

УДК 621.726

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, ПОЛУЧЕННОГО ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИЕЙ

*Мигранов М.Ш., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Основы конструирования механизмов и машин» ([migmars@mail.ru](mailto:migmars@mail.ru))*

*Минигалеев С.М., к.т.н., доцент кафедры «Основы конструирования механизмов и машин»*  
*Шехтман С.Р., д.т.н., профессор кафедры «Технологии машиностроения»*

Уфимский государственный авиационный технический университет  
(450000, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. К. Маркса, 12)

**Аннотация.** Для обеспечения наименьших затрат на изготовление деталей с заданными эксплуатационными свойствами в условиях современного машиностроительного производства необходимо оптимизировать процессы механической обработки, где более 70 % занимает лезвийная обработка резанием. Эту проблему можно решить путем разработки и применения современных инструментальных материалов, обладающих уникальными свойствами. Анализ технологических особенностей изготовления деталей в машиностроении, в частности деталей силовой части газотурбинных двигателей, показал необходимость повышения качества обработанной поверхности этих деталей и эффективности использования современного дорогостоящего оборудования, оснащенного системами числового программного управления и адаптивными системами управления, обеспечивающего широкий диапазон изменения элементов режима резания, вплоть до высокоскоростного. Для выпуска конкурентоспособной продукции как на внутреннем рынке, так и за его пределами, необходимо проведение комплекса мероприятий по оптимизации лезвийной обработки резанием, где наиболее слабым звеном технологической цепочки является режущий инструмент, что отрицательно влияет как на производительность, так и на качество обработанных деталей. В работе 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 о целесообразности проведения дополнительного легирования с помощью следующих двух 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 расширять интервал самоорганизации. Применение обоих способов сопровождается переходом к трению с меньшим усилием и тепловой нагрузкой, что подтверждается изменением в износостойкости и триботехнических характеристиках. 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.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-11-883-890

Как правило, традиционные инструментальные материалы имеют повышенную твердость. Однако известно [1 – 7], что износостойкость инструментов в значительной мере определяется свойствами поверхности. 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 ( $W_{тр}$ ) в основном преобразу-

ется в тепло ( $Q$ ) и частично во внутреннюю энергию материалов трибосистемы ( $\Delta E$ )

$$W_{тр} = Q + \Delta E.$$

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  $\Delta E$  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 процесс 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, который состоит 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 представлять большой интерес 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:

- исследование процессов износа и явления самоорганизации при резании с инструментами, спеченными из порошковых материалов на основе быстрорежущей стали с добавлением карбида титана;
- анализ дополнительного легирующего воздействия на состав, структуру и свойства вторичных структур при резании инструментами, изготовленными из рассматриваемых материалов.

В работе 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.

В данном исследовании рассматривались 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

Таблица 1

**Химический состав исследуемых инструментальных материалов**

*Table 1. Chemical composition of the studied tool materials*

| Материал     | ГОСТ     | AISI | Химический состав, % |             |           |           |           |           |             |
|--------------|----------|------|----------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
|              |          |      | C                    | W           | Mo        | Cr        | V         | Co        | Ti          |
| P6M5         | 19265-73 | M2   | 0,80 – 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 | –        | –    | 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 |

смешивание порошковых материалов, их спекание и горячую штамповку выдавливанием.

Исследования износостойкости проводились при обработке точением углеродистой стали, содержащей 0,45 % (по массе) С (сталь 45) четырехгранными быстросменными инструментальными пластинами размером 12×12 мм. Режимы резания приведены ниже:

| Обрабатываемый материал | НВ        | Скорость резания, м/мин | Глубина, мм | Подача, мм/об |
|-------------------------|-----------|-------------------------|-------------|---------------|
| Сталь 45                | 180 – 200 | 70 – 55                 | 0,5         | 0,28          |

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 НВ 180 (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

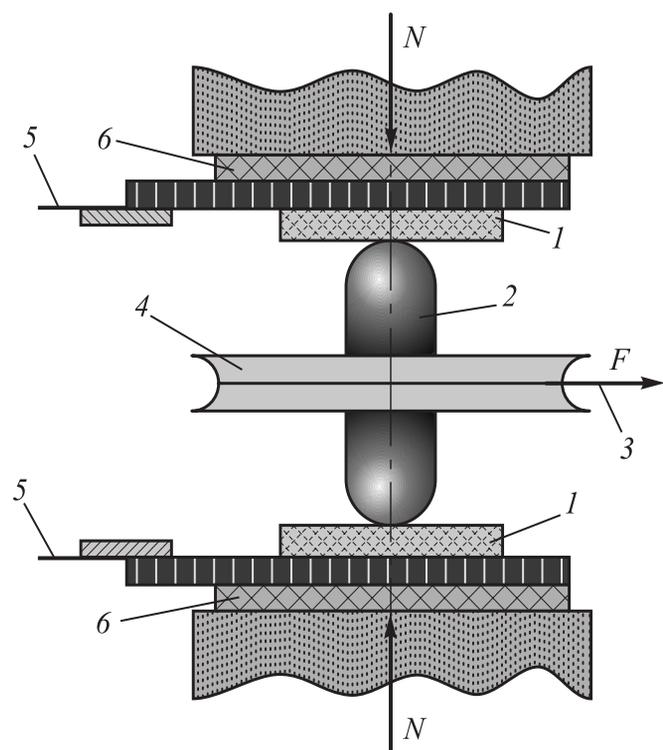


Рис. 1. Модель установки для исследования триботехнических свойств:

- 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

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 быстрорежущей сталью. Этот параметр был определен как отношение прочности адгезионных связей на срез ( $\tau_{\text{п}}$ ) к нормальным напряжениям ( $P_{\text{н}}$ ), действующим на поверхности сферы индентора при соответствующей температуре.

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 как в жидком, так и в твердом состоянии. Расчетная величина  $\tau_{\text{п}}$  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  $\tau_{\text{п}}$ .

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 квадроугольного 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 обезжировались, затем помещались во внутрь подготовительной камеры спектрометра и подвергались пятиминутному травлению в среде ионов аргона. Травление осуществлялось под давлением газа в  $10^{-4}$  Па, со скоростью порядка 20 монослоев в минуту. Такая подготовка образцов исключила воздействие случайного загрязнения на результаты анализа. Поверхность образцов была исследована на различных глубинах либо с помощью стационарного электрона и ионных лучей, либо сканированием 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  $2 \cdot 10^{-8}$  Па. При проведении масс-спектропии 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  $2 \cdot 10^{-5}$  Па. При заданном режиме скорость травления не превышала 1 монослой в минуту. Анализ был сделан в режиме, приближенном к статическому.

Результаты исследований показали, что порошковые сплавы на основе быстрорежущей стали, легированные карбидом титана, принадлежат к самоорганизующимся материалам [15, 16]. На рис. 2, а показано распределение фаз с различной твердостью в структуре спекаемых порошковых материалов на основе быстрорежущей стали. Фотоснимок отполированного косого шлифа был получен на сканирующем электронном микроскопе в режиме вторичной электронной эмиссии. Контрасты, появившиеся на электронном изображении, связаны с различием химического состава в некоторых микрочастицах образца, а именно содержанием элементов легкого и тяжелого веса (так называемого контраста по атомному числу). Темные угловые 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) равномерно распределены по всему объему.

Как следует из рентгеновского спектрального анализа, в образцах наблюдается значительная неоднород-

ность 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, а. Определено, 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. 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.

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 Р12М3Ф2К5 и спеченного порошкового материала (карбидосталь) довольно близки (табл. 2), износостойкость последнего значительно выше. Различие в интенсивности изнашивания можно объяснить процессами на поверхности инструмента. По мнению авторов, более низкая интенсивность износа инструментов из спеченных порошковых материалов может быть связана с присутствием карбида титана в

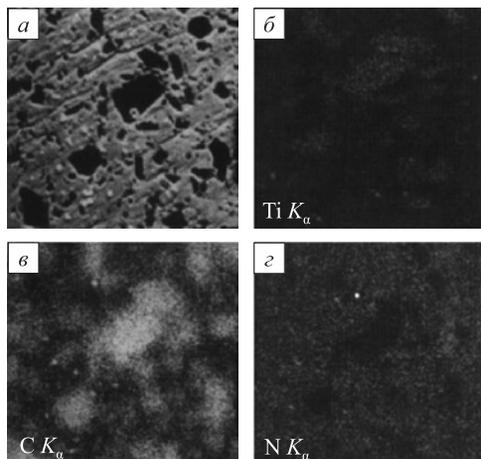


Рис. 2. Микроструктура спеченного порошкового материала на основе быстрорежущей стали с добавлением 20 % карбида титана,  $\times 750$ :

а – 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 titan carbide ( $\times 750$ ):

а – view of the surface in secondary electrons; б – view of emission surface  $Ti K_{\alpha}$ ; в – view of emission surface  $C K_{\alpha}$ ; г – view of emission surface  $N K_{\alpha}$

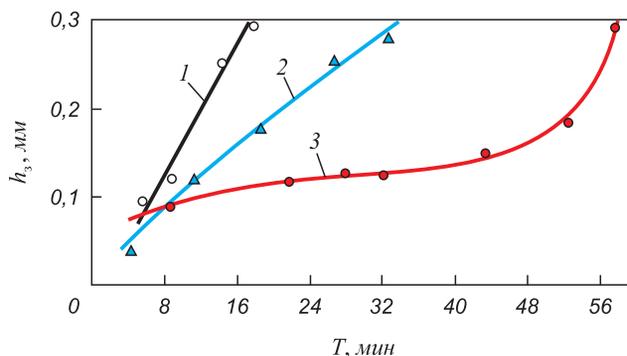


Рис. 3. Зависимость износа по задней поверхности ( $h_3$ ) от периода стойкости инструмента ( $T$ ) при точении стали 45: 1 – Р6М5; 2 – Р12М3Ф2К5; 3 – Р6М5 + 20 % TiC

Fig. 3. Dependence of wear on back surface ( $h_3$ ) on the period ( $T$ ) of tool's firmness while turning steel 45: 1 – R6M5; 2 – R12M3F2K5; 3 – R6M5 + 20 % TiC

## Свойства исследуемых материалов

Table 2. Properties of the studied materials

| Материал     | Режим спекания                |                             |                               | Физико-механические свойства |                                      |                    |
|--------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
|              | температура затвердевания, °С | температура прессования, °С | твердость после спекания, HRC | прочность, МПа               | теплопроводность, кДж/м <sup>2</sup> | термостойкость, °С |
| P6M5         | 1220                          | 560                         | 63 – 65                       | 3200                         | 400                                  | 610                |
| P12M3Ф2К5    | 1240                          | 560                         | 67 – 68                       | 2400                         | 220                                  | 645                |
| Карбидосталь | 1210                          | 560                         | 69 – 70                       | 2000                         | 80                                   | 655                |

их структуре и в значительной степени с образованием соединений, содержащих кислород 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 данный процесс.

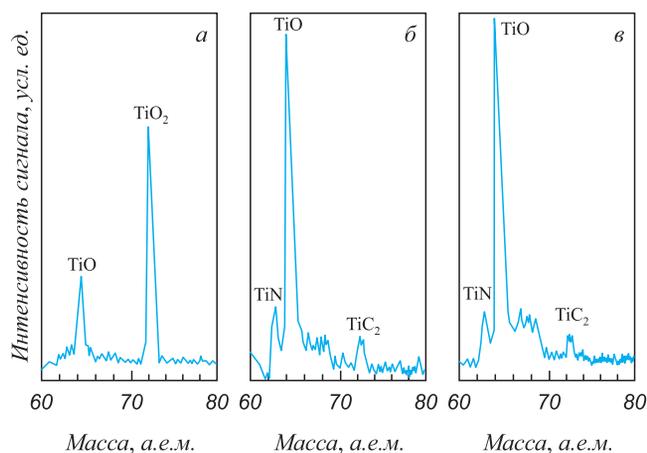


Рис. 4. Спектры вторичной массы поверхности инструмента из спекленного порошкового материала в зависимости от времени резания: а – через 4 мин; б – через 20 мин; в – через 24 мин

Fig. 4. Spectrums of secondary mass of tool surface from the baked powder material depending on cutting time: а – in 4 min; б – in 20 min; в – in 24 min

На явления структурной самоорганизации поверхностного слоя указывают и результаты исследования подповерхностных слоев обрабатываемого материала. Данные, полученные с помощью ОЭС/AES и представленные на [рис. 5](#), показывают, что с увеличением времени резания содержание кислорода на поверх-

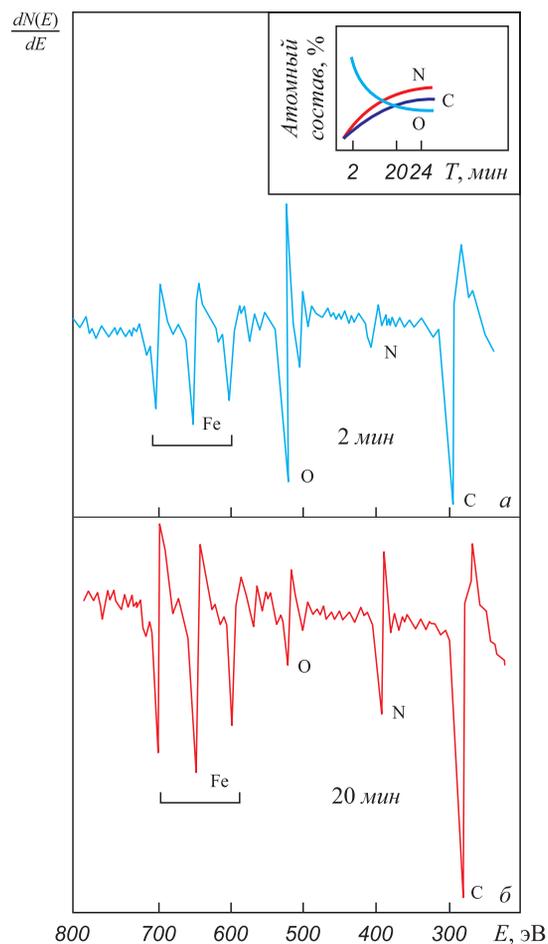


Рис. 5. Зависимости интенсивностей оже-спектров поверхности ( $\frac{dN(E)}{dE}$ ) обрабатываемого материала от энергии сканирования ( $E$ ): а – после 2 мин резания; б – после 20 мин резания

Fig. 5. Dependences of intensities of surface Auger spectrums ( $\frac{dN(E)}{dE}$ ) of the processed material on scanning energy ( $E$ ): а – after 2 minutes of cutting; б – after 20 minutes of cutting

ности 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 (рис. 5, а, б).

При сканировании ОЭС/AES косых шлифов была исследована природа химической микронеоднородности наростов (налипов) и пленок, образовавшихся на режущем инструменте. На рис. 6 представлено распределение интенсивности характерных оже-KLL-линий для O, N, C и LMM-линий из Ti при прохождении электронного луча над поверхностью косого 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 °С) 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 (рис. 6).

Диффузия этих элементов имеет место при высоких температурах и напряжениях в зоне резания. Представленные результаты соответствуют данным, полученным ранее при исследовании изменений в химическом составе поверхности инструмента с покрытием из нитрида титана TiN (ФОП/PVD).

Вышеуказанные данные подтверждаются результатами триботехнических испытаний инденторов, изготовленных из быстрорежущей стали и спеченных порошковых материалов. Результаты испытаний, приведенные на рис. 7, показывают, что по мере повыше-

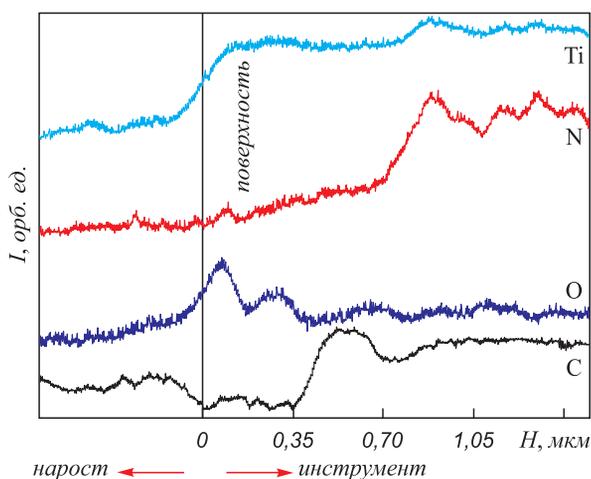


Рис. 6. Распределение химических элементов по орбитальным единицам ( $I$ ) в зависимости от глубины ( $H$ ) в контактной зоне

Fig. 6. Distribution of chemical elements on orbital units ( $I$ ) depending on the depth ( $H$ ) in contact zone

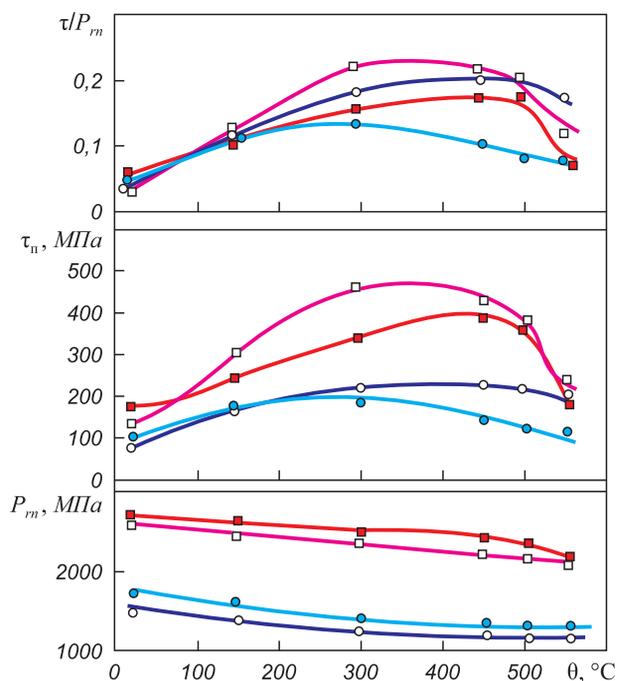


Рис. 7. Влияние температуры ( $\theta$ ) на триботехнические свойства материалов

( $\tau/P_m$  – адгезионная составляющая коэффициента трения;  
 $\tau_n$  – тангенциальная прочность адгезионных связей;  
 $P_m$  – среднее нормальное напряжение;  
 ● ■ – P6M5 + 20 % TiC; ○ ● – Сталь 45 (HB 180 – 200);  
 ○ □ – P6M5; □ ■ – Сталь 45 (HRC 30 – 32)

Fig. 7. Influence of temperature ( $\theta$ ) on tribotechnical properties of materials

( $\tau/P_m$  – adhesive component of friction coefficient;  
 $\tau_n$  – tangential durability of adhesive communications;  
 $P_m$  – average normal tension)  
 ● ■ – P6M5 + 20 %TiC; ○ ● – Steel 45 (HB 180 – 200);  
 ○ □ – P6M5; □ ■ – Steel 45 (HRC 30 – 32)

ния температуры фрикционные параметры контакта «инструмент – деталь» изменяются немонотонно.

В диапазоне температур 150 – 400 °С 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 °С величины фрикционных параметров практически одинаковы для всех исследуемых материалов, то при более высоких температурах разница между ними начинает увеличиваться.

При температуре около 300 °С 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 образованием кислородсодержащих соединений на поверхности. Различие фрикционных параметров у быстрорежущей стали и у спеченных порошковых материалов макси-

мально при температурах, приближающихся к температурам работы инструмента при обработке резанием (550 – 600 °С). Это предопределяет высокие эксплуатационные свойства инструментов из спеченных порошковых материалов (см. [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 др.).

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) кислородсодержащие фазы в виде тонкой пленки, эффективно защищающие подложку от внешних воздействий при трении. Выявленный принцип можно реализовать разными способами. Однако предложенный способ, по мнению авторов, 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.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
3. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
4. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Metallurgy, 1983. – 528 с.
5. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.
6. Захарченко И.П. Эффективность обработки инструмента сверхтвердыми материалами. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
7. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
8. Бершадский Л.И. Самоорганизация и надежность трибосистем. – Киев: Знание, 1981. – 35 с.
9. Бершадский Л.И. Структурная термодинамика трибосистем. – Киев: Знание, 1990. – 31 с.
10. Гершман И.С., Буше Н.А. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах // Трение и износ. 1995. Т. 16. № 1. С. 61 – 70.
11. Кабалдин Ю.Г. Самоорганизация и нелинейная динамика в процессах трения и изнашивания инструмента. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2003. – 236 с.
12. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. – Л.: Машиностроение. Лен. отд-ние, 1990. – 208 с.
13. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. – М.: Машиностроение, 2005. – 202 с.
14. Польцер Г., Эбиленг В., Фирковский А. Внешнее трение твердых тел, диссипативные структуры и самоорганизация // Трение и износ. 1988. Т. 9. № 1. С. 12.
15. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S. etc. Characteristic features of alloying HSS – based deformed compound powder materials with consideration for tool self – organization at cutting. Part. I. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting // Wear. 1997. Vol. 206. Issue 1. P. 214 – 220.
16. Мигранов М.Ш. Повышение износостойкости инструментов на основе интенсификации процессов адаптации поверхностей трения при резании металлов. – Уфа: Изд-во «Гилем АН РБ», 2001. – 229 с.
17. Креймер Г.С. Прочность твердых сплавов. – М.: Metallurgy, 1971. – 247 с.
18. Постнов В.В., Шолом В.Ю., Шустер Л.Ш. Методы и результаты оценки контактного взаимодействия применительно к процессам металлообработки. – М.: Машиностроение, 2004. – 103 с.
19. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. – Уфа: Гилем, 1999. – 199 с.
20. Криони Н.К., Мигранов М.Ш. Покрyтия и смазки для высокотемпературных трибосопрежений. – М.: Изд-во «Инновационное машиностроение», 2016. – 327 с.

Поступила 29 декабря 2016 г.

## RESEARCH OF PROPERTIES OF THE CUTTING TOOL RECEIVED BY POWDER METALLURGY

**M.Sh. Migranov, S.M. Minigaleev, S.R. Shekhtman**

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

**Abstract.** For providing the smallest costs of details production with the set operational properties in the conditions of modern machine-building production it is necessary to optimize machining processes where more than 70 % are occupied by processing with cutting. This problem can be solved by development and use of the modern tool materials with unique properties. The analysis of technological features of production of details in mechanical engineering, in particular power parts of gas-turbine engines, has shown the need to improve the quality of the machined surface of these parts and the efficiency of using modern, expensive equipment with numerical control systems and adaptive control systems providing a wide range of elements of the cutting regime, up to high-speed. To produce competitive products both on the domestic market and outside it, it is necessary to carry out a set of measures to optimize blade cutting, where the cutting tool is the weakest link in the process chain, which adversely affects both productivity and quality of the processed details. The work presents research results of wear features of the cutting tools manufactured by sintering of powders on the basis of quick-speed steel. It is shown that the powder tool materials on the basis of this steel additionally alloyed by titan carbide have high wear resistance and 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 two ways of impact: friction and wear. 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 friction coefficient 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 secondary structures and increase of hardening coefficient. 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. The researches have shown that wear resistance of such tool is 2 – 3.5 times higher than wear resistance of ordinary tools from quick-speed steel.

**Keywords:** wear resistance, self-organization at friction, tool materials, tribotechnical properties, secondary and ion mass spectrometry, Auger-electronic spectroscopy.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-11-883-890

### REFERENCES

- Vereshchaka A.S. *Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostoikimi pokrytiyami* [Operability of the cutting tool with wear-proof coverings]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 336 p. (In Russ.).
- Loladze T.N. *Prochnost' i iznosostoikost' rezhushchego instrumenta* [Durability and wear resistance of the cutting tool]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 320 p. (In Russ.).
- Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 278 p. (In Russ.).
- Geller Yu.A. *Instrumental'nye stali* [Tool steels]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 528 p. (In Russ.).
- Ostaf'ev V.A. *Raschet dinamicheskoi prochnosti rezhushchego instrumenta* [Calculation of dynamic durability of the cutting tool]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 168 p. (In Russ.).
- Zakharchenko I.P. *Effektivnost' obrabotki instrumenta sverkh-tverdymi materialami* [Efficiency of tool processing by extrahard materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 224 p. (In Russ.).
- Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 288 p. (In Russ.).
- Bershadskii L.I. *Samoorganizatsiya i nadezhnost' tribosistem* [Self-organization and reliability of tribosystems]. Kiev: Znanie, 1981, 35 p. (In Russ.).
- Bershadskii L.I. *Strukturnaya termodinamika tribosistem* [Structural thermodynamics of tribosystems]. Kiev: Znanie, 1990, 31 p. (In Russ.).
- Gershman I.S., Bushe N.A. Realization of dissipative self-organization of friction surfaces in tribosystems. *Trenie i iznos*. 1995, vol. 16, no. 1, pp. 61–70. (In Russ.).
- Kabaldin Yu.G. *Samoorganizatsiya i nelineinaya dinamika v protsessakh treniya i iznashivaniya instrumenta* [Self-organization and nonlinear dynamics in processes of friction and wear of the tool]. Komsomolsk-on-Amur: KnAGTU, 2003, 236 p. (In Russ.).
- Shul'ts V.V. *Forma estestvennogo iznosa detalei mashin i instrumenta* [Form of natural wear of details of cars and tools]. Leningrad: Mashinostroenie, Len. otd., 1990, 208 p. (In Russ.).
- Migranov M.Sh., Shuster L.Sh. *Intensifikatsiya protsessa metalloobrabotki na osnove ispol'zovaniya efekta samoorganizatsii pri trenii* [Intensification of the metalworking process using the effect of self-organization in friction]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 202 p. (In Russ.).
- Pol'tser G., Ebileng V., Firkovskii A. External friction of solid bodies, dissipative structures and self-organization. *Trenie i iznos*. 1988, vol. 9, no. 1, p. 12. (In Russ.).
- Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Bokiy Yu. 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. Part.1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting. *Wear*. 1997, vol. 206, no. 1, pp. 214–220.
- Migranov M.Sh. *Povyshenie iznosostoikosti instrumentov na osnove intensifikatsii protsessov adaptatsii poverkhnostei treniya pri rezanii metallov* [Increase in wear resistance of tools on the basis of intensification of adaptation processes of friction surfaces at metals cutting]. Ufa: Gilem AN RB, 2001, 229 p. (In Russ.).
- Kreimer G.S. *Prochnost' tverdykh splavov* [Durability of solid alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 247 p. (In Russ.).
- Postnov V.V., Sholom V.Yu., Shuster L.Sh. *Metody i rezul'taty otsenki kontaktnogo vzaimodeistviya primenitel'no k protsessam metalloobrabotki* [Methods and results of an assessment of contact interaction in relation to metal working processes]. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 103 p. (In Russ.).
- Shuster L.Sh. *Adgezionnoe vzaimodeistvie tverdykh metallicheskih tel* [Adhesive interaction of solid metal bodies]. Ufa: Gilem, 1999, 199 p. (In Russ.).
- Krioni N.K., Migranov M.Sh. *Pokrytiya i smazki dlya vysokotemperaturnykh tribosopryazhenii* [Coverings and lubricants for high-temperature tribosocouplings]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2016, 327 p. (In Russ.).

### Information about the authors:

**M.Sh. Migranov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Design Basics of Machines and Mechanisms” ([migmars@mail.ru](mailto:migmars@mail.ru))  
**S.M. Minigaleev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Design Basics of Machines and Mechanisms”  
**S.R. Shekhtman**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Engineering Technology”

Received December 29, 2016