

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук, А.М. МИГРАНОВ, аспирант,
С.Р. ШЕХТМАН, д-р техн. наук

Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р., 2021

Представлены результаты теоретико-экспериментальных исследований триботехнических характеристик композиционных многослойных покрытий для режущего инструмента при лезвийной обработке фрезерованием. Установлено уменьшение коэффициента трения, увеличение периода стойкости режущего инструмента и снижение тепловой нагруженности зоны резания на фрезерных операциях при использовании износостойких покрытий.

Ключевые слова: композиционные многослойные покрытия, фрезерование, вторичные структуры, энтропия, трибосистема.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-18-27

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное развитие машиностроения сопровождается разработкой и внедрением в промышленность новых марок сталей и сплавов, обладающих уникальными физико-механическими свойствами. Детали из таких материалов в большинстве случаев подвергаются лезвийной обработке точением, фрезерованием, сверлением и т.д. При этом повышение эффективности механической обработки резанием является важнейшей задачей машиностроительного производства, где наиболее слабым звеном является режущий инструмент [1, 2], так как именно инструмент в значительной мере определяет эффективность производства в целом, качество обработанной поверхности детали, полноту использования технических возможностей современных мехатронных систем, оснащенных высокоскоростным оборудованием с дорогостоящим микропроцессорным управлением (ЧПУ и АдСУ), сроки их окупаемости и т.д. В связи с этим проблема совершенствования режущего инструмента является актуальной. Вместе с тем в настоящее время в машиностроении еще не нашли широкого применения инструментальные материалы и покрытия с регулируемой адаптацией поверхностей трения, которые с учетом условий резания (управляемой переменности элементов режима резания, СОТС и др.) позволяют повысить износостойкость инструмента за счет протекания неравновесных процессов при трении в процессе резания металлов [3–6]. Это связано с недостаточной изученностью вопросов по структурно-фазовой адаптации приповерхностных слоев на подвижном фрикционном контакте «инструмент – деталь», что затрудняет практическое использование данного явления для решения конкретных технологических задач.

Известно [6–9], что основные явления при трении концентрируются в тонком приповерхностном слое. Научный и практический интерес представляют термодинамические аспекты состояния указанного слоя и связь изнашивания с этим состоянием. Любая трибосистема представляет собой открытую неравновесную

термодинамическую систему и подчиняется принципу вторичной диссипативной гетерогенности, согласно которому в процессе трения протекают явления структурной приспособляемости (адаптации) контактирующих материалов, при этом все виды взаимодействия тел локализуются в тонкопленочном объекте – вторичных структурах (ВС). В соответствии с данным принципом вторичные структуры необходимы для рассеяния энергии при ее переходе из зоны трения в трущиеся тела, причем рассеяние энергии должно происходить с наименьшей скоростью прироста энтропии. Вторичные структуры выполняют защитные функции, ограничивая распространение взаимодействия внутри трущихся тел и снижая его интенсивность [9].

Разработка новых материалов защитных покрытий, способов и процессов их нанесения, архитектуры в направлении создания многослойных композиций, обладающих более высокими эксплуатационными свойствами по сравнению с монослойными, отвечающих современным требованиям по защите поверхности режущего инструмента, работающих в условиях пластической деформации, повышенных температур, знакопеременных, усталостных и термоусталостных нагрузок, и определила цель данной работы – исследование эксплуатационных свойств композиционных многослойных покрытий для режущего инструмента при фрезеровании.

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Направленное изменение свойств покрытий путем варьирования их состава, структуры и строения позволяет существенно влиять на контактные характеристики процесса резания. Известно, что химический состав, физико-механические и теплофизические свойства износостойких покрытий (ИП) могут значительно отличаться от соответствующих параметров инструментального и обрабатываемого материалов, поэтому покрытие следует рассматривать как своеобразную «третью среду» [5]. Причем эта среда, с одной стороны, может заметно изменять поверхностные свойства инструментального материала, а с другой – влиять на процессы контактного взаимодействия, температуру и усилия резания, направленность тепловых потоков, термодинамическое и напряженное состояния режущей части инструмента.

Процесс трения на контактных площадках передней и задней поверхностей во многом определяется поверхностными свойствами пары трения «инструмент – деталь». Согласно молекулярно-механической теории внешнее трение имеет двойственную природу, обусловленную объемным деформированием материала и преодолением межатомных и межмолекулярных связей, возникающих между участками трущихся поверхностей [4]. Адгезионное взаимодействие, как установлено в работе [5], оказывает существенное влияние практически на все параметры резания металлов. В тяжелых условиях трения (при пластических деформациях на контакте) адгезионное взаимодействие приводит к схватыванию. Схватывание можно рассматривать как цепной процесс, начинающийся с образования активных центров и их взаимодействия и заканчивающийся формированием общих металлических связей контактирующих тел с дальнейшим их разрывом и рекомбинацией.

Наиболее простым и надежным способом оценки склонности инструментального и обрабатываемого материалов к схватыванию является определение таких триботехнических параметров, как прочность адгезионных связей на срез t_{nm} и адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения $f_m = t_{nm}/P_m$ [4]. Нанесение покрытий на инструментальные материалы позволяет значительно

снизить силу трения. Особенно это характерно для наиболее термодинамически устойчивых покрытий в виде оксидов некоторых металлов, а также для покрытий, которые склонны 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 возрастает количество активных центров и увеличивается площадь фактического контакта. Кроме того, повышение температуры ускоряет разрушение поверхностных пленок и образование 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, что зачастую приводит к снижению сил трения. Тепловые процессы при резании металлов служат своеобразным индикатором, отражающим характер протекания целого ряда явлений, определяющих работоспособность режущего инструмента и качество формируемых поверхностей обрабатываемых деталей [2]. С повышением температуры инициируются процессы макро- и микроразрушения контактных площадок инструмента [6–8]. При наличии на контактных площадках инструмента ИП снижаются силы резания и работа деформации [1, 2]. Это свидетельствует об уменьшении интенсивности основных источников тепла в зоне резания – деформационного и фрикционного по передней и задней поверхностям.

Износостойкие покрытия, теплофизические свойства которых отличаются от соответствующих характеристик инструментальной матрицы, могут 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. Это возможно за счет формирования пленок вторичных структур (в виде рутила, а также оксидов и карбонитридов тугоплавких металлов) на режущем инструменте с покрытием, обладающих защитными и экранирующими свойствами [9].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МАТЕРИАЛЫ

Для оценки степени влияния указанных выше факторов на эффективность процесса резания при применении износостойких покрытий были выполнены работы по компьютерному моделированию теплофизических явлений, расчету температуры резания и распределение тепловых потоков с использованием пакета программ ANSYS, DEFORM. Температуру резания определяли методом естественной термопары [2], при этом регистрацию и запись осуществляли при помощи ртутного токосъемника, цифрового электронного вольтметра «Элемер» и ПЭВМ. Для оценки составляющих сил резания применялся комплект аппаратуры: универсальный трехкомпонентный динамометр УДМ-600 с усилителем 4АНЧ-22 и шлейфовой светолучевой осциллограф типа Н-117 для регистрации и записи сигналов.

Триботехнические характеристики ИП были определены с помощью адгезиомера особой конструкции [10]. На адгезиомере (рис. 1) между двумя

полированными образцами 1, изготовленными из обрабатываемого материала, был помещен вращающийся индентор с исследуемыми покрытиями 2. Для моделирования условий трения, аналогичных процессу резания, образцы и индентор нагревались электроконтактным способом в диапазоне температур от 150 до 1 050 °С. Для создания в зоне контакта пластической деформации, аналогичной процессу резания, образцы из обрабатываемого материала 1 сжимались с силой, равной 2 400 Н. При этом для оценки антифрикционных свойств слоя применялся адгезионный компонент коэффициента трения. Этот компонент, важный для анализа и прогнозирования интенсивности износа при трении металлов, определялся как отношение сопротивления сдвигу τ_m , вызываемому адгезионным взаимодействием между материалами инструмента и обрабатываемой деталью, к нормальному напряжению P_m , возникающему на пластическом контакте при температурах испытания (τ_m/P_m). Модель установки включает в себя также диск 4 с тянущим тросиком 3, электроконтактные клеммы 5 с изоляторами 6.

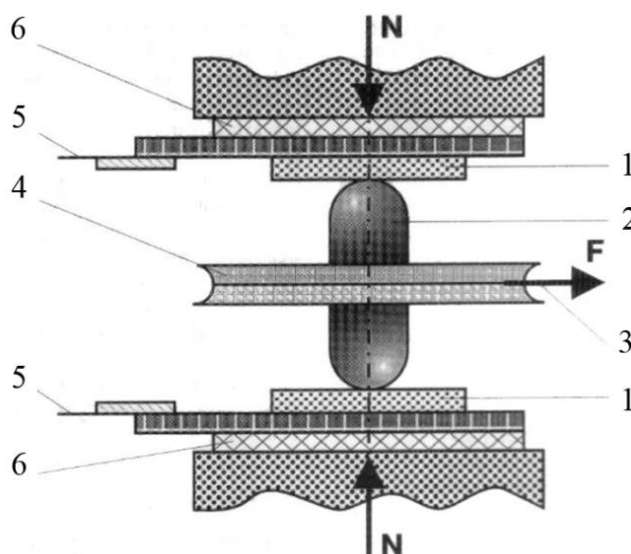


Рис. 1. Модель установки для исследования триботехнических свойств

Были проведены серии натуральных испытаний по определению износостойкости твердосплавных режущих инструментов групп ВК, ТК и ТТК с покрытиями ((TiCr)N, (TiAl)N, (AlTi)N, (TiAlCr)N, (AlTiCr)N), (TiAlCrSiY)N с различным содержанием каждого из элементов покрытия толщиной до 15 мкм при фрезеровании. Фрезерование сталей и сплавов 40Х, 12Х18Н10Т, ЭИ-654, ЭИ-698ВД осуществлялось на вертикально-фрезерном станке НЕСКЕРТ концевыми фрезами с наружным диаметром $d = 12$ мм, числом зубьев $z = 4$ и резцовыми фрезами ($d = 90$ мм, $z = 1$) со сменными четырехгранными твердосплавными пластинами. Исследования проводили при различных режимах фрезерования (частота вращения вала шпинделя $n = 500 \dots 900$ об/мин; скорость подачи $S = 50 \dots 100$ мм/мин; глубина резания $t = 1 \dots 3$ мм; ширина резания $b = 4 \dots 10$ мм).

Синтез мультислойных покрытий осуществляется на модернизированной промышленной установке ННВ 6.6-И1 с магнитно-дуговой фильтрацией, электро-дуговыми испарителями катода в условиях плазменного ассистирования, с использованием несамостоятельного сильноточного диффузионного разряда, генери-

руемого плазменным источником «ПИНК». Одновременная генерация частиц распыляемого материала за счет тока дуги с катодным пятном и генерация ионов инертного газа плазменного источника «ПИНК» позволяет повысить концентрацию заряженных частиц, что приводит к ускорению протекания процессов адсорбции, хемосорбции и ионного перемешивания. Проведение процесса в условиях ионной бомбардировки интенсифицирует процессы, наблюдаемые при осаждении многослойных покрытий, способствует формированию мелкозернистой структуры, наноразмерных зерен и слоев, а также образованию сложных соединений за счет:

энергии, поставляемой в конденсируемое покрытие, и превращения кинетической энергии бомбардирующих ионов в тепловую для локальных объемов;
увеличения количества и плотности центров зародышеобразования;
повышения степени ионизации конденсируемого потока для снижения температуры синтеза покрытия и сдерживания роста размеров зерен.

Наблюдаются также поверхностные эффекты, которые заключаются, в частности, в аморфизации растущей пленки; стимулировании диффузионных процессов на границе раздела «покрытие – подложка», повышении адгезионной связи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты триботехнических испытаний инденторов, изготовленных из инструментального материала Т15К6 с различными покрытиями (рис. 2), показывают, что по мере повышения температуры фрикционные параметры контакта «инструмент – деталь» изменяются немонотонно.

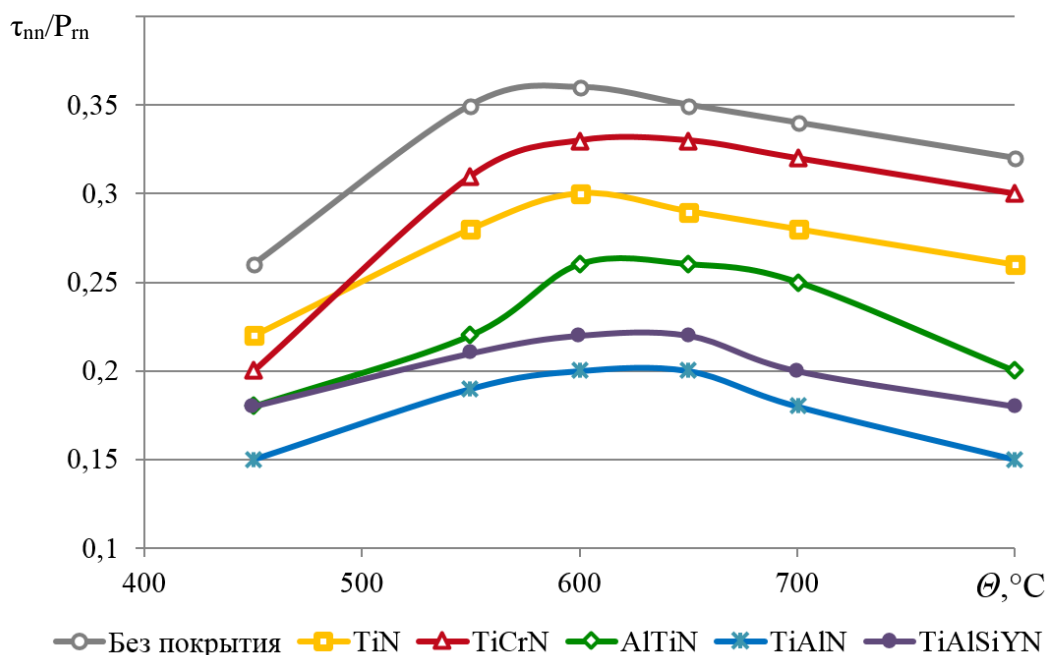


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от температуры в зоне контакта «сталь 12Х18Н10Т – Т15К6 с различными покрытиями»

В диапазоне температур 550...650 °С увеличение коэффициента трения контакта связано с интенсификацией адгезионного взаимодействия на контактных поверхностях. Кривые для всех исследуемых покрытий материалов подобны друг

другу. Однако если при температурах до 450...500 °С величины фрикционных параметров практически одинаковы для всех исследуемых материалов (покрытий), за исключением материалов без покрытия, то при более высоких температурах разница между ними начинает увеличиваться. При температурах около 600...700 °С схватывание (адгезия) на фрикционной контактной поверхности максимальное. При этом фрикционные параметры у инструментальных материалов с износостойкими покрытиями значительно ниже, чем у обычного твердого сплава. Как уже отмечалось в работе [9], данное явление, несомненно, связано с окисляемостью карбида титана и образованием кислородосодержащих соединений на поверхности. Различие фрикционных параметров у исследуемых материалов максимально при температурах, приближающихся к температурам работы инструмента при обработке резанием (700...750 °С).

На наш взгляд, это предопределяет высокие эксплуатационные свойства концевых фрез. Наибольшие значения периода стойкости инструмента (T) для условий чистовой и получистовой обработки (при величине износа по задней поверхности инструмента $h_3^{kp} = 0,3$ мм) соответствуют композиционным многослойным наноструктурным покрытиям типа (AlTi)N, (TiAl)N и (TiAlCrSiY)N (рис. 3). При этом обеспечивается улучшение значения периода стойкости в 2,5...3 раза по сравнению с использованием инструмента без покрытия.

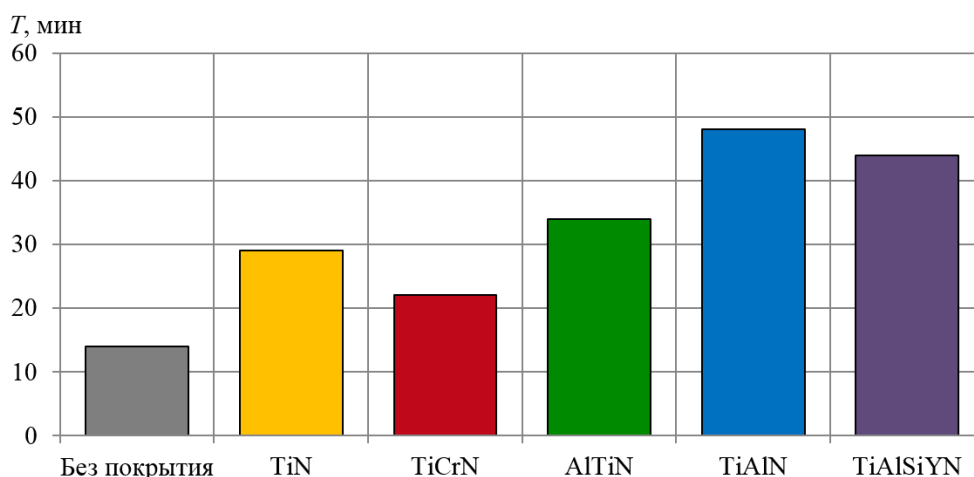


Рис. 3. Зависимость периода стойкости инструмента от типа покрытия при фрезеровании стали 12X18H10T фрезой T15K6 ($d = 12$ мм, $z = 4$, $n = 650$ об/мин, $S_m = 50$ мм/мин, $b = 3$ мм, $t = 6$ мм, $h_3^{kp} = 0,3$ мм)

Экспериментальные исследования температуры резания при фрезеровании (рис. 4) показали, что применение композиционных износостойких покрытий оказывает существенное влияние на тепловую нагруженность зоны резания и зависит от типа покрытий. При использовании износостойких покрытий обеспечивается снижение температуры в зоне контакта до 25 %. Результаты температурных исследований были также использованы для формирования базы данных для моделирования теплофизических явлений.

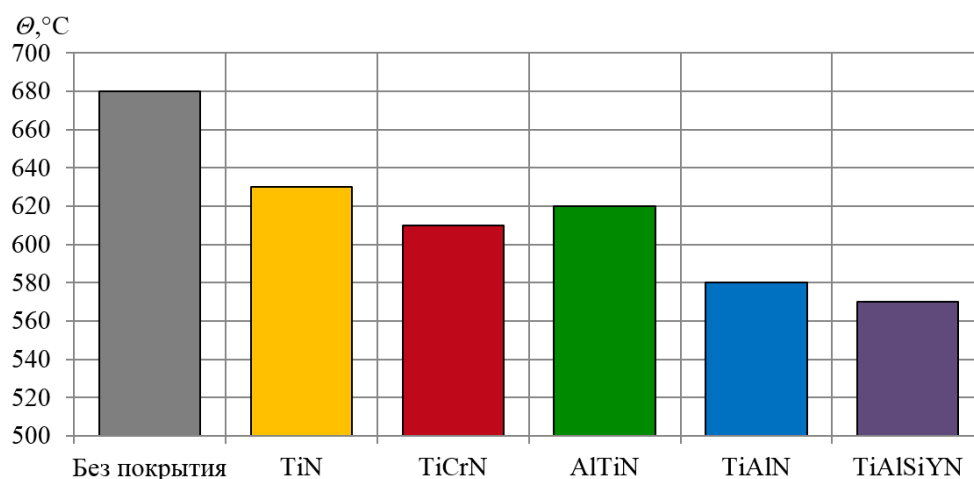


Рис. 4. Зависимость температуры резания от типа покрытия при фрезеровании стали 12Х18Н10Т фрезой Т15К6 ($d = 12$ мм, $z = 4$, $n = 650$ об/мин, $S_m = 50$ мм/мин, $b = 3$ мм, $t = 6$ мм, $h_3^{kp} = 0,3$ мм)

Можно предположить следующий физический механизм этих процессов. В зоне контакта «инструмент – деталь» появляются градиенты температуры и напряжения, локализованные в слоях ниже поверхности. При пластической деформации высокой степени и температурах, достигающих 550 °С, инициируются различные процессы, которые изменяют химические и фазовые составы композиционных износостойких покрытий в этих микрообъемах. К ним относятся поглощение кислорода, разложение карбидов и нитридов, которые являются неустойчивыми при такой температуре, хемосорбция кислорода, диффузия освобождаемых С и N из инструмента в стружку. Тонкие пленки представляют собой простые и сложные кислородосодержащие фазы на основе титана и алюминия. Они возникают в процессе резания в тонких приповерхностных слоях инструмента. Отдельные стадии таких процессов исследованы в работе [11].

Способность покрытий образовывать защитные поверхностные пленки во время трения является важным фактором на пути повышения стойкости инструмента. Согласно [9], эта способность улучшается для покрытий с нанокристаллической структурой. Нанокристалличность покрытия помогает формировать защитный слой из оксида алюминия [9] на поверхности вследствие ускоренной диффузии алюминия во время окисления. Покрытие с мелкой зернистой структурой имеет большую площадь границ зерен. Внешняя диффузия алюминия и внутренняя диффузия кислорода усиливаются. Это способствует образованию защитных алюминиевых оксидных пленок, что значительно улучшает износостойкость инструмента (см. рис. 3).

Данные, приведенные в работах [7, 9], показывают, что на поверхности во время резания образуются два типа защитных кислородосодержащих пленок на основе алюминия и титана: аморфноподобные и кристаллические. Эти пленки обладают высокой пластичностью и улучшенной смазывающей способностью. Кроме того, кристаллические пленки оксида алюминия улучшают поведение износа, так как они имеют низкую теплопроводность, что препятствует интенсивной теплоотдаче во время резания. Значительная часть тепла, как подтверждается данными температурных экспериментов, остается в стружке (см. рис. 4). В то же время оксид алюминия как химически устойчивый материал препятствует интенсивному взаимодействию на

поверхности «деталь – инструмент» в процессе резания и снижает сцепляемость обрабатываемого материала с поверхностью режущего инструмента. Для того чтобы улучшить износостойкость и приспособляемость этих покрытий, создать условия для образования обоих типов защитных пленок из оксидов алюминия и титана (кристаллической трибокерамической и аморфноподобной), необходимо обеспечить высокоскоростную обработку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований триботехнических характеристик композиционных многослойных покрытий для режущего инструмента при фрезеровании установлено, что наиболее благоприятным по коэффициенту трения (см. рис. 2), износостойкости (см. рис. 3) и тепловой нагруженности зоны резания (см. рис. 4) являются покрытия TiAlN и TiAlSiYN. Пленки, которые образуются на поверхности режущего инструмента в результате процесса адаптации, имеют аморфно-кристаллическую структуру [7, 9]. Сложная структура защитных пленок, образующихся при трении и высоких температурах резания, обеспечивает большую износостойкость и соответственно период стойкости фрез с покрытиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
3. Бершадский Л.И. Самоорганизация и надежность трибосистем. Киев: Знание, 1981. 35 с.
4. Польцер Г., Эбиленг В., Фирковский А. Внешнее трение твердых тел, диссипативные структуры и самоорганизация // *Трение и износ*. 1988. Т. 9. № 1. С. 12–18.
5. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.
6. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Boki Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting // *Wear*. 1997. V. 206. №. 1-2. P. 214–220.
7. Fox-Rabinovich G.S., Weatherly G.C., Dodonov A.I., Kovalev A.I., Shuster L.S., Veldhuis S.C., Dosbaeva G.K., Wainstein D.L., Migranov M.S. Nanocrystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications // *Surface and Coatings Technology*. 2004. V. 177–178. P. 800–811.
8. Beake B.D., Fox-Rabinovich G.S. Progress in high temperature nanomechanical testing of coatings for optimising their performance in high speed machining // *Surface and Coatings Technology*. 2014. V. 255. P. 102–111.
9. Fox-Rabinovich G.S., Beake B.D., Endrino J.L., Veldhuis S.C., Parkinson R., Shuster L.S., Migranov M.S. 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. V. 200. №. 20–21. P. 5738–5742.

10. Патент РФ 34249. *Прибор для исследования адгезионного взаимодействия* / Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш.; Заявл. 24.06.2003. Опубл. 27.11.2003. Бюл. № 33.

11. Vereschaka A.A., Migranov M.S. Study of wear resistance of sintered powder tool materials // *Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd*, 2014. V. 871. P. 159–163.

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р. Триботехнические свойства композиционных покрытий для концевых фрез // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (7). С. 18–27.

TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF COMPOSITE COATINGS FOR END MILLING CUTS

M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc., A.M. MIGRANOV, Postgraduate
S.R. SHEKHTMAN, Dr. Sc.

Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marx st.,
450008, Ufa, Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

The results of theoretical and experimental studies of the tribotechnical characteristics of composite multilayer coatings for cutting tools during milling are presented. A decrease in the friction coefficient, an increase in the service life of the cutting tool and a decrease in the thermal loading of the cutting zone during milling operations with the use of wear-resistant coatings are established.

Keywords: composite multilayer coatings, milling, secondary structures, entropy, tribosystem.

REFERENCES

1. Vereshchaka A.S. Rabotosposobnost rezhushchego instrumenta s iznosostoykimi pokrytiyami [Performance of cutting tools with wear-resistant coatings]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1993. 336 p.
2. Makarov A.D. Optimizatsiya protsessov rezaniya [Optimization of cutting processes]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976. 278 p.
3. Bershadskiy L.I. Samoorganizatsiya i nadezhnost tribosistem [Self-organization and reliability of tribosystems]. Kiyev: Znaniye, 1981. 35 p.
4. Pol'tser G., Ebileng V., Firkovskiy A. External friction of rigid bodies, dissipative structures and self-organization. *Treniye i iznos*. 1988. V.9, No.1, pp.12–18. (In Russian).
5. Shuster L.SH. Adgezionnoye vzaimodeystviye tverdykh metallicheskih tel [Adhesive interaction of solid metal bodies]. Ufa: Gilem, 1999. 199 p.
6. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Bokiyy Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting. *Wear*. 1997. V. 206. No. 1–2, pp. 214–220.

7. Fox-Rabinovich G.S., Weatherly G.C., Dodonov A.I., Kovalev A.I., Shuster L.S., Veldhuis S.C., Dosbaeva G.K., Wainstein D.L., Migranov M.S. Nanocrystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications. *Surface and Coatings Technology*. 2004. V. 177–178, pp. 800–811.
8. Beake B.D., Fox-Rabinovich G.S. Progress in high temperature nanomechanical testing of coatings for optimising their performance in high speed machining. *Surface and Coatings Technology*. 2014. V. 255, pp. 102–111.
9. Fox-Rabinovich G.S., Beake B.D., Endrino J.L., Veldhuis S.C., Parkinson R., Shuster L.S., Migranov M.S. 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. V. 200. No. 20–21, pp. 5738–5742.
10. Patent RF 34249 utility model *Pribor dlya issledovaniya adgezionnogo vzaimodeystviya* [Device for the study of adhesive interaction]. Shuster L.Sh., Migranov M.Sh. Declared 24.06.2003, Published 27.11.2003, Bulletin No. 33.
11. Vereschaka A.A., Migranov M.S. Study of wear resistance of sintered powder tool materials //Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd, 2014. V. 871, pp. 159–163.

Поступила в редакцию/received: 29.10.2020; после рецензирования/revised: 23.12.2020;
принята/accepted 28.12.2020