

АДГЕЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХТВЕРДЫХ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ АЛТИНОВ

**Чекан¹ Н. М., Овчинников² Е. В., Акула³ И. П., Веремейчик⁴ А. И.
Огородников⁵ А. В., Хвисевич⁶ В. М.**

¹ К. ф.-м. н., заведующий лабораторией наноматериалов и ионно-плазменных процессов
ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»,
Минск, Беларусь, res@bas-net.by

² Д. т. н., профессор кафедры машиноведения и технической
эксплуатации автомобилей УО «Гродненский государственный
университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, ovchin@grsu.by

³ К. т. н., ведущий научный сотрудник лаборатории наноматериалов
и ионно-плазменных процессов ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»
Минск, Беларусь, shark@phti.by

⁴ К. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики
УО «Брестский государственный технический университет»
Брест, Беларусь, vai_mrtm@bstu.by

⁵ Заведующий лабораторией кафедры архитектуры и строительства
УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»
Гродно, Беларусь, Ogorodnikov_AV@grsu.by

⁶ К. т. н., доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной механики
УО «Брестский государственный технический университет»
Брест, Беларусь, vmhvisevich@bstu.by

Сочетание высокой износостойкости и прочности быстрорежущих сталей обусловлено высокими требованиями к режущему инструменту, используемому для обработки твердых и сверхтвердых материалов, применяемых при производстве различных деталей машин и механизмов [1–4]. При механообработке изделий как передняя, так и задняя поверхности режущего инструмента подвергаются высокоабразивному износу, вызванному наличием мелкодисперсных карбидов в стали [5]. На механизм абразивного износа дополнительно оказывают влияние адгезия и трибохимические реакции, которые могут привести к образованию нароста на кромке металлообрабатывающего инструмента [1]. В частности, наличие высоких температур и окислительных процессов, наблюдаемых в процессе резания, предъявляют высокие требования к металлообрабатывающим инструментам в отношении термической стабильности [5, 6]. Функция антифрикционного сверхтвердого покрытия заключается в разделении обрабатываемой заготовки инструмента во время процесса резания. Это минимизирует повреждение инструмента из-за адгезии, трения, диффузии и окисления [7]. Система покрытия (Ti,Al,Si)(C,N) была разработана с учетом стойкости к окислению и износу при металлообработке различных типов стали. Данный тип покрытий основан на тройной системе (Ti,Al)N, которая модифицирована добавлением кремния, углерода, фтора и представляет собой многообещающее решение для получения износостойких защитных покрытий, применяемых для модифицирования

металлообрабатывающего инструмента при высокопроизводительных процессах обработки черных металлов методом резания [8–10]. Добавление кремния с содержанием примерно $\text{Si} = 5$ ат. % приводит к образованию аморфной матрицы, содержащей нитрид кремния (Si_3N_4), который прерывает рост $(\text{Ti,Al,N})(\text{C})$ -кристаллитов и, таким образом, уменьшает размер их кристаллов. Покрытие состоит из наночастиц $(\text{Ti,Al,Si})(\text{N,C})$ с размерами зерен $d < 20$ нм, которые внедрены преимущественно в аморфную матрицу Si_3N_4 . Благодаря высокой дисперсности зерен и адгезионной прочности между нанозернами и аморфной матрицей, покрытия обладают повышенной твердостью по сравнению сополикристаллическими покрытиями с сопоставимым химическим составом [12, 13]. Одним из вариантов создания высокотвердых, высокотемпературных покрытий на основе алтинов является добавление хрома. Такой подход позволяет увеличивать метастабильную растворимость гексагонального AlN в кубическом $(\text{Ti,Al})\text{N}$ [11]. Таким образом, можно достичь лучшей высокотемпературной прочности $(\text{Ti,Al,Cr,Si})\text{N}$ [8]. Кроме того, аморфная матрица Si_3N_4 предотвращает диффузию кислорода в кристаллические нанозерна. Это увеличивает неизменность фазового состава покрытий, а также и окислительную стойкость защитных слоев [14–16]. Добавляя кислород к нитридным твердым покрытиям, можно специально регулировать содержание кислорода в реакционном слое, что может повысить стойкость к окислению и адгезионную стойкость к материалу субстрата [17].

Целью исследований является изучение адгезионных характеристик покрытий на основе алтинов, модифицированных кремнием.

Композиционные покрытия на основе AlTiSi(N) наносились методом реактивного электродугового испарения на установке УВНИПА 1-001. В качестве подложек использовалась сталь 45. Поверхность подложек подвергалась закалке до HRC 50–55 и шлифовке до чистоты не ниже 11 класса. Перед нанесением проводилась чистка и нагрев поверхности образца ионами титана при следующих режимах: ток испарителя – 105–110 А; потенциал на образце –1,0 кВ. Методом скретч-анализа оценивались адгезионные характеристики вакуумных покрытий. Для исследований использовано стандартное оборудование, применяемое для проведения испытаний, в которое входит модуль для проведения измерительного царапания, исследования износа и профилометрии. Система обратной связи используется как контролирующая прилагаемую нагрузку, силу, действующую на образец, не зависящую от топографии поверхности. Процедура предварительного сканирования позволяет измерять реальную глубину проникновения при скретч-тесте для характеристики упругого восстановления, используя процедуру постсканирования [18].

Результаты исследований показали, что при изменяющейся нормальной нагрузке, действующей на индентор в диапазоне от 1 Н до 40 Н, для покрытий, полученных методом реактивного электродугового испарения, полное отслаивание покрытий AlTiSi от субстрата наблюдается в диапазоне от 12 Н до 15 Н. Покрытия состава AlTiSi(N) , сформированные при $P_{\text{N}_2} \sim 1,1 \cdot 10^{-2}$ Па, начинают отслаиваться при значениях, находящихся в области 19–20 Н. Полное отслоение покрытия от субстрата наблюдается при значениях нагрузки на алмазный

индентор ~ 23 Н. Увеличение давления газа в камере при формировании покрытий AlTiSi(N) до значений $P_{N_2} \sim 1,8 \cdot 10^{-2}$ Па и напряжение смещения $\sim$ минус 100 В, также улучшает адгезионные характеристики защитных слоев. Наблюдается увеличение значений адгезионного взаимодействия до 22–24 Н, полное разрушение покрытий происходит при значениях нагрузки 25 Н. Однако покрытие AlTiSi(N), сформированное на стали 45 при $P_{N_2} \sim 1,8 \cdot 10^{-2}$ Па и напряжении смещения $\sim$ минус 50 В обладает такими же адгезионными характеристиками, как и базовое покрытие AlTiSi.

Проведенные исследования по изучению адгезионного взаимодействия методом краевого угла смачивания и согласно стандартов по DIN 4856:2018-02 и VDI 3198 показали хорошую корреляцию результатов с данными скретч-анализа.

Список использованных источников

1. Characterization of tool wear in high-speed milling of hardened powder metallurgical steels / F. Klocke, K. Arntz, G.F. Cabral [et al.] // *Adv. Tribol.* – 2011. – Vol.1. – 1–13. – <https://doi.org/10.1155/2011/906481>.
2. Tönshoff, H. K. Cutting of hardened steel / H. K. Tönshoff, C. Arendt, R. B. // *Amor CIRP Ann.* – 2000. – Vol.1. – 547–566. – [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63455-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63455-6).
3. Denkena, B. Reduction of wear induced surface zone effects during hard turning by means of new tool geometries / B. Denkena, D. Boehnke, R. Meyer // *Prod. Eng. Res. Dev.* – 2008. – Vol.1. – 123–132. – <https://doi.org/10.1007/s11740-008-0089-1>.
4. Manufacturing of dies from hardened tool steels by 3-axis micromilling / D. Biermann, A. Baschin, E. Krebs, J. Schlenker // *Prod. Eng. Res. Dev.* – 2011. – Vol.1. – 209–217. – <https://doi.org/10.1007/s11740-010-0293-7>.
5. Weinert, K. Drehen und Fräsen pulvermetallurgischer Hartlegierungen für warmgehende Werkzeuge / K. Weinert, M. Buschka, S. Hesterberg // *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, – 2001. – Vol.1. – 434–446.
6. Wear and breakage of TiAlN- and TiSiN-coated carbide tools during high-speed milling of hardened steel / C.Y. Wang, Y.X. Xie, Z. Qin [et al.] // *Wear* 336–337. – 2015. – Vol.1. – 29–42. – <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.04.018>.
7. F. Klocke, W. König, *Fertigungsverfahren 1* (2008) 8 (9783540358343).
8. S.F. Bolz, *Abscheidung nanostrukturierter Verschleißschutzschichten für Zerspanwerkzeuge mittels Kathodenzerstäubung*, RWTH Aachen University, Shaker, Aachen, Diss, 2011 (9783844003406).
9. Y.-Y. Chang, C.-Y. Hsiao, High temperature oxidation resistance of multicomponent Cr–Ti–Al–Si–N coatings, *Surf. Coat. Technol.* 204 (2009) 992–996. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.04.009>.
10. Deposition of superhard TiAlSiN thin films by cathodic arc plasma deposition / S. K. Kim, P. V. Vinh, J. H. Kim, T. Ngoc // *Surf. Coat. Technol.* – 2005. – P. 1391–1394. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.109>.

11. Impact of Al and Cr alloying in TiN-based PVD coatings on cutting performance during machining of hard to cut materials / A. I. Kovalev, D. L. Wainstein, A. Y. Rashkovskiy [et al.] // Vacuum 84. – 2009. – 184–187. – <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.06.019>.
12. Vepřek, S. Superhard nanocrystalline composite materials / S. Vepřek, S. Reiprich, L. Shizhi // Appl. Phys. Lett. – 1995. – Vol.66.– P. 2640–2642. – <https://doi.org/10.1063/1.113110>.
13. Nanocomposite Ti–Si–N films deposited by reactive unbalanced magnetron sputtering at room temperature / N. Jiang, Y.G. Shen, Y.-W. Mai [et al.] // Mater. Sci. Eng. – 2004. – Vol.106. – P. 163–171. – <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2003.09.033>.
14. Comparative study of the tribological behaviour of superhard nanocomposite coatings nc-TiN/a-Si₃N₄ with TiN / S. Ma, J. Procházka, P. Karvánková, Q. Ma [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol.194. – P. 143–148. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.05.007>.
15. Investigation of nanocrystal-(Ti,Al)N_x/ amorphous-SiN_y composite films by co-deposition process / B.-S. Yau, J.-L. Huang, D.-F. Lii, P. Sajgalik // Surf. Coat. Technol. – 2004. – Vol. 177–178. – P. 209–214. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.09.034>.
16. Investigation of nanocrystal- (Ti_{1-x}Al_x)N_y/amorphous-Si₃N₄ nanolaminate films / B.-S. Yau, J.-L. Huang, H.-H. Lu, P. Sajgalik // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol.194. – P. 119–127. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.05.009>.
17. A contribution to explain the mechanisms of adhesive wear in plastics processing by example of polycarbonate / .K. Bobzin, T. Brögelmann, G. Grundmeier [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2017. – Vol.332. – P. 464–473. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.07.080>.
18. CSM INSTRUMENTS. Техническое описание. Микро Скретч Тестер (MST 2) / ООО «Ниеншанц-Сайнтифик». URL: http://lab-nnz.ru/wp-content/uploads/02-MST2_Technical-Features_2011-RUS.pdf.