

Влияние плотности ионного тока на параметры вакуумно-плазменного покрытия на твердосплавном режущем инструменте

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрено влияние плотности ионного тока на толщину вакуумно-дуговых покрытий, в целях определения рационального значения пористости покрытия при управлении плотностью ионного тока. На поверхности твердосплавных режущих пластин, расположенных в различных местах подложки, было получено покрытие TiN, толщина которого определялась посредством электронной микроскопии. Обнаружено, что пластины с покрытием, полученным при малой плотности ионного тока, обладают недостаточными эксплуатационными характеристиками при токарной обработке стали 40Х. Получена количественная зависимость толщины покрытий для плотности ионного тока в пределах от 50 до 17 А/м² для покрытий, осажденных при потенциале смещения 200 В и давлении азота 0,05 Па, рассчитана пористость покрытия. Результаты могут быть использованы при управлении плотностью ионного тока вдоль поверхности протяженных подложек.

Ключевые слова: плазменно-ионная обработка, свойства покрытий

1. Введение

Плазменно-ионная обработка широко используется в современной промышленности для травления, модификации поверхности и осаждения покрытий [1–3]. Плотность ионного тока является основным параметром управления при равномерной обработке протяженных подложек [4], а также при воздействии на качество растущего покрытия в определенной области подложки [5–9].

Известно, что структура и свойства отличаются для покрытий, полученных при конденсации потоков ионов с невысокой энергией и большой плотностью ионного тока, и покрытий, полученных при высоких энергиях ионов и малых плотностях тока [5,10]. Еще одним фактором, который влияет на свойства покрытий и зависит от плотности ионного тока, является температура [11,12]. Общие механизмы влияния плотности ионного тока на свойства покрытия качественно описываются с помощью диаграмм (моделей) структурных зон (ДСЗ) [13]. Однако ДСЗ не могут непосредственно использоваться для количественного описания конкретной пары «положка - покрытие» [14]. Любая комбинация материалов подложки и покрытия представляют собой уникальную систему, которая не может быть адекватно описана ДСЗ и должна быть исследована экспериментально.

Ранее был описан метод управления плотностью ионного тока, который позволяет регулировать ионный поток, извлекаемый из различных типов источников плазмы, использующих магнитное поле для направления плазмы от источника к подложке: вакуумно-дуговые, ЭЦР, геликонные и несбалансированные магнетронные генераторы плазмы [15–18]. Метод позволяет фокусировать плазму к выделенному участку подложки и получать высокие плотности ионного тока, а также расфокусировать плазму для обработки протяженных подложек. Последний вариант позволяет увеличивать производительность оборудования путем увеличения количества деталей,

которые могут быть одновременно обработаны за один технологический цикл. Однако при этом средняя плотность ионного тока уменьшается, что может привести к ухудшению эксплуатационных характеристик вследствие осаждения пористого покрытия. Таким образом, необходимо исследовать влияние величины плотности ионного тока на пористость покрытия, в целях выбора рационального уровня плотности обрабатывающего ионного потока для покрытий различного применения. В работе исследуется влияние плотности ионного тока на образование плотных конденсатов на подложке, подверженной воздействию плазмы вакуумно-дугового источника. Целью работы является определение пределов плотности ионного тока, которые допустимы для формирования пригодных покрытий TiN на поверхности твердосплавного режущего инструмента. Результаты могут использоваться при определении технологических режимов для осаждения покрытий различного применения.

2. Эксперимент

Осаждение покрытия проводилось вакуумно-дуговым методом [19] на установке «Булат-6», схема которой вместе со схемой размещения подложки изображена на рис. 1. Установка включает в себя вакуумно-дуговой источник плазмы и планарный зонд для определения радиального распределения плотности ионного потока.

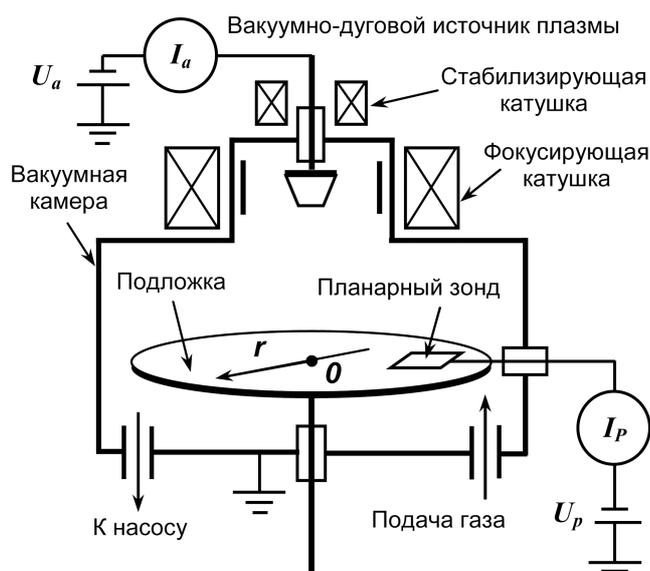


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Подложка в форме диска диаметром 400 мм и толщиной 8 мм устанавливалась на расстоянии 250 мм от торца плазмоведа. На подложку подавался отрицательный потенциал смещения 200 В относительно заземленного анода, которым являлись стенки вакуумной камеры.

Для измерения плотности ионного тока вдоль поверхности подложки (ось r на рис. 1) использовался планарный зонд с размерами $50 \times 48 \times 0,5$ мм. При включении вакуумно-дугового источника плазмы падение напряжения между зондом и анодом составляло 200 В, что позволяло определять ионный ток насыщения [19]. Длительность каждого цикла измерения составляла 2 с.

Плазменно-ионной обработке подвергались режущие сменные

многогранные пластины квадратной формы SNMM-150612 (ISO) с длиной режущей кромки $l = 15,875$ мм, толщиной $s = 6,35$ мм и радиусом $r = 1,2$ мм (масса $m = 7,59$ г), изготовленные из твердого сплава марки ТН-20.

Режущие пластины размещались на приспособлении [21] в точках подложки с координатами $r = 40, 70, 100, 130, 160$ и 190 мм для осаждения покрытия TiN на режущих поверхностях. Перед осаждением пластины подвергались ионной очистке в течение 8 минут в дуговом разряде при потенциале смещения $1,5$ кВ при давлении 10^{-3} Па. В процессе осаждения покрытия в камере поддерживалось давление реактивного газа (азота) $0,05$ Па, ток дуги составлял 100 А, длительность осаждения – 30 минут.

Стойкость режущего инструмента на износ исследовалась при токарной обработке легированной конструкционной стали 40Х [22]. Для механической обработки были выбраны такие режимы обтачивания продольной подачей [23]: скорость резания $V_p = 200$ м/мин, глубина резания $t_p = 3,0$ мм при подаче $s = 0,21$ мм/об. При определении износа использовался инструментальный микроскоп БМИ-1Ц с ценой деления 5 мкм. Критерием износа режущих пластин был выбран износ по задней поверхности резца $0,3$ мм.

Дополнительно задние поверхности пластин подвергались абразивной обработке для получения микрошлифа, в целях определения толщины покрытий с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-106.

3. Результаты и обсуждение

Распределение плотности ионного тока в зависимости от радиуса r (см. рис. 1) при давлении газа $0,05$ Па, измеренное с помощью планарного зонда, показано на рис. 2, а. Каждая экспериментальная точка на рисунке является результатом усреднения по 10 измерениям.

Экспериментальные данные были аппроксимированы с помощью распределения Гаусса, при этом получено выражение

$$J_i(r) = -9,8 + 60,242 \exp \left[- \left(\frac{r}{210,65} \right)^2 \right], \text{ А/м}^2, \quad (1)$$

где r – координата вдоль поверхности подложки, мм.

Как видно, распределение плотности ионного тока неоднородно вдоль поверхности подложки: достигает плотности 50 А/м² в центре подложки ($r = 0$) и уменьшается до 17 А/м² возле ее края ($r = 180$ мм).

Измеренная с помощью электронного микроскопа зависимость толщины покрытия от положения режущей пластины на подложке показана на рис. 2, б.

Экспериментальные данные были также аппроксимированы с помощью распределения Гаусса, и было получено выражение

$$h_c(r) = -0,212 + 5,261 \exp \left[- \left(\frac{r}{203} \right)^2 \right], \text{ мкм}. \quad (2)$$

Распределение толщины покрытия также неоднородно: изменяется от $4,81$ мкм в центре подложки до $2,03$ мкм на ее крае ($r = 190$ мм).

Можно отметить, что уменьшение плотности ионного тока в $2,98$ раза ($J_i(0) = 50,442$ А/м²; $J_i(190) = 16,9$ А/м²) приводит к уменьшению толщины покрытия только в $2,51$ раза ($h_c(0) = 5,06$ мкм; $h_c(190) = 2,01$ мкм).

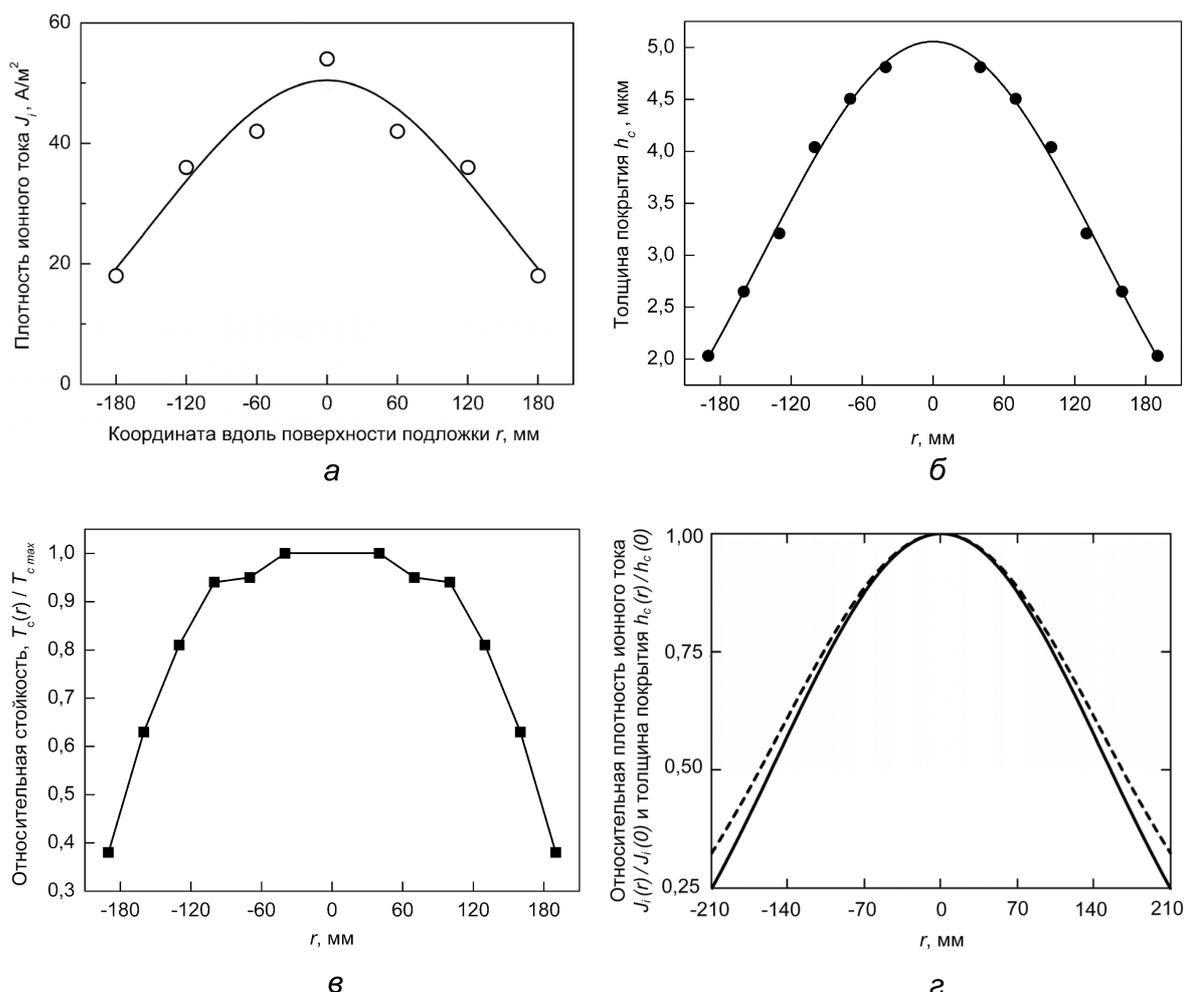


Рис. 2. Распределение параметров как функции координаты r вдоль поверхности подложки: а – плотность ионного тока; б – толщина покрытия; в – относительная стойкость инструмента $T_c(r)/T_{c,max}$ ($T_{c,max} = T_c(40) = 34$ мин.); г – относительная плотность ионного тока и толщина покрытия

Наиболее высокая стойкость инструмента $T_{c,max} = 34$ мин. при точении отмечена для режущей пластины, расположенной при осаждении в точке с координатой $r = 40$ мм. График относительной стойкости инструмента $T_c(r)/T_{c,max}$ в зависимости от положения r режущей пластины во время осаждения покрытия показаны на рис. 2, в. Можно отметить резкое уменьшение стойкости инструмента для пластин, расположенных при $r > 120$ мм.

Относительная плотность ионного тока и толщина покрытия также были рассчитаны, а их результаты приведены на рис. 2, г. Эти результаты также подтверждают постепенное расхождение между зависимостями плотности ионного тока и толщины покрытия от координаты r , что позволяет сделать вывод о нелинейной зависимости пористости покрытия от плотности ионного тока.

Изображения микрошлифов, полученные с помощью электронного микроскопа для покрытий на режущих пластинах, расположенных при осаждении в различных местах подложки, показаны на рис. 3.

Как видно, микрошлифы на рис. 3, а–г четкие, что можно рассматривать как признак плотного покрытия, которое хорошо выдерживает абразивную обработку. Микрошлиф на рис. 3, д показывает, что износ покрытия выше, чем износ

основного материала резца, поскольку при фокусировке на поверхность покрытия видно, что поверхность покрытия находится глубже поверхности резца. Очевидно, это является признаком пористого покрытия. Микрошлиф, показанный на рис. 3, е, является нечетким даже на поверхности покрытия, что может рассматриваться как признак неадекватных механических характеристик покрытия.

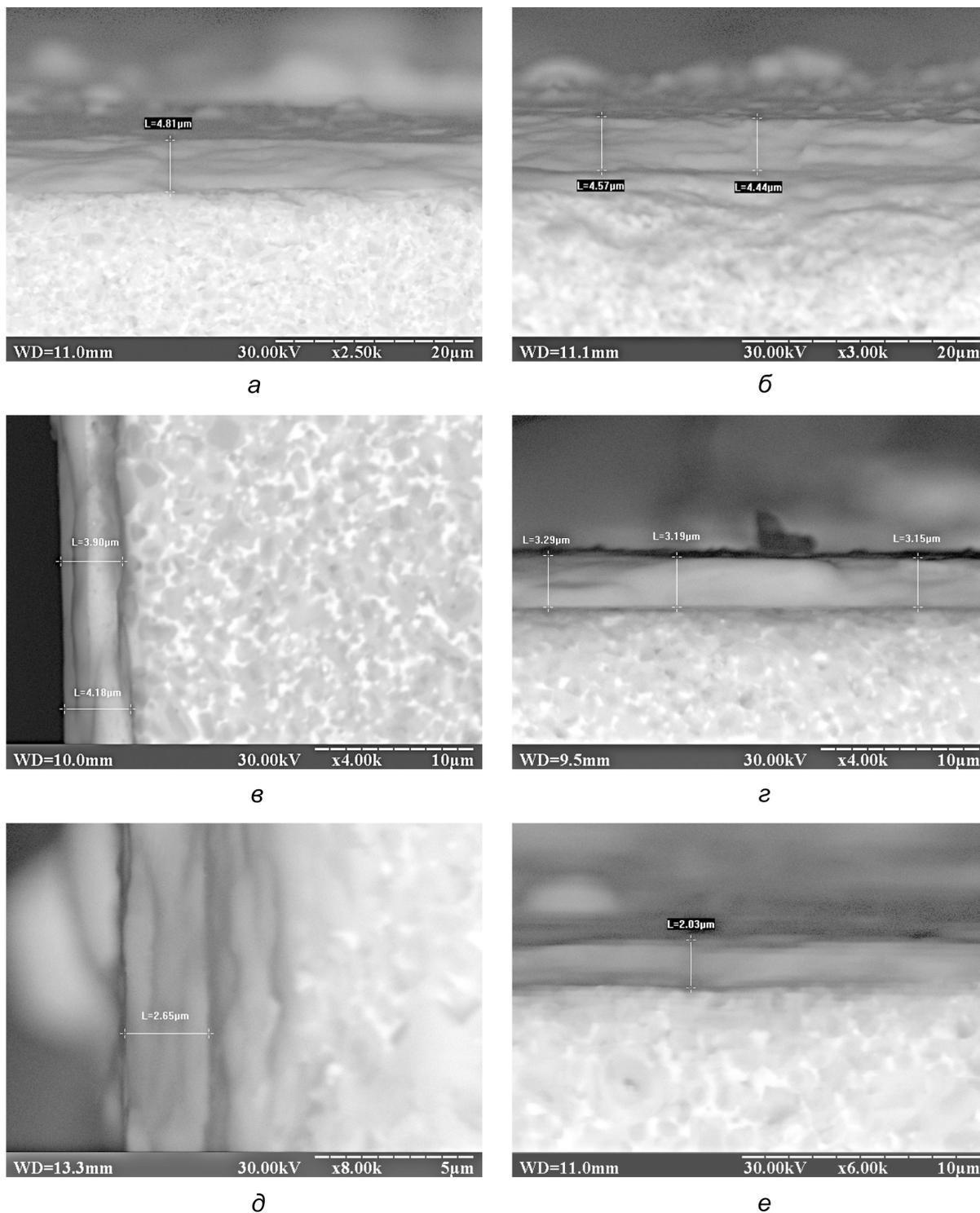


Рис. 3. Фотографии микрошлифов покрытия на поверхности твердосплавных режущих пластин для различных положений r вдоль поверхности подложки: а - $r = 40$ мм; б - $r = 70$ мм; в - $r = 100$ мм; г - $r = 130$ мм; д - $r = 160$ мм; е - $r = 190$ мм

Для расчета пористости использовалось свойство уравнения касательной к точке функции прогнозировать функцию только в линейном приближении. В нашем случае уравнение касательной к функции, которая описывает зависимость толщины покрытия от плотности ионного тока, в точке, где формируется плотное покрытие, позволяет прогнозировать толщину покрытия только при условии формирования плотного покрытия. Любое отклонение действительной зависимости от этой касательной может рассматриваться как влияние пористости.

Зависимость толщины покрытия от плотности ионного тока можно получить из уравнений (1) и (2):

$$h_c(J_i) = -0,212 + 5,261 \left(\frac{J_i + 9,8}{60,24} \right)^{1,077}, \text{ мкм.} \quad (3)$$

Полагая, что нелинейность зависимости (3) является результатом формирования пористого покрытия, можно оценить влияние плотности ионного тока на структуру покрытия. Зависимость толщины плотного покрытия от плотности ионного тока аппроксимируется уравнением касательной к зависимости (3) в точке с максимальной плотностью ионного тока, где формируется наиболее плотное покрытие (в нашем случае – 50,44 А/м², см. рис. 2, а):

$$h_{c0}(J_i) = 0,094(J_i - 50,442) + 5,049, \text{ мкм.} \quad (4)$$

Относительный объем покрытия можно оценить зависимостью $(h_c(J_i)/h_{c0}(J_i))^3$, график которой изображен на рис. 4, вместе с зависимостями $h_c(J_i)$ и $h_{c0}(J_i)$.

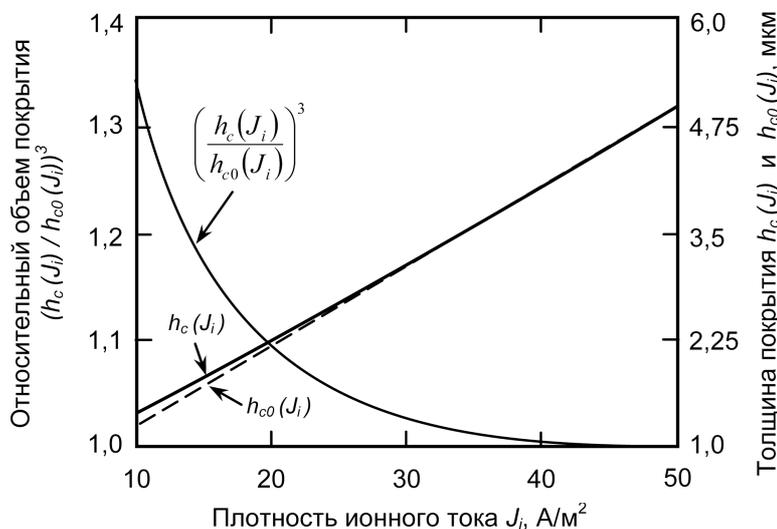


Рис. 4. Относительный объем покрытия как функция плотности ионного тока и зависимость толщины покрытия в линейном и нелинейном приближении

Пористость покрытия рассчитывается как $(h_c(J_i)/h_{c0}(J_i))^3 - 1$. Как видно из графика, отмечается увеличение пористости при уменьшении плотности ионного тока, которое можно отнести к влиянию более низкой температуры осаждения покрытия.

Токарная обработка стали 40X показала работоспособность покрытий, полученных при плотности ионного тока не менее 25...30 А/м², которая

соответствует образованию покрытий с пористостью порядка 3...5 %. Однако допустимое минимальное значение плотности ионного тока может изменяться для других применений, например для декоративных покрытий.

4. Заключение

В работе исследован один из практических аспектов решения проблемы управления плотностью ионного тока в технологических установках плазменно-ионной обработки. Исследована также зависимость толщины и пористости покрытия, полученного при конденсации из плазмы вакуумно-дугового разряда по методу КИБ, от плотности ионного тока при постоянном давлении реактивного газа и потенциале смещения на подложке. Кроме того, исследованы эксплуатационные характеристики и определена стойкость твердосплавных режущих пластин с покрытием при токарной обработке стали 40X.

Зависимость толщины покрытия от плотности ионного тока вдоль поверхности подложки имеет нелинейный характер. Уменьшение плотности ионного тока от центра подложки к ее краю приводит к осаждению более плотных покрытий, что соответствует характерным изменениям на диаграмме структурных зон. В проведенном эксперименте плотность ионного тока уменьшалась в 2,98 раза, в то время как толщина покрытий уменьшалась только в 2,51 раза. При обработке данных получена количественная зависимость толщины покрытия TiN от плотности ионного тока в диапазоне от 17 до 50 А/м² для покрытий, осажденных при потенциале смещения 200 В при давлении азота 0,05 Па. Изменение плотности покрытия отразилось на результатах токарной обработки стали 40X – уменьшение плотности ионного тока до величины порядка 25...30 А/м² приводит к резкому уменьшению стойкости покрытий.

Результаты работы могут быть использованы в установках с вакуумно-дуговыми источниками плазмы и управляемым распределением плотности ионного потока вдоль поверхности подложки. При этом возможен подбор наименьшей величины плотности ионного тока, а следовательно, максимальной обрабатываемой площади подложки для получения однородных покрытий TiN различного назначения (износостойких, коррозионностойких, декоративных и т.д.) вдоль поверхности подложки.

Список литературы

1. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. — 482 с.
2. Anders, A. Handbook of plasma immersion ion implantation and deposition [Text] / A. Anders // New York: Wiley, 2000. – 736 p.
3. Андреев, А.А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия [Текст] / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. – Х: ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.
4. Chen, F.F. Lecture Notes on Principles of Plasma Processing [Text] / F. F. Chen, J.P. Chang // Plenum/Kluwer Publishers. - 2002. – 208 p.
5. Petrov, I. Microstructural evolution during film growth [Text] / I. Petrov, P.B. Barna, L. Hultman, J.E. Greene // Journal of vacuum science and technology A. - 2003. - V. 21, № 5. - P. 117 – 128.
6. Chua, D. Correlation of surface, mechanical and microproperties of tetrahedral

amorphous carbon films deposited under different magnetic confinement conditions [Text] / D.H.C. Chua, K.B.K. Teo, T.H. Tsai, W.I. Milne, D. Sheeja, B.K. Tay, D. Schneider // Applied surface science. - 2004. – № 221. - P. 455 – 466.

7. Laing, K. The effect of ion current density on the adhesion and structure of coatings deposited by magnetron sputter ion plating [Text] / K. Laing, J. Hampshire, D. Teer, G. Chester // Surface and coatings technology. - 1999. – № 112. - P. 177 – 180.

8. Martin, P. Mechanical and optical properties of thin films of tantalum oxide deposited by ion-assisted deposition [Text] / P.J. Martin, A. Bendavid, M.V. Swain, R.P. Netterfield, T.J. Kinder, W.G. Sainty, D. Drage // Materials research society symposium proceedings. - 1993. – V.308. - P. 583 – 588.

9. Баранов, О.О. Проблема управления ионным потоком в технологических установках плазменно-ионной обработки [Текст] / О.О. Баранов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: ХАИ, 2012. - № 55 - С. 52 - 66.

10. Shin, C. Development of preferred orientation in polycrystalline NaCl-structure δ -TaN layers grown by reactive magnetron sputtering: role of low-energy ion surface interactions [Text] / C.-S. Shin, D. Gall, Y.-W. Kim, N. Hellgren, I. Petrov, J.E. Greene // Journal of applied physics. - 2002. – V.92, № 9. - P. 5084 – 5093.

11. Tay, B. Effects of substrate bias and growth temperature on properties of aluminium oxide thin films by using filtered cathodic vacuum arc [Text] / B.K. Tay, Z.W. Zhao, C.Q. Sun // Surface and coatings technology. - 2005. – № 198. - P. 94 – 97.

12. Yang, L. Cavitation erosion resistance of NiTi thin films produced by filtered arc deposition [Text] / L.M. Yang, A.K. Tieu, D.P. Dunne, S.W. Huang, H.J. Li, D. Wexler, Z.Y. Jiang // Wear. - 2009. - № 267. - P. 233 – 243.

13. Мовчан, Б.А. Исследование структуры и свойств толстых вакуумных конденсатов никеля, титана, вольфрама, окиси алюминия и двуокиси циркония [Текст] / Б.А. Мовчан, А.В. Демчишин // Физика металлов и металловедение. – 1969. – т.28, № 4. – С. 653 – 660.

14. Anders, A. A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching [Text] / A. Anders // Thin Solid Films. - 2010. - № 518. - P. 4087 – 4090.

15. Baranov O. Control of ion density distribution by magnetic traps for plasma electrons [Text] / O. Baranov, M. Romanov, J. Fang, U. Cvelbar, K. Ostrikov // Journal of applied physics. - 2012. – V.112, № 7. - P. 073302-1 – 073302-10.

16. Baranov, O. Effective control of ion fluxes over large areas by magnetic fields: from narrow beams to highly uniform fluxes [Text] / O. Baranov, M. Romanov, K. Ostrikov // Physics of plasmas. - 2009. - № 16. - P. 053505-1 - 053505-5.

17. Baranov, O. Process intensification in vacuum arc deposition setups [Text] / O. Baranov, M. Romanov // Plasma processes and polymers. – 2009. - № 6. - P. 95 - 100.

18. Baranov, O. Current distribution on the substrate in a vacuum arc deposition setup [Text] / O. Baranov, M. Romanov // Plasma processes and polymers. – 2008. - № 5. - P. 256 - 262.

19. Андреев, А.А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия [Текст] / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев.– Х.: НИЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.

20. Zarchin, O. Interaction of a vacuum arc plasma beam with an obstacle positioned normal to the plasma flow [Text] / O. Zarchin, V.N. Zhitomirsky, S. Goldsmith, R.L. Voxman // Journal of physics D: applied physics. – 2003. – V.36. – P. 2262 - 2268.

21. Баранов, О.О. Эффективность вакуумно-плазменного покрытия TiN на твердосплавном режущем инструменте при токарной обработке стали 14X17H2

[Текст] / О.О. Баранов, М.С. Романов, А.А. Бреус, Р.В. Воропай // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: сб. науч. трудов. Вып. 3. – Х.: ХПИ, 2011. - С. 148 - 153.

22. Сорокин, В.Г. Стали и сплавы. Марочник: справ [Текст] / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев, В.С. Палеев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

23. Самойлов, В.С. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент: справ [Текст] / В.С. Самойлов, Э.Ф. Эйхманс, В.А. Фальковский и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Долматов А.И., Национальный аэрокосмический университет «ХАИ» им. Н.Е. Жуковского, Харьков

Поступила в редакцию 07.06.2013

Вплив щільності іонного струму на параметри вакуумно-плазмового покриття на твердосплавному різальному інструменті

Розглянуто вплив густини іонного струму на товщину вакуумно-дугових покриттів з метою визначення оптимального значення пористості покриття при управлінні густиною іонного струму. На поверхні твердосплавних різальних пластин, розташованих в різних місцях підкладки, було отримано покриття TiN, товщина якого визначалася за допомогою електронної мікроскопії. Виявлено, що пластини з покриттям, отриманим за малої густини іонного струму, мають недостатні експлуатаційні характеристики при токарній обробці сталі 40X. Отримано кількісну залежність товщини покриттів для густини іонного струму в межах від 50 до 17 А/м² для покриттів, отриманих при потенціалі зміщення 200 В і тиску азоту 0,05 Па, розраховано пористість покриття. Результати можуть бути використані при управлінні густиною іонного струму уздовж поверхні підкладок значної площини.

Ключові слова: плазмово-іонна обробка, властивості покриттів

The influence of the ion current density on the parameters of vacuum-plasma coatings on cemented carbide cutting tool

Influence of ion current density on the thickness of coating deposited in the vacuum arc setup has been investigated to optimize the coating porosity at the ion current density control. TiN coatings were deposited onto cutting inserts placed at different locations on the substrate, and SEM technique was used to characterize surfaces of the coatings. It was found that low-dense coatings were formed at the decreased ion current density. The cutting inserts were tested by lathe machining of steel 40X. A quantitative dependence of the coating thickness on the ion current density in the range of 17 to 50 A/m² were obtained for the films deposited at substrate bias of 200 V and nitrogen pressure 0.05 Pa, and the coating porosity was calculated. The results may be useful for controlling ion flux distribution over the large substrates.

Keywords: plasma-ion treatment, the properties of coatings