

УДК 621.914:674:004

В. В. Раповец, В. Т. Лукаш, М. А. Мазовка

Белорусский государственный технологический университет

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ
АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ НА НОЖАХ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО
ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА**

Статья посвящена исследованию эффективности применения износостойких алмазоподобных покрытий на ножах деревоорежущего фрезерного инструмента. В условиях интенсивной эксплуатации деревообрабатывающего оборудования ключевым фактором, влияющим на долговечность и производительность инструмента, является износостойкость режущих кромок. Использование алмазоподобных покрытий, обладающих высокой твердостью, низким коэффициентом трения и устойчивостью к абразивному износу, позволяет улучшить эксплуатационные характеристики инструмента.

Повышение износостойкости деревоорежущего инструмента является актуальной задачей для Республики Беларусь, поскольку увеличение объемов выпускаемой продукции из древесины вызывает рост объемов используемого режущего инструмента, большая часть которого закупается за границей. Это ведет к увеличению затрат валютных средств, тем самым снижая общий объем валютных поступлений от продажи изделий из древесины и древесных материалов. Таким образом, повышение износостойкости деревоорежущего инструмента является актуальной технической задачей.

Статья представляет интерес для специалистов в области деревообработки, материаловедения, механики поверхностей и проектирования режущего инструмента. Результаты исследования подтверждают перспективность использования алмазоподобных покрытий для повышения эффективности и конкурентоспособности деревоорежущего инструмента в условиях современного производства.

Ключевые слова: износостойкость, алмазоподобные покрытия, древесные материалы, резание, эксперимент.

Для цитирования: Раповец В. В., Лукаш В. Т., Мазовка М. А. Эффективность использования износостойких алмазоподобных покрытий на ножах деревоорежущего фрезерного инструмента // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 2 (294). С. 188–193.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-294-20.

V. V. Rapovets, V. T. Lukash, M. A. Mazovka

Belarusian State Technological University

**EFFICIENCY OF USING WEAR RESISTANT DIAMOND-LIKE COATINGS
ON KNIVES OF WOODWORKING MILLING TOOLS**

The article is devoted to the study of the efficiency of using wear-resistant diamond-like coatings on the knives of woodworking milling tools. Under conditions of intensive use of woodworking equipment, the key factor affecting the durability and productivity of the tool is the wear resistance of the cutting edges. The use of diamond-like coatings with high hardness, low friction coefficient and resistance to abrasive wear improves the performance characteristics of the tool.

Increasing the wear resistance of woodworking tools is an urgent task for the Republic of Belarus, since an increase in the volume of manufactured wood products leads to an increase in the volume of cutting tools used. The republic purchases most of its woodworking tools abroad. This leads to an increase in foreign exchange costs, thereby reducing the total volume of foreign exchange earnings from the sale of wood products and wood materials. Thus, increasing the wear resistance of wood-cutting tools is an urgent technical task.

The article is of interest to specialists in the field of woodworking, materials science, surface mechanics and cutting tool design. The results of the study confirm the prospects of using diamond-like coatings to improve the efficiency and competitiveness of wood-cutting tools in modern production conditions.

Keywords: wear resistance, diamond-like coatings, wood materials, cutting, experimental research.

For citation: Rapovets V. V., Lukash V. T., Mazovka M. A. Efficiency of using wear resistant diamond-like coatings on knives of woodworking milling tools. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 2 (294), pp. 188–193 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-294-20.

Введение. На современных деревообрабатывающих и мебельных предприятиях для обработки кромок натуральной древесины и древесного материала, криволинейного раскроя, обхода по контуру изделия методом цилиндрического фрезерования применяется концевой фрезерный инструмент, оснащенный стальными и твердосплавными пластинами. Наиболее распространенными в эксплуатационном отношении являются марки быстрорежущей стали P6M5, P12, HSS и твердого сплава BK6, BK8 и BK15. Ранее выполненные исследования [1–10] показали, что применение инструментальных сталей, твердого сплава и упрочняющих технологий для создания тугоплавких покрытий на нем для процесса фрезерования древесного материала дает возможность значительно увеличить (в 5–20 раз) технологическую стойкость режущего инструмента в сравнении с износостойкостью ножей из инструментальной быстрорежущей стали.

Основная часть. Немаловажную роль в повышении технологической стойкости играют различные упрочняющие покрытия из тугоплавких материалов и алмазоподобные DLC-покрытия, полученные плазменно-ассистированными, ионно-лучевыми или гибридными методами с получением многослойных покрытий и др. [11].

Выполненный анализ литературных источников в области использования износостойких покрытий на поверхностях дереворежущего инструмента показал перспективность применения двух основных методов получения алмазоподобных DLC-покрытий: химическим осаждением на подложку из паровой фазы (CVD) и плазменным распылением графита в вакуумной камере с осаждением ионов углерода на изделия (PVD).

Технология получения алмазоподобных DLC-покрытий сводится к плазменному импульсному распылению графита в вакуумной камере и осаждению ионов углерода с достаточно большой энергией на поверхности режущего инструмента. В результате такого напыления углерода образуется аморфное покрытие, состоящее из атомов углерода как с алмазными sp^3 -, так и графитоподобными sp^2 -связями. Такие аморфные покрытия можно получать в широкой области температур, вплоть до комнатной, на различных материалах: металлах, керамике, стекле, пластических материалах.

Для получения DLC-покрытий алмазоподобного углерода на ножах концевой фрезы использовался метод физического вакуумного осаждения (PVD), основанный на создании высокоэнергетичных потоков углеродной плазмы, которая формируется импульсными дугowymi генераторами из графитовых электродов. Осаждение DLC-покрытий алмазоподобного углерода осуществлялось в вакууме. Метод позволил получить покрытия

АПУ, имеющих аморфную структуру и свойства, близкие к алмазу, с максимальным содержанием атомов углерода с sp^3 -гибридизацией валентных электронных оболочек (т. е. с алмазным типом связи).

В качестве экспериментальной базы были выбраны образцы ножей разных марок, изготовленные из твердого сплава типа BK8, на которые были нанесены алмазоподобные покрытия. В результате были сформированы износостойкие DLC-покрытия на ножах дереворежущего инструмента в двух вариациях.

DLC-покрытие 1. Получено путем осаждения покрытий алмазоподобного углерода (АПУ) в вакууме на установке вакуумного напыления УВНИПА-1-001, оборудованной источником импульсной плазмы катодно-дугового разряда, а также ионным источником ИИ-4-0,15.

Для получения покрытий алмазоподобного углерода – АПУ (diamond-like carbon – DLC) использовался метод физического вакуумного осаждения (PVD), основанный на создании высокоэнергетичных потоков углеродной плазмы, формируемой импульсными дугowymi генераторами из графитовых электродов. При бомбардировке поверхности осаждения ионами углерода с энергией 10–50 эВ в течение коротких импульсов (0,3–0,5 мсек), создаются условия, аналогичные высоким давлению и температуре, необходимые для получения алмазной фазы углерода. Особенностью процесса осаждения является импульсный режим, при котором длительность паузы между импульсами многократно превышает длительность импульсов, во время которых формируется АПУ-покрытие. В результате этого во время паузы происходит рассеивание тепла и охлаждение растущей пленки. Регулируя соотношение между длительностью импульса и паузы, можно управлять температурой нагрева поверхности осаждения покрытия АПУ. Средняя температура нагрева деталей при нанесении АПУ обычно составляет 30–150°C, что значительно ниже, чем при использовании других вакуумно-плазменных методов нанесения твердых покрытий. Благодаря этому, их можно осаждавать как на термостойкие материалы, например металлы, стекло, керамику, так и на материалы с низкой температурой структурных превращений – полимеры, бумагу, ткани. Метод позволяет получать покрытия АПУ с максимальным содержанием атомов углерода с sp^3 -гибридизацией валентных электронных оболочек (т. е. с алмазным типом связи). Такие покрытия имеют аморфную структуру и свойства, близкие к алмазу [12–14]:

- плотность 3,0–3,5 г/см³;
- микротвердость 30–80 ГПа в зависимости от условий получения и типа АПУ-покрытия;
- коэффициент сухого трения по стали 0,1–0,2;

- электрическое удельное сопротивление 10^6 – 10^{14} Ом/см;
- показатель преломления 2,4–2,6;
- прозрачность в видимой и инфракрасной областях спектра;
- химическую инертность;
- термостойкость на воздухе до 350°C;
- биологическую совместимость с живыми тканями.

После откачки вакуумной камеры до остаточного давления порядка $5 \cdot 10^{-3}$ Па выполнялась ионно-лучевая очистка поверхности датчиков ионами аргона при следующих параметрах работы ионных источников: давление аргона $1,5 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение 2,5–3,0 кВ, ускоряющий ток 40–60 мА, время обработки 40 мин.

Затем формировалось покрытие АПУ из плазмы импульсного (длительность импульса порядка 300 мкс) высокотокового (порядка 3 кА/имп.) разряда. В качестве катода использовался графит с чистотой 99,99%. Источник плазмы работал при следующих параметрах: напряжение разряда 300 В, емкость разрядной батареи 2150 мкФ, частота следования разрядных импульсов 3 Гц, общее число разрядных импульсов 7000. Толщина осажденного покрытия АПУ составила порядка 300 нм (рис. 1).



Рис. 1. Дереворежущие ножи концевой фрезы с алмазоподобным DLC-покрытием 1

Комбинированное DLC-покрытие 2. Сформировано методом осаждения покрытия алмазоподобного углерода (АПУ) в реакционной среде с использованием комбинированного способа PVD-CVD. Его сущность состоит в том, что в результате взаимодействия углеродной плазмы катодно-дугового разряда с парами углеводорода происходит деструкция органических молекул с образованием химически активных фрагментов, осаждаю-

щихся на подложке и формирующих покрытие АПУ. Это позволяет существенно повысить скорость формирования тонкопленочного материала, снизить в нем величину остаточных напряжений сжатия, без значимого ухудшения механо-трибологических характеристик. Наличие свободного водорода в области потока углеродной плазмы позволяет стабилизировать оборванные связи углеродных молекул и тем самым повысить содержание «азмазного» типа sp^3 -связей между атомами углерода в осажденном покрытии АПУ.

Для осаждения покрытия АПУ использовалась установка УВНИПА-1-002, оборудованная двумя источниками дуговой плазмы и четырьмя ионно-лучевыми источниками с анодным слоем типа «Радикал». После откачки вакуумной камеры до остаточного давления порядка $5 \cdot 10^{-3}$ Па для удаления с поверхности образцов следов органических загрязнений выполнялась ионно-лучевая очистка (ИЛО) поверхности ионами аргона при следующих параметрах работы ионных источников: давление аргона $1,5 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение 3,5–4,0 кВ, ускоряющий ток 50–70 мА, время обработки 60 мин. Затем формировалось покрытие АПУ из плазмы импульсного высокотокового разряда. Источники плазмы работали при следующих параметрах: напряжение разряда 340 В, емкость разрядной батареи 2150 мкФ, общая частота следования разрядных импульсов (на два источника) 5 Гц, общее число разрядных импульсов 20 000 (по 10 000 импульсов на каждый источник). В качестве реакционного углеводородного газа использовался ацетилен, подаваемый в вакуумную камеру до давления порядка 0,1 Па. Толщина осажденного покрытия АПУ составила порядка 0,7–1,0 мкм (рис. 2).

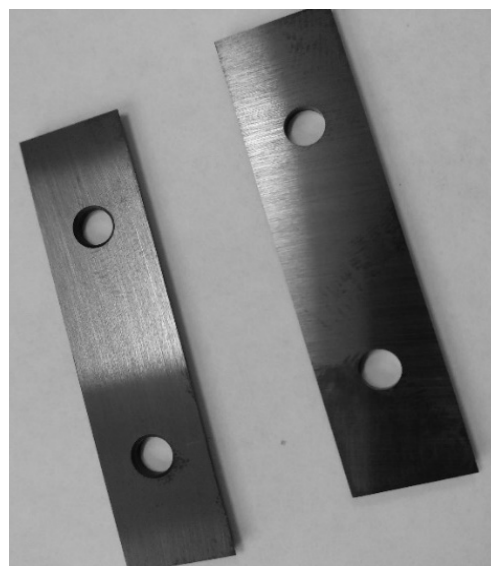


Рис. 2. Дереворежущие ножи концевой фрезы с комбинированным алмазоподобным DLC-покрытием 2

Производственные испытания технологической стойкости фрезерных ножей с алмазоподобными DLC-покрытиями в составе конструкций концевой инструмента проводились в условиях ОАО «Слониммебель» при выполнении технологической операции контурного вибрационного фрезерования материала МДФ на машине Biesse Rover A4.30 (рис. 3).



Рис. 3. Машина Biesse Rover A4.30 с числовым программным управлением

Обоснованным технологическим режимом обработки материала ножами с DLC-покрытием по критерию требуемой производительности принят следующий: обрабатываемый материал MDF толщиной 22–44 мм; диаметр резания 25 мм, частота вращения инструмента 18 000 мин⁻¹, скорость подачи 4 м/мин, частота осевого перемещения 10 Гц, амплитуда колебаний 0,2 мм.

Результаты экспериментальных исследований показали значительное повышение технологической стойкости ножей с алмазоподобными DLC-покрытиями. В таблице приведены результаты сравнения технологической стойкости фрезерных ножей с алмазоподобным DLC-покрытием и без него.

Сравнительная характеристика износостойкости ножей

Наименование экспериментального образца	Суммарный путь резания, п. м
Нож BK8 без покрытия	1052
Нож BK8 с DLC-покрытием 1	3216
Нож BK8 с комбинированным DLC-покрытием 2	2401

Из таблицы видно, что использование алмазоподобных покрытий увеличивает технологическую стойкость ножей из твердого сплава BK8 в 2,4–3,2 раза. Кроме того, за счет снижения коэффициента трения на поверхности ножа снижается мощность на резание, что согласуется с наблюдениями о повышении производительности обработки. Обычно повышенная долговечность и эффективность процесса резания имеют прямое влияние на экономические показатели предприятий [15].

Заключение. Экспериментальные исследования технологической стойкости инструмента в производственных условиях деревообрабатывающего предприятия показали, что применение алмазоподобных DLC-покрытий на ножах дереворежущего инструмента значительно повышает их технологическую стойкость и эффективность работы. Увеличение суммарного пути резания до 3216 п. м в сравнении с 1052 п. м без покрытия является убедительным показателем эффективности применяемой технологии использования DLC-покрытий на ножах дереворежущего инструмента.

Долговечность и высокая производительность режущего инструмента при его эффективной эксплуатации позволит предприятиям снизить затраты на переподготовку инструментов к работе и повысить качество обработки изделий, что в свою очередь будет способствовать улучшению конкурентоспособности получения готовой продукции.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на использование различных комбинаций алмазоподобных DLC-покрытий и их сочетаний с другими методами обработки, что позволит углубить понимание физических процессов, происходящих при резании древесины.

Список литературы

1. Эффективность применения TiN-, ZrN-, Ti-Zr-N- и Ti-покрытий на твердосплавных резцах при обработке ламинированных древесно-стружечных плит концевыми фрезами / А. А. Гришкевич [и др.] // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. 2008. Вып. XVI. С. 52–54.
2. Properties of coatings based on Cr, Ti, Mo nitrides with embedded metals deposited on cutting tools / A. K. Kuleshov // Journal of Friction and Wear. 2011. P. 192–198.
3. Способ получения износостойких сверхтвердых покрытий: пат. RU 2360032 C1 / В. С. Беляев, А. Э. Давлетшин, С. А. Плотников, И. Ш. Трахтенберг, А. Б. Владимиров. Опубл. 27.06.2009.

4. Low Friction CrN/TiN Multilayer Coatings Prepared by a Hybrid High Power Impulse Magnetron Sputtering / DC Magnetron Sputtering Deposition Technique / J. Paulitsch [et al.] // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 518. P. 5553–5557.
5. Структура и свойства многослойных систем TiN/MoN, полученных методом дугового испарения / А. Д. Погребняк [и др.] // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2015. № 48. С. 222–228.
6. Nano-Structured CrN/AlN Multilayer Coatings Synthesized by Pulsed Closed Field Unbalanced Magnetron Sputtering / J. Lin [et al.] // *Surf. Coat. Technol.* 2009. Vol. 204. P. 936–940.
7. Veprek S., Veprek-Heijman M. J. G. Industrial application of superhard nanocomposite coatings // *Surface and Coating Technology*. 2008. Vol. 202. P. 5063–5073.
8. The effect of temperature on wear mechanism of the AlCrN coated components / M. Michalak [et al.] // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 674. P. 233–238.
9. The Leitz Lexicon. Handbook for woodworking machine tools. Edition 4. Oberkochen: Gerb. Leitz GmbH & Co, 2011. 832 p.
10. Раповец В. В. Повышение периода стойкости режущего инструмента фрезерно-брусующих станков при использовании твердого сплава в конструкциях двухлезвийных ножей // *Труды БГТУ*. 2014. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 152–154.
11. Боровиков С. М., Ридаль Р. В., Терещук О. И. Методы нанесения DLC-покрытий // *Молодой ученый*. 2021. № 43 (385). С. 16–19.
12. Voevodin A. A., Zabinski J. S. Superhard, functionally gradient, nanolayered and nanocomposite diamond-like carbon coatings for wear protection // *Diamond and Related Materials*. 2000. No. 9 (2). P. 162–171.
13. Tribological properties of DLC coatings in combination with biodegradable oils / B. Podgornik B [et al.] // *Tribology International*. 2012. No. 46. P. 58–66.
14. Properties of tetrahedral amorphous carbon prepared by vacuum arc deposition / B. Tay K. [et al.] // *Diamond and Related Materials*. 1999. No. 8 (2-5). P. 377–381.
15. Методика расчета мощности в программной среде LS-DYNA через мгновенные значения сил и скоростей резания при фрезеровании древесины / В. В. Раповец [и др.] // *Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов*. 2018. № 2 (210). С. 290–295.

References

1. Grishkevich A. A., Chaevsky V. V., Uglov V. V., Kuleshov A. K. Efficiency of using TiN, ZrN, Ti–Zr–N and Ti coatings on carbide cutters during processing of laminated chipboards with end mills. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series VI, Physics and Mathematics Informatics, 2008, issue XVI, pp. 52–54 (In Russian).
2. Kuleshov A. K., Uglov V. V., Chaevski V. V., Anishcik V. M. Properties of coatings based on Cr, Ti, Mo nitrides with embedded metals deposited on cutting tools. *Journal of Friction and Wear*, 2011, vol. 32, no. 3, pp. 192–198.
3. Belyaev V. S. Method for producing wear-resistant superhard coatings. Patent RU 2360032, 2009 (In Russian).
4. Paulitsch J., Schenkel M., Schintlmeister A., Hutter H., Mayrhofer P. H. Low Friction CrN/TiN Multilayer Coatings Prepared by a Hybrid High Power Impulse Magnetron Sputtering / DC Magnetron Sputtering Deposition Technique. *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, pp. 5553–5557.
5. Pogrebnyak A. D., Eyidi D., Abadias G., Bondar O. V., Beresnev V. M., Sobol O. V. Structure and properties of multilayer TiN/MoN systems obtained by arc evaporation. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 2015, no. 48, pp. 222–228 (In Russian).
6. Lin J., Moore J. J., Mishra B., Pinkas M., Sproul W. D. Nano-Structured CrN/AlN Multilayer Coatings Synthesized by Pulsed Closed Field Unbalanced Magnetron Sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 2009, vol. 204, pp. 936–940.
7. Veprek S., Veprek-Heijman M. J. G. Industrial application of superhard nanocomposite coatings. *Surface and Coating Technology*, 2008, vol. 202, pp. 5063–5073.
8. Michalak M., Michalczewski R., Osuch-Słomka E., Maldonado-Corte's D., Szczerek M. The effect of temperature on wear mechanism of the AlCrN coated components. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 674, pp. 233–238.
9. The Leitz Lexicon. Handbook for woodworking machine tools. Edition 4. Oberkochen, Gerb. Leitz GmbH & Co Publ., 2011. 832 p.
10. Rapovets V. V. Increasing the service life of the cutting tool of milling and canting machines using hard alloy in the designs of double-blade knives. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forestry and Woodworking Industry, pp. 152–154 (In Russian).

11. Borovikov S. M., Pigal R. V., Tereshchuk O. I. Methods of applying DLC-coatings. *Molodoy uchenyy*, [Young scientist], 2021, no. 43 (385), pp. 16–19 (In Russian).
12. Voevodin A. A., Zabinski J. S. Superhard, functionally gradient, nanolayered and nanocomposite diamond-like carbon coatings for wear protection. *Diamond and Related Materials*, 2000, no. 9 (2), pp. 162–171.
13. Podgornik B. Tribological properties of DLC coatings in combination with biodegradable oils. *Tribology International*, 2012, no. 46, pp. 58–66.
14. Tay B. K. Properties of tetrahedral amorphous carbon prepared by vacuum arc deposition. *Diamond and Related Materials*, 1999, no. 8 (2-5), pp. 377–381.
15. Rapovets V. V., Klepatsky I. K., Medvedev S. V., Ivanets G. G. Methodology for calculating power in the LS-DYNA software environment through instantaneous values of cutting forces and speeds during wood milling. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2018, no. 2 (210), pp. 290–295 (In Russian).

Информация об авторах

Раповец Вячеслав Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: slavyan_r@mail.ru

Лукаш Валерий Тадеушевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lukash_valeriyy@rambler.ru

Мазовка Мирон Александрович – студент. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Rapovets Vyacheslav Valerievich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: slavyan_r@mail.ru

Lukash Valery Tadeushevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lukash_valeriyy@rambler.ru

Mazovka Miron Aleksandrovich – student. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus).

Поступила 18.03.2025