

УДК 621.726

Sintered alloy powder alloy cutting tool**Режущий инструмент из спеченных легированных порошковых сплавов**

*M. S. Migranov *, A. M. Migranov, A. S. Gusev, A. F. Sadykov*
*М. Ш. Мигранов *, А. М. Мигранов, А. С. Гусев, 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. К. Маркса, 12

*migmars@mail.ru

ABSTRACT

In work results of a research of features of wear of the cutting tools manufactured by agglomeration of powders on the basis of quick cutting steel are presented. It is shown that the powder tool materials on the basis of quick cutting steel which are in addition alloyed by carbide of the titan have high wear resistance and they can be classified as a new class of the self-organized tool materials. The received results allow to draw a conclusion that it is expedient to carry out an additional alloying by means of the next 2 ways of impact on friction and wear of tools. The first is an alloying by means of connection which allows to reach considerable decrease in level of self-organization as a result of reduction of coefficient of friction at working temperatures. The second way is an alloying which gives the chance to expand a self-organization interval. It is reached by use of connections which cause transformations of structure of secondary structures and increase in coefficient of hardening. Application of both ways is followed by transition to friction with smaller effort and thermal loading that is confirmed by change in wear resistance and tribotechnical characteristics. As have shown researches, wear resistance of such tool is 2 – 3,5 times higher than wear resistance of ordinary tools from quick cutting steel.

KEYWORDS

Wear resistance; self-organization at friction; tool materials; tribotechnical properties; secondary and ion mass spectrometry; Auger-electronic spectroscopy.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследования особенностей износа режущих инструментов, изготовленных путем спекания порошков на основе быстрорежущей стали. Показано, что порошковые инструментальные материалы на основе быстрорежущей стали, дополнительно легированные карбидом титана (карбидосталь), обладают высокой износостойкостью и их можно классифицировать как новый класс самоорганизующихся инструментальных материалов. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что целесообразно осуществлять дополнительное легирование с помощью следующих 2 способов воздействия на трение и износ инструментов. Первый – это легирование с помощью соединения, которое позволяет достичь значительного снижения уровня самоорганизации в результате уменьшения коэффициента трения при рабочих температурах. Второй способ – это легирование, которое дает возможность расширить интервал самоорганизации. Это достигается путем использования соединений, которые вызывают преобразования состава вторичных структур и повышение коэффициента упрочнения. Применение обоих способов сопровождается переходом к трению с меньшим усилием и тепловой нагрузкой, что подтверждается изменением в износостойкости и триботехнических характеристик. Как показали исследования, износостойкость такого инструмента в 2–3,5 раза выше износостойкости обычных инструментов из быстрорежущей стали.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Износостойкость; самоорганизация при трении; инструментальные материалы; триботехнические свойства; вторично-ионная масс-спектрометрия; Оже-электронная спектроскопия.

Введение

Как правило, традиционные инструментальные материалы имеют повышенную твердость. Однако известно [1–7], что износостойкость инструментов в значительной мере определяется свойствами по-

верхности. Тем не менее твердость чаще всего используется как отправная точка при определении принципов для плавления, спекания, легирования инструментальных материалов, и это в какой-то степени закономерно.

В настоящее время лезвийная обработка резанием требует более полного использования последних достижений в трибологии. Термодинамические подходы к анализу контактных явлений при трении и износе в последние годы отражены в трудах по трибологии [8–13]. Трибосистема рассматривается как открытая термодинамическая система и описывается первым и вторым принципами термодинамики. Согласно первому принципу, работа сил трения ($W_{\text{тр}}$) в основном преобразуется в тепло (Q) и частично во внутреннюю энергию материалов трибосистемы (ΔE)

$$W_{\text{тр}} = Q + \Delta E.$$

Процессы разрушения и отделения частиц износа возникают и развиваются в результате увеличения (активации) и уменьшения (пассивации) энергии поверхности. Высвобождение тепла (Q) обуславливает термическую активацию процессов при трении. Величина (ΔE) играет основную роль в контактных процессах в зоне резания, определяет механизм развития новых фаз и структур, контролирует величину и тип их деформации и последующее разрушение. Активация приводит поверхностные слои в неравновесное состояние. Таким образом, за активацией следует пассивация с последующим взаимодействием с окружающей средой и образованием защитных структур.

Согласно второму принципу термодинамики в открытых системах при определенных соотношениях потоков энергии и вещества можно наблюдать процессы упорядочения. Этот процесс соответствует уменьшению энтропии и появлению самоорганизующихся рассеивающихся структур [8, 11, 14, 15]. Это и есть отличие открытых систем от закрытых, где энтропия может только увеличиваться. Термин «структура» в этом случае рассматривается в термодинамическом смысле как вид связи между отдельными частями системы. Для явления самоорганизации характерен принцип экранирования, и состоит он во взаимосвязи процессов разрушения и регенерации (восстановления) в зоне трения. Другими словами, существует динамическое равновесие между процессами активации и пассивации на поверхностных слоях. Когда равновесие нарушается, начинается разрушение материала поверхности. Таким

образом, эффект экранирования при трении препятствует всем видам непосредственного взаимодействия поверхностей трибопары и разрушению основного металла. Контакт трибопары осуществляется с помощью вторичных структур, образующихся в зоне трения. Рассеивание энергии во время трения связано с формированием устойчивых рассеивающих структур на контактной поверхности. Этот процесс можно рассматривать как пример использования самоорганизующихся явлений в технике.

Самоорганизация во время трения сопровождается уменьшением эффективного объема материалов, в которых все виды взаимодействия имеют место, в том числе и локализация взаимодействий в тонких слоях на поверхности. Этот процесс происходит с максимальным расходом энергии, вплоть до разрушения. Одновременно самовосстанавливающиеся тонкие пленки появляются на трущихся поверхностях, и их свойства существенно отличаются [10, 15, 16].

Значение применения этого явления в технике и технологии неоспоримо. Уже в настоящее время можно говорить о перспективных разработках материалов нового поколения. В инструментальном производстве произойдет переход к материалам с программируемыми свойствами самоорганизации. Такие материалы, по прогнозам, будут иметь существенное значение в будущем [5]. Можно предположить, что основную концепцию конструирования трибосопряжений обеспечат самоорганизующиеся износостойкие материалы. Основное отличие таких материалов от традиционных состоит в их активной адаптации к внешним физическим воздействиям. Фазовые и структурные превращения с образованием устойчивых слоев, которые эффективно защищают контактирующие поверхности инструментов, возникают в этих материалах в зоне резания. Эти фазы обладают хорошими термическими свойствами, высокой прочностью и обеспечивают низкие коэффициенты трения. Легирование самоорганизующихся материалов должно способствовать развитию этих явлений. В этом случае появляется возможность направленно воздействовать на трение и способствовать максимальному увеличению износостойкости трибосистемы [17, 18].

Целью данной работы является определение конкретных методов воздействия на трение и износ инструментов при резании на основе явления самоорганизации. Решение этой задачи включает в себя:

1) исследование процессов износа и явления самоорганизации при резании с инструментами, спеченными из порошковых материалов на основе быстрорежущей стали с добавлением карбида титана;

2) анализ дополнительного легирующего воздействия на состав, структуру и свойства вторичных структур при резании инструментами, изготовленными из рассматриваемых материалов.

В статье приведены результаты, полученные при исследовании первой части поставленной задачи. На основании решения задачи в целом предпринята попытка выявить легирующие присадки для самоорганизующихся материалов, используемых в инструментальном производстве.

1. Экспериментальные исследования

В данной работе исследовались износостойкость и триботехнические характеристики при изменении состава и атомной структуры поверхностного слоя материала во время обработки (резания). В качестве исследуемых материалов были выбраны: быстрорежущие стали (P6M5, P12M3Ф2K5) и порошковые спеченные сплавы на основе быстрорежущих кобальтовых сталей с добавлением 20% карбида титана. Их состав и свойства приведены

в табл. 1. Технология производства спеченных порошковых материалов включает в себя смешивание порошковых материалов, их спекание и горячую штамповку выдавливанием.

Исследования износостойкости проводились при обработке точением углеродистой стали, содержащей 0,45 массы С (сталь 45) четырехгранными быстросменными инструментальными пластинами (с размерами 12×12 мм) при различных режимах обработки. Триботехнические свойства исследуемых трибопар были определены с помощью адгезиомера, конструкция которого описана в работе [19]. Для этого индентор из исследуемого инструментального материала сжимался двумя отполированными образцами, изготовленными из обрабатываемой стали 45 (твердостью HRC 30 или HB 180, см. рис. 1). Чтобы смоделировать рабочие условия трения, поверхность образцов нагревали электроконтактным методом. Температура во время испытаний изменялась в диапазоне от 150 до 500 °С. Стандартные нагрузки доходили до 2400 Н, тем самым обеспечивая пластическую деформацию на контакте. В качестве критерия износостойкости использовали адгезионную составляющую коэффициента трения, ответственную за интенсивность износа при резании с быстрорежущей сталью. Этот параметр был определен как отношение прочности адгезионных связей на срез (τ_n) к нормальным напряжениям (P_n), действующим на поверхности сферы индентора при соответствующей температуре.

Таблица 1
Table 1

Химический состав исследуемых инструментальных материалов

The chemical composition of the studied tool materials

Материал	ГОСТ	AISI	Химический состав, %						
			C	W	Mo	Cr	V	Co	Ti
P6M5	19265-73	M2	0.8–0.88	5.0–5.5	5.0–5.5	3.8–4.2	1.7–2.1	–	–
P12M3Ф2K5	–	~T15	1.05–1.15	11.5–12.5	2.5–3.0	3.9–4.3	1.8–2.3	5.0–5.5	–
Карбидосталь Carbide steel	–	–	4.5–5.0	4.8–5.8	3.8–4.3	3.0–7.5	1.3–1.8	3.8–4.3	15.0–17.0

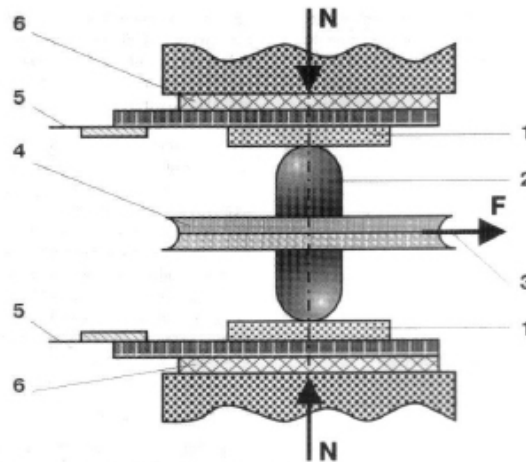


Рис. 1. Модель установки для исследования триботехнических свойств: 1 – отполированные образцы из обрабатываемого материала; 2 – индентор; 3 – тросик, обеспечивающий вращение индентора; 4 – специальный диск; 5 – медные пластины; 6 – изоляторы

Fig. 1. Installation model for a research of tribotechnical properties: 1 – polished samples from the processed material; 2 – indenter; 3 – the rope providing indenter rotation; 4 – special disk; 5 – copper plates; 6 – insulators

Согласно работе [19], предполагалось, что при взаимодействии двух твердых тел (особенно при высоких температуре и давлении) 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 $\tau_{\text{н}}$ 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 $\tau_{\text{н}}$.

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 квадратного типа.

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

Оже-спектры были зарегистрированы в режиме CRR = 4 при скорости в 2,1 эВ/с, с первичной электронной энергией $E = 5000$ эВ и при вакууме порядка 2×10^{-8} Па. При проведении спектроскопии массы ионный луч аргона диаметром 0,5 мм был зафиксирован на участке мишени (заданной точке) при ускоряющем напряжении в 5,0 кэВ и давлении аргона в 2×10^{-5} Па. При заданном режиме скорость травления не превышала 1 монослоя в минуту. Анализ был сделан в режиме, приближенном к статическому.

2. Полученные результаты и их обсуждение

Результаты исследований показали, что порошковые сплавы на основе быстрорежущей стали, легированные карбидом титана, принадлежат к самоорганизующимся материалам [15, 16]. На рис. 2, *a* показано распределение фаз с различной твердостью в структуре спекаемых порошковых материалов на основе быстрорежущей стали. Фото снимок отполированного косо́го шлифа был получен на сканирующем электронном микроскопе в режиме вторичной электронной эмиссии. Контрасты, появившиеся на электронном изображении, связаны с различием химического состава в некоторых микрозонах образца, а именно: содержанием элементов легкого и тяжелого веса (так называемого контраста по атомному числу). Темные угловатые частицы больших размеров титанового карбида (менее 20 мкм в поперечном сечении), а также рассеянные сферические вольфрамовые и молибденовые карбиды (менее 0,2–1,0 мкм в диаметре) в структуре матрицы, мелкие частицы на основе быстрорежущей стали равномерно распределены по всему объему.

Как следует из рентгеновского спектрального анализа, в образцах наблюдается значительная неоднородность в распределении легких элементов, таких как С и N. На рис. 2, *б–г* представлено изменение в интенсивности характерной $K\alpha$ эмиссии Ti, С и N во время прохождения луча над областью образца, представленного на рис. 2, *a*. Было обнаружено, что содержание углерода в титановых, вольфрамовых и молибденовых карбидах в матрице выше, чем в твердом растворе. Азот содержится в основном в матрице быстрорежущей стали. Его наличие, вероятно, связано с растворением при напылении порошком из быстрорежущей стали в азотной среде (как это делалось на первых стадиях производства этого инструментального материала).

Результаты испытаний на износостойкость приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что износ инструментов по задней поверхности из обычных быстрорежущих сталей значительно (в 2,0–3,5 раза) больше износа инструмента из спеченного порошкового материала. Такие результаты получились в основном за счет снижения интенсивности изнашивания и расширения зоны нормального износа.

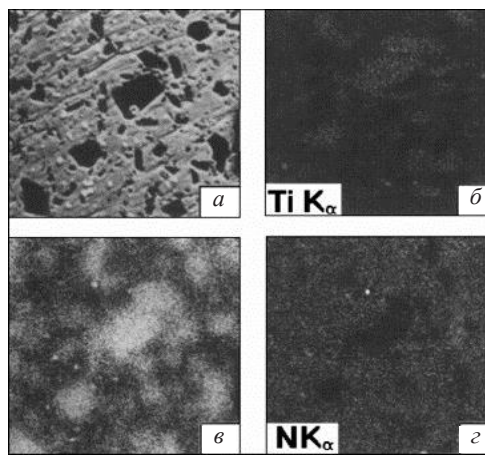


Рис. 2. Микроструктура спеченного порошкового материала на основе быстрорежущей стали с добавлением 20 % карбида титана (кратность увеличения $\times 750$): *a* – вид поверхности во вторичных электронах; *б* – вид поверхности эмиссии Ti $K\alpha$; *в* – вид поверхности эмиссии C $K\alpha$; *г* – вид поверхности эмиссии N $K\alpha$

Fig. 2. Microstructure of the baked powder material on the basis of quick cutting steel with addition of 20 % of carbide of the titan (frequency rate of increase $\times 750$): *a* – a type of a surface in secondary electrons; *б* – a type of a surface of issue of Ti $K\alpha$; *в* – a type of a surface of issue C $K\alpha$; *г* – a type of a surface of issue of N $K\alpha$

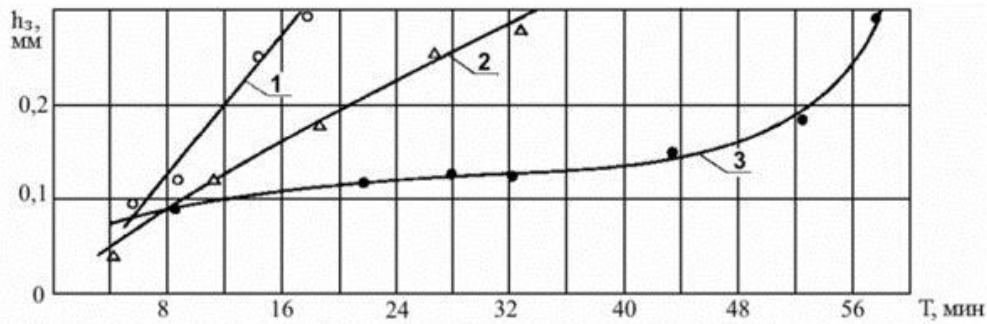


Рис. 3. Зависимость износа по задней поверхности (h_3) от периода стойкости инструмента (T) при точении стали 45:
1 – P6M5; 2 – P12M3Φ2K5; 3 – P6M5 + 20 % TiC

Fig. 3. Dependence of wear on back surface (h_3) from the period (T) of tool's firmness while turning steel 45:
1 – P6M5; 2 – P12M3Φ2K5; 3 – P6M5 + 20 % TiC

В зоне нормального износа уровень интенсивности изнашивания инструмента из спеченного порошкового материала гораздо ниже, чем для быстрорежущей стали (рис. 3, кривая 3). Электронная микроскопия поверхности образцов, изготовленных из различных материалов, не показала качественных изменений в механизме износа. Резание с наростообразованием типично для инструментов из всех исследуемых материалов, причем наростообразование достаточно стабильное во всех случаях. Хотя величины твердости и теплостойкости быстрорежущей стали P12M3Φ2K5 и спеченного порошкового материала (карбидосталь) довольно близки, износостойкость последнего значительно выше. Различие в интенсивности изнашивания можно объяснить процессами на поверхности инструмента. По нашему мнению, более низкая интенсивность износа инструментов из спеченных порошковых материалов может быть связана с присутствием карбида титана в их структуре и в значительной степени с образованием соединений, содержащих кислород (кислородсодержащих соединений) при резании.

Действительно, при исследовании методом электронной микроскопии (STMS) в фазовом составе поверхности инструмента и в лунке под индентором было обнаружено образование кислородсодержащих фаз. Данные, приведенные на рис. 4, а, показывают, что преобразование карбида титана в кислородсодержащую фазу происходит уже на начальной стадии износа (в зоне приработочного износа). В процессе дальнейшего резания увеличивается образование окиси титана на контактных поверхностях (рис. 4, б, в). Этот процесс сопровождается стабилизацией интенсивности износа (рис. 3, 4, б, в) с уменьшением его величины и расширением зоны нормального износа. Очевидно, это определяется явлением самоорганизации, которое связано с возникновением при трении вторичных структур в виде титан-кислородсодержащих соединений, играющих роль твердой смазки и устойчивых при резании [20]. Как показали результаты исследования, тонкие поверхностные пленки типа TiO эффективно защищают поверхностный слой от дальнейшего износа и стабилизируют процесс износа.

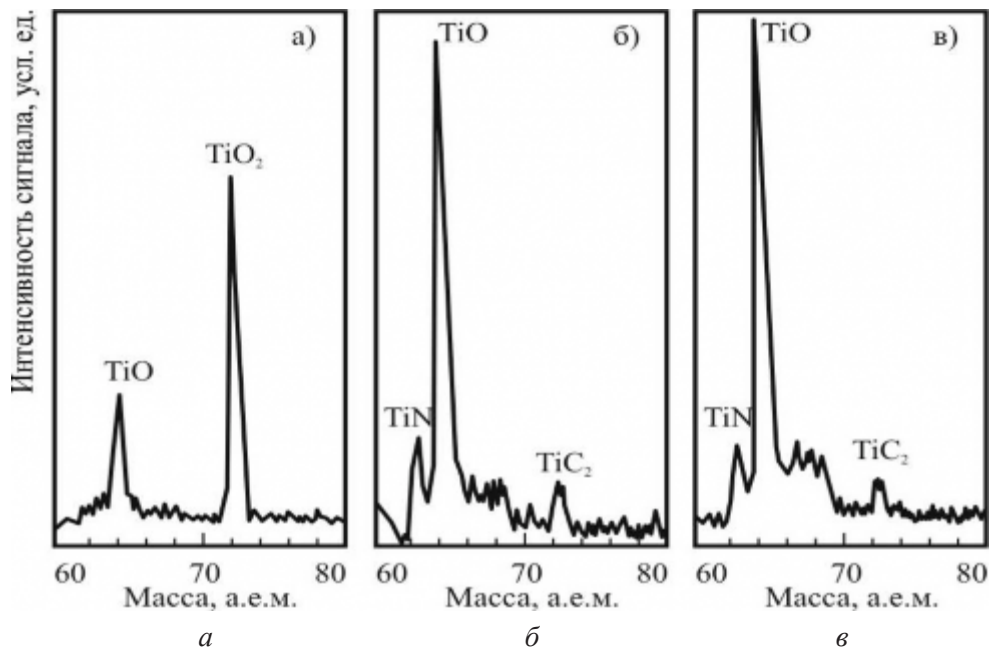


Рис. 4. Спектры вторичной массы поверхности инструмента из спеченного порошкового материала в зависимости от времени резания: *а* – через 4 мин; *б* – через 20 мин; *в* – через 24 мин

Fig. 4. Ranges of secondary mass of a surface of the tool from the baked powder material depending on cutting time: *a* – in 4 min; *b* – in 20 min; *c* – in 24 min

На явления структурной самоорганизации поверхностного слоя указывают и результаты исследования подповерхностных слоев обрабатываемого материала. Данные, полученные с помощью ОЭС/AES, показывают, что с увеличением времени резания содержание кислорода на поверхности контакта с резцом понижается. В то же время содержание углерода и азота увеличивается. Это отчетливо проявляется в изменениях интенсивности характерных KLL-линий O, N и C на оже-спектрах. При сканировании ОЭС/AES косых шлифов была исследована природа химической микронеоднородности наростов (налипов) и пленок, образовавшихся на режущем инструменте. На рис. 4 представлено распределение интенсивности характерных оже-KLL-линий для O, N, C и LMM-линий из Ti при прохождении электронного луча над поверхностью косо шлифа. Проходящий луч пересекает наросты (из стали 40, точка на координате 0) и приповерхностные пленки, образовавшиеся на режущем инструменте (точка на координатах 0–1,4 мкм). Наблюдаемые изменения в химическом составе приповерхностного слоя инструмента связаны с тем фактом, что при высоких температурах (свыше 450 °C) карбид титана метастабилен (неустойчив) и имеет

тенденцию к разрушению. Вследствие ярко выраженного химического родства с кислородом титан поглощает его из окружающей среды и образует тонкие пленки из кислородсодержащих соединений, при этом углерод наряду с азотом диффундируют из поверхности режущего инструмента в стружку.

Вышеуказанные данные подтверждаются результатами триботехнических испытаний инденторов, изготовленных из быстрорежущей стали и спеченных порошковых материалов. Результаты испытаний, приведенные на рис. 5, показывают, что по мере повышения температуры фрикционные параметры контакта «инструмент – деталь» изменяются не монотонно.

В диапазоне температур 150–400 °C увеличение параметров фрикционного контакта связано с интенсификацией адгезионного взаимодействия на контактных поверхностях. Кривые для быстрорежущей стали и для спеченных порошковых материалов подобны друг другу. Однако, если при температурах до 200 °C величины фрикционных параметров практически одинаковы для всех исследуемых материалов, то при более высоких температурах разница между ними начинает увеличиваться.

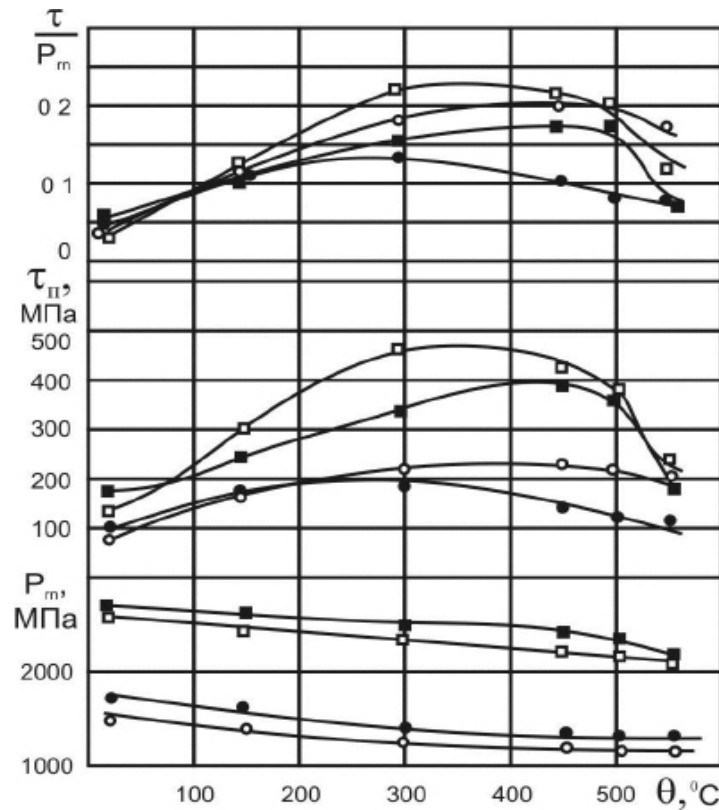


Рис. 5. Влияние температуры (θ) на триботехнические свойства материалов (τ/P_m – адгезионная составляющая коэффициента трения; τ_{π} – тангенциальная прочность адгезионных связей; P_m – среднее нормальное напряжение):
 ● ■ – P6M5 + 20%TiC; ○ ● – Сталь 45 (HB 180...200); ○ □ – P6M5;
 □ ■ – Сталь 45 (HRC 30..32)

Fig. 5. Influence of temperature on tribotechnical properties of materials (τ/P_m – an adhesive component of coefficient of friction; τ_{π} – tangential durability of adhesive communications; P_m – average normal tension)
 ● ■ – P6M5 + 20 %TiC; ○ ● – Steel 45 (HB 180...200); ○ □ – P6M5;
 □ ■ – Steel 45 (HRC 30..32)

При температуре около 300 °C схватывание (адгезия) на фрикционной контактной поверхности максимальное. Но фрикционные параметры у спеченных порошковых материалов значительно ниже, чем у обычных быстрорежущих сталей. Это явление, несомненно, связано с окисляемостью карбида титана и с образованием кислородсодержащих соединений на поверхности. Различие фрикционных параметров у быстрорежущей стали и у спеченных порошковых материалов максимально при температурах, приближающихся к температурам (550–600 °C) работы инструмента при обработке резанием. Это предопределяет высокие эксплуатационные свойства инструментов из спеченных порошковых материалов (рис. 3).

Таким образом, полученные результаты показывают, что легирование спеченной порошковой быстрорежущей стали карбидом

титана TiC значительно влияет на износостойкость инструмента, особенно если в процессе резания происходит интенсивное преобразование этих соединений в устойчивые кислородсодержащие фазы, которые эффективно защищают контактные поверхности от схватывания (адгезии) при резании, что может широко использоваться в металлообработке материалов с высокой износостойкостью (коронитов, карбидосталей и т.д.).

Вышеупомянутые результаты дают возможность сформулировать требования к составу инструментальных материалов с высоким уровнем самоорганизации. Они должны включать в себя базовую фазу (карбид титана TiC), предусматривающую высокие физико-механические свойства. В процессе трения фаза преобразуется так, что вследствие самоорганизации на поверхности будут образовываться прочные (устойчивые) кисло-

родсодержащие фазы в виде тонкой пленки, эффективно защищающие подложку от внешних воздействий при трении. Выявленный принцип можно реализовать разными способами. Однако предложенный способ, по нашему мнению, в некотором роде носит универсальный характер.

Выводы

Показано, что спеченные порошковые материалы на основе быстрорежущей стали, дополнительно легированные карбидом титана (карбидосталь), имеют высокую износостойкость и могут рассматриваться как новый класс самоорганизующихся инструментальных материалов. К таковым можно, в частности, отнести совместно спеченные и прессованные порошки карбида титана в качестве основы и быстрорежущую сталь в качестве связующего вещества. Самоорганизация таких материалов проявляется в их способности образовывать устойчивые высокопрочные вторичные структуры, которые эффективно защищают поверхность инструмента от внешних воздействий при резании.

В процессе резания наблюдается преобразование карбидной фазы в устойчивые вторичные структуры, имеющие форму соединений из титана и кислорода. Это значительно улучшает фрикционные свойства при рабочих температурах и, как следствие, повышает износостойкость режущего инструмента. В результате износостойкость такого инструмента в 2,0–3,5 раза выше износостойкости инструмента из быстрорежущих сталей.

Список литературы

1. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. 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. 1–2. P. 214–220. (1997). DOI: 10.1016/S0043-1648(96)07516-3.
3. Mashkov Yu. K., Mamaev O. A., Surikov V. I. Structural and energy self-organization in the synthesis of friction of composites based on polytetrafluoroethylene // *Friction and wear*. 2002. V. 23, No. 6. P. 661–666. (2002).
4. Maier J., Prill S., Reichert B. Space charge effects in polycrystalline, micropolycrystal-

line and thin film samples Application to AgCl and AgBr. // *Solid state ionics*. 1988. V. 28–30. P. 1465–1469.

5. Ovchinnikov S., Koval V. N., Ryabchikov A. Thermal Stability of Nanostructured Superhard Coatings on the Basis of TiN // 9 Inter. Conference on Modification on Materials with Particles Beams and Plasma Flows. Tomsk, Russia. 2008. P. 472–478.

6. Stadnichenko V. N. Classification of nanosized types by the value of the dissipation coefficient of the supplied energy to the tribosystem. // *Collection of scientific works of HUPS*. 2010. V. 1, No. 27. P. 51–61.

7. Stadnichenko V. N., Troshin O. N. The synergistic concept of self-organization in tribological systems in the management of heat fluxes // *Bulletin: proceedings of scientific papers*. 2007. No. 17. P. 49–62.

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

9. Mitterer C., Mayrhofer P. H., Musil J. Thermal stability of PVD hard coatings // *Vacuum*. 2005. V. 71, No. 1-2. P. 279–284.

10. Ultra Rapid Sintering / D. I. Johnson et. al. // *Sintering and Heterogeneous Catalysis*. 1984. P. 243–252.

11. Baranov A. V. Self-Organization of tribosystems at the boundary friction of metals // *Polzunovskii Herald*. 2009. No. 1–2. P. 155–158. (2009).

12. Pogodaev L. I. Structural and energy models of behavior (reliability) of materials under pulsed loading // *Friction, wear, lubrication*. 2013. V. 15, No. 57.

13. 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.

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. // *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10, No. 20. P. 9282–9286.

15. 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. P. 1471–1482.

16. 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.

17. Кабалдин Ю. Г. Самоорганизация и нелинейная динамика в процессах трения и изнашивания инструмента. Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2003. 236 с.

18. Zgalat-Lozinsky O. B., Ragulya A. V., Dub N. V. Properties of nanocrystalline materials based on titanium nitride // Nanostructured materials science. 2010. No. 1. P. 30–38.

19. Мигранов М. Ш., Шустер Л. Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.

20. Polzer G., Ebileng V., Firkovsky A. External friction of solids, dissipative structures and self-organization // Friction and wear. 1988. V. 9, No. 1. P. 9.