

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.9:621.91.01
doi: 10.30987/2782-5957-2023-4-4-10

О ПРИМЕНЕНИИ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ТОЧЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Борис Яковлевич Мокрицкий^{1✉}, Александр Витальевич Космынин², Павел Алексеевич Саблин³, Владимир Владимирович Григорьев⁴, Вадим Юрьевич Шелковников⁵

^{1,2,3,4,5} Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Россия

¹ boris@knastu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

² avkosm@knastu.ru

³ ikpmto@knastu.ru

⁴ ikpmto@knastu.ru

⁵ BETA HOS

Аннотация

Цель работы: повышение периода стойкости сменных твёрдосплавных пластин за счёт нанесения покрытий для точения труднообрабатываемых нержавеющей сталей.

Результаты исследования: разработаны рекомендации по выбору рационального покрытия металлорежущего инструмента в зависимости от условий его эксплуатации.

Выводы: Разработанные покрытия позволяют повысить период стойкости режущего инструмента до 3 раз.

В статье рассмотрены результаты применения новых разработанных покрытий на твёрдосплавном материале марки ВК8. Анализ выполнен для токарной обработки нержавеющей сталей марок 09X17H7Ю, 12X18H10Т, 13X15H5АМ-3. Выявлены наиболее рациональные покрытия, которые до 3 раз позволяют повысить период стойкости металлорежущего инструмента.

Ключевые слова: проектирование, инструменты, износостойкость, покрытие, прогнозирование, период, моделирование, процесс, резание.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393/>.

Ссылка для цитирования:

Мокрицкий Б.Я. О применении покрытий для точения нержавеющей сталей / Б.Я. Мокрицкий, А.В. Космынин, П.А. Саблин, В.В. Григорьев, В.Ю. Шелковников // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 04. – С. 4-10. doi: 10.30987/2782-5957-2023-4-4-10.

Original article
Open Access Article

ON THE USE OF COATINGS FOR TURNING STAINLESS STEELS

Boris Yakovlevich Mokritsky^{1✉}, Alexander Vitalievich Kosmynin², Pavel Alekseevich Sablin³, Vladimir Vladimirovich Grigoriev⁴, Vadim Yuryevich Shelkovnikov⁵

^{1,2,3,4,5} Komsomolsk-on-Amur State University, Russia

¹ boris@knastu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

² avkosm@knastu.ru

³ ikpmto@knastu.ru

⁴ ikpmto@knastu.ru

⁵ BETA HOS

Abstract

The study objective is to increase the durability period of replaceable carbide inserts by applying coatings for turning hard-to-machine stainless steels.

Research results: recommendations are made on the choice of a rational coating of a metal-cutting tool, depending on its operating conditions.

Conclusions: The developed coatings allow to increase the durability period of the cutting tool up to 3 times.

The paper discusses the results of applying the newly developed coatings on the hard-alloy material of BK8 brand. The analysis is done for turning stainless steels of 09X17H7Ю, 12X18H10Т, 13X15H5АМ-3 grades. The most rational coatings are found, which make it possible to increase the durability period of the metal-cutting tool up to 3 times.

Keywords: design, tools, wear resistance, coating, forecasting, period, modeling, process, cutting.

Financial Support: The research is carried out by means of the grant of the Russian Scientific Foundation No. 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393/>.

Reference for citing:

Mokritsky BYa, Kosmynin A V, Sablin PA, Grigoriev VV, Shelkovnikov VYu. On the use of coatings for turning stainless steels. *Transport Engineering*. 2023; 4:4-10. doi: 10.30987/2782-5957-2023-4-4-10.

Введение

Коррозионно-стойкие стали широко применяются в качестве конструкционных материалов для изделий, работающих в условиях агрессивной окружающей среды, особенно в условиях морской воды. Характерным примером таких сталей является сталь 09X17H7Ю, которая относится к коррозионно-стойким сталям, аустенитно-мартенситного класса. Большое количество легирующих элементов, структура затрудняет механическую обработку этой

стали, она является труднообрабатываемой. Несмотря на значительное число исследований, выполненных в данном направлении, задача повышения эффективности процесса механической обработки остается актуальной. В данной работе рассмотрены вопросы проектирования износостойких покрытий твердосплавного металлорежущего инструмента для обработки металлов на примере коррозионно-стойких сталей.

Методология исследования

В основу методологии исследования положено имитационное моделирование процесса резания в программной среде *DEFORM* [1]. В совокупности структурная схема проектирования покрытия режущего инструмента (рационального подбора износостойкого покрытия) с применением программы *DEFORM* представлена на рис. 1. Моделирование позволило на этапе про-

ектирования покрытий выявить наиболее рациональные из них, спрогнозировать период стойкости инструмента с такими покрытиями, проверить это экспериментально и рекомендовать наиболее эффективные из них. Эффективными приняты те, которые обеспечивали рост периода стойкости до 3 раз в сравнении с аналогичным инструментом без покрытия.

Обсуждение полученных результатов

Коррозионно-стойкая сталь марки 09X17H7Ю имеет достаточно высокие эксплуатационные и физико-механические свойства и плохую обрабатываемость. Из-за высокого содержания никеля (от 7 до 8 %) и хрома (от 16 до 17,5 %) резание сопровождается большими силами, температурами, что приводит к существенному снижению периода стойкости режущего инструмента. Это накладывает ограничения по применению высоких скоростей резания.

В табл. 1 приведены значения составляющих сил резания, полученных при моделировании токарной обработки в программе *DEFORM* для коррозионно-стойких сталей 09X17H7Ю, 12X18H10Т, 13X15H5АМ-3, а также титанового сплава ВТ22. Моделирование выполнено для рекомендованных режимов резания при лучистой обработке указанных материалов и нескольких вариантов архитектуры износостойких покрытий. Значения составляющих сил резания при обработке

титанового сплава ВТ22 приведены в качестве дополнительной информации, а также для оценки корректности моделирования процесса резания. Из табл. 1 видно, что значение составляющих сил резания для

титанового сплава выше, чем для нержавеющей сталей, что соответствует результатам экспериментальных исследований и говорит об адекватности результатов, полученных в ходе моделирования.

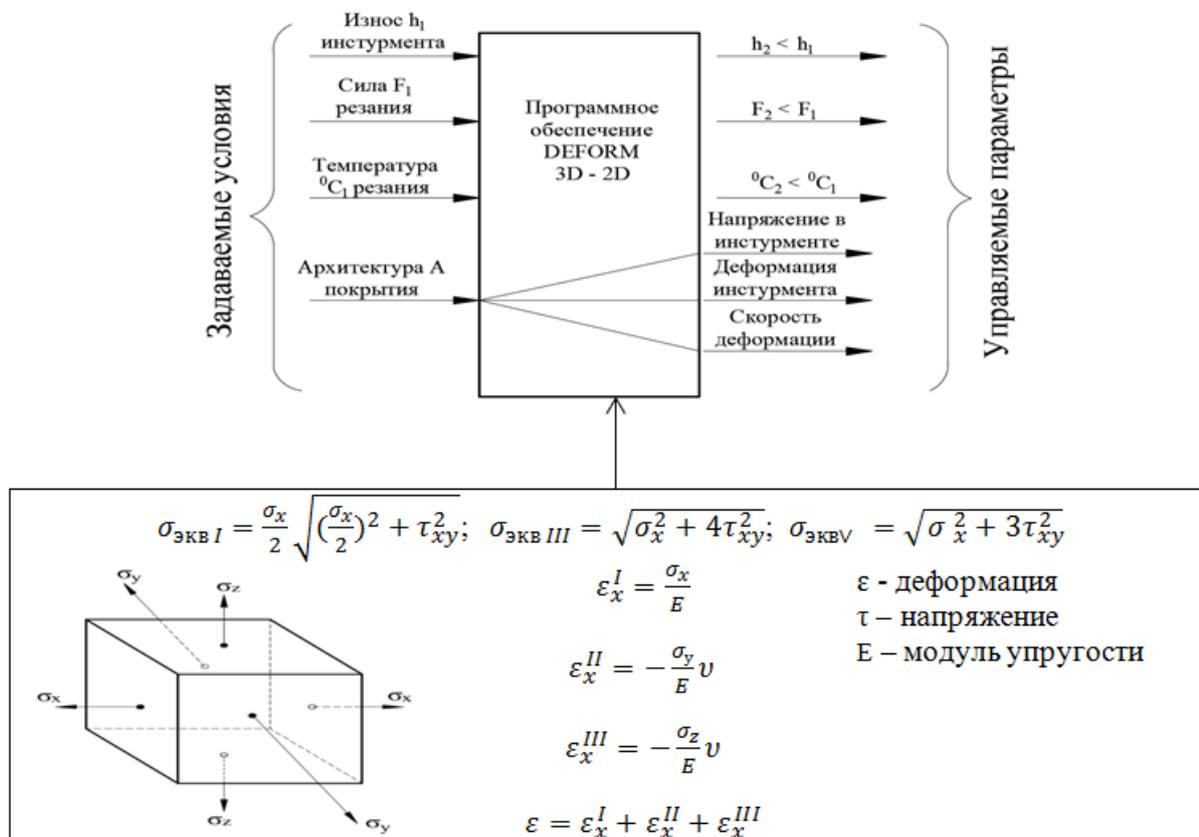


Рис. 1. Структурная схема проектирования режущего инструмента с применением программы DEFORM

Fig. 1. Block diagram of designing a cutting tool using DEFORM program

Таблица 1

Значения составляющих сил резания при токарной обработке различных материалов

Table 1

Values of cutting force components while turning various materials

Составляющие силы резания	Обрабатываемые материалы			
	09X17H7Ю	12X18H10T	13X15HAM-3	BT 22
P_x – осевая составляющая силы резания, Н	85,6	64,8	35,1	199,3
P_y – радиальная составляющая силы резания, Н	305,3	308,1	310	571
P_z – главная составляющая силы резания, Н	362,4	284,5	191,3	578,1

Из табл. 1 следует, что минимальные значения силы характерны для продольной составляющей силы резания. Они существенно меньше главных и радиальных составляющих сил, которые соизмеримы между собой. Такие соотношения характерны для реального процесса резания, что

также свидетельствует о корректности процедур моделирования.

В работе переход от силы резания к напряжениям в инструментальном материале вблизи главной режущей кромки выполнен по методике С.И. Петрушина [2, 3].

В качестве примера на рис. 2 показаны результаты пересчета сил резания в напряжения вблизи главной режущей кромки инструмента из твёрдого сплава

ВК8 (на рисунках его механические характеристики показаны позицией 11) с разными (варианты 1-10) покрытиями на нём.

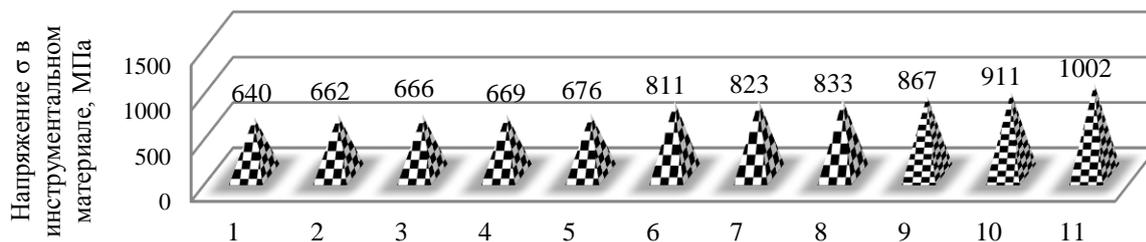


Рис. 2. Результат компьютерного моделирования величины эквивалентных напряжений в инструменте для различных инструментальных материалов (в качестве модельного обрабатываемого материала взята сталь 09X17H7Ю; режимы токарной обработки: скорость резания 50 м/мин, подача 0,21 мм/об., глубина резания 1 мм)

Fig. 2. Computer simulation result of the value of equivalent stresses in the tool for various tool materials (09X17H7Ю steel is taken as a model material to be machined; turning modes: cutting speed of 50 m/min, feed of 0.21 mm/rpm, cutting depth of 1 mm)

Износ инструмента коррелирует, как правило, с силами резания. На основе этой взаимосвязи и результатов моделирования можно прогнозировать величины износа инструментов, а также выбирать наиболее рациональные из них.

На рис. 3 показаны примеры прогнозирования периода стойкости режущих инструментов (резцов) при точении корро-

зионно-стойких сталей нескольких марок и одного из предложенных покрытий. Критерий потери работоспособности – величина износа по задней поверхности, предельное значение 0,5 мм. На рисунке показаны графики расчета ожидаемой стойкости для резцов из ВК8 без покрытия (а) и с одним из вариантов реализованного износостойкого покрытия (б).

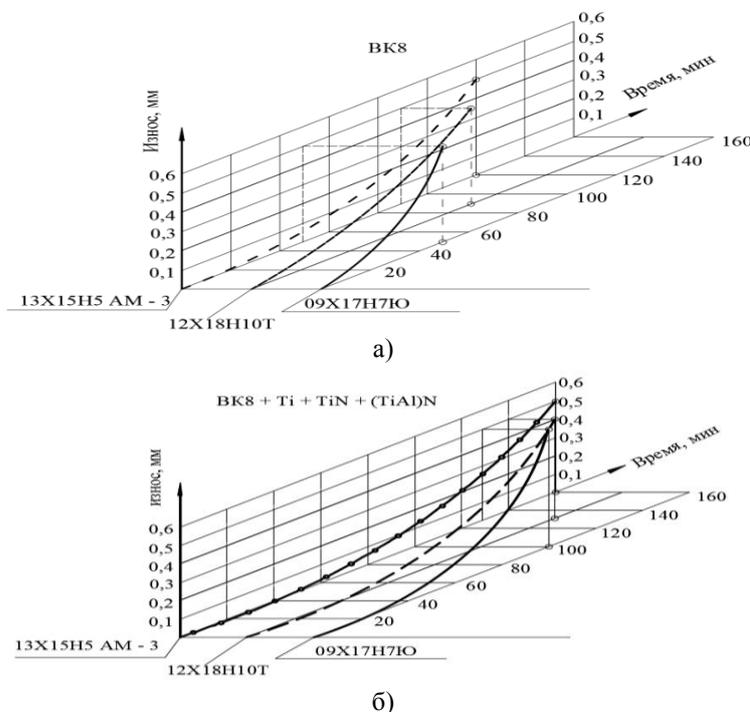


Рис. 3. График зависимости износостойкости режущего инструмента от времени работы: а – для режущего инструмента ВК8; б – для режущего инструмента ВК8 с одним из разработанных покрытий

Fig. 3. Graph of the dependence of the cutting tool wear resistance on the operating time: a – for BK8 cutting tool; b – for BK8 cutting tool with one of the developed coatings

Из рис. 3 видно, что использование износостойкого покрытия дает положительный эффект для всех трех обрабатываемых сталей. Так, например, применение инструмента BK8 с покрытием Ti + TiN + (TiAl)N позволяет увеличить период стойкости при обработке стали 13X15H5 AM-3 со 120 минут до 160 минут, а при обработ-

ке стали 12X18H10T с 90 минут до 130 минут (с покрытием).

В табл. 2 показаны результаты прогнозирования периода стойкости резца (до износа 0,5 мм по задней поверхности) для точения коррозионно-стойкой стали 09X17H7Ю при использовании различных вариантов многослойных и многокомпонентных износостойких покрытий.

Таблица 2

Период стойкости разработанных инструментов при обработке нержавеющей стали марки 09X17H7Ю (при глубине резания 1 мм, подаче 0,21 мм/об. и скорости резания 50 м/мин)

Table 2

Durability period of the developed tools when machining stainless steel of 09X17H7Ю grade (with cutting depth of 1 mm, feed of 0.21 mm/rpm and cutting speed of 50 m/min)

№ п/п	Инструмент	Период стойкости инструмента
1	BK8 с покрытием TiCN+(TiAl)N+Al ₂ O ₃ +TiC	140
2	BK8 с покрытием Al ₂ O ₃ +(Ti)CN+(TiAl)N+TiN	130
3	BK8 с покрытием (TiAl)N+Al ₂ O ₃ +(TiAl)N+Al ₂ O ₃	125
4	BK8 с покрытием TiCN+(TiAl)N+Al ₂ O ₃ +TiC	120
5	BK8 с покрытием Ti+TiN+(NbZrTiAl)N	115
6	BK8 с покрытием TiN+TiC+TiN+TiC	100
7	BK8 без покрытия	45

Результаты моделирования позволили установить вариант износостойкого покрытия, обеспечивающего наибольшее увеличение периода стойкости инструмента.

Проведенные экспериментальные исследования показали хорошее (расхождение до 7 %) совпадение расчётных и экспериментальных данных.

Заключение

В ходе работы выполнено моделирование процесса токарной обработки коррозионно-стойких сталей инструментом из твердого сплава марки BK8, в том числе с различными износостойкими покрытиями в программной среде *DEFORM*. Установлена возможность адаптирования программной среды *DEFORM* под задачи исследования влияния износостойких покрытий на параметры процесса резания и через них на период стойкости инструмента.

Проведенные экспериментальные исследования показали хорошее (расхождение до 7 %) совпадение расчётных и экспериментальных данных.

В результате моделирования спроектированы износостойкие покрытия, обеспечивающие наибольший рост периода стойкости инструмента для точения коррозионно-стойких сталей. Рациональный выбор архитектуры износостойкого покрытия позволяет обеспечить повышение периода стойкости инструмента в 3 раза, что для предприятия, связанного с обработкой та-

ких сталей, позволяет сократить расход инструмента на 40 %. При этом, при уменьшении вспомогательного времени на смену инструмента обеспечивается снижение трудоемкости и рост производительности труда.

Наибольший эффект повышения периода стойкости обеспечило использование четырехслойного многокомпонентного покрытия на базе карбонитридов и оксидов, имеющего состав и размеры: TiCN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) + Al₂O₃(5мкм) + TiC(5мкм). Экспериментальные исследования подтвердили результаты компьютерного моделирования. Они не противоречат имеющимся литературным данным [4 - 16] по эффективности покрытий для режущих инструментов, подходам к определению их структуры, толщин отдельных слоев и других характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Криворучко Д.В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы : монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого; под общ. Ред. В.А. Залого.- Сумы.: Университетская книга. 2012. – 496 с.
2. Петрушин С.И. Стружкообразование с развитой зоной пластических деформации при резании металлов/ Известия Томского политехнического университета. 2009. Т.314. №2, с. 62.
3. Петрушин С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами. – Томск: Изд-во ТПУ. 2004. – 204 с.
4. Bezyagny V.F. Similarity method in mechanical engineering technology. M.: Mechanical engineering. 2012. – 320 p.
5. Grigoriev S.N., Tabakov V.P., Volosova M.A. Technological methods of increasing the wear resistance of contact pads of cutting tools: monograph / S.N. Grigoriev, V.P. Tabakov, M.A. Volosova. – Stary Oskol: TNT, 2011, - 380 p.
6. Alexey A Vereschaka, Anatoly S Vereschaka, Andre DL Batako , Anatoliy Y Aksenenkoand, Nikolay N Sitnikov. Improvement of structure and quality of nanoscale multilayered composite coatings, deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition method// Research Article. Nanomaterials and Nanotechnology Volume 7: 1–13. 2017. DOI: 10.1177/1847980416680805 journals.sagepub.com/home/nax. SAGE.
7. Migranov M. Migranova, R. Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions. // Key Engineering Materials. Vol. 496, pp. 75-79, 2012
8. Vereschaka A.A. Migranov M.S. Study of wear resistance of sintered powder tool materials. // Advanced Materials Research. Vol. 871, pp. 159-163, 2014.
9. Grigoriev S., Vereschaka A., Milovich F., Tabakov V., Sitnikov N., Andreev N., Sviridova T., Bublikov J. Investigation of muticomponent nanolayer coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb and Al // Surface and Coating Technology. 2020. V.401. Art. No. 126258. DOI: 10.3390/coatings10121236.
10. Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Naumov A.G., Sotova E.S., Kirilov A.K., Bublikov J.I. Nanoscale multilayered composite coating – applications for ecomashining // In: Handbook of modern Coating Technologies: Applications and Development. Editors: Mahmood Aliofkhaezai Ali Nasaan Chipara Nadhira Bensaada Laidani Jeff Th.M/ De Hosson. Elsevier: Ist edition. 2021. ISBN:9780444632371.
11. Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Sitnikov N.N., Bataka A. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nano-structured coating and their influence on cutting tool life // Wear. 2017. Vol. 390-391. P.209-219. DOI: 10.1016/j.wear.2017.07.021.
12. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Improving the performance of a carbide tool by directional selection of rational parameters of the composition of a wear-resistant coating //Machines and tools. 2016. No. 3. pp. 14-18.
13. Tabakov V.P., Smirnov M.Yu., Tsikin A.V., Chikhranov A.V. Mathematical description of crack formation processes in wear-resistant coatings of cutting tools // Hardening technologies and coatings. 2007. No. 6. pp. 48-51.
14. Colding B. War characteristics of coated carbide //International Cutting Tool Bay Sandviken, Lecture. 11980. – 1969. – №. 5. – C. 1.
15. Horlin H.A. TiC coated cemented carbides - their introduction and impact on metal cutting // Product Engineering. 1971. V. 50. № 4,5. P. 153-159. DOI: 10.1049/tpe:19710023.
16. Lin Z., Wang L., Zhan J., Mao H.K., Zhao Y. Nanocrystalline tungsten carbide: As incompressible as diamond // Applied Physics Letters. 2009. 95. 211906.

REFERENCES

1. Krivoruchko DV, Zaloga VA. Modeling of cutting processes by finite element method: methodological foundations: monograph. Sumy: Universitetskaya Kniga; 2012.
2. Petrushin SI. Chip formation with a developed zone of plastic deformation during metal cutting. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2009;314(2):62.
3. Petrushin SI. Generation of geometry fundamentals by cutting blade tools. Tomsk: TPU Publishing House;2004.
4. Bezyagny VF. Similarity method in mechanical engineering technology. Moscow: Mashinostroenie; 2012.
5. Grigoriev SN, Tabakov VP, Volosova MA. Technological methods of increasing the wear resistance of contact pads of cutting tools: monograph. Stary Oskol: TNT; 2011.
6. Vereschaka AA, Vereschaka AS, Batako AD, Aksenenko AYu, Sitnikov NN. Improvement of structure and quality of nanoscale multilayered composite coatings, deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition method. Nanomaterials and Nanotechnology 2017;7:1–13. DOI: 10.1177/1847980416680805 journals.sagepub.com/home/nax. SAGE.
7. Migranov M, Migranova R. Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions. Key Engineering Materials. 2012;496:75-79.
8. Vereschaka AA, Migranov MS. Study of wear resistance of sintered powder tool materials. Advanced Materials Research. 2014;871:159-163.
9. Grigoriev S, Vereschaka A, Milovich F, Tabakov V, Sitnikov N, Andreev N, Sviridova T, Bublikov J. Investigation of muticomponent nanolayer coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb and Al. Surface

- and Coating Technology. 2020;401(126258). DOI: 10.3390/coatings10121236.
10. Vereschaka AA, Grigoriev SN, Naumov AG, Sotova ES, Kirilov AK, Bublikov JI. Nanoscale multi-layered composite coating – applications for eco-machining. In: Handbook of modern Coating Technologies: Applikations and Development. 1st ed. 2021. ISBN:9780444632371.
 11. Vereschaka AA, Grigoriev SN, Sitnikov NN, Bataka A. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nano-structured coating and their influence on cutting tool life. Wear. 2017;390-391:209-219. DOI: 10.1016/j.wear.2017.07.021.
 12. Tabakov VP, Chikhranov AV. Improving the performance of a carbide tool by directional selection of rational parameters of the composition of a wear-resistant coating. Machines and tools. 2016;3:14-18.
 13. Tabakov VP, Smirnov MYu, Tsikin AV, Chikhranov AV. Mathematical description of crack formation processes in wear-resistant coatings of cutting tools. Hardening technologies and coatings. 2007;6:48-51.
 14. Colding B. Wear characteristics of coated carbide. International Cutting Tool Bay Sandviken, Lecture. 1969;5:1.
 15. Horlin HA. TiC coated cemented carbides - their introduction and impact on metal cutting. Product Engineering. 1971;50(4,5):153-159. DOI: 10.1049/tpe:19710023.
 16. Lin Z, Wang L, Zhan J, Mao HK, Zhao Y. Nanocrystalline tungsten carbide: As incompressible as diamond. Applied Physics Letters. 2009. 95. 211906.

Информация об авторах:

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, профессор кафедры «Машиностроение», тел. +79141757562.

Космынин Александр Витальевич – доктор технических наук, проректор по науке, тел. +7914179-3482.

Mokritsky Boris Yakovlevich – Doctor of Technical Sciences, Chief Research Associate, Professor of the Department of Mechanical Engineering; phone: +79141757562.

Kosmyinin Alexander Vitalievich – Doctor of Technical Sciences, phone: +7914179-3482.

Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение», тел. 914-176-27-78.

Григорьев Владимир Владимирович – аспирант, тел. 914-183-02-99.

Шелковников Вадим Юрьевич – аспирант, тел. 914-179-66-27.

Sablin Pavel Alekseevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering; phone: 914-176-27-78.

Grigoriev Vladimir Vladimirovich – Postgraduate Student; phone: 914-183-02-99.

Shelkovnikov Vadim Yuryevich – Postgraduate Student; phone: 914-179-66-27.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 13.02.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 27.03.2023. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 13.02.2023; approved after review on 13.02.2023; accepted for publication on 27.03.2023. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.