

НАНОСТРУКТУРНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ (Ti,N)Cu, ОСАЖДЕННЫЕ ИЗ СЕПАРИРОВАННОЙ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ

С.Д. Латушкина¹, Д.В. Куис², И.М. Романов¹, А.Г. Жижченко¹,
О.И. Посылкина¹, О.Ю. Пискунова²

¹ Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

² Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь; dmitrykuis@mail.ru

Приведены результаты исследования структуры и физико-механических свойств TiN/Cu-покрытий, осажденных из двух источников сепарированной плазмы вакуумной дуги при различных технологических условиях.

Работоспособность режущего инструмента можно повысить за счет нанесения покрытий на инструментальный материал, что обеспечит создание на рабочих поверхностях инструмента необходимого комплекса свойств с сохранением исходных в объеме инструментального материала.

С применением износостойких высокотвердых покрытий можно снизить абразивный, диффузионный и адгезионно-усталостный износ инструментального материала, причем низкий коэффициент трения также обеспечивает быстрое удаление раскаленной стружки [1 – 3]. При увеличении скорости резания основными факторами, определяющими увеличение стойкости инструмента с покрытием, становятся термостабильность фазового состояния и его сопротивление окислению.

Наиболее перспективным на сегодняшний день является использование вакуумно-плазменных методов нанесения покрытий. Например, при вакуумно-дуговом осаждении (PVD-методы) формирование покрытия происходит в высокоионизированном потоке низкотемпературной плазмы. Использование реакционных газов (азота, метана, ацетилена и др.) в условиях ионной бомбардировки приводит к конденсации покрытия сложного состава на обрабатываемой поверхности благодаря протеканию плазмохимических реакций [4, 5]. Важ-

ное преимущество метода – низкий температурный режим процесса, что позволяет наносить защитные покрытия как на твердосплавный, так и на инструмент из быстрорежущей стали.

В настоящее время активно развиваются научные технологические основы осаждения многокомпонентных наноразмерных покрытий на базе нитрида титана, легированного В, С, Al, Si, Cu или Cr, которые, обладая повышенной твердостью, позволяют увеличить стойкость и улучшить эксплуатационные свойства изделий [6 – 9].

В данной работе проводилось исследование физико-механических свойств вакуумно-плазменного многокомпонентного покрытия на основе TiN, легированного Cu с целью определения оптимальной концентрации легирующего компонента, обеспечивающего повышение защитных свойств покрытий.

Для формирования многокомпонентного покрытия использовалась вакуумно-дуговая модернизированная установка УРМЗ.279.048, оснащенная сепаратором макрочастиц [10]. Для получения покрытия использовались катоды из титана и меди. В качестве реакционного газа был выбран азот. Изменение фазового состава покрытия обеспечивалось изменением тока дугового разряда на дополнительном катоде (медном). Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ покрытий с различным содержанием меди проводился с помощью дифрактометра ДРОН-3 в интервале углов $\sim 30 - 120^\circ$ в фильтрованном Cu-K_α -излучении. Использование основных характеристик дифракционных максимумов позволило рассчитать параметр решетки (d), размер областей когерентного рассеяния (L). Поверхность и структура пленок исследовалась на растровом электронном микроскопе РЭМ S-4800 Hitachi. Состав покрытий определялся электронным микроскопом EPMA, JEOL, JXA 8500-F. Трибологические свойства осажденных покрытий определяли на трибометре при следующих параметрах: контртело – шарик $\varnothing 5,5$ мм, изготовленный из стали ШХ15, нагрузка на контртело 0,4 Н, скорость 120 об/мин, радиус 10 мм, время испытания 1 – 8 ч. Микротвердость покрытия измеряли на микротвердомере Duramin при нагрузке 25 г.

Как показали оптические исследования структуры и морфологии осажденного покрытия, использование сепарирующей системы дало возможность осаждать покрытие без макрочастиц, отрицательно влияющих на физико-механические свойства конденсата.

Исследование влияния технологических параметров на свой-

ства осаждаемого покрытия позволило установить зависимости размера зерна, микротвердости от элементного состава материала покрытия (таблица).

Структурные и механические характеристики покрытия TiN/Cu ($I = 55$ А – ток титанового катода, $P = 60$ Па)

I, А медного катода	%		d, нм	L, нм	H, нм
	Ti	Cu			
40	98,0	2,0	0,424	22	40
55	95,0	5,0	0,424	30	35
60	85,0	15,0	0,424	76	17

Согласно анализу полученных результатов, можно предположить, что повышенные значения периода решетки для покрытий системы TiN/Cu по сравнению с TiN обусловлены высоким уровнем сжимающих напряжений в сформированных покрытиях.

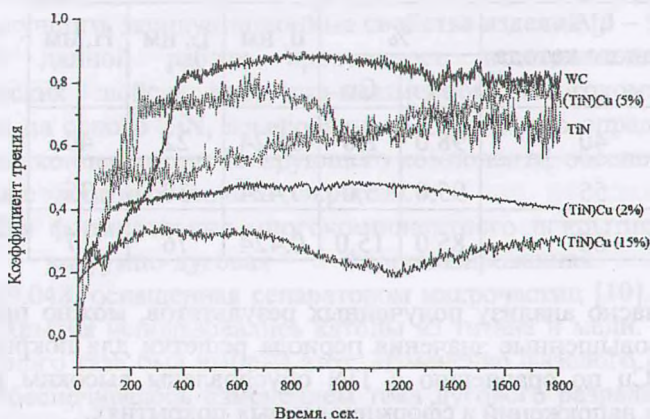
Установлено, что изменение размера зерна существенно влияет на микротвердость формируемых покрытий, что соответствует многочисленным литературным данным [11–14].

Как показали эксперименты, с увеличением концентрации меди в покрытии с 2 до 15 % размер зерна (областей когерентного рассеяния) в покрытиях увеличивается с 22 до 76 нм. При этом их микротвердость изменяется от 40 до 17 ГПа.

Известно, что границы зерен являются двухмерными дефектами, имеющими макроскопические размеры двух измерений. Высокая дефектность материала зернограничного слоя, обусловленная плохим сопряжением соседних зерен, способствует облегчению в зернограничных областях процессов сегрегации примесных элементов, зарождению и росту новых фаз. Предполагается, что время, за которое атомы меди образуют вокруг растущего кристаллита TiN замкнутую оболочку, и определяет время роста кристаллита, соответственно и его размер [15]. Ограниченная смешиваемость титана и меди при температурных условиях осаждения (не выше 500 °С) должна препятствовать миграции границ и росту зерен. В то же время эффективность закреп-

ления границ зерен определяется как размером частиц, так и объемной долей частиц второй фазы [16].

Такие структурные особенности формируемых покрытий должны существенно изменять их эксплуатационные характеристики. Для подтверждения этих выводов проводились исследования фрикционных свойств осаждаемого покрытия (рисунок).



Зависимость коэффициента сухого трения по стали покрытий различного состава от времени испытаний

Согласно полученным результатам, введение легирующего элемента в покрытия TiN/Cu позволяет уменьшить коэффициент трения в 2,5 раза, по сравнению с TiN покрытиями.

Как показали проведенные исследования легирование покрытий на основе TiN медью позволяет существенно изменить механические характеристики покрытий, что должно обеспечивать повышение эксплуатационных свойств изделий с покрытиями. Однако при выборе состава материала защитного слоя всегда необходимо учитывать условия работы инструмента с покрытием, тем самым повышая эффективность его использования.

Литература

1. Sundgren, J.E. Structure and properties of TiN // Thin Solid Films. 1985. Vol. 128. Pp. 21–44.
2. Андриевский Р.А., Анисимова И.А., Анисимов В.Г. Форми-

рование структуры, микротвердости многослойных дуговых конденсатов на основе нитридов // *ФиХОМ*. 1992. № 2. С. 99–102.

3. Волосова М. А., Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровтий для применения в инструментальном производстве // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2010. № 6. С. 37–42.

4. Кунченко В.В., Андреев А.А. Карбонитриды титана, полученные вакуумно-дуговым // *ВАНТ*, Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2001. № 2 (90). С. 116–120.

5. Вершина А.К., Латушкина С.Д. Защитные Ti(NC)-покрытия, формируемые из сепарированных потоков плазмы вакуумной дуги // *Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: Сб. материалов 10-й Междунар. науч.-практ. конф. С.-Петербург, 15–18 апреля 2008 г. Ч. 2*. С. 90–95.

6. Veprek S., Veprek-Heijman M. Industrial applications of superhard nanocomposite coatings // *Surf. And Coat. Technol.* 2008. Vol. 202. Pp. 5063–5073.

7. Левашов Е.А., Штанский Д.В. Многофункциональные наноструктурированные пленки // *Успехи химии*. 2007. № 76(5). С. 501–509.

8. Васильев В. и др. Структура и твердость Ti-N и Ti-Si-N покрытий, осажденных из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы // *Вопросы атомной науки и техники*. 2009. № 2. С. 173–180.

9. PalDey S., Deevi S.C. Single Layer and Multilayer Wear Resistant Coatings of (Ti,Al)N: A Review *Materials Science and Engineering*. 2003. A 342. Pp. 58–79.

10. Латушкина С.Д. и др. Нанокompозитные покрытия (Ti,Al)N, осажденные из сепарированной вакуумно-дуговой плазмы // *Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. Навук*. 2012. № 3. С. 39–43.

11. Jeon Han G. et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-Ag-N and Ti-Cr-N superhard nanostructured coatings // *Surf. and Coat. Technol.* 2003. Vol. 174 – 175. Pp. 738–743.

12. Кунченко Ю.В. и др. Слоистые Ti-Cr-N покрытия, получаемые методом вакуумно-дугового осаждения // *ВАНТ*. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2007. № 2 (90). С. 203–214.

13. Myung H.S. et al. [et al.] Microstructure and mechanical properties of Cu doped TiN superhard nanocomposite coatings // *Surf. and*

Coat. Techn. 2003. Vol. 163-164. Pp. 591–596.

14. Латушкина С.Д. и др. Вакуумно-дуговые наноструктурные покрытия на основе нитрида титана // Перспективные материалы. 2014. № 6. С. 49–55.

15. He J.L. Structure refinement and hardness enhancement of titanium nitride films by addition of copper // Surf. and Coat. Techn. 2001. Vol. 137. Pp. 38–42.

16. Jehn H.A., Rother B. Homogeneity of multi-component PVD hard coatings deposited by multi-source arrangements/ Surface and Coatings Technology. 1999. Vol. 112. No. 1-3. Pp. 103–107.

NANOSTRUCTURED COMPOSITE (Ti,N)Cu COATINGS DEPOSITED BY SEPARATED VACUUM ARC PLASMA

**S.D. Latushkina¹, D.V. Kuis², I.M. Romanov¹, A.G. Zhzhchenko¹,
O.I. Posilkina¹, O.Yu. Piskunova²**

¹Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences
of Belarus, Minsk, Belarus

²Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

The results of structure and physical-mechanical properties investigation of TiN/Cu coatings, deposited from two separated vacuum arc plasma sources under different technological conditions are shown in this paper.