

УДК 621.91.02

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

Н. К. Криони<sup>1</sup>, М. Ш. Мигранов<sup>2</sup>, М. С. Дементьева<sup>3</sup>, В. Р. Мухамадеев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>krioni@mail.rb.ru, <sup>2</sup>migmars@mail.ru, <sup>3</sup>masha\_dem@mail.ru, <sup>4</sup>vener\_muhamadeev@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 26.06. 16

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментальных исследований и показаны зависимости влияния температуры на трибологические характеристики контакта инструмента с обрабатываемым материалом при различных условиях лезвийной обработки резанием (без покрытия с СОЖ; с покрытием, без СОЖ; без покрытия, с СОЖ; с покрытием, без СОЖ; с покрытием + эпилама, с СОЖ).

**Ключевые слова:** dry cutting, turning, cutting tool wear, cutting temperature, cutting fluids, epilamy

### ВВЕДЕНИЕ

Применение современного высокопроизводительного и дорогостоящего металлорежущего оборудования, оснащенного системами с числовым программным и адаптивным управлением, особенно в условиях гибких автоматизированных производств и мехатронных станочных систем, повышает требования, предъявляемые к качеству и надежности режущего инструмента, а также усложняет условия его работы. Режущие инструменты таких систем работают при высоких контактных напряжениях и температурах, при активации всех физико-химических процессов. При этом контактные площадки инструмента интенсивно изнашиваются от абразивного воздействия твердых включений в обрабатываемых материалах, протекания адгезионно-усталостных, коррозионно-окислительных и диффузионных явлений. В этих условиях работоспособность инструмента может быть повышена за счет изменения состояния приповерхностных свойств, при которых контактные площадки режущего клина будут наиболее эффективно сопротивляться изнашиванию, особенно при повышенных температурах. При этом инструментальный материал в объеме тела инструмента должен одновременно обладать достаточным запасом прочности при сжатии и изгибе, приложении ударных импульсов и знакопеременных напряжений. Перечисленные свойства обычно являются взаимоисключающими, и для создания режущего инструмента с комплексом указанных

свойств на поверхности и в объеме тела в настоящее время используются различного рода износостойкие покрытия (ИП). Широкое промышленное использование режущих инструментов с ИП позволяет [1]: повысить стойкость и надежность инструмента; сократить удельный расход дорогостоящих остродефицитных инструментальных материалов; расширить область использования твердых сплавов и сократить номенклатуру применяемых сплавов стандартных марок и т.д.

Известно [1], что износ любого трибосопряжения, в том числе режущего инструмента, проходит, как правило, ряд стадий, которые базируются на различных трибопроцессах. Наиболее общая классификация процессов трения разделяет их на две группы:

- стационарные, то есть с мало изменяющимися во времени трибопараметрами,
- изменяющиеся с определенной тенденцией.

Стационарному процессу в наибольшей степени соответствует нормальный износ, нестационарному – приработка и усиленный (или катастрофический) износ. Для режущего инструмента, работающего главным образом в условиях адгезионного изнашивания, усиленный износ аналогичен режиму заедания. Приработке соответствует процесс перехода к устойчивому состоянию, а заедание проявляется как неустойчивый процесс, который характеризуется самоускоряющимся возрастанием интенсивности изнашивания.

Поэтому представляется вполне рациональным разработка таких многослойных покрытий

для режущего инструмента, очередной слой которых отвечал бы текущей фазе процесса изнашивания.

### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Нанесенные на инструментальные материалы покрытия позволяют значительно снизить силу трения [1, 3]. Особенно это характерно для наиболее термодинамически устойчивых покрытий в виде окислов некоторых металлов, а также для покрытий, склонных к диссоциации при температурах, соответствующих максимальным температурам резания. С повышением температуры увеличивается частота собственных колебаний валентных атомов, растет пластичность материала и снижается его сопротивляемость пластическому деформированию. Таким образом, даже при постоянном нормальном напряжении увеличиваются количество активных центров и площадь фактического контакта. Кроме того, повышение температуры способствует разрушению поверхностных пленок и образованию химически чистых, «ювенильных» поверхностей. Последнее способствует проявлению схватывания и увеличению сил трения. Однако в результате дальнейшего повышения температуры происходит разупрочнение «узлов» схватывания и интенсивное окисление трущихся поверхностей. Эти обстоятельства зачастую приводят к снижению сил трения.

Тепловые процессы при резании металлов являются своеобразным индикатором, отражающим характер протекания целого ряда явлений, определяющих работоспособность режущего инструмента и качество формируемых поверхностей обрабатываемых деталей [3]. С повышением температуры инициируются процессы макро- и микроразрушения контактных площадок инструмента. При наличии на контактных площадках инструмента ИП снижаются работа деформации и силы резания [1, 3]. Это свидетельствует о снижении интенсивности основных источников тепла в зоне резания – деформационного и фрикционного по передней и задней поверхностям. ИП, отличаясь по своим теплофизическим характеристикам от соответствующих характеристик инструментальной матрицы, может также изменять или регулировать направление и интенсивность тепловых потоков: в сторону инструмента, детали и стружки, а также в окружающую среду. Очевидно, что в этом случае снижение интенсивности основных источников теплоты и изменение

направления тепловых потоков приведет к изменению теплового состояния инструмента и температуры резания.

Высокая износостойкость инструмента с твердыми покрытиями обусловлена тем, что последние выполняют функцию экрана контактных поверхностей инструмента от внешних воздействий при резании. В наибольшей степени это касается устойчивой стадии процесса (фазы нормального износа), когда основным требованием к покрытию является высокая износостойкость. Существенное повышение режущих свойств инструмента достигается при наличии дополнительного подслоя, сформированного за счет диффузионного насыщения азотом (путем ионного азотирования) поверхности быстрорежущей стали. Наличие азотированного подслоя обеспечивает минимальную пластическую деформацию твердого покрытия в процессе резания, что обеспечивает высокую износостойкость инструмента. По этой причине технология комбинированного упрочнения (ионного азотирования + покрытия) принята нами за базовую.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для эффективной работы такого покрытия в нестационарных стадиях процесса износа предложено использовать дополнительные слои. Так, в период приработки использован антифрикционный слой, позволяющий избежать повреждаемости твердого и хрупкого покрытия. Состав такого слоя и технология его нанесения могут варьироваться.

В данной работе в качестве прирабочного слоя использован слой эпилама [1–3].

Эпиламирование заключается в нанесении на поверхность инструмента фторосодержащего поверхностно-активного вещества. Пленочное покрытие в виде плотно упакованного молекулярного монослоя располагается эквидистантно профилю макронеровности поверхности инструмента. Оно обладает высокой адсорбционной способностью, в связи с малой толщиной прочно удерживается на поверхности и заполняет ее поры. Поскольку поверхностная энергия масел, присутствующих в составах смазочно-охлаждающих жидкостей, используемых при работе инструмента, больше поверхностной энергии этой пленки, то в результате их молекулярного взаимодействия обеспечивается нерастекаемость масел и предотвращение их сдвига с поверхности. Разделение смазкой поверхностей трения препятствует их изнашиванию и

интенсивному схватыванию на начальных стадиях работы инструмента.

Таким образом, мы полагали, что если при работе инструмента отвечает эпиламированный слой покрытия, нормальному износу – слой покрытия, а катастрофическому износу – азотированный подслой, то следует ожидать существенного повышения износостойкости режущего инструмента. Чтобы проверить эту гипотезу, вначале были проведены исследования триботехнических характеристик в интервале температур 150–550 °С, соответствующем температурам резания при использовании быстрорежущих инструментов. Прочность адгезионных связей на срез  $\tau_{nn}$ , предельные нормальные напряжения  $p_{ГН}$  и индекс совместимости  $K_C = \tau_{nn}/p_{ГН}$  оценивали по методике [2].

В работе для оценки триботехнических параметров ( $\tau_{nn}$ ,  $p_{ГН}$ ,  $\tau_{nn}/p_{ГН}$ ) использовали экспериментальный метод [2]. В основе этого метода принята физическая модель (рис. 1), которая в первом приближении отражает реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте. Согласно этой модели, сферический индентор 2 (имитирующий единичную неровность пятна касания трущихся твердых тел), сдавленный двумя плоско-параллельными образцами 1 (с высокой точностью и чистотой контактирующих поверхностей), вращается под нагрузкой вокруг собственной оси. Сила  $F$ , расходуемая на вращение индентора и приложенная к тросику 3, уложенному в паз диска 4, связана главным образом со сдвиговой прочностью  $\tau_{nn}$  адгезионных связей.

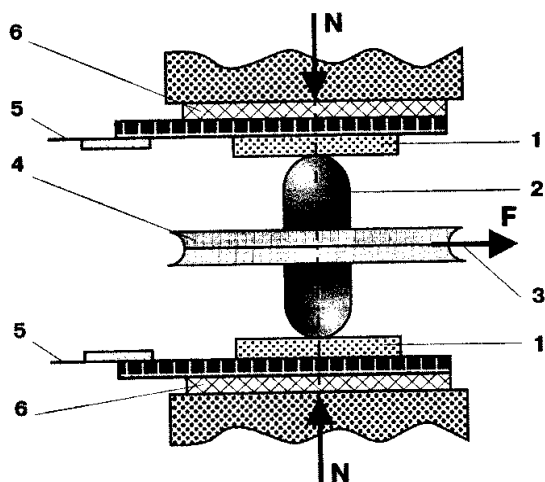


Рис. 1. Модель фрикционного контакта

С целью использования этого способа применительно к условиям повышенных темпера-

тур контакта разработана и создана [2] специальная аппаратура, позволяющая производить электроконтактный нагрев (через шины 5, изолированные от корпуса прокладками 6, см. рис. 1) зоны соприкосновения и обеспечивать характерное для трибоконтакта распределение температуры в приповерхностном слое. Разработаны также методы тарирования регулирования температуры контакта и получение зависимости величины  $\tau_{nn}$  от нормальных напряжений  $p_{ГН}$  при различных температурах контакта.

Инденторы изготавливали из инструментальной стали Р6М5 без покрытий, с твердым покрытием (Ti Cr)N (нанесенным методом PVD) и с твердым покрытием (Ti Cr)N + слой эпилама (фторосодержащая). Образцы изготавливали из стали 40Х (НВ 280–290). Исследования проводили с использованием пятипроцентной эмульсии на водной основе и без СОЖ.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

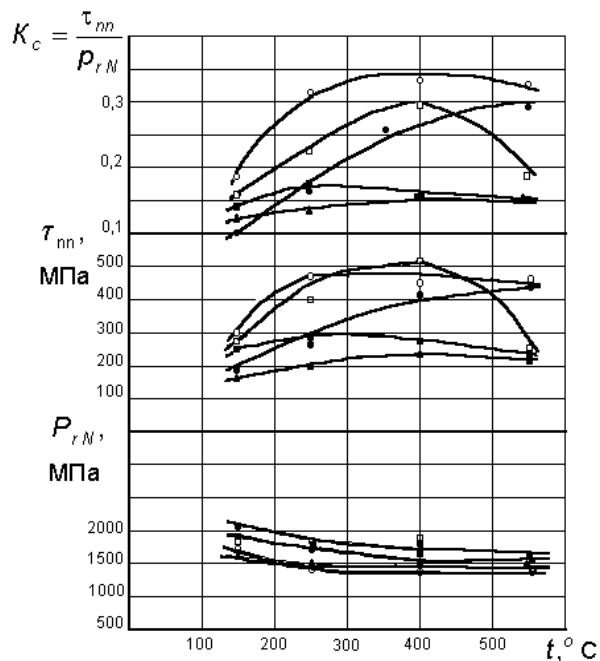
Полученные результаты приведены на рис. 2. Из этого рисунка видно, что применение покрытий (Ti Cr)N и эпиламы существенно снижает прочность  $\tau_{nn}$  на срез адгезионных связей и индекс совместимости  $K_C$  практически во всем исследованном диапазоне температур контакта. Этому способствует также применение СОЖ.

Таким образом, полученные результаты подтвердили прогноз об улучшении триботехнических свойств контакта инструментального и обрабатываемого материалов при использовании покрытий с программируемым послойным изменением свойств.

Натурные испытания выполняли при попутном фрезеровании четырехперьевыми концевыми фрезами  $\varnothing 12$  мм заготовок из стали 40Х (НВ 280–290) со скоростью резания  $V = 21$  м/мин, подачей на зуб  $S_z = 0,028$  мм, шириной  $b = 10$  мм и глубиной  $t = 3$  мм на фрезерном станке HSS-400-V «HECKERT».

Ширину фаски износа по задней поверхности на вершине зубьев ( $h_3$ ) и по лезвию измеряли с помощью микроскопа МИР 2М (МОВ) с точностью 0,01 мм. Во внимание принимали наиболее изношенный зуб. Критерий затупления  $h_3 = 0,3$  мм. Для измерения износа через каждые 500–1000 метров пути резания делали остановки. Исследовали работоспособность фрез, выполненных из карбидостали на основе

Р6М5 и прошедших ионное азотирование с последующим нанесением покрытий методом PVD – (Ti Al)N (HRC<sub>3</sub>, 67) или (Ti Cr)N (HRC<sub>3</sub>, 68) и эпиламинированием.

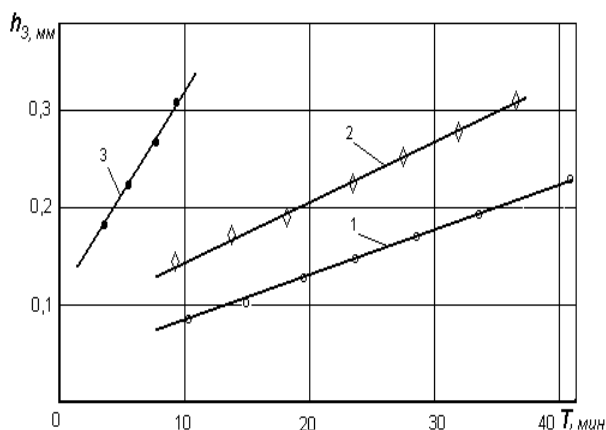


**Рис. 2.** Влияние температуры, состояния поверхности инструментального материала из Р6М5 и окружающей среды на трибологические характеристики контакта с обрабатываемым материалом – сталью 45 (в отожженном состоянии):  $\circ$  – без покрытия с СОЖ;  $\square$  – с покрытием (TiCr)N, без СОЖ;  $\bullet$  – без покрытия, с СОЖ;  $\blacksquare$  – с покрытием (TiCr)N, без СОЖ;  $\blacktriangle$  – с покрытием (TiCr)N + эпилама, с СОЖ

Для сравнения выполняли также стойкостные испытания цельных твердосплавных фрез из ВК8. Полученные результаты, приведенные на рис. 3, подтверждают многократное повышение периода стойкости режущих инструментов с многослойными покрытиями, имеющими программируемое изменение свойств. Достигается это, как видно из рис. 3, как за счет уменьшения приработочного износа, так и за счет снижения интенсивности нормального износа.

## ВЫВОДЫ

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что весьма перспективным направлением в повышении износостойкости режущих инструментов является применение многослойных покрытий, каждый слой которых выполняет соответствующую функцию в каждой последующей фазе изнашивания.



**Рис. 3.** Графики износа концевых фрез диаметром 12 мм при фрезеровании стали 40Х (НВ 280-290); скорость резания  $V = 21$  м/мин; ширина фрезерования  $b = 10$  мм; глубина фрезерования  $t = 3$  мм; подача на зуб  $S_z = 0,028$  мм: 1 – фреза карбидостальная с покрытием (TiAl)N (HRC 67); 2 – карбидосталь с покрытием (TiCr)N (светложелтый цвет HRC68); 3 – фреза твердосплавная

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. **Верещака А. С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с. [A. S. Vereshchaka, *Performance of cutting tool with wear-resistant coatings* (in Russian). – Moscow: Mashinostroenie, 1993.]
2. **Шустер Л. Ш., Мигранов М. Ш.** Пат. № 34249. Прибор для исследования адгезионного взаимодействия; заявл. 24.06.2003; опубл. 27.11.03. [L. Sh. Shuster, M. Sh. Migrantov, *Device to study the adhesive interaction*. The patent for useful model No. 34249 from 24.06.2003.]
3. **Шустер Л. Ш., Криони Н. К., Шолом В. Ю., Мигранов М. Ш.** Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке. М.: Машиностроение, 2008. 318 с. [L. Sh. Shuster, N. K. Krioni, V. Y. Sholom, M. Sh. Migrantov, *Coating and lubrication in high temperature moving mates, and Metalworking*. – Moscow: Mashinostroenie, 2008.]

## ОБ АВТОРАХ

**Криони Николай Константинович**, проф., ректор УГАТУ (с 2015 г по н.вр.), д-р техн. наук (защ. РГУНиГ им. И.М.Губкина, 2005г.) Иссл. в обл. трения и износа деталей машин, специалист в области контактного взаимодействия твердых тел.

**Мигранов Марс Шарифуллович**, проф. зав. каф. ОКМиМ, дипл. инж.-мех. (1987, УАИ). Д-р техн. наук по процессам мех. и физ.-техн. обработки (защ. в РУДН, 2007). Иссл. в обл. триботехн., износостойкости режущего инструмента и повышения эффективности лезвийной обработки резанием.

**Дементьева Мария Сергеевна**, аспирант кафедры ОКМиМ, Дипл. Инж.технолог машиностр.производства (УГАТУ 2013).

**Мухамадеев Венер Рифкатович**, стар. препод. каф. ОКМиМ. Дипл. маг. техн. и технол. (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. износостойкости режущего инструмента.

**METADATA**

**Title:** Wear-resistant of coatings with self-programmable change properties of the cutting processes. **Authors:** N.K. Krioni, M.Sh. Migranov, M.S. Dementyeva, V.R. Muhamadeev.

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University(USATU), Russia.

**E-mail:** migmars@mail.ru, masha\_dem@mail.ru, vener\_muhamadeev@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 2 (72), pp. 29-33, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The article presents the results of experiments and shows the dependence of of temperature influence on the tribological characteristics of contact with the material being processed under different conditions (without coating with cooling liquid, with coating without cooling liquid, without coating, with a cooling liquid, a coated without coolant; coated + epilama with cooling liquid).

**Key words:** Coating, turning, tool wear, cutting temperature, cooling.

**About authors:**

**KRIONI Nicholay Konstantinovich**, prof., Rector USATU (with 2015 on present time), Dr. Sc. Sciences (Def. RGUNiG them. Gubkin, 2005). Inst. in the region. friction and wear items-lei machines, a specialist in the field of inter-action contact solids.

**MIGRANOV, Mars Sharifulloevich**, professor, head of the department of bases of constructing of mechanisms and machines of USATU. Dipl. engineer-mechanic (UAI, 1987). Area of research in the field of tribo-logy, the wear resistance of the cutting tool and improve the efficiency of the blade machining process.

**MUHAMADEEV, Vener Rifkatovich**, senior lecturer of the department of bases of constructing of mechanisms and machines of USATU. Mag.-ing. (USATU, 2007). Area of research in the field of wear resistance of the cutting tool.

**DEMENTYEVA Maria Sergeevna**, post-graduate student OKMiM, Dip. engineer tehnologist of machinebuild. (USATU 2013).