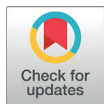


МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.433-447>EDN: <https://elibrary.ru/daasgw>

УДК / UDK 621.941

Оригинальная статья / Original article

Трибологические свойства фрез, работающих в условиях сплошного резания

С. А. Плотников, А. С. Клуонис✉*Вятский государственный университет,**г. Киров, Российская Федерация, <https://ror.org/01anxgq21>*✉ alexanderklunonis@gmail.com

Аннотация

Введение. На протяжении всего периода развития в машиностроении особое внимание уделяется производству и совершенствованию режущих инструментов. Современные методы нанесения на них покрытий обеспечивают создание тонких равномерных слоев с высокой твердостью и низким коэффициентом трения. Однако часто подбор оптимальных составов производится эмпирическим путем. Для эффективного создания новых составов функциональных поверхностных покрытий режущих инструментов необходим переход к теоретическому прогнозированию их выходных параметров.

Цель исследования. Изучение трибологических характеристик концевых твердосплавных фрез производства АО «Лепсе» в условиях сухого трения скольжения всей периферией режущей части посредством проведения экспресс-тестов.

Материалы и методы. Исследования элементарных составов поверхностного покрытия и инструментального материала фрез проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6510LV. Определение силы трения осуществляли при помощи оригинальной лабораторной установки для экспресс-испытаний трибологических характеристик. Оценка степени износа поверхности концевых фрез после испытаний производилась с помощью прямого лабораторно-исследовательского микроскопа Axio Scope.A1.

Результаты исследования. Определен идентичный состав покрытия фрез. Установлена зависимость силы трения от времени работы инструмента. В начале работы (первые 30–300 секунд) сила трения достигла наивысших значений, после чего стабилизировалась на различных уровнях в зависимости от приложения нагрузки: 2,5 Н при 200 Н, 3,5 Н при 300 Н и 10 Н при 400 Н.

Обсуждение и заключение. Повышение осевой нагрузки приводит к усилению износа и образованию сколов. Размер и распространенность сколов вдоль режущей кромки увеличиваются, достигая критического уровня при нагрузке в 400 Н. Полученные данные возможно использовать при проектировании новых составов и архитектур поверхностных покрытий. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением экспериментальной матрицы за счет испытаний покрытий различной архитектуры и элементного состава, а также с внедрением контроля температуры в зоне контакта.

© Плотников С. А., Клуонис А. С., 2026

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: концевые фрезы, твердосплавные фрезы, поверхностное покрытие, трибологические характеристики, экспресс-испытания, износ режущей кромки, сила трения, элементарный состав, режущие инструменты

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Плотников С.А., Клуонис А.С. Трибологические свойства фрез, работающих в условиях сплошного резания. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(2):433–447. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.433-447>

Tribological Properties of End Milling Cutters Operating under Continuous Cutting Conditions

S. A. Plotnikov, A. S. Kluonis ✉

Vyatka State University,

Kirov, Russian Federation, <https://ror.org/01anxqg21>

✉ alexanderkluonis@gmail.com

Abstract

Introduction. Throughout the entire period of its development, agricultural machine engineering has paid special attention to the manufacture and improvement of cutting tools. Modern methods of coating create thin, uniform layers having high hardness and low friction coefficients. Optimal coating compositions are often selected empirically; therefore, developing new functional surface coating compositions for cutting tools requires theoretical prediction of their result parameters.

Aim of the Study. The aim of the study is to investigate tribological characteristics of carbide end milling cutters manufactured by JSC Lепse under the conditions of dry sliding friction across the entire cutting part periphery through conducting express tests.

Materials and Methods. The scanning electron microscope JEOL JSM-6510LV was used to study elemental compositions of the surface coating and tool material of the milling cutters. The friction force was determined using a unique laboratory setup for express tests of tribological characteristics. After testing, there has been assessed the degree of end milling surface wear using the direct laboratory research microscope Axio Scope.A1.

Results. There has been determined the identical composition of the milling cutter coating. There has been found the dependence of the friction force on the tool operating time. At the beginning of operation (the first 30–300 seconds), the friction force reached its highest values and then it stabilized at different levels depending on the application of load: 2.5 N at 200 N, 3.5 N at 300 N, and 10 N at 400 N.

Discussion and Conclusion. The increase in axial load causes increased wear and chipping formation. The size and propagation of chippings along the cutting edge increases and reaches a critical level at a load of 400 N. The obtained data can be used to create new surface coating compositions and architectures. The further research should be conducted to expand the experimental matrix through testing coatings of different architectures and elemental compositions, and implementing temperature control in the contact zone.

Keywords: end milling cutters, carbide alloy, surface treatment, tribological characteristics, express tests, cutting edge wear, friction force, elementary composition, cutting tools

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Plotnikov S.A., Kluonis A.S. Tribological Properties of End Milling Cutters Operating under Continuous Cutting Conditions. *Engineering Technologies and Systems.* 2026;36(2):433–447. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.433-447>

ВВЕДЕНИЕ

Применение современного высокопроизводительного и дорогостоящего оборудования для металлообработки, оснащенного системами числового программного и адаптивного управления, особенно в контексте гибких автоматизированных производств и мехатронных систем, обуславливает более строгие требования к качеству и надежности режущих инструментов, а также усложняет условия их эксплуатации. Наблюдается увеличение расхода инструмента на единицу продукции и рост затрат, которые могут достигать 4–7 % от общего бюджета на производство изделий¹. Следовательно, улучшение эксплуатационных характеристик режущих инструментов за счет увеличения их стойкости, надежности и производительности становится ключевым фактором, способствующим повышению общей эффективности производственного процесса [1].

На сегодняшний день машиностроение и металлообрабатывающая промышленность стремительно развиваются, внедряются новые технологии и материалы, что требует непрерывного совершенствования режущих инструментов. В условиях повышенной конкуренции и необходимости сокращения времени производства, оптимизация процессов обработки металлов становится неотъемлемой частью стратегий развития предприятий. В связи с этим создание и изучение новых типов покрытий для режущих инструментов, обладающих улучшенной поверхностной износостойкостью, а также высокими физико-механическими свойствами, имеет высокую значимость [2]. Направленное изменение характеристик покрытий путем изменения их состава, структуры и микроструктуры, а также изменение способов и режимов нанесения позволяет улучшить контактные свойства в процессе резания² [3; 4].

Проектирование новых составов и архитектур поверхностных покрытий невозможно без изучения контактных процессов, возникающих в условиях работы режущего инструмента. Таким образом, целью работы является исследование трибологических характеристик концевых твердосплавных фрез методом экспресс-тестирования при сухом трении скольжения всей периферией режущей части.

При этом необходимо изучить влияние осевой нагрузки на силу трения, возникающую при полном контакте поверхностей режущей части концевых твердосплавных фрез, и на характер степени износа рабочих поверхностей инструментов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Современные технологии нанесения покрытий, такие как физико-химическое и химическое осаждение из паровой фазы, позволяют создавать покрытия с тонкими и однородными слоями, обладающими высокой твердостью и низким коэффициентом трения. Эти покрытия не только увеличивают износостойкость

¹ Савин Д.И., Титов О.О., Слепнева Н.Г. Отнесение затрат на режущий инструмент в статью основных затрат на изделие. В: Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Дню космонавтики. Красноярск: СибГУ им. академика М. Ф. Решетнева; 2019. С. 272–274. <https://elibrary.ru/aexycl>

² Клуонис А.С., Плотников С.А. Обзор современных методов нанесения износостойких покрытий и их сравнительный анализ. В: Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. трудов. Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия; 2023. С. 284–287. <https://elibrary.ru/tdzffe>

инструментов, но и способствуют уменьшению теплового воздействия на обрабатываемый материал, что в свою очередь улучшает качество обработки и снижает вероятность деформаций и дефектов изделий [5]. Кроме того, инновационные материалы для покрытий, такие как нитриды и карбиды металлов, позволяют достичь оптимального баланса между твердостью и вязкостью, что является критически важным для долговечности и эффективности режущих инструментов [6–8].

Все более популярными в современных технологических процессах обработки металлов становятся концевые твердосплавные фрезы с поверхностным покрытием, предназначенные для работы с полным перекрытием [9]. В рассматриваемом виде обработки имеют место крайне сложные факторы, включая высокие контактные напряжения и температуры, а также активное появление физико-химических процессов. В результате контактные поверхности фрезы подвергаются интенсивному износу от абразивного воздействия материала и адгезионно-усталостным, коррозионно-окислительным, диффузионным воздействиям [10]. Все описанные процессы зависят от параметров поверхностного покрытия и условий обработки, таких как скорость резания, подача и глубина реза. Ключевым фактором в повышении производительности и качества обработки является оптимизация этих параметров, что позволяет эффективно управлять теплонапряжением и механическим воздействием на фрезу [11].

В последнее время значительное внимание уделяется разработке многофункциональных покрытий, способных обеспечивать не только повышенную износостойкость, но и улучшенные антиадгезионные свойства. Это достигается за счет внедрения наноструктурированных слоев и композитных материалов, которые обладают уникальными механическими и термическими характеристиками [12]. Такие покрытия способны значительно продлить срок службы режущих инструментов, снизить потребление энергоресурсов и уменьшить затраты на обслуживание производственного оборудования [13].

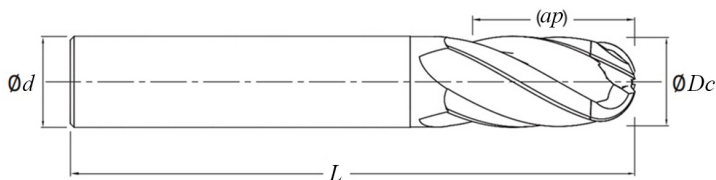
Так АО «Электромашиностроительный завод «Лепсе» (г. Киров) активно занимается разработкой и внедрением в производство ограниченного ассортимента металлорежущего инструмента, который представляет собой аналог импортного, ранее применяемого на предприятии. Для оценки свойств концевых твердосплавных фрез с покрытием применяются различные методы экспресс-тестирования [14], позволяющие быстро и эффективно оценить их эксплуатационные характеристики [15–17]. Экспресс-методы позволяют оперативно получить результаты выходных параметров концевых фрез (коэффициент трения, скорость истирания покрытия) а также выявить механизмы износа и деформации поверхностей [18–20].

Особое внимание уделяется исследованию влияния различных режимов обработки на трибологические характеристики инструментов, что включает анализ влияния температуры, давления и скорости резания на развитие износоустойчивости покрытий, а также изучение взаимодействия между микро- и наноуровнями структуры покрытия и обрабатываемого материала. Понимание этих взаимосвязей позволяет создавать более эффективные покрытия, адаптированные под специфические условия эксплуатации и требования к качеству обработки [21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В ходе работы были исследованы трибологические свойства поверхностных покрытий концевых твердосплавных фрез (рис. 1), изготовленных предприятием АО «Лепсе» и предназначенных для работы при сплошном резании. Рассматриваемые инструменты имели идентичные геометрические параметры – диаметр режущей части $D_c = 5h10$ мм с 4 зубьями, общей длиной $L = 45$ мм и длиной режущей части $ap = 14$ мм. Это исключало влияние геометрии на результаты испытаний и обеспечивало достоверность полученных данных.



Р и с. 1. Геометрические параметры концевой фрезы

F i g. 1. Geometric parameters of the end milling cutter

Примечание: d – диаметр хвостовика, 5 мм.

Note: d – shank diameter, 5 mm.

Источник: схема для рисунка 1 была взята из технической карты АО «Лепсе».

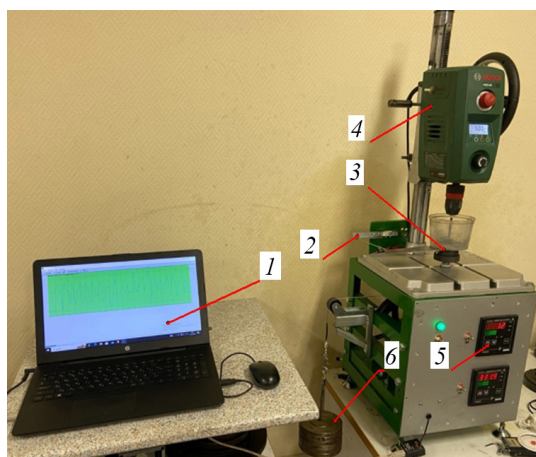
Source: figure 1 is a scan of the technical map of JSC Lepse.

Материалы и оборудование

Элементарные составы покрытий и основного материала фрез были исследованы на поперечных срезах с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6510LV. Данный микроскоп позволил получить высокоточные изображения микроструктуры материалов, а также провести качественный и количественный анализ элементного состава методом рентгеновской энергетической дисперсионной спектроскопии.

Определение силы трения F_f происходило на оригинальной лабораторной установке для экспресс-испытаний трибологических характеристик (рис. 2), разработанной в Санкт-Петербургском политехническом университете имени Петра Великого. Данная установка позволила проводить испытания в условиях, максимально приближенных к реальным, относительно быстро и точно определять силы, возникающие при трении пар тел.

Процесс износа при сухом трении поверхностных покрытий концевых фрез проводился согласно схеме, приведенной на рисунке 3 (контртело показано в разрезе для более детального представления контактной области).



Р и с. 2. Испытательная установка для определения силы трения:

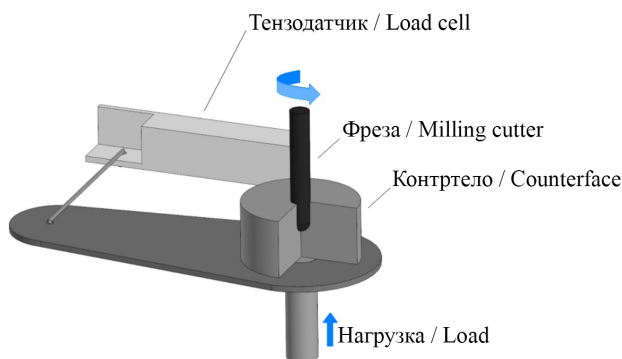
1 – ноутбук с ПО; 2 – балочный тензодатчик; 3 – приспособление; 4 – патрон настольного сверлильного станка Bosch PBD 40; 5 – измеритель-регулятор OWEN TRM202; 6 – грузы

F i g. 2. A test facility for determining the friction force:

1 – laptop with software; 2 – beam load cell; 3 – tool; 4 – bench-type drilling unit chuck Bosch PBD 40; 5 – measuring regulator OWEN TRM202; 6 – weights

Источник: фотографии для рисунков 2, 4 сделаны авторами статьи (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 14.02.2025).

Source: photos for figures 2, 4 were taken by the authors of the article (St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 14.02.2025).



Р и с. 3. Схема трибологического нагружения

F i g. 3. Tribological loading scheme

Источник: рисунок 3 составлен авторами статьи в программе Компас-3D.

Source: figure 3 was made by the authors of the article using the Kompas-3D.

Для оценки степени износа поверхности концевых фрез после испытаний использовался прямой лабораторно-исследовательский микроскоп Axio Scope.A1 (рис. 4). Данный микроскоп оснащен системой цифровой обработки изображений, что позволило проводить анализ поверхности износа и определять признаки повреждений покрытия.



Р и с. 4. Общий вид микроскопа Axio Scope.A1

F i g. 4. General view of the micros Axio Scope.A1

Процедура исследования

Концевые фрезы закреплялись в патрон 4 (рис. 2) настольного сверлильного станка Bosch PBD 40, оснащенного функцией реверсивного вращения. Использование данного станка обеспечивало возможность регулирования скорости вращения и направления вращения инструмента. Далее в приспособление 3 на подшипнике, позволяющем ему совершать вращательное движение, устанавливалось контртело. Оно представляло собой цилиндрическое тело, изготовленное из стали марки 2Х18Н10Т, с предварительно полученным отверстием, точно повторяющим периферию рабочей части исследуемых фрез. Это обеспечивало равномерное распределение нагрузок и контактных напряжений по всей поверхности контакта. После создания контакта рабочего инструмента с поверхностью отверстия осуществлялся поджим контртела в осевом направлении через редуктор при помощи грузов 6. Вариация нагрузки возможна в диапазоне от 50 до 800 Н, что позволило исследовать трибологические свойства при различных условиях нагружения, характерных для реальных процессов резания. Приспособление 3 было соединено через тягу с балочным тензодатчиком 2 с измерением нагрузки до 200 Н. При работе установки сила трения преобразовалась в механическую деформацию сдвига тензодатчика и, в конечном итоге, в пропорциональный электрический сигнал. Этот сигнал считывался измерителем-регулятором 5, который обеспечил высокую точность регистрации данных и возможность их последующей обработки. Обработка полученных данных осуществлялась с использованием специально разработанной для ЭВМ программы 1. Программа выполняла преобразование полученных значений в график зависимости силы трения, F_f от времени проведения испытания t , с. Это позволило наглядно представить процесс изменения силы трения в зависимости от параметров испытания и времени.

Было проведено три экспресс-испытания для инструментов при нагружении 200, 300 и 400 Н. Скорость реверсивного вращения образцов во всех испытаниях оставалась постоянной и составляла 500 мин⁻¹. Вращательное движение позволило смоделировать условия реального процесса износа поверхностного процесса при обработке.

Так как тензодатчик обладает начальным коэффициентом передачи силы (2,5 % от рабочего коэффициента передачи по паспорту), то перед началом

испытаний производилась тарировка стенда при помощи прецизионного динамометра. В таблице 1 приведены соответствия значений измерителя-регулятора от приложенной нагрузки к тензобалке.

Т а б л и ц а 1

Table 1

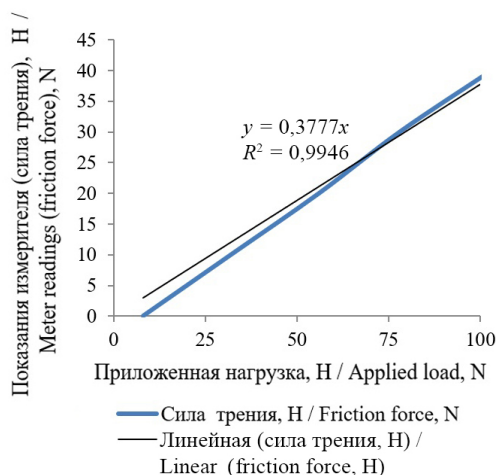
Соответствие значений измерителя-регулятора от приложенной нагрузки к тензодатчику
The correspondence of the values of the measuring-regulator from the applied load to the load cell

Приложенная нагрузка, Н / Applied load, N	Показания измерителя-регулятора, Н / Measuring-regulator readings, N
0	8
10	32
20	56
30	78
40	103

Источник: таблица 1 составлена авторами статьи.

Source: the table 1 was compiled by the authors of the article.

На рисунке 5 приведены результаты тарировки стенда, позволившие установить зависимость между нагрузкой и сигналом тензодатчика с учетом его начальных характеристик. Тарировка обеспечила максимальную точность измерений силы трения и исключение систематических погрешностей.



Р и с. 5. Зависимость показания измерителя-регулятора от приложенной нагрузки к тензодатчику

F i g. 5. Dependence of the measuring-regulator reading on the load to applied the load cell

Источник: графики для рисунков 5, 6 составлены авторами статьи в программе Microsoft Excel.

Source: the graphs for figures 5 and 6 were compiled by the authors of the article using Microsoft Excel.

Весь экспериментальный цикл был проведен в условиях комнатной температуры и влажности. Перед каждым испытанием поверхности фрез и контртел были

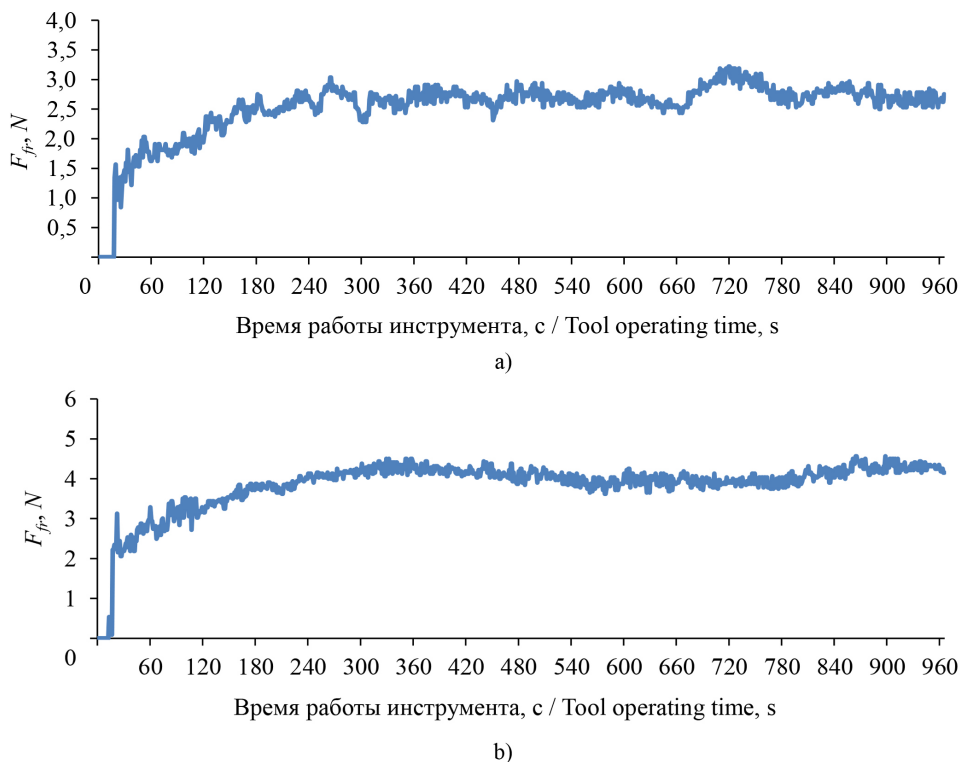
тщательно очищены и обезжирены с использованием этилового спирта, чтобы исключить влияние загрязнений на результаты.

Наиболее важное требование, предъявляемое к рассматриваемым в работе покрытиям – стойкость в условиях изнашивания. Испытания в условиях трения скольжения позволили выявить общие закономерности поведения образцов при внешнем нагружении и сформировать рекомендации по их применению в реальных условиях эксплуатации [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

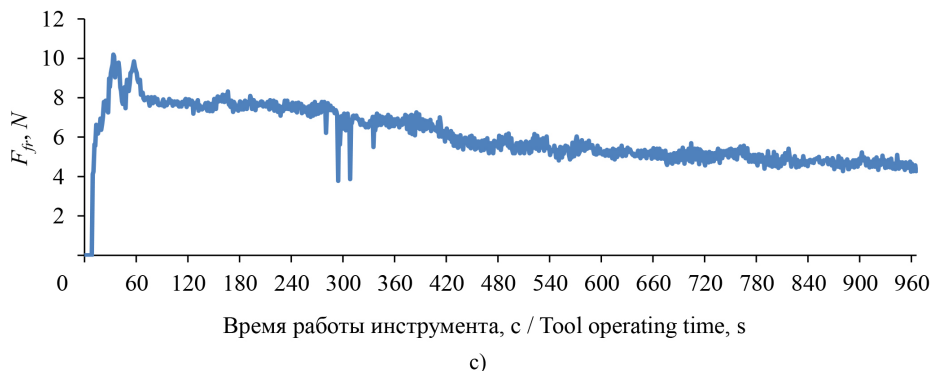
Состав поверхностных покрытий фрез был идентичен, поскольку получен при одинаковых режимах и в одной загрузке в вакуумной камере: N – 31,17 %; Al – 29,76 %; Ti – 37,29 %; Co – 0,4 %; W – 1,38 %. Толщина поверхностного покрытия составляет единицы микрон, так как из-под покрытия «просвечивает» инструментальный материал. Процентный состав инструментальных материалов фрез (Co – 9,05 %; W – 90,95 %) также был идентичен, что исключало вариации в материале основы.

На рисунке 6 изображены графики зависимостей силы трения от времени работы инструмента.



Р и с. 6. Сила трения при различных осевых нагрузках на концевую фрезу:
а) нагрузка 200 Н; б) нагрузка 300 Н

Fig. 6. Friction force at various axial loads on the end milling cutter:
a) load 200 N; b) load 300 N

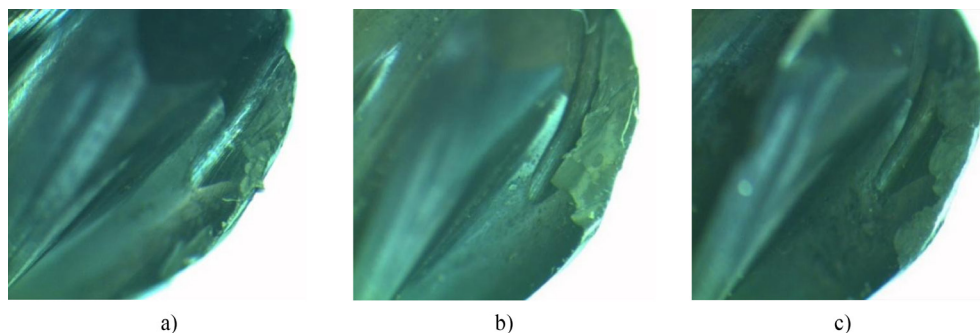


Р и с. 6. Сила трения при различных осевых нагрузках на концевую фрезу: c) нагрузка 400 Н
F i g. 6. Friction force at various axial loads on the end milling cutter: c) load 400 N

Начальная фаза процесса трения: все три кривые показывают резкий рост силы трения на начальном этапе, что связано с первоначальным контактом фрезы с материалом, формированием рабочей зоны трения и начальным износом. После начального пика силы трения стабилизируются на разных уровнях в зависимости от нагрузки:

- 200 Н: сила трения стабилизируется около $2,5 \pm 0,2$ Н;
- 300 Н: сила трения стабилизируется на уровне приблизительно $3,5 \pm 0,3$ Н;
- 400 Н: сила трения достигает еще более высоких значений в 10 ± 1 Н, что указывает на усиленное трение.

На рисунке 7 изображена поверхность фрез после испытаний при разной нагрузке.



Р и с. 7. Поверхность фрез после испытаний:
a) нагрузка 200 Н; b) нагрузка 300 Н; c) нагрузка 400 Н
F i g. 7. The surface of the end milling cutters after testing:
a) load 200 N; b) load 300 N; c) load 400 N

Источник: фотографии для рисунка 7 сделаны авторами статьи при помощи микроскопа Axio Scope.A1.

Source: The photographs for figure 7 were taken by the authors of the article using the microscope Axio Scope.A1.

Нагрузка 200 Н (рис. 7 а): зуб фрезы демонстрирует минимальный износ, сколы присутствуют на грани режущей кромки и распространяются минимально.

Нагрузка 300 Н (рис. 7 б): сколы находятся на всей режущей кромке (сферической части фрезы) фрезы и распространяются дальше, чем в первом опыте. Увеличение нагрузки привело к более интенсивному протеканию процесса износа и повышенному тепловому воздействию, что снизило твердость материала зуба.

Нагрузка 400 Н (рис. 7 с): наблюдаются значительные признаки износа, глубокие трещины и крупные сколы на режущей кромке, при протекании процесса существуют риски поломки инструмента.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ графиков зависимости силы трения от времени работы концевых твердосплавных фрез диаметром 5 мм из материала WC-Co с покрытием TiAlN в условиях осевого нагружения позволил выявить тенденцию к снижению силы трения при увеличении времени работы инструмента (рис. 6). В начальные этапы (30–300 секунд) сила трения достигала максимальных значений из-за формирования контактной зоны и абразивного износа при первом соприкосновении фрезы с материалом. Затем сила трения снижалась, вероятно, благодаря эффекту самозаточки или установлению оптимальных условий трения, которые уменьшили сопротивление³.

При увеличении нагрузки сила трения возрастала вследствие повышения давления в контактной зоне, что привело к снижению смазывающей способности и увеличению трения между фрезой и материалом. При нагрузке 200 (рис. 6 а) и 300 Н (рис. 6 б) трение более стабильное, но с ростом нагрузки графики показали неравномерное поведение с очевидным увеличением силы трения. При нагрузке 400 Н (рис. 6 с) замечен резкий скачок силы трения и нехарактерное для других графиков ее снижение.

Критические моменты на графиках, где сила трения резко изменяется, могут указывать на износ инструмента или появление повреждений. Резкие скачки силы трения могут свидетельствовать о критической точке износа, когда поверхностное покрытие начинает терять свои свойства.

Анализ износа зубьев фрез (рис. 7) после испытаний позволил выявить характерные особенности износа инструмента в зависимости от величины приложенной осевой нагрузки. У всех образцов присутствуют сколы частиц металла от режущих кромок. Отколы с режущих кромок могут возникать по нескольким причинам.

Во-первых, высокая механическая нагрузка на режущую кромку вызывает концентрацию напряжений, которая может превышать предел прочности материала инструмента. Эти нагрузки часто усиливаются при прерывистом резании, высоких скоростях подачи или когда инструмент используется в условиях, превышающих его расчетные параметры [23].

Во-вторых, имеет значение тепловое воздействие. При резании выделяется значительное количество тепла, которое может привести к локальному перегреву и последующей деградации материала режущей кромки. При визуальном

³ Полюшкин Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки: учеб. пособие. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет; 2013. 192 с. <https://elibrary.ru/vmanwv>

исследовании образцов термального износа замечено не было, изменение цвета режущих кромок не обнаружено.

С повышением осевой нагрузки от 200 до 400 Н наблюдалось прогрессивное увеличение износа зубьев фрезы. Это указывает на то, что при более высоких нагрузках инструмент подвергается усиленному разрушительному воздействию, сокращая срок его службы. Нагрузка 400 Н является критической, при которой фреза может быстро выйти из строя.

Ограничением исследования является отсутствие фиксации температуры в зоне контакта режущего инструмента и контртела ввиду ограничения прямого доступа к месту измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной научный вклад работы заключается в получении впервые систематизированных данных о поведении силы трения и характере износа для данной комбинации инструментального материала и покрытия при указанных режимах осевого нагружения и сплошном периферийном контакте.

Покрытие TiAlN (нитрид титана и алюминия) может быть использовано для уменьшения износа инструмента благодаря своим отличным физико-химическим свойствам. Одним из ключевых преимуществ такого покрытия является его высокая термостойкость. Оно способно выдерживать температуры до 800–900 °С, что позволяет значительно снижать тепловое воздействие на основную массу инструмента. Однако размер и количество отколов на инструменте, покрытом TiAlN, могут служить индикатором некоторых проблем, таких как превышение нагрузок или дефект самого покрытия, например, его неравномерность или недостаточная толщина [24].

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением экспериментальной базы за счет испытаний покрытий различной архитектуры, внедрением контроля температуры в зоне контакта и разработкой математических моделей. Такие модели позволят перейти от эмпирического подбора к теоретическому прогнозированию и научно обоснованному проектированию новых функциональных покрытий режущего инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Romanov P. Improving the Efficiency of the Cutting Tool Based on its Modification. *E3S Web of Conferences*. 2023;402(6):10027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340210027>
2. Мигранов М.Ш. Износостойкость режущего инструмента с наноструктурным покрытием. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012;(2–5):34–39. <https://www.elibrary.ru/pujnah>
3. Micallef C., Zhuk Y., Aria A.I. Recent Progress in Precision Machining and Surface Finishing of Tungsten Carbide Hard Composite Coatings. *Coatings*. 2020;10(8):731. <https://doi.org/10.3390/coatings10080731>
4. Saha B., Toh W.Q.Q., Liu E., Tor S.B., Hardt D., Lee J. A Review on the Importance of Surface Coating of Micro/Nano-Mold in Micro/Nano-Molding Processes. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2016;(26):013002. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/1/013002>
5. Vereshchaka A.A. Functional Coatings for Cutters. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2015;(4):25–37. <https://doi.org/10.12737/17077>

6. Bobzin K. High-Performance Coatings for Cutting Tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2017;(18):1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.11.004>
7. Sousa V.F.C., Silva F.J.G. Recent Advances on Coated Milling Tool Technology – A Comprehensive Review. *Coatings*. 2020;10(3):235. <https://doi.org/10.3390/coatings10030235>
8. Zakeri A., Bahmani E., Ramazani A. A Review on the Enhancement of Mechanical and Tribological Properties of MCrAlY Coatings Reinforced by Dispersed Micro and Nanoparticles. *Energies*. 2022;15(5):1914. <https://doi.org/10.3390/en15051914>
9. Gouveia R.M., Silva F.J.G., Reis P., Baptista A.P.M. Machining Duplex Stainless Steel: Comparative Study Regarding End Mill Coated Tools. *Coatings*. 2016;6(4):51. <https://doi.org/10.3390/coatings6040051>
10. Башаров Р.Р., Кудояров Р.Г. Исследование процесса фрезерования концевой фрезой при высоких частотах вращения шпинделя станка. *Вестник Уфимского государственного авиационно-технического университета*. 2012;16(4):71–77. <https://www.elibrary.ru/pxgybf>
11. Monaca A.Ia., Murray J.W., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A., Axinte D.A. и др. Surface Integrity in Metal Machining – Part II: Functional Performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021;(164):103718. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103718>
12. Beake B.D., Fox-Rabinovich G.S., Veldhuis S.C., Goodes S.R. Coating Optimisation for High Speed Machining with Advanced Nanomechanical Test Methods. *Surface and Coatings Technology*. 2009;203(13):1919–1925. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.01.025>
13. Чемборисов Н.А., Высогорец Я.В. Исследование влияния нанесения износостойких нанопокровов на стойкость режущего инструмента. *Современная техника и технологии*. 2015;(8):48–62. URL: <https://technology.snauka.ru/2015/08/7385> (дата обращения: 25.08.2025).
14. Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Кваша В.Ю. Экспрессная сравнительная оценка работоспособности концевых твердосплавных фрез. *Металлообработка*. 2015;(2):49–53. <https://www.elibrary.ru/uavusp>
15. Chauhan S., Kumar R. Comparative Study on Cutting Performance of Plain and Coated Carbide Inserts in CNC Turning of EN9 Steel. *Engineering Research Express*. 2020;2(4):045009. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/abbe81>
16. Wang T., Zha X., Chen F., Wang J., Lin L., Xie H. и др. Research on Cutting Performance of Coated Cutting Tools by a New Impact Test Method Considering Contact Stress Condition Caused by Segmented Chips. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;68:1569–1584. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.07.001>
17. Wan M., Zhang W.-H., Dang J.-W., Yang Y. A Unified Stability Prediction Method for Milling Process with Multiple Delays. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010;50(1):29–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.09.009>
18. Gradisek J., Kalveram M., Insperger T., Weinert K., Stepan G., Govekar E. и др. On the Stability Prediction for Milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005;45(7–8):769–781. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.015>
19. Al-Asadi M.M., Al-Tameemi H.A. A Review of Tribological Properties and Deposition Methods for Selected Hard Protective Coatings. *Tribology International*. 2022;(176):107919. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107919>
20. Devarajan D.K., Rangasamy B., Mosas K.K.A. State-of-the-Art Developments in Advanced Hard Ceramic Coatings Using PVD Techniques for High-Temperature Tribological Applications. *Ceramics*. 2023;6(1):301–329. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010019>
21. Mayrhofer P.H., Mitterer C., Hultman L., Clemens H. Microstructural Design of Hard Coatings. *Progress in Materials Science*. 2006;51(8):1032–1114. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.002>
22. Ilie F., Cotici C.D., Hristache A.-F. Study of the Grinding Process by Friction of Cereal Grains in Stone Mills. *Processes*. 2023;11(12):3376. <https://doi.org/10.3390/pr11123376>
23. Бутыгин В.Б., Демидов А.С. Рациональное использование твердосплавного инструмента при прерывистом точении стали. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011;13(1–3):541–543. URL: http://www.ssc.smr.ru/izv_2011_1.html (дата обращения: 25.08.2025).

24. Lindvall R., Lenrick F., Andersson J.M., M'Saoubi R., Bushlya V. On Wear of TiAlN Coated Tools with and Without NbN Overlayer in Machining Titanium Alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2024;(198):104148. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104148>

REFERENCES

1. Romanov P. Improving the Efficiency of the Cutting Tool Based on its Modification. *E3S Web of Conferences*. 2023;402(6):10027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340210027>
2. Migranov M.S. Wear Resistance of the Cutting Tool with a Nano-Structural Cover. *Fundamental and Appliad Problems of Engineering and Technology*. 2012;(2–5):34–39. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/pujnah>
3. Micallef C., Zhuk Y., Aria A.I. Recent Progress in Precision Machining and Surface Finishing of Tungsten Carbide Hard Composite Coatings. *Coatings*. 2020;10(8):731. <https://doi.org/10.3390/coatings10080731>
4. Saha B., Toh W.Q.Q., Liu E., Tor S.B., Hardt D., Lee J. A Review on the Importance of Surface Coating of Micro/Nano-Mold in Micro/Nano-Molding Processes. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2016;(26):013002. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/1/013002>
5. Vereshchaka A.A. Functional Coatings for Cutters. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2015;(4):25–37. <https://doi.org/10.12737/17077>
6. Bobzin K. High-Performance Coatings for Cutting Tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2017;(18):1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.11.004>
7. Sousa V.F.C., Silva F.J.G. Recent Advances on Coated Milling Tool Technology – A Comprehensive Review. *Coatings*. 2020;10(3):235. <https://doi.org/10.3390/coatings10030235>
8. Zakeri A., Bahmani E., Ramazani A. A Review on the Enhancement of Mechanical and Tribological Properties of MCrAlY Coatings Reinforced by Dispersed Micro and Nanoparticles. *Energies*. 2022;15(5):1914. <https://doi.org/10.3390/en15051914>
9. Gouveia R.M., Silva F.J.G., Reis P., Baptista A.P.M. Machining Duplex Stainless Steel: Comparative Study Regarding End Mill Coated Tools. *Coatings*. 2016;6(4):51. <https://doi.org/10.3390/coatings6040051>
10. Basharov R.R., Kudoyarov R.G. Research of End Milling Operation at the High Speed Rotation of Machine-Tool Spindle. *Vestnik UGATU*. 2012;16(4):71–77. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/pxgybf>
11. Monaca A.Ia., Murray J.W., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A., Axinte D.A., et al. Surface Integrity in Metal Machining – Part II: Functional Performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021;(164):103718. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103718>
12. Beake B.D., Fox-Rabinovich G.S., Veldhuis S.C., Goodes S.R. Coating Optimisation for High Speed Machining with Advanced Nanomechanical Test Methods. *Surface and Coatings Technology*. 2009;203(13):1919–1925. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.01.025>
13. Chemborisov N.A., Vysogorets Ya.V. Researching of Tool Life Increasing with Wearproof Nano-coatings. *Modern Technics and Technologies*. 2015;(8):48–62. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://technology.snauka.ru/2015/08/7385> (accessed 25.08.2025).
14. Mokritsky B.Ya., Pustovalov D.A., Kvasha V.Y. Comparative Express Health Evaluation End Mills Carbide. *Metalworking*. 2015;(2):49–53. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/uavusp>
15. Chauhan S., Kumar R. Comparative Study on Cutting Performance of Plain and Coated Carbide Inserts in CNC Turning of EN9 Steel. *Engineering Research Express*. 2020;2(4):045009. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/abbe81>
16. Wang T., Zha X., Chen F., Wang J., Lin L., Xie H., et al. Research on Cutting Performance of Coated Cutting Tools by a New Impact Test Method Considering Contact Stress Condition Caused by Segmented Chips. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;68:1569–1584. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.07.001>
17. Wan M., Zhang W.-H., Dang J.-W., Yang Y. A Unified Stability Prediction Method for Milling Process with Multiple Delays. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010;50(1):29–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.09.009>

18. Gradisek J., Kalveram M., Insperger T., Weinert K., Stepan G., Govekar E., et al. On the Stability Prediction for Milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005;45(7–8):769–781. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.015>
19. Al-Asadi M.M., Al-Tameemi H.A. A Review of Tribological Properties and Deposition Methods for Selected Hard Protective Coatings. *Tribology International*. 2022;(176):107919. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107919>
20. Devarajan D.K., Rangasamy B., Mosas K.K.A. State-of-the-Art Developments in Advanced Hard Ceramic Coatings Using PVD Techniques for High-Temperature Tribological Applications. *Ceramics*. 2023;6(1):301–329. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010019>
21. Mayrhofer P.H., Mitterer C., Hultman L., Clemens H. Microstructural Design of Hard Coatings. *Progress in Materials Science*. 2006;51(8):1032–1114. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.002>
22. Ilie F., Cotici C.D., Hristache A.-F. Study of the Grinding Process by Friction of Cereal Grains in Stone Mills. *Processes*. 2023;11(12):3376. <https://doi.org/10.3390/pr11123376>
23. Butygin V.B., Demidov A.S. Rational Use of Hard-Alloy Tool at Discontinuous Steel Turning. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015;(8):48–62. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://technology.snauka.ru/2015/08/7385> (accessed 25.08.2025).
24. Lindvall R., Lenrick F., Andersson J.M., M'Saoubi R., Bushlya V. On Wear of TiAlN Coated Tools with and Without NbN Overlayer in Machining Titanium Alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2024;(198):104148. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104148>

Об авторах:

Плотников Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, Researcher ID: R-8491-2016, plotnikovSA@bk.ru

Клуонис Александр Сергеевич, аспирант кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0149-8082>, Researcher ID: JNQ-9802-2023, alexanderklunonis@gmail.com

Вклад авторов:

С. А. Плотников – общее руководство, постановка задач исследования.

А. С. Клуонис – теоретический анализ, проведение лабораторных исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 26.03.2025; поступила после рецензирования 20.10.2025;
принята к публикации 02.02.2026*

About the authors:

Sergei A. Plotnikov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., 610000 Kirov, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, Researcher ID: R-8491-2016, plotnikovSA@bk.ru

Alexander S. Klunonis, Post-graduate Student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., 610000 Kirov, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0149-8082>, Researcher ID: JNQ-9802-2023, alexanderklunonis@gmail.com

Authors contribution:

A. S. Plotnikov – general guidance, formulating the study objectives.

S. A. Klunonis – theoretical analysis, conducting laboratory research.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 26.03.2025; revised 20.10.2025; accepted 02.02.2026