

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.937

### ФОРМИРОВАНИЕ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЛОЯ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ОГРАНОЧНЫХ ДИСКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

*д-р техн. наук, проф. М.Г. КИСЕЛЕВ, Д.А. СТЕПАНЕНКО*  
*(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Приводятся результаты экспериментальных исследований по оценке влияния ультразвука на процесс формирования алмазосодержащего слоя ограничных дисков и эксплуатационные показатели сформированного слоя. Описана методика оценки эксплуатационных показателей ограничных дисков и созданный для ее реализации экспериментальный комплекс. На основе анализа результатов экспериментальных исследований определены рациональные режимы процесса формирования алмазосодержащего слоя, обеспечивающие наивысший уровень эксплуатационных показателей инструмента, в частности, абразивной способности, износостойкости и качества обработанных поверхностей. Показано, что применение ультразвука в процессе укатки позволяет повысить стойкость ограничных дисков в 2 раза, обеспечивая при этом требуемое качество обработки поверхностей. На основе анализа интегральных кривых износа образцов из синтетического сапфира и наблюдений за процессом их шлифования установлены характерные стадии протекания этого процесса.*

**Введение.** В алмазообрабатывающей промышленности для огранки монокристаллов алмаза применяют ограничные диски, которые представляют собой инструмент с алмазосодержащим поверхностным слоем. В настоящее время для формирования алмазосодержащего слоя в основном применяют метод гальванического осаждения композиционных покрытий никель – бор – алмаз [1]. Этот метод обеспечивает высокие эксплуатационные показатели инструмента, однако является энергоемким и связан с применением агрессивных химических реактивов (растворов электролитов). В связи с этим представляет интерес задача совершенствования метода механического закрепления (шаржирования) зерен алмазных микропорошков в материале диска, для реализации которого применяют технологическую операцию, известную под названием укатки. Перед ее выполнением на поверхность диска напыляют слой суспензии, состоящей из алмазного микропорошка, взвешенного в спиртовом растворе клея БФ-2 [2]. Просушенный слой укатывается с помощью деформирующего инструмента из алмазного композита, закрепляемого во вращающейся цапге укаточного приспособления, которое монтируется на ограничном станке или специализированном укаточном станке. На поверхности укатанного ограничного диска происходит образование черной глянцевой пленки, обладающей высокой износостойкостью и труднорастворимой в органических растворителях. Как показывают наши исследования, этот слой состоит из резита, представляющего собой продукт поликонденсации клея БФ-2. Поликонденсация возникает в результате воздействия интенсивных тепловых полей, обусловленных взаимодействием инструмента с поверхностью диска. Возникающий при этом резит представляет собой основную составляющую бакелитовых связок, широко применяемых при производстве абразивного инструмента. Как показывают результаты исследований, одним из эффективных способов повышения эксплуатационных показателей ограничных дисков является сообщение ультразвуковых колебаний (УЗК) деформирующему инструменту [3]. Однако рекомендации по выбору рациональных режимов процесса укатки с применением УЗК в доступных литературных источниках отсутствуют, что послужило мотивацией для проведения исследований, результаты которых представлены в данной статье.

**Целью исследований** являлось определение рациональных режимов процесса формирования алмазосодержащего слоя на рабочих поверхностях ограничных дисков с применением УЗК, обеспечивающих наивысший уровень эксплуатационных показателей инструмента, например: абразивной способности, износостойкости и качества обработанных поверхностей.

**Методика проведения исследований.** Для исследования процесса формирования алмазосодержащего слоя использовались чугунные ограничные диски, прошедшие притирку на специализированных станках или с использованием специально разработанного приспособления [4]. Диски для проведения экспериментов поставлялись Гомельским заводом «Кристалл». Для выполнения операции формирования

алмазосодержащего слоя и оценки эксплуатационных показателей инструмента использовался ограниченный станок типа ОАБ-4 со сварной рамой. Станок был оснащен двигателем постоянного тока типа ПС-42 с независимым возбуждением, что позволяло регулировать частоту вращения диска путем изменения напряжения на якорной обмотке при помощи автотрансформатора. Частота вращения диска контролировалась косвенным методом путем измерения напряжения на якорной обмотке двигателя с помощью вольтметра. На предварительно обезжиренную притертую поверхность диска напылялась алмазосодержащая суспензия следующего состава:

- алмазный микропорошок АСМ 10/7 – 2,5 карата;
- клей БФ-2 – 2 мл;
- этиловый спирт – 6 мл.

Дозирование алмазного порошка для приготовления суспензии осуществлялось с помощью каратных весов ОНАУС Е12140. Дозирование клея и спирта производилось с помощью медицинского шприца. Компоненты суспензии смешивались в стеклянной емкости. Для напыления использовалось специальное приспособление, использующее инъекционный принцип напыления и состоящее из привода радиальной подачи сопла, передачи «винт – гайка» и кронштейна, связанного с гайкой. На кронштейне крепились два сопла, одно из которых служило для подачи суспензии, а другое – сжатого воздуха. При напылении использовались следующие режимы:

- частота вращения ограниченного диска – 500 об/мин;
- скорость перемещения сопла распылительного устройства – 20 мм/с.

Укатка ограниченных дисков производилась с помощью специально разработанного опытно-промышленного приспособления, в цанге которого закреплялся деформирующий инструмент из алмазного композита типа АСБ-5 (баллас) в виде цилиндров диаметром 7 мм. Перед укаткой на инструменте снималась фаска шириной не менее 2 мм путем обработки композита на изношенных ограниченных дисках. Цанга с балласом закреплялась посредством резьбового соединения в ультразвуковом концентраторе и получала вращение через редуктор от электродвигателя. Колебания концентратора создавались пакетным пьезоэлектрическим преобразователем типа Ланжевена. Нагрузка на баллас создавалась с помощью сжатого воздуха, подаваемого от компрессора. Давление в пневмосистеме контролировалось по манометру. Укаточная головка закреплялась на направляющей типа «ласточкин хвост» и получала движение радиальной подачи от синхронного двигателя с помощью ходового винта. Диапазон перемещений головки задавался с помощью концевых выключателей. Возбуждение ультразвуковой колебательной системы осуществлялось от опытного ультразвукового генератора типа ВНТ 34М с выходной мощностью 50 Вт. Частота возбуждения поддерживалась равной 21,27 кГц и контролировалась с помощью электронно-счетного частотомера ЧЗ-33, подключенного к выходу ультразвукового генератора через резистивный делитель. Амплитуда УЗК в ненагруженном состоянии составляла 5 мкм и определялась оптическим методом с помощью микроскопа ММУ-3У4.2 с увеличением  $\times 500$ .

Перед укаткой диска с помощью шупа выставлялся зазор между образующей балласа и рабочей поверхностью диска, равный по величине 0,6 мм. Регулировка зазора осуществлялась путем осевого перемещения нижнего подшипника станка. На поверхности диска укатывались дорожки шириной 10 мм, причем соседние две дорожки отличались условиями укатки: одна из них укатывалась в обычном режиме, другая – с наложением УЗК на баллас. Для различных пар дорожек варьировались статическая нагрузка при укатке и количество рабочих ходов укаточной головки (табл. 1).

Таблица 1

Технологические параметры режимов укатки

№ режима	Давление, МПа	Количество рабочих ходов
1	0,1	2
2	0,1	3
3	0,1	4
4	0,15	3
5	0,2	3

После укатки производилось испытание дорожек диска на абразивную способность и износостойкость, а также исследование качества обработки поверхностей.

Для оценки абразивной способности и износостойкости сформированного алмазосодержащего слоя производилось изнашивание образцов из синтетического корунда (сапфира) в виде прямоугольных параллелепипедов с поперечным сечением 5×5 мм, которые вырезались из монокристалла в направлении

его главной оси. Вырезание образцов производилось на отрезном станке с помощью алмазного отрезного диска. Затем образцы шлифовались алмазной планшайбой на настольном ограночном станке типа СОС с контролем размеров поперечного сечения и углов между гранями. Корунд был использован для изготовления образцов, так как является наиболее твердым из доступных материалов (твердость 9 единиц по шкале Мооса). Проведение широкомасштабных лабораторных испытаний по огранке монокристаллов алмаза (твердость 10 единиц) не представляется возможным по экономическим причинам. Образец закреплялся с помощью винта в специальной державке с пазом шириной 5 мм и дополнительно фиксировался термоклеем.

Для изнашивания образца было разработано специальное приспособление, схема конструкции которого приведена на рисунке 1.

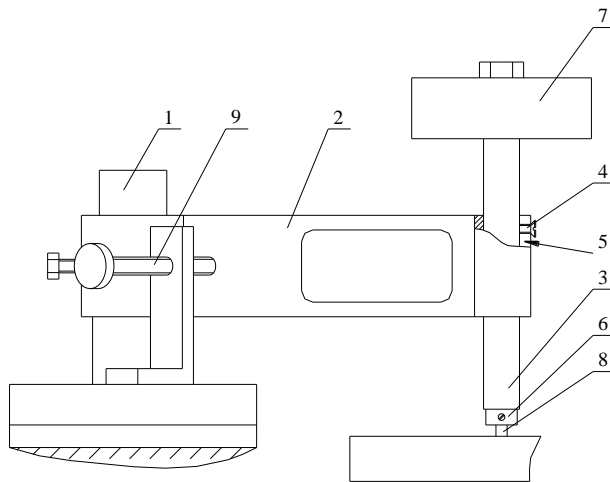


Рис. 1. Схема конструкции приспособления для изнашивания образца

Приспособление состоит из стойки 1 с закрепленным на ней поворотным кронштейном 2. Поворот кронштейна 2 позволяет устанавливать образец в различных радиальных положениях. В кронштейне 2 выполнено отверстие, в котором устанавливается по скользящей посадке шток 3. Угловое положение штока 3 относительно кронштейна 2 определяется с помощью винта 4, перемещающегося по продольному пазу 5. Винт 4 стопорится с помощью серебряного припоя. Державка 6 вставляется по скользящей посадке в осевое отверстие, выполненное в нижней части штока 3, и фиксируется винтом. Угловое положение державки 6 относительно штока 3 поддерживается постоянным при переустановке за счет совмещения нанесенных на них меток. На верхнем конце штока 3 закрепляется груз 7, создающий статическую нагрузку на образец 8 в процессе износа. Вес этого груза составлял для всех экспериментов 10,6 Н. Перед проведением экспериментов образец 8 прирабатывался на одной из укатанных дорожек. Смещение кронштейна 2 под действием сил трения, возникающих в процессе обработки, предотвращается ограничительными винтами 9.

Величина износа образца измерялась через интервалы времени от 1 до 4 мин (в зависимости от интенсивности износа) при частоте вращения диска 1000 об/мин.

При включении и выключении привода станка шток с изнашиваемым образцом приподнимался над поверхностью диска, чтобы исключить износ при переменной скорости вращения и возможность открепления или разрушения образца под действием усилий, возникающих в результате ускоренного вращения диска.

Время изнашивания контролировалось с помощью секундомера «Агат».

Измерение величины износа производилось линейным методом. Для этого было разработано специальное измерительное приспособление, схема конструкции которого приведена на рисунке 2.

Приспособление состоит из станины 1, в отверстие которой установлена пятка 2, определяющая при измерении осевое положение штока 3. На станине 1 также закреплена с помощью термоклея магнитная призма 4, лишаящая шток 3 двух вращательных и двух поступательных степеней свободы. Угловое положение штока 3 относительно призмы 4 определяется с помощью винта 5, который доводится путем вращения штока 3 до упора в опорную поверхность призмы 4. Таким образом, шток 3 лишается при измерениях шести степеней свободы, т.е. имеет место полное базирование. С магнитной призмой 4 связана стойка 6, на которой крепится державка 7 с многооборотным индикатором 8 типа 1 МИГ. При установке

штока 3 в приспособление измерительный наконечник 9 отводится с помощью арретира 10. Величина линейного износа определяется как разность показаний индикатора 8 до и после изнашивания образца.

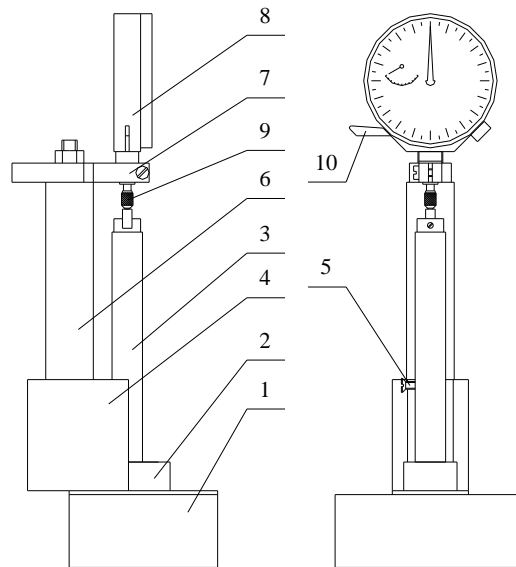


Рис. 2. Схема конструкции приспособления для измерения величины износа

По результатам измерений строилась кривая зависимости интегрального износа образца от времени. Так как для различных дорожек вследствие разности линейных скоростей вращения путь, проходимый образцом за единицу времени и определяющий величину износа, оказывался неодинаковым, то износостойкость алмазосодержащего слоя пересчитывалась в метрах пути. Подобный подход распространен в технологии машиностроения, где используется, в частности, показатель износа режущего инструмента на километр пути, т.е. удельный износ.

Качество обработки поверхностей образцов оценивалось путем измерения параметра шероховатости  $R_a$  на профилографе-профилометре модели 252. Измерение производилось в направлении, перпендикулярном следам обработки.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Анализ наблюдения за процессом изнашивания образцов, а также анализ типичной кривой зависимости интегрального износа образца от времени изнашивания, представленной на рисунке 3, позволяет выделить три характерных этапа процесса шлифования на ограночном диске:

1) на начальном этапе процесса изнашивания скорость износа образца сравнительно мала, что объясняется погружением вершин алмазных зерен под поверхность клевого слоя. Клевым слоем имеет при этом черный глянцевый цвет, характерный для укатанного диска;

2) при увеличении продолжительности обработки наступает вторая стадия, характеризующаяся абразивным изнашиванием клевого слоя продуктами разрушения образца и его термической деградацией под действием высоких температур, возникающих в результате трения. Эти явления приводят к вскрытию вершин алмазных зерен, что в свою очередь вызывает увеличение производительности обработки. При повышении интенсивности износа образца происходит пропорциональное увеличение скорости износа клевого слоя, сопровождающееся вскрытием новых зерен, т.е. дальнейшим самозатачиванием инструмента. Поверхность диска на этапе интенсивного самозатачивания приобретает матовый серый цвет, при этом режущая способность принимает максимальное значение;

3) наступление третьей стадии характеризуется разрушением алмазосодержащего слоя и вскрытием чугунной основы диска. Начало этой стадии соответствует периоду стойкости диска. На поверхности диска с частично разрушенным алмазосодержащим слоем появляются блестящие царапины, а шлифование образца сопровождается сильным нагревом до красного свечения и интенсивными вибрациями. Огранка алмазов при подобном состоянии слоя становится невозможной, так как не обеспечивается требуемая чистота поверхности и появляется дефект огранки в виде седины. При шлифовании образцов из корунда участки их поверхности, имевшие при обработке контакт с разрушенным слоем, принимали матовый цвет. При этом нагрев образца имел локальный характер и наблюдался именно в зоне контакта.

При проведении экспериментов также было отмечено, что использование УЗК приводит к подавлению вредных низкочастотных вибраций, возникающих в процессе укатки из-за нежесткости системы.

Это проявлялось в снижении уровня шума по сравнению с укаткой в обычных условиях. Подавление низкочастотных вибраций в совокупности со снижением сил трения существенно уменьшает риск повреждения напыленного алмазно-клеявого слоя, что является дополнительным доводом в пользу эффективности применения ультразвука в процессе укатки.

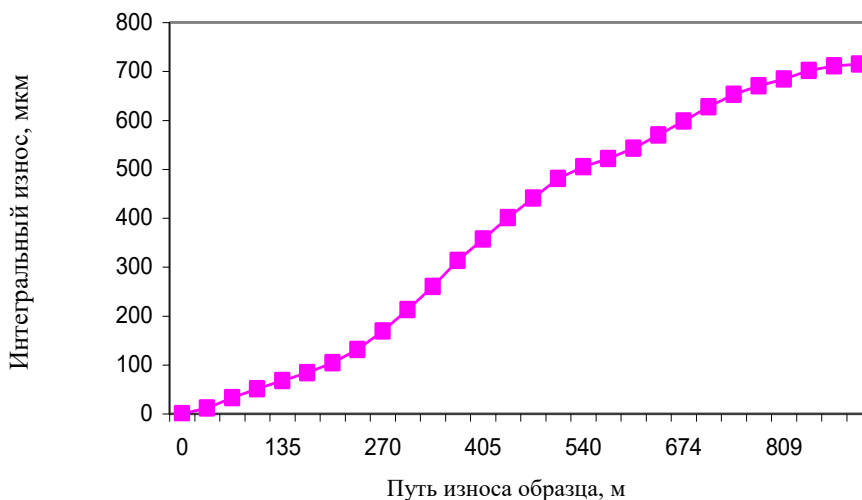


Рис. 3. Зависимость интегрального износа образца от времени

Как показали эксперименты, качество формирования алмазосодержащего слоя существенно зависит от степени износа деформирующего инструмента, толщины клеявого слоя и равномерности его напыления. При приближении формы инструмента к полному конусу в окрестности его вершины возникает значительное контактное давление, что приводит к срыву клеявого слоя. При наличии биения инструмента его вершина начинает резать полотно диска, оставляя на нем глубокие царапины. При малой толщине напыленного слоя происходит его выгорание под действием высоких температур, возникающих в процессе укатки. При этом клей переходит в сажеобразное состояние и легко удаляется с поверхности диска, обнажая чугунную основу. При чрезмерно большой толщине слоя тепловой энергии, возникающей в процессе укатки, оказывается недостаточно для перехода клея в состояние резита и диск не принимает характерного черного цвета. В случае неравномерного распределения клея по поверхности диска некоторые из ее участков приобретают после укатки характерный черный цвет, в то время как другие участки, на которых клеевой слой имеет большую толщину, не прокатываются.

Влияние отмеченных факторов на процесс укатки сложно учесть при проведении экспериментов. В связи с этим для количественной оценки влияния УЗК на эксплуатационные показатели инструмента были использованы относительные величины, например, коэффициент влияния УЗК на износостойкость определялся по формуле:

$$K_T = \frac{T_1 - T_0}{T_1} \cdot 100 \%,$$

где  $T_0$  – период стойкости диска при укатке без УЗК;  $T_1$  – период стойкости диска при укатке с УЗК.

Для определения периода стойкости по кривым интегрального износа находился момент времени, в который значение скорости износа (минутного износа) становилось меньше 20 % от среднего значения скорости износа за соответствующий период.

В таблице 2 приведены значения коэффициента влияния УЗК на период стойкости дисков для различных режимов укатки.

Таблица 2

Значения коэффициента влияния УЗК на период стойкости

№ режима укатки	Коэффициент влияния, %
1	10
2	50
3	33
4	42
5	34

Анализ приведенных данных показывает, что из исследованных режимов укатки наиболее рациональным является режим № 2 (0,1 МПа, 3 рабочих хода).

Зависимость периода стойкости от давления при укатке имеет в исследованном диапазоне давлений убывающий характер, что можно объяснить снижением амплитуды колебаний и, как следствие, снижением эффективности применения УЗК с ростом нагрузки.

Скорость вращения диска при укатке оказывает существенное влияние на качество сформированного алмазосодержащего слоя, так как определяет скорость износа балласа и, соответственно, интенсивность тепловыделения, обусловленного этим износом. При использовании традиционной схемы укатки с постоянной частотой вращения диска линейная скорость перемещения балласа относительно поверхности диска существенно изменяется в зависимости от его радиального положения, что может проявляться в недостаточном качестве укатки центральной зоны рабочей поверхности. В связи с этим можно дать рекомендации о необходимости управления факторами, влияющими на качество укатки, в частности, частотой вращения диска и давлением в пневмосистеме, в зависимости от радиального положения деформирующего инструмента. Рациональная скорость вращения при укатке с применением УЗК должна быть согласована с частотой колебаний инструмента, чтобы обеспечить перекрытие смежных областей контакта инструмента с поверхностью диска в условиях их разрывного взаимодействия [3, 5].

Согласно нашим расчетам [5] при частоте УЗК, равной 22 кГц, скорость вращения должна составлять порядка 12 м/с, что соответствует изменению частоты вращения диска при перемещении инструмента от периферии к центру в диапазоне значений от 750 до 1400 об/мин.

Шероховатость поверхностей образцов, обработанных на диске с оптимальной стойкостью, в среднем составила 0,115 мкм по параметру  $R_a$  и обусловлена в основном наличием направленных следов обработки, которые возникают вследствие отсутствия движения подачи образца. При огранке бриллиантов кристалл алмаза имеет качательное движение подачи относительно поверхности диска, и в этом случае следует ожидать снижения шероховатости по сравнению с приведенным значением.

#### Выводы

1. На основе предложенной методики оценки эксплуатационных показателей ограночных дисков и с использованием специально созданного экспериментального комплекса получены данные о влиянии УЗК на показатели алмазосодержащего слоя, формируемого на рабочих поверхностях дисков в процессе укатки, и установлены рациональные режимы выполнения этой операции, обеспечивающие высокий уровень эксплуатационных показателей.

2. Показано, что применение УЗК в процессе укатки позволяет повысить стойкость ограночных дисков в 2 раза, обеспечивая при этом требуемое качество обработки поверхностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бекиш, Ю.Н. Композиционное покрытие никель – бор – алмаз / Ю.Н. Бекиш, Т.В. Гаевская, Л.С. Цыбульская // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2006. – С. 259.
2. Епифанов, В.И. Технология обработки алмазов в бриллианты / В.И. Епифанов, А.Я. Песина, Л.В. Зыков. – М., 1982. – 335 с.
3. Исследование возможности применения ультразвуковых колебаний при укатке ограночных дисков: отчет о НИР (заключ.); науч. рук. В.А. Цымбалист. – Барнаул, 1983. – 52 с. – № ГР 81078073.
4. Киселев, М.Г. Исследование особенностей подготовки поверхности ограночных дисков методом свободного притира / М.Г. Киселев, Д.А. Степаненко, Т.В. Корзей // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2006. – С. 282 – 283.
5. Киселев, М.Г. Расчет рациональных частот вращения ограночных дисков при их укатке с ультразвуком / М.Г. Киселев, Д.А. Степаненко // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – № 6. – 2005. – С. 54 – 57.

Поступила 07.06.2007