

9. Lu H., Hua G., Li D. Dependence of the mechanical behavior of alloys on their electron work function – An alternative parameter for materials design. *Applied Physics Letters*. 2013. V. 103. No 26. URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4852675> (date accessed: 17.12.2021).

10. Bushe N.A., Kopytko V.V. *Sovmestimost trushchikhsya poverkhnostey*. [Compatibility of rubbing surfaces]. Moscow: Nauka, 1981. 127 p.

11. Hua G., Li D. Generic relation between the electron work function and Young's modulus of metals. *Applied physics letters*. 2011. V. 99. No 4. URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3614475> (date accessed: 17.12.2021).

12. Burdo G.B., Bolotov A.N. Lubricating nanooils based on organosilicon nanofluids *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No 4 (8), pp. 13–21. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 28.06.2022; после рецензирования/revised: 05.07.2022;
принята/accepted: 27.07.2022

УДК 621.914

МНОГОСЛОЙНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук, Е.В. ИСАЕВ, гл. науч. сотр.,
А.М. МИГРАНОВ, науч. сотр., И.И. МОСЕНЗ, гл. науч. сотр.,
А.С. ГУСЕВ, асп., С.С. ОПЛЕСНИН, науч. сотр.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
127994, ГСП-4, Москва, Вадковский пер., 1, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Исаев Е.В., Мигранов А.М.,
Мосенз И.И., Гусев А.С., Оплеснин С.С., 2022

Представлены результаты экспериментальных исследований износостойкости концевых фрез с многослойными композиционными покрытиями при лезвийной обработке резанием хромоникелевых сплавов, которые широко применяются в ответственных, тяжелонагруженных и высокотемпературных трибосопряжениях авиакосмической техники. Исследованы перспективные и инновационные износостойкие покрытия, полученные на различных установках и при использовании различных технологий.

Ключевые слова: концевые фрезы, многослойные композиционные покрытия, хромоникелевые сплавы, тяжелонагруженные и высокотемпературные трибосопряжения.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-30-37

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение является ключевой отраслью промышленности, так как без использования его возможностей по изготовлению необходимых деталей, изделий, оборудования не может обойтись ни одна отрасль. Ориентация отечественной

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (15), 2022*

промышленности на малооперационные, малоотходные и безотходные технологические процессы, на замену в отдельных случаях резания материалов более экономичными методами формообразования не исключает, однако, лезвийную обработку резанием, которая остается основным технологическим приемом изготовления деталей машин. Это связано, во-первых, с появлением новых материалов, трудно поддающихся обработке; во-вторых, с усложнением конструктивных форм деталей; в-третьих, с повышением требований к точности и качеству изготовления деталей и, в-четвертых, с возможностью гибкого управления обработкой резания в отличие от других методов [1, 2].

В настоящее время в машиностроении широко применяются металлорежущие станки с числовым программным управлением и автоматизированные технологические комплексы, работающие по принципу «безлюдной» технологии. Для изготовления режущих инструментов используются новые сверхтвердые композиционные материалы, синтетические и природные алмазы. Тенденции в развитии машиностроения связаны с автоматизацией производственных процессов, созданием гибких производственных систем и автоматизированных заводов и требуют поиска новых подходов к исследованию процесса резания, основанных на достижениях фундаментальных наук, а также разработки новых видов обработки резанием, режущих инструментов и станков. Все это предполагает использование достижений науки в области резания материалов и невозможно без разработки инновационных многокомпонентных износостойких покрытий и методов их получения, исследования функциональных свойств покрытий при обработке титановых, жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов. При этом для промышленного производства актуально изучение и исследование влияния того или иного покрытия режущего инструмента на показатели качества поверхностного слоя, полученного после лезвийной обработки резанием [1–5].

Целью работы является исследование износостойкости усовершенствованных многофункциональных покрытий на режущем инструменте при фрезеровании жаропрочных хромоникелевых сплавов.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для обеспечения достоверности полученных результатов экспериментальные исследования при фрезеровании выполнялись на аттестованном оборудовании. Испытания проводились на вертикально-фрезерном станке нормальной точности и жесткости модели ВМ127М отечественного производства. Устанавливались закономерности износа режущих инструментов при торцевом встречном фрезеровании твердосплавными концевыми фрезами (диаметр $d = 12$ мм; количество зубьев $z = 4$) марки Н10F (аналог ВК10 ОМ) с различными покрытиями. В качестве обрабатываемого материала использовались хромоникелевые сплавы марок ХН50МВКТЮР, ХН58МБЮД-ИД.

Исследование обрабатываемости хромоникелевых сплавов при натуральных испытаниях осуществлялось согласно рекомендациям и режимам, используемым на промышленных предприятиях: частота вращения $n = 800$ об/мин; подача $S_m = 65$ мм/мин; ширина фрезерования $a_e = 4$ мм и глубина $a_p = 1$ мм.

В процессе фрезерования для обеспечения идентичности результатов и исключения погрешностей измерения ширину фаски износа инструмента по задней поверхности измеряли с помощью отсчетного микроскопа МИР-2М с насадкой МОВ-15 точностью отсчета до 0,002 мм на рабочем месте. По достижении h_3 значений 0,35...0,4 мм для дополнительного контроля и фотофиксации картины износа

использовался универсальный моторизированный стереомикроскоп с возможностью телекоммуникации Carl Zeiss Stereo Discovery V12 с системой визуализации на базе видеокамеры модели Zeiss AxioCam 503 Color. При этом износ фрезы измерялся при определенных количествах прохода и, соответственно, длины пути резания с целью получения картины всех стадий кривой изнашивания (участков приработочного, нормального и катастрофического изнашивания).

Износостойкие покрытия наносились на трех различных установках:

Platit π311 и ННВ-6.6-И1 на базе лаборатории «Технологии нанесения покрытий и термической обработки» МГТУ «СТАНКИН» – (CrAlSi)N; (CrAlSi)N с DLC (Diamond-Like Carbon – алмазоподобное углеродное покрытие); (TiAlSi)N; (CrAlSi)N + эпилама; (CrAlSi)N с DLC + эпилама; (TiAlSi)N + эпилама; модернизированной ННВ-6.6-И1;

на модернизированной ННВ-6.6-И1 в лаборатории «Инновационных материалов и покрытий» ИКТИ РАН – (TiCrAl)N; (ZrCrAl)N; (ZrMoAl)N; (ZrMoHfCrAl)N;

Platit π411 на базе Технопарка «Авиационные технологии» – TiB₂; nACo₃; nACRo; nACo₃ + TiB₂; nACRo + TiB₂; TiB₂ + эпилама; nACo₃ + эпилама; nACRo + эпилама; nACo₃ + TiB₂ + эпилама; nACRo + TiB₂ + эпилама.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Большинство экспериментальных данных по износу и стойкости режущих инструментов получены путем непосредственного наблюдения и измерения зон износа на фрезе. При этом, как показали предварительные эксперименты и анализ литературных данных [1, 2, 4–9], в условиях полустогового резания определяющим элементом износа инструмента является фаска износа по его задней поверхности. Анализ профиля износа задней поверхности, выполненный в исследовании [1], показал, что наименьшей изменчивостью результатов характеризуется средний износ задней поверхности вдоль главной режущей кромки. Этот параметр при постоянных значениях переднего и заднего углов режущего клина отражает размерную износостойкость инструмента. Исходя из вышеизложенного, в качестве исследуемого параметра износа инструмента использовали среднюю ширину фаски износа задней поверхности (без учета выемок).

Результаты экспериментальных исследований износостойкости режущего инструмента с различными покрытиями при фрезеровании хромоникелевых сплавов представлены в виде графиков зависимости износа инструмента по задней поверхности (h_3 , мм) от суммарной длины рабочего хода фрезы (l , м) (рис. 1, 2), а также в виде диаграмм зависимости периода стойкости от покрытия, наносимого на режущий инструмент (рис. 3, 4). При фрезеровании хромоникелевых сплавов наилучшие показатели по износостойкости режущего инструмента (износ по задней поверхности, суммарная длина рабочего хода фрезы и период стойкости инструмента) обеспечивались:

для сплава ХН50МВКТЮР при использовании износостойких покрытий: улучшение на 24 % с покрытием nACo₃ + TiB₂ и на 23 % с покрытием nACRo + TiB₂ по сравнению с покрытием nACo₃;

для сплава ХН58МБЮД-ИД при использовании износостойкого покрытия: улучшение на 23 % с покрытием nACRo + TiB₂ по сравнению с покрытием nACo₃.

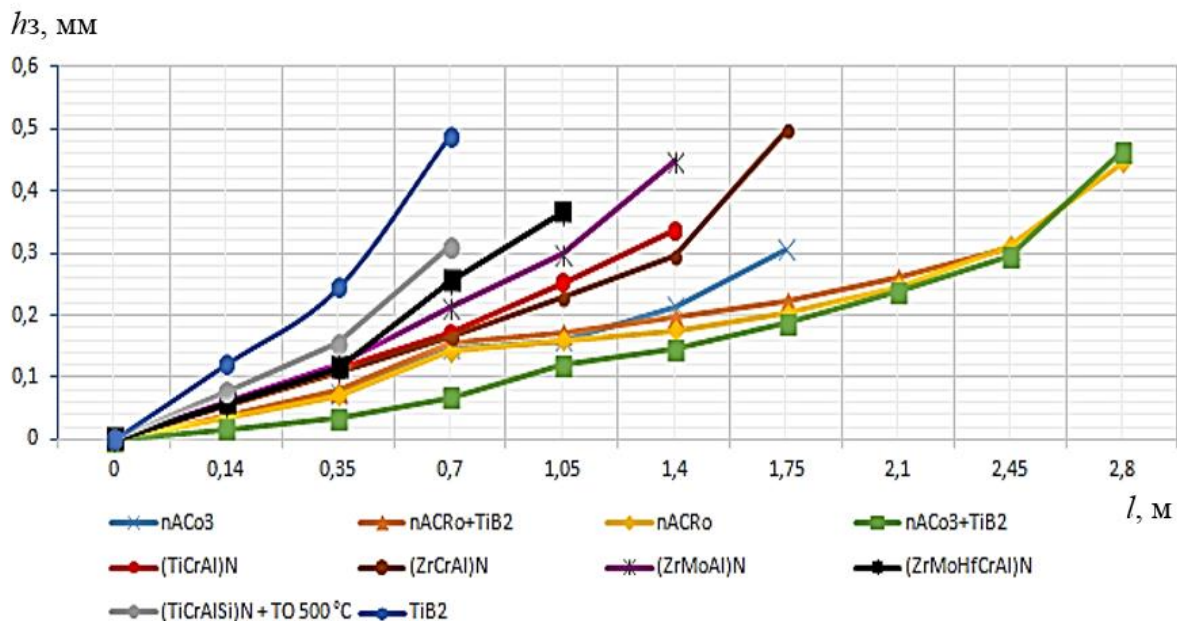


Рис. 1. Величина износа по задней поверхности при фрезеровании хромоникелевого сплава ХН50МВКТЮР твердосплавными фрезами марки Н10F (ВК10 ОМ) с различными покрытиями

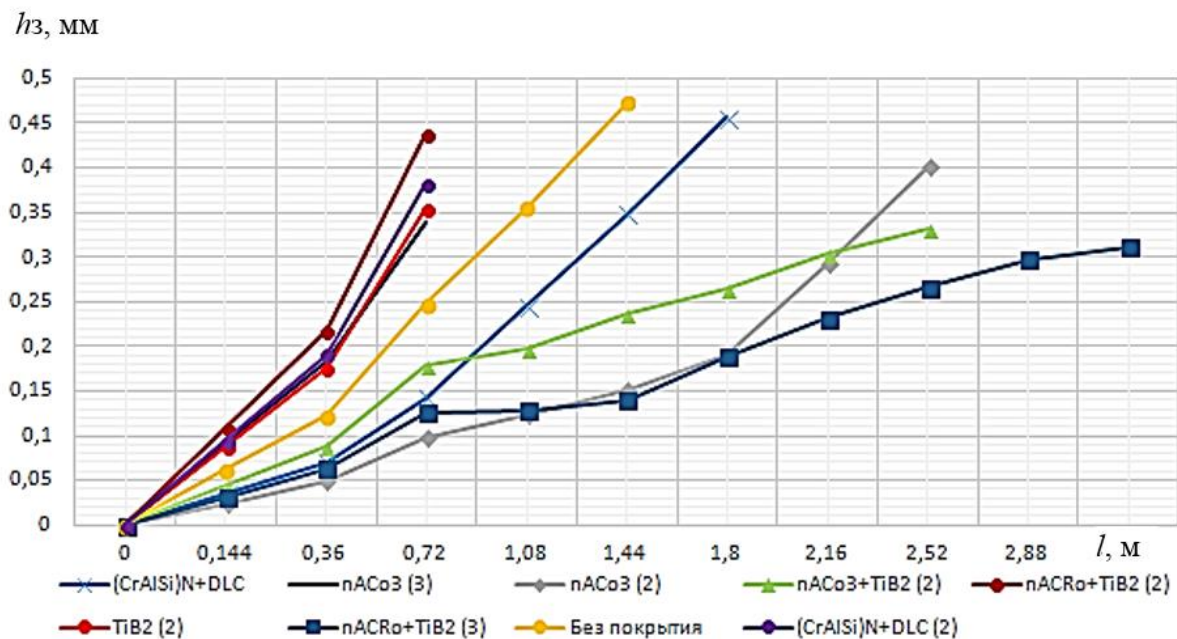


Рис. 2. Величина износа по задней поверхности при фрезеровании хромоникелевого сплава ХН58МБЮД-ИД твердосплавными фрезами марки Н10F (ВК10 ОМ) с различными покрытиями

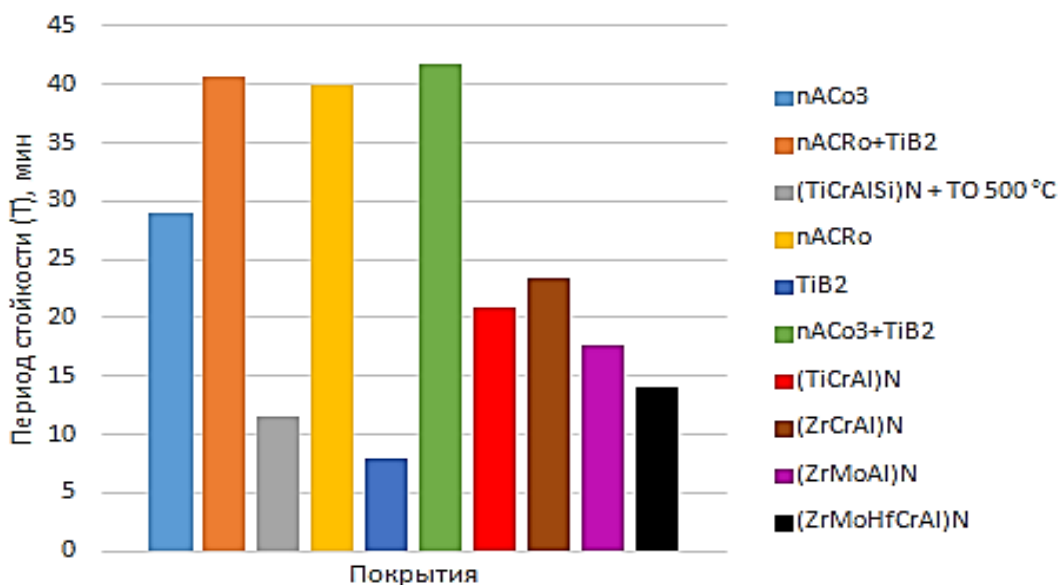


Рис. 3. Период стойкости при фрезеровании хромоникелевого сплава ХН50МВКТЮР твердосплавными фрезами марки Н10F (BK10 OM) с различными покрытиями

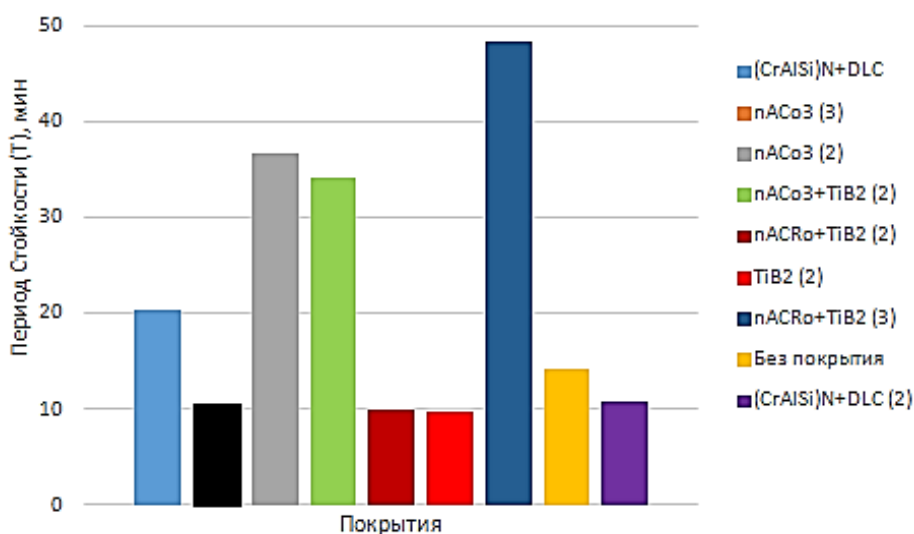


Рис. 4. Период стойкости при фрезеровании хромоникелевого сплава ХН58МБЮД-ИД твердосплавными фрезами марки Н10F (BK10 OM) с различными покрытиями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании серии экспериментальных исследований износостойкости режущего инструмента с различными покрытиями при фрезеровании хромоникелевых сплавов установлено, что наилучшие показатели по износостойкости режущего инструмента (по таким параметрам, как износ по задней поверхности, суммарная длина рабочего хода фрезы и период стойкости инструмента) обеспечиваются при использовании износостойких покрытий nACo3+TiB2 и nACRo + TiB2 при обработке

сплава ХН50МВКТЮР. При фрезеровании сплава ХН58МБЮД-ИД лучшую износостойкость показал инструмент с покрытием nACRo + + TiB2. Эффективность износостойких покрытий с диборидом титана при лезвийной обработке резанием, видимо, обусловлена образованием на контактных поверхностях защитных пленок, обладающих смазывающими и экранирующими свойствами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00670, <https://rscf.ru/project/22-19-00670/>)

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. М.: Высшая школа, 2009. 336 с.
2. Табаков В.П., Сагитов Д.И. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 179 с.
3. Верещака А.А., Григорьев С.Н. Теоретическое обоснование выбора рациональной архитектуры и элементов состава многослойно-композиционных износостойких покрытий. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2020. 141 с.
4. Криони Н.К., Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р. Наноструктурированные вакуумные ионно-плазменные покрытия. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 367 с.
5. Григорьев С.Н., Верещака А.А., Волосова М.А. Современные многослойно-композиционные наноструктурированные покрытия для твердосплавного и керамического режущего инструмента. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2020. 164 с.
6. Vereschaka A., Grigoriev S., Milovich F., Sitnikov N., Migranov M., Andreev N., Bublikov Yu., Sotova C. Investigation of tribological and functional properties of Cr,Mo-(Cr, Mo)N-(Cr,Mo,Al)N multilayer composite coating // *Tribology International*. 2021. V. 155. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X20306290> (дата обращения: 17.12.2021).
7. Migranov M.S., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shehtman S.R. Tribological Properties of Multilayer Coatings for Cutting Tool // *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. № 3. P. 245–250.
8. Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Гусев А.С., Садыков А.Ф. Изнашивание режущего инструмента с многослойными композиционными покрытиями // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 36–41.
9. Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р. Температура резания при применении инструмента с многослойным покрытием. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 34–43.

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Исаев Е.В., Мигранов А.М., Мосенз И.И., Гусев А.С., Оплеснин С.С. Многослойные наноструктурные композиционные покрытия для фрезерования хромоникелевых сплавов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 3 (15). С. 30–37.

ACKNOWLEDGMENTS

The research was supported by RSF (project No 22-19-00670,
<https://rscf.ru/project/22-19-00670/>)

MULTILAYER NANOSTRUCTURED COMPOSITE COATINGS FOR MILLING CHROMIUM-NICKEL ALLOYS

M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc., E.V. ISAEV, Chief Researcher,
A.M. MIGRANOV, Researcher, I.I. MOSENZ, Chief Researcher,
A.S. GUSEV, Postgraduate, S.S. OPLESNIN, Researcher

Moscow State University of Technology «STANKIN», 3a, Vadkovsky lane,
127055, Moscow, Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

The paper presents the results of experimental studies of wear resistance of end mills with multilayer composite coatings during blade cutting of chromium-nickel alloys, which are widely used in critical, heavy-duty and high-temperature tribocontours of aerospace equipment. Promising and innovative wear-resistant coatings obtained on different installations and by different technologies are investigated.

Keywords: end mills, multilayer composite coatings, chromium-nickel alloys, heavy-duty and high-temperature tribocouplings.

REFERENCES

1. Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezaniye materialov [Cutting materials]*. Moscow: Vysshaya shkola, 2009. 336 c.
2. Tabakov V.P., Sagitov D.I. *Rabotosposobnost rezhushchego instrumenta s iznosostoykimi pokrytiyami v usloviyakh stesnennogo rezaniya [The serviceability of cutting tools with wear-resistant coatings in conditions of constrained cutting]*. Ulyanovsk: UIGTU, 2015. 179 p.
3. Vereshchaka A.A., Grigoryev S.N. *Teoreticheskoye obosnovaniye vybora ratsionalnoy arkhitektury i elementov sostava mnogosloyno-kompozitsionnykh iznosostoykikh pokrytiy [Theoretical substantiation of the choice of rational architecture and composition elements of multilayer composite wear-resistant coatings]*. Moscow: MGTU «STANKIN», 2020. 141 p.
4. Krioni N.K., Mihranov M.Sh., Shehtman S.R. *Nanostrukturirovannyye vakuumnnyye ionno-plazmennyye pokrytiya [Nanostructured vacuum ion-plasma coatings]*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017. 367 p.
5. Grigoryev S.N., Vereshchaka A.A., Volosova M.A. *Sovremennyye mnogosloyno-kompozitsionnyye nanostrukturirovannyye pokrytiya dlya tverdosplavnogo i keramicheskogo rezhushchego instrumenta [Modern multilayer composite nanostructured coatings for hard-alloy and ceramic cutting tools]*. Moscow: MGTU «STANKIN», 2020. 164 p.
6. Vereshchaka A., Grigoriev S., Milovich F., Sitnikov N., Migranov M., Andreev N., Bublikov Yu., Sotova C. Investigation of tribological and functional properties of Cr,Mo-(Cr, Mo)N-(Cr,Mo,Al)N multilayer composite coating. *Tribology International*. 2021. V. 155. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X20306290> (date accessed: 17.12.2021).
7. Migranov M.S., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shehtman S.R. Tribological Properties of Multilayer Coatings for Cutting Tool. *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. No 3, pp. 245–250.

8. Mihranov M.Sh., Migranov A.M., Gusev A.S., Sadykov A.F. Wear of cutting tools with multilayer composite coatings. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No 2 (6), pp. 36–41.

9. Mihranov M.Sh., Mihranov A.M., Shehtman S.R. Cutting temperature when using tools with multilayer coating. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No 3 (11), pp. 34–43.

Поступила в редакцию/received: 02.06.2022; после рецензирования/ revised: 14.06.2022;
принята/accepted: 20.06.2022

УДК 621.914

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ИЗНАШИВАНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ЭФФЕКТОМ АДАПТАЦИИ

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук, А.М. МИГРАНОВ, науч. сотр.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 127994,
ГСП-4, Москва, Вадковский пер., 1, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., 2022

На основе термодинамики неравновесных процессов разработана методология исследования изнашивания режущих инструментов и износостойких покрытий с эффектом прогнозируемой адаптации поверхностей трения. Использование методологии даст возможность оценить самоорганизацию трибосистемы при резании металлов, обеспечит научно обоснованный подход к выбору и применению инструментов и условий резания с прогнозируемыми свойствами самоорганизации при трении. Предложенные принципы выбора и применения инструментальных материалов и износостойких покрытий позволят существенно повысить эффективность лезвийной обработки резанием.

Ключевые слова: пластическая деформация, температура резания, термодинамика неравновесных процессов, трибосистема, самоорганизация, прогнозируемая адаптация, уровень и интервал самоорганизации.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-37-45

ВВЕДЕНИЕ

В процессе резания вследствие изнашивания инструмента происходит непрерывное изменение пространственной формы контактных поверхностей. Это может привести к изменению распределения напряжений и температур в зоне фактического контакта и в целом оказать существенное влияние на интенсивность изнашивания режущего инструмента (даже при обработке без применения смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) и износостойких покрытий с постоянными значениями элементов режима резания). Таким образом, трение контакта и распределение удельных нагрузок и температур являются взаимообусловленными процессами, что необходимо учитывать при разработке методологии исследования изнашивания режущих инструментов и выводе аналитических зависимостей для

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (15), 2022*