

Свойства многокомпонентных многослойных покрытий, полученных вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом

М.В. Савчук, В.В. Денисов, Ю.А. Денисова, А.А. Леонов, В.Н. Тищенко, А. Скоырский, В.М. Савостиков*

Институт Сильноточной Электроники СО РАН, Томск, Россия

**mikhail96@bk.ru*

Аннотация. В данной работе представлены физико-механические и триботехнические свойства однослойных и многослойных покрытий системы TiB/TiBN и TiBCr/TiBCrN. В результате анализа полученных данных было определено, что наибольшее значение микротвердости имеет однослойное покрытие с добавлением хрома TiBCrN. В результате проведения триботехнических испытаний максимальной износостойкостью и наименьшим коэффициентом трения обладают однослойные покрытия с хромом. При испытании фрезы с многослойным покрытием TiCrB/TiCrBN, время эксплуатации режущего инструмента увеличилось в 4 раза по сравнению с фрезой без покрытия.

Ключевые слова: многослойные покрытия, вакуумно-дуговое напыление, снижения коэффициента трения

1. Введение

Одними из приоритетных задач научно-технологического развития России является развитие цифровых и производственных технологий, в том числе разработка новых материалов и способов конструирования. В последние годы большое количество научных коллективов занимается созданием и исследованием методов улучшения свойств поверхности материалов. Одним из способов повышения срока службы изделий является повышение износостойкости материалов, что достигается за счет напыления различных тонкопленочных покрытий [1, 2]. Для нанесения различным тонкопленочных покрытий в плазменных технологиях наиболее часто используется вакуумно-дуговое и магнетронное распыление.

В данной работе используется метод вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения функциональных покрытий. При использовании метода вакуумно-дугового напыления покрытий, в результате эрозии материала катода на поверхности изделия формируются упрочняющее покрытие [3]. В качестве материала катода может использоваться любой электропроводящий материал: металл, сплав, композит на основе металла.

В работе исследуются физико-механические и триботехнические свойства нанокompозитных покрытий системы TiB/TiBN и TiBCr/TiBCrN, а также износ поверхности изделий, в частности для снижения износа штампового инструмента, эксплуатирующегося при относительно высоких, от нескольких сотен градусов Цельсия, температурах. Данные покрытия были выбраны, поскольку должны обеспечивать лучшие физико-механические и триботехнические свойства по сравнению с покрытиями бинарных систем. Перечисленные выше системы отличаются высоким сопротивлением механическому износу, повышенными значениями твердости, высокой термической стабильностью и жаропрочностью.

Данная работа позволяет получить перспективные для повышения износостойкости поверхности штампового инструмента покрытия системы TiB/TiBN, напыленного вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом. Полученное таким образом покрытие позволяет увеличить срок эксплуатации режущей кромки инструмента, что является перспективным для использования в инструментальной и машиностроительной отраслях промышленности.

2. Методы и материалы исследования

2.1. Экспериментальная установка

Общий вид экспериментальной установки представлен на Рис.1. В состав установки входит вакуумная камера, стойка управления, система вакуумной откачки камеры, в которую входит форвакуумный насос и турбомолекулярный насос ТМН-500, 4 источника питания и генераторы металлической и газовой плазмы.

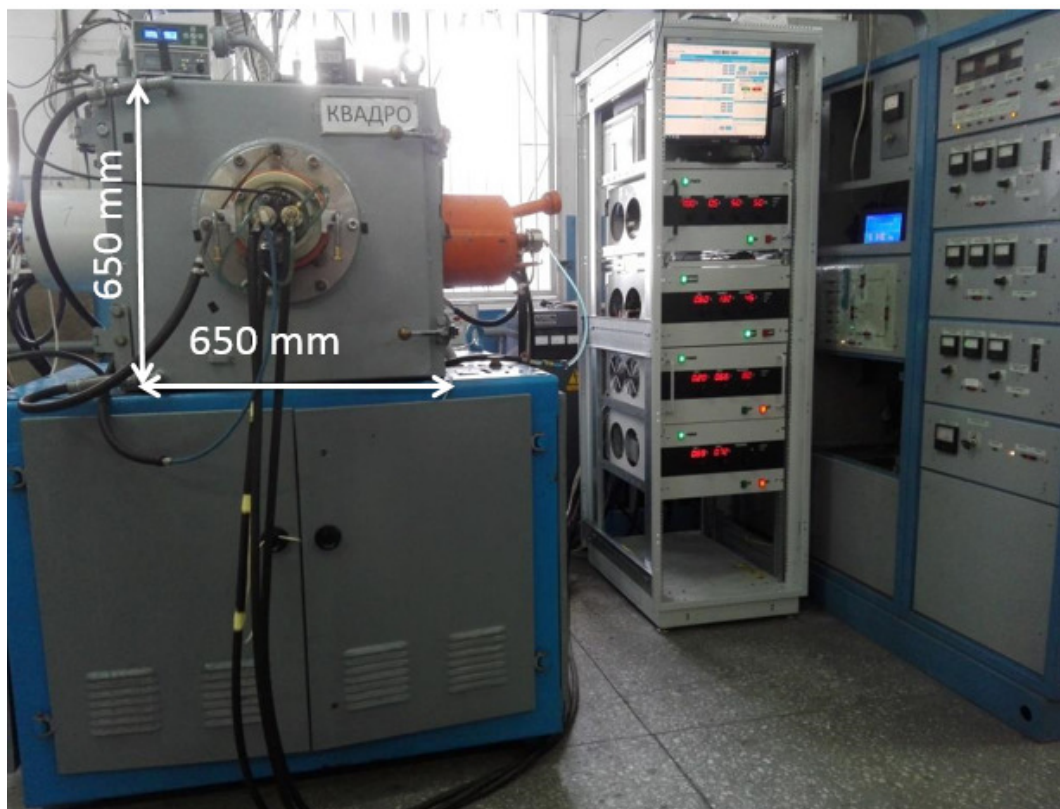


Рис.1. Внешний вид экспериментальной установки.

Вакуумная камера из нержавеющей стали имеет внутренние размеры 650×650×650 мм. В нижней части камеры установлен стол, оснащенный планетарной системой вращения. Поворотное устройство электрически изолировано от стенок вакуумной камеры. Установка имеет систему высоковакуумной откачки на базе турбомолекулярного насоса ТМН-500, систему планетарного вращения деталей, систему напуска двух газов (Ar и N₂).

В эксперименте для генерации потока металлической плазмы использовались электродуговые испарители с цилиндрическим многокомпонентным катодом диаметром 80 мм, представляющим собой соединение титана и бора, полученное методом СВС, и с катодом из Cr (99.8% чистоты). Источник газовой плазмы с накаливаемым и полым катодом «ПИНК» использовался для предварительной очистки поверхности образцов от оставшихся диэлектрических, в том числе оксидных, пленок путём ионного травления газовыми ионами, нагрева подложки, а также дополнительной ионизации газа и ассистирования при напылении покрытий. Для получения требуемого элементного состава нитридных покрытий на основе TiB и Cr подбиралось соотношение токов разряда дуговых испарителей. Покрытия систем TiB, TiBN и TiCrBN синтезировались на образцах из инструментальной штамповой стали X12МФ, а также твердого сплава ВК8 для корректного определения твердости покрытий.

Образцы с размерами 15×15×5 мм, размещались в центре камеры на подложкодержателе на уровне выходных апертур источников плазмы.

До начала эксперимента вакуумная камера откачивалась турбомолекулярным насосом до предельного давления 10^{-2} Па. Подачей рабочего газа аргона через источник газовой плазмы рабочее давление устанавливалось на уровне 0.3–1 Па. При зажигании газового разряда с током около 40 А и приложении напряжения смещения величиной 50–600 В на подложкодержатель с образцами осуществлялся нагрев подложек до температуры 300–450 °С. После очистки поверхности образцов ионной бомбардировкой и её химической активации производилось зажигание разрядов в дуговых испарителях и напыление покрытия. При напылении нитридов использовался напуск азота, а для осаждения композиций из чистых металлов – аргон.

3. Результаты исследований и их обсуждение

В работе были получены однослойные (TiB, TiBN, TiCrBN) и многослойные (TiB/TiBN и TiCrB/TiCrBN) покрытия. Многослойные покрытия TiB/TiBN и TiCrB/TiCrBN, состоящие из четырех слоев TiB (TiCrB) и четырех слоев TiBN (TiCrBN) общей толщиной ~2.5 мкм, получены последовательным осаждением слоев на предварительно очищенную ионной бомбардировкой поверхность образцов (Рис.2). Соотношение между толщинами слоев 1:3. Толщина однослойных покрытий составляла 2–3 мкм. Для улучшения адгезии покрытия к подложке после очистки на поверхность напылялся тонкий, около нескольких сотен нанометров, подслоя титана или хрома.

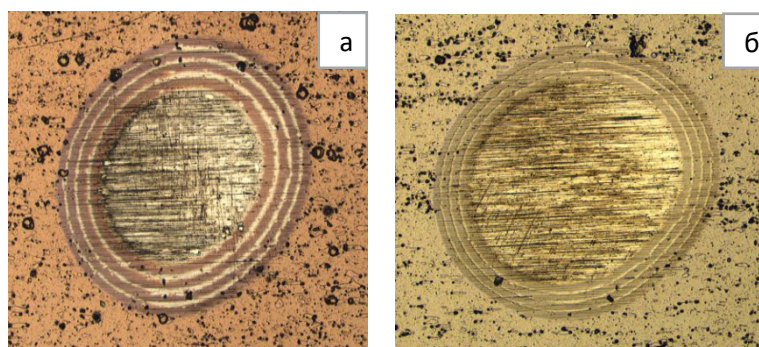


Рис.2. Стрoение многослойных покрытий TiB/TiBN (a) и TiCrB/TiCrBN (б).

3.1. Измерение микротвердости и нанотвердости

Измерение микротвердости и модуля упругости проводилось методом динамического вдавливания пирамидки Берковича, при этом получалось трехмерное изображение отпечатка, основываясь на котором, можно определить глубину вдавливания и определить значение модуля упругости.

На Рис.3 и Рис.4 приведены значения микротвердости и нанотвердости осажденных покрытий. При напылении в среде азота твердость покрытий несколько возрастает. Максимальные значения микротвердости имеют однослойные покрытия с добавлением хрома (TiBCrN₁, TiBCrN₂). Метод рентгеноспектрального анализа показал, что в покрытии TiBCrN₁ содержится 23 ат% Ti и 22 ат% Cr. С увеличением тока дугового испарителя с хромовым катодом до 60 А при неизменном токе дугового испарителя с многокомпонентным катодом количество хрома в покрытии увеличилось TiBCrN₂ (16 ат% Ti и 25 ат% Cr). Следует отметить, что твердость многослойных покрытий при добавлении хрома несколько снижается. Это, вероятно, связано с уменьшением твердости слоёв без азота.

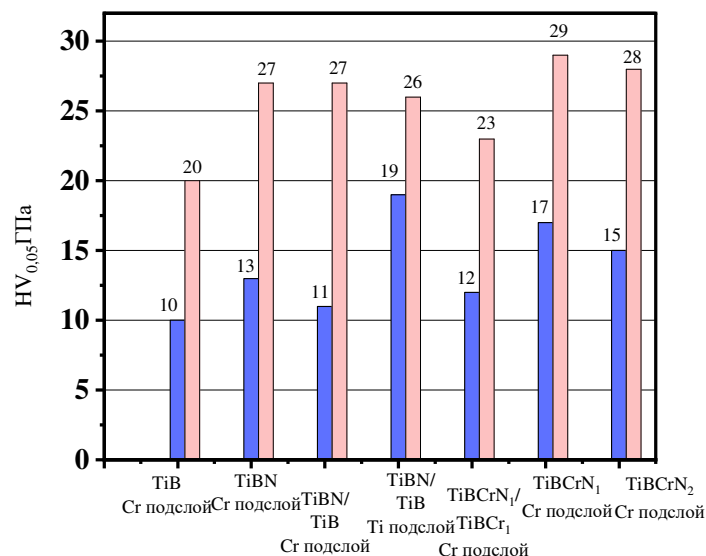


Рис.3. Микротвердость системы покрытие/подложка (сталь X12МФ и твердый сплав ВК8).

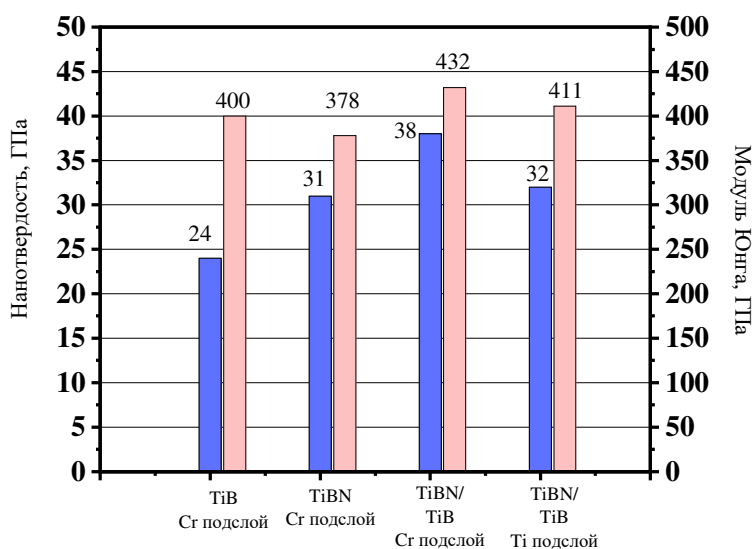


Рис.4. Нанотвердость и модуль Юнга покрытий.

3.2. Триботехнические испытания покрытий

Триботехнические испытания на трение скольжения осуществлялись на трибометре Tribotechnic в условиях сухого трения при возвратно-поступательном перемещении образца относительно контртела. В качестве контртела использовали шарик Al_2O_3 диаметром 6 мм. Скорость перемещения образца в процессе испытания составляла 25 мм/с. Нагрузка на шарик составляла – 5 Н, длина трека 5 мм, путь трения 50–200 м. В процессе испытания регистрировались текущие значения коэффициента трения. Испытания соответствуют международным стандартам ISO 7148, ASTM G99-95a, ASTM G 133-95. Трибологические испытания проводились при комнатной температуре. В качестве характеристик модифицированного слоя были выбраны коэффициент износа и коэффициент трения.

Сравнительные испытания покрытий показали, что однослойное покрытие TiBN наименее стойкое к истиранию. Кроме того, это покрытие имеет наибольший коэффициент трения (Рис.5). Формирование многослойной структуры покрытия TiB/TiBN позволяет повысить его износостойкость. В процессе испытаний было установлено, что покрытия,

осажденные на хромовый подслои, имеют лучшую адгезию как к стальной, так и твердосплавной подложке. Максимальной износостойкостью и наименьшим коэффициентом трения обладают однослойные покрытия с хромом (Рис.6). По-видимому, это связано с образованием пленки оксида хрома на поверхности трения.

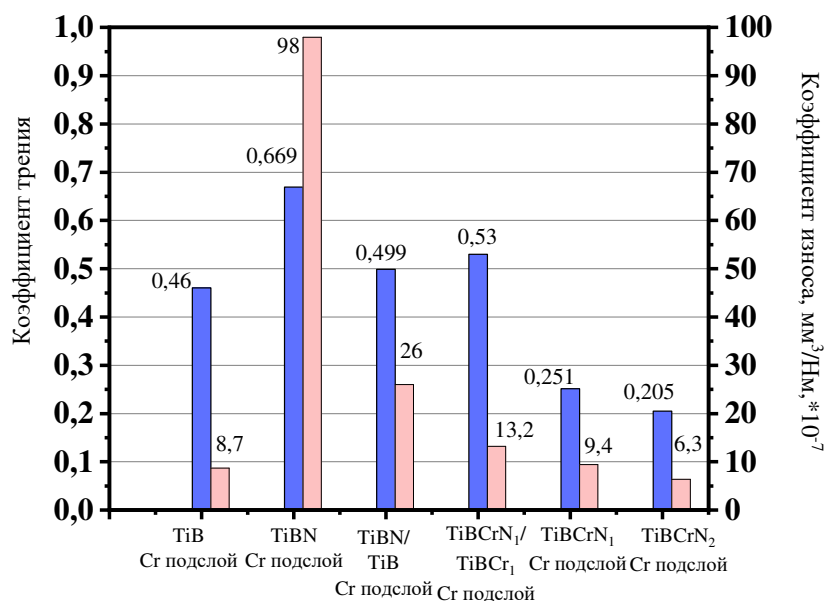


Рис.5. Коэффициент трения и коэффициент износа покрытий на подложке из стали X12МФ.

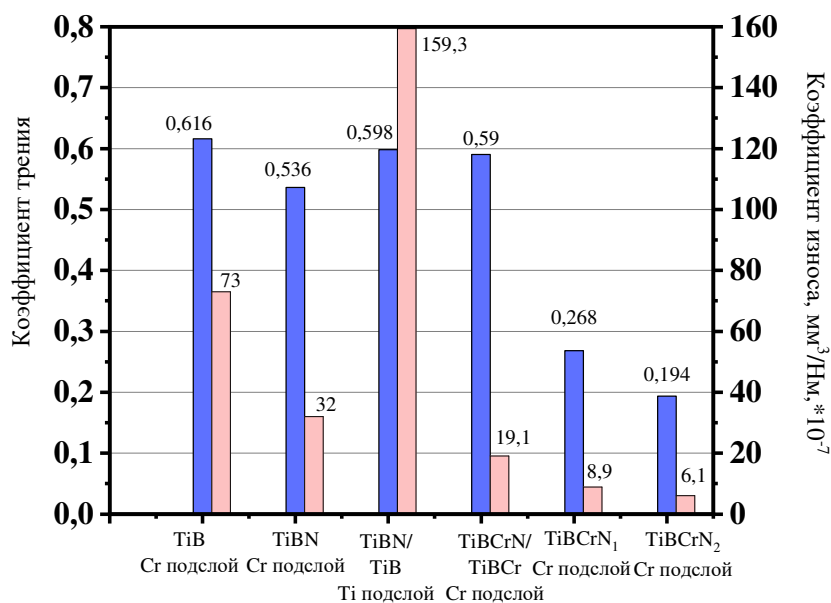


Рис.6. Коэффициент трения и коэффициент износа покрытий на подложке из стали BK8.

4. Заключение

В ходе выполнения работ были проведены испытания твердосплавных фрез с многослойными покрытиями TiB/TiBN и TiCrB/TiCrBN.

Таким образом, в результате исследования перспективного для повышения износостойкости поверхности штампового инструмента покрытия системы TiB/TiBN, напылённого вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом, было выявлено, что при добавлении Cr в покрытие значительно, с 0.5 до 0.2, снижается коэффициент трения и

падает коэффициент износа. Испытание фрезы с покрытием TiCrB/TiCrBN при резке нержавеющей стали 12X18H10T показало повышение ресурса инструмента в 4 раза по сравнению с фрезой без покрытия.

Разработанный технологический режим перспективен для использования в инструментальной и машиностроительной отраслей промышленности.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

5. Список использованной литературы

- [1] Филиппов А.В., Шамарин Н.Н., Москвичев Е.Н., Новицкая О.С., Княжев Е.О., Денисова Ю.А., Леонов А.А. и Денисов В.В., *Обраб. метал.*, **24**(1), 87, 2022;
doi: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-87-102
- [2] Денисов В.В., Денисова Ю.А., Варданян Э.Л., Островерхов Е.В., Леонов А.А., Савчук М.В., *Изв. высш. учеб. завед. Физика*, **64**(1), 125, 2021;
doi: 10.17223/00213411/64/1/125
- [3] Савостиков В.М., Денисова Ю.А., Денисов В.В., Леонов А.А., Овчинников С.В., Савчук М.В., *Изв. высш. учеб. завед. Физика*, **64**(12), 43, 2021;
doi: 10.17223/00213411/64/12/43