

Научная статья
УДК 621.726
DOI: 10.34759/vst-2022-3-211-219

ИЗНОСОУСТОЙЧИВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОСИЛОВОЙ НАГРУЗКИ

Марс Шарифуллович Мигранов¹ ✉, Семен Романович Шехтман²,
Надежда Александровна Сухова³, Андрей Сергеевич Гусев⁴

^{1,2,3,4}Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”,
Москва, Россия

¹migmars@mail.ru ✉

²shex@inbox.ru

³nad_suhova@mail.ru

⁴gusev.angrey@bk.ru

Аннотация. Представлены результаты теоретико-экспериментальных исследований температурно-силовых условий и интенсивности характерного износа режущего инструмента при использовании современных износостойчивых комплексов для лезвийной обработки резанием хромоникелевых сплавов. Определены основные направления уменьшения интенсивности износа лезвийных режущих инструментов. Приведены результаты оценки влияния осажденных износостойких покрытий на обрабатываемость хромоникелевых сплавов. Представлены натурные эксперименты по оценке прочности адгезионных связей. Показано, что использование в условиях повышенной теплосиловой нагрузки контактной зоны при обработке резанием хромоникелевых сплавов износостойчивых комплексов инструментального назначения повышает период стойкости в два раза.

Ключевые слова: износостойчивые комплексы, наноструктурированные покрытия, температура и силы резания, изнашивание режущего инструмента, термо-ЭДС, прочность адгезионных связей

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-19-00670, <https://rscf.ru/project/22-19-00670/>

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Сухова Н.А., Гусев А.С. Износостойчивые комплексы инструментального назначения для эксплуатации в условиях повышенной теплосиловой нагрузки // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 222-230. DOI: 10.34759/vst-2022-3-222-230

Original article

WEAR-RESISTANT COMPLEXES OF INSTRUMENTAL PURPOSE FOR OPERATION UNDER INCREASED THERMAL-POWER LOADING

Mars S. Migranov¹ ✉, Semen R. Shekhtman², Nadezhda A. Sukhova³, Andrei S. Gusev⁴^{1,2,3,4}Moscow State University of Technology “STANKIN”,

Moscow, Russia

¹migmars@mail.ru ✉²shex@inbox.ru³nad_suhova@mail.ru⁴gusev.angrey@bk.ru

Abstract

The article deals with theoretical and experimental studies of cutting tool wear intensity while machining chrome-nickel alloys under temperature-force conditions employing modern wear-resistant complexes. Application of modifying multilayer-composite multicomponent nanostructured wear-resistant complexes is one of the most promising ways to improve the cutting properties of edge tools. The authors defined basic trends for edge cutting tools wear-off intensity reduction, associated with the friction coefficient value decreasing by application of the lubricant-cooling technological agents (LCTA) and wear-resistant complexes, as well as cutting temperature impact on the wear intensity in time. The cutting mode, temperature-force factor value in the working zone and contact phenomena at the cutting wedge affect the tool complexes origination (the tool material and wear-proof coating) with the effect of adaptation in the process of friction.

The article presents data on a series of experimental studies on the cutting process thermo-physics and mechanics, regularities of the cutting tool wear process while chromium-nickel parts lathe work for the qualitative estimation of the wear-resistant coatings effect on the machinability. Quadrihedral carbide plates (10×10 mm) and solid tools from the materials (BK8, BKIOOM) with various wear-resistant coatings were employed as cutting tools. The life testing and temperature-force tests were conducted with the I6K20 universal lathe machine of normal stiffness with stepless spindle rotation frequency control.

Temperature measuring in the process of metal cutting processing with a view to identify the average contact temperature with a sufficiently high accuracy and reliability was being performed by the natural thermocouple method. The thermo-EMF values registration and evaluation were accomplished by the mercury current collector and “Elemer” digital voltmeter. Estimation of friction coefficient and stress state of contact zone at various temperatures was conducted with the adhesion installation.

It has been established that the most favorable temperature-force state is being ensured at deposition the TiAlN of multilayer coatings after magnetic-arc filtration (MAF). Relative linear wear and its intensity decrease are being observed herewith, which can be explained by forming protective amorphous-like (aluminum oxide) and lubricating (titanium oxide) structures on the cutting wedge surface.

It has been revealed that the increase of cutting temperature and tangential component of cutting force with subsequent decrease of cutting tool wear resistance when using chromium-containing coating is associated with the phenomenon of chemical affinity of contacting materials at increased temperatures in the cutting zone.

It has been established that application of chromium-nickel alloys in the contact zone under conditions of the increased thermal power load at blade machining with tool wear-resistant complexes allows the twofold increasing of the durability period.

Keywords: wear-resistant complexes, friction, nano-structured coatings, cutting temperature and force, cutting tools wearing-out, thermo-emf, adhesive bonds strength.

Funding: the work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-19-00670, <https://rscf.ru/project/22-19-00670/>

For citation: Migranov M.S., Shekhtman S.R., Sukhova N.A., Gusev A.S. Wear-Resistant Complexes of Instrumental Purpose for Operation under Increased Thermal-Power Loading. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 222-230. DOI: 10.34759/vst-2022-3-222-230

Введение

В технологии машиностроения лезвийная обработка резанием является основным процессом, широко применяемым в различных отраслях промышленности и, по оценкам ведущих экспертов, сохранит ведущую роль в ближайшем будущем. Это обусловлено следующими обстоятельствами: во-первых, все большее применение в машиностроительном производстве современных изделий находят инновационные перспективные типы конструкционных материалов с уникальными физико-механическими и теплофизическими свойствами (например, в авиакосмической промышленности), которые невозможно обрабатывать без использования высокоэффективных режущих инструментов (РИ); во-вторых, резко возрастают требования к качественно-точностным показателям обработанных изделий при максимально возможной производительности процессов резания. Кроме того, именно режущий инструмент предопределяет в большей степени технические особенности дорогостоящих мехатронных систем с высокопроизводительными устройствами управления на контроллерах и микропроцессорах (ЧПУ и АдСУ), что способствует уменьшению периода окупаемости систем.

Анализ зарубежных и отечественных исследований показал, что несмотря на разработку высокопроизводительных типов инструментальных материалов и различных способов повышения их режущих свойств режущие инструменты остаются наиболее слабым звеном технологической системы обработки резанием. Проблеме повышения работоспособности инструмента посвящено большое количество работ, однако остается много нерешенных задач, связанных с повышением стойкости лезвийного инструмента. Для улучшения износостойкости и обеспечения фрикционных свойств применяют металлические, керамические и композиционные покрытия, наносимые различными методами [1—5]. Одним из самых перспективных способов улучшения режущих свойств лезвийных инструментов является формирование на их рабочих поверхностях модифицирующих многослойно-композиционных многокомпонентных наноструктурированных износостойчивых комплексов (ИК) [4—7].

Цель работы — экспериментальное определение поведения износостойкости при температурно-силовом состоянии процесса лезвийной обработки режущим инструментом с многослойными покрытиями.

Теоретико-экспериментальные предпосылки

Процесс обработки металлов резанием — сложный процесс по своей физической сущности [5, 8—11]. При контакте РИ с обрабатываемым материалом проявляются повышенные давления (до 2000 МПа и более), которые ведут к повышению температуры (до 1200...1500 К) и способствуют возникновению высоких скоростей деформации (до 10^6 с⁻¹) и т.д. Этот процесс создает благоприятные условия для роста адгезионной прочности, взаимной диффузии и наводораживания поверхности, изменения структурно-фазового состава, генерирования ЭДС. Вышеперечисленные условия оказывают значимое воздействие на свойства и состояние контактных поверхностей РИ и материала заготовки.

При реализации процесса обработки поверхности лезвийным инструментом трение является главным источником тепла (температуры) и причиной образования вторичных структур в приповерхностных слоях. Процесс трения происходит при высоких температурах в условиях ювенильности контакта, сопровождается пластической деформацией, а значит, преобладает адгезионная (молекулярная) составляющая в контактных процессах [12—16].

Контактные поверхности РИ и обрабатываемого материала (заготовки) при относительном скольжении совершают непрерывный процесс зарождения и срезания адгезионных пятен. Поверхность РИ находится под действием срезающих напряжений, что приводит к отрывам (местами) частиц материала с поверхности. Срыв обычно наблюдается больше у мягкого, обрабатываемого материала, но исследования на электронном микроскопе фиксируют одновременный перенос частиц инструментального, более твердого материала, на более мягкий материал.

Для анализа и объяснения контактных процессов при резании металлов, напряженно-деформированного состояния режущего клина при различных температурно-силовых режимах работы используются различные подходы и методы описания этих явлений. Кроме того, сегодня преимущественное применение и развитие получает структурно-энергетическое описание процесса контактного взаимодействия обрабатываемого материала и поверхностей режущего инструмента. При этом процесс резания рассматривается как открытая термодинамическая система с диссипацией энергии, затраченной на какой-либо процесс, т.е. диссипативная функция

(энергия, затраченная за единицу времени на единицу площади) работы внешних сил тратится на пластическую деформацию обрабатываемого материала, формоизменение (изнашивание) режущего инструмента и структурно-фазовые превращения поверхностных слоев обрабатываемого и инструментального материалов [5, 10, 14, 18]. Составляется уравнение энергетического баланса процесса трения при резании металлов и уточняются его составляющие. Опуская математические выкладки, полученные в работе [2, 5], запишем выражение для расчета интенсивности изнашивания инструмента:

$$J_h = \frac{p_z(\tau) \cdot V \cdot f / (l_1 + c) \cdot b - 0,186\theta(\tau) J_d J_\theta}{V \cdot \left(\frac{HV_u}{HV_\phi} \right)^\alpha \cdot erf P(\tau) \cdot \left[P_r + \frac{12(1+\mu)}{E} \sigma_T^2 \right]}, \quad (1)$$

где $p_z(\tau)$ – текущее значение тангенциальной составляющей усилия резания; l_1 – длина контакта по передней поверхности; b – ширина срезаемого слоя; f – коэффициент трения; $\theta(\tau)$ – текущее значение температуры резания; V – скорость резания; J_d – безразмерный критерий, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала; J_θ – безразмерный критерий, учитывающий характер изменения температуры резания; HV_u – твердость (инструментальный материал или покрытия); HV_ϕ – твердость обрабатываемого материала в зоне условной плоскости сдвига; α – показатель, учитывающий степень влияния температуры резания θ , изменяющейся во времени τ , на отношение твердостей материалов; $erf P(\tau)$ – вероятность отделения частиц изнашивания инструментального материала; P_r – контактное давление на режущий клин; E и σ_T – соответственно модуль упругости и кратковременный предел текучести инструментального материала.

Зависимость (1) определяет основные направления уменьшения интенсивности износа лезвийных РИ:

– снижение коэффициента трения f при фрикционном контакте РИ с обрабатываемым материалом. Происходит вследствие появления на поверхностях РИ (рабочие поверхности) вторичных структур и формирования фаз продуктов адаптации трибосистемы, снижения усилия резания, ее тангенциальной составляющей, а так-

же применения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) и износостойчивых комплексов;

– увеличение значения отношения HV_u и HV_ϕ . Реализуется применением износостойчивых комплексов, которые ведут к снижению зависимости физико-механических свойств взаимодействующих (контактирующих) поверхностей от температуры, возникающей в рабочей зоне;

– температура процесса резания проявляет двойное воздействие на интенсивность протекания износа РИ: происходит увеличение температуры, что понижает влияние силового фактора, формируются вторичные структуры при трении и образуются фазы с измененными физико-механическими свойствами.

Таким образом, при синтезе инструментальных комплексов (материал инструмента и функционально износостойкое покрытие) с эффектом адаптации в процессе фрикционного контакта необходимо учитывать режимы реализации процесса резания, величину температурно-силового фактора в рабочей зоне и контактных явлений на режущем клине.

Результаты натуральных экспериментов

Для качественной оценки полученной зависимости и оценки влияния износостойких покрытий на обрабатываемость были проведены серии экспериментальных исследований по теплофизике и механике процесса резания, закономерностей протекания процесса износа РИ при обработке (точении) хромоникелевых сплавов, характеризующихся значительно разнящимися физико-механическими свойствами, химсоставом и следовательно, различными режимами обработки: II группа обрабатываемости резанием – сталь 14X17H2, коррозионно-стойкая хромистая, класс – мартенситно-ферритный; III группа – сталь 12X18H10T коррозионно-стойкая хромоникелевая, класс аустенитный; IV группа – сталь 15X18H12C4ТЮ, жаропрочная, жаростойкая, кислотостойкая, класс аустенитный.

При натуральных испытаниях (исследование обрабатываемости материалов) применялись четырехгранные твердосплавные пластины (10×10 мм) и цельные резцы из материалов (BK8, BK100M) с различными износостойкими покрытиями. На универсальном токарном станке нормальной жесткости I6K20 проводились стойкостные и температурно-силовые испытания. Станок для бесступенчатого регулирования ча-

стоты вращения шпинделя оборудован тиристорным преобразователем.

Метод естественной термопары предложен [5, 17–19] для замера температуры при реализации процесса обработки резанием металлов с целью идентификации средней температуры контакта с достаточно высокой точностью и надежностью. Данный метод применяется для установления среднего значения температуры резания. Деталь и РИ изолированы, что позволяет исключить возникновение погрешностей от действия «паразитных» термо-ЭДС. Мониторинг термо-ЭДС осуществлялся через 10–15 с после начала обработки. Регистрация и оценка величины термо-ЭДС совершалась при помощи ртутного токосъемника и цифрового вольтметра «Элемер». С целью определения характера изменений сил резания (P_z, P_x, P_y) в зависимости от режима резания (оценивалась величина дискретного и непрерывного изменения) проводились эксперименты по нахождению составляющих силы резания. Обработка осуществлялась на станках 16К20 и с ЧПУ 16К20Т1.

Величины сил резания определялись следующей аппаратурой: универсальный динамометр УДМ-600 с усилителем 4АНЧ-22 на базе ПЭВМ для регистрации и записи параметров, осциллограф типа Н-117 (шлейфовый, светолучевой). Для тарирования динамометра использовался образцовый переносной динамометр системы Н.Г. Токаря (ГОСТ 9500-95).

Для оценивания коэффициента трения и напряженного состояния контактной зоны при различных температурах были проведены натурные эксперименты на адгезионной установке. Физическая модель установки, отражающая реальные условия протекания процесса трения и изнашивания при ограниченном (локальном) контакте, представлена на рис. 1. В соответствии с моделью индентор 2 (сферический), выполненный из инструментального материала (индентор имитирует единичную неровность пятна касания трущихся твёрдых тел), сдавленный двумя плоскопараллельными образцами 1 из обрабатываемого материала (с высокой точностью изготовления и чистотой взаимодействующих поверхностей), осуществляет вращение под действием нагрузки вокруг собственной оси. При этом различный температурный режим контакта индентор 2 — образец 1 обеспечивается высоковольтным тоководом 5, изолированным нетокопроводящим материалом (текстолитом) 6. Сила $F_{\text{экс}}$, затрачиваемая на совершение вращения инден-

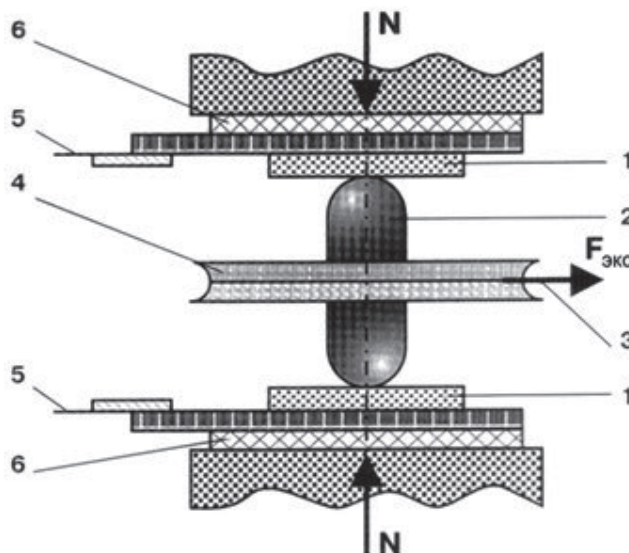


Рис. 1. Модель фрикционного контакта

тора и приложенная к тросу 3, находящемуся в пазах диска 4, главным образом связана со сдвиговой прочностью τ_n адгезионных связей.

Прочность τ_n адгезионных связей на срез определяется из соотношения:

$$\tau_n = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{\text{экс}}}{\pi} \cdot \frac{R_{\text{экс}}}{r_{\text{отп}}^3}, \quad (2)$$

где $F_{\text{экс}}$ — окружная сила на диске, вращающая индентор;

$R_{\text{экс}}$ — радиус диска, в котором закрепляется индентор;

$r_{\text{отп}}$ — радиус отпечатка (лунки) на образцах.

Вследствие малых параметров отпечатка от индентора предполагаем, что напряжения, действующие по нормали, воздействующие на поверхность сферы, по величине постоянны и в области всего отпечатка равны. Они могут быть получены как

$$p_r = \frac{N}{n \cdot r_{\text{отп}}^2}. \quad (3)$$

Адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения

$$f_M = \frac{\tau_n}{p_r} = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{\text{экс}}}{N} \cdot \frac{R_{\text{экс}}}{r_{\text{отп}}}. \quad (4)$$

Необходимо обратить внимание на величину шероховатости, точности и чистоты взаимодействующих тел. Величина нагрузки N выбирается так, чтобы при касании в зоне контакта сред-

ние напряжения были соизмеримы с твёрдостью по Бринеллю плоских образцов, выполненных из этого же материала. Согласно [6, 11, 15, 20], при относительном внедрении

$$0,02 \leq \frac{h}{r_1} \leq 0,2 \quad (5)$$

возможен плоский пластичный контакт, а также некое «растекание» поверхности, которое может привести к разрушению инородных покрытий, например оксидных и сорбированных плёнок, и совершению контакта ювенильных (чистых) металлических поверхностей.

Технические параметры: размеры образцов ($\varnothing 20$ мм, $h = 7$ мм), индентор ($r_{сф} = 2,5$ мм, высота 25 мм) и время выдержки (1 мин) под нормальной нагрузкой назначаются согласно техническим требованиям для аналогичных испытаний

при испытании на твёрдость по Бринеллю (ГОСТ 9012-59). Однородность физико-механических свойств обеспечивается изготовлением экспериментальных образцов из одной партии материала. Результаты адгезионных исследований приведены на рис. 2.

Износостойкость режущего инструмента с различными покрытиями исследовалась при различных сочетаниях режимов резания и оценивалась относительным линейным износом при $h_3^{кп} = 0,3$ мм:

$$h_{ол} = \frac{h_{з.к} - h_{з.н}}{l_k - l_H} \quad (6)$$

Результаты расчетных и экспериментальных данных представлены в таблице при обработке сплава 15X18H12C4ТЮ резцом ВК10 ОМ с раз-

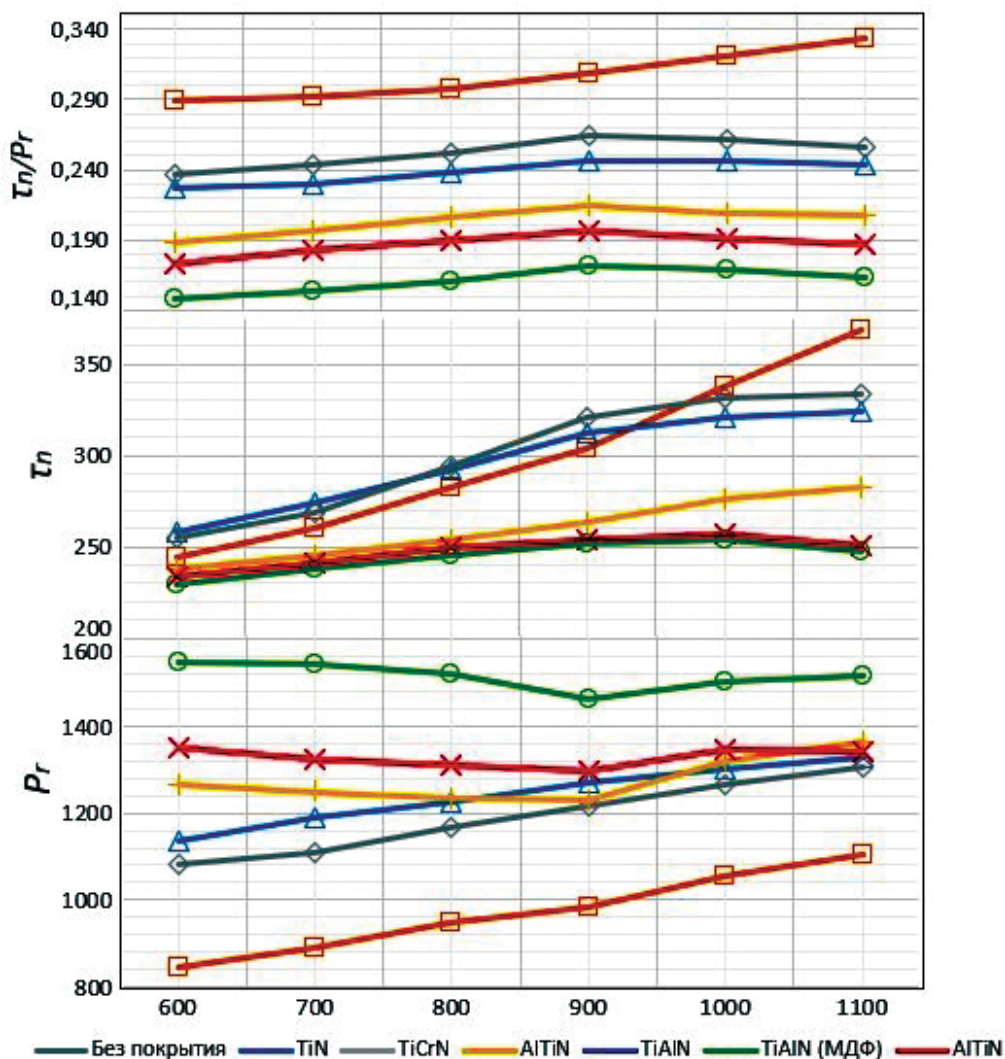


Рис. 2. Температурная зависимость адгезионных характеристик

Экспериментальные и расчетные данные при точении сплава 15X18H12C4ТЮ резцом BK10 OM с различными покрытиями

Покрытия	Температура резания T , К	P_z , Н	$h_{ол} \cdot 10^{-3}$, мм/м	$J_f \cdot 10^{-7}$
TiN	1047	753	2,7	84
TiCrN	1019	802	18	97
AlTiN	1002	697	2,4	78
TiAlN	984	672	1,9	61
TiAlN(МДФ)	905	606	0,8	47
Без покрытия	1093	838	24	104

личными покрытиями для следующих режимов: скорость резания $V = 85$ м/мин, глубина $t = 0,5$ мм, подача $S = 0,11$ мм/об.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований установлено:

— наиболее благоприятное температурно-силовое состояние обеспечивается при использовании многослойных покрытий TiAlN после магнитно-дуговой фильтрации (МДФ) и TiAlN, при этом наблюдается уменьшение относительного линейного износа и его интенсивности, что, согласно проведенным исследованиям, объясняется формированием на поверхности режущего клина защитных аморфноподобных (оксид алюминия) и смазывающих (оксид титана) структур;

— повышение температуры резания и тангенциальной составляющей усилия резания, с последующим снижением износостойкости режущего инструмента при применении хромосодержащего покрытия, связано с явлением химического сродства контактирующих материалов при повышенных температурах в зоне резания;

— результаты экспериментальных исследований позволили определить количественное значение интенсивности износа режущего инструмента для различных обрабатываемых материалов при использовании покрытий;

— применение в условиях повышенной теплосилового нагружения контактной зоны при лезвийной обработке хромоникелевых сплавов износостойчивыми комплексами инструментального назначения позволяет повысить период стойкости в два раза.

Список источников

1. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. — М.: Машиностроение, 2009. — 368 с.
2. Мигранов М.Ш. Повышение износостойкости инструментов на основе интенсификации процессов адаптации поверхностей трения при резании металлов. — Уфа: Гилем, 2011. — 232 с.
3. Волосова М.А., Грецишников В.А., Пивкин П.М. и др. Режущий инструмент из инновационных керамических материалов: изготовление и применение. — М.: МГТУ Станкин, 2020. — 104 с.
4. Верещака А.А., Григорьев С.Н. Теоретическое обоснование выбора рациональной архитектуры и элементного состава многослойно-композиционных износостойких покрытий. — М.: МГТУ Станкин, 2020. — 141 с.
5. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. — М.: Машиностроение, 2008. — 311 с.
6. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. — Уфа: Гилем, 1999. — 199 с.
7. Курочкин А.В. Оптимизация архитектуры многослойных износостойких наноструктурированных покрытий // Труды МАИ. 2013. № 68. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=41998>
8. Грубый С.В. Имитационное моделирование процессов резания и изнашивания инструмента // Вестник машиностроения. 2007. № 7. С. 38-42.
9. Шулов В.А., Быценко О.А., Теряев Д.А. Получение нанокристаллических эрозионно-коррозионно-стойких покрытий, содержащих MAX-фазу, на поверхности деталей из титановых сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 3. С. 168-177.
10. Гершман И.С. Разработка износостойких материалов с помощью методов неравновесной термодинамики на примере скользящих контактов: Дисс. ... докт. техн. наук. — М: ВНИИЖТ, 2006. — 234 с.
11. Кузин В.В., Григорьев С.Н., Волосова М.А. Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной термоупругости // Новые огнеупоры. 2013. № 9. С. 52-57.
12. Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Tabakov V.P. et al. Improving the efficiency of the cutting tool made of ceramic when machining hardened steel by applying

- nano-dispersed multi-layered coatings // *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 581, pp. 68-73. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.68
13. Fominski V.Yu., Grigoriev S.N., Celis J.P. et al. Structure and mechanical properties of W–Se–C/diamond-like carbon and W–Se/diamond-like carbon bi-layer coatings prepared by pulsed laser deposition // *Thin Solid Films*. 2012. Vol. 520. No. 21, pp. 6476-6483. DOI: 10.1016/j.tsf.2012.06.085
 14. Sobol' O.V., Andreev A.A., Grigoriev S.N. et al. Physical Characteristics, Structure and Stress State of Vacuum-Arc Tin Coating, Deposition on the Substrate when Applying High-Voltage Pulse During the Deposition // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2011. No. 4, pp. 174-177.
 15. Гуринов В.Д., Григорьев С.Н., Алешин С.В., Семенов В.А. Исследование силовых параметров при фрезеровании концевыми фрезами для диагностирования их состояния // *Вестник машиностроения*. 2005. № 9. С. 19-22.
 16. Suhova N.A., Shekhtman S.R., Migranov M.S. Synthesis of nanostructured composite coatings in arc discharge plasma // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019, pp. 1393–1399.
 17. Блинков И.В., Волхонский А.О. Мультислоиные наноструктурные покрытия для режущего инструмента. — Кишинев: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. — 124 с.
 18. Liu M.-J., Zhang M., Zhang X.-F. et al. Transport and deposition behaviors of vapor coating materials in plasma spray-physical vapor deposition // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 486, pp. 80-92. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.04.224
 19. Vereschaka A., Grigoriev S., Milovich F. et al. Investigation of tribological and functional properties of Cr,Mo-(Cr,Mo)N-(Cr,Mo,Al)N multilayer composite coating // *Tribology International*. 2021. Vol. 155: 106804. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106804
 20. Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Минигалеев С.М., Шехтман С.Р. Трибологические свойства многослойных покрытий для режущего инструмента // *Трение и износ*. 2018. Т. 39. № 3. с. 304–309.

References

1. Grigor'ev S.N. *Metody povysheniya stoikosti rezhushchego instrumenta* (Methods of cutting tools durability increasing), Moscow, Mashinostroenie, 2009, 368 p.
2. Migranov M.Sh. *Povyshenie iznosostoikosti instrumentov na osnove intensifikatsii protsessov adaptatsii poverkhnostei treniya pri rezanii metallov* (Tools wear resistance increasing based on the friction surfaces adaptation processes intensifying when metals cutting), Ufa, Gilem, 2011, 232 p.
3. Volosova M.A., Grechishnikov V.A., Pivkin P.M. et al. *Rezhushchii instrument iz innovatsionnykh keramicheskikh materialov: izgotovlenie i primeneniye* (Cutting tools made of innovative ceramic materials: manufacture and application), Moscow, MGТУ Stankin, 2020, 104 p.
4. Vereshchaka A.A., Grigor'ev S.N. *Teoreticheskoe obosnovanie vybora ratsional'noi arkhitektury i elementnogo sostava mnogosloino-kompozitsionnykh iznosostoikikh pokrytii* (Theoretical substantiation of rational architecture and elemental composition of multilayer composite wear-resistant coatings selecting), Moscow, MGТУ Stankin, 2020, 141 p.
5. Tabakov V.P. *Formirovanie iznosostoikikh ionno-plazmennyykh pokrytii rezhushchego instrumenta* (Formation of wear-resistant ion-plasma coatings of cutting tools), Moscow, Mashinostroenie, 2008, 311 p.
6. Shuster L.Sh. *Adgezionnoye vzaimodeistvie tverdykh metallicheskh tel* (Adhesive interaction of solid metal bodies), Ufa, Gilem, 1999, 199 p.
7. Kurochkin A.V. *Trudy MAI*, 2013, no. 68. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41998>
8. Grubyi S.V. *Vestnik mashinostroeniya*, 2007, no. 7, pp. 38-42.
9. Shulov V.A., Bytzenko O.A., Teryaev D.A. Deposition of nanocrystal corrosion-erosion resistant coatings on the surface of titanium alloy parts. *Aerospace MAI Journal*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 168-177.
10. Gershman I.S. *Razrabotka iznosostoikikh materialov s pomoshch'yu metodov neravnovesnoi termodinamiki na primere skol'zyashchikh kontaktov* (Development of wear-resistant materials using methods of nonequilibrium thermodynamics on the example of sliding contacts), Doctor of technical sciences thesis. Moscow, VNIIZhT, 2006, 234 p.
11. Kuzin V.V., Grigor'ev S.N., Volosova M.A. *Novye ognepory*, 2013, no. 9, pp. 52-57.
12. Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Tabakov V.P. et al. Improving the efficiency of the cutting tool made of ceramic when machining hardened steel by applying nano-dispersed multi-layered coatings. *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 581, pp. 68-73. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.68
13. Fominski V.Yu., Grigoriev S.N., Celis J.P. et al. Structure and mechanical properties of W–Se–C/diamond-like carbon and W–Se/diamond-like carbon bi-layer coatings prepared by pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*, 2012, vol. 520, no. 21, pp. 6476-6483. DOI: 10.1016/j.tsf.2012.06.085
14. Sobol' O.V., Andreev A.A., Grigoriev S.N. et al. Physical Characteristics, Structure and Stress State of Vacuum-Arc Tin Coating, Deposition on the Substrate when Applying High-Voltage Pulse During the Deposition. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2011, no. 4, pp. 174-177.

15. Gurin V.D., Grigor'ev S.N., Aleshin S.V., Semenov V.A. *Vestnik mashinostroeniya*, 2005, no. 9, pp. 19-22.
16. Suhova N.A., Shekhtman S.R., Migranov M.S. Synthesis of nanostructured composite coatings in arc discharge plasma. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019, pp. 1393–1399.
17. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O. *Mul'tislainye nanostrukturnye pokrytiya dlya rezhushchego instrumenta* (Multilayer nanostructured coatings for cutting tools), Kishinev, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 124 p.
18. Liu M.-J., Zhang M., Zhang X.-F. et al. Transport and deposition behaviors of vapor coating materials in plasma spray-physical vapor deposition. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 486, pp. 80-92. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.04.224
19. Vereschaka A., Grigoriev S., Milovich F. et al. Investigation of tribological and functional properties of Cr,Mo-(Cr,Mo)N-(Cr,Mo,Al)N multilayer composite coating. *Tribology International*, 2021, vol. 155: 106804. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106804
20. Migranov M.Sh., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shekhtman S.R. Tribological Properties of Multilayer Coatings for Cutting Tool. *Journal of Friction and Wear*, 2018, vol. 39, no. 3, pp. 245–250. DOI: 10.3103/S106836661803008X

Статья поступила в редакцию 28.04.2022; одобрена после рецензирования 18.05.2022; принята к публикации 28.05.2022.

The article was submitted on 28.04.2022; approved after reviewing on 18.05.2022; accepted for publication on 28.05.2022.