина таких покрытий (5...7 мкм), при достижении которой происходит их разупрочнение и частичное или полное самопроизвольное разрушение после охлаждения до комнатной температуры, что вызвано высоким уровнем внутренних напряжений, возникающих вследствие различия коэффициента термического расширения материалов покрытия и подложки [11].

Получение толстых покрытий из карбида или нитрида титана способом микроэлектродугового вакуумного ионно-плазменного испарения затруднено, поскольку происходит их отслоение от подложки. Указанный способ нанесения покрытий обеспечивает эффективную очистку поверхности детали ионами высокой энергии, а также параллельно ее разогрев и активацию, что способствует высокой прочности адгезии покрытия к подложке.

Для уточнения природы отслоения покрытий от подложки на поверхность образца из стали X18H9T размером 20×10×1,5 мм наносили суспензию из графита, смешанную с ацетоном. После высыхания на образце оставался тонкий слой дисперсного графита, который при осаждении на него покрытия должен обеспечивать низкую прочность адгезии покрытия к поверхности образца. На подготовленный таким образом образец наносили покрытие из TiN толщиной 5 мкм. Температура нагрева образца в процессе осаждения покрытия составляла (500±20) °С; после остывания в вакуумной камере при вакууме 0,008 Па образец выгружали. Покрытие отслаивалось от его поверхности путем вздутия сплошной пленки, которая при этом не разрушалась.

Проведенные ранее исследования по нанесению такого покрытия на чистые пластинки из стали X18H9T показали, что покрытие также отслаивалось, но в процессе отслоения от поверхности образца происходило одновременное его разрушение на мельчайшие частички.

Это свидетельствует о том, что полученное покрытие имеет высокую прочность сцепления с поверхностью образца. Нескомпенсированное усилие, необходимое для отрыва и разрушения покрытия на маленькие фрагменты, придает им энергию, с которой они отлетают от поверхности образца.

Усилие отрыва создает напряжения, которые накапливаются в слое покрытия при его прочном сцеплении с поверхностью.

Как было описано выше, при отсутствии адгезии обнаружено только отслоение покрытия без его разрушения. Разрушение покрытия свидетельствует как об уровне напряжений, накопленных в покрытии, так и о прочности адгезии покрытия к подложке. Поэтому удобной комплексной технологической характеристикой, оценивающей проч-

ность сцепления покрытия с подложкой, можно считать критическую толщину слоя покрытия, при которой усилие, дополнительно прикладываемое к поверхности покрытия для его отрыва от подложки, уменьшается настолько, что покрытие самостоятельно отслаивается от подложки. Отслоение, как правило, происходит после остывания образца с покрытием, а иногда и в процессе осаждения, если толщина сформировавшегося покрытия значительно превышает критическое значение.

Нанесение покрытий на тонкие пластинки из нержавеющей стали X18H9T размером 40×10×0,4 мм приводит к их изгибанию, что указывает на наличие значительных напряжений в формируемом слое покрытия.

Как показали исследования, уровень внутренних напряжений в формируемом слое увеличивается с ростом его толщины. Установлено, что напряжения выше у покрытий из нитрида титана, чем из карбида титана, а соответственно, значение критической толщины у нитрида титана ниже. Для наращивания более толстого слоя покрытия используем эффект уменьшения напряжений за счет чередования слоев, у которых толщина значительно меньше критической для данного материала и условий, с тонкими прослойками из пластичного материала [12]. Все это учитывали при формировании многослойных покрытий из этих материалов с мягкой прослойкой.

В модернизированной установке ВУ-700«Д»(М) разработаны новые технологические и аппаратурные решения, позволяющие наносить защитные эрозионностойкие многослойные покрытия. С учетом критической толщины покрытия из карбида или нитрида титана расчетная толщина слоев в многослойном покрытии из карбида титана составляла 3,4, а из нитрида титана — 2,9 мкм.

Как показали проведенные нами исследования, в качестве мягкой прослойки могут служить тонкие слои из стали X18H9T или кобальта, хотя последний является более эффективным материалом прослойки.

Проведены исследования влияния толщины прослойки кобальта на критическую толщину многослойного покрытия Co/TiC. В качестве образцов использовали пластинки размером 20×10×1,5 мм из стали X18H9T.

В вакуумной камере пластинки подвергали очистке способом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) при 600 и 1200 В и нагревали при ионной бомбардировке до (400±20) °С. Давление реакционного газа метана CH₄ в процессе осаждения покрытия из TiC составляло (0,18±0,05) Па.

После нанесения каждого слоя покрытия из TiC образец остывал в вакуумной камере при вакууме 0,008 Па до температуры 100 °С, после чего его выгружали и он остывал до комнатной температуры на воздухе.

Если многослойное покрытие после нанесения очередного слоя не отслаивалось, то образец загру-

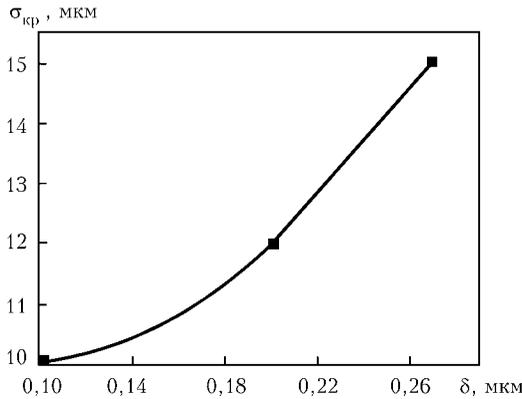


Рис. 9. Зависимость критической толщины $\delta_{кр}$ многослойного покрытия Co/TiC , сформированного при температуре подложки $400\text{ }^\circ\text{C}$, от толщины δ кобальтовых прослоек

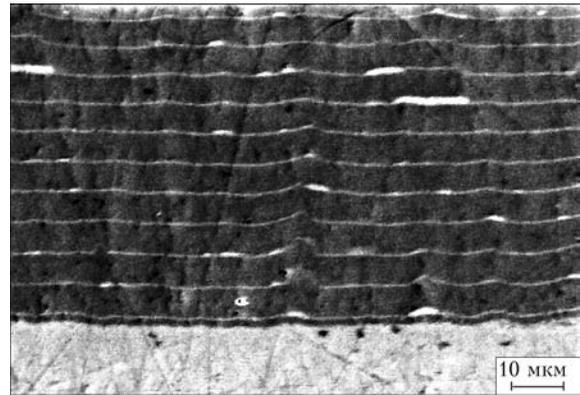


Рис. 11. Типичная микроструктура многослойного покрытия на основе $TiCN$ с пластичными прослойками кобальта (суммарная толщина покрытия $30\text{ }\mu\text{m}$)

жали снова в вакуумную камеру для доращивания очередного слоя. При достижении критической толщины многослойного покрытия обнаружены случаи отслоения и разрушения покрытия от части или всей напыляемой площади. Толщина многослойного покрытия, при которой это происходило, считалась критической.

Зависимость критической толщины многослойного покрытия Co/TiC , сформированного при температуре $(400\pm 20)\text{ }^\circ\text{C}$, от толщины кобальтовых прослоек показана на рис. 9. Как видно из рисунка, с увеличением толщины кобальтовой прослойки критическая толщина увеличивается не линейно, а по нарастающей. При толщине мягкой прослойки $0,27\text{ }\mu\text{m}$ критическая толщина многослойного покрытия Co/TiN составляет $15\text{ }\mu\text{m}$.

Поскольку при данной толщине пластичной прослойки на зависимости, показанной на рис. 9, насыщение не зафиксировано, то в дальнейшем будет представлять интерес исследовать влияние значительно большей толщины прослойки из кобальта на критическую толщину многослойного покрытия.

Проведенные нами исследования показали, что температура, при которой происходит формирование покрытия, является очень важным параметром процесса. Поскольку у покрытия из TiN напряжения в растущем слое нарастают интенсивнее, чем у покрытия из TiC , важно исследовать влияние температуры на формирование многослойного покрытия на

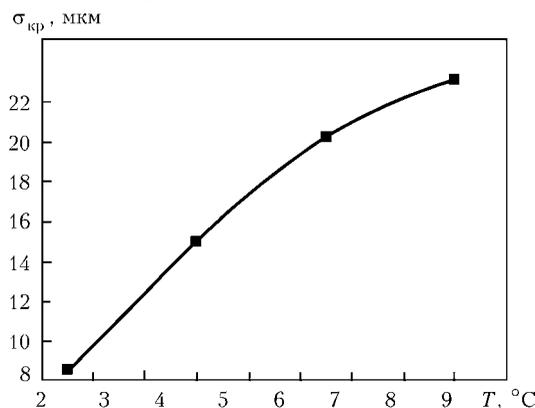


Рис. 10. Зависимость критической толщины $\delta_{кр}$ многослойного покрытия из Co/TiN от температуры подложки, при которой происходит осаждение

основе TiN . Для этого на образцы из стали X18H9T размером $20\times 10\times 1,5\text{ }\text{mm}$ послойно, как и в предыдущих опытах, наносили многослойное покрытие Co/TiN при разной температуре процесса. Толщина слоев из TiN составляла $2,9\text{ }\mu\text{m}$, а прослойки из Co — $0,27\text{ }\mu\text{m}$.

Температура формирования покрытия $300\text{...}500\text{ }^\circ\text{C}$ является очень важной, поскольку именно в данном диапазоне температуры формируются структуры столбчатых или нитевидных кристаллов, которые являются характерными для процессов наращивания покрытий [13, 14]. При более высокой температуре вследствие объемной диффузии атомов образуется структура равноосных зерен, характерная для монолитного материала.

Зависимость критической толщины многослойного покрытия из Co/TiN от температуры подложки, при которой происходит осаждение, показана на рис. 10. Из рисунка видно, что эта зависимость носит нелинейный характер. Наиболее существенное влияние оказывает этот параметр при температуре, близкой к $400\text{ }^\circ\text{C}$. При температуре подложки $450\text{ }^\circ\text{C}$ и выше влияние этого параметра ослабляется. В то же время данная кривая не имеет явно выраженного насыщения при температуре, близкой к $500\text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 2. Физические свойства покрытий из нитрида титана

Покрытие Co/TiC (толщина, мкм)	Модуль упругости, ГПа	Среднее значение модуля упругости, ГПа	Нанотвердость, ГПа	Среднее значение нанотвердости, ГПа
Однослойное (3,4)	384,8	384,8	32,7	32,7
Двухслойное (6,8)	381,2	415,2	33,4	36,3
	421,5		37,1	
Четырехслойное (13,7)	442,8	408,3	38,5	35,8
	408,3		35,8	
Шестислойное (13,7)	364,8	354,2	31,9	30,8
	343,6		29,7	



Исследованы физико-механические свойства многослойных покрытий из Co/TiC. С этой целью, как и в предыдущих исследованиях, использовали пластинки из нержавеющей стали X18H9T размером 20×10×1,5 мм, с нанесенным многослойным покрытием на основе TiC с прослойками из кобальта.

Многослойное покрытие из Co/TiC получили послойным допылением очередного слоя после вскрытия камеры и выгрузки образца с данным количеством слоев для последующих исследований.

Остальные образцы подвергали следующему циклу напыления: очередной слой покрытия из TiC наносили после разогрева образца способом КИБ до (400 ± 20) °С и нанесения на него мягкой прослойки из кобальта. Толщина последней составляла 0,3 мкм, а основного твердого эрозионностойкого слоя из TiC — 3,4 мкм.

На образцах, изготовленных таким образом с разным количеством слоев многослойного покрытия Co/TiC, проводили исследования их нанотвердости. Перед этим верхний слой покрытия из TiC полировали для уменьшения его шероховатости до значений, приемлемых для испытаний на наноинденторе.

Исследования нанотвердости выполняли на установке «Nano Indenter-II, MTS Systems Corporation», Oak Ridge, TN, USA, испытания твердости — на трехгранном инденторе Берковича. После испытаний твердость определяли по глубине отпечатка под нагрузкой, а модуль упругости — по кривой разгрузки.

Результаты исследований нанотвердости и модуля упругости для многослойных покрытий Co/TiC, осажденных при температуре (400 ± 20) °С, приведены в табл. 2.

Типичная многослойная микроструктура показана на рис. 11.

Интересным является факт, что при многослойном нанесении покрытия на основе TiC нанотвердость покрытия в отдельных случаях достигала 38,5 ГПа, что значительно превышает микротвердость аналогичных, но однослойных покрытий. Нагрузка и глубина индентирования покрытия при данных испытаниях соизмеримы с условиями воздействия на него при эрозионном износе, поэтому высокие физико-механические характеристики многослойного покрытия подтверждают эффективность его нанесения на изделия в качестве защитного эрозионностойкого покрытия.

Таким образом, данная модернизированная установка имеет новые технологические и аппаратурные возможности нанесения защитных эрозионностойких покрытий в многослойном варианте общей толщиной 30 мкм и более, в том числе для защиты компрессорных лопаток газотурбинных двигателей от эрозионного износа, что повышает их эксплуатационные характеристики и значительно увеличивает срок службы.

1. Мовчан Б.А., Малащенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — Киев: Наук. думка, 1983. — 232 с.
2. Бессо Ж.Ж. Методы вакуумного нанесения покрытий и их сравнительный анализ // Семинар фирмы «Сит Алкатель» (Москва, 1982 г.). — М., 1982. — С. 15–18.
3. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. — М.: Радио и связь, 1982. — 120 с.
4. Электродуговое распыление металлов и сплавов в вакууме: Обзор // Ю.Н. Андреев, Т.М. Андреева, А.И. Вовси и др. — Рига: ЛатНИИИТИ, 1982. — 45 с.
5. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. — М.: Наука, 1970. — 636 с.
6. Любимов Т.А., Раховский В.И. Катодное пятно вакуумной дуги // Успехи физ. наук. — 1978. — 125, № 4. — С. 665–706.
7. Вакуумные дуги. Теория и приложение / Под ред. Дж. Лаферти. — М.: Мир, 1982. — 428 с.
8. Лунев В.М., Падалка В.Г., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги // Журн. техн. физ. — 1977. — 47, вып. 7. — С. 1491–1495.
9. Бондарь И.В. Закономерности формирования металлизационных покрытий на алмазных порошках при вакуумном напылении: Дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1991. — 100 с.
10. Современные вакуумные технологии получения покрытий // Е. В. Дабига, Н. В. Новиков, Н. Н. Борисова и др. // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 4. — С. 34–40.
11. Properties of titanium based hard coatings deposited by the cathodic arc method / A. Popescu, I. Tudor, V. Braic et al. // J. of Optoelectronics and Advanced Materials. — 2002. — 4, N 1, March. — P. 115–120.
12. Пат. 6804 Украина, МПК С 23 С 14/32. Многослойное износостойкое покрытие, полученное ионноплазменным методом // О.Л. Головченко, В.Е. Дабига. — Оубл. 16.05.2005, Бюл. № 5.
13. Мовчан Б.А., Демчишин А.В. Исследование структуры и свойств толстых вакуумных конденсатов никеля, титана, вольфрама, окиси алюминия и двуокиси циркония // Физ. металлов и металловед. — 1969. — 28, вып. 4. — С. 653–660.
14. John A.Th. Influence of substrate temperature and deposition rate on structure of thick sputtered Cu coatings // J. Vac. Sci. Techn. — 1986. — A4 (6), Nov./Dec. — P. 3059–3065.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. М. Бакуля НАН Украины

Поступила 13.01.2010