

УДК 614.846

## ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕЖУЩИХ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ПУТЕМ МОДИФИЦИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВЯЗОК НАНОКОМПОНЕНТАМИ

Смиловенко О.О.\*, к.т.н., доцент, Полуян А.И.\*\*

\*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

\*\*Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси

e-mail: mail@kii.gov.by

*Направленное изменение физико-механических свойств металлической связки алмазных сегментов путем модифицирования ультрадисперсным алмазом позволило улучшить эксплуатационные характеристики режущих кругов: удельную стойкость и скорость резания, что, в свою очередь, позволит повысить эффективность аварийно-спасательных работ.*

*The directed change of physicomachanical properties of a metal linking of diamond segments by modifying by ultradisperse diamond allowed to improve operational characteristics of cutting circles: specific firmness and cutting speed that, in turn, will allow to increase efficiency of a crash-rescue operations.*

(Поступила в редакцию 18 июля 2013 г.)

### ВВЕДЕНИЕ

Проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ в районах стихийных бедствий, производственных аварий и катастроф требует от подразделений МЧС выполнения большого объема самых разнообразных по характеру и трудоемкости работ с применением аварийно-спасательного инструмента. Основным критерием при конструировании режущего инструмента является фактор времени, то есть скорость реза. Скорость реза в совокупности с надежностью должны определять технико-эксплуатационные параметры режущих алмазных кругов, применяемых для вскрытия перекрытий, разборки завалов, прорезания вентиляционных штолен и других аварийно-спасательных работ.

Работоспособность алмазных инструментов в значительной степени определяется прочностью алмазных зерен и надежностью их закрепления в матрице (связке). При выборе способа закрепления необходимо учитывать состояние не только зерен и матрицы, но и переходного слоя между ними – адгезионной зоны. Исследования особенностей разрушения алмазного слоя позволяют сделать вывод о том, что его структура и свойства, а также процессы, происходящие в нем при работе инструмента, в значительной степени определяют ресурс инструмента. Опыт эксплуатации серийно производимого алмазного инструмента на металлической связке (матрице) показывает, что большей частью алмазные зерна, выпавшие из связки, не выработали свой ресурс. Это объясняется тем, что технология изготовления и используемые связки не обеспечивают надежное закрепление зерен в алмазоносном слое. Поэтому управление процессами, протекающими в зоне контакта алмазов и связки при изготовлении инструмента, с целью получить заданные структуру и свойства адгезионной зоны, может служить основой повышения надежности закрепления зерен и, соответственно, работоспособности инструмента в целом [1].

Металлические связки представляют собой многокомпонентные порошковые смеси, основными составляющими которых являются Co, Cu, W, Al, легированные соединениями Ti, В и другими элементами. Разработка новых металлических связок с улучшенными эксплуатационными свойствами является актуальной проблемой. Практически ставится задача создания нового класса инструментальных материалов. Большие возможности в этом

плане открывает технология получения металлических связок, модифицированных ультрадисперсными алмазами (УДА). Введение таких материалов в металлические связки изменит процесс компактирования и спекания последних, их физико-механические и эксплуатационные свойства [2].

### **Модифицирование связок наноконпонентами**

В связи с тем, что углеродные наночастицы обладают высокой поверхностной энергией, и как следствие, склонностью к конгломерации, модифицирование металлических связок невозможно без диспергирования этих частиц ультразвуковой обработкой.

Использование ультразвука в технологии диспергирования связано с рядом специфических явлений, сопровождающихся распространением ультразвуковых колебаний в жидких средах. Действие ультразвука на дисперсную фазу в жидкой среде заключается в том, что в гетерогенной системе на границе раздела фаз возникают зоны сжатия и разрежения. Образуется ударная волна высокой интенсивности, которая приводит к механическому разрушению твердых частиц [3].

Шихту УДА, предварительно отожженную при температуре 100-200 °С, загружали в камеру, дном которой служил торец излучателя ультразвука. Обработку вели в толуоле и коллоидном графите. Устанавливали частоту 44 кГц. На этих режимах в камере генерируются ударные волны до 1 000 МПа, что вполне достаточно для механического разрушения близлежащих твердых поверхностей. Определенный вклад в измельчение и смешивание частиц вносят их соударения друг с другом и трение о жидкость, т. к. под воздействием ударной волны они приобретают весьма значительное ускорение, начиная двигаться в жидкости со сверхзвуковой скоростью. После ультразвуковой обработки порошок УДА механически смешивался с металлическим порошком связки в порционном смесителе роторного типа с реверсивным вращением.

При спекании алмазосодержащих материалов важно обеспечить надежный контакт алмаз – связка и сохранить при этом высокие режущие свойства алмазных зерен. Для электроконтактного способа необходимо, чтобы алмаз (диэлектрик) был окружен электропроводной связкой. Основными параметрами, влияющими на условия спекания, являются амплитуда тока и длительность электрического импульса, которые определяют тепловой режим процесса. В данном случае амплитуда тока и длительность разряда – задаваемые параметры, температурное поле после прохождения импульса тока регулируется технологической оснасткой [4].

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ**

### *Исследование микроструктуры металлических связок*

Для исследований микроструктуры металлических связок, модифицированных УДА, методом электроконтактного спекания были изготовлены образцы с размерами:  $\varnothing$  12 мм,  $h$  10 мм. Изготовленные образцы металлической связки имели следующий состав: № 1 – 80 % Cu, 20 % Sn, 2 % Pb + ультрадисперсный алмаз и № 2, представляющий собой систему (Co-Ni-W) + ультрадисперсный алмаз. Концентрация алмазного ультрадисперсного порошка определена на основе предварительных экспериментов и составляет 0,5 объемных процентов. Для проведения исследований изготовлены шлифы. Исследование элементного состава проводилось на аттестованном сканирующем электронном микроскопе «Нанолаб-7» фирмы «Оптон» (ФРГ) с микрорентгеноспектральным анализатором AM 10000 фирмы «Линк Аналитикл» (Англия) по программе количественного анализа ZAF4-FLS.

Гомогенность структуры изучалась на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении  $\times 100$ . Фотографии микроструктур приведены на рис. 1 (для образца связки № 1) и 2 (для образца связки № 2). Параметры структуры: пористость, фазовый состав, микротвердость, распределение структурных составляющих также представлены в таблице.

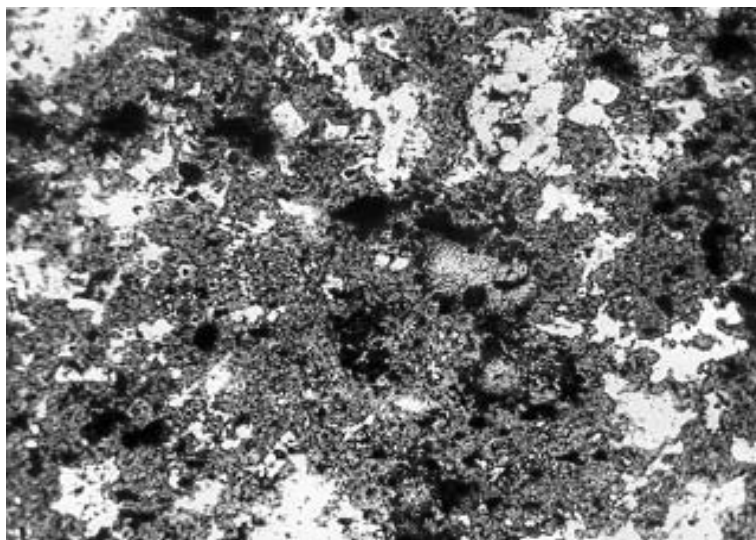


Рисунок 1 – Микроструктура связки на основе меди (середина образца № 1)

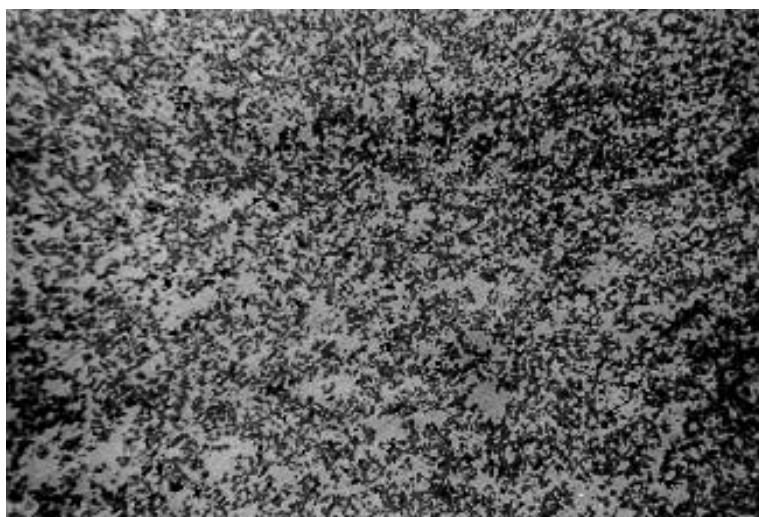


Рисунок 2 – Микроструктура связки на основе кобальта (середина образца № 2)

Следует отметить, что в образце № 1 наблюдается неравномерная пористость, смещенная к одному из краев поверхности широкой стороны сечения шлифа. Размер пор находится в диапазоне 5-100 мкм у края поверхности узкой стороны шлифа, 5-80 мкм – у края поверхности широкой стороны шлифа, 5-60 мкм – в сердцевине.

Микроструктура образца № 1 состоит из следующих структурных составляющих: участков Cu,  $\alpha$ -твердого раствора Sn в Cu, эвтектоида ( $\alpha + \delta_{Cu_{31}Sn_8}$ ),  $\delta_{Cu_{31}Sn_8}$  – фазы, включений Pb по границам и внутри зерен. Структурные составляющие распределены практически равномерно по сечению образца.

В образце № 2 присутствует локально распределенная пористость. Размер пор находится в диапазоне 5-30 мкм у края поверхности узкой стороны шлифа, 5-20 мкм – у края поверхности широкой стороны шлифа, 5-15 мкм – в сердцевине. Микроструктура образца № 2 представляет собой твердый раствор Co в Ni с включениями W, возможно в соединении с C, H. Структурные составляющие распределены практически равномерно по сечению образца, однако присутствуют единичные Ni-Co- и W-участки.

В целом, это не оказывает большого влияния на однородность структур обоих связок. Некоторая повышенная пористость у образца на медной связке объясняется

последедеформационным расширением. Но на физико-механические характеристики связки это не повлияло, что подтвердили измерения микротвердости обеих связок.

Таблица – Параметры структуры и распределение структурных составляющих

№ образца	Пористость, мкм			распределение	Структура		
	у края поверхности узкой стороны	сердцевины	у края поверхности широкой стороны		фазовый состав/микротвердость, МПа	№ точки МРСА	гомогенность
1	5-100	5-60	5-80	Неравномерное, смещение к одному из краев поверхности широкой стороны	Cu/600-750	T6, T9	Практически однородное распределение структурных составляющих по сечению образца
					$\alpha$ -твердый раствор Sn в Cu / 1300-1700	T2, T3, T10	
					эвтектид ( $\alpha + \delta_{Cu_{31}Sn_8}$ ) / 2400-2700	T4, T7, T8, T11, T12	
					$\alpha + \delta_{Cu_{31}Sn_8}$ / 3200-3700	T5	
					Включения Pb по границам и внутри зерен	T1, T3, T11	
2	5-30	5-15	5-20	Неравномерное, с локальными скоплениями	Твердый раствор Co в Ni / 3200-4000	T1-T8	Практически однородное распределение структурных составляющих по сечению образца, с присутствием единичных Ni-Co- и W-участков
					W (возможно соединение с легкими элементами типа C, H) / 5500-6800	T1, T6	

*Исследование дюрометрических свойств металлических связок*

Микротвердость измерялась на микротвердомере «Micromet-II» фирмы «Buehler» (Швейцария) с нагрузкой 100 г. Графики изменения микротвердости приведены на рис. 3 (для образца связки № 1) и 4 (для образца связки № 2), причем измерение микротвердости осуществлялось как по диаметру образца, так и по его высоте.

*Триботехнические испытания металлических связок, модифицированных УДА*

Рассмотрим механизм взаимодействия алмазного зерна и модифицированной связки с обрабатываемым материалом. Процесс износа модифицированного алмазоносного слоя состоит из нескольких взаимосвязанных и одновременно протекающих фаз: абразивного износа и механического удаления (вырывания) зерен, а также абразивного истирания связки. Вырывание зерен из связки происходит в результате воздействия на них тангенциальных составляющих силы резания, а абразивное истирание связки – вследствие воздействия на нее мелкодисперсных продуктов разрушения.

Если связка имеет износостойкость ниже оптимальной, алмазные зерна преждевременно из нее выпадают, в результате чего они используются нерационально. Если износостойкость связки выше оптимальной, на вершинах режущих алмазных зерен образуются значительные площадки (рис. 5), в результате чего для их внедрения в обрабатываемый материал требуются дополнительные силы, которые приводят к возникновению больших усилий резания, разрушению алмазоносного слоя (рис. 6).

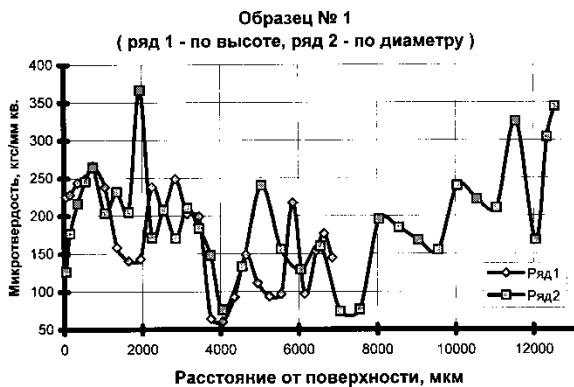


Рисунок 3 – Микротвердость образца на основе меди



Рисунок 4 – Микротвердость образца на основе кобальта

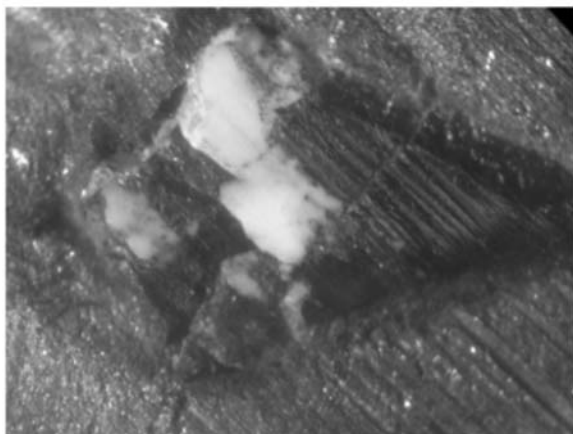


Рисунок 5 – Площадка износа кристалла алмаза с образовавшимися трещинами

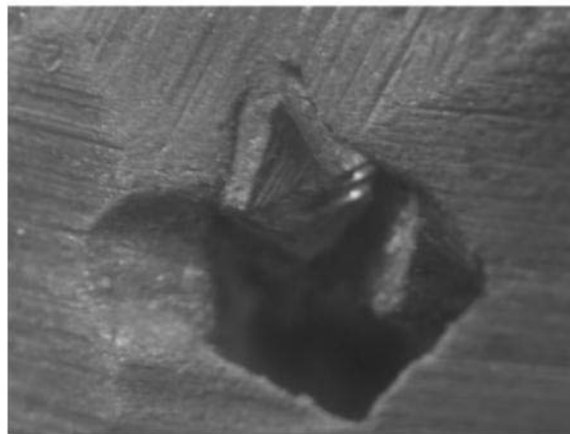


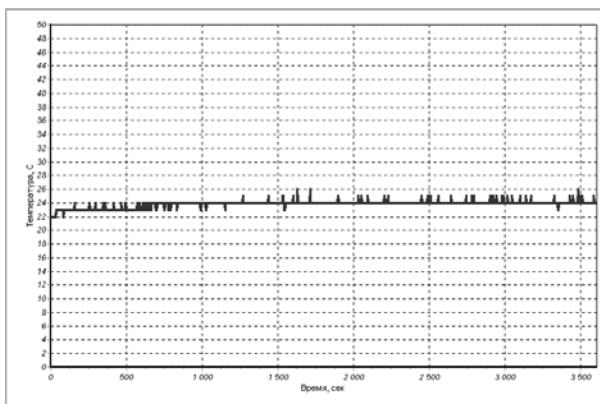
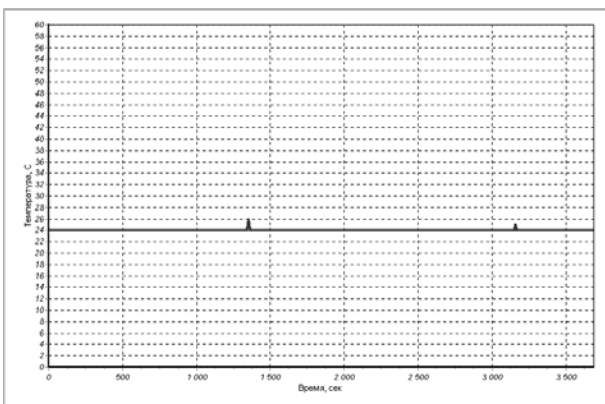
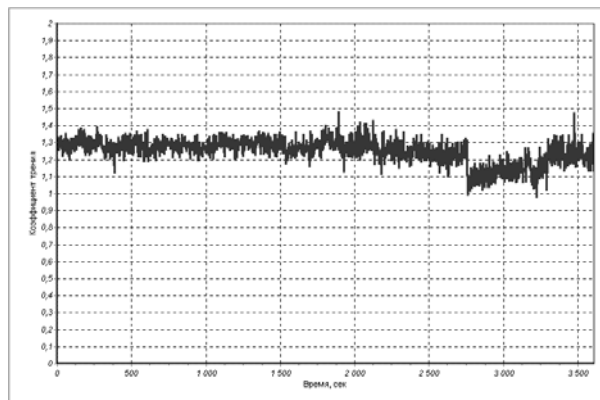
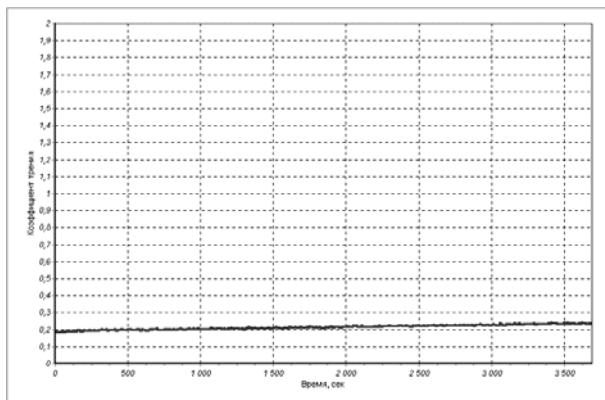
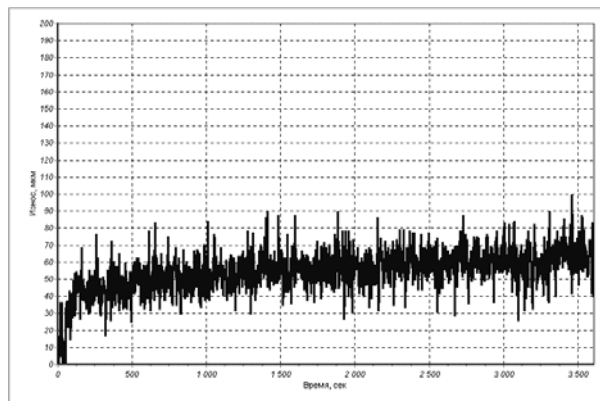
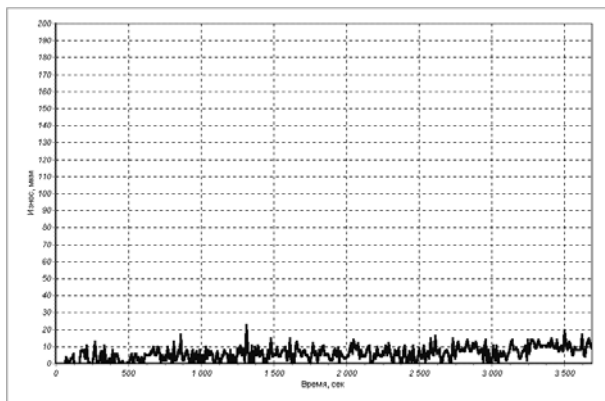
Рисунок 6 – Части кристалла и образовавшаяся лунка в металлической связке

Триботехнические свойства металлических связок изучались при помощи специальной установки для триботехнических испытаний материалов (УТИМ-2).

Триботехническим испытаниям были подвергнуты металлические связки, модифицированные ультрадисперсным алмазным порошком соответствующей концентрации. В процессе испытаний производились измерения коэффициента трения, температуры фрикционного разогрева и суммарного износа образцов. Получены определенные закономерности износа связок в зависимости от степени легирования их порошком ультрадисперсного алмаза. Наиболее наглядно кинетику износа отражает изменение коэффициента трения на определенном пути и за определенное время (2 часа) при одинаковой нагрузке – 10 Н.

На рис. 7 и 8 продемонстрированы изменения вышеуказанных параметров выбранных связок при наиболее оптимальной их модификации по сравнению с образцами, изготовленными на «чистой» связке.

Так, для связки М2-01 наиболее оптимальной является 0,5 % концентрация УДА, при которой коэффициент трения изменяется в пределах 0,2-0,25 за время – 4 часа (рис. 7). В то время, как коэффициент трения «чистой связки» находился на уровне 1,3 в течении двух часов (рис. 8).



**Рисунок 7 – Триботехнические свойства связки М2-01, модифицированной УДА с концентрацией 0,5 %**

**Рисунок 8 – Триботехнические свойства «чистой» связки М2-01**

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микрорентгеноспектральные исследования экспериментальных образцов режущих элементов показали высокую гомогенность спеков, повышение их микротвердости. Равномерное распределение модифицирующих наноалмазных частиц позволяет выровнять удельное электросопротивление спекаемого слоя, что приводит к получению гомогенной структуры спека по всему объему.

Установлено, что оптимальной концентрацией легирования металлических связок порошком УДА является диапазон 0,5-0,75 %. Повышение твердости модифицированных

связок снижает интенсивность их изнашивания и повышает прочность алмазоудержания, о чем говорит снижение удельного расхода алмазного сырья – на 10 %. Однако, увеличение концентрации УДА до 1 % и выше приводит к резкому повышению коэффициента трения и температуры в зоне обработки, увеличивает твердость связки, снижает ее пластичность, затрудняет процесс вскрытия новых режущих зерен, что приводит к ухудшению эксплуатационных свойств алмазного инструмента.

Модифицирование металлических связок алмазоподобными нанокomпонентами придало связкам новые характеристики, которые, в свою очередь, изменили их эксплуатационные свойства. Таким образом, модификация УДА металлических связок, приводит к улучшению эксплуатационных показателей последних, т.е. повышению производительности, снижению расхода алмазного сырья, повышению стойкости на износ.

Режущие круги, изготовленные на основе модифицированных связок обладают физико-механическими и триботехническими свойствами отличными от стандартных. Благодаря более низкому коэффициенту трения, окружная скорость обработки выросла на 15-20 %, глубина пропила на 10 %, производительность на 25-30 %. Увеличилась также и общая стойкость инструмента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Яхутлов, М.М. Повышение стойкости алмазного инструмента на металлической связке, СТИН, 2001, № 7, с. 19-23
2. Доматов, В.Ю., Суцев, В.Г., Фуджимура, Т., Верететенникова, М.В. Природа кластерных наноалмазов детонационного синтеза и физико-химические аспекты технологии их азотнокислотной очистки. Сверхтвердые материалы, 2004, № 1, С. 23-29
3. Волошин, М.Н., Коломиец, В.П. Структура композиций WC-Co – алмаз, полученной электроимпульсным спеканием. – Сверхтвердые материалы, 1996, № 3. – С. 3-7.
4. Булгаков, В.И., Лаптев, А.И. и др. Методика оценки износостойкости связок алмазного инструмента. – «Материаловедение», 2004, № 2, – С. 24-28.
5. Лоладзе, Т.Н., Бокучава, Г.В. Износ алмаза и алмазных кругов. М. Машиностроение, 1967. – 113 с.