

УДК 621.793

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ Ti–TiN НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Ю. Д. АФАНАСЬЕВА¹, С. Р. ШЕХТМАН²

¹luboi725@mail.ru, ²shex@inbox.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 21.10.2017

Аннотация. Рассматривается технология синтеза наноструктурированного покрытия на основе Ti–TiN на режущий инструмент. Сформулированы основные требования к защитным покрытиям, наносимым на лезвийный инструмент и представлены необходимые условия для материала покрытия. Описаны основные направления повышения эксплуатационных свойств лезвийного инструмента с многослойным покрытием. Описан процесс получения многослойных покрытий. Приведены исследования свойств многослойных покрытий, синтезированных по разработанной технологии. Синтезированы наноструктурированные многослойные и мультислойные покрытия, обладающие отличной адгезионной прочностью.

Ключевые слова: вакуумные ионно-плазменные методы; режущий инструмент; технология; защитные покрытия; работоспособности режущего инструмента; наноструктурированные покрытия.

ВВЕДЕНИЕ

При лезвийной обработке металла именно инструмент определяет ее производительность, качество поверхности и точность получаемых размеров.

В настоящее время существует много способов повышения режущих свойств металлообрабатываемого инструмента, которые постоянно совершенствуются. К таким методам относится модифицирование поверхности и формирование тонких пленок на инструменте, изготовленном из твердых сплавов и быстрорежущих сталей.

Формирование на лезвийном инструменте тонких высокотвердых пленок уменьшает абразивный и диффузионный износ, снижает температуру и силовые нагрузки в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали, снижает адгезионное взаимодействие с материалом заготовки.

Повышение работоспособности лезвийного инструмента обеспечивается улучше-

нием свойств поверхностного слоя инструментального материала, при котором поверхность инструмента сопротивляется видам износа.

Поверхностные характеристики режущего инструмента с покрытием должны превосходить свойства материала, из которого он изготовлен.

Требования, предъявляемые к материалу и составу покрытия на лезвийном инструменте:

– сохранение свойства в условиях повышенных давлений и высоких температур, а также сопротивление разрушению;

– общность температурных зависимостей материала, из которого изготовлен режущий инструмент, и материала покрытия;

– высокая адгезия покрытия к инструментальной основе при уменьшении склонности к схватыванию [1–3, 9];

– эксплуатационные характеристики режущего инструмента с покрытием должны соответствовать специфике процесса обработки.

Вектор развития свойств режущего инструмента с покрытием определяется сочетанием факторов, которые продиктованы совершенствованием свойств самого покрытия и композиции «покрытие – инструментальная основа» [3–6].

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЯМ

Вакуумные ионно-плазменные многослойные покрытия (МП) должны отвечать следующим требованиям:

- непосредственно примыкающие к материалу основы слои должны обеспечивать удовлетворительную адгезию;
- высокая твердость и прочность верхних слоев покрытия, а также минимальное схватывание к конкретному материалу заготовки.

Повышение работоспособности лезвийного инструмента с тонким покрытием обеспечивается повышением прочности, микротвердости и трещиностойкости. При этом покрытия могут иметь низкую прочность сцепления с инструментальным материалом, что в итоге приводит к отслаиванию покрытия в процессе резания, а в дальнейшем к снижению работоспособности режущего инструмента. Следовательно, срок службы покрытия на поверхности режущего инструмента зависит от прочности сцепления [3, 7–9].

Предлагаемые многослойные наноструктурированные покрытия состоят из периодически расположенных слоев из различных материалов, например, чередующиеся Ti и TiN, с характерным размером слоев меньше 100 нм и их количеством до нескольких десятков, обладают высокими механическими и эксплуатационными свойствами.

Малая толщина слоев и их большое количество, особенность строения наноструктурированных (НС) покрытий и в том числе плотное сопряжение различных материалов в покрытии приводит к тому, что эти специфические пленки сочетают в себе свойства наноструктур и слоистых систем.

МП позволяет остановить развитие трещины вследствие создания протяженных полей сжатия (твердые слои чередующиеся с более мягкими) и созданием барьера на пути ее движения (мягкие слои).

Процесс осаждения НС покрытия композиции Ti–TiN осуществляется в среде газа азота. Предлагаемая технология реализуется в одном операционном пространстве, совмещающая дуговой разряд, горящий в парах материала катода, и разряд, создаваемый плазменным источником с накальным катодом «ПИНК».

Предлагаемая к реализации технология получения наноструктурированных многослойных и мультислойных покрытий основывается на следующих основных процессах:

- бомбардировка несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом (НСДР) производится с помощью источника «ПИНК» в атмосфере аргона, в процессе чего происходит предварительная очистка поверхности и создания условий для зарождения и роста покрытий;
- плазменное ассистирование поверхности НСДР в Ar;
- испарение материала катода Ti;
- осаждение ионов на поверхность обрабатываемой заготовки с формированием слоя покрытия в среде азота.

Технология предусматривает в едином технологическом цикле:

- очистку поверхности,
- предварительную ионную модификацию плазмой НСДР в аргоне, предварительный нагрев заготовки ионами металла;
- формирование покрытий с использованием дополнительной ионной бомбардировки.

Предварительную очистку поверхности проводят для ее модификации. Она осуществляется ионами газа аргона (Ar) при $P=10^{-1}$ Па при напряжении смещения ($U=1100$ В).

Кроме того, осуществляется предварительный нагрев заготовки.

МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проверка толщины покрытия на образцах проводилась на приборе CSM CALOTEST. Прибор позволяет определить толщину покрытия по следу образования сечения. Точность измерений: 1–5%. Прибор Calotest широко используется для анализа покрытий с толщиной между от 0,1 до 50 мкм. Сфериче-

ские шлифы подготавливаются при помощи вращающегося стального шарика, который при помощи абразивной суспензии за определенное время удаляет материал покрытия с поверхности образца до момента начала удаления основного материала.

Скретч тестер CSM Instruments предназначен для изучения свойств микро- и нанопленок и покрытий. Метод основан на контролируемом царапании алмазным индентором на выбранном участке образца. Наконечник индентора перемещается по поверхности образца с постоянной, возрастающей или прогрессивной нагрузкой. При определенной критической нагрузке покрытие начнет разрушаться.

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Технология плазменно-ассистированного осаждения ионно-плазменных покрытий композиции Ti–TiN включает (рис. 1):

- предварительную подготовку (очистку);
- загрузку деталей в вакуумную камеру и создания вакуума в камере;
- модификацию поверхности НСДР в аргоне;
- натекание рабочего газа N_2 в камеру;
- ассистированное формирование МП на основе Ti–TiN;
- охлаждение обработанных деталей совместно с плазменной установкой.

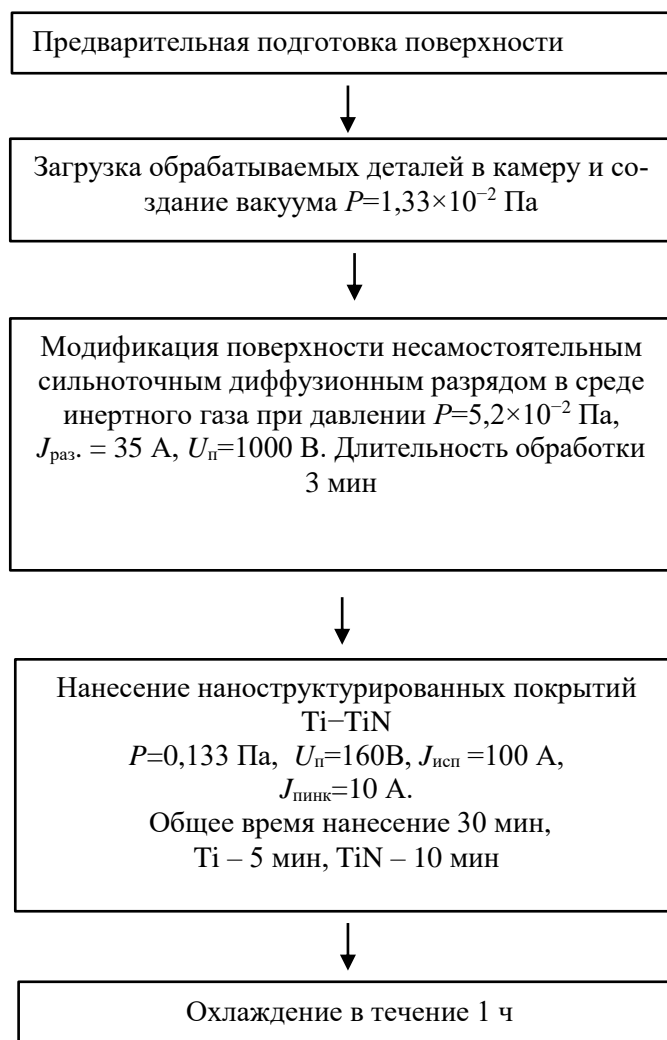


Рис. 1. Схема ТП осаждения НС покрытия системы Ti–TiN

Формирование МП осуществляется в процессе последовательного осаждения слоев Ti, Ti₂N, TiN из плазмы, создаваемой электродуговым испарителем. Синтезирование осуществляется при постоянном воздействии плазмогенератора.

Равномерное планетарное вращение обрабатываемой детали вокруг оси стола и собственной оси позволяет обеспечить равномерность распределения слоев осаждаемого покрытия.

Разработанная технология формирует НС многослойные покрытия с толщиной отдельных слоев до 100–150 нм и МП с микрометровыми слоями. Величина и количество слоев задается технологическим процессом, режимами осаждения и расположением обрабатываемой поверхности относительно плазменного потока.

Формирование МП осуществляется в процессе последовательного осаждения слоев Ti, Ti₂N, TiN из плазмы, создаваемой электродуговым испарителем. Синтезирование осуществляется при постоянном воздействии плазмогенератора.

Равномерное планетарное вращение обрабатываемой детали вокруг оси стола и собственной оси позволяет обеспечить равномерность распределения слоев осаждаемого покрытия.

Разработанная технология формирует НС многослойные покрытия с толщиной отдельных слоев до 100–150 нм и МП с микрометровыми слоями. Величина и количество слоев задается технологическим процессом, режимами осаждения и расположением обрабатываемой поверхности относительно плазменного потока.

Предварительная химическая очистка заключается в удаление органических загрязнений, остатков масел, жира, отпечатков пальцев. Применяется этиловый спирт, ацетон. Иногда очистку проводят в ультразвуковых ваннах.

Модификация поверхности и активация центров адсорбции НСДР осуществлялось «ПИНК» в аргоне при $P=5,2 \times 10^{-2}$ Па.

Режимы: напряжение $U_{\text{п}}=1000$ В при $I=35$ А, длительность обработки $t=3$ мин.

Модификация ионами Ar активует поверхность и приводит к высокой концентрации зародышеобразования

Режим проведения очистки поверхности ионами материала катода подобраны таким образом, чтобы исключить внедрение ионов металлической плазмы в обрабатываемую поверхность и избежать возможность привязывания микродуг, а также значительно понизить температуру предварительного нагрева.

Ионная бомбардировка с низкой энергией растущих пленок может ограничить рост зерен и способствовать образованию нанокристаллических слоев.

Следующая стадия: плазменно-ассистированное нанесение многослойных НС покрытий Ti–TiN. Нанесение покрытий проводится при $P=0,133$ Па, $U_{\text{п}}=160$ В и $I=100$ А. Формирование слоев покрытий осуществляется при воздействии дополнительной бомбардировкой ионами аргона, ток НСДР составляет 10 А. Переходный слой – титан.

Температурный режим на поверхности подложки при формировании покрытия контролировался с помощью оптического пирометра. Нагревание подложки до температуры синтеза покрытия выполнялось с помощью ионов аргона во время их осаждения при смещающем напряжении подложки в 1 кВ. При достижении требуемой температуры подложки величина смещающего напряжения понижалась, и в камеру подавался азот для нанесения покрытия Ti–TiN.

Рассматриваемая технология позволяет формировать микрометровые и нанометровые слои, которые могут быть использованы для различного функционального назначения.

Катод для электродугового испарителя был выполнен из материала ВТ-1.0. Обрабатываемые детали в вакуумной камере осуществляли планетарное движение. При этом обеспечивается равномерное осаждение по толщине слоя.

В едином операционном пространстве и цикле покрытие синтезируется, варьируя подаваемыми газами. Время формирования $T_{\text{ос}}=30$ мин. При напылении многослойного покрытия – слой Ti (5 мин), TiN – 10 мин.

Режимы нанесения покрытия $J_d = 50$ А, $U_{п} = 120$ В, при давлении 10^{-1} Па.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе проведенной работы были проведены исследования покрытий на основе Ti–TiN.

На подложке при формировании покрытий температура составляет 350–400°C. Такая температура особенно важна при осаждении покрытий на инструмент.

Для синтезирования многослойных вакуумных ионно-плазменных наноструктурированных покрытий необходимо выполнить необходимые основные правила:

1. Многослойные композиции должны состоять из множества сверхтонких (менее 100 нм) слоев.

2. Температуру конденсации при синтезе необходимо поддерживать близкой к минимальной (350–450°C).

Исследования адгезионной прочности нанесенных покрытий системы Ti–TiN для различных материалов показали, что сформированные покрытия обладают высокой адгезией к подложке (рис. 2).

Исследование с помощью оптического микроскопа отпечатка алмазной пирамидки показало, что вблизи зоны воздействия индентора, материал покрытия не растрескивается, что может косвенно свидетельствовать о высокой адгезионной прочности.

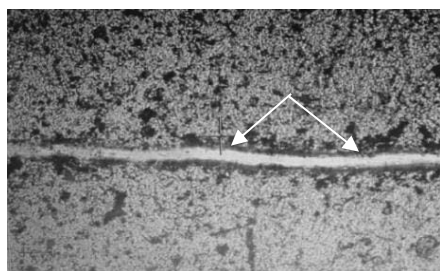


Рис. 2. Оценка адгезионной прочности покрытия на образце с многослойным наноструктурированным покрытием Ti–TiN методом царапания (стрелочками указано начало разрушения покрытий)

На рис. 2 показано начало разрушения покрытия Ti–TiN при увеличении нагрузки на индентор (прибор CSM Scratch Test) в процессе царапания. Это исследование

также доказало, что испытание методом царапания показало удовлетворительную адгезию. При царапании происходил прорыв пленки до обнажения подложки и отслоение покрытия.

Наблюдаемые незначительные сколы по краям царапины соответствует предъявляемым к адгезии требованиям.

Многочисленные проведенные исследования [3–6] показали, что при уменьшении слоев пленки до величины 100 нм поверхностные свойства ее начинают преобладать над объемными.

Свойства пленок зависят от формы и размеров наноструктур и во многих случаях на несколько порядков превосходят характеристики мономатериалов. Это можно объяснить более совершенной структурой сверхтонких пленок, а также более высокой внутренней энергией вследствие перераспределения в прочностные свойства материала вклада поверхности по сравнению с объемом.

Толщина нанесенных покрытий составила 5...7 мкм, согласно исследованиям микроструктуры. Эта совокупность значений согласуется с результатами весового анализа. Замеры толщины покрытия производились на оптическом световом микроскопе МИМ-7. Увеличение от 60 до 1440 раз.

На рис. 3 приведен внешний вид сферических лунок после истирания покрытия вращающимся шариком на приборе GSM CALOTEST. В случае многослойного покрытия в шлифе отчетливо просматриваются промежуточные слои (рис. 3).

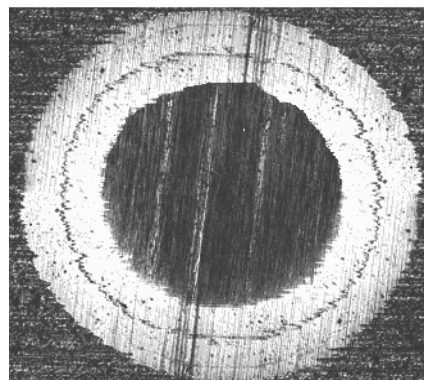


Рис. 3. Внешний вид кратера износа образца с покрытием для двухслойного покрытия

На рис. 4 приведен внешний вид сферических лунок после истирания наноструктурированного покрытия вращающимся шариком.

Наблюдаемые кольца соответствуют границам: «атмосфера–поверхность покрытия» внешнее кольцо и «покрытие–основной материал» (внутреннее кольцо). В случае многослойного покрытия в исследовательском шлифе отчетливо просматриваются промежуточные слои (рис. 4).

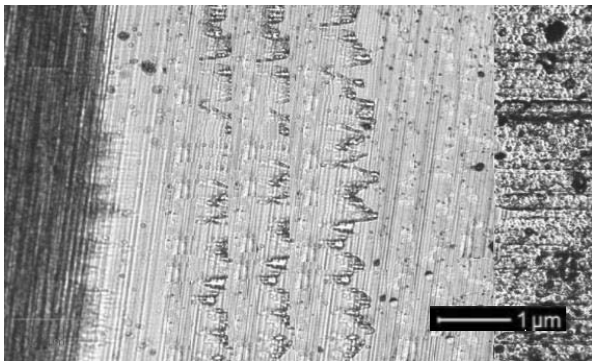


Рис. 4. Внешний вид кратера износа образца с НС покрытием с размерами слоев 100 нм

Размеры слоев многослойных покрытий можно варьировать изменением положения детали относительно плазменного потока. Например, при расположении образцов или обрабатываемых деталей параллельно плазменному потоку толщина слоев в 2 раза меньше, чем при расположении перпендикулярно потоку, толщина меняется и при удалении обрабатываемых деталей от оси плазменного потока, изменяется размеры слоев так и при увеличении расстояния от торца катода.

Общая толщина сформированного многослойного покрытия системы Ti–TiN составляет 5–7 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана технология осаждения наноструктурированного многослойного и мультислойного покрытия системы Ti–TiN, реализованная на модернизированной установке ННВ 6.6-И1, предназначенной для нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий.

Разработанная технология ионно-плазменного осаждения наноструктурированных

покрытий системы Ti–TiN в условиях дополнительной ионной бомбардировки, обеспечивающей повышение качества поверхностного слоя лезвийного инструмента и высокую адгезионную прочность наноструктурированных покрытий. Предлагаемый технологический процесс нанесения многослойного покрытия позволяет:

- обеспечить точность обработки;
- снизить остаточные напряжения в покрытии;
- обеспечить равномерный нагрев детали;
- обеспечить равномерную толщину покрытия;
- обеспечить заданную толщину слоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будилов В. В., Киреев Р. М., Шехтман С. Р. Технология вакуумной ионно-плазменной обработки // М.: Издательство МАИ, 2007. 155 с. [V. V. Budilov, R. M. Kireev, S. R. Shekhtman, *Tekhnologiya vakuumnoj ionno-plazmennoj obrabotki*, (in Russian). Moscow: Izdatelstvo "MAI", 2007.]
2. Особенности применения вакуумной ионно-плазменной обработки конструкционных материалов для изделий авиационной техники / В. В. Плихунов [и др.] // Авиационная промышленность. 2010. № 3. С. 26–32. [V. V. Plihunov, et al., "Features of application of vacuum ion-plasma treatment of structural materials for aircraft products", (in Russian), in *Aviacionnaya promyshlennost'*, no. 3, pp. 26-32, 2010.]
3. Vacuum Arc: Plasma Sources, Coating Deposition, Surface Modification. / I. I. Aksenov, et al., Naukova Dumka: Kyiv: 2012. [I. I. Aksenov, et al., "Vacuum Arc: Plasma Sources, Coating Deposition, Surface Modification". Kyiv: *Naukova Dumka*.]
4. Shekhtman S. R., Sukhova N. A. Synthesis of multilayer vacuum ion-plasma coatings Ti-Tin during the surface modification // Materials Science Forum. 2016. V. 870. Pp. 113-117. [S. R. Shekhtman, N. A. Sukhova, "Synthesis of multilayer vacuum ion-plasma coatings Ti-Tin during the surface modification", in *Materials Science Forum*, vol. 870, pp. 113-117, 2016.]
5. Гончаров В. С. Методы получения защитных покрытий / Машиностроитель. 2001. №5. С. 30-33. [V. S. Goncharov, "Methods of obtaining protective coatings", (in Russian), in *Mashinostroitel*, no. 5, pp. 30-33, 2001.]
6. Ismagilova L. A., Sukhova N. A. Assessment of quality of innovative technologies // International Journal for Quality Research. 2016. V. 10. № 4. Pp. 707-718. [L. A. Ismagilova, N. A. Sukhova, "Assessment of quality of innovative technologies", in *International Journal for Quality Research*, vol. 10, no. 4, pp. 30-33, 2016.]
7. Сухова Н. А., Боева Е. С. Разработка системы показателей оценки потенциала высоких технологий В сборнике: Актуальные вопросы права, экономики и управления сборник статей VIII Международной научно-практической конференции: в 3 частях. 2017. С. 100-103. [N. A. Suhova, E. S. Boeva, "Development of a system of indicators for assessing the potential of high technologies", (in Russian), in *Topical issues of law, Economics and management a collection of articles VIII International scientific-practical conferebce in 3 parts*, Russia, 2017, pp. 100-103.]

8. **Pogrebnyak A. D., Beresnev V. M.** Hard nanocomposite coatings, their structure and properties // Books "Nanocomposites-new trends and developments". 2012, Ch. 6, p. 123-160. [D. A. Pogrebnyak, V. M. Beresnev, *Hard nanocomposite coatings, their structure and properties*, (in Russian). 2012, ch. 6, pp. 123-160.]

9. **Наноструктурные покрытия** / Под ред. А. Кавалейро и Д. де Хоссона. М.: Техносфера, 2011. С. 792. [A. Kavalejro, D. de Hossona, *Nanostructured coatings*, (in Russian). Moscow: Tekhnosfera, 2011.]

ОБ АВТОРАХ

АФАНАСЬЕВА Юлия Дмитриевна, ассистент каф. ОКМиМ. Диплом магистра (УГАТУ, 2017). Иссл. в обл. вакуумно-плазменных технологий.

ШЕХТМАН Семен Романович, декан вечернего факультета УГАТУ при УМПО. Дипл. инженера-механика (УГАТУ, 1993). Д-р техн. наук по порошковой металлургии и композиционным материалам (МАТИ, 2015). Иссл. в области вакуумных ионно-плазменных покрытий.

METADATA

Title: Technology of application of ti-tin coating to cutting tools.

Authors: Yu. D. Afanasyeva¹, S. R. Shechtman²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: luboi725@mail.ru¹ shex@inbox.ru²

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 3 (81), pp. 3-9, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The technology of applying a nanostructured Ti - TiN coating to a cutting tool is considered. The main requirements for protective coatings applied to the cutting tool are set out and the conditions necessary for selecting the coating material are formulated. The basic directions of perfection of the cutting tool with a covering are described. The conditions for multilayer coatings are formulated. The process of obtaining multilayer coatings is described. The study of the properties of multilayer coatings applied on the developed technology

Key words: vacuum ion-plasma methods; cutting tool; technology; protective coatings; cutting tool operability; nanostructured coatings

About authors:

AFANASYEVA, Julia Dmitrievna, assistant of the department of ОКМиМ. Diploma of Master (UGATU, 2017). Issl. in the region. vacuum-plasma technologies.

SHECHTMAN, Semen Romanovich, Dean of the Faculty of USATU evening at UMPO. Dipl. Mechanical Engineer (USATU, 1993). Dr. Sc. by powder metallurgy and composite materials (МАТИ 2015) Inst. In the field of vacuum ion-plasma coatings