

УДК 621.891

Tribological properties of multilayer coatings**Трибологические свойства многослойных покрытий**

M. S. Migranov *, *A. M. Migranov*, *A. S. Gusev*, *V. R. Mukhamadeev*, *A. F. Sadykov*
М. Ш. Мигранов *, *А. М. Мигранов*, *А. С. Гусев*, *В. Р. Мухамадеев*, *А. Ф. Садыков*

Ufa State Aviation Technical University, Marx str. 12, Ufa, 450008, Russia

* migmars@mail.ru

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. Маркса, 12

* migmars@mail.ru

ABSTRACT

Deals with the methods of increasing the wear resistance of the cutting tool due to the formation of an additional anti-friction layer of perfluoropolyether on the surface. Experimental studies have been carried out using modern techniques and equipment to reveal the mechanism of influence of the coating and the scientific validity of the hypothesis put forward about their lubricating action and adaptability to the conditions of friction when cutting metals. The results of natural experimental studies of wear resistance and tribotechnical characteristics of multilayer coatings for high-speed steel cutting tools during turning and milling are presented. The results of metalgraphic studies by SIMS and AES methods to establish the appearance of secondary structures with unique properties. The use of these coatings in the conditions of modern machine-building production, which uses expensive and high-performance machine tools with low cutting properties of the cutting tool, can significantly improve the efficiency of blade machining metal cutting.

KEYWORDS

Friction; wear; multilayer coatings; wear resistance; tribological properties; turning; milling.

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются методы повышения износостойкости режущего инструмента за счет формирования на поверхности дополнительного антифрикционного слоя из перфторполиэфира. Экспериментальные исследования проведены с использованием современных методик и оборудования, позволяющих раскрыть механизм влияния покрытия и доказать научную обоснованность выдвинутой гипотезы об их смазывающем действии и приспособляемости к условиям трения при резании металлов. Представлены результаты натурных экспериментальных исследований износостойкости и триботехнических характеристик многослойных покрытий для режущего инструмента из быстрорежущей стали при точении и фрезеровании. Результаты металлографических исследований методами ВМС и ОЭС дают возможность установить появление вторичных структур с уникальными свойствами. Применение данных покрытий в условиях современного машиностроительного производства, где используется дорогостоящее высокопроизводительное станочное оборудование с низкими режущими свойствами режущего инструмента, позволяет существенно повысить эффективность лезвийной обработки резанием металлов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Трение; износ; многослойные покрытия; износостойкость; трибологические свойства; точение; фрезерование.

Введение

Сравнительно недавно дуплексные покрытия стали одним из наиболее эффективных способов повышения износостойкости режущих инструментов из быстрорежущей стали. Дуплексные покрытия включают в себя физически осажденный слой из нитрида титана, нанесенный на заранее ионно-азотированную подложку быстрорежущей стали. Режущие

инструменты из быстрорежущей стали с такими покрытиями сочетают в себе высокую износостойкость поверхности (износостойкость инструмента повышается в 1,5–2 раза) [1–7]. Но при нестабильных условиях трения, когда происходит повреждение поверхности (главным образом во время приработочной стадии износа), эффективность твердых покрытий снижается. Твердые покрытия хрупкие и подвер-

жены значительному повреждению поверхности во время приработки. Часто большая часть твердого покрытия разрушается во время этой фазы износа, т.е. еще до начала нормальной стадии износа. Повреждение первоначальной поверхности часто приводит к значительному снижению износостойкости всего покрытия. По этой причине верхний слой, с высокими антифрикционными свойствами, является критическим компонентом, который может быть использован для защиты всего твердого покрытия. Определение состава и нанесение таких компонентов является одной из наиболее важных задач для получения износостойких покрытий на режущих инструментах, работающих при низких и умеренных скоростях резания, а также обработки труднообрабатываемых материалов, где преобладает адгезионный износ. Этого можно достичь путем применения самосмазывающихся многослойных покрытий. При этом верхние слои имеют много сложных микроструктурных особенностей, которые способствуют рассеиванию энергии (например, TiAlN-MoS₂ покрытия [2–4]). Одним из наиболее эффективных покрытий такого типа является многослойное TiAlN/WC-C покрытие с твердой смазкой, созданное Balzers [4, 8]. Главное преимущество такого покрытия состоит в очень низкой интенсивности первоначального износа инструмента в процессе резания, что ведет к значительному повышению износостойкости инструмента [5, 9–16]. Некоторые оксиды, такие, как, например, WO₃, V₂O₅, TiO₂, как было обнаружено [6–8], имеют хорошие трибологические свойства при высоких температурах. Эти перспективные материалы, выступающие как твердые смазки при высоких тем-

пературах, можно наносить методами ФОП.

Другой тип антифрикционного поверхностного слоя, успешно применявшийся для твердого покрытия, – это Z-DOL слой. Z-DOL – это 0,5% раствора перфторполиэфирной кислоты (R_f-CH₂OH) в фреоне 113.

Целью данной работы является изучение износостойкости и трибологических параметров режущего инструмента с дуплексным покрытием, дополнительно улучшенным применением антифрикционного верхнего слоя из перфторполиэфира (Z-DOL). Характеристики многослойных покрытий показаны в табл. 1.

Перфторполиэфиры нашли широкое применение в промышленности как смазочные вещества для тяжело нагруженных высокотемпературных трибосопряжений. Эти жидкости привлекательны как смазочные вещества из-за их высокой теплостойкости, низкой температуры испарения и химической инертности. Перфторполиэфир применяется как антифрикционный верхний слой на поверхности твердых покрытий. Жидкая смазка представляет собой 0,5%-й раствор перфторполиэфира Z-DOL в фреоне 113 [7, 8]. Перфторполиэфир имеет следующую химическую структуру: HO-CH₂-CF₂O-(C₂F₄O)₆-(CF₂O)₂₀-CF₂-CH₂-OH. Пленка из перфторполиэфира наносилась путем погружения образцов с покрытиями в раствор при температуре точки кипения.

Процесс износа покрытых режущих инструментов исследовался при точении и фрезеровании стали 40X. Режущие инструменты подвергались испытанию при резании с использованием охлаждающей жидкости 5%-й эмульсии и без нее. Условия проведения испытаний в процессе резания приведены в табл. 2.

Таблица 1

Table 1

Характеристики исследуемых дуплексных покрытий
Characteristics of the investigated duplex coatings

Наименование слоя / Name layer's	Характеристики исследуемых дуплексных покрытий / Characteristics of the investigated duplex coatings		
	Состав и структура слоя / The composition and layer structure	Микротвердость, ГПа / Microhardness, GPa	Толщина, мкм / Thickness, mkm
Твердое покрытие TiN / Solid the TiN coating	TiN	26–28	6–8
Ионно-азотированная подложка / Ion-nitrided the substrate	Мартенсит (α-Fe) / Martensite (α-Fe)	11–12	30–32

Выбранные условия проведения испытаний могут привести к интенсивному износу с повреждением поверхности режущего инструмента, так как известно [3, 6, 16, 17], что адгезионный износ преобладает на поверхностях режущего инструмента во время резания на низких и умеренных скоростях. Адгезионный износ вызывается формированием «мостиков» сварки шероховатостей на поверхностях обрабатываемой детали, стружки и инструмента. Последующий разрыв этих соединений, вызываемый сдвигом, ведет к появлению микроскопических фрагментов изношенного материала инструмента.

1. Методика экспериментальных исследований

Трибологические параметры покрытий определялись с помощью специально сконструированного прибора, описанного в [3]. Вращающийся индентор с покрытием устанавливался между двумя отполированными образцами, изготовленными из обрабатываемой стали 40X. Чтобы смоделировать условия трения режущего инструмента, образцы нагревались электроконтактным способом в диапазоне температур от 150 до 550°C. Нормальная сжимающая сила 2400 Н обеспечивала пластическую деформацию в контактной зоне. Для оценки антифрикционных свойств слоя использовалась адгезионная составляющая коэффициента трения. В основном именно этот компонент отвечает за адгезионный

износ инструментов из быстрорежущей стали (когда имеют место истирание и задиры металла). Величина адгезионной составляющей коэффициента трения определялась как отношение прочности $\tau_{\text{ин}}$ на срез адгезионных связей между инструментом и обрабатываемой деталью и нормальным контактным напряжением p_m , возникающим на контактирующей поверхности при температуре испытаний ($\tau_{\text{ин}}/p_m$).

Чтобы понять физический механизм явлений, которые имеют место на поверхности «режущий инструмент – обрабатываемая деталь», исследовались химический и фазовый составы поверхностных слоев с помощью электронной оже-спектроскопии (ОЭС), анализа расширенной мелкой структуры спектров потери энергии электронов (EELFAS) и вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) с использованием спектрометра VG ESCALAB MK2. Оже-спектроскопия использовалась для анализа состава поверхности покрытия и наружной поверхности пленок, образующихся на кромке режущего инструмента, а также для анализа контактирующей поверхности стружки. В каждом из этих случаев для анализа было выбрано несколько секторов размером 15×15 мм. Фазовый состав поверхности фаски износа изучали с помощью ВИМС. С этой целью пучок ионов аргона диаметром в 0,5 мкм сканировали синхронно с высокоскоростной телевизионной разверткой с ускоряющим напряжением в 5,0 кэВ и давлением аргона (Ar) в 2×10^{-5} Па.

Таблица 2
Table 2

Условия проведения испытаний при резании Test conditions for cutting

Обрабатываемый материал / Processing material	Операция / Operation	Режимы резания					Режущий инструмент из быстрорежущей стали / Cutting tool from high speed steel
		Скорость резания, м/мин / Cutting speed, m/min	Подача / feed	Глубина резания, мм / Depth of cut, mm	Ширина резания, мм / Cutting width, mm	СОЖ / lubricating coolant	
Сталь 40X / Steel 40 Cr	Точение / Turning	50–70	0,28 мм/об / 0,28 mm/rot	1,0		+	Быстросменные пластины / The quick-change plate
Сталь 40X / Steel 40 Cr	Фрезерование / Milling	21	63,0 мм/мин / 63,0 mm/min	3,0	5,0	+	Концевые фрезы / End mill

При таких условиях скорость ионного травления не превышала 0,5 монослоя в мин. Анализ проводился в приближенном к статическому режиме. Амorfизация и тонкие структурные изменения в ближайшем атомном окружении были исследованы с помощью EELFAS-метода путем анализа расширенной тонкой структуры спектров электронов. Этот метод (в режиме отражения электронов) в настоящее время используется для точных исследований атомной структуры в тонких поверхностных слоях. По аналогии с EXAFS (рентгеновским методом определения плотности расширенной тонкой структуры) мелкая структура спектров электронов содержит информацию о структуре ближайшего атомного окружения на поверхности. Математические методы обработки спектров, принятые в EXAFS-спектроскопии [6, 18–21], могут быть использованы для анализа тонкой структуры спектров электрона и дают возможность определять длины атомных связей. Эти результаты соответствуют кристаллографическим данным. EELFAS был проанализирован в диапазоне 250 эВ,

близком к линиям первичного обратного рассеивания и KLL-линиям N, C и O. Спектры электронов со скоростью 0,4 эВ/с регистрировались в интегральной форме в САЕ-режиме при 10-кратной аккумуляции сигнала. Условия для анализа были выбраны таким образом, чтобы обеспечить наилучшее энергетическое разрешение соотношения «сигнал/звук». Энергия первичных электронов составила 1500 эВ. Тонкая структура спектров электронов, близких к линии эластично рассеивающихся электронов, использовалась для анализа атомной структуры образца с покрытием TiN.

2. Результаты экспериментальных исследований

Данные стойкостных испытаний режущих инструментов приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что верхний (антифрикционный) слой уменьшает интенсивность износа инструмента на первоначальной (приработочной) стадии износа, т.е. повреждение поверхности уменьшается и износостойкость резца увеличивается значительно.

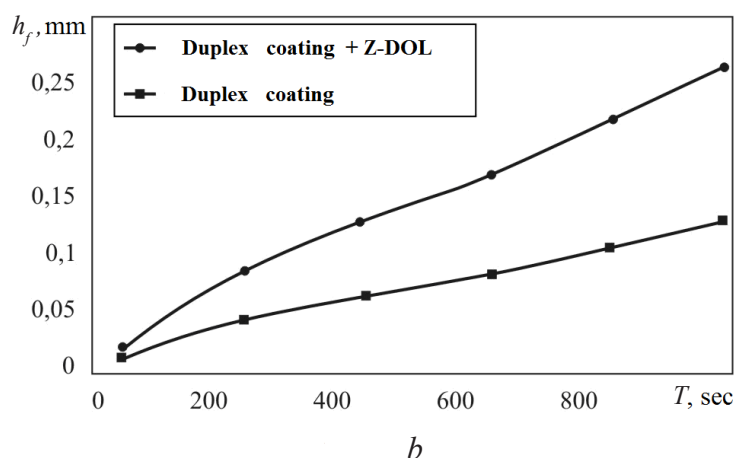
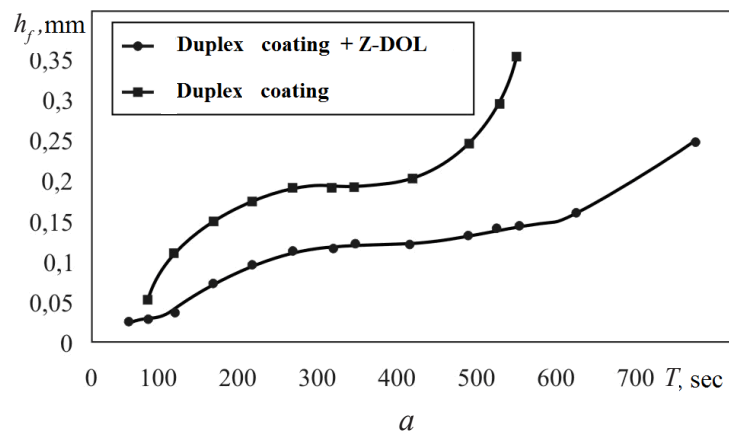


Рис. 1. Влияние времени обработки на износ инструмента по задней поверхности: *a* – точение; *b* – фрезерование (режимы обработки по табл. 2); обработка с охлаждающей жидкостью

Fig. 1. The influence of the processing time on cutting tool wear-resistance on the back surface: *a* – turning; *b* – milling (processing modes according to the table 2); treatment with coolant

Исследования влияния температуры на триботехнические параметры многослойных покрытий, состоящих из ФОП твердого покрытия TiN с верхним слоем из Z-DOL в контакте со сталью 40X, показывают (рис. 2), что эти параметры немного улучшаются.

Улучшение триботехнических параметров (уменьшение коэффициента трения) само по себе не может объяснить существенное повышение износостойкости (в 1,5–2 раза) режущего инструмента с многослойным покрытием (рис. 1).

Чтобы понять это явление, были проведены дополнительные исследования поверхностей контакта режущего инструмента и обраба-

тываемой детали. На рис. 3, а–с представлены спектры положительных и отрицательных ионов, полученные в результате анализа химического и фазового составов покрытия TiN + ПФПЭ. Покрытие TiN дает следующие пики: Ti⁺ (48); TiN⁺ (62); TiO⁺ (64 а.е.м.). ПФПЭ Z-DOL дает следующие пики: O⁻ (16); F⁻ (19); CF₂⁻² (25); CF₂O⁻² (33); F₂⁻ (38 а.е.м) (а.е.м. – это атомная единица массы). Состав покрытия изменяется во время резания. Пики с маленькой интенсивностью при 64 и 86 а.е.м. появляются после 200 секунд резания. Появление этих пик можно объяснить триборазложением ПФПЭ и TiN с образованием титаново-кислородных соединений и TiF₂.

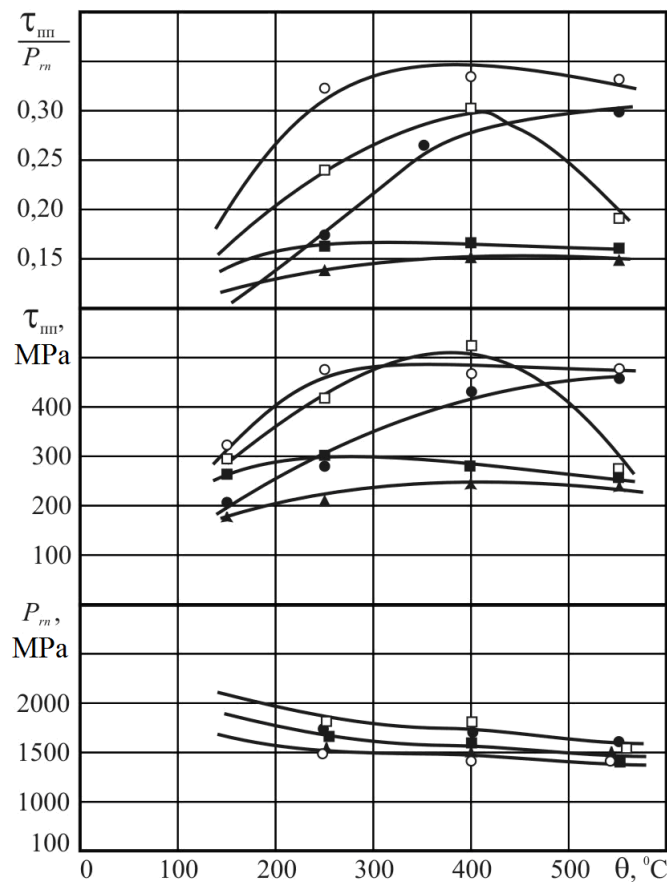


Рис. 2. Зависимость параметров трения от температуры в зоне контакта:

- – быстрорежущая сталь Р6М5 (без СОЖ);
- – быстрорежущая сталь Р6М5 + TiN (без СОЖ);
- – быстрорежущая сталь Р6М5 (с СОЖ);
- – быстрорежущая сталь Р6М5 + TiN (с СОЖ);
- ▲ – быстрорежущая сталь Р6М5 + TiN + Z-DOL (с СОЖ)

Fig. 2. The influence of the temperature on tribotechnical properties of materials:

- – speed steel R6M5 (without lubricating coolant);
- – speed steel R6M5 + TiN (without lubricating coolant);
- – speed steel R6M5 (with lubricating coolant);
- – speed steel R6M5 + TiN (with lubricating coolant);
- ▲ – speed steel R6M5 + TiN + Z-DOL (with lubricating coolant)

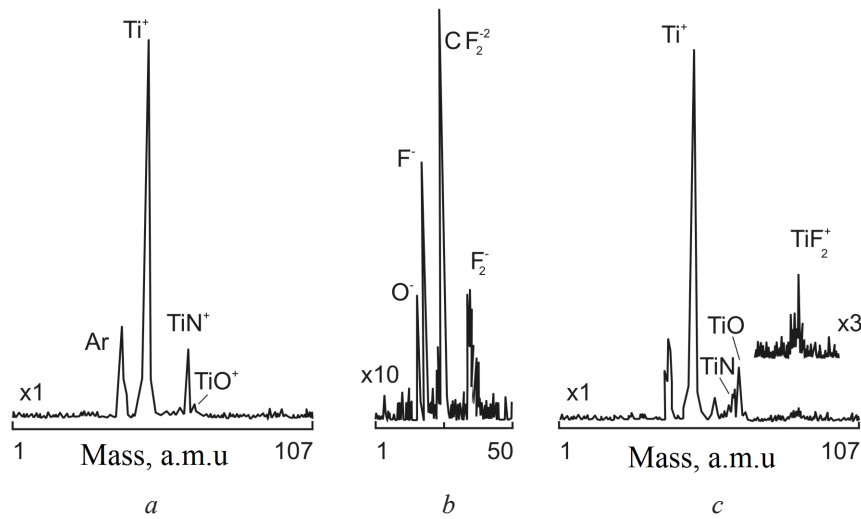


Рис. 3. ВИМС-спектры TiN-покрытия с антифрикционным верхним слоем Z-DOL:
a – спектр положительных ионов (до начала резания);
b – спектр отрицательных ионов (до начала резания);
c – спектр положительных ионов (после 200 секунд резания)

Fig. 3. SIMS-spectra of TiN-cover with the Z-DOL anti-friction top layer:
a – spectrum of positive ions (before cutting);
b – spectrum of negative ions (prior to cutting);
c – spectrum of positive ions (after 200 seconds of cutting)

С помощью ОЭС был проведен анализ состава элементов поверхности фаски износа инструмента. Результаты представлены как ряд оже-спектров, полученных с поверхности фаски износа при различной длительности резания (рис. 4). Результаты показывают, что на начальной стадии износа (в прирабочной фазе) постепенное окисление покрытия TiN (ФОП) имеет место при высоком локальном напряжении и температурах, возникающих во время резания. Этот процесс наблюдался в покрытиях TiN с антифрикционным слоем ПФПЭ и без него. В процессе резания происходит постепенное уменьшение содержания азота на поверхности. В то же самое время кислород заменяет азот. Значительное увеличение в интенсивности оже-линий для железа при длительном периоде резания объясняется схватыванием (сцеплением) материала детали (стали 40X) с поверхностью режущего инструмента и разрушением покрытия TiN на финальной стадии износа. Наблюдается хорошее соотношение между изменением износостойкости режущего инструмента и состава покрытия (рис. 1 и 4). Обоеднение поверхности покрытия азотом и обогащение кислородом во время перехода из прирабочной стадии в стадию нормального износа связано с трибоокислением TiN. Наши предыдущие исследования

показывают, что кислородосодержащее соединение, возникающее на поверхности, – это неравновесный TiO твердый раствор [4, 12–17].

3. Обсуждение результатов

Трибоокисление нитрида титана в нашем случае, очевидно, благоприятно воздействует на процессы трения и износа. Образование кислородосодержащего соединения на основе титана действует как щит, который защищает поверхность. Таким образом, появление кислородосодержащего соединения при переходе из прирабочной стадии в нормальную стадию износа свидетельствует о самоорганизации трибосистемы «инструмент – деталь» [6, 20, 21]. Изучаемая трибосистема (в нашем случае это трибосистема «обрабатываемая деталь – режущий инструмент»), можно полагать, является открытой термодинамической системой, в которой происходит обмен энергией, веществом и энтропией с окружающей средой. Согласно принципам, разработанным И. Пригожиным, второй закон термодинамики исключает возможности того, что высокоорганизованные рассеивающиеся структуры образуются в открытых системах [5, 15–17]. В этих системах изменение равновесия может превысить некоторую критическую вели-

чину, типичную для резания, и процесс упорядочивания материала начнет происходить в результате спонтанного образования рассеивающихся структур [5, 7, 13–17].

Во время трения и износа самоорганизация материалов трибосистемы происходит как реакция на внешние условия, вызываемые процессом резания, что во многих случаях приводит к коренным структурным изменениям в поверхностных слоях материалов. Эти изменения касаются многих характерных свойств трущихся поверхностей и близлежащих поверхностных слоев (например, геометрических параметров, микроструктуры, физико-химических и механических свойств). Структурная адаптация трибосистемы заканчивается на начальной стадии износа инструмента, т.е. во время прирабочной стадии. Когда характеристики поверхностных слоев становятся оптимальными, прирабочная фаза заканчивается; интенсивность износа уменьшается и начинается стадия нормального износа (устойчивого состояния) [6].

В данном исследовании предлагается следующая модель механизма износа твердого покрытия (ФОП) с верхним ПФПЭ-слоем. Полимерная молекула связывается с поверхностью покрытия TiN положительно поляризованными атомами водорода в OH и SH группах. Отрицательно поляризованные атомы азота в соединении TiN могут быть центрами адсорбции на поверхности твердого покрытия. Отрицательно поляризованные атомы фтора в CF группах выталкиваются назад из электронных облаков, окружающих поверхность «инструмент – деталь». Подобный процесс формирования поверхностного потенциала с ПФПЭ-смазкой был предложен в работе [4].

Благодаря такому электростатическому эффекту смазка ПФПЭ уменьшает коэффициент трения на режущей поверхности «инструмент – обрабатываемая деталь» (рис. 2). В связи с этим срок службы инструмента увеличивается.

Но это не единственное объяснение эффекта ПФПЭ-пленки. Следует также принять во внимание и другие объяснения. Такая пленка имеет высокую способность адсорбироваться и, благодаря небольшой толщине (табл. 2), высокую адгезию с нижним слоем и проникает в поры твердого покрытия. Поверхностная энергия смазок, содержащаяся в типичных охлаждающих жидкостях, используемых для обработки резанием, выше, чем поверхностная энергия Z-DOL-пленки [4]. В результате молекулярного взаимодействия

смазки и Z-DOL-пленки последняя не сдвигается с поверхности режущего инструмента во время первых стадий резания. Поверхности инструмента и детали разделяются слоем смазки, которая препятствует схватыванию (прилипанию) и интенсивному износу во время прирабочной стадии эксплуатации инструмента. Основная функция верхнего антифрикционного слоя – это повышение способности адаптироваться режущим инструментам с твердым TiN-покрытием. Слой смазки постепенно уменьшается в процессе резания. Трибоэмиссия отрицательно и положительно заряженных частиц и изменение поверхностного потенциала вследствие трибозарядки и триборазложения ПФПЭ были показаны в работе [6]. В результате этого процесса происходит адсорбция ионов фтора и их взаимодействие с металлом (с образованием фтористого соединения). После 200 секунд резания образуется TiF_2 . Этот процесс сопровождается окислением TiN и переходом массы азота в стружку. Такой переход массы имеет место в условиях экстремальных температуры и напряжения в зоне трения. Пленки кислородных соединений на основе титана образуются на поверхности инструмента во время резания в виде аморфноподобной структуры. Титано-фтористые соединения могут быть более устойчивыми, чем окислы благодаря более прочным связям, образуемым с TiO соединениями. Оксидные и фтористые соединения с титаном обеспечивают покрытиям высокую защитную способность в условиях износа. Устойчивые титано-фтористые соединения, образуемые во время резания, являются, по-видимому, более важными факторами для повышения износостойкости инструмента, чем улучшение условий трения с помощью ПФПЭ верхнего слоя. Ранее было показано [4], что неустойчивые Ti-O пленки действуют при трении и износе как термическое и механическое защитные устройства.

Контроль за трением режущего инструмента в условиях адгезионного износа означает локализацию всего (или, более реально, большей части) внешнего воздействия в тонком поверхностном слое при максимальном рассеивании энергии, вырабатываемой во время трения. Большое количество каналов рассеивания энергии во время прирабочной стадии износа инструмента обеспечивает более высокую износостойкость режущего инструмента. Такого практического применения универсального принципа рассеивающей гетерогенности [5]. Применение антифрикцион-

ного ПФПЭ-слоя препятствует интенсивному повреждению поверхности твердого покрытия TiN вследствие антифрикционных свойств слоя и образования защитных устойчивых соединений на поверхности во время приработочной стадии износа. Наконец устойчивая стадия износа начинается с небольшого повреждения поверхности, что также способствует повышению износостойкости инструмента (рис. 1).

Заключение

Были исследованы дулексные покрытия, включающие ионное азотирование нижнего слоя из быстрорежущей стали с последующим нанесением ФОП TiN покрытия, верхний слой которого модифицирован с помощью с ПФПЭ (перфторполиэфира). На начальной стадии износа режущего инструмента ПФПЭ-смазка уменьшает фрикционный параметр и значительно уменьшает повреждение поверхности инструмента. В процессе резания нитрид титана твердого покрытия (ФОП) окисляется, образуя защитный экранированный слой. Триборазложение Z-DOL ведет к появлению фтористого соединения на основе титана, который может повышать защитную способность поверхностного слоя. Оба эти эффекта значительно повышают износостойкость дулексного покрытия.

Список литературы

1. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. Шустер Л. Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.
3. Characteristic features of alloying HSS – based deformed compound powder materials with consideration for tool self – organization at cutting / G. S. Fox-Rabinovich et. al. // *Wear*. 1997. V. 206, No. 1. P. 214–220. DOI: 10.1016/S0043-1648(96)07516-3
4. Мигранов М. Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.
5. Пригожин И., Кондипуди Д. Современная термодинамика. М.: Мир, 2002. 461 с.
6. Мигранов М. Ш. Повышение износостойкости инструментов на основе интенсификации процесса адаптации поверхностей трения при резании металлов. Уфа: Гилем, 2011. 229 с.

7. Криони Н. К., Мигранов М. Ш. Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 327 с.

8. Износостойкость многофункциональных покрытий при лезвийной обработке резанием / Н. К. Криони и др. // *Вестник УГАТУ*. 2016. Т. 20. № 2 (72). С. 29–33.

9. Maier J., Prill S., Reichert B. Space charge effects in polycrystalline, micropolycrystalline and thin film samples Application to AgCl and AgBr // *Solid state ionics*. 1988. V. 28–30. Part. 2. P. 1465–1469. DOI: 10.1016/0167-2738(88)90405-5.

10. Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке / Л. Ш. Шустер и др. М.: Машиностроение, 2008. 318 с.

11. Mitterer C., Mayrhofer P. H., Musil J. Thermal stability of PVD hard coatings // *Vacuum*. 2003. V. 71. P. 279–284. DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00751-0.

12. Migranov M., Migranova R. Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions // *Key Engineering Materials*. 2012. V. 496. P. 75–79. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.496.75.

13. Vereschaka A. A., Migranov M. S. Study of wear resistance of sintered powder tool materials // *Advanced Materials Research*. 2014. V. 871. P. 159–163. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.871.159.

14. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on HSS with high melting point compounds / A. Vereschaka et. al. // *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10, No. 20. P. 9282–9286.

15. Development of wear-resistant complex for high-speed steel tool when using process of combined cathodic vacuum arc deposition / A. A. Vereschaka et. al. // *Procedia CIRP*. 2013. V. 9. P. 8–12. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.159.

16. Development of wear-resistant coatings compounds for high-speed steel tool using a combined cathodic vacuum arc deposition / A. A. Vereschaka et. al. // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. V. 84, No. 5–8. P. 1471–1482. DOI: 10.1007/s00170-015-7808-5.

17. Study of properties of nanostructured multilayer composite coatings of Ti-TiN-(TiCrAl)N and Zr-ZrN-(ZrNbCrAl)N / A. A. Vereschaka et. al. // *Journal of Nano Research*. 2016. V. 40. P. 90–98. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JNanoR.40.90.

18. Comparison of tribological behaviours of AlCrN and TiAlN coatings-Deposited by physical vapor deposition / J. L. Mo et. al. // *Wear*. 2007. V. 263, No. 7–12. P. 1423–1429. DOI: 10.1016/j.wear.2007.01.051.

19. Fabrication of CrAlN nanocomposite films with high hardness and excellent anti-wear performance for gear application / L. Wang et. al. // *Surface & Coatings Technology*. 2010. V. 204, No. 21–22. P. 3517–3524. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.04.014.

20. Characterization of tribological behavior and wear mechanisms of novel oxynitride PVD coatings designed for applications at high temperatures / J. Nohava et. al. // *Tribology International*. 2015. V. 81. P. 231–239. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.08.016.

21. Tribological behavior at elevated temperature of multilayer TiCN/TiC/TiN hard coatings produced by chemical vapor deposition / M. Bao et. al. // *Thin Solid Films*. 2011. V. 520. P. 833–836. DOI: 10.1016/j.tsf.2011.04.165.