

Научная статья
УДК 621.76
DOI: 10.34759/vst-2023-2-188-195

ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Сергей Николаевич Григорьев¹, Марина Александровна Волосова²,
Марс Шарифуллович Мигранов³✉, Андрей Сергеевич Гусев⁴

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

Москва, Россия

¹s.grigoriev@stankin.ru

²volosova1978@gmail.com

³migmars@mail.ru ✉

⁴gusev.angrey@bk.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований трибологических свойств инновационных композиционных наноструктурированных износостойких покрытий при высокоскоростном фрезеровании титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ6, широко используемых в деталях и агрегатах современных авиационных двигателей и ракетно-космической техники. Результаты температурных и силовых испытаний при фрезеровании износостойкими покрытиями показали снижение температуры резания в среднем на 20%, а также уменьшение значения составляющих усилия резания на 25-30% с покрытием «nACrO3+TiB2» по сравнению с другими. В целом по результатам проведенных исследований установлено повышение эффективности высокоскоростного фрезерования титановых сплавов с современными инновационными композиционными наноструктурированными износостойкими покрытиями за счет увеличения периода стойкости режущего инструмента в два и более раза. Проведенная дополнительная экспресс-оценка показателей качества обработанной поверхности (шероховатость и наклеп обработанной поверхности) показала улучшение требуемых показателей качества обработанной поверхности, что важно при лезвийной обработке резанием элементов конструкции деталей (фланцы, диски, валы роторов компрессора и т. д.).

Ключевые слова: износостойкие покрытия, двойные и тройные нитриды, адгезиомер, температурно-силовые условия резания, термо-ЭДС, ртутный токосъемник, составляющие усилия резания, износостойкость режущего инструмента

Финансирование: исследование финансируется из средств государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSFS-2023-0003

Для цитирования: 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

Original article

NANO-STRUCTURED WEAR-RESISTANT COATINGS EFFECTIVENESS AT TITANIUM ALLOYS HIGH-SPEED MILLING

Sergei N. Grigor'ev¹, Marina A. Volosova², Mars S. Migranov³✉, Andrey S. Gusev⁴

^{1, 2, 3, 4} Moscow State University of Technology "STANKIN",

Moscow, Russia

¹s.grigoriev@stankin.ru

²volosova1978@gmail.com

³migmars@mail.ru ✉

⁴gusev.angrey@bk.ru

Abstract

The article presents the results of tribology properties experimental studies, particularly the dependence of wear over the back surface of the cutting edge on the cutting path length and the miller durability period for various coatings. Full-

© Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш., Гусев А.С., 2023

scale tests of innovative composite nanostructured wear-resistant coatings were being performed at high-speed milling of the VT3-1 and VT6 titanium alloys widely employed in the parts and units of the state-of-the-art gas-turbine engines (GTE) and rocket-space technology. The coated millers wear was being measured with the "Carl Zeiss Stereo Discovery V12" stationary motorized stereo microscope with telecommunication capability and 3 mp "Zeiss Axiocam 503 Color" video camera based visualization system. A series of experiments on studying contact processes while milling, such as temperature and cutting force components were conducted with modern equipment and facilities. While the electro-physical parameters control and registration, accompanying blade machining process, the natural thermocouples method with mercury current collector application and PC recording was employed for the cutting temperature determining. The temperature tests results while milling by wear resistant coatings revealed the average 20% reduction in cutting temperature with the "nACRo3+TiB2" coating compared to the others, and the VT3-1 machining was less heat intensive compared to the VT6 one. The cutting forces components were being determined with the "Kisler" dynamometer complex consisted of the 9253B23 model three-component dynamometer, amplifier with ADC and a PC. The cutting edge force loading of the miller with the "nACRo3+TiB2" coating has lower value compared to the others and is 25-30%. The results of the conducted studies revealed effectiveness increase of the titanium alloys high-speed milling by application of the state-of-the-art nano-structured wear resistant more than twofold. Express-evaluation of the machined surface quality indices, such as roughness and hardening, was being extra conducted while these tests. The results of the performed express-evaluations revealed the required machined surface quality indices improvement, which is important while the GTE structural elements such as flanges, disks, compressor rotor shafts etc. blade cutting machining.

During these tests, express-evaluation of the quality indicators of the machined surface (roughness and naklep of the machined surface) was additionally carried out. The results of the express-evaluations showed the improvement of the required quality indicators of the machined surface, which is important for blade cutting machining of structural elements of GTE parts (flanges, disks, compressor rotor shafts, etc.).

Keywords: wear-resistant coatings, double and triple nitrides, adhesiomer, temperature-force cutting conditions, thermo-EMF, mercury current collector, cutting force components, cutting tool wear resistance

Funding: the research is being supported from the funds of State Assignment in the sphere of scientific activities of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. FSFS-2023-0003

For citation: Grigor'ev S.N., Volosova M.A., Migranov M.Sh., 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

Введение

Сложно представить современную аэрокосмическую промышленность без титановых сплавов, которые широко используются в двигателестроении при изготовлении компрессоров и деталей газотурбинных двигателей (ГТД), узлов и агрегатов планера самолета и вертолета, а также изделий ракетно-космического производства. Известно [1, 2], что титановые сплавы обладают превосходными характеристиками, а именно: высокой прочностью на растяжение и сжатие даже при нагреве до 600°C и более; способностью работать как при высоких, так и при криогенных температурах; пониженной плотностью по сравнению с другими металлами (за счет чего при одинаковой прочности конструкции из титана на 45 % легче стальных); высокой пластичностью и хорошей ударной вязкостью при высоких температурах и знакопеременных нагрузках; низкими температуро- и теплопроводностью (меньшими по сравнению с никелем, железом, алюминием и медью соответственно в 4;5;14 и 25 раз); возможностью получения наноструктурного состояния путем дополнительных технологических приемов (порошковая металлургия, равно-канальное угловое прессование, поперечно-винтовая и продольная прокатка и др.). Титановые сплавы обладают низким коэффициентом температурного расширения; высокой коррозионной стойкостью (используются

в конструкциях, работающих в кислой и щелочной средах, в морской воде), устойчивостью к солнечной радиации; способностью сплавляться с железом, алюминием, ванадием, молибденом и другими металлами; нет необходимости в специальной защите от воздействия природных явлений.

Рассматриваемые титановые сплавы VT3-1 и VT6, согласно [2], относятся к жаропрочным за счет применения определенного соотношения алюминия; при высоком содержании Al можно достичь интерметаллидного состояния, обеспечивающего жаропрочность выше, чем у никелевых сплавов, и возможность применения VT3-1 и VT6 в высокотемпературных элементах конструкции авиационных ГТД.

При всех уникальных конструкционных свойствах титановые сплавы нетехнологичны с точки зрения их механической обработки, в частности лезвийной обработки резанием из-за необходимости большого расхода инструментального материала, сложности обеспечения качества обработанной поверхности, низкой производительности и высокой себестоимости процесса. В основном это обусловлено их низкой теплопроводностью, способствующей высокой тепловой напряженности в контактной зоне «деталь-инструмент» при резании, когда небольшая часть выделенного тепла отводится в окружающую среду и в стружку, а значительная часть тепла передается на инструмент,

что предопределяет низкую износостойкость режущего инструмента и вероятность неточности изготовления обрабатываемой детали [3–6].

Известно, что с повышением прочностных характеристик материалов, подвергаемых механической обработке точением, фрезерованием, сверлением и т. д., существенно снижаются производительность обработки и в целом ее эффективность, возрастет расход дорогостоящего твердосплавного и вольфрамсодержащего металлорежущего инструмента [7]. В конечном счете, инструментальное обеспечение определяет уровень технологичности машиностроительного производства [5, 7–9].

В большинстве случаев машиностроительное производство выпускает металлообрабатывающий инструмент с различными покрытиями. При этом существует ряд проблем, связанных как с производством самого инструмента, особенно спекаемого (отсутствие качественных отечественных порошков и оборудования для спекания), и нанесением износостойких покрытий (состав и режимы), так и с необходимостью разработки научно обоснованных режимов и рекомендаций по использованию режущего инструмента в условиях машиностроительного производства [10–13]. Так, например, практически не учитываются особенности температурно-силовых условий, контактных процессов и изнашивания при высокоскоростной обработке титановых сплавов. Вместе с тем, разработка рекомендаций по рациональному выбору марки инструментального материала и типа наносимого покрытия для каждого конкретно взятого случая позволит существенно повысить износостойкость режущего инструмента и производительность процесса механической обработки [13–15].

Цель проводимой работы – исследование эффективности лезвийной обработки резанием и улучшение показателей качества обработанного поверхностного слоя применительно к деталям аэрокосмической техники при высокоскоростном фрезеровании титановых сплавов путем применения инновационных наноструктурированных композиционных износостойких покрытий и определения рациональных режимов фрезерования на основе проведенных натурных износостойкостных и температурно-силовых экспериментов.

1. Теоретико-экспериментальные предпосылки

Известны и успешно применяются различные методы нанесения износостойких покрытий на металлорежущий инструмент [5, 14–17]. С учетом особенностей физико-химических процессов формирования многослойных композиций существующие способы можно разбить на три группы. В *первой группе* формирование покрытий достигается путем диффузионных процессов между осаждаемыми элементами и материалом режущего инструмента; ко *второй группе* относятся покрытия, полученные путем комплексного взаимодействия парогазовой смеси металлонесителя и газотранспортера с последующей интердиффузи-

онной реакцией ее конденсата на инструментальной подложке. *Третья группа* предполагает получение покрытия путем химических и плазмохимических взаимодействий частиц в объемном пространстве с подложкой из металлорежущего инструмента.

Анализ работ отечественных и зарубежных исследователей позволяет заключить, что решение проблемы повышения износостойкости режущего инструмента с различными покрытиями развивается по разным направлениям. При этом практически отсутствуют данные по результатам экспериментальных исследований с указанием режимов резания для конкретных пар «обрабатываемый материал – инструментальный материал» применительно к деталям силовой части (фланцы, диски моноколес, валы роторов компрессора и т. д.). Актуальной задачей являются определение процентного содержания элементов износостойкого покрытия и разработка режимов их нанесения (алгоритм управляющих программ) с последующим исследованием эксплуатационных характеристик (коэффициент адгезионного взаимодействия; температурно-силовые условия резания; период стойкости; критическая длина пути резания; износ по задней поверхности режущего инструмента и т. д.).

На данном этапе были проведены теоретико-экспериментальные исследования наноструктурных многослойных композиционных покрытий, направленные на поиск путей улучшения триботехнических характеристик режущего инструмента с учетом особенностей контактных процессов и температурно-силовых условий в зоне резания при фрезеровании. На основе полученных положительных результатов в дальнейшем выявлены возможности изменения управляющих программ в технологии нанесения на производственной установке для изменения химического состава покрытия, а также разработки методов предварительной обработки поверхности режущего инструмента (оптимизация радиуса скругления режущего клина в зависимости от режимов и вида обработки; микротекстурирование рабочей части и т. д.).

К числу перспективных износостойких покрытий относятся многослойные наноструктурированные покрытия, представляющие собой композиции, полученные путем внедрения кристаллических зерен нитрида кремния наноразмера в аморфную матрицу покрытия нитрида титана и алюминия – с обозначением nACo и в аморфную матрицу нитрида хрома и алюминия – с обозначением nACRo. Такие покрытия обладают сочетанием уникальных свойств: при повышенных прочностных свойствах они имеют улучшенные пластические (эластичность) характеристики, хотя в обычной инженерной практике эти два свойства материалов взаимоисключающие. Это позволяет данным покрытиям эффективно работать как при обычных режимах резания, так и при высокоскоростном резании. Вместе с тем, согласно [14, 18–20], при определенных температурно-силовых условиях и контактных процессах в зоне резания на поверхности металлорежущего инструмента с рассматриваемы-

ми покрытиями высока вероятность формирования вторичных структур со смазывающим эффектом, с более высокой твердостью относительно исходного состояния, что позволяет улучшить их триботехнические характеристики. В частности, на поверхности покрытия nACo при определенных условиях контактного процесса формируются вторичные структуры с защитными и смазывающими свойствами; нанокompозитное покрытие nACRo, вследствие аморфизации поверхности режущего инструмента с покрытием при повышенных температурах резания, обладает очень высокой твердостью; нанокompозитное покрытие TiB2 обладает повышенной твердостью, жаропрочностью, тугоплавкостью и износостойкостью [10, 15].

Покрытие из диборида титана обеспечивает уникальную стойкость к эрозионным явлениям при лезвийной обработке резанием благодаря наличию керамической основы и слоя, обладающего аморфноподобной структурой со смазывающим эффектом в контактной зоне. Покрытие из диборида титана получают путем его добавления в вакууме при физическом осаждении из паровой фазы на металлорежущий инструмент в виде тонкой пленки. Покрытие TiB2 оказывает благоприятное влияние на контактные процессы при стружкообразовании и их отводе, обеспечивая плавность и равномерность схода благодаря исключению прилипания и нароста стружки на режущий клин. Повышенная смазочная способность покрытия из диборида титана актуальна при использовании инструментов с дополнительными канавками с целью обеспечения плавности выхода стружки из канавок и исключения наростообразования.

На предварительном этапе исследований были проведены серии натурных испытаний для определения наиболее эффективных, с точки зрения износостойкости, покрытий. В частности, рассмотрены наноструктурированные композиционные многослойные покрытия (CrAlSi)N; (CrAlSi)N + DLC (Diamond-Like Carbon - алмазоподобное углеродное покрытие); (TiAlSi)N; (CrAlSi)N + эпилама; (CrAlSi)N + DLC + эпилама; (TiAlSi)N + эпилама; (TiCrAl)N; (ZrCrAl)N; (ZrMoAl)N; (ZrMoHfCrAl)N; TiB2; nACo3; nACRo; nACo3+TiB2; nACRo+TiB2; TiB2+эпилама; nACo3+эпилама; nACRo+эпилама; nACo3+TiB2+эпилама; nACRo+TiB2+эпилама. Вышеперечисленные покрытия были нанесены на концевые фрезы как на отечественных установках с различной степенью модернизации и комплектации на базе ННВ-6.6 - И1, так и импортных «Platit π311» в лаборатории «Инновационных материалов и покрытий» института конструкторско-технологической информатики РАН; в лабораториях технологического полигона МГТУ «СТАНКИН», а также на базе инструментального производства технопарка «Стрела» на установке «Platit π411». По результатам сравнительного анализа для дальнейших исследований были отобраны следующие более эффективные покрытия по износостойкости: (CrAlSi)N + DLC; (ZrCrAl)N; nACo3; nACRo; nACo3+TiB2; nACRo+TiB2.

2. Оборудование, методика экспериментальных исследований и результаты

Натурные износостойкостные, температурно-силовые эксперименты при исследовании твердосплавных концевых фрез марки BK10 OM (H10F) с геометрией режущей части: передний угол $\gamma = 10^\circ$; задний угол $\alpha = 4^\circ$; угол спирали $\omega = 30^\circ$, а также диаметр $d = 12$ мм и количество зубьев $z = 4$ с различными покрытиями были проведены при встречном фрезеровании исследуемых сплавов ВТ3-1 и ВТ6 на станках нормальной точности и жесткости фрезерного класса «Knuth WF 4.1» (Германия) и «BM 127M» (Россия). Исследуемые титановые сплавы, наиболее широко применяемые в агрегатах и узлах авиакосмической техники (корпус, статор, диски, лопатки компрессора среднего и низкого давления, а также вентилятора), эксплуатируемые в диапазоне температур 280–350°C, отличаются своей многоцелевой применимостью, объемной химической однородностью; они менее чувствительны к концентраторам остаточных напряжений и, самое главное, обладают лучшей технологичностью при лезвийной обработке резанием. Экспериментальные исследования проводились в режимах обработки применительно к условиям получистовой и чистовой обработок: при частотах вращения шпинделя ($n = 2200$ – 2500 об/мин); минутной подаче инструмента ($S_{\text{мин}} = 150$ мм/мин); ширине фрезерования ($a_e = 5$ мм) и глубине фрезерования ($a_p = 1,5$ мм). Согласно многочисленным исследованиям [3, 4, 6] и по результатам предварительных экспериментов при чистовой и получистовой обработках основным видом износа режущего клина является его средняя величина фаски по задней поверхности ленточки фрезы (без учета выемок). При проведении экспериментальных исследований величину износа измеряли с помощью оптического микроскопа МИР-2М с механической насадкой МОВ-15 с точностью до 0,002 мм после каждого рабочего хода фрезы по длине заготовки ($L_{\text{заг}} = 250$ – 300 мм) на рабочем месте до достижения $h_3 = 0,3$ – $0,35$; после этого измеряли износ фрезы, снятой из оправки, на стационарном моторизованном стереомикроскопе с возможностью телекоммуникации «Carl Zeiss Stereo Discovery V12» с системой визуализации на базе видеокамеры «Zeiss AxioCam 503 Color» 3 мп. Такой подход был связан с необходимостью повышения точности проводимых измерений на всех участках кривой изнашивания (приработочный, нормальный и катастрофический).

Принципиальная схема оборудования и аппаратуры для температурных и силовых исследований при фрезеровании приведена на рис. 1. Для определения тепловой нагруженности режущего клина с различными износостойкими покрытиями измерялась средняя температура контакта при фрезеровании на основе метода естественной термпары с использованием ртутного токосъемника, обеспечивающего простоту, надежность и высокую точность. При температурных испытаниях для исключения возможности возникновения паразитных термоэлектродвижущих сил (ТЭДС) и снижения погрешности измерения обрабатываемая

деталь и режущий инструмент изолировались друг от друга специальными прокладками. Регистрация и запись ТЭДС осуществлялись цифровым милливольтметром, записывающими устройствами «Endim» и ПЭВМ и производились через 5–7 секунд после начала фрезерования.

Для измерения составляющих усилия резания используется комплект оборудования «Kistler», обеспечивающий высокую степень точности. Принципиальная схема сборки и подключения основных элементов измерительной системы приведена на рис. 2.

Основу измерительной системы (рис. 3) составляет трехкомпонентный динамометр модели 9253B23, представляющий собой станину для установки и фиксации заготовки из обрабатываемого материала.

Динамометр оснащен многокомпонентным датчиком, обеспечивающим регистрацию результирующей силы независимо от точки ее приложения за счет пропорциональности алгебраической суммы соответствующих



Рис. 3. Динамометр-станина 9253B23

составляющих усилия резания при фрезеровании. Усиление и преобразование поступающих сигналов ПЭВМ при фрезеровании осуществляется восьмиканальным усилителем-преобразователем модели 5070A01110, сбор и анализ полученных экспериментальных данных – с помощью простого и универсального программного обеспечения «DynoWare» компании «Kistler». Особенностью этого динамометрического комплекса с программным обеспечением является возможность непрерывной визуализации измеряемых параметров и полученных кривых в режиме реального времени с последующим архивированием данных конфигураций и замеров, документированием экспериментальных измерительных процессов, а также наличие необходимых математических и графических функционалов для расчетов и их оценки.

3. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

В работах [3, 5, 7, 19] в поисках решений проблемы пошли по пути моделирования легирующих компонентов (Ti, Cr, Al, Si) в составе нанокompозитных покрытий (nc-TiAlN/a-SiN, nc-AlCrN/a-SiN, nc-AlTiCrN/a-SiN), при этом увеличение периода стойкости инструмента в среднем на 10–15 % не позволяет обосновать улучшение триботехнических характеристик износостойких покрытий с учетом возможных погрешностей измерения.

Результаты натуральных экспериментальных испытаний износостойкости концевых фрез с покрытиями, нанесенными на различных установках на операциях встречного фрезерования, представлены на рис. 4, 5: для титанового сплава BT3-1 – в виде зависимости износа фрез с покрытиями по задней поверхности ленточки (h_3 , мм) от величины длины пути резания (l , м), рис. 4, и расчетные величины зависимости периода стойкости (T , мин) от исследуемых покрытий на режущем инструменте – на рис. 5. При этом наилучшие показатели эффективности фрез по трем критериям – наилучшая износостойкость, наибольшая критическая длина пути резания по износу и максимальный период стойкости обеспечены:

- для титанового сплава BT3 - 1 при применении следующих износостойких покрытий: «nACRo+TiB2» – повышение в 2,5 раза; «nACo3+TiB2» – в 2,1 раза и «(CrAlSi) + DLC» – в 1,8 раза в сравнении по фрезерованию с покрытием без дополнительного слоя «(ZrCrAl)N»;
- для титанового сплава BT6 при применении следующих износостойких покрытий: «nACRo+TiB2» – повышение в 2,1 раза; «nACo3+TiB2» – в 1,6

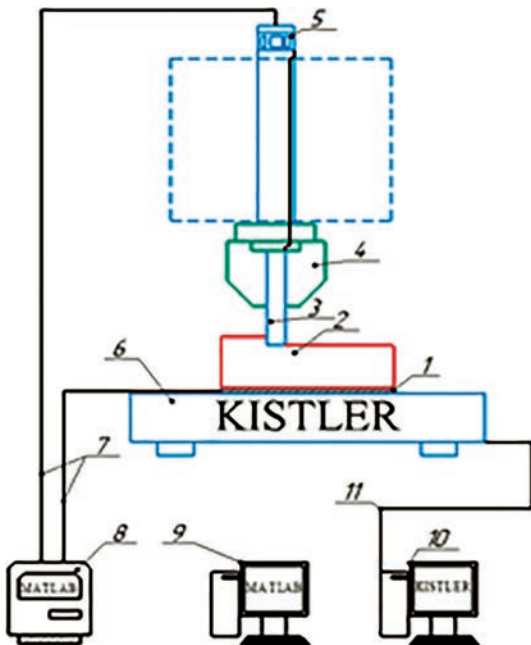


Рис. 1. Принципиальная схема измерения температуры и составляющих усилия резания методом естественной термопары:
1 – изоляция; 2 – заготовка; 3 – изолированная фреза; 4 – патрон; 5 – ртутный токосъемник; 6 – динамометр «Kistler»; 7 – соединительная проводка; 8 – усилитель- преобразователь; 9 – компьютер для регистрации термоэдс; 10 – компьютер для регистрации составляющих усилия резания; 11 – соединительная шина



Рис. 2. Комплект оборудования измерительной системы и принципиальная схема ее сборки

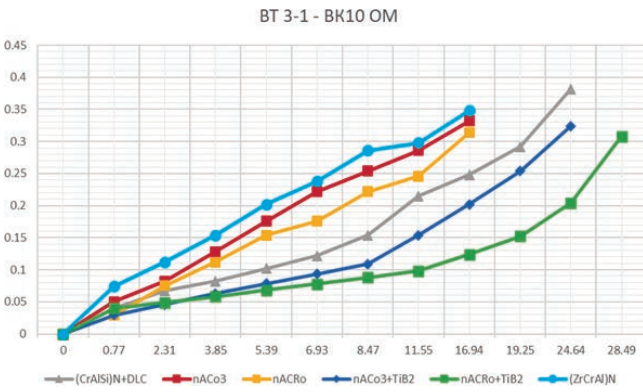


Рис. 4. Зависимость износа по задней поверхности (мм) от длины пути резания (l, м) при лезвийной обработке резанием титанового сплава BT3-1 твердосплавной фрезой BK10 OM с различными покрытиями ($n = 2400$ об/мин, $S_{мин} = 150$ мм/мин, $a_e = 5$ мм, $a_p = 1,5$ мм)

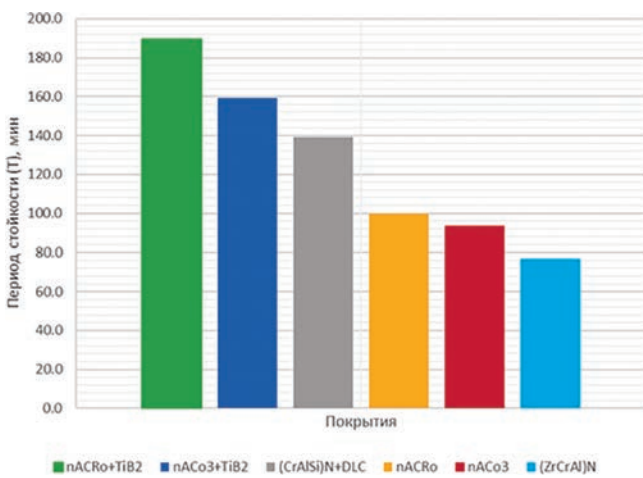


Рис. 5. Влияние различных покрытий на период стойкости инструмента из твердого сплава BK10 OM при фрезеровании титанового сплава BT3-1 ($n = 2400$ об/мин, $S_{мин} = 150$ мм/мин, $a_e = 5$ мм, $a_p = 1,5$ мм)

раза и «CrAlSi) + DLC» – в 1,4 раза в сравнении по фрезерованию с покрытием без дополнительного слоя «(ZrCrAl)N».

По результатам температурных исследований (рис. 6) установлено, что наименьшее значение температуры резания обеспечивается покрытием «nACRo+TiB2» на 17% и 21% соответственно при обработке титановых сплавов BT3-1 и BT6 по сравнению с обработкой с покрытием без дополнительного слоя «(ZrCrAl)N».

Сравнительный анализ температурных зависимостей и теплоемкости фрезерования титановых сплавов показал, что процесс обработки BT3-1 менее теплоемкий по сравнению с BT6.

По результатам проведенных силовых испытаний (рис. 7) установлено:

– наименьшее значение силы резания обеспечивается при применении покрытия «nACRo+TiB2» как для титанового сплава BT3 - 1, так и сплава BT6; при этом составляющая усилия резания соответственно на 25 и 32% меньше по сравнению с обработкой с покрытием без дополнительного слоя «(ZrCrAl)N»;

– силовая нагруженность контактных процессов при фрезеровании BT3-1 меньше по сравнению с BT6 в 1,2–1,4 раза.

Результаты исследования шероховатости обработанной поверхности при точении с различными покрытиями представлены на рис. 8. Установлено,

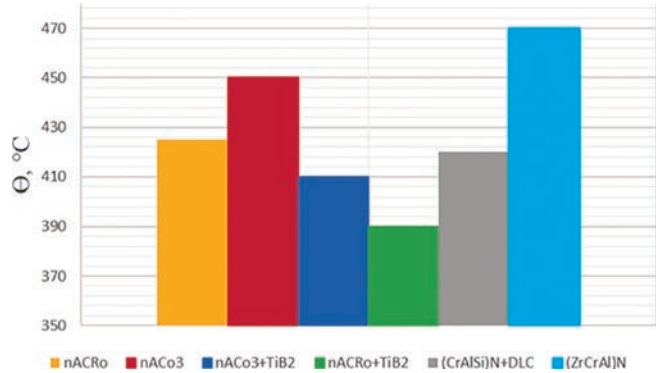


Рис. 6. Зависимость температуры резания от применяемых износостойких покрытий при обработке титанового сплава BT3-1 твердосплавными фрезами BK10 OM ($n = 2400$ об/мин, $S_{мин} = 150$ мм/мин, $a_e = 5$ мм, $a_p = 1,5$ мм)

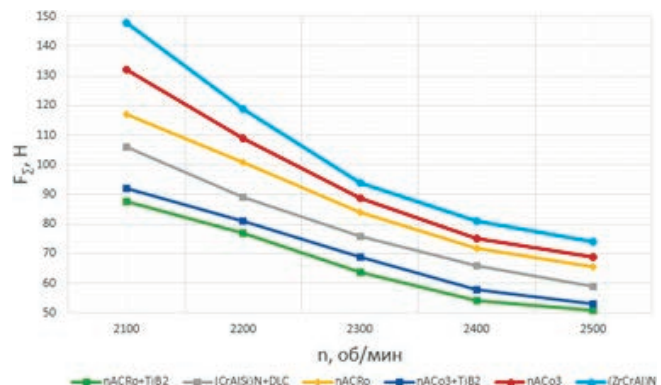


Рис. 7. Составляющая усилия резания при фрезеровании титанового сплава BT3-1 твердосплавными фрезами марки BK10 OM при разных частотах вращения шпинделя (n , об/мин) с различными покрытиями ($n = 2400$ об/мин, $S_{мин} = 150$ мм/мин, $a_e = 5$ мм, $a_p = 1,5$ мм)

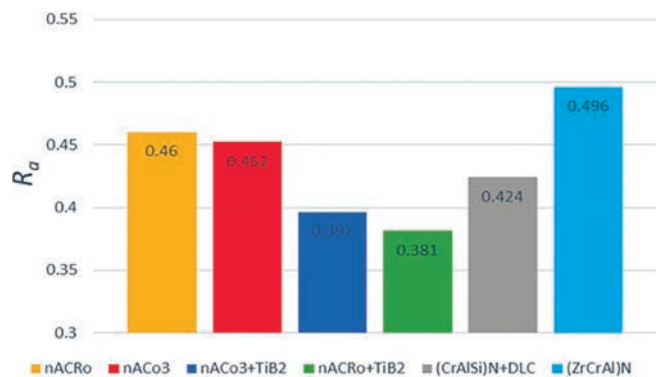


Рис. 8. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от применяемого покрытия при фрезеровании титанового сплава BT3-1 твердосплавными фрезами марки BK10 ($n = 2400$ об/мин, $S_{мин} = 150$ мм/мин, $a_e = 5$ мм, $a_p = 1,5$ мм)

что наилучшие показатели обеспечиваются при применении следующих покрытий: $\text{nACrO} + \text{TiB}_2$; $\text{nACo}_3 + \text{TiB}_2$ и $(\text{CrAlSi})\text{N} + \text{DLC}$.

Выводы

В целом по результатам экспериментальных исследований подтверждена эффективность применения инновационных наноструктурированных многослойных износостойких покрытий на режущем инструменте при высокоскоростном фрезеровании титановых сплавов. Наилучшие показатели по износостойкости режущего инструмента с различными покрытиями получены:

– при фрезеровании титанового сплава ВТ3-1 с использованием износостойких покрытий: улучшение в 2,5 раза с покрытием « $\text{nACrO} + \text{TiB}_2$ »; в 2,1 раза – с покрытием « $\text{nACo}_3 + \text{TiB}_2$ » и в 1,8 раза – « $(\text{CrAlSi}) + \text{DLC}$ »;

– при фрезеровании титанового сплава ВТ6 с использованием износостойких покрытий: « $\text{nACrO} + \text{TiB}_2$ » – повышение в 2,1 раза; « $\text{nACo}_3 + \text{TiB}_2$ » – в 1,6 раза и « $(\text{CrAlSi}) + \text{DLC}$ » – в 1,4 раза.

Высокая износостойкость концевых фрез с инновационными наноструктурированными многослойными покрытиями, а также меньшая температурно-силовая нагруженность зоны резания при скоростном фрезеровании связаны не только с высокой сопротивляемостью к изнашиванию покрытий, но и с особыми процессами, происходящими в высокотемпературной контактной зоне, которые способствуют образованию защитных самоорганизующихся вторичных структур на поверхности режущего клина [10, 14, 15]. При этом следует отметить улучшение показателей качества обработанной поверхности (шероховатость и наклеп поверхностного слоя) по результатам проведенных экспресс-оценок.

Список источников

1. Павлова Т.В., Кашипов О.С., Ночовная Н.А. Титановые сплавы для газотурбинных двигателей // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 5. С. 8–14.
2. Глазунов С.Г., Ясинский К.К. Титановые сплавы для авиационной техники и других отраслей промышленности // Технология легких сплавов. 1993. № 7–8. С. 47–54.
3. Шулов В.А., Быценко О.А., Теряев Д.А. Получение нанокристаллических эрозионно-коррозионно-стойких покрытий, содержащих МАХ-фазу, на поверхности деталей из титановых сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 3. С. 168–177.
4. Козинер Ю.Д., Арефьев А.В., Арефьев В.В. Оптимизация высокоскоростного фрезерования пера для компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) // Международный исследовательский журнал. 2017. № 3(57). DOI: 10.23670/IRJ.2017.57.127
5. Волосова М.А., Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровов для применения в инструментальном производстве // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 6(66). С. 37–42.
6. Гурин 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.

7. Григорьев С.Н., Волосова М.А. Технология комбинированного поверхностного упрочнения режущего инструмента из оксидно-карбидной керамики // Вестник машиностроения. 2005. № 9. С. 32–36.
8. Метель А.С., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Панин В.В. Заполнение рабочей камеры технологической установки однородной плазмой с помощью стационарного тлеющего разряда // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 12. С. 1140–1149.
9. Quan G.Z., Luo G.C., Liang J.T. et al. Modelling for the dynamic recrystallization evolution of Ti–6Al–4V alloy in two-phase temperature range and a wide strain rate range // Computational Materials Science. 2015. Vol. 97, pp. 136–147. DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.10.009
10. Migranov M.S., Volosova M.A., Shekhtman S.R. et al. Tribotechnical characteristics of nanostructured multilayer composite coatings on tools for machining heat-resistant alloys // Letters on Materials. 2023. Vol. 13. No. 1, pp. 73–78. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-1-73-78
11. Huang L.J., Geng L., Li A.B. et al. Characteristics of hot compression behavior of Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si alloy with an equiaxed microstructure // Materials Science and Engineering: A. 2009. Vol. 505. No. 1–2, pp. 136–143. DOI: 10.1016/j.msea.2008.12.041
12. Zhang M., Zhang J., McDowell D.L. Microstructure-based crystal plasticity modeling of cyclic deformation of Ti–6Al–4V // International Journal of Plasticity. 2007. Vol. 23. No. 8, pp. 1328–1348. DOI: 10.1016/j.ijplas.2006.11.009
13. Петрова Л.Г., Белашова И.С., Александров В.А., Демин П.Е., Брежнев А.А. О возможности получения наноструктурированных покрытий на стальных изделиях модифицированием поверхности // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 2. С. 75–82.
14. Fox-Rabinovich G.S., Weatherly G.C., Dodonov A.I. et al. Nanocrystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications // Surface and Coatings Technology. 2004. Vol. 177–178. No. 6, pp. 800–811. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.05.004
15. Fox-Rabinovich G.S., Beake B.D., Endrino J.L. et al. Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 200. No. 20–21, pp. 5738–5742. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.132
16. Zhang Y., Zhang M., In R.T. Study on surface micro textured tool cutting performance based on advantedge // International Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 7. No. 7, pp. 221–224. DOI: 10.15623/ijret.2018.0707030
17. Li Q., Pan C., Jiao Y., Hu K. Investigation on Cutting Performance of Micro-Textured Cutting Tools // Micromachines. 2019. Vol. 10. No. 6: 352. DOI: 10.3390/mi10060352
18. Xin T., Pei H., Shucai Y. Coating and micro-texture techniques for cutting tools // Journal of Materials Science. 2022. Vol. 57, pp. 17052–17104. DOI: 10.1007/s10853-022-07704-9
19. Beake B.D. Nano- and Micro-Scale Impact Testing of Hard Coatings: A Review // Coatings. 2022. Vol. 12. No. 6: 793. DOI: 10.3390/coatings12060793
20. Gupta K., Laubscher R.F. Sustainable machining of titanium alloys: A critical review // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2017. Vol. 231. No. 14, pp. 2543–2560. DOI: 10.1177/0954405416634278

References

- Pavlova T.V., Kashapov O.S., Nochovnaya N.A. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*, 2012, no. 5, pp. 8-14
- Glazunov S.G., Yasinskii K.K. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1993, no. 7-8, pp. 47-54.
- 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.
- Koziner Yu.D., Aref'ev A.V., Aref'ev V.V. *Mezhdunarodnyi issledovatel'skii zhurnal*, 2017, no. 3(57). DOI: 10.23670/IRJ.2017.57.127
- Volosova M.A., Grigor'ev S.N. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2010, no. 6(66), pp. 37-42.
- Gurin V.D., Grigor'ev S.N., Aleshin S.V., Semenov V.A. *Vestnik mashinostroeniya*, 2005, no. 9, pp. 19-22.
- Grigor'ev S.N., Volosova M.A. *Vestnik mashinostroeniya*, 2005, no. 9, pp. 32-36.
- Metel' A.S., Grigor'ev S.N., Mel'nik Yu.A., Panin V.V. *Fizika plazmy*, 2009, vol. 35, no. 12, pp. 1140-1149.
- Quan G.Z., Luo G.C., Liang J.T. et al. Modelling for the dynamic recrystallization evolution of Ti-6Al-4V alloy in two-phase temperature range and a wide strain rate range. *Computational Materials Science*, 2015, vol. 97, pp. 136-147. DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.10.009
- Migranov M.S., Volosova M.A., Shekhtman S.R. et al. Tribotechnical characteristics of nanostructured multilayer composite coatings on tools for machining heat-resistant alloys. *Letters on Materials*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 73-78. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-1-73-78
- Huang L.J., Geng L., Li A.B. et al. Characteristics of hot compression behavior of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy with an equiaxed microstructure. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, vol. 505, no. 1-2, pp. 136-143. DOI: 10.1016/j.msea.2008.12.041
- Zhang M., Zhang J., McDowell D.L. Microstructure-based crystal plasticity modeling of cyclic deformation of Ti-6Al-4V. *International Journal of Plasticity*, 2007, vol. 23, no. 8, pp. 1328-1348. DOI: 10.1016/j.ijplas.2006.11.009
- Petrova L.G., Belashova I.S., Alexandrov V.A., Demin P.E., Brezhnev A.A. The possibility of obtaining of nano-modified layers and coatings on steel products by surface engineering methods. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 75-82.
- Fox-Rabinovich G.S., Weatherly G.C., Dodonov A.I. et al. Nano-crystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 177-178, no. 6, pp. 800-811. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.05.004
- Fox-Rabinovich G.S., Beake B.D., Endrino J.L. et al. Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, no. 20-21, pp. 5738-5742. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.132
- Zhang Y., Zhang M., In R.T. Study on surface micro textured tool cutting performance based on advantedge. *International Journal of Engineering and Technology*, 2018, vol. 7, no. 7, pp. 221-224. DOI: 10.15623/ijret.2018.0707030
- Li Q., Pan C., Jiao Y., Hu K. Investigation on Cutting Performance of Micro-Textured Cutting Tools. *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 6: 352. DOI: 10.3390/mi10060352
- Xin T., Pei H., Shucai Y. Coating and micro-texture techniques for cutting tools. *Journal of Materials Science*, 2022, vol. 57, pp. 17052-17104. DOI: 10.1007/s10853-022-07704-9
- Beake B.D. Nano- and Micro-Scale Impact Testing of Hard Coatings: A Review. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 6: 793. DOI: 10.3390/coatings12060793
- Gupta K., Laubscher R.F. Sustainable machining of titanium alloys: A critical review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 2017, vol. 231, no. 14, pp. 2543-2560. DOI: 10.1177/0954405416634278

Статья поступила в редакцию 21.03.2023; одобрена после рецензирования 11.05.2023; принята к публикации 15.05.2023.

The article was submitted on 21.03.2023; approved after reviewing on 11.05.2023; accepted for publication on 15.05.2023.