

УДК 674.055:621.934(043.3)

С. Д. Латушкина¹, И. М. Романов¹, А. Г. Жижченко¹, Д. В. Куис²,
О. Ю. Пискунова², О. И. Терещук¹, В. Ю. Гладкий¹

¹Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси

²Белорусский государственный технологический университет

УПРОЧНЕНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ОСАЖДЕНИЕМ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ TiN

Дереворежущий инструмент работает в условиях сухого трения при повышенных термомеханических нагрузках. Перспективным направлением повышения его стойкости является формирование нанокomпозиционных покрытий на его рабочей поверхности вакуумно-плазменными методами. В настоящей работе для упрочнения твердосплавных пластин для дереворежущего инструмента предложен способ формирования многокомпонентных наноразмерных покрытий на основе TiN из сепарированных плазменных потоков; в качестве легирующих элементов были выбраны Al, Cr, Cu, Zr.

Показано, что применение разработанной плазмооптической сепарирующей системы при двухкатодном распылении позволяет осаждать плотные однородные покрытия без капельных включений распыляемых металлов. В зависимости от вида и концентрации легирующего элемента шероховатость осаждаемых покрытий составила 0,1–0,2 мкм. Полученные значения в 2,5–3 раза ниже по сравнению с характеристиками покрытий, осаждаемых из несепарированных плазменных потоков. Введение легирующего элемента приводит к подавлению роста столбчатой структуры, уменьшению размера зерна основной фазы до 7–15 нм. Результатом измельчения зеренной структуры материала покрытия стало повышение микротвердости формируемых многокомпонентных покрытий, снижение коэффициента трения по сравнению с неупрочненными твердосплавными пластинами.

Улучшение физико-механических свойств твердосплавных пластин для дереворежущего инструмента за счет осаждения многокомпонентных нанокomпозиционных покрытий должно обеспечить снижение температуры в зоне резания, повышение сопротивления абразивному износу и быстрое удаление стружки из зоны обработки.

Ключевые слова: дереворежущий инструмент, покрытие, упрочнение, стойкость, легирование.

S. D. Latushkina¹, I. M. Romanov¹, A. G. Zhizhchenko¹, D. V. Kuis²,
O. Yu. Piskunova², O. I. Tereshchuk¹, V. Yu. Gladkiy¹

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

²Belarusian State Technological University

HARDENING OF CARBIDE WOOD-CUTTING TOOLS BY VACUUM PLASMA DEPOSITION OF NANOCOMPOSITE COATINGS BASED ON TiN

Wood-cutting tool works in the dry friction conditions under increased thermomechanical load. The generation of the nanocomposite coatings on its working surface by vacuum plasma technique is one of the most perspective directions for its lifetime increasing. The way of multicomponent nanosized TiN-based coatings (alloying elements Al, Cr, Cu, Zr) generation from the separated plasma flows for wood-cutting tool hardening was suggested in this work.

It's shown, that application of the developed plasma optical two-cathode separating system allows to deposit dense and uniform coatings without sputtered materials droplets. The roughness of the deposited coatings depending on the type and the alloying element concentration was in the range of 0.1–0.2 μm. The obtained values were 2.5–3 times lower in comparison with coatings, deposited from unseparated plasma flows. The addition of the alloying elements leads to the columnar structure growth interruption and the main phase grain size reduction to 7–15 nm. As a result of grain refinement the microhardness of the deposited coatings increased and the friction factor decreased in comparison with unhardened carbides.

The improvement of the physical mechanical properties of the carbide wood-cutting tools by means of multicomponent nanocomposite coatings deposition leads to the cutting area temperature decreasing, the abrasive resistance increasing and quick chip clearance from the work area.

Key words: wood-cutting tool, coating, hardening, resistance, alloying.

Введение. Общая тенденция современного деревообрабатывающего производства – увеличение производительности обработки при сокращении ее себестоимости. В этой связи обостряющаяся конкуренция превращает стойкостные характеристики режущего инструмента в решающий фактор удешевления процесса обработки. Следовательно, повышение его эксплуатационного ресурса при ужесточении режимов резания является актуальной задачей, решение которой возможно:

- совершенствованием геометрии режущей части инструмента [1];

- модифицированием свойств собственно инструментального материала изменением химического состава и структуры, используя, в частности, методы порошковой металлургии [2];

- осаждением на поверхность упрочняющих износостойких покрытий, структура, фазовый и компонентный состав которых определены спецификой технологических режимов эксплуатации, а также характеристиками обрабатываемого и инструментального материалов.

Анализ данных, опубликованных в научно-технической литературе, позволил сформулировать комплекс требований, предъявляемых к упрочняющим покрытиям для режущего инструмента:

- низкий коэффициент трения в зоне контакта с обрабатываемым материалом ($\mu = 0,10–0,60$);

- высокая и сверхвысокая твердость ($H \geq 30–50$ ГПа) в сочетании с высокими вязкостью (больше 0,8), термостойкостью и стойкостью к окислению (при температурах $T = 800–1000^\circ\text{C}$);

- низкая теплопроводность ($\lambda = 0,35–0,50$ Вт·м/К) для создания теплового барьера, направляющего выделяемое в зоне резания тепло в стружку и обрабатываемый материал;

- высокая адгезионная прочность с инструментальной подложкой ($L_c = 50–150$ Н) в сочетании с химической инертностью к инструментальному и обрабатываемому материалам;

- низкий уровень внутренних напряжений и мелкозернистость структуры с минимальным количеством дефектов, снижающая вероятность трещинообразования.

Наиболее перспективным на сегодняшний день является использование метода вакуумно-дугового осаждения покрытий, важным преимуществом которого являются возможность формировать многокомпонентные покрытия на основе тугоплавких соединений и низкий температурный режим процесса, что позволяет наносить защитные покрытия как на твердосплавный, так и на инструмент из быстрорежущей стали [3, 4].

Основная часть. Для формирования многокомпонентных покрытий на основе TiN ис-

пользовалась вакуумно-дуговая модернизированная установка УРМЗ.279.048, оснащенная сепаратором макрочастиц [5]. Покрытия формировались путем одновременного распыления двух катодов, один из которых всегда был титановым, при парциальном давлении азота в вакуумной камере $6,0 \cdot 10^{-3}$ Па. Управление фазовым составом покрытий обеспечивалось изменением тока дугового разряда на дополнительном катоде (алюминиевый, или хромовый, или циркониевый, или медный) в интервале 40–80 А. Морфология поверхности и структура пленок исследовалась на растровом электронном микроскопе РЭМ S-4800 Hitachi. Состав покрытий определялся электронным микрозондом EPMA; JEOL, JXA 8500-F. Триботехнические исследования проводили на испытательном стенде, реализующем трение по схеме «сфера – плоскость» при следующих параметрах: контртело – шарик $\varnothing 5,5$ мм, изготовленный из подшипниковой стали ШХ15, нагрузка на контртело 0,4 Н, скорость вращения образца 120 мин⁻¹, радиус контртела 10 мм, время испытаний 1 ч. Испытания проводились на воздухе при отсутствии смазки. Микротвердость покрытий измеряли на микротвердомере Duramin 5 при нагрузке 25 г. Для определения шероховатости покрытий использовался профилометр 296-й модели цеховой с цифровым отсчетом и индуктивным преобразователем. Для исследования структуры, элементного и фазового состава покрытий использовались подложки из кремния, а для определения механических характеристик – неперетачиваемые твердосплавные пластины.

В настоящее время широкое использование в качестве твердых износостойких покрытий находят покрытия на основе нитридов переходных металлов (титана, циркония, хрома), известными своими высокими механическими характеристиками – твердостью и прочностью. Однако возможность управления эволюцией структуры в процессе формирования покрытий из одного химического элемента ограничена. Кроме того, покрытия являются нестабильными при повышенных температурах, вследствие чего возникает их рекристаллизация, изменяются структура и свойства. Наиболее перспективным направлением является разработка технологии формирования нанокпозиционных покрытий вакуумно-плазменными методами [6–8].

В настоящей работе исследовались процессы осаждения многокомпонентных наноразмерных покрытий на основе TiN, в качестве легирующих элементов были выбраны Al, Cr, Cu, Zr. Отсутствие капельных включений на поверхности осаждаемых покрытий подтвердило эффективность работы сепарирующей системы (рис. 1).

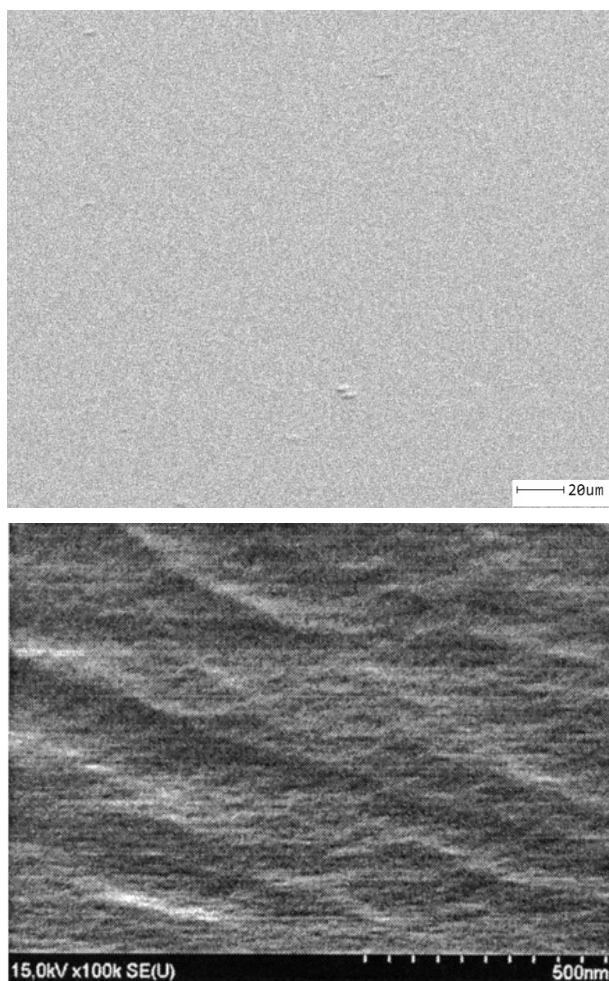


Рис. 1. Морфология поверхности многокомпонентных покрытий, осаждаемых из сепарированных плазменных потоков

Применение сепарирующей системы также позволило обеспечить шероховатость осаждаемых покрытий 0,1–0,2 мкм в зависимости от вида и концентрации легирующего элемента. Эти значения в 2,5–3 раза ниже по сравнению с характеристиками покрытий, осаждаемых из несепарированных плазменных потоков. Поверхность с высокой шероховатостью увеличивает силу трения во время процесса резания, что может привести к повышению температуры и адгезионному схватыванию в зоне контакта. Поэтому снижение шероховатости является важным с точки зрения повышения эксплуатационных свойств покрытий.

Известно, что столбчатая структура, характерная для покрытий, осаждаемых вакуумно-дуговым методом, отрицательно сказывается на их механических свойствах из-за высокой объемной доли границ с пониженной плотностью. Проведенные исследования показали, что во всех экспериментах при введении легирующего элемента происходит формирование плотной нанокристаллической структуры (рис. 2).

Сегрегация на границах зерен TiN второй нанокристаллической (в случае Al, Cr, Zr) или аморфной (в случае Cu) фаз приводит к подавлению роста столбчатой структуры, уменьшению размера зерна основной фазы. Как показали результаты расчетов по формуле Селякова – Шеррера, в зависимости от элементного состава размеры зерен в покрытиях составляют 7–15 нм.

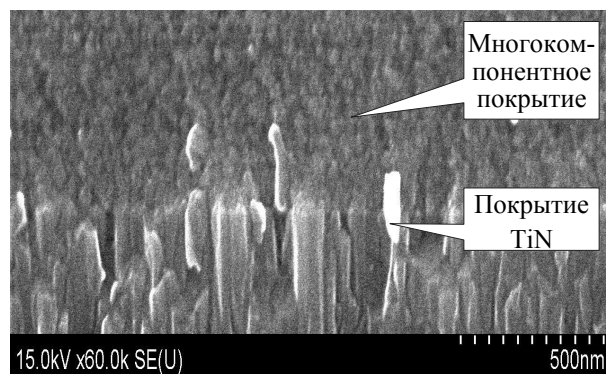


Рис. 2. Фрактограмма двухслойного покрытия

Механизм изнашивания защитных износостойких покрытий связан с адгезионными и химическими процессами, происходящими в зоне контакта с обрабатываемым материалом. Соответственно для повышения эксплуатационных свойств упрочненных изделий покрытия должны обладать высокой твердостью и низким коэффициентом трения, что возможно обеспечить за счет формирования наноструктуры конденсатов.

Установлено, что легирование нитрида титана приводит к повышению микротвердости формируемых многокомпонентных покрытий, что является результатом измельчения зеренной структуры материала покрытия (рис. 3).

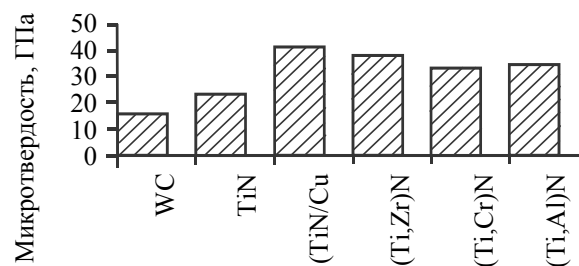


Рис. 3. Микротвердость твердосплавных пластин без покрытия и различными видами покрытий

В наноструктурных материалах с размерами зерен $d < 80\text{--}100$ нм превалирующей причиной разрушения являются процессы на межзеренных границах, что трансформирует межзеренное взаимодействие и приводит к торможению движения и генерации дислокаций, препятствуя зарождению, ветвлению и движению трещин вследствие упрочнения границ зерен [9]. При-

менение разработанных нанокристаллических высокотвердых покрытий для упрочнения рабочей поверхности инструмента должно обеспечить снижение абразивного износа инструментального материала. Трибологические испытания показали, что коэффициент трения режущих пластин с многокомпонентными покрытиями находится в пределах от 0,3 для TiN/Cu до 0,6 для (Ti,Cr)N (рис. 4), что существенно ниже в сравнении с пластинами с покрытием TiN (0,7–0,8) и с пластинами без покрытия (0,9). Уменьшение коэффициента трения твердосплавных пластин за счет осаждения многокомпонентных наноконпозиционных покрытий обеспечивает снижение температуры в зоне резания и быстрое удаление стружки из зоны обработки.

Заключение. Экспериментально показана возможность формирования из сепарированных плазменных потоков многокомпонентных наноструктурных покрытий. Синергетический эффект ультрадисперсной структуры покрытий за счет введения легирующих элементов и минимальной шероховатости вследствие уменьшения количества капельной фазы в плазменном потоке позволил существенно улучшить физико-механические свойства формируемых слоев.

Литература

1. Григорьев С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2009. 368 С.
2. Гиршов В. Л., Тополянский П. А. Металлорежущий инструмент из порошковой стали с дисперсной структурой и алмазоподобным нанопокрывтием // *Металлообработка*. 2009. № 1. С. 43–49.
3. Мрочек Ж. А., Вершина А. К., Иващенко С. А. [и др.]. Плазменно-вакуумные покрытия. Минск: Технопринт, 2004. 369 с.
4. Табаков В. П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение. 2008. 311 с.
5. Латушкина С. Д., Жижченко А. Г., Посылкина О. И., Романов И. М. Вакуумно-дуговые наноструктурные покрытия на основе нитрида титана // *Перспективные материалы*. 2014. № 6. С. 49–55.
6. Veprek S., Veprek-Heijman M. Industrial applications of superhard nanocomposite coatings // *Surf. And Coat. Technol.* 2008. Vol. 202. P. 5063–5073.
7. 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). P. 58–79.
8. Yin-Yu Chang, Da-Yung Wang. Characterization of nanocrystalline AlTiN coatings synthesized by a cathodic-arc deposition process // *Surf. Coat. Technol.* 2007. Vol. 201. P. 6699–6701.
9. Gleiter P. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // *Acta mater.* 2000. V. 48. P. 1–29.

References

1. Grigoriev S. N. *Metody povysheniya stoykosti rezhushchego instrumenta* [Methods of the cutting power increasing]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2009. 368 p.
2. Girshov V. L., Topolyanskiy P. A. The metal-cutting tool from powder steel with disperse structure and diamondlike nanocoating. *Metalloobrabotka* [Metal processing], 2009, no. 1, pp. 43–49 (in Russian).
3. Mrochek Zh. A., Vershina A. K., Ivashchenko S. A. [at al.]. *Plazmenno-vakuumnye pokrytiya* [Vacuum plasma coatings]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004. 369 p.
4. Tabakov V. P. *Formirovanie iznosostoykikh ionno-plazmennyykh pokrytiy rezhushchego instrumenta* [Generation of the wear resistant ion plasma coatings for cutting tools]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2008. 311 p.
5. Latushkina S. D., Zhizhchenko A. G., Posylkina O. I., Romanov I. M. Vacuum arc nanocrystalline TiN-based coatings. *Perspektivnyye materialy* [Perspective materials], 2014, no. 6, pp. 49–55 (in Russian).

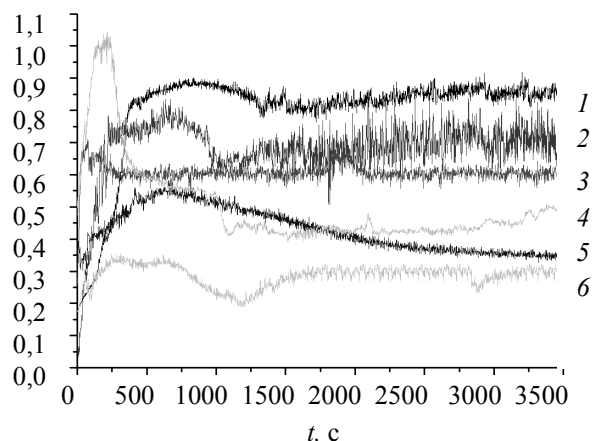


Рис. 4. Зависимость коэффициента сухого трения от времени испытания твердосплавных пластин:

- 1 – без покрытия; 2 – покрытие TiN;
3 – покрытие (Ti,Cr)N; 4 – покрытие (Ti,Al)N,
5 – покрытие (Ti,Zr)N; 6 – покрытие TiN/Cu

Применение наноконпозиционных покрытий при упрочнении дереворежущего инструмента должно повысить не только его работоспособность, но и качество обрабатываемых изделий.

6. Veprek S., Veprek-Heijman M. Industrial applications of superhard nanocomposite coatings [Surf. And Coat. Technol.], 2008, vol. 202, pp. 5063–5073.

7. 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.

8. Yin-Yu Chang, Da-Yung Wang. Characterization of nanocrystalline AlTiN coatings synthesized by a cathodic-arc deposition process [Surf. Coat. Technol.], 2007, vol. 201, pp. 6699–6701.

9. Gleiter P. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure [Acta mater], 2000, vol. 48, pp. 1–29.

Информация об авторах

Латушкина Светлана Дмитриевна – кандидат технических наук, заведующая лабораторией вакуумно-плазменных покрытий. Физико-технический институт НАН Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Республика Беларусь). E-mail: phti@tut.by

Романов Игорь Михайлович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вакуумно-плазменных покрытий. Физико-технический институт НАН Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Республика Беларусь). E-mail: phti@tut.by

Жижченко Алексей Геннадьевич – научный сотрудник лаборатории вакуумно-плазменных покрытий. Физико-технический институт НАН Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Республика Беларусь). E-mail: phti@tut.by

Куис Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и технологии металлов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: DmitryKuis@mail.ru

Пискунова Ольга Юрьевна – инженер кафедры материаловедения и технологии металлов». Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: olgurievna@mail.ru

Терещук Олег Иванович – инженер-технолог первой категории лаборатории вакуумно-плазменных покрытий. Физико-технический институт НАН Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Республика Беларусь). E-mail: phti@tut.by

Гладкий Владислав Юрьевич – инженер-технолог первой категории лаборатории вакуумно-плазменных покрытий. Физико-технический институт НАН Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Республика Беларусь). E-mail: phti@tut.by

Information about the authors

Latushkina Svetlana Dmitriyevna – Ph. D. Engineering, head of Vacuum Plasma Coatings Laboratory. Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: phti@tut.by

Romanov Igor' Mihaylovich – Ph. D. Engineering, senior research engineer of Vacuum Plasma Coatings Laboratory. Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: phti@tut.by

Zhizhchenko Aleksyey Gennad'yevich – research engineer of Vacuum Plasma Coatings Laboratory. Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: phti@tut.by.

Kuis Dmitriy Valer'yevich – Ph. D. Engineering, assistant professor, head of Department of Materials Science and Metal Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: DmitryKuis@mail.ru

Piskunova Olga Yur'yevna – engineer, Department of Department of Materials Science and Metal Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olgurievna@mail.ru

Tereshchuk Oleg Ivanovich – manufacturing engineer of Vacuum Plasma Coatings Laboratory. Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: phti@tut.by

Gladkiy Vladislav Yur'yevich – manufacturing engineer of Vacuum Plasma Coatings Laboratory. Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). Email: phti@tut.by

Поступила 20.02.2015