

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. Федорович, И. Н. Пыжов, Е. А. Бабенко, В. Г. Клименко

1. Постановка проблемы. На настоящий момент одним из наиболее используемых методов формообразования лезвийных инструментов и других изделий из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) остается шлифование кругами на основе шлифпорошков алмаза. Этот метод имеет широкие технологические возможности и может быть применен для обработки практически любых конструкционных и инструментальных материалов (от сверхмягких до сверхтвердых [1]). В связи с этим изыскание дополнительных возможностей для повышения эффективности этого процесса является актуальной проблемой.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Особенностью процесса алмазного шлифования ПСТМ является отсутствие его устойчивости, поскольку он характеризуется периодичностью изменения значений выходных показателей во времени [2], что связано с нестабильностью процесса самозатачивания алмазных зерен круга. В первую очередь это обстоятельство отрицательно сказывается на качестве обработанной поверхности.

Для обеспечения постоянства во времени показателей качества процесса формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ необходимо в максимальной степени реализовать на практике условия устойчивого протекания процессов их шлифования. В технической литературе, ориентированной на технологию машиностроения [3], уже имеется сформулированное определение понятия точности и устойчивости технологических процессов, и выполнена классификация их по видам устойчивости. При этом устойчивость техпроцесса связывают в первую очередь с точностью механической обработки, которая, как известно, является одним из основных объектов внимания технолога. Глубокий анализ точности технологического процесса возможен только на основе статистического исследования того размера, который формируется данным технологическим процессом.

По устойчивости технологические процессы можно разделить на полностью устойчивые, устойчивые по рассеиванию и неустойчивые (рис. 1) [4].



Рис. 1. Укрупненная классификация технологических процессов обработки по устойчивости

Полностью устойчивые процессы те, в которых за время изготовления изделий (большая выборка) значения числовых характеристик размера детали (среднего арифметического \bar{X} и выборочного среднего квадратического отклонения S) остаются неизменными. Процессы, устойчивые по рассеиванию, сохраняют постоянной только характеристику рассеивания \bar{X} , а среднее арифметическое S изменяется. Если \bar{X} и S меняются во времени, то такие процессы называются неустойчивыми.

Приведенная классификация технологических процессов по характеру поведения во времени числовых характеристик размера – это классификация с математической точки зрения.

3. Цель исследования. Целью настоящей работы является изыскание путей стабилизации комбинированного процесса шлифования и решения на этой основе проблемы формообразования лезвийных инструментов и изделий из ПСТМ.

4. Основные материалы исследования. Классический подход в технологии машиностроения состоит в том, что в производстве не должно быть неустойчивых технологических процессов. Однако на практике имеется много технологических процессов, устойчивых по рассеиванию, у которых центр группирования смещается в процессе обработки в основном за счет износа режущего инструмента, но характеристика рассеивания остается неизменной [3].

Применительно к формообразованию лезвийных инструментов из ПСТМ (и особенно на основе алмаза), обладающих уникальными физико-механическими свойствами и в первую очередь самой высокой в природе микротвердостью, говорить о полной устойчивости по точности сложно ввиду аномально высоких значений размерного износа инструмента второго порядка (линейного износа алмазных кругов). Это не позволяет при работе на предварительно настроенных станках [4] выполнить условие $\bar{X} = \text{const}$. Поэтому речь может идти об устойчивости по рассеиванию ($S = \text{const}$). Однако применительно к качеству обработанной поверхности можно говорить и о полной устойчивости.

Известно [3, 5], что довести техпроцесс до устойчивого состояния можно, выдержав следующие требования (рис. 2):

- устранив нестабильность показателей точности станка;
- получив стабильные по точности и физико-механическим свойствам заготовки;
- достигнув стабильности работы инструмента.

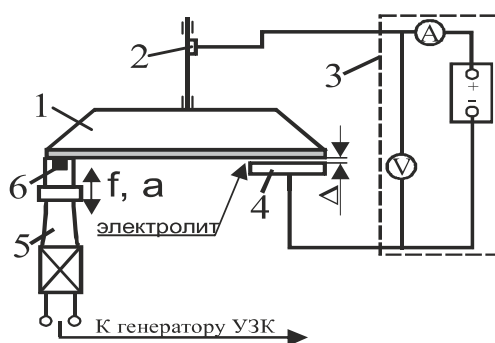


Рис. 2. Схема способа алмазного шлифования с управлением РПК:
1 – алмазный круг; 2 – токосъемник; 3 – источник питания; 4 – правящий катод;
5 – устройство ультразвуковой правки; 6 – ПСТМ

В данной работе рассматривается понятие технологической устойчивости. Речь идет о создании условий для обеспечения устойчивости выходных показателей процессов шлифования, которые являются основой проектируемых технологических процессов изготовления изделий из ПСТМ.

С учетом того, что один из основных факторов, обеспечивающих технологическую устойчивость, связан со стабильностью работы алмазного круга, эти условия сформулированы следующим образом:

- создание условий для обеспечения технологической устойчивости процесса шлифования еще на этапе спекания алмазоносного слоя круга (который сопровождается высокими значениями силовой и тепловой напряженности) путем сохранения его неизменной характеристики;
- обеспечение непрерывности процесса самозатачивания алмазных зерен в процессе шлифования;
- обеспечение высокого уровня износостойкости режущего рельефа алмазного круга;
- наличие высокоэффективных способов управления режущим рельефом и профилем алмазных кругов и устройств для их осуществления;
- использование автоматической следящей системы для надежного поддержания постоянства во времени параметров, характеризующих состояние РПК.

С целью установления физических особенностей в зонах контакта покрытого зерна со связкой и обрабатываемым ПСТМ и выявления на этой основе возможных резервов процесса шлифования были выполнены теоретико-экспериментальные исследования НДС системы «связка круга – алмазное зерно – рельефное толстослойное покрытие – обрабатываемый материал» с учетом наличия металлофазы в зерне. Расчеты показали, что наличие металлического покрытия на алмазном зерне вносит существенные коррективы в НДС этой системы [4].

Установлено, что важную роль в обеспечении технологической устойчивости играют толстослойные рельефные металлические покрытия на алмазных зернах. 3D-анализ напряженно-деформированного состояния показал, что их наличие на алмазном зерне при тех же условиях термосилового нагружения системы существенно уменьшает величину напряжений на границе «зерно-связка». Это можно объяснить значительным увеличением поверхности контакта покрытого зерна со связкой круга, что в свою очередь является подтверждением факта лучшего удержания зерен в связке, а следовательно, повышения их режущего ресурса. С другой стороны, покрытие способствует сохранению целостности алмазного зерна при спекании, что в свою очередь является одним из факторов обеспечения стабильности процесса шлифования.

Установлено, что появление площадок износа на вершинах зерен согласно реализации явления приспособляемости снижает и впоследствии полностью исключает ощутимый съем объемов поликристалла [1]. Для обеспечения непрерывности процесса самозатачивания алмазных зерен в процессе шлифования и высокого уровня износостойкости режущего рельефа алмазного круга необходимо выполнить одно из основополагающих условий. Оно заключается в создании условий для непрерывного самозатачивания круга при условии, что высота выступания зерен над уровнем связки имеет некое минимальное значение. При этом в контакте с ПСТМ будет находиться максимальное количество алмазных зерен. Другими словами, таким способом можно регулировать величину их концентрации, а следовательно, и износостойкость режущего рельефа круга.

В связи с этим нами предложена идея [1] сочетания способов непрерывного электрохимического удаления связки с рабочей поверхности круга (РПК) и ультразвукового воздействия на алмазные зерна [6], эффект от которого в условиях высокоскоростного контактного взаимодействия двух высокотвердых материалов проявляется наиболее ярко [7]. Для обеспечения требуемого соответствия скоростей износа режущего рельефа и электрохимического удаления связки круга, которое можно считать основополагающим в плане практической реализации условий, обеспечивающих технологическую устойчивость, необходимо использовать схему автоматического поддержания плотности технологического тока в цепи управления режущим рельефом круга на металлической связке [1].

В то же время ультразвуковые колебания позволяют не только исключить образование на алмазных зернах площадок износа, но и обеспечить непрерывное формирование на них микро- и субмикрорельефа [7], что в конечном итоге позволяет обеспечить высокую интенсивность съема припуска.

Таким образом, методология управления режущими свойствами кругов в процессе шлифования должна базироваться на формировании и поддержании в течение всего периода обработки энергетически неустойчивых состояний зерен и их структуры путем дозированного воздействия, направленного на предотвращение топографической и структурной приспособляемости рабочей поверхности алмазных кругов. Достичь этого выбором характеристик кругов и режимов шлифования практически невозможно. *Принудительное формирование режущего субмикрорельефа алмазных зерен.* Поскольку главной причиной потери режущих свойств алмазными кругами при шлифовании ПСТМ является массовое образование на зернах площадок износа [8], основным способом повышения эффективности процесса является формирование на зернах необходимых параметров микро- и субмикрорельефа.

Предварительные исследования процесса шлифования с переменным давлением в контакте в условиях управления режущим рельефом кругов показали его высокие перспективы даже при низких частотах прикладываемой нагрузки (таблица, условия обработки: круг 12A2–45° 150 × 10 × 3 × 32 АС6 160/125 М1-01 100 %, $V_k = 20$ м/с; $S = 1$ м/мин; $I = 70$ А; $S_k = 20$ мм²):

- 1) шлифование с постоянным давлением в контакте $P_{\text{пост}} = 70$ Н ($P_{\text{доп}} = 0$);
- 2) шлифование с постоянным давлением $P_{\text{пост}} = 100$ Н ($P_{\text{доп}} = 0$);
- 3) шлифование с переменным давлением в контакте $P_{\text{пост}} = 30$ Н, $P_{\text{доп}} = 40$ Н ($P_{\text{сум}} = 70$ Н, $f = 5$ Гц; $A = 6$ мм).

При этом производительность процесса Q возрастает, а значения удельного расхода и удельной себестоимости снижаются примерно в два раза (табл. 1).

Таблица 1

Показатели различных способов шлифования СКМ-Р

Способ обработки	Значения выходных показателей обработки		
	Q , мм ³ /мин	q , мг/мм ³	$C_{вд.}$ коп/мм ³
1	2,3	73	125
2	3,5	44	85
3	4,3	35	70

Эти данные, в частности, свидетельствуют о том, что в условиях взаимодействия двух материалов, имеющих предельную твердость, именно переменная нагрузка на алмазные зерна способна эффективно обеспечивать непрерывность процесса их самозатачивания, что, как отмечалось выше, является основополагающим условием стабилизации процесса обработки в целом.

В связи с изложенным было выдвинуто предположение о том, что в условиях непрерывного электрохимического удаления связки круга наиболее целесообразно управлять формированием субмикрорельефа на зернах круга с помощью ультразвуковых колебаний, что можно реализовать как в зоне обработки, так и в автономной зоне. В первом случае в качестве ударника выступает сам обрабатываемый ПСТМ (см. рис. 2), а во втором – специальный инструмент-ударник, например, с прочными и мелкими алмазными зернами.

Наиболее эффективным представляется способ ультразвукового шлифования, но только не с продольными колебаниями, как это обычно принято для улучшения качества обработки [9], а с поперечными, создающими дополнительные ударные нагрузки в контакте «зерно–ПСТМ». Это, с одной стороны, интенсифицирует процесс съема припуска, а с другой – обеспечивает процесс формирования на поверхностях износа зерен режущего микро- и субмикрорельефа. Естественно, такой способ эффективен только в тех случаях, когда дополнительная энергия ультразвука, вводимая в зону шлифования, не будет приводить к образованию дефектного слоя в процессе ультразвукового шлифования.

Многочисленные модельные эксперименты показали высокую эффективность формирования на зернах субмикрорельефа как фактора одновременного повышения как производительности процесса шлифования ПСТМ, так и коэффициента использования алмазных зерен, так как алмазное зерно остается активно работающим в течение более продолжительного времени.

Экспериментально установлено, что применительно к обработке ПСТМ на основе алмаза использование энергии ультразвука в сочетании с непрерывной электрохимической правкой круга позволяет до семи раз повысить производительность шлифования при одновременном снижении удельного расхода алмазов круга до десяти раз.

Это объясняется тем, что в работе участвует предельно возможное количество зерен круга, а оптимальное значение силы в цепи управления сдвигается в большую сторону (с 55 до 100А).

Выполненные исследования позволили разработать автоматическую систему непрерывного поддержания режущего рельефа и профиля круга в требуемом состоянии практически на протяжении всего периода работы круга. Это особенно важно в случае применения сложнопрофильных кругов. В основу этого способа положено пять главных принципов:

- 1) применение токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза, в результате чего обеспечивается возможность реализации малых значений межэлектродного зазора (МЭЗ);
- 2) использование кругов с предварительно сформированным профилем, что позволяет считать площадь в зоне управления величиной постоянной;
- 3) обеспечение равновесного МЭЗ перед началом управления РПК за счет правки ЭИ новым кругом на обратной полярности;
- 4) учет факта возможного изменения электропроводности электролита в процессе формообразования путем использования датчика электропроводности электролита;
- 5) использование автоматической следящей системы.

Схема способа представлена на рис. 3. Его характерная особенность заключается в том, что перед формообразованием токопроводящего круга на основе микропорошков алмаза (уже имею-

щего заданный точный профиль) включают «обратную» полярность (круг – «←»), а катод – «→») источника питания 6 и с помощью этого круга подправляют рабочую поверхность катода, предварительный профиль которой близок к своему окончательному состоянию.

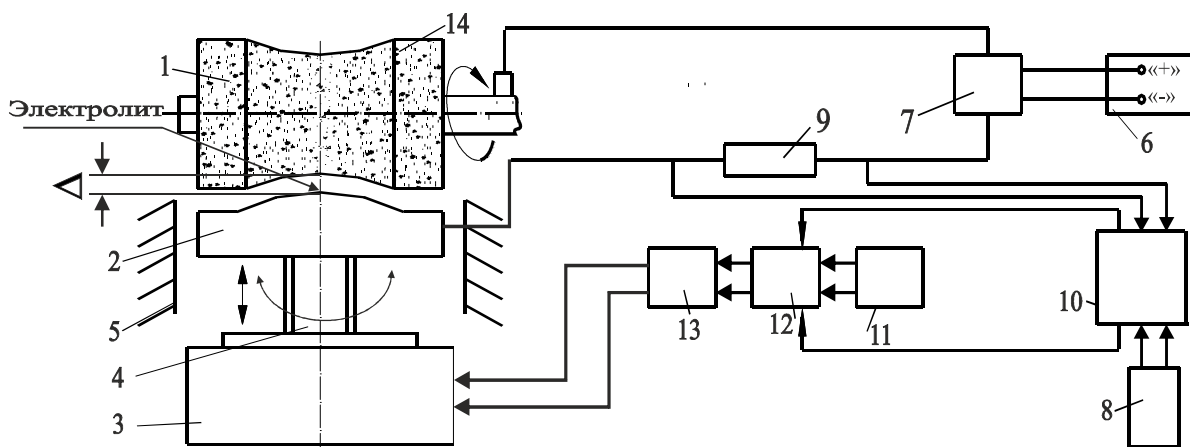


Рис. 3. Схема способа алмазного шлифования с управлением РПК с автоматической следящей системой

При этом режимы правки катода 2, установленного на направляющих 5, аналогичны рабочим режимам правки круга 1. Это позволяет решить две важные задачи: во-первых, получить необходимый профиль катода (который расчетным методом получить довольно сложно) с одновременной компенсацией различного рода погрешностей (например, погрешность установки), а во-вторых, обеспечить равновесный МЭЗ.

Затем осуществляют рабочий процесс правки круга на «прямой» полярности, для чего используется реверсивный переключатель 7. Особенностью этого способа является то, что, во-первых, в процессе правки катода устанавливается МЭЗ, имеющий одинаковую электрическую проводимость, а следовательно, и одинаковую плотность тока практически в любой его точке. По мере износа круга этот зазор поддерживается неизменным с помощью реверсивного электродвигателя 3, управляемого блоком автоматики, с помощью пары «винт-гайка», что также не допускает возможности искажения профиля рабочей поверхности катода в результате его соприкосновения с кругом.

Как видно из рисунка, правка круга производится в автоматическом режиме. Еще одной важной особенностью данного способа является то, что в электрическую схему введен датчик электропроводности электролита 11, что позволяет существенно повысить надежность процесса. Сигналы от шунта 9 и источника стабилизированного напряжения 8 сравниваются в устройстве 10. Результирующий сигнал поступает в сумматор 12, где корректируется в зависимости от величины сигнала с датчика 11. Это продиктовано тем, что как уже отмечалось выше, с изменением температуры электролита меняется его электропроводность, а следовательно, и плотность технологического тока. В противном случае обычный блок автоматики отреагирует на этот факт изменением величины МЭЗ, что в свою очередь нарушит точность профиля круга.

Результирующий сигнал с блока 12 усиливается усилителем 13, и в зависимости от полярности этого сигнала электродвигатель вращается в одну или другую сторону, поддерживая (по мере износа круга и изменения электропроводности электролита) величину МЭЗ в заданных пределах. Практика использования предложенного способа в производственных условиях подтвердила его высокую эффективность.

Выводы и перспективы развития. Таким образом, проведенные исследования позволили в значительной мере решить проблему обработки труднообрабатываемых материалов, в том числе и поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора. В дальнейшем представляют интерес исследования напряженно-деформированного состояния системы «ПСТМ – алмазное зерно – связка круга» в условиях наложения ультразвуковых колебаний с целью установления на этой основе оптимальных режимов шлифования.

Список литературы

1. Грабченко, А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А. И. Грабченко. – Харьков : Вища шк., 1985. – 184 с.
2. Грабченко, А. И. Повышение режущей способности токопроводящих алмазных кругов в комбинированных процессах шлифования ПСТМ / А. И. Грабченко, И. Н. Пыжов, Д. М. Алексеенко // Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки». – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 105–116.
3. Точность производства в машиностроении и приборостроении / А. Н. Гаврилов, Н. А. Бородачев, Р. М. Абдрашитов [и др.] ; под ред. А. Н. Гаврилова. – М. : Машиностроение, 1973. – 567 с.
4. Грабченко, А. И. Особенности использования микропорошков алмаза в кругах на металлических связках / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, И. Н. Пыжов, В. А. Федорович // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць / Донбаська державна машинобудівна академія. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – Вип. 27. – С. 3–11.
5. Сизый, Ю. А. Основы научных исследований в технологии машиностроения : учеб. пособие / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков : УкрГНТЦ «Енергосталь»; Изд-во САГА, 2007. – 212 с.
6. Кумабэ, Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ ; пер. с яп. С. Л. Масленникова ; под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. – М. : Машиностроение, 1985. – 424 с.
7. Федорович, В. А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов / В. А. Федорович // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып. 45. – С. 26–28.
8. Семко, М. Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. Г. Ходоревский. – Харьков : Вища шк., 1980. – 192 с.
9. Марков, И. А. Ультразвуковая обработка материалов / И. А. Марков. – М. : Машиностроение, 1980. – 237 с.
10. Ящерицын, П. И. Профилирование алмазно-абразивных инструментов пластическим деформированием / П. И. Ящерицын, В. Д. Дорофеев, Г. Н. Гринин. – Саратов : Изд-во Саратов. ун.-та, 1982. – 112 с.

УДК 621.923

Федорович, В. А.

Обеспечение устойчивости процесса алмазного шлифования поликристаллических сверхтвердых материалов / В. А. Федорович, И. Н. Пыжов, Е. А. Бабенко, В. Г. Клименко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 74–80.

Федорович Владимир Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
Национальный технический университет «ХПИ»,
61000, Украина, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21.
+380577001564
E-mail: fedorovich@kpi.kharkov.ua

Пыжов Иван Николаевич

доктор технических наук, профессор,
Национальный технический университет «ХПИ»,
61000, Украина, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21.
+380577001564
E-mail: diamet@inbox.ru

Бабенко Евгений Александрович

аспирант,
Национальный технический университет «ХПИ»,
61000, Украина, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21.
+380577001564
E-mail: eugen.babenko@gmail.com

Клименко Виталий Григорьевич

старший преподаватель,
Полтавский национальный технический университет
им. Ю. Кондратюка,
36011, Украина, г. Полтава, Первомайский проспект, 24.
E-mail: klim_poltava@mail.ru

V. Fedorovich

doctor of technical sciences, professor,
National Technical University «KPI»
61000, Ukraine, Kharkov, Frunze st., 21.
+380577001564
E-mail: fedorovich@kpi.kharkov.ua

I. Pyzhov

Dr. Sc. Science,
National Technical University «KPI»
61000, Ukraine, Kharkov, Frunze st., 21.
+380577001564
E-mail: diamet@inbox.ru

E. Babenko

a graduate student
National Technical University «KPI»
61000, Ukraine, Kharkov, Frunze st., 21.
+380577001564
E-mail: eugen.babenko@gmail.com

V. Klimenko

art. teacher,
Poltava National Technical University
named Yuri Kondratyuk,
36011, Ukraine, Poltava, Pervomajskij avenue, 24.
E-mail: klim_poltava@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты теоретико-экспериментальных работ, посвященных разработке и исследованию прогрессивных комбинированных процессов шлифования, обеспечивающих устойчивость процесса обработки труднообрабатываемых материалов, в том числе и поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора.

Ключевые слова: обрабатываемый материал, комбинированный процесс шлифования, алмазный круг, рабочая поверхность круга, автономная зона, металлическая связка круга, правящий катод, ультразвуковые колебания, межэлектродный зазор.

Abstract. The results of theoretical and experimental work on the research and development of advanced composite grinding processes that sustain the processing of hard materials, including polycrystalline superhard materials based on diamond and dense modifications of boron nitride.

Key words: processed material, the combined process of grinding, diamond grinding wheel, the working surface of the circle, the autonomous zone, metal bond terms, the ruling cathode, ultrasonic vibration, the electrode gap.