

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

*Кандидаты техн. наук ШМАТОВ А. А., СМИЛОВЕНКО О. О.*

*Белорусский национальный технический университет,  
ГНУ «Институт порошковой металлургии»*

Применение алмазного инструмента в промышленности ограничивается его высокой стоимостью и недостаточной стойкостью, поскольку при абразивной обработке металло- и минералокерамических материалов используется всего 3–5 % потенциальных режущих свойств алмаза [1]. В силу этого ведется поиск путей увеличения работоспособности алмазного инструмента. Наибольший интерес представляют технологически и экономически эффективные процессы его упрочнения. К их числу можно отнести низкотемпературные методы поверхностного упрочнения, температура проведения которых ниже температуры начала структурных превращений обрабатываемого материала, т. е. для быстрорежущих сталей температура обработки не должна превышать 560 °С, а для твердых сплавов и алмазосодержащих материалов – не выше 650 °С. В этом случае не происходит разупрочнение (или разрушение) внутренней структуры инструмента и сохраняются его первоначальные форма и размеры.

**Методы низкотемпературного упрочнения.** Согласно классификации [2] наиболее типичными среди них являются физико-химические методы, которые осуществляются путем создания на поверхности защитной пленки или путем изменения химического состава поверхностного слоя. Имеется несколько направлений низкотемпературного упрочнения стального, твердосплавного и алмазного инструментов: 1 – электрохимическое и химическое осаждение из водных растворов или суспензий металлических покрытий (хрома, никеля, кобальта) и композиционных металлических покрытий с дисперсными частицами оксидов, карбидов, сульфидов, алмаза [2, 3]; 2 – методы CVD (химического осаждения из паровой фазы) и PVD (физического осаждения из паровой фазы) [4];

3 – химико-термическая обработка в жидких и газовых средах (оксидирование, фосфатирование, сульфидирование, азотирование) [5]; 4 – нанесение на поверхность твердых смазок, снижающих коэффициент трения [2]; 5 – обработка в жидких органических составах на основе поверхностно-активных веществ (в активных эпиламирующих составах) [2]; 6 – пропитка антифрикционными тугоплавкими компонентами, в частности пропитка в жидких составах на основе органических масел и спиртов с большим содержанием ультрадисперсных и наноструктурных частиц графита, алмаза (фуллерена), дисульфида молибдена и других тугоплавких соединений [2]; 7 – упрочнение инструмента, при котором в процессе резания смачивают режущую кромку специальными жидкими составами на основе углерода, азота, серы и других элементов; такое упрочнение происходит за счет диффузионного насыщения поверхности резца указанными элементами в составе эмульсии в условиях ужесточения режимов резания [2, 6]; 8 – осаждение на поверхности оксидов тугоплавких металлов методом термолиза, которое осуществляют путем многократного предварительного смачивания инструмента в оксидосодержащих составах с последующим кратковременным нагревом в окислительной среде [7]; 9 – обработка в кипящих водных растворах на основе органических веществ и водорастворимых тугоплавких соединений, в частности окиси молибдена, ацетамида и др. [2, 8]; 10 – гидрохимический синтез тонких пленок из сульфидов и других соединений путем обработки поверхности в водных сульфидообразующих и других химически образующих растворах [9]; 11 – термогидрохимическая обработка в водных составах на основе ультрадисперсных и наноразмерных тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, сульфидов и др.) и неметалличе-

ских компонентов (графита, алмаза) с высокими антифрикционными свойствами [10].

На практике для упрочнения алмазного инструмента применяют только некоторые из перечисленных выше способов. К лучшим низкотемпературным способам поверхностного упрочнения инструмента можно отнести CVD-процесс, активируемый плазмой для осаждения на поверхность многослойных пленок из карбидов, оксидов, нитридов и других тугоплавких соединений [4]. Но этот способ не получил применения для алмазного инструмента из-за трудоемкости, малой производительности и энергоемкости, дорогостоящего вакуумного оборудования и расхода специальных химических компонентов.

В последние годы большое внимание уделяется развитию нанотехнологий, наноматериалов и применению их в технике. В частности, в машиностроении довольно успешно используют такие синтетические добавки, как фуллерены (наноалмазы), вводимые вместе со смазочными материалами в зону трения деталей машин, поскольку они существенно снижают силы трения и в результате повышают долговечность машин. Последнее объясняется тем, что синтетические молекулы – фуллерены C<sub>60</sub> состоят из 60 атомов углерода, которые выстраиваются в виде правильных пяти- и шестиугольников и вместе составляют шар. В свою очередь, согласно [11] эти вращающиеся шарики, располагаясь между двумя трущимися поверхностями, выполняют функцию «безыносного» подшипника, но рассматривать улучшение работы инструмента с этой позиции не совсем корректно. Следует отметить, что вопросы, связанные с нанесением на поверхность инструмента наноразмерных тугоплавких соединений и фуллеренов различными низкотемпературными способами, практически не изучены. А известные низкотемпературные химические покрытия в основном получают в водных химических растворах или суспензиях, не содержащих наноразмерные частицы упрочняющей фазы; при этом инструмент имеет недостаточную износостойкость [2]. Гидрохимический синтез сульфидов и термолизное осаждение оксидов на поверхности алмазного инструмента хоть и позволяют получать наноструктурные антифрикционные пленки, но недостаточно

толстые (до 200 нм), для того чтобы обеспечить алмазному инструменту высокую работоспособность [7, 9].

Проведенный анализ способов повышения работоспособности инструмента показывает, что усовершенствование существующих и создание новых процессов упрочнения алмазного инструмента является важной научно-технической задачей. Наиболее простым и экономичным является низкотемпературное упрочнение алмазосодержащего инструмента путем термогидрохимической обработки (ТГХО) в водных составах на базе ультрадисперсных и наноразмерных частиц упрочняющей фазы: алмаза и графита, оксидов, карбидов и других тугоплавких соединений. Данный способ может быть применен для любого вида и формы инструмента, стабилен и легко контролируется, отличается малым расходом компонентов, высокой производительностью и позволяет существенно улучшить износостойкость режущего алмазного инструмента.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании и разработке нового низкотемпературного процесса ТГХО алмазного режущего инструмента для придания ему высокой работоспособности.

В настоящей работе изучен процесс термогидрохимической обработки алмазного инструмента путем проведения двух операций: а – химической обработки поверхности алмазосодержащего материала при температуре 90–100 °С в течение 40–60 мин в специальной водной суспензии на базе ультрадисперсных оксидов титана, молибдена и активирующих органических компонентов (глицерина, мочевины и др.); б – последующей термической выдержки при температуре 130–180 °С (ниже температуры графитизации алмаза) в течение 60–80 мин в окислительной среде. Специальную водную суспензию готовили путем последовательного введения и механического смешения компонентов в различных сочетаниях и длительного кипячения до полного растворения водорастворимых органических и неорганических ингредиентов. Перед применением рабочего состава дополнительно вводили активаторы процесса: водорастворимые органические поверхностно-активные вещества. Образцы алмазного инструмента помещали и выдер-

живали в ванне со специально приготовленной водной суспензией, нагретой до температур проведения процесса. Для подготовки поверхности образцы предварительно обезжировали, а после каждой операции подготовки и химической обработки образцы алмазного инструмента промывали в воде. Процессу ТГХО подвергали алмазные шлифовальные чашечные круги на бакелитовой связке, а также алмазные шлифовальные головки и трубчатые сверла на никелевой связке.

Для изучения структуры и фазового состава упрочненного алмазного инструмента применяли микро- и рентгеноструктурный, дюротметрический и микрорентгеноспектральный анализы. Сравнительные испытания на работоспособность алмазных чашечных кругов 12А2 проводили в условиях предприятия ПО «БелАЗ» путем обработки деталей из стали 45 с твердостью HRC 48–54 при следующих режимах: число оборотов круга – 4000 об/мин, число оборотов детали – 32 об/мин, продольная подача – 2 м/мин, снимаемый припуск – 1 мкм, шероховатость поверхности – 0,08–0,16. Алмазные шлифовальные головки испытывали путем обработки твердого сплава ВК8 при следующих режимах: частота вращения шлифголовки – 6400 об/мин, радиальное усилие – 6,0 Н. Работоспособность алмазных кругов и шлифовальных головок оценивали по удельному расходу алмазов (ГОСТ 9244–75):  $q_p = \Delta H B / \Delta P$ , где  $\Delta H$  – износ алмазосодержащего слоя шлифовального круга, мкм;  $B$  – коэффициент, указывающий количество алмаза в слое, мг/мкм;  $\Delta P$  – разность массы обрабатываемого образца до и после опыта, г. Сверла диаметром 2,2 мм с гальваническим алмазным слоем были испытаны на стойкость при сверлении технического стекла толщиной 4 мм на сверлильном станке с вращением шпинделя 6000 об/мин. Стойкость ал-

мазных сверл оценивалась по длине его резания (глубине сверления) до полного износа режущего слоя.

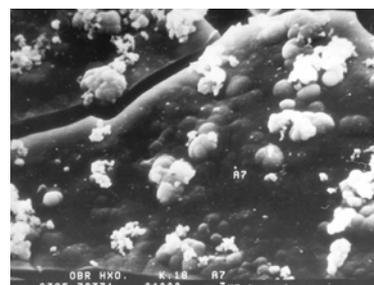
**Результаты исследований.** Процесс низкотемпературной термогидрохимической обработки (ТГХО) алмазного инструмента имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности стали формируется многокомпонентное дискретное покрытие в виде пленки, состоящей из темной ровной подложки на основе комплексных соединений с участием молибдена и ультрадисперсных комплексных титаносодержащих образований в виде светлых «хлопьев» (рис. 1); в поверхностном слое создается зона высоких напряжений сжатия.

Как видно из рис. 1, 2, практически вся поверхность никелевой связки покрыта защитной пленкой и наблюдается ее осаждение на поверхность алмазных зерен. Наличие титана и молибдена в пленке подтверждается результатами рентгеноспектрального анализа (рис. 3).

На поверхности алмазного инструмента, упрочненного ТГХО по двум режимам, формируется зона сжимающих напряжений как в никелевой связке, так и алмазном зерне (табл. 1). Формирование высоких напряжений сжатия с помощью ТГХО положительно сказывается на работе алмазного инструмента, поскольку позволяет релаксировать внутренние напряжения, а также компенсировать растягивающие напряжения, которые возникают при работе любого режущего инструмента. Авторы предполагают, что высокие сжимающие напряжения в гидрохимически упрочненной поверхности алмазосодержащего материала создаются за счет глубокого проникновения (по границам зерен и блоков мозаики, несовершенствам структуры) наноразмерных частиц упрочняющей оксидной фазы, входящей в состав водной суспензии.



×1000



×4000

Рис. 1. Микрорельеф поверхности алмазного инструмента после ТГХО в Ti–Mo-суспензии

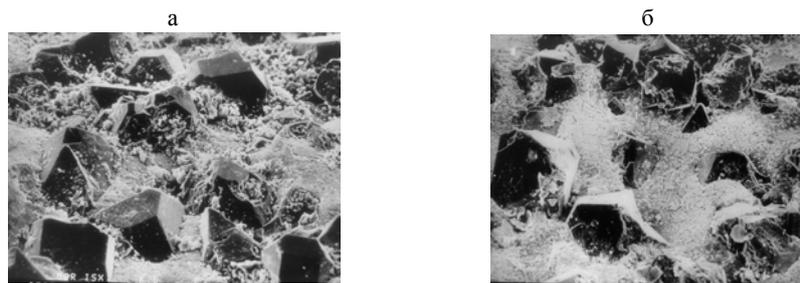


Рис. 2. Микрорельеф поверхности алмазного инструмента: а – необработанного; б – после обработки методом ТГХО в Ti–Mo-суспензии

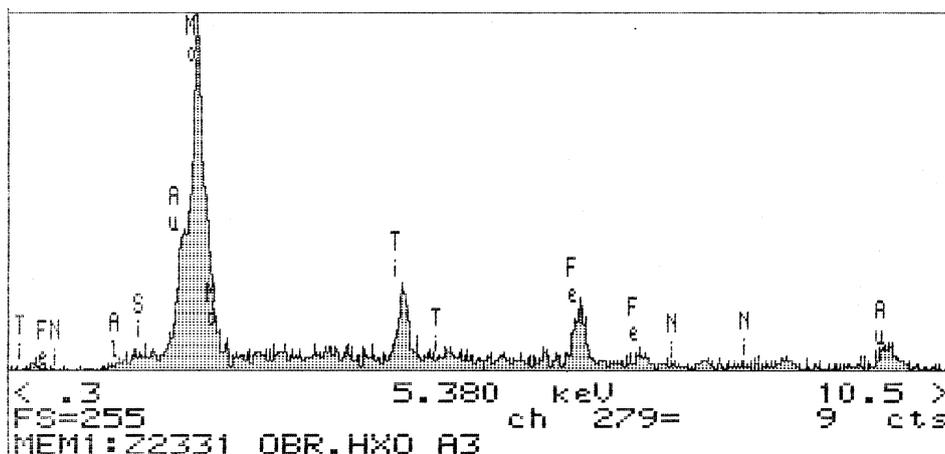


Рис. 3. Рентгеноспектральный анализ поверхности алмазного инструмента после ТГХО

Таблица 1

Результаты рентгеновской съемки (при  $\psi = 40^\circ$ ,  $\text{CoK}_\alpha$ -излучении)

Режим обработки	Фаза	$2\theta\psi^{(311)}$ , град	$2\theta_0^{(311)}$ , град	$d\psi^{(311)}$ , нм	$d_0^{(311)}$ , нм	$\sin^2\psi$	$\sigma$ , МПа
1	Ni	14,7	114,68	1,0631	1,0632	0,4132	-50
	C (алмаз)	112,57	112,5	1,0761	1,0765	0,4132	≈-700
2	Ni	114,75	114,68	1,0627	1,0632	0,4132	-180
	C (алмаз)	112,55	112,5	1,0763	1,0765	0,4132	≈-350

В результате проведения сравнительных испытаний различных видов алмазного инструмента (алмазных шлифовальных кругов и головок, алмазных сверл), упроченных методом ТГХО, установлено, что их износостойкость зависит от химического состава и кислотности водной суспензии, температуры и времени проведения процесса химической обработки. Оптимальными параметрами химической обработки являются: температура 90–100 °С, время 40–60 мин., кислотность рабочей ванны  $\text{pH} = 4,5\text{--}6,0$ , что позволяет достичь наибольшей износостойкости инструмента. Для снятия вредного эффекта охрупчивания, вызванного наводороживанием поверхности, после химиче-

ской обработки обязательно проводят термообработку. Оптимальными параметрами термообработки алмазного инструмента в окислительной среде являются: температура 130–160 °С, время 1–1,5 ч. В результате ТГХО достигается повышение износостойкости алмазного инструмента более двух раз.

В зависимости от природы связки и материала абразивных зерен сами зерна могут удерживаться в связке за счет: а – образования химического соединения между материалом связки и зернами; б – сил адгезии; в – механического защемления-заклинивания зерен в связке. Практика использования шлифовальных кругов с различными типами связок показыва-

ет, что наибольшее закрепление абразивных зерен в связке достигается путем их химического соединения. На износ алмазного шлифовального инструмента оказывает также значительное влияние и адгезионное взаимодействие связки с обрабатываемым материалом [1].

Образованная титанмолибденсодержащая пленка затрудняет образование микротрещин и дефектов разрушения в поверхностном слое алмазного инструмента, возникающих в процессе резания, снижает диффузионное и адгезионное взаимодействие связки с обрабатываемым материалом, защищает связку от активного износа, усиливает удержание алмазов в связке. В целом это означает, что значительно больший процент алмазных зерен участвует в процессе резания, а сам алмазный инструмент работает более эффективно.

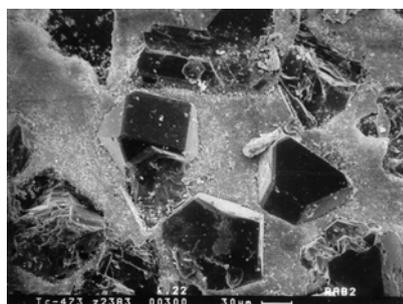
На рис. 4 представлены участки изношенной поверхности алмазной шлифовальной головки, упрочненной ТГХО по оптимальному режиму. Испытываемые алмазные головки проработали 120 мин при непрерывной обработке твердого сплава ВК8. При этом средний расход алмаза упрочненных шлифовальных головок составил  $11,55 \text{ г/см}^2$ , а необработанных –  $16,74 \text{ г/см}^2$ , т. е. на 50 % ниже

Как видно из рис. 4, в процессе работы алмазной шлифовальной головки основная нагрузка ложится на алмазные зерна, которые в большей степени изнашиваются и в меньшей – вырываются из связки, а износ самой упрочненной никелевой связки практически не наблюдается. На изношенной поверхности нанесенного на инструмент Ti–Mo-покрытия не обнаружено каких-либо сколов и микротрещин, что свидетельствует о хорошей адгезии покрытия с основой. Наличие плоской площадки износа упрочненных алмазных зерен свидетель-

ствует также о прочной связи на границе «алмаз – связка».

Объяснить положительные структурные изменения алмазосодержащего материала после ТГХО можно эффектом Ребиндера. Данный эффект носит адгезионный характер взаимодействия поверхности твердого тела с жидкой окружающей средой и осуществляется при взаимодействии любых твердых тел с поверхностно-активными веществами. В результате такого физико-химического влияния жидкой окружающей среды чаще всего наблюдается снижение прочности и пластичности твердых тел за счет уменьшения поверхностной энергии тела. Такое влияние носит обратимый характер, т. е. после удаления с поверхности твердого тела поверхностно-активных веществ механические свойства тел обычно полностью восстанавливаются. Однако имеется ряд примеров, когда в результате прекращения воздействия среды на материал его механические свойства, в том числе сопротивляемость разрушению и износу, не только восстанавливаются, но и возрастают [12].

Многочисленные промышленные и лабораторные испытания режущего алмазного инструмента показали, что применение низкотемпературного поверхностного упрочнения путем гидрохимической обработки в Ti–Mo-суспензии позволило повысить эксплуатационную стойкость упрочненных алмазных шлифовальных кругов и головок в 1,3–2,2 раза, а алмазных сверл – в 3–4 раза по сравнению с традиционным инструментом. Процесс термогидрохимической обработки алмазных чашечных кругов для финишной обработки закаленных деталей машин из стали 45 внедрен на ПО «БелАЗ», что позволило предприятию сократить закупку дорогостоящего алмазного инструмента за рубежом.



×300



×500

Рис. 4. Микрорельеф изношенной поверхности алмазной шлифовальной головки, упрочненной методом ТГХО в Ti–Mo-суспензии

## ВЫВОДЫ

1. Предложенное низкотемпературное термогидрохимическое упрочнение алмазного инструмента достигается формированием многокомпонентного дискретного покрытия, которое обеспечивает алмазосодержащему материалу высокие антифрикционные свойства и хорошую адгезионную связь на границе «алмаз – связка», а также создание в поверхностной зоне высоких напряжений сжатия.

2. Использование низкотемпературного способа термогидрохимической обработки в Ti–Mo-суспензии позволяет повысить эксплуатационную стойкость различных видов алмазного режущего инструмента в 1,3–4,0 раза по сравнению со стандартным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Чеповецкий, И. Х.** Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке / И. Х. Чеповецкий. – Киев: Наук. думка, 1978. – 227 с.
2. **Полевой, С. Н.** Упрочнение металлов / С. Н. Полевой, В. Д. Евдокимов. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
3. **Мельников, П. С.** Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / П. С. Мельников. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
4. **Hocking, M. G.** Metallic and Ceramic Coatings. Production, Properties and Applications / M. G. Hocking, V. Vasantasree, P. S. Sidky. – London; New York, 2000. – 518 p.
5. **Химико-термическая** обработка металлов и сплавов: справ. / под ред. Л. С. Ляхович. – М.: Metallurgia, 1981. – 424 с.
6. **Состав** для упрочнения режущего инструмента в процессе резания: а. с. 1340219 СССР / Н. С. Салманов, Г. А. Околович, В. Б. Бутыгин; опубл. 26.06.84.
7. **Ильющенко, А. Ф.** Исследование альтернативных процессов нанесения слоя твердого электролита на высокопористую подложку несущего электрода / А. Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, Д. Р. Виолентий // Порошковая металлургия. – 2007. – № 30. – С. 138–143.
8. **Способ** упрочнения инструмента из быстрорежущей стали: а. с. 1434777 СССР / Ю. П. Буравчук, С. В. Оржеховский, Г. К. Новикова и др.; опубл. 22.07.86.
9. **Виноградова, Т. В.** Гидрохимическое осаждение пленок сульфидов свинца, серебра и твердых растворов замещения на их основе для создания датчиков экологического контроля: дис. ... канд. хим. наук / Т. В. Виноградова. – Екатеринбург, 2005. – 209 с.
10. **Способ** упрочнения инструмента из быстрорежущей стали: пат. 2023027 Российская Федерация / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин; опубл. 15.11.94 // Бюл. изобр. – 1994. – № 21.
11. **Балабанов, В. И.** Триботехнологии в техническом сервисе машин / В. И. Балабанов, С. А. Ищенко, В. И. Беклемышев. – М.: Изумруд, 2005. – 192 с.
12. **Фридман, Я. Б.** Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 2. – 135 с.

Поступила 07.07.2008

УДК 681.7.064

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

*Канд. техн. наук ХОМИЧ Н. С., ЛУГОВИК А. Ю.,  
канд. техн. наук, доц. ФЕДОРЦЕВ Р. В., КОРЗУН А. Е., КУХТО П. В.*

*Научно-инженерное предприятие «Полимаг»,  
Белорусский национальный технический университет,  
научно-производственное объединение «Интеграл»*

Монокристаллические кремниевые подложки широко используются в электронной промышленности в качестве основы интегральных микросхем и других компонентов полупроводниковых приборов. Использование кремниевых пластин большого диаметра (200, 300 мм) по-

зволяет снизить себестоимость изготовления микросхем за счет увеличения числа годных чипов, получаемых с одной пластины [1].

Технологический процесс изготовления кремниевых подложек предусматривает замкнутый цикл механической обработки и наличие сле-