*УДК 621.793*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК10ХОМ С PVD-ПОКРЫТИЯМИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ AL-SI-N И TI-AL-SI-N

© 2026 В.А. Гапонов, Е.С. Сотова, А.А. Кутин

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 06.10.2026

Работа посвящена сравнительному исследованию микротвердости и трибологических характеристик твердого сплава ВК10ХОМ с экспериментальными PVD-покрытиями AlTiN-G, TiAlN-ML, TiAlCrSiN и TiN, полученными методом вакуумно-дугового осаждения на установке п311 (Platit AG). Актуальность обусловлена необходимостью повышения стойкости инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов. Микротвердость измеряли методом Виккерса, трибологические испытания проводили по схеме «шар–диск» в условиях сухого трения при нагрузках 5 и 10 Н. Установлено, что наибольшая микротвердость характерна для AlTiN-G (48,0 ГПа), наименьшая — для TiAlCrSiN (22,2 ГПа). Наименьший коэффициент трения (~0,15) показали TiN и TiAlCrSiN, однако TiN сохранял работоспособность 460 с, а TiAlCrSiN — только 80 с. Покрытия системы Ti-Al-N при нагрузке 10 Н быстро разрушались; при 5 Н многослойное TiAlN-ML сохраняло устойчивый режим трения (μ ≈ 0,25), тогда как для AlTiN-G он не формировался. Выявлено отсутствие однозначной связи между микротвердостью и устойчивостью к трению, трибологическое поведение определяется совокупным влиянием состава, толщины, архитектуры и адгезии покрытия.

Ключевые слова: PVD-покрытие, вакуумно-дуговое осаждение, трибологические свойства, микротвердость, коэффициент трения, износостойкость, твердый сплав ВК10ХОМ.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-230-235
EDN: UGODUA

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSFS-2025-0010) с использованием оборудования Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН».*

## ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроение предъявляет повышенные требования к эффективности металлообработки, что напрямую связано с производительностью и стойкостью режущего инструмента [1]. В условиях обработки труднообрабатываемых материалов (титановых, никелевых сплавов, нержавеющих сталей) традиционные инструментальные материалы часто не обеспечивают необходимой долговечности [2]. Современные твердосплавные режущие пластины при обработке нержавеющих сталей, жаропрочных никелевых и титановых сплавов эксплуатируются в условиях высоких контактных давлений, циклических механических нагрузок и интенсивного тепловыделения [3]. Низкая теплопроводность и высокая химическая активность обрабатываемых материалов способствуют локализации тепла в зоне резания, развитию адгезионных процессов и ускоренному изнашиванию контактных поверхностей инструмента [4]. Применение упрочняющих покрытий, нанесенных методами физического осаждения из паровой фазы (PVD), стало ключевым технологическим решением, позволяющим в несколько раз повысить стойкость инструмента, улучшить качество обработанной поверхности и увеличить скорости резания [1–6]. В этих условиях износостойкое покрытие должно обеспечивать не только повышение твердости поверхностного слоя, но и снижение интенсивности трибологического взаимодействия в зоне контакта «инструмент – обрабатываемый материал».

Одним из эффективных способов повышения работоспособности твердосплавного инструмента является нанесение PVD-покрытий, в частности методом вакуумно-дугового осаждения. Перспективным направлением является разработка многокомпонентных и нанокомпозитных покрытий на основе нитридов переходных металлов, легированных кремнием, алюминием, хромом и другими

*Гапонов Владислав Александрович, аспирант кафедры высокоэффективных технологий обработки. E-mail: gaponov-vlad@inbox.ru*

*Сотова Екатерина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высокоэффективных технологий обработки. E-mail: e.sotova@stankin.ru*

*Кутин Андрей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий машиностроения. E-mail: a.kutin@stankin.ru*

элементами, позволяющих целенаправленно изменять их механические и трибологические характеристики [7–10]. Особый интерес представляют покрытия систем Ti-Al-Si-N и Al-Si-N, для которых введение кремния способствует формированию мелкодисперсной структуры, повышению термической стабильности и сопротивления изнашиванию [10–12].

При этом эксплуатационные свойства покрытия определяются не только его твердостью. Существенное влияние оказывают химический состав, толщина и архитектура слоя, его адгезия к твердосплавной подложке и устойчивость к локальному хрупкому разрушению [13–16]. Поэтому оценка коэффициента трения совместно с анализом продолжительности устойчивой работы покрытия позволяет более полно характеризовать его перспективность для режущего инструмента.

Целью работы является сравнительная оценка микротвердости и трибологических характеристик экспериментальных PVD-покрытий различного состава и архитектуры на твердом сплаве ВК10ХОМ в условиях сухого трения скольжения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись образцы из твердого сплава ВК10ХОМ, на которые методом вакуумно-дугового PVD-осаждения наносили градиентное покрытие AlTiN-G, многослойное TiAlN-ML, многокомпонентное TiAlCrSiN и сравнительное монослойное покрытие TiN.

Покрытия формировали на установке п311 (Platit AG, Швейцария) при температуре 400–500 °С в азотсодержащей среде с добавлением Ar с использованием катодов Ti, Al, Cr и Al-Si. В зависимости от состава и режима осаждения толщина покрытий составляла порядка 0,3–1,7 мкм. Наименьшая толщина была характерна для TiAlCrSiN около 0,3 мкм, наибольшая для TiN, около 1,7 мкм.

Микротвердость покрытий определяли методом Виккерса с использованием четырехгранной алмазной пирамиды с углом 136° между противоположными гранями. Нагрузка составляла 0,49 Н, время выдержки 10 с.

Трибологические испытания проводили на трибометре Ducom POD 4.0 по схеме «шар–диск». Контртелом служил шарик из оксида алюминия $Al_2O_3$ диаметром 6 мм. Испытания проводили в условиях сухого трения, скорость скольжения составляла 0,1 м/с, нормальная нагрузка 5 и 10 Н. Перед испытанием образцы очищали в этаноле в ультразвуковой ванне в течение 15 мин и сушили сжатым воздухом. Продолжительность испытаний заранее не задавали, испытание прекращали после разрушения или истирания покрытия.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений микротвердости исследованных покрытий приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты измерения микротвердости исследованных PVD-покрытий

| Наименование покрытия | Средняя диагональ отпечатка $d$, мкм | | | Микротвердость покрытия $H_{\mu 50}$, ГПа |
|---|---|---|---|---|
| | Образец № 1 | Образец № 2 | Образец № 3 | |
| AlTiN-G | 4,505 | 3,940 | 4,725 | 48,0 ± 7,6 |
| TiAlN-ML | 4,975 | 4,725 | 4,875 | 38,5 ± 1,6 |
| TiAlCrSiN | 6,545 | 6,345 | 6,315 | 22,2 ± 0,7 |
| TiN | 5,220 | 5,380 | 5,130 | 33,1 ± 1,3 |

Наибольшей микротвердостью обладает покрытие AlTiN-G (48,0 ± 7,6 ГПа), однако стоит отметить значительный разброс значений, что может свидетельствовать о неоднородности состава или структуры покрытия.

Покрытия TiAlN-ML и TiN демонстрируют среднюю твердость(38,5 ± 1,6 ГПа и 33,1 ± 1,3 ГПа соответственно) с малым разбросом, что указывает на их стабильность.

Наименьшую твердость показало покрытие TiAlCrSiN (22,2 ± 0,7 ГПа), при этом разброс значений минимален, что говорит о его однородности. Малое значение твердости покрытия можно объяснить его малой толщиной, так как под действием нагрузки на индентор происходит влияние материала основания на деформацию покрытия (происходит продавливание более мягкой подложки), хотя визуально «прорыва» индентором покрытия не наблюдалось.

Таким образом, наблюдаемые различия могут быть связаны с химическим составом, структурой и архитектурой сформированных покрытий.

Зависимости коэффициента трения различных покрытий от пути трения показаны на рис. 1. Исследование трибологических свойств показало, что коэффициент трения при сухом скольжении у покрытий в большей степени зависит от их химического состава, при этом толщина покрытия также играет роль. Так, меньший коэффициент трения при обоих нагрузках показали покрытия TiN и TiAlCrSiN (~0,15), при этом меньшая толщина многокомпонентного покрытия лишь сократило время его истирания (460 секунд – у TiN и 80 секунд – у TiAlCrSiN). Покрытия системы Ti-Al-N вне зависимости от их архитектуры (моно- или многослойное) при нагрузке 10 Н быстро хрупко разрушались (через 20 секунд), коэффициент трения самого покрытия установить не удалось. При нагрузке 5 Н для градиентного покрытия картина не изменилась, а коэффициент трения для многослойного покрытия TiAlN-ML составил ~0,25, что можно объяснить большим значением трещиностойкости самого покрытия.

Сопоставление результатов показывает, что в исследованной выборке не выявлено однозначного соответствия между уровнем микротвердости и устойчивостью покрытий при трении. Так, TiAlCrSiN при низком коэффициенте трения истиралось значительно раньше TiN. Это может быть связано с сочетанием меньшей толщины сформированного слоя и более низкой микротвердости данного покрытия.

Для покрытий системы Ti-Al-N также не выявлено однозначной связи между микротвердостью и устойчивостью при трении. AlTiN-G характеризовалось наиболее высокой микротвердостью, однако устойчивый режим трения для него не сформировался даже при нагрузке 5 Н. В то же время многослойное TiAlN-ML при несколько меньшей микротвердости сохраняло работоспособность при данной нагрузке. Вероятно, различия обусловлены не только механическими характеристиками, но и особенностями архитектуры покрытий, состоянием границы «покрытие – подложка», внутренними напряжениями и наличием локальных дефектов.

В целом полученные данные показывают, что трибологическое поведение PVD-покрытий определяется совокупным влиянием их состава, микротвердости, толщины и архитектуры. При этом высокая микротвердость сама по себе не обеспечивает устойчивого поведения при контактной нагрузке, поэтому для уточнения механизмов разрушения необходим комплексный анализ структуры и свойств сформированных покрытий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования позволили всесторонне оценить свойства PVD-покрытий (AlTiN-G, TiAlN-ML, TiAlCrSiN, TiN), нанесенных на твердосплавные образцы ВК10ХОМ. Основные выводы сгруппированы по ключевым характеристикам:

1. В ходе трибологических испытаний установлено, что характер изменения коэффициента трения зависит как от состава покрытия, так и от продолжительности сохранения его работоспособного состояния. По мере изнашивания покрытия коэффициент трения возрастает, поэтому для сравнительной оценки важно учитывать не только его минимальное значение, но и время устойчивой работы покрытия

2. Наименьший коэффициент трения, около 0,15, при нагрузках 5 и 10 Н характерен для покрытий TiN и TiAlCrSiN.

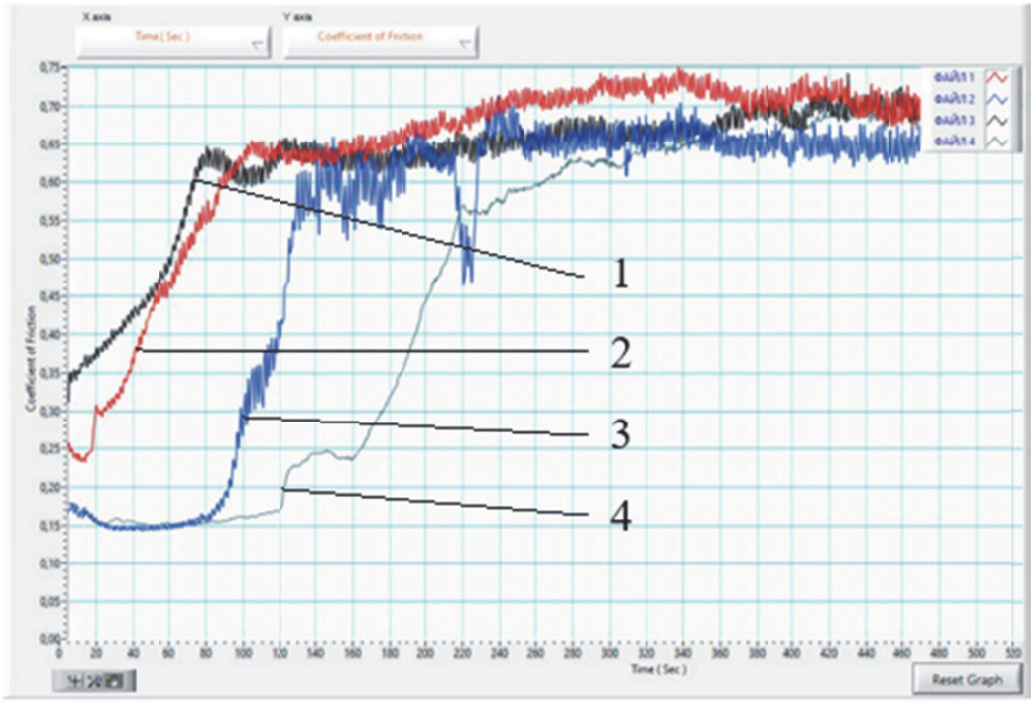
3. Выявлено, что при близких значениях коэффициента трения покрытия TiN и TiAlCrSiN отличаются продолжительностью устойчивой работы, TiAlCrSiN истирается значительно раньше TiN.

4. Показано, что снижение нагрузки до 5 Н позволяет многослойному покрытию TiAlN-ML сохранять устойчивый режим трения с коэффициентом около 0,25, тогда как для AlTiN-G устойчивый режим не формируется.

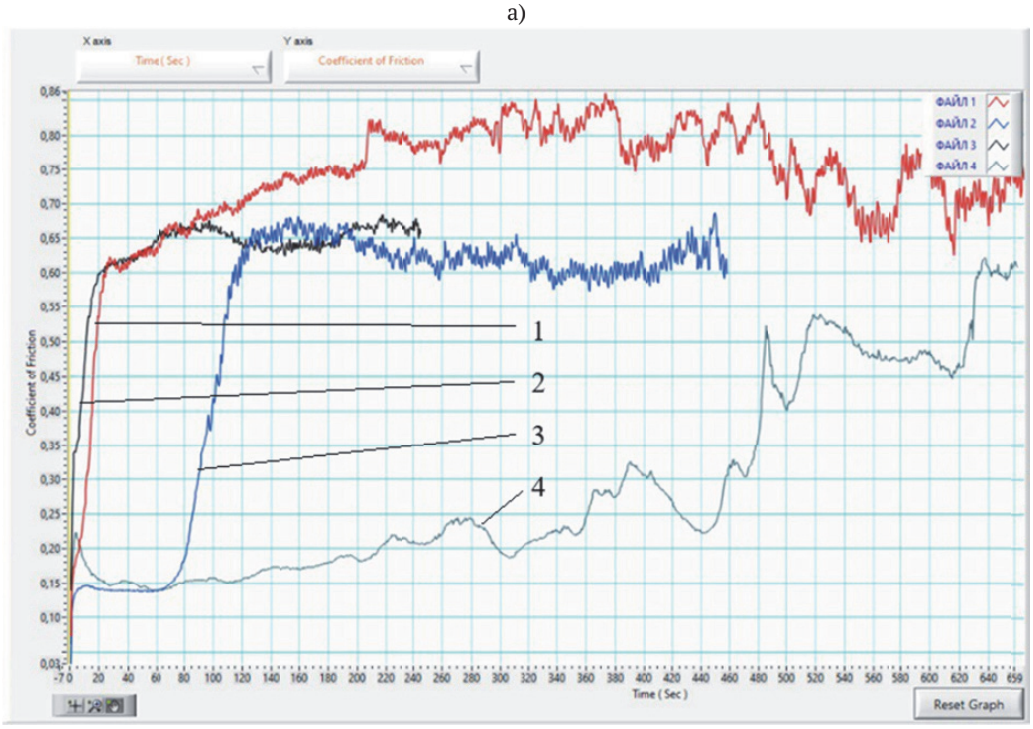
5. Установлено существенное различие микротвердости исследованных покрытий, максимальный уровень характерен для AlTiN-G, минимальный для TiAlCrSiN. При этом однозначного соответствия между микротвердостью и устойчивостью покрытия при трении в исследованной выборке не выявлено.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сульдяйкина, У.А.* Современные фрезерные режущие пластины: рынок, материалы и инновационные покрытия / Сульдяйкина У.А., Попелышкин Е.П., Сотова Е.С., Григорьев С.Н. // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2025. – № 4. – С. 100–115.
2. *Мокрицкий, Б.Я.* Инновационная технология повышения работоспособности инструмента при точении труднообрабатываемых коррозионно-стойких сталей / Б.Я. Мокрицкий, А.В. Космынин, А.В. Киричек // Вестник машиностроения. – 2024. – № 5. – С. 423–427.
3. *Григорьев, С.Н.* Высокоэффективные технологии обработки: Монография / С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, А.Р. Маслов и др. [под общ. ред. С.Н. Григорьева]. – М.: Машиностроение, 2014. – 455 с.




а)




б)

**Рис. 1.** Коэффициент трения различных покрытий при приложенной нагрузке 5 Н (а) и 10 Н (б):
1 – AlTiN-G; 2 – TiAlN-ML; 3 – TiAlCrSiN; 4 – TiN

4. *Сотова, Е.С.* Влияние состава катодов при нанесении износостойких покрытий на распределение микрокапельной фазы на поверхности образцов / Е.С Сотова., Е.П. Попелышкин, М.В. Чупров, С.В. Федоров, В.Д. Гурин, Е.Ю. Кропоткина, М.Ш. Мигранов, С.Н. Григорьев // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2025. – № 4. – С. 116–124.
5. *Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Batako A.D.L., Mokritskii B.J., Aksenenko A.Y., Sitnikov N.N.* Improvement of structure and quality of nanoscale multilayered composite coatings, deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition method // Nanomaterials and Nanotechnology. – 2017. – Vol. 7. – DOI: 10.1177/1847980416680805.
6. Vereschaka A., Tabakov V., Grigoriev S., Sitnikov N., Milovich F., Andreev N., Bublikov J. Investigation of wear mechanisms for the rake face of a cutting tool with a multilayer composite nanostructured Cr-CrN-(Ti,Cr,Al,Si)N coating in high-speed steel turning // Wear. – 2019. – V. 438–439. – Art. No 203069.
7. *Panjan P., Drnovšek A., Mahne N., Čekada M., Panjan M.* Surface Topography of PVD Hard Coatings // Coatings. 2021. Vol. 11, No. 11. Art. 1387. DOI: 10.3390/coatings11111387.

8. *Moritz Y., Kainz C., Tkadletz M., Czettl C., Pohler M., Schalk N.* Microstructure and mechanical properties of arc evaporated Ti(Al,Si)N coatings // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 421. Art. 127461. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127461.
9. *Chen L., Du Y., Wang A.J., Wang S.Q., Zhou S.Z.* Effect of Al content on microstructure and mechanical properties of Ti–Al–Si–N nanocomposite coatings // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2009. Vol. 27, No. 4. P. 718–721. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.12.002.
10. *Liu Z.R., Pei F., Chen L., Mayrhofer P.H.* Effect of Si-addition on structure and thermal stability of Ti–Al–N coatings // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 917. Art. 165483. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165483.
11. *Chang C.L., Lee J.W., Tseng M.D.* Microstructure, corrosion and tribological behaviors of TiAlSiN coatings deposited by cathodic arc plasma deposition // Thin Solid Films. 2009. Vol. 517, No. 17. P. 5231–5236. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.03.082.
12. *Tillmann W., Dildrop M.* Influence of Si content on mechanical and tribological properties of TiAlSiN PVD coatings at elevated temperatures // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 321. P. 448–454. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.014.
13. *Xian L., Fan H., Xian G., Li L., Luo Y., Zhao H.* Comparison study of the microstructure, mechanical and tribological properties of TiAlN, AlCrBN and TiAlN/AlCrBN coatings by cathodic arc evaporation // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2025. Vol. 128. Art. 107017. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.107017.
14. *Sousa V.F.C., Silva F.J.G., Alexandre R., Fecheira J.S., Silva F.P.N.* Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel // Wear. 2021. Vol. 476. Art. 203695. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203695.
15. *Sui X., Li G., Qin X., Yu H., Zhou X., Wang K., Wang Q.* Relationship of microstructure, mechanical properties and titanium cutting performance of TiAlN/TiAlSiN composite coated tool // Ceramics International. 2016. Vol. 42, No. 6. P. 7524–7532. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.01.159.
16. *Li G., Li L., Han M., Luo S., Jin J., Wang L., Gu J., Miao H.* The performance of TiAlSiN coated cemented carbide tools enhanced by inserting Ti interlayers // Metals. 2019. Vol. 9, No. 9. Art. 918. DOI: 10.3390/met9090918.

## STUDY OF THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF A HARD ALLOY VK10KHOM WITH PVD COATINGS BASED ON AL-SI AND TI-AL-SI SYSTEMS

© 2026 V.A. Gaponov, E.S. Sotova, A.A. Kutin

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

The work is devoted to a comparative study of microhardness and tribological characteristics of WC-Co carbide alloy with experimental PVD coatings AlTiN-G, TiAlN-ML, TiAlCrSiN, and TiN obtained by vacuum arc deposition using a π311 unit (Platit AG). The relevance is driven by the need to improve tool life in machining difficult-to-cut materials. Microhardness was measured by the Vickers method; tribological tests were performed using a ball-on-disc scheme under dry friction at loads of 5 and 10 N. It was found that the highest microhardness is characteristic of AlTiN-G (48.0 GPa), the lowest – of TiAlCrSiN (22.2 GPa). The lowest friction coefficient (~0.15) was shown by TiN and TiAlCrSiN; however, TiN maintained performance for 460 s, while TiAlCrSiN – only 80 s. Ti-Al-N coatings rapidly fractured at a load of 10 N; at 5 N, the multilayer TiAlN-ML retained a stable friction regime (μ ≈ 0.25), whereas for AlTiN-G it did not form. No unambiguous relationship between microhardness and friction stability was revealed; tribological behavior is determined by the combined influence of composition, thickness, architecture, and adhesion of the coating.

Keywords: PVD coating, vacuum arc deposition, tribological properties, microhardness, friction coefficient, wear resistance, WC-Co carbide alloy.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-230-235
EDN: UGODUA

## REFERENCES

1. *Sul'dyajkina, U.A.* Sovremennye frezernye rezhushchie plastiny: rynok, materialy i innovacionnye pokrytiya / Sul'dyajkina U.A., Popelyshkin E.P., Sotova E.S., Grigor'ev S.N. // Vestnik MGTU «STANKIN». – 2025. – № 4. – S. 100–115.
2. *Mokrickij, B.Ya.* Innovacionnaya tekhnologiya povysheniya rabotosposobnosti instrumenta pri tochenii trudnoobrabatyvaemyh korrozionno-stojkih stalej / B.Ya. Mokrickij, A.V. Kosmynin, A.V. Kirichek // Vestnik mashinostroeniya. – 2024. – № 5. – S. 423–427.
3. *Grigor'ev, S.N.* Vysokoeffektivnye tekhnologii obrabotki: Monografiya / S.N. Grigor'ev, M.A. Volosova, A.R. Maslov i dr. [pod obshch. red. S.N. Grigor'eva]. – M.: Mashinostroenie, 2014. – 455 s.
4. *Sotova, E.S.* Vliyanie sostava katodov pri nanesenii iznosostojkih pokrytij na raspredelenie mikrokapel'noj fazy na poverhnosti obrazcov / E.S Sotova., E.P. Popelyshkin, M.V. Chuprov, S.V. Fedorov, V.D. Gurin, E.Yu. Kropotkina, M.Sh. Migranov, S.N. Grigor'ev // Vestnik MGTU «STANKIN». – 2025. – № 4. – S. 116–124.
5. *Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Batako A.D.L., Mokritskii B.J., Aksenenko A.Y., Sitnikov N.N.* Improvement of structure and quality of nanoscale multilayered composite coatings, deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition method // Nanomaterials and Nanotechnology. – 2017. – Vol. 7. – DOI: 10.1177/1847980416680805.

6. *Vereschaka A., Tabakov V., Grigoriev S., Sitnikov N., Milovich F., Andreev N., Bublikov J.* Investigation of wear mechanisms for the rake face of a cutting tool with a multilayer composite nanostructured Cr-CrN-(Ti,Cr,Al,Si)N coating in high-speed steel turning // Wear. – 2019. – V. 438–439. – Art. No 203069.
7. *Panjan P., Drnovšek A., Mahne N., Čekada M., Panjan M.* Surface Topography of PVD Hard Coatings // Coatings. 2021. Vol. 11, No. 11. Art. 1387. DOI: 10.3390/coatings11111387.
8. *Moritz Y., Kainz C., Tkadletz M., Czettl C., Pohler M., Schalk N.* Microstructure and mechanical properties of arc evaporated Ti(Al,Si)N coatings // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 421. Art. 127461. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127461.
9. *Chen L., Du Y., Wang A.J., Wang S.Q., Zhou S.Z.* Effect of Al content on microstructure and mechanical properties of Ti–Al–Si–N nanocomposite coatings // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2009. Vol. 27, No. 4. P. 718–721. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.12.002.
10. *Liu Z.R., Pei F., Chen L., Mayrhofer P.H.* Effect of Si-addition on structure and thermal stability of Ti–Al–N coatings // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 917. Art. 165483. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165483.
11. *Chang C.L., Lee J.W., Tseng M.D.* Microstructure, corrosion and tribological behaviors of TiAlSiN coatings deposited by cathodic arc plasma deposition // Thin Solid Films. 2009. Vol. 517, No. 17. P. 5231–5236. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.03.082.
12. *Tillmann W., Dildrop M.* Influence of Si content on mechanical and tribological properties of TiAlSiN PVD coatings at elevated temperatures // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 321. P. 448–454. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.014.
13. *Xian L., Fan H., Xian G., Li L., Luo Y., Zhao H.* Comparison study of the microstructure, mechanical and tribological properties of TiAlN, AlCrBN and TiAlN/AlCrBN coatings by cathodic arc evaporation // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2025. Vol. 128. Art. 107017. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.107017.
14. *Sousa V.F.C., Silva F.J.G., Alexandre R., Fecheira J.S., Silva F.P.N.* Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel // Wear. 2021. Vol. 476. Art. 203695. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203695.
15. *Sui X., Li G., Qin X., Yu H., Zhou X., Wang K., Wang Q.* Relationship of microstructure, mechanical properties and titanium cutting performance of TiAlN/TiAlSiN composite coated tool // Ceramics International. 2016. Vol. 42, No. 6. P. 7524–7532. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.01.159.
16. *Li G., Li L., Han M., Luo S., Jin J., Wang L., Gu J., Miao H.* The performance of TiAlSiN coated cemented carbide tools enhanced by inserting Ti interlayers // Metals. 2019. Vol. 9, No. 9. Art. 918. DOI: 10.3390/met9090918.

*Vladislav Gaponov, Postgraduate Student at the Department of High Efficiency Processing Technologies.*
*E-mail: gaponov-vlad@inbox.ru*
*Ekaterina Sotova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of High Efficiency Processing Technologies. E-mail: e.sotova@stankin.ru*
*Andrey Kutin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies. E-mail: a.kutin@stankin.ru*