

Научная статья

УДК 621.9.02

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180661>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Марс Шарифуллович Мигранов¹✉, Андрей Сергеевич Гусев², Кирилл Алексеевич Гарифуллин³,
Степан Сергеевич Оплеснин⁴, Денис Сергеевич Репин⁵, Юлия Александровна Тюрина⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,

Москва, Россия

¹ migmars@mail.ru ✉

Аннотация. Рассмотрены теоретико-экспериментальные вопросы повышения производительности лезвийной обработки точением жаропрочных хромоникелевых сталей и сплавов для деталей газотурбинных двигателей (ГТД) и элементов конструкции ЛА путем применения инновационных наноструктурированных многослойных высокоэнтропийных покрытий на металлорежущем инструменте. С учетом правила Юм–Розери и принципов термодинамики неравновесных процессов разработаны методики формирования и получения электроискровым спеканием порошкового материала высокоэнтропийных катодов-мишеней с последующим нанесением инновационных многослойных наноструктурированных износостойких покрытий на твердосплавный режущий инструмент для обработки жаропрочных хромоникелевых сплавов V группы обрабатываемости. Проведены серии триботехнических испытаний на трибометрах и при скоростном продольном тчении ЭИ-654 и ЭИ-698 ВД с подтверждением эффективности применения высокоэнтропийных покрытий, повышающих производительность обработки в среднем на 20–25 %.

Ключевые слова: детали ГТД, элементы конструкции ЛА, высокоэнтропийные износостойкие покрытия, твердосплавные пластины для точения, жаропрочные сплавы, триботехнические испытания, износостойкость режущего инструмента, температура и составляющие усилия резания

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00670)

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Гусев А.С., Гарифуллин К.А., Оплеснин С.С., Репин Д.С., Тюрина Ю.А. Повышение эффективности обработки деталей силовой части газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 183–192. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180661>

Original article

PARTS MACHINING EFFICIENCY UPGRADING OF THE GAS TURBINE ENGINES LOAD-BEARING PART

Mars Sh. Migranov¹✉, Andrei S. Gusev², Kirill A. Garifullin³, Stepan S. Oplesnin⁴,
Denis S. Repin⁵, Yuliya A. Tyurina⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Moscow State Technological University “STANKIN”,

Moscow, Russia

¹ migmars@mail.ru ✉

Abstract

The article presents the results of theoretical and experimental research on the technology developing and high-entropy cathodes-targets obtaining by the spark plasma sintering with subsequent magnetron application of innovative nanostructured multilayer wear-resistant coatings on cutting tools, followed by tribotechnical tests. The experimental part of the work included high-temperature tribotechnical tests performing on the two different types of tribometer. The first one was “Nanovea” TRB multifunctional tribometer to assess the adhesion of the coating with the substrate of the tool material and the impact of coating technology on the tribotechnical characteristics. The second one was a specially developed high-temperature adhesion unit (adhesiomer) for carrying out studies of wear resistance of carbide inserts with high-entropy coatings while longitudinal turning of the EI-654 and EI-698 chromium-nickel alloys. High-entropy coatings were obtained on the modernized “HNV-6,6 II” unit with magnetic-arc filtration system. The results of the experiments, conducted with the above said installations, revealed an extreme character of the friction coefficient dependence on the friction path length with minimum for the “EI 654–VK10 OM” pair at the temperature of 700°C and for the “EI 698 VD–VK10 OM” pair at the temperature of 750°C. This is ensured by the aluminum-based high-entropy coating, particularly with percentage composition of Al - 20%; Ti - 20%; Zr - 15% and V - 15%; Cr - 15%; Nb₁₅.

The results of wear resistance tests for all “tool–part” pairs under study demonstrated of high-entropy coatings effectiveness of application with better indicators compared to the advanced nACo3 coating widely applied in production, since the high-entropy coating Al-20%; Ti-20%; Zr-15%; V-15%; Cr-15%; Nb₁₅ ensures improvement of durability period at turning EI-654 by 34% and EI-698 VD by 16% respectively. In total, the wear resistance upgrade of carbide inserts when turning heat-resistant alloys of the V group of machinability is achieved by ensuring better adhesion between the coating and the tool substrate. It is achieved as well by the adhesion component reducing of the friction coefficient between the tool with wear-resistant coating and the material being machined, and by reducing and ensuring favorable temperature and force conditions while cutting.

Keywords: GTE parts, aircraft structural elements, high-entropy wear-resistant coatings; carbide blades for turning, heat-resistant alloys, tribotechnical testings, cutting tools wear resistance, cutting force temperature and components

Funding: The work was financed by the Grant from the Russian Science Foundation (Project No. 22-19-00670).

For citation: Migranov M.Sh., Gusev A.S., Garifullin K.A., Oplesnin S.S., Repin D.S., Tyurina Yu.A. Parts Machining Efficiency Upgrading of the Gas Turbine Engines Load-Bearing Part. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 2, pp. 183-192. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180661>

Введение

Дальнейшее развитие современного машиностроительного производства, применение инновационных процессов лезвийной обработки резанием труднообрабатываемых материалов, используемых в деталях узлов ГТД и ЛА, работающих в условиях повышенных температурных и силовых нагрузок, а также в агрессивных средах, требует повышения работоспособности и эффективности металлорежущего инструмента при изменении элементов режима резания в широком диапазоне с обеспечением требуемых показателей качества обработанной поверхности. Анализ отечественных и зарубежных публикаций и опыта работы ведущих предприятий авиационно-космического производства показал, что в настоящее время при всех достоинствах существующих методов улучшения эксплуатационных характеристик металлорежущего инструмента применением износостойких покрытий у них есть несколько объективных и субъективных недостатков [1–5]. Эти недостатки объясняются исчерпанием возможностей варьирования режимов

и химическим составом существующих катодов, устареванием применяемого для этого оборудования, необходимостью освоения комбинированных методов нанесения покрытий и др. Согласно многочисленным исследованиям [6–9], повышение производительности и улучшение показателей качества обработанной поверхности деталей ГТД и ЛА при лезвийной обработке резанием в значительной степени зависят от прочностных и теплофизических свойств контактирующих поверхностей режущего клина инструмента. Эффективность применения металлообрабатывающего инструмента можно обеспечить путем разработки современных технологий получения и нанесения инновационных наноструктурированных многослойных износостойких покрытий. В настоящее время все более актуальной становится разработка высокоэнтропийных материалов, в том числе в качестве катодов-мишеней, для получения наноструктурированных многослойных износостойких покрытий.

Статья посвящена вопросам повышения эффективности обработки деталей силовой части ГТД

и ответственных узлов ЛА на основе применения разработанных инновационных высокоэнтропийных покрытий для режущего инструмента при продольном высокоскоростном точении жаропрочных сплавов.

2. Теоретико-экспериментальные предпосылки

Под словом «износостойкое покрытие» принято понимать многослойный, мультикомпонентный, наноструктурированный комплекс, нанесенный на контактную поверхность режущего клина инструмента, обладающий уникальными характеристиками по твердости, прочности, теплофизике (теплопроводность, температуропроводность, электропроводность и др.), нестехиометричности физико-механического и структурного состояний, кристаллохимии, химической инертности и способностью при критических значениях температуры и условиях резания образовывать вторичные структуры со смазывающими и защитными свойствами, позволяющими значительно улучшить триботехнические свойства контакта «инструмент–деталь» [10–14]. Следует отметить, что при подборе и эксплуатации режущего инструмента с износостойкими покрытиями надо учесть ряд особенностей, в частности [15–16] необходимость обеспечения высокой прочности схватывания (адгезии) с поверхностью инструментального материала; исключить или минимизировать адгезию между обрабатываемым материалом в широком диапазоне изменения температуры резания, т. е. обеспечить инертность для снижения химического сродства контактирующих материалов, в большинстве случаев приводящего к интенсивному изнашиванию пары трения; по мере возможности уменьшить при резании высокотемпературную коррозию и окислительные процессы; обеспечить стабильность физико-технических свойств при высоких температурах резания, в некоторых случаях обеспечить высокую плотность для предотвращения попадания активных реагентов из окружающей среды на поверхность инструментальной основы; обеспечить максимальную равномерность толщины наносимого покрытия и общую стабильность эксплуатационных свойств.

Существует множество методов нанесения износостойких покрытий на поверхности режущего клина инструмента. В статье рассматривается метод физического осаждения (ФОП). Известно, что метод ФОП обладает рядом преимуществ по сравнению с другими, в частности универсальностью и возможностью получения нитридных, карбидных,

карбонитридных, оксидных и боридных многокомпонентных покрытий с различным сочетанием тугоплавких элементов с IV по VI группу из перечня Периодической системы элементов и используемых в вакуумных технологиях. Отличительной особенностью методов физического осаждения по сравнению с другими является возможность активного и эффективного управления плазмохимическим процессом при нанесении покрытий с обеспечением необходимых свойств и требуемого качества, а также предотвращения формирования на рабочих поверхностях режущего клина различных дефектов геометрического, кристаллохимического и физико-механического характера. Для обеспечения эффективности применения наносимых износостойчивых комплексов на поверхность режущего клина они должны удовлетворять следующим требованиям: работоспособность при высоких давлениях и температурах; совместимость основных физико-технических характеристик (коэффициентов Пуассона и линейного расширения, модуль упругости и т. д.); склонность элементов к диффузионным и адгезионным явлениям при имплантации; способность воспринимать ударные и вибрационные нагрузки и т. д. [17–21]. Улучшение эксплуатационных свойств износостойких покрытий на режущем инструменте может быть достигнуто повышением таких параметров, как микротвердость, прочность, трещиностойкость и др. Вместе с тем, как показали производственный опыт и результаты многочисленных исследований при обработке ответственных деталей ГТД и ЛА, повышение прочностных характеристик (микротвердости, прочности и трещиностойкости) износостойких покрытий не всегда обеспечивает высокие надежность и работоспособность инструмента, поэтому в настоящее время значительное внимание уделяется разработке таких покрытий, которые могли бы, во-первых, работать при широком диапазоне изменения параметров резания; во-вторых, адаптироваться к знакопеременным и температурным нагрузкам в контактной зоне и, в-третьих, продлить зоны приработочного и установившегося износа кривой зависимости «износ – длина пути резания» за счет разработки и применения инновационных износостойких покрытий, полученных из высокоэнтропийных катодов-мишеней. При этом наиболее интересных результатов следует ожидать от применения нового класса катодов-мишеней, полученных электроискровым спеканием порошкового материала с высокоэнтропийным составом для последующего нанесения износостойких покрытий методом PVD с магнетронной системой и возможностью магнитно-дуговой фильтрации (МДФ).

3. Материалы, оборудование и технология экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились при точении жаропрочных и жаростойких хромоникелевых сплавов ЭИ-654 и ЭИ-698 ВД, применяемых в ответственных деталях узлов авиационной техники, с использованием твердосплавных четырехгранных пластин (10 × 10 мм) марки ВК10 ОМ на токарно-винторезом станке модели 1Б616П.

Высокоэнтропийные катоды-мишени разработаны с учетом правила Юм–Розери и принципов термодинамики неравновесных процессов. На основе анализа существующих подходов и методик формирования состава определены их количественные и качественные параметры с последующим выбором двенадцати наиболее эффективных марок металлических порошков для спекания. Было получено более 30 вариантов высокоэнтропийных порошковых композиций катодов-мишеней с проверкой необходимых эксплуатационных свойств (электропроводности, твердости, гранулометрического состояния, элементного состава и др.). Процесс спекания катодов-мишеней размерами 80 × 5 мм выполнялся на машине КСЕ-FCT-H-HP-D25-SD (FCT, Германия), обеспечивающей широкий диапазон изменения температуры (500–1600°C с интервалом 50°C); удельных нагрузок (25–100 кН/см²). Для проведения экспериментальных исследований и сравнительного анализа были отобраны как общеизвестные и наиболее широко используемые инновационные многослойные покрытия ((ZrMoHfCrAl)N; nACo₃; nACrO; nACo₃+TiB₂; nACrO+TiB₂), полученные на современных установках серий «Платит п311» и «Платит п411», так и покрытия, полученные из высокоэнтропийных катодов-мишеней: (Al₂₀–Hf₁₀–Ni₁₅–Ti₂₅–W₁₀–Zr₂₀; Al₂₀–Ti₂₀–Zr₁₅–V₁₅–Cr₁₅–Nb₁₅; Al₂₀–Hf₁₅–V₁₅–Cr₁₅–Ti₁₅–Ta₁₀–W₁₀; Al₂₀–Hf₁₅–Mo₁₅–Co₁₅–Ta₁₀–W₁₀–Zr₁₅; Nb₂₀–Hf₂₀–Ti₂₀–Zr₂₀–Ta₂₀; Mo₂₀–Nb₂₀–Ni₂₀–Ta₂₀–W₂₀ и др.) на модернизированной установке ННВ – 6,6 И1, оснащенной

магнетроном и системой магнитно-дуговой фильтрации.

На предварительном этапе с целью сокращения количества натуральных экспериментальных исследований при лезвийной обработке резанием были проведены серии триботехнических исследований на двух функционально разных типах трибометра для оценки адгезии покрытия с подложкой инструментального материала и влияния технологии нанесения покрытий на триботехнические характеристики. Для определения коэффициента трения различных покрытий на твердосплавном контртеле экспериментальные испытания проводились на высокотемпературном трибометре Nanovea TRB (рис. 1). Для определения адгезионной составляющей коэффициента трения использовалась разработанная высокотемпературная адгезионная установка [13] (высокотемпературный адгезиометр). Исследуемые образцы, принципиальная схема и адгезиометр представлены на рис. 2. Многофункциональный трибометр Nanovea TRB, обеспечивающий широкий диапазон изменения температурного режима и работоспособность в различных смазочных средах, позволяет определить триботехнические характеристики контактных поверхностей, а также износостойких покрытий. Устройство соответствует стандартам ASTM G99,

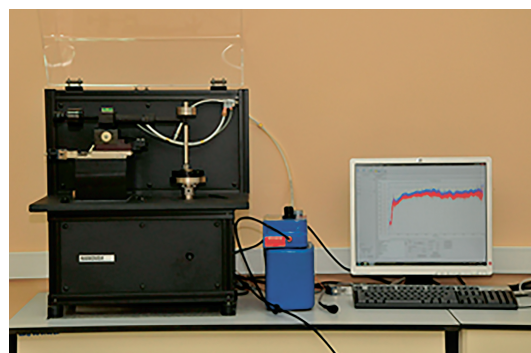


Рис. 1. Высокотемпературный трибометр Nanovea TRB

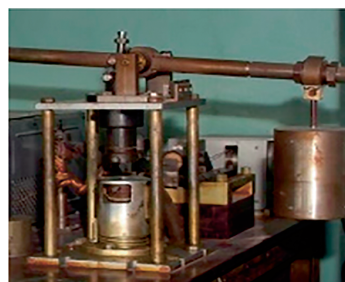
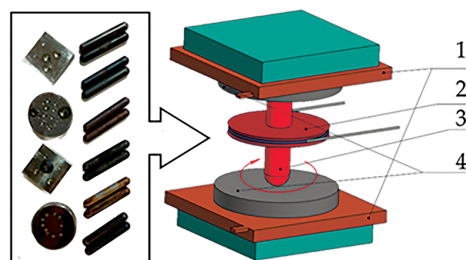


Рис. 2. Образцы из обрабатываемого материала и сферические инденторы с различными покрытиями; схема установки и адгезиометр: 1 – токовод; 2 – диск с тросиком; 3 – индентор; 4 – образцы обрабатываемого материала

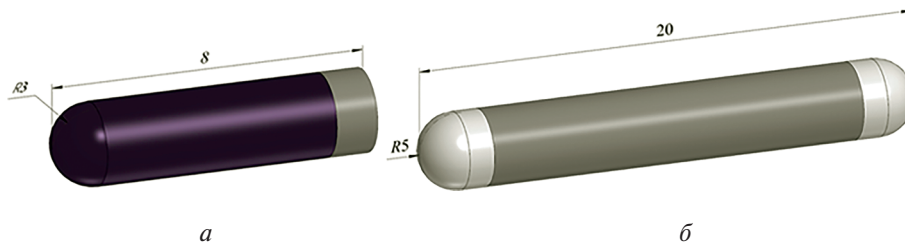


Рис. 3. Контртело (а) и индентор (б) с покрытиями для триботехнических испытаний на трибометре и адгезиометре

G133 и DIN 50324. Специализированная программа TRIBOX позволяет автономно управлять трибометром в процессе испытания и выводить полученные результаты для анализа. Контртело представляет собой одностороннюю полусферу (диаметром 6 мм), изготовленную из инструментального материала ВК10 ОМ с различными покрытиями (рис. 3).

Как уже отмечалось, для ускоренной оценки эффективности разрабатываемых составов износостойких покрытий и отработки их режимов имплантации с целью снижения материальных затрат на инструмент, катод и другие необходимые материалы в производственных условиях, целесообразно провести серию опытных работ на специальной высокотемпературной адгезионной установке (адгезиометре). Экспериментальный метод [13] используется для определения таких триботехнических характеристик, как прочность адгезионных связей на срез (τ_{nm}), нормальное напряжение на пятне контакта сферической поверхности индентора (p_m), адгезионная составляющая коэффициента трения (τ_{nm}/p_m). Основу этого метода составляет физическая модель, которая соответствует реальным условиям трения и изнашивания на локальном высокотемпературном контакте трибопары, в частности «инструмент–деталь». В соответствии с этой моделью (рис. 4), между двумя отполированными плоскопараллельными образцами из обрабатываемого материала 3 устанавливается цилиндрический индентор со сферическими наконечниками 1 из исследуемого материала инструмента. В зависимости от целей исследования, на сферические поверхности индентора наносятся различные покрытия и смазочные материалы. При работе установленный на диск 2 индентор (из ВК10 ОМ с различными исследуемыми покрытиями) рычажно-реечным механизмом зажимается между двумя образцами (из ЭИ-654 или Э-698 ВД) и вращается посредством тросика 4 вокруг своей оси от прикладываемой и контролируемой силы $F_{экс}$, которая в последующем позволяет определить прочность сдвига (τ_{nm}) адгезионных связей, а другой конец троса связан с упруго-деформируемыми пластинами и устройствами регистрации

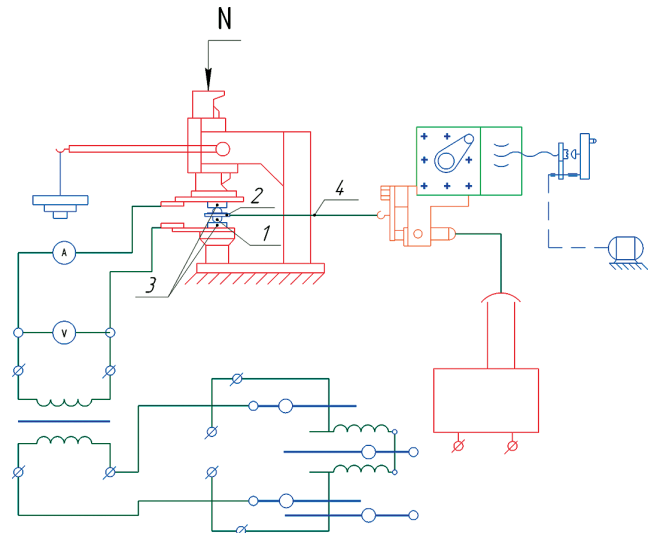


Рис. 4. Принципиальная схема установки для адгезионных испытаний

и записи значений усилия от привода вращения. Температурный режим в контактной зоне исследуемого индентора с образцами обрабатываемого материала осуществляется электроконтактным способом путем подачи высокого напряжения на изолированные клеммы от управляемого силового трансформатора. Установка позволяет обеспечить широкий диапазон изменения температуры от 0 до 1500°C. Результаты рассчитываются по следующим формулам:

– значение прочности адгезивных связей

$$\tau_n = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{экс}}{\pi} \cdot \frac{R_{экс}}{r_{отп}^3}, \quad (1)$$

где $F_{экс}$ – измеренное значение окружной силы вращения, Н; $R_{экс}$ – радиус установочного диска индентора, мм; $r_{отп}$ – радиус вдавненной лунки на образцах, мм;

– нормальное напряжение

$$p_r = \frac{N}{\pi \cdot r_{отп}^2}; \quad (2)$$

– адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения

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

Натурные испытания на износостойкость режущего инструмента с различными покрытиями проводились согласно многочисленным рекомендациям и с учетом режимов резания, применяемых на машиностроительных предприятиях. Для обеспечения точности полученных результатов измерения величины фаски изнашивания по задней поверхности (h_3 , мм) режущего клина инструмента применялись оптический микроскоп МИР-2М и многофункциональный электронный стереомикроскоп Carl Zeiss Stereo Discovery V12.

4. Результаты экспериментов и их обсуждения

Результаты триботехнических испытаний на трение на высокотемпературном трибометре Nanovea TRB и адгезионной установке для исследуемых пар «обрабатываемый и инструментальный материалы» представлены на рис. 5–8. Анализ полученных экспериментальных данных на трибометре в широком диапазоне изменения температуры на контакте (рис. 5 и 6) показал, что коэффициент трения для пары ЭИ-654 – ВК10 ОМ имеет минимальное значение при температуре 700°C, а для пары ЭИ-698 ВД – ВК10 ОМ – при температуре 750°C. При этом наименьшее его значение показывают высокоэнтропийные покрытия на алюминиевой основе, в частности с процентным составом Al – 20%; Ti – 20%; Zr – 15%; V – 15%; Cr – 15%; Nb₁₅. Результаты исследования адгезионной составляющей коэффициента трения в широком диапазоне изменения температуры для всех исследуемых пар (рис. 7 и 8) позволяют сделать вывод, что зависи-

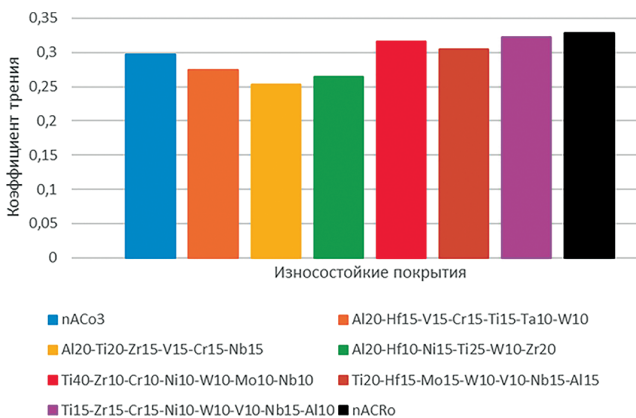


Рис. 5. Значение коэффициента трения на контакте для пары ЭИ-654 – ВК10 ОМ с различными покрытиями при температуре 700°C

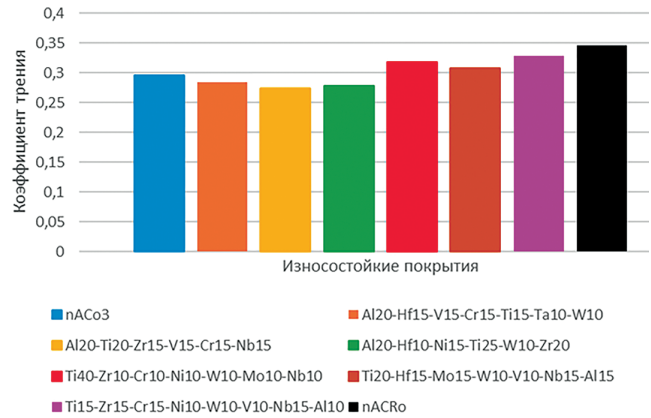


Рис. 6. Значение коэффициента трения на контакте для пары ЭИ-698 ВД – ВК10 ОМ с различными покрытиями при температуре 750°C

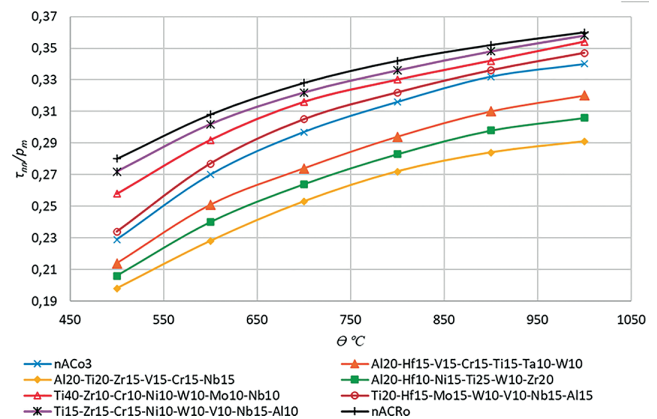


Рис. 7. Влияние температуры на адгезионную составляющую коэффициента трения для пары ЭИ-654 – ВК10 ОМ с различными покрытиями

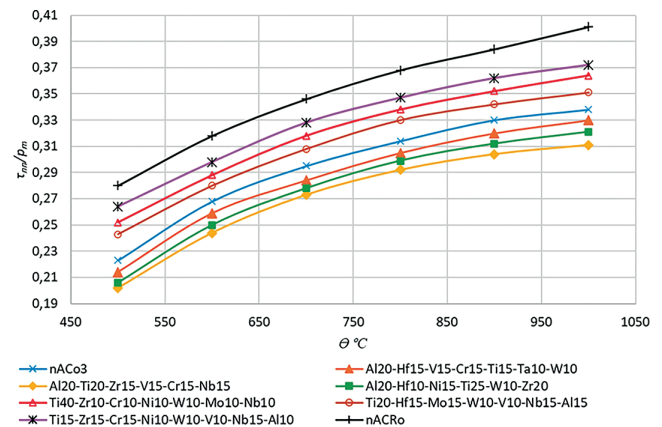


Рис. 8. Влияние температуры на адгезионную составляющую коэффициента трения для пары ЭИ-698 ВД – ВК10 ОМ с различными покрытиями

мости носят монотонно возрастающий характер и наименьшие значения коэффициента трения при данных условиях испытаний показывают высокоэнтропийные покрытия на алюминиевой основе, в частности с процентным составом Al – 20%; Ti – 20%; Zr – 15%; V – 15%; Cr – 15%; Nb₁₅.

Для оценки эксплуатационных свойств режущего инструмента, как без покрытия, так и с наноструктурированными многослойными композиционными покрытиями, в частности высокоэнтропийными наноструктурированными многослойными композиционными, по-прежнему необходимо проведение длительных трудоемких износостойких испытаний. Учитывая особенности полустогового и чистового точения и необходимость обеспечения размерной стойкости инструмента в пределах полных проходов, измеряли среднюю ширину фаски износа по задней поверхности (без учета выемок). Проведены серии износостойких испытаний твердосплавных пластин с различными покрытиями при точении на различных режимах резания с последующим определением оптимальных режимов (по минимуму износа) для ЭИ-654 ($V = 85$ м/мин; $S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм) и ЭИ-698 ВД ($V = 75$ м/мин; $S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм) и периода стойкости (T , мин). Результаты испытаний представлены на рис. 9–12.

Анализ полученных результатов износостойких испытаний при продольном точении жаропрочных сплавов ЭИ-654 и ЭИ-698 ВД позволил оценить эксплуатационные свойства высокоэнтропийных износостойких покрытий, а также определить благоприятный состав и технологию их получения. В целом установлено, что наибольшую длину пути резания (l , м), соответственно, и период стойкости (T , мин) обеспечивают при точении ЭИ-654 и ЭИ-698 ВД наноструктурированные

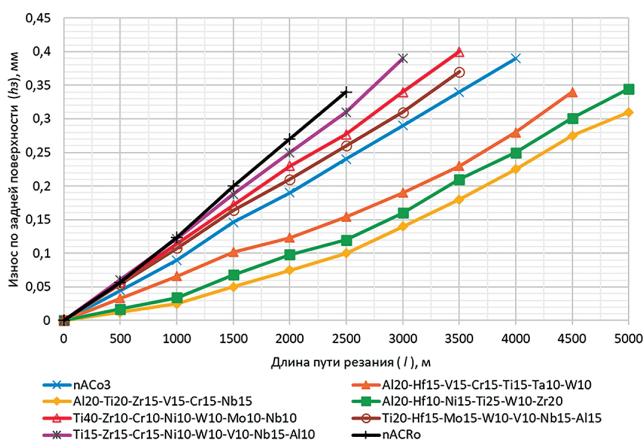


Рис. 9. Зависимость износа инструмента от длины пути резания при точении ЭИ-654 пластинами ВК 10 ОМ с различными покрытиями ($V = 85$ м/мин; $S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

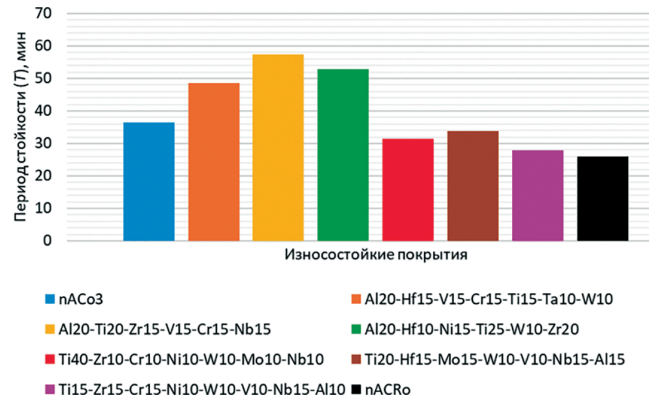


Рис. 10. Зависимость периода стойкости инструмента (T) от применяемых износостойких покрытий резания при точении ЭИ-654 пластинами ВК 10 ОМ с различными покрытиями ($V = 85$ м/мин; $S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

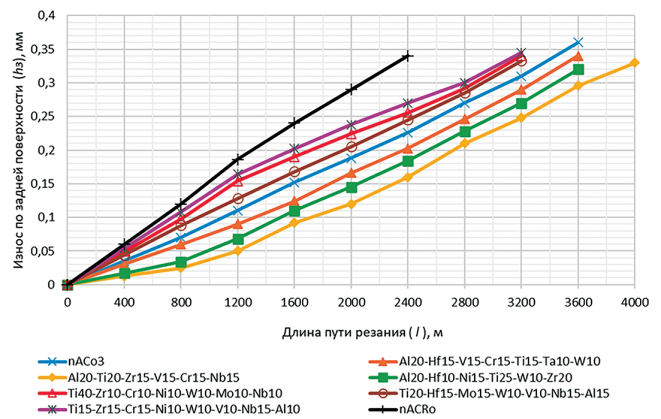


Рис. 11. Зависимость износа инструмента от длины пути резания при точении ЭИ-698 ВД пластинами ВК 10 ОМ с различными покрытиями ($V = 75$ м/мин; $S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

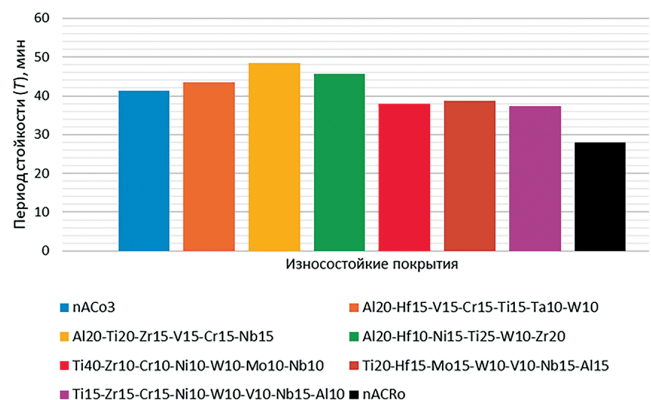


Рис. 12. Зависимость периода стойкости инструмента (T) от применяемых износостойких покрытий при точении ЭИ-698 ВД – ВК 10 ОМ ($V = 75$ м/мин; $S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

высокоэнтропийные покрытия на алюминиевой основе ($Al_{20}-Ti_{20}-Zr_{15}-V_{15}-Cr_{15}-Nb_{15}$); ($Al_{20}-Hf_{10}-Ni_{15}-Ti_{25}-W_{10}-Zr_{20}$); ($Al_{20}-Hf_{15}-V_{15}-Cr_{15}-Ti_{15}-Ta_{10}-W_{10}$) и наноструктурированное многослойное покрытие $nAlCo_3$.

Выводы

По результатам проведенных экспериментальных исследований триботехнических характеристик на высокотемпературном трибометре Nanovea TRB установлен экстремальный характер зависимости коэффициента трения от длины пути трения при возвратно-поступательном движении на различных режимах нагружения и температурах, при этом коэффициент трения для пары ЭИ-654 – ВК10 ОМ имеет минимальное значение при температуре 700°C, а для пары ЭИ-698 ВД – ВК10 ОМ – при температуре 750°C. Наименьшее значение коэффициента трения 0,255 для пары ЭИ-654 – ВК10 ОМ и 0,285 для пары «ЭИ-698 ВД – ВК10 ОМ» обеспечивается высокоэнтропийным покрытием на алюминиевой основе, в частности с процентным составом Al – 20%; Ti – 20%; Zr – 5%; V – 5%; Cr – 15%; Nb₁₅. По результатам исследования адгезионной составляющей коэффициента трения в широком диапазоне изменения температуры для всех исследуемых пар установлено, что зависимости носят монотонно возрастающий характер и наименьшие значения при данных условиях испытаний обеспечивают высокоэнтропийные покрытия на алюминиевой основе, в частности с процентным составом Al – 20%; Ti – 20%; Zr – 15%; V – 15%; Cr – 15%; Nb₁₅ с адгезионной составляющей коэффициент трения, равной 0,255 для пары ЭИ-654 – ВК10 ОМ и 0,285 для пары ЭИ-698 ВД – ВК10 ОМ. Результаты износостойких испытаний для всех исследуемых пар «инструмент – деталь» показали эффективность применения высокоэнтропийных покрытий. В частности, лучшие показатели по сравнению с продвинутым и широко используемым на производстве покрытием $nAlCo_3$ – высокоэнтропийное покрытие Al – 20%; Ti – 20%; Zr – 15%; V – 15%; Cr – 15%; Nb₁₅ обеспечивает улучшение периода стойкости при точении соответственно ЭИ-654 на 34% и ЭИ-698 ВД на 16%.

Повышение износостойкости твердосплавных пластин при точении жаропрочных сплавов V группы обрабатываемости, используемых в деталях силовой части ГТД и ЛА, достигается благодаря обеспечению хорошей адгезии между покрытием и подложкой инструмента; улучшению триботехнических характеристик используемых износостойких покрытий; созданию благоприятных температурно-силовых условий при резании. Наиболее эффектив-

ными являются многослойные композиционные наноструктурированные высокоэнтропийные износостойкие покрытия, которые, по-видимому, более склонны к адаптации и формированию вторичных структур на контактной зоне «инструмент – деталь» при определенных температурно-силовых условиях.

В целом по результатам проведенных экспериментальных исследований при продольном точении хромоникелевых сплавов ЭИ-654 и ЭИ-698 ВД подтверждена возможность повышения производительности обработки ответственных деталей газотурбинных двигателей и летательного аппарата в среднем на 20–25%.

Список источников

1. Райхельсон В.А. Обработка резанием сталей, жаропрочных и титановых сплавов с учетом их физико-механических свойств. – М.: Техносфера, 2018. – 507 с.
2. Шустер Л.Ш., Криони Н.К., Шолом В.Ю., Мигранов М.Ш. Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке: Монография. – М.: Машиностроение, 2008. – 318 с.
3. Мокрицкий Б.Я., Ситамов Э.С., Серебренникова А.Г. Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента за счет нанесения покрытий // Вестник ИрГТУ. 2019. Т. 23. № 2(145). С. 246–251. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-246-251
4. Шустер Л.Ш., Фокс-Рабинович Г.С., Чертовских С.В. Влияние режимов резания на износостойкость инструментов с покрытием TiB₂ при обработке титанового сплава // Трение и износ. 2021. Т. 42. № 6. С. 707–716. DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-6-707-716
5. Кохнюк В.Н., Изюмов А.А., Селифанов С.О. и др. Увеличение ресурса металлообрабатывающего инструмента посредством нанесения износостойких наноструктурных покрытий на основе карбидов и оксидов титана // Современные технологии для заготовительного производства: Сборник научных работ 74-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ (14 апреля 2021). Минск: БНТУ, 2021. С. 53–55.
6. Haubner R., Lessiak M., Pitonak R. et al. Evolution of conventional hard coatings for its use on cutting tools // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2017. Vol. 62 (Part B), pp. 210–218. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2016.05.009
7. Береснев В.М., Погребняк А.Д., Азаренков Н.А. и др. Нанокристаллические и нанокомпозитные покрытия, структура, свойства // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2007. Т. 5. № 1–2. С. 4–27.
8. Кабалдин Ю.Г., Семibrатова М.В., Кириченко В.В. Самоорганизация в процессах трения при резании // Известия ТПУ. 2002. Т. 305. № 1. С. 95–100.

9. Haršani M., Ghafoor N., Calamba K. et al. Adhesive-deformation relationships and mechanical properties of nc-AlCrN/a-SiNx hard coatings deposited at different bias voltages // *Thin Solid Films*. 2018. Vol. 650, pp. 11-19. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.02.006
10. Блинков И.В., Белов Д.С., Волхонский А.О. и др. Упрочняющие ионно-плазменные покрытия (Ti,Alx)N (x = Зат.%) для твердосплавного режущего инструмента // Быстрозакаленные материалы и покрытия: Материалы XVII Международной научно-технической конференции (20–21 октября 2020; МАИ, Москва). М.: Пробел, 2020. С. 102–107.
11. Верещака А.А., Бубликов Ю.И., Лыткин Д.Н. Влияние толщины нанослоев на эксплуатационные свойства многослойно-композиционных наноструктурированных модифицирующих покрытий для металлорежущего инструмента // *Металлообработка*. 2018. № 6(108). С. 2–6. DOI: 10.25960/МО.2018.6.2
12. Prengel H.G., Jindal P.C., Wendt K.H. et al. A new class of high-performance PVD coatings for carbide cutting tools // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 139. No. 1, pp. 25-34. DOI: 10.1016/S0257-8972(00)01080-X
13. Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш. Прибор для исследования адгезивного взаимодействия. Патент RU 34249 U1, 27.11.2003.
14. Григорьев С.Н., Волосова М.А., Сухова Н.А., Шехтман С.Р. Технология синтеза дуплексных вакуумных ионно-плазменных покрытий системы TiZrAlN для деталей энергоустановок // *Вестник Московского авиационного института*. 2023. Т. 30. № 3. С. 201–208.
15. Cselle T., Coddet O., Galamand C. et al. TripleCoatings3® - New generation of PVD-coatings for cutting tools // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2009. Vol. 49, pp. 19-25.
16. Migranov M.S., Shekhtman S.R., Gusev A.S. Synthesizing Low-Wear Cathodic Coatings from Multi-component Alloys with a High-Entropy Effect // *Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2023, pp. 718-728. DOI: 10.1007/978-3-031-38126-3_71
17. Бафоев Д. Перспективные методы повышения износостойкости режущих инструментов // *ERUS (Educational Research in Universal Sciences)*. 2023. Vol. 2. No. 14 Special, pp. 576–581.
18. Ласица А.М., Чуранкин В.Г., Чуранкина Т.А., Дзиевский Р.О. Влияние покрытия TiN на распределение нагрузок в твердосплавных режущих пластинах при обработке аустенитных нержавеющей сталей // *Омский научный вестник*. 2020. № 4(172). С. 9–12. DOI:10.25206/1813-8225-2020-172-9-12
19. Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Сухова Н.А., Гусев А.С. Износостойчивые комплексы инструментального назначения для эксплуатации в условиях повышенной теплосилового нагружения // *Вестник Московского авиационного института*. 2022. Т. 29. № 3. С. 222–230. DOI: 10.34759/vst-2022-3-222-230
20. Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш., Гусев А.С. Эффективность наноструктурированных износостойких покрытий при высокоскоростном фрезеровании титановых сплавов // *Вестник Московского авиационного института*. 2023. Т. 30. № 2. С. 188–195. DOI: 10.34759/vst-2023-2-188-195
21. Knyazeva Z.V., Yudin P.E., Petrov S.S., Maksimuk A.V. Using Metal-Sprayed Coatings to Protect Submersible Electric Pump Motors from the Impact of Complicating Factors in Oil Wells // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2020. Vol. 61. No. 5, pp. 592-599. DOI: 10.3103/S1067821220050065

References

1. Raikhel'son V.A. *Obrabotka rezaniem staley, zharoprochnykh i titanovykh splavov s uchetom ikh fiziko-mekhanicheskikh svoystv* (Cutting of steels, heat-resistant and titanium alloys, with account for their physical and mechanical properties), Moscow, Tekhnosfera, 2018, 507 p.
2. Shuster L.Sh., Krion N.K., Sholom V.Yu., Migranov M.Sh. *Pokrytiya i smazka v vysokotemperaturnykh podvizhnykh sopryazheniyakh i metalloobrabotke* (Coatings and lubrication in high-temperature mobile interfaces and metalworking), Moscow, Mashinostroenie, 2008, 318 p.
3. Mokritskii B.Ya., Sitamov E.S., Serebrennikova A.G. *Vestnik IrGTU*, 2019, vol. 23, no. 2(145), pp. 246-251. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-246-251
4. Shuster L.Sh., Foks-Rabinovich G.S., Chertovskikh S.V. *Trenie i iznos*, 2021, vol. 42, no. 6, pp. 707–716. DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-6-707-716
5. Kokhnyuk V.N., Izyumov A.A., Selifanov S.O. et al. *Materialy 74 Nauchno-tehnicheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh rabotnikov, doktorantov i aspirantov BNTU "Sovremennye tekhnologii dlya zagotovitel'nogo proizvodstva" (14 April 2021)*. Minsk, BNTU, 2021, pp. 53-55.
6. Haubner R., Lessiak M., Pitonak R. et al. Evolution of conventional hard coatings for its use on cutting tools. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2017, vol. 62(Part B), pp. 210-218. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2016.05.009
7. Beresnev V.M., Pogrebnyak A.D., Azarenkov N.A. et al. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2007, vol. 5, no. 1-2, pp. 4-27.
8. Kabaldin Yu.G., Semibratova M.V., Kirichenko V.V. *Izvestiya TPU*, 2002, vol. 305, no 1, pp. 95-100.
9. Haršani M., Ghafoor N., Calamba K., et al. Adhesive-deformation relationships and mechanical properties of nc-AlCrN/a-SiNx hard coatings deposited at different bias voltages. *Thin Solid Films*, 2018, vol. 650, pp. 11-19. DOI: 10.1016/j.tsf.2018.02.006

10. Blinkov I.V., Belov D.S., Volkhonskii A.O. et al. *Materialy XVII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoj konferentsii "Bystrozakalennye materialy i pokrytiya" (20-21 October 2020; MAI, Moscow)*. Moscow, Probel, 2020, pp. 102-107.
11. Vereshchaka, A.A., Bublikov Yu.I., Lytkin D.N. *Metalloobrabotka*, 2018, no. 6(108), pp. 2-6. DOI: 10.25960/MO.2018.6.2
12. Prengel H.G., Jindal P.C., Wendt K.H. et al. A new class of high-performance PVD coatings for carbide cutting tools. *Surface and Coatings Technology*, 2001, vol. 139, no. 1, pp. 25-34. DOI: 10.1016/S0257-8972(00)01080-X
13. Shuster L.Sh., Migranov M.Sh. *Patent RU 34249 U1*, 27.11.2003.
14. Grigor'ev S.N., Volosova M.A., Sukhova N.A., Shekhtman S.R. Duplex vacuum ion-plasma coatings synthesis technology of the TiZrAlN system for energy installations parts. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 3, pp. 201-208.
15. Cselle T., Coddet O., Galamand C. et al. TripleCoatings3® - New generation of PVD-coatings for cutting tools. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2009, vol. 49, pp. 19-25.
16. Migranov M.S., Shekhtman S.R., Gusev A.S. Synthesizing Low-Wear Cathodic Coatings from Multi-component Alloys with a High-Entropy Effect. *Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2023, pp. 718-728. DOI: 10.1007/978-3-031-38126-3_71
17. Bafoev D. Prospective methods for cutting tools wearability ehancing. *ERUS (Educational Research in Universal Sciences)*, 2023, vol. 2, no. 14 Special, pp. 576-581.
18. Lasitsa A.M., Churankin V.G., Churankina T.A., Dzivil'skii R.O. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2020, no. 4(172), pp. 9-12. DOI:10.25206/1813-8225-2020-172-9-12
19. 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
20. Grigor'ev S.N., Volosova M.A., Migranov M.S., Gusev A.S. Nano-structured wear-resistant coatings effectiveness at titanium alloys high-speed milling. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 188-195. DOI: 10.34759/vst-2023-2-188-195
21. Knyazeva Z.V., Yudin P.E., Petrov S.S., Maksimuk A.V. Using Metal-Sprayed Coatings to Protect Submersible Electric Pump Motors from the Impact of Complicating Factors in Oil Wells. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2020, vol. 61, no. 5, pp. 592-599. DOI: 10.3103/S1067821220050065

Статья поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 09.04.2024; принята к публикации 10.04.2024.
The article was submitted on 28.03.2024; approved after reviewing on 09.04.2024; accepted for publication on 10.04.2024.