

УДК 621.735.016.2

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

М. Ш. МИГРАНОВ¹, А. М. МИГРАНОВ², К. Н. РАМАЗАНОВ³, С. Р. ШЕХТМАН⁴

¹ migmars@mail.ru, ² migranov_art_1993@inbox.ru, ³ kamram@rambler.ru, ⁴ shex@inbox.ru

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

Поступила в редакцию 07.05.2019

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований триботехнических характеристик (прочность адгезионных связей, износостойкость и т.д.) спеченных инструментальных материалов, дополнительно легированные присадками, и многослойных композиционных износостойких покрытий, позволяющие за счет формирования вторичных структур при трении существенно повысить эксплуатационные свойства режущего инструмента для лезвийной обработки резанием.

Ключевые слова: износостойкие покрытия; спеченные порошковые инструментальные материалы; триботехнические характеристики; вторичные структуры; износ; режущий инструмент.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности механической обработки резанием является актуальной задачей машиностроительного производства, где наиболее слабым звеном является режущий инструмент [1–6], так как именно инструмент в значительной мере определяет полноту использования технических возможностей современных мехатронных систем, оснащенных высокоскоростным оборудованием с дорогостоящим микропроцессорным управлением (ЧПУ и АдСУ), а также сроки их окупаемости. Поэтому 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 (РАПТ), 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 [1, 4–6]. Связано это с недостаточной изученностью вопросов по структурно-фазовой адаптации

приповерхностных слоев на подвижном фрикционном контакте «инструмент–деталь», что затрудняет практическое использование этого явления для решения конкретных технологических задач.

Известно [3–6], что основные явления при трении концентрируются в тонком приповерхностном слое. Представляет научный и практический интерес термодинамические аспекты состояния этого слоя и связь изнашивания с этим состоянием. Любая трибо-система представляет собой открытую неравновесную термодинамическую систему и подчиняется принципу вторичной диссипативной гетерогенности, согласно которому в процессе трения происходят явления структурной приспособляемости (адаптации) контактирующих материалов, при которых все виды взаимодействия тел локализуются в тонкопленочном объекте – вторичных структурах (ВС). В соответствии с этим 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 выполня-

ют защитные функции, ограничивая распространение взаимодействия внутри трущихся тел и снижая интенсивность этого взаимодействия.

Для исследований были выбраны характерные представители обрабатываемых материалов, обладающих существенно различными физико-механическими свойствами, химическим и структурно-фазовым составом: конструкционные и коррозионно-стойкие стали, а также жаропрочные и жаростойкие сплавы. В качестве инструментальных материалов были выбраны широко используемые в современном машиностроительном производстве – быстрорежущие стали и твердые сплавы группы ВК, ТК и ТТК. При натурных испытаниях использовались четырехгранные пластины (12×12 мм) и цельные резцы, фрезы и сверла. Цилиндрическое фрезерование осуществлялось концевыми фрезами как из быстрорежущей стали, так и из твердосплавного материала ($d=12; 13$ мм; $z = 4; 5$), а торцевое фрезерование однорезцовыми фрезами ($d = 90$ мм), оснащенными четырехгранными пластинами.

Согласно работе [2], предполагалось, что при взаимодействии двух твердых тел (особенно при высоких температуре и давлении, рис. 1) на контактирующей поверхности возникает слой, представляющий собой так называемое «третье тело». Этот слой способен существовать в различных состояниях: как в жидком, так и в твердом. Расчетная величина τ_n в данной работе есть не что иное как сопротивление сдвигу «третьего тела» под давлением, вызывающим пластическую деформацию в наиболее мягком из контактирующих твердых тел. Очевидно, что условия трения на поверхности режущего инструмента близки к условиям, для которых была рассчитана величина τ_n .

Исследование микроструктуры поверхности инструмента выполнялось с помощью сканирующей электронной микроскопии и локального рентгеновского спектрального анализа на микроскопе JSM – U3, оборудованном рентгеновским спектрометром для рассеивания волн на основе двух кристаллов при ускоряющем напряжении в 20 кВ. В качестве анализаторов использовались кристаллы LiF и MYR.

Химические и фазовые составы инструментальных материалов, а также составы пленок, образовавшихся на инструменте и в лунках, исследовались с помощью сканирующей Оже-электронной спектроскопии (ОЭС/AES) и спектроскопии вторичной массы (СВИИМ/SIMS). Это было сделано с помощью спектрометра ESCALAB – MK2, оборудованного электронным прожектором LEG200, ионным прожектором AG6 и анализатором ионной массы SQ300 квадрупольного типа.

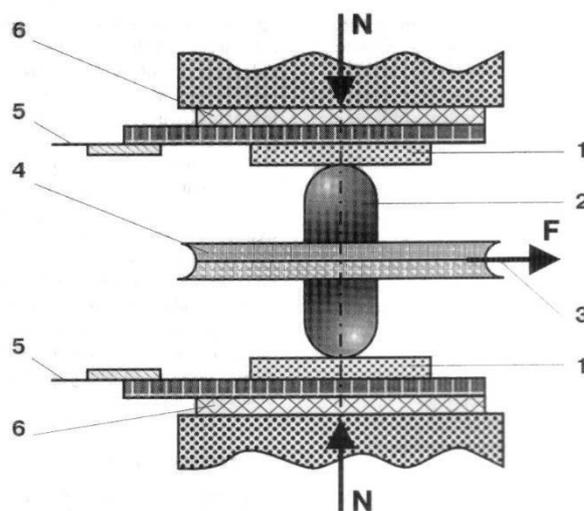


Рис. 1. Модель установки для исследования триботехнических свойств: 1 – отполированные образцы из обрабатываемого материала; 2 – индентор; 3 – тросик, обеспечивающий вращение индентора; 4 – специальный диск; 5 – медные пластины; 6 – изоляторы

Для исследования химического состава были изготовлены образцы в виде косых шлифов под углом 5° к верхней части режущих пластинок. Эти образцы позволили исследовать гетерогенность состава на небольшой глубине под поверхностью, включая образовавшиеся пленки. До проведения исследования образцы обезжиривались, затем помещались вовнутрь подготовительной камеры спектрометра и подвергались 5-минутному травлению в среде ионов аргона. Травление осуществлялось под давлением газа в 10^{-4} Па и со скоростью травления порядка 20 монослоев в минуту. Такая подготовка образцов исключила воздействие случайного загрязнения на результаты анализа. Поверхность образцов была исследована.

дована на различных глубинах, начиная от поверхности: либо с помощью стационарного электрона и ионных лучей, либо сканированием их по выбранному направлению.

В работе представлены два подхода воздействия на условия трения при резании металлов путем дополнительного легирования СПИМ нового поколения на основе быстрорежущей стали.

Первый подход предполагает снижение уровня триботехнических характеристик благодаря уменьшению коэффициента трения при рабочих температурах. Установлено, что СПИМы на основе быстрорежущей стали, легированные карбидом титана, обладают высокой износостойкостью и их можно классифицировать как новый класс самоорганизующихся инструментальных материалов.

В частности, к таковым можно отнести СПИМы, содержащие в качестве твердой основы карбид титана, а быстрорежущую сталь (P6M5) – как связующее (СПИМ + 20 % TiC). При помощи ОЭС и ВИМС было обнаружено, что в процессе резания карбиды титана превращаются в тонкие поверхностные пленки в виде соединения титана с кислородом [4]. Это значительно улучшает фрикционные свойства (рис. 2) при рабочих температурах резания и повышает износостойкость режущего инструмента (рис. 3).

Суть второго подхода легирования состоит в повышении экранирующего эффекта с помощью устойчивой высокопрочной вторичной структуры (простых и сложных кислородосодержащих фаз на основе титана и бора), появляющейся на поверхности инструмента, что достигается, например, с помощью дополнительной присадки 2 % VN. Дополнительная присадка 5 % Al₂O₃ практически не повлияла на состав вторичных структур.

Легирование осуществлялось не добавлением того или иного элемента, а добавлением соединений нужной плотности и неустойчивости при рабочих температурах, что позволило использовать соединения

в относительно небольших количествах, с минимально возможным воздействием на качество объема. Применение обоих принципов дает возможность значительного увеличения износостойкости инструмента (например, с помощью присадки 20 % TiCN) (рис. 2).

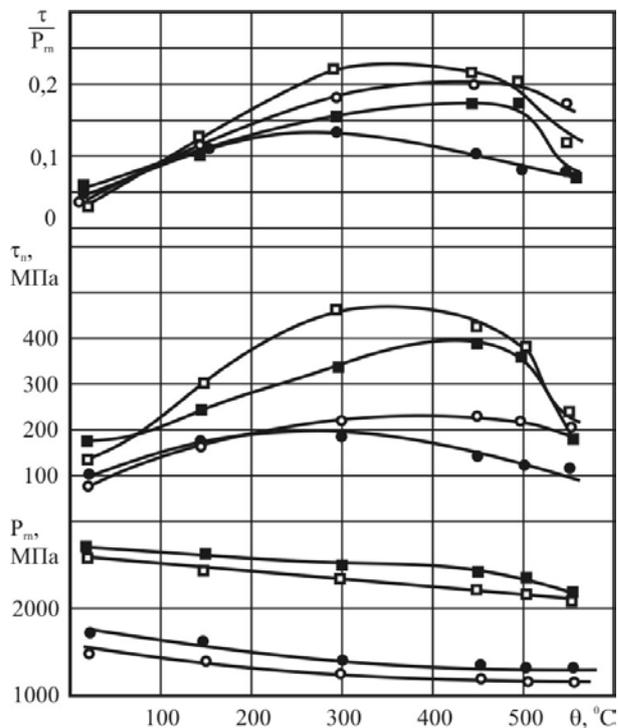


Рис. 2. Влияние температуры на триботехнические свойства материалов:

- ■ – СПИМ (P6M5 + 20% TiC);
- ● – Сталь 45 (HB 180...200);
- □ – P6M5; □ ■ – Сталь 45 (HRC 30...32)

Как показали исследования, износостойкость такого инструмента в 2–3,5 раза выше износостойкости обычных инструментов из быстрорежущей стали.

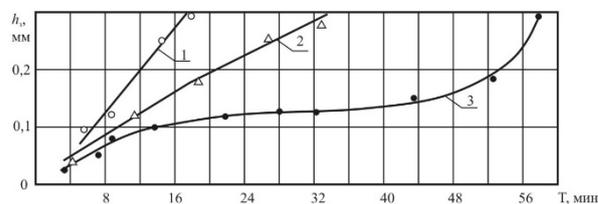


Рис. 3. Влияние времени обработки на износ режущего инструмента по задней поверхности инструмента при точении стали 45 (HB 180...200),
 $V = 60$ м/мин; $t = 0,5$ мм; $S = 0,2$ мм/об:
 1 – P6M5; 2 – P12M3Φ2K5;
 3 – СПИМ (P6M5 + 20% TiC)

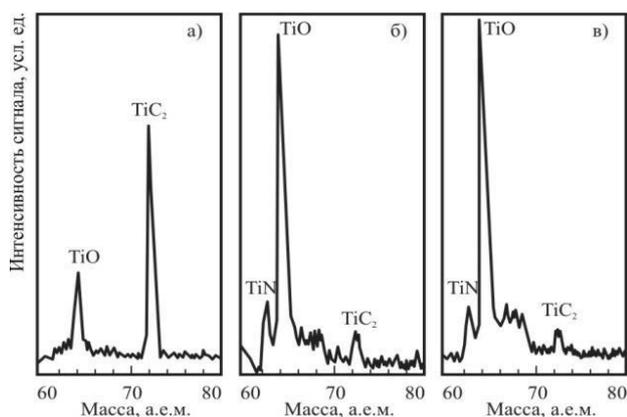


Рис. 4. Спектры ВИС поверхности инструмента из СПИМ (Р6М5 + 20 % TiC) в зависимости от времени резания (точение стали 45): $V = 60$ м/мин; $t = 0,5$ мм; $S = 0,28$ мм/об): а – после 4 мин; б – после 20 мин; в – после 24 мин

Дальнейшим совершенствованием режущих инструментов является нанесение на их рабочие поверхности многослойных износостойких покрытий. При этом каждый слой такого покрытия должен формироваться с учетом изменения механизма изнашивания в периоды приработочного, нормального (устойчивого) и катастрофического износа. Состояние поверхности подложки перед нанесением твердых покрытий влияет на прохождение нормальной стадии износа инструмента и на прочность сцепления с подложкой. Исследовано влияние 16-ти химических элементов и четырех антифрикционных материалов, имплантированных в подложку, на износостойкость реза из быстрорежущей стали с (Ti,Cr)N-покрытием поверхности.

Установлено, что компромисс между высокой износостойкостью и надежностью достигается в многослойном покрытии, нанесенном на подложку, обогащенную индием. Индий присутствует в нижнем слое покрытия как в металлическом, так и в связанном состояниях (In-N). Положительное воздействие индия на износостойкость связано с двумя типами явлений, возникающих на трущейся поверхности. Индий при нагреве в процессе резания частично переходит в жидкое состояние и частично окисляется (о чем свидетельствуют данные металлографических исследований). Жидкая фаза как смазка ведет к уменьшению коэффициента трения. Кислородосодержащие фазы, защищающие по-

верхность, способствуют продлению стадии нормального износа, значительно повышая износостойкость инструментов.

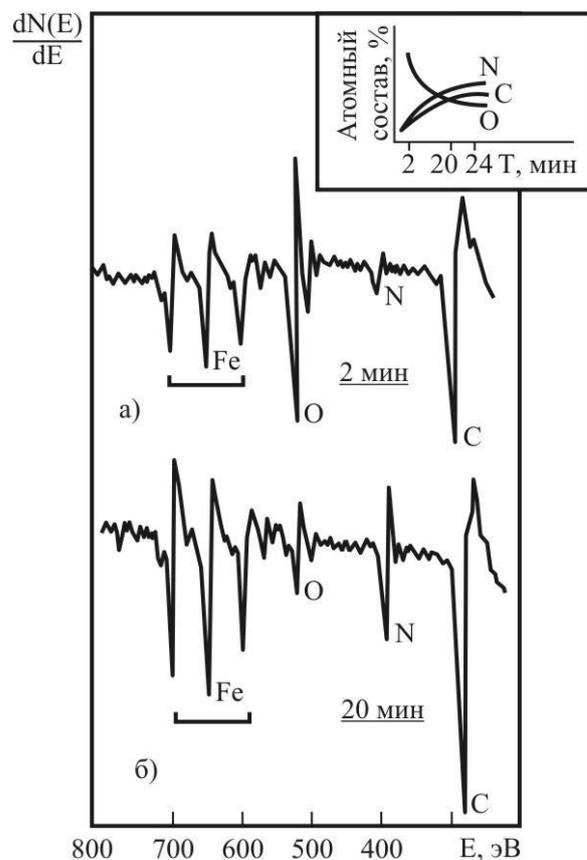


Рис. 5. Оже-спектры поверхности обрабатываемого материала (сталь 45): а – после 2 минут резания; б – после 20 минут резания (условия резания см. рис. 2)

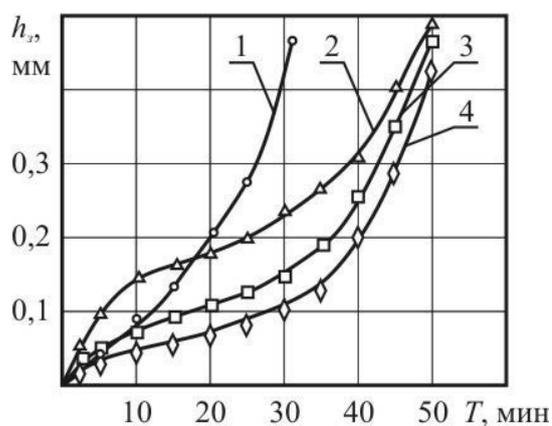


Рис. 6. Влияние времени обработки на износ концевой фрезы $\varnothing 12$ мм по задней поверхности: 1 – СПИМ (Р6М5 + 20% TiC); 2 – СПИМ (Р6М5 + 20% TiC + 2% BN); 3 – СПИМ (Р6М5 + 15% TiC + 5% Al₂O₃); 4 – СПИМ (Р6М5 + 20% TiCN) (обрабатываемый материал сталь 40Х; $V = 65$ м/мин; $S_m = 63$ мм/мин; $t = 3$ мм; $b = 10$ мм)

Для исследования возможности снижения приработочной стадии изнашивания быстрорежущую сталь Р6М5 упрочняли по «дуплексной» технологии (ионное азотирование, а за ним – TiN-покрытие). «Дуплексное» покрытие затем было модифицировано нанесением на поверхность ПФПЭ (перфторполиэфир Z-DOL) слоя.

Исследован процесс самоорганизации такого покрытия, который происходит во время обработки металлов резанием на стадии приработочного износа поверхности режущего инструмента. Установлено, что при этом происходят одновременно следующие явления: *a* – триборасщепление (распад) тонкого поверхностного слоя; *б* – формирование устойчивого аморфоподобного защитного слоя (типа Ti-O и Ti-F) на инструментальной поверхности. Процессы самоорганизации способствуют улучшению износостойкости во время приработочной стадии износа, что ведет к повышению в 2–3 раза износостойкости резцов и концевых фрез.

В последнее время все большее применение в технике получают нанотехнологии, повышающие эксплуатационные качества изделий. Выявлено, что основное преимущество метода физического осаждения покрытия (ФОП) с магнитно-дуговой фильтрацией (МДФ) состоит в значительном измельчении зерна, которое ведет к формированию нанокристаллических структур (с размером зерна примерно 60–80 нм) покрытий. Данный метод позволяет повысить износостойкость покрытий из композита нитрида титана и алюминия (TiAl)N в условиях высокоскоростной обработки (рис. 7), когда преобладает окислительный износ режущего инструмента.

Образование пленок оксида алюминия на поверхности резца значительно изменяет тепловые потоки и отвод тепла в стружку, что можно проиллюстрировать на изображении поперечных сечений стружек после сканирования на электронном микроскопе. На этих сечениях стружки можно выделить три различные зоны. Известно [3, 4], что динамическая рекристаллизация контактной области стружки происходит во время резания. Большая часть теплового потока, кото-

рая переходит в стружку, вызывает интенсивную рекристаллизацию материала в этой зоне, что находит свое выражение в укрупнении зерен стружки внутри приконтактной зоны.

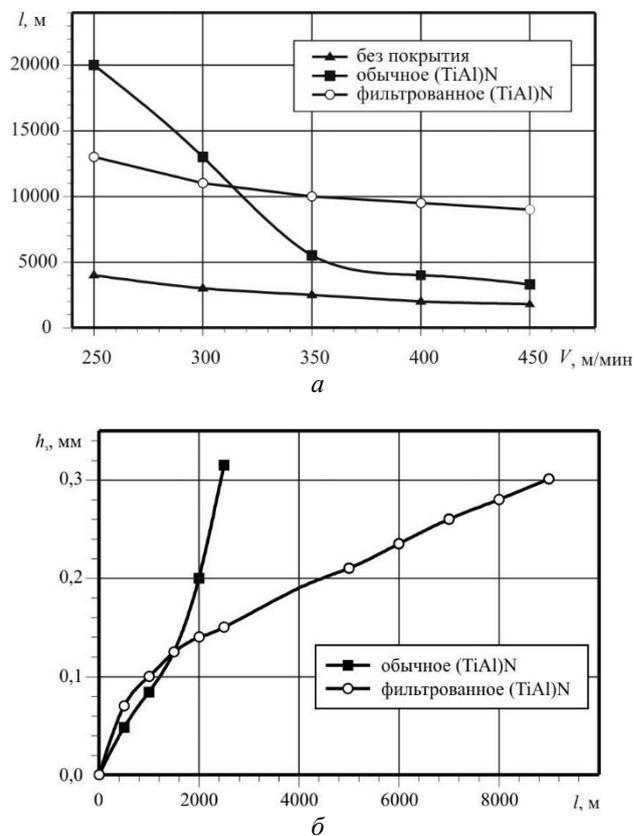


Рис. 7. Результаты стойкостных исследований при точении стали 40X резцами ТТ8К6 с различными покрытиями ($S=0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм): *a* – влияние скорости резания на путь резания (при $h_3 = 0,3$ мм); *б* – влияние пути резания на износ инструмента по задней поверхности (при $V = 450$ м/мин)

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что СПИМы на основе быстрорежущей стали, дополнительно легированные карбидом титана, обладают высокой износостойкостью и могут рассматриваться как новый класс самоорганизующихся инструментальных материалов. В процессе резания наблюдается преобразование карбидной фазы в устойчивые вторичные структуры, имеющие форму соединений из титана и кислорода, что способствует значительному улучшению фрикционных свойств при рабочих температурах и приводит к повышению износостойкости режущего инструмента в 2,0–3,5 раза

по сравнению с износостойкостью инструмента из обычных быстрорежущих сталей.

2. Установлено, что первый подход (например, за счет легирования TiC) приводит к снижению коэффициента трения при рабочих температурах контакта. Второй подход связан с повышением экранирующего эффекта с помощью устойчивых высокопрочных вторичных фаз (в виде соединений Ti и B с кислородом и азотом), формирующихся на поверхности инструмента (например, при дополнительном легировании 2 % BN). Оба подхода реализуются с помощью присадки 20 % TiCN.

3. Установлено, что оптимальное сочетание прочности и надежности (характеризующихся высокой адгезией покрытия (TiCr)N к подложке) проявляется в многослойном покрытии с нижним слоем, обогащенным индием (имплантированным в поверхность подложки), который способствует образованию на поверхностях трения аморфно-подобных структур In–N и In–O и продлению стадии нормального износа, повышая в 2,1–2,4 раза износостойкость инструментов.

4. Установлено, что многослойные покрытия, включающие ионное азотирование нижнего слоя из быстрорежущей стали с последующим нанесением ФОП TiN покрытия, верхний слой которого модифицирован с помощью с ПФПЭ (перфторполиэфира), обеспечивают высокую износостойкость режущего инструмента. На начальной стадии износа режущего инструмента ПФПЭ как смазка уменьшает фрикционный параметр и значительно уменьшает повреждение поверхности инструмента. В процессе резания нитрид титана твердого покрытия окисляется, образуя защитный экранированный слой. Триборазложение «Z-DOL» ведет к появлению фтористого соединения на основе титана, который повышает защитную способность поверхностного слоя. Оба эти эффекта приводят к повышению износостойкости «дуплексного» покрытия.

5. Показано, что основное преимущество магнитно-дуговой фильтрации при нанесении покрытия методом ФОП – значительное измельчение зерен (TiAl)N, которое приводит к образованию поверхностного

слоя с размером зерен около 60–80 нм, т.е. в пределах нанощкалы, и обеспечивает возможность использования режущего инструмента с таким покрытием в условиях высокоскоростной обработки резанием с увеличением износостойкости режущего инструмента в 3–4 раза. Оксидные слои, которые образуются на поверхности нанокристаллических фильтрованных (TiAl)N покрытий при высокоскоростном резании, в основном состоят из защитных тонких пленок, подобных оксиду алюминия, и имеющих аморфно-кристаллические структуры. Сложная структура этих пленок оказывает благотворное влияние на снижение износа режущих инструментов.

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.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с. [L. Sh. Shuster, *Adhesion bond solid metal bodies*, (in Russian). Ufa: Gilem, 1999.]
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*. Vol. 206. 1997. P 214. [G. S. Fox-Rabinovich, et. al., "Characteristic features of alloying HSS – based deformed compound powder materials with consideration for tool self – organization at cutting", (in English), in *Wear*, vol. 206, p. 214, 1997.]
4. **Криони Н. К., Мигранов М. Ш.** Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Издательство «Инновационное машиностроение», 2016. 377 с. [N. K. Krioni, M. Sh. Miganov, *Coatings and lubricants for high temperature friction units*, (in Russian). Moscow: Innovacionnoe mashinostroenie, 2016.]
5. **Vereschaka A. A., Miganov M. S.** Study of wear resistance of sintered powder tool materials // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 871. pp. 159-163. [A. A. Vereschaka, M. S. Miganov, "Study of wear resistance of sintered powder tool materials", (in Russian), in *Advanced Materials Research*, vol. 871, pp. 159-163, 2014.]
6. **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. // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 10, No. 20. pp. 9282-9286. [A. Vereschaka, et. al., "Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds", (in Russian), in *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 20, pp. 9282-9286, 2015.]

ОБ АВТОРАХ

МИГРАНОВ Марс Шарифуллович, проф. зав. каф. ОКММ, 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.

МИГРАНОВ Артур Марсович, асп. каф. ОКММ. Дипл. магистр техники и технологии (РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2017). Иссл. в обл. триботехнических параметров смазочных жидкостей.

РАМАЗАНОВ Камиль Нуруллаевич, директор ИАТМ, проф. каф. технол. машиностроения. Дипл. инженер-технолог производств. (УГАТУ, 2004). Д-р техн. наук по специальности «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» (2016). Иссл. структурно-фазовые превращения и свойства поверхностных слоев сталей при ионном азотировании в тлеющем разряде низкого давления.

ШЕХТМАН Семен Романович, проф. каф. ТМ. Дипл. инженера-механика (УГАТУ, 1993). Д-р техн. наук по порошковой металлургии и композиционным материалам (МАТИ, 2015). Иссл. в области вакуумных ионно-плазменных покрытий.

RAMAZANOV, Kamil Nurulayevich, Director IATM, Prof., Dept. of Mechanical engineering. Dipl. Process engineer (Ufa State Aviation Technical Univ., 2004). Cand. of Tech. Sci. (ISPMS, 2009), Dr. of Tech. Sci. (ISPMS, 2016).

SHEKHTMAN, Semen Romanovich, Prof., Dept. of Mechanical engineering Dipl. Mechanical Engineer (USA-TU, 1993). Dr. Sc. by powder metallurgy and composite materials (MATI 2015) Inst. In the field of vacuum ion-plasma coatings.

METADATA

Title: Wear resistance materials and coatings tool.

Authors M. Sh. Migranov¹, A. M. Migranov², K. N. Ramazanov³, S. R. Shekhtman⁴.

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹ migmars@mail.ru, ² migranov_art_1993@inbox.ru, ³ kamram@rambler.ru, ⁴ shex@inbox.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 2 (84), pp. 44-50, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The experimental studies results of tribotechnical characteristics (strength of adhesive bonds, wear resistance, etc.) of sintered tool materials additionally alloyed with additives and multilayer composite wear-resistant coatings, allowing to significantly improve the performance properties of the cutting tool for blade cutting by forming secondary structures during friction are presented.

Key words: wear-resistant coatings, sintered powder tool materials, tribotechnical characteristics, secondary structures wear, cutting tool.

About authors:

MIGRANOV, Mars Sharifullovich, 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

MIGRANOV, Artur Marsovich, postgraduate student of the sub-department "Bases of the designing of mechanism and machines" USATU. Mag.-ing. (Gubkin University, 2017). Area of research in tribotechnical parameters of lubricating fluids.