

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.923

А. И. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, **И. Н. ПЫЖОВ**, д-р техн. наук,
В. А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук, Харьков, Украина

К МЕТОДОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЛЕЗВИЙНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ ПСТМ

Викладена методологія вирішення проблеми формоутворення лезових інструментів з ПНТМ заснована на використанні принципу вибіркової переважної доцільної послідовності реалізації потенціалу процесів електроерозійної обробки і алмазного шліфування з додатковою електрохімічною або електроіскровою дією на зв'язку струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу. З позиції інжинірингу якості доведена конкурентоспроможність запропонованого підходу.

Изложена методология решения проблемы формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ основанная на использовании принципа выборочной предпочтительной целесообразной последовательности реализации потенциала процессов электроэрозивной обработки и алмазного шлифования с дополнительным электрохимическим или электроискровым воздействием на связку токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза. С позиции инжиниринга качества доказана конкурентоспособность предложенного подхода.

The concept of sample preferred purposeful realization of an electroerosion processing potcutical and diamond grinding with an additional intensive electrochemical or local electrospark action to the bond of a wheel is introduced for achievement of high side of quality and dimensional accuracy of edge tools from superhard polycrystals under application of conducting wheels on the base of the diamond classified flours with relief thick metal coatings. The practical implementation of this concept is carried out owing to a number of the technical decisions enclosed by more than twenty author's certificates.

1. Постановка проблемы. Известно, что лезвийный инструмент из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) уже нашел широкое применение в различных отраслях промышленности. Особый интерес при этом представляет прецизионный (в том числе и сложнопрофильный) алмазный инструмент, используемый на чистовых и финишных операциях к которому предъявляются повышенные требования по точности и качеству.

На рис. 1 приведен эскиз достаточно точного алмазного резца, применяемого в радиоэлектронной промышленности. С его помощью

ведется чистовая обработка канавок на изделиях из латуни на автоматической линии по технологии фирмы RADIALL (Франция).

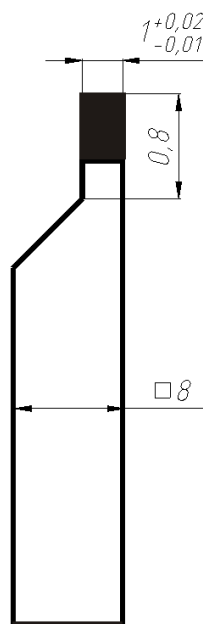


Рисунок 1 – Прецизионный алмазный канавочный резец

Сложность изготовления таких инструментов заключается с одной стороны в их невысокой жесткости, а с другой - в малой площади контакта алмаза с поверхностью державки (площадь пайки). В результате этого при изготовлении таких инструментов обычными методами могут возникать значительные сколы на режущих кромках, а также произойти нарушение контакта алмазного поликристалла с державкой под воздействием значительных усилий резания и температур.

При обработке «всухую» возможно также расплавление низкотемпературного припоя (например, на основе серебра). Кроме этого, существенные трудности изготовления связаны с высокой размерной точностью (в данном случае допуск на обработку $T=0,03\text{мм}$). Здесь следует понимать, что данные значения допуска можно считать достаточно «жесткими» даже при изготовлении инструментов из обычных инструментальных материалов. При обработке же алмаза практически нет соответствия между подачей по лимбу и величиной реального съема припуска в силу наличия явления скачкообразности самозатачивания круга. При этом съем припуска в момент самозатачивания алмазного круга может достигать 0,1мм и более. Результатом этого является значительный процент брака при изготовлении лезвийных инструментов по причине выхода их размеров за пределы установленного поля допуска. Это требует изменения технологии производства прецизионного алмазного инструмента. В ее основу должны быть положены методы, которые с одной стороны не создают критических значений сил и температуры в зоне шлифования, а с другой способствуют устойчивости процесса обработки.

2. *Анализ последних исследований и публикаций.* Поскольку почти все известные сверхтвердые материалы на основе алмаза являются проводниками электрического тока, то для их рационального

использования с одной стороны и уменьшения величины припуска на чистовой стадии формообразования с другой целесообразно применение электроэрозионной обработки (ЭЭО) на проволочных вырезных станках с ЧПУ [1]. Режимные факторы при этом должны обеспечивать необходимое состояние режущих кромок (величина сколов кромки $v \leq 0,02$ мм). При этом передняя поверхность инструментов затачивается токопроводящим алмазным кругом на основе микропорошков алмаза с рельефными толстослойными покрытиями [2, 3, 4, 5, 6], а задние поверхности в две стадии. Вначале их формируют на проволочно-вырезном электроэрозионном станке под углами на $(1-2)^\circ$ большими, нежели их чертежные значения. Затем, также как и в случае обработки передней поверхности, производят чистовую заточку токопроводящим алмазным кругом на основе микропорошков алмаза с рельефными толстослойными покрытиями. Такой подход можно считать системным т.к. он основан на использовании потенциала различных процессов обработки.

Это позволяет довести размерную точность инструментов до значения 5 мкм при шероховатости обработанной поверхности $Ra=0,02 - 0,04$ мкм.

3. Цель исследования. Целью настоящей работы является установление некоторых особенностей, связанных с системным подходом к процессу формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ и оценка его эффективности в целом на базе использования идеи инжиниринга качества.

4. Основные материалы исследования.

В работе [6] изложены основы методологии решения проблемы формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ основанной на использовании принципа выборочной предпочтительной целесообразной последовательности реализации потенциала процессов электроэрозионной обработки и алмазного шлифования с дополнительным электрохимическим или электроискровым воздействием на связку токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза. Рассмотрим некоторые особенности, связанные с использованием различных процессов обработки на базе которых основана указанная выше методология.

Особенности формирования качества режущих кромок при электроэрозионной обработке токопроводящих ПСТМ. С учетом того, что большинство ПСТМ на основе алмаза, используемых для изготовления лезвийных инструментов, являются проводниками электрического тока благодаря наличию в их составе металлических включений (металлической фазы), была выдвинута идея о возможности сведения к

минимуму применение черного алмазного шлифования путем использования электроэрозионной обработки (ЭЭО) для уменьшения сколов на их режущих кромках. Важность такого подхода приобретает особое значение в случае использования заготовок ПСТМ больших размеров (когда требуется их предварительный раскрой), а также при необходимости получения сложного профиля.

Основное отличие механизма удаления припуска при обработке гетерогенных, какими являются ПСТМ, от гомогенных материалов связано с присутствием алмазных зерен, являющихся диэлектриками, между которыми, как правило, находится некоторое количество металлической связки, наличие которой и делает эти ПСТМ электропроводными.

Схема удаления ПСТМ непрофилированным (проволочным) электродом-инструментом (ЭИ) представлена на рис. 2.

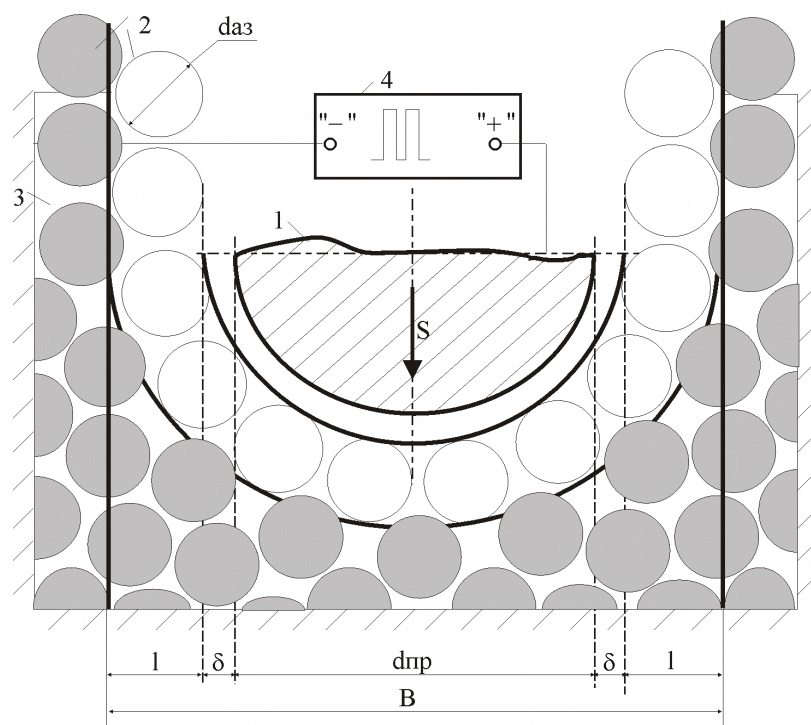


Рисунок 2 – Схема удаления припуска с ПСТМ непрофилированным ЭИ:

- 1 - проволочный ЭИ; 2 - алмазные зерна; 3 - токопроводящая связка;
- 4 - генератор униполярных электрических импульсов.

Установлено, что в силу наличия так называемого «краевого» эффекта режущие кромки представляют собой наиболее уязвимую часть рабочей поверхности лезвийных инструментов из ПСТМ. Как и при обработке других рабочих поверхностей инструментов, качество кромок является функцией многих параметров. Однако их влияние в данном случае проявляется более интенсивно. Можно предположить, что условия,

способствующие увеличению производительности ЭЭО, будут одновременно обеспечивать снижение качества режущих кромок. В качестве основных критериев, характеризующих качество режущих кромок на этапе обработки непрофилированным электродом-инструментом (проволокой), можно принять величину кратеров ν (по аналогии со сколом при шлифовании) от электроэрозионных разрядов и отклонение кромки от прямолинейности (Δ). При этом должно быть выдержано условие $\nu(\Delta) \leq 0,02$ мм.

Производительность ЭЭО ПСТМ во многом обусловлена составом и свойствами компонентов, составляющих структуру самого поликристалла. Основными из них считаются процентное содержание металлической связки в их составе и размер зерен исходного микропорошка сверхтвердого материала [8]. В развитие данных, полученных в работе [8], было высказано предположение об особой роли процентного содержания металлической связки в составе ПСТМ с одной стороны, а с другой предложено использовать для анализа обрабатываемости ПСТМ электрической эрозией такой показатель, как электроэрозионная стойкость материала [1], оцениваемую, например, по критерию Палатника Л.С. Этот критерий учитывает одновременное влияние комплекса физических свойств обрабатываемого материала на его способность противостоять электроэрозионному разрушению.

Согласно формуле Палатника Л.С. электроэрозионная стойкость обрабатываемого материала может быть определена следующим образом:

$$\mathcal{E}_{cm.} = C \cdot \rho \cdot \lambda \cdot T^2 \cdot K, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{cm.}$ - электроэрозионная стойкость; C - удельная теплоемкость, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$; ρ_n - плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; λ - коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $T_{пл}$ - температура плавления, $^\circ\text{C}$; K - постоянный коэффициент, $10^{-8} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^4 / (\text{кДж} \cdot \text{Вт})$.

В таблице 1 приведены расчетные значения $\mathcal{E}_{cm.}$ для материалов, которые могут входить в состав алмазных поликристаллов.

Таблица 1 – Электроэрозионная стойкость обрабатываемых материалов

Обрабатываемый материал	Алмаз	Хром	Никель	Кобальт
$\mathcal{E}_{cm.}$	157	4,2	5,1	4,1

При обработке ПСТМ как гетерогенных материалов это предопределяет опережающее электроэрозионное разрушение связки и, таким образом, способствует реализации механизма удаления обрабатываемого материала, согласно которому зерна сверхтвердого материала, а, скорее всего их части, не успевшие подвергнуться расплавлению или испарению, выпадают в результате электроэрозионного удаления или оплавления связки вокруг них.

Исследования показали, что при небольшом объеме металлической связки с увеличением размеров исходных зерен сверхтвердого материала производительность процесса однозначно снижается (рис. 3, кривая 1).

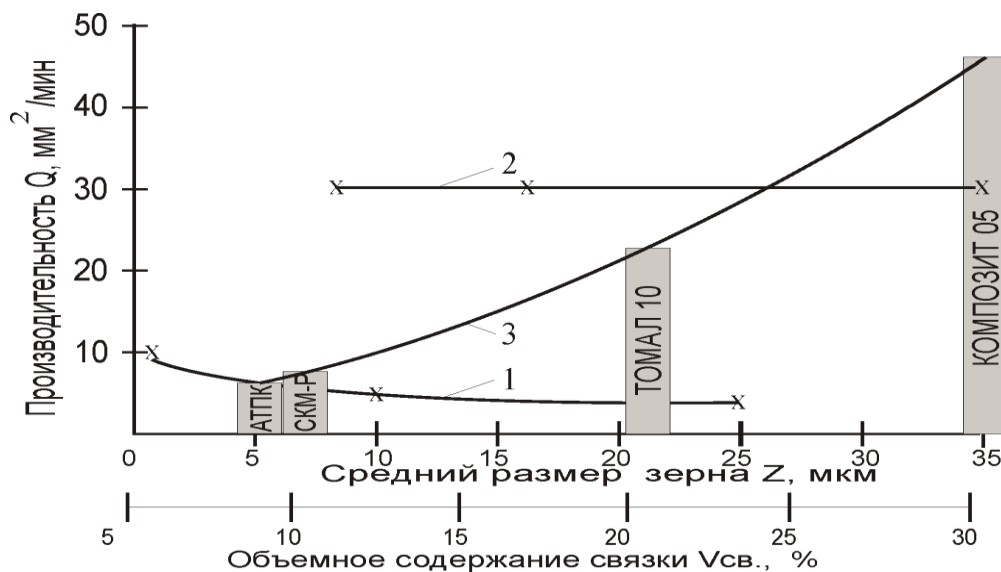


Рисунок 3 – Влияние различных факторов на производительность ЭЭО:

- 1 - $Q = f(Z)$, обрабатываемый материал - синтетический алмаз ($V_{св.} \approx 4 - 13\%$);
- 2 - $Q = f(Z)$, обрабатываемый материал - алмазоносный слой ($V_{св.} \approx 75\%$);
- 3 - влияние обрабатываемый материал (расположение по росту $V_{св.}$).

Однако при преобладающих объемах связки (например, в алмазоносном слое круга на основе микропорошков алмаза имеющем в своем составе 75% связки М2-01) картина резко меняется (рис. 3, кривая 2).

Использование в качестве обрабатываемых образцов алмазоносного слоя круга на металлической связке М2-01 с микропорошками АСН 100% зернистостью $Z=10/7-40/28$ давало возможность обеспечения чистоты эксперимента в плане установления влияния размера зерен на выходные показатели ЭЭО при большом содержании связки. Исследования показали, что увеличение зернистости порошка в указанных пределах при диаметре проволоки 0,25мм практически не сказывается на производительности

обработки. Это связано, по всей видимости, с меньшей эрозионной стойкостью алмазосодержащего слоя круга в целом (из-за малой доли алмазных зерен) с одной стороны, а с другой преимущественным проявлением в таких условиях механизма съема ПСТМ, согласно которому зерна ПСТМ выпадают в результате электроэрозионного удаления окружающей их связки. Эти результаты согласуются с данными зарубежных исследователей. Так, согласно работам [9], [10] производительность ЭЭО синтетического алмаза Syndite СТВ010 (размер исходного микропорошка $\approx 10\text{мкм}$) и СТВ025 (размер исходного микропорошка $\approx 25\text{мкм}$) практически не отличается ($Q = 3,5 - 5,7 \text{ мм}^2 / \text{мин}$ и $Q = 4,0 - 4,2 \text{ мм}^2 / \text{мин}$) уже при содержании кобальта в их составе примерно 8%.

Для подтверждения особой роли металлической связки были проведены эксперименты по ее влиянию на ширину прорезаемого паза изделия.

Согласно рисунку 2 с использованием [7] имеем, что ширина реза может быть определена по выражению:

$$B = d_{np.} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot l, \quad (2)$$

где B - ширина прорезаемого паза; $d_{np.}$ - диаметр электрода-проволоки; δ - величина межэлектродного промежутка; l - глубина лунок от электроэрозионных разрядов.

Известно, что зазор на сторону зависит от величины напряжения на электродах. Эта зависимость линейна и для случая прорезки пазов может быть представлена формулой [11]:

$$a = K_{PЖ} \cdot U_o, \quad (3)$$

где a - величина зазора на сторону, мм; $K_{PЖ}$ - коэффициент, зависящий от вида рабочей жидкости (например, для керосина $K_{PЖ} = 0,125$ [11]); U_o - напряжение на электродах, В.

С другой стороны согласно зависимости (2) можно записать, что:

$$a = \delta + l = \frac{B - d}{2} \quad (4)$$

Из зависимостей (3) и (4) имеем, что ширина прорезаемого паза должна равняться:

$$B = d + 2 \cdot K_{PЖ} \cdot U_o \quad (5)$$

Это значит, что согласно выражениям (3) – (5) значения параметров B и a не должны зависеть от обрабатываемого материала.

Экспериментально установлено, что при обработке ПСТМ на основе алмаза (например, марок СКМ-Р и АТП), имеющих примерно одинаковое объемное содержание связки ($V_{св} \approx 8,5-10\%$), это положение выдерживается ($B \approx 0,33\text{мм}$, $a \approx 0,04\text{мм}$). Однако при обработке ПСТМ на основе кубического нитрида бора (КНБ) марки К-05, имеющего в своем составе гораздо больше связки ($V_{св} \approx 30\%$), ширина паза примерно на 20% больше. В то же время при сопоставимых условиях обработки ПСТМ и, например, алмазоносного слоя круга зернистостью 10/7 ($V_{св} \approx 75\%$), ширины прорезаемых пазов после ЭЭО проволочным ЭИ отличаются еще более существенно ($B \approx 0,45\text{мм}$, $a \approx 0,1\text{мм}$).

Таким образом, полученные результаты подтверждают положение о ключевой роли при электроэрозионной обработке таких показателей, как процентное содержание металлической связки в составе ПСТМ и соотношения значений электроэрозионной стойкости материалов входящих в поликристалл.

В отличие от зернистости порошка исходного материала влияние содержания связки можно проследить даже для различных обрабатываемых материалов (рис. 3, кривая 3). При этом можно утверждать, что с точки зрения производительности процесса увеличение $V_{св.}$ является положительным, а по отношению к качеству обработанной поверхности (и особенно режущих кромок) отрицательным моментом (рис. 3), что соответствует классическим представлениям. Нам представляется, что не столько различием теплопроводности [8], сколько повышенным содержанием металлической связки можно объяснить тот факт, что качество обработки электрической эрозией ПСТМ на основе КНБ хуже, чем у поликристаллов алмаза.

Эти данные согласуются с результатами исследований по влиянию электропроводности ПСТМ на выходные показатели ЭЭО, выполненных в Бирмингемском университете (Англия [12]). Установлено, что в определенном диапазоне значений процентное содержание связки в ПСТМ определяет уровень его электрической проводимости. Эти эксперименты показали, что при одинаковых режимах обработки (сила тока, напряжение, частота импульсов и т. д.) производительность ЭЭО синтетического алмаза Syndite СТВ010 (метод получения – спекание) выше по сравнению с алмазом Cvdite CDE (CVD метод) примерно на 50% при использовании проволочного электрода-инструмента и примерно на 85% при ротационной обработке дисковым ЭИ. Причиной этого авторы считают различия в значениях удельного электрического сопротивления этих материалов

($\rho_{уд.} \approx 58000$ мкОм см у Cvdite CDE и $\rho_{уд.} \approx 12000$ мкОм см у Syndite СТВ010). В то же время качество поверхности лучше у Cvdite CDE ($R_a \approx 0,15$ мкм) по сравнению с Syndite СТВ010 ($R_a \approx 0,20$ мкм). Этот факт можно считать еще одним подтверждением той роли, которую играют такие параметры как объемное содержание связки и соотношение электроэрозионной стойкости ($\mathcal{E}_{ст.}$) зерен исходного материала и металлической фазы.

Типичные картины состояния кромок ПСТМ после ЭЭО представлены на рис. 4.

В общем случае при неизменных электрических режимах качество кромок улучшается по мере уменьшения процентного содержания связки в ПСТМ (в пределах достаточных для нормального протекания ЭЭО) и размеров зерен исходного материала, а также увеличения диаметра проволочного ЭИ и угла заострения режущей кромки. Важна роль распределение связки в ПСТМ, неравномерность которой приводит как к возникновению отклонения режущей кромки от прямолинейности, что особенно характерно для ПСТМ с большим содержанием металлической связки (например, у ПСТМ марки К-05), так и появлению достаточно крупных кратеров (напоминающих сколы после шлифования) и являющихся результатом удаления блока алмазных зерен охваченных металлической связкой (рис. 4 в).

Чрезмерно большое содержание металлической связки (например, в алмазоносном слое круга АСМ 20/14 100% М2-01) ведет к резкому снижению качества кромки (рис. 4 г).

Что касается рабочей жидкости, то достаточно хорошие результаты в плане обеспечения качества кромок ПСТМ были получены при использовании промышленной воды. Несмотря на то, что, например, керосин и вода по вязкости и плотности различаются мало, относительная диэлектрическая проницаемость последней почти в 40 раз больше, чем у керосина. Это же можно сказать и про их удельные электропроводности которые для промышленной воды и керосина соответственно равны $2.8 \cdot 10^{-1}$ и $10^{-15} \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}$.

Поэтому при ЭЭО в воде возрастают потери энергии в канале разряда [13] и, как следствие этого, при одинаковой величине энергии импульсов уменьшаются размеры лунок при одновременном росте межэлектродного промежутка. С другой стороны, при разряде в воде в отличие от электрического разряда в жидких углеводах практически отсутствует

обратная полуволна тока и минимально возможное значение токоограничивающего сопротивления в зарядной цепи может быть меньше. Следовательно, при ЭЭО в воде реализуемая мощность генератора электрических импульсов больше, чем для керосина.

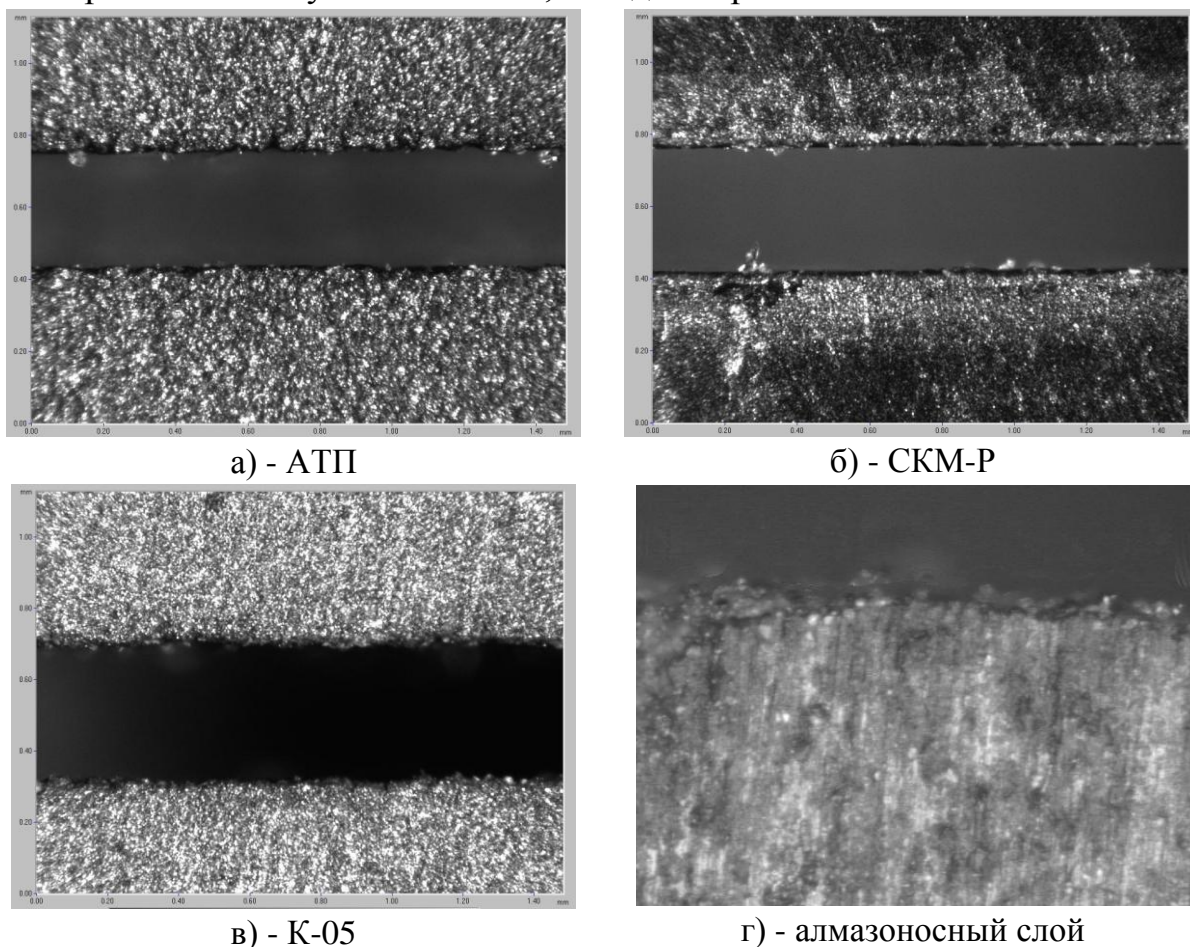


Рисунок 4 – Состояние кромок ПСТМ после ЭЭО непрофилированным ЭИ ($\beta = 90^0$)

В воде отсутствуют твердые продукты разложения, свойственные ЭЭО в жидких углеводах, а также ускоряется выведение продуктов путем струйной подачи воды в зону. Этим можно объяснить стабильность процесса при обработке большинства материалов, и, в конечном счете, более высокую производительность ЭЭО в воде.

Кроме этого вода является более приемлемой рабочей жидкостью с точки зрения пожарной безопасности и меньшей стоимости.

Как известно [7], [13] параметрами режима ЭЭО являются напряжение, сила тока (определяющие энергию импульсов), а также частота следования электрических импульсов, от значения которых зависит производительность и качество процесса. Поэтому они должны

быть оптимизированы с точки зрения получения требуемого качества режущих кромок.

Известно, что их влияние на величину объема материала, удаляемого в единицу времени, имеет вид [13]:

$$Q = f(k, f_d, W_u),$$

где Q - объем материала удаляемого в единицу времени; k - опытная постоянная величина (зависящая главным образом от теплофизических свойств обрабатываемого материала, рабочей жидкости, условий удаления продуктов электрической эрозии из МЭП и т.д.); f_d - действительная частота электрических разрядов; W_u - энергия единичного электрического импульса.

Установлено, что из режимных факторов наибольшее влияние на качество рабочих элементов лезвийных инструментов из ПСТМ оказывает энергия единичных импульсов. С ее увеличением разность значений \mathcal{E}_{cm} зерен исходного сверхтвердого материала и связки проявляется еще в большей степени, что ведет к ухудшению качества режущих кромок.

Как известно [13] энергия единичного импульса является функцией емкости и пробивного напряжения и определяется по зависимости:

$$W = \frac{C \cdot U_{пп}^2}{2} \approx \frac{0,72 \cdot C \cdot U_{ипп}^2}{2},$$

где W - энергия единичного электрического импульса, Дж; C - емкость конденсатора, Ф; $U_{пп} \approx 0,72 \cdot U_{ипп}$ - пробивное напряжение, В; $U_{ипп}$ - напряжение источника питания, В.

Исследование влияния единичных электрических импульсов на электроэрозионное удаление ПСТМ на основе алмаза позволили получить зависимость, связывающую объем лунки от разряда ($V_l, 10^{-4} \text{ мм}^3$) с емкостью конденсатора (C) и величиной межэлектродного промежутка (δ), которые определяют энергию единичного импульса [$X1=-1, 0, +1$ ($C=100, 250, 400\text{мФ}$); $X2=-1, 0, +1$ ($\delta=2, 7, 12\text{мкм}$) $U=100\text{В}$]:

$$V_l = (1,58 + 0,20 \cdot X1 - 0,66 \cdot X2 - 0,08 \cdot X1 \cdot X2 - 0,05 \cdot X1^2 + 0,35 \cdot X2^2).$$

Достоинством поликристаллов алмаза по сравнению с КНБ следует считать тот факт, что, как известно алмаз не стабилен в окисляющейся атмосфере при температуре больше чем 700°C и в процессе высокого теплового воздействия, каким сопровождаются электроискровые разряды, может превращаться в графит. Образование графитизированного

поверхностного слоя, являющегося хорошим проводником электрического тока, имеет ряд положительных моментов. Во-первых, облегчает дальнейшее протекание электрической эрозии алмаза; во-вторых, рассеивает энергию импульса по большей длине кромки и, в-третьих, снижает пороговое значение импульсов тока [8]. Этот факт является еще одной существенной причиной лучшего качества кромок инструментов на основе алмаза после ЭЭО по сравнению с КНБ. Снижение порогового значения импульсов тока в свою очередь позволяет в случае необходимости делать чистовые проходы при более щадящих электрических режимах, что также благоприятно отражается на качестве кромок. Исследованиями установлено, что в рабочем диапазоне величин энергии 2 - 13,5 мДж значения параметров режущих кромок (R_z и ρ_k) алмазных инструментов находятся в пределах 10-50 мкм, а величина кратеров от электроэрозионных разрядов на кромках в диапазоне 10-100 мкм. В связи с этим определены оптимальные режимы ЭЭО проволочным ЭИ применительно к различным маркам ПСТМ с точки зрения требований к минимизации затрат на этапе чистового алмазного шлифования (см. табл. 2.).

Таблица 2 – Рекомендуемые режимы ЭЭО ПСТМ*

Обрабатываемый ПСТМ	Энергия импульсов W , мДж	Частота импульсов f , кГц
СКМ-Р, АТПМ	4-6	8
К-05	9-11	6
Томал	11-13,5	4

*скважность электрических импульсов равна 2.

Таким образом, можно считать, что ЭЭО проволочным ЭИ является достаточно серьезной альтернативой черновой обработке ПСТМ алмазным шлифованием кругами на основе шлифпорошков алмаза как с точки зрения экономии поликристаллов, так и получения требуемого качества режущих кромок для последующей чистовой обработки.

Особенности процесса управления режущим рельефом и макропрофилем токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза с покрытиями. Они обусловлены в первую очередь возможностью реализации малых величин межэлектродных зазоров с одной стороны и электропроводностью самих покрытий с другой.

Известно, что наличие металлического покрытия на зерне является фактором, препятствующим его преждевременному выпадению из связки круга. Однако еще одним существенным моментом является то, что путем

изменения вылета зерна относительно самого покрытия можно целенаправленно влиять на характер его разрушения. Это можно считать дополнительным резервом в плане повышения режущего ресурса алмазных зерен. Также как и токопроводящая связка круга, металлическое покрытие может удаляться с дозированной скоростью за счет ввода в зону управления электрической энергии. Возможны три характерных варианта состояния элементов подсистемы «связка круга – металлическое покрытие – алмазное зерно» при электрофизикохимическом управлении режущим рельефом токопроводящих кругов с металлизированными алмазными зернами. Они связаны с соотношением скоростей принудительного удаления материалов связки круга $V_{св.}$ и покрытия $V_{покр.}$. В первом случае оба материала удаляются с одинаковой скоростью ($V_{покр.} \sim V_{св.}$), в двух остальных идет опережающее удаление одного из компонентов ($V_{покр.} < V_{св.}$ или $V_{покр.} > V_{св.}$).

В случае электрохимического воздействия на связку круга согласно первому закону Фарадея количество металла, удаляемого с поверхности анода (круга), можно определить по зависимости [13, 14]:

$$Q_M = K_{\mathcal{E}} \cdot I \cdot t \cdot \eta, \quad (6)$$

где Q_M - количество металла, удаляемого с поверхности анода, Г; $K_{\mathcal{E}}$ - массовый электрохимический эквивалент, Г/А·мин); I - сила тока, А; t - длительность прохождения тока, мин.; η - коэффициент выхода по току.

На схеме (рис. 5) представлены два характерных состояния подсистемы «связка круга – покрытие - алмазное зерно».

Известно [14], что при размерной электрохимической обработке при постоянной температуре сопротивление электролита определяется зависимостью:

$$R_{\mathcal{E}} = \rho_{уд.} \cdot \frac{\Delta}{F}, \quad (7)$$

где $R_{\mathcal{E}}$ – электрическое сопротивление электролита, Ом; $\rho_{уд.}$ - удельное сопротивление электролита Ом·см; Δ - длина столба электролита между электродами, см; F - площадь поперечного сечения столба электролита см².

При включении электрического напряжения реализуется электрическая схема с двумя параллельно включенными сопротивлениями, причем согласно выражению (7) величина последнего в цепи «катод – покрытие» будет несколько меньше, чем в цепи «катод – связка круга» что объясняется неравенством межэлектродных зазоров ($\Delta_{покр.1} < \Delta_{св.1}$, рис. 5 а).

Если предположить, что значения $K_Э$ и ρ материалов связки и покрытия равны друг другу ($V_{покр.} = V_{св.}$), то это однозначно обусловит большую плотность тока в первой цепи, а, следовательно, и большую интенсивность электрохимического растворения покрытия. С течением времени величина межэлектродного зазора $\Delta_{покр.1}$ будет увеличиваться быстрее, нежели $\Delta_{св.1}$, а, следовательно, покрытие удалится на большую величину ($\Delta_{св.2} - \Delta_{покр.2} > \delta_{св.}$), чем связка (рис. 5 б).

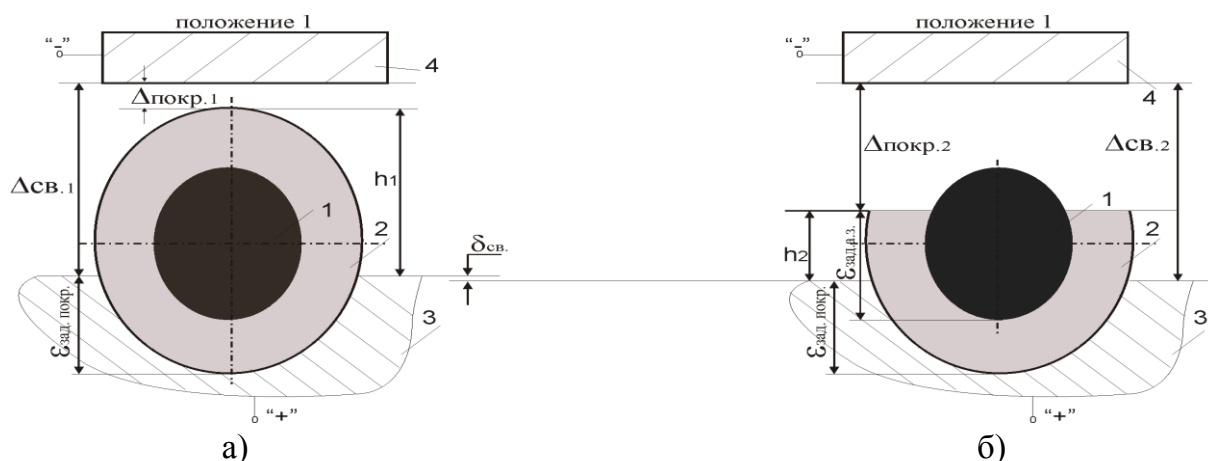


Рисунок 5 – Характерные состояния подсистемы «связка круга – покрытие – алмазное зерно»: 1 – алмазное зерно; 2 – металлическое покрытие; 3 – связка круга; 4 – автономный правящий катод.

Отмеченные выше возможные три характерные схемы взаимного расположения элементов подсистемы «связка круга – металлическое покрытие – алмазное зерно», зависящие от значения электрохимических эквивалентов и коэффициентов выхода по току пары «связка круга – металлическое покрытие», представлены на рис. 6.

Для рассмотренного выше случая, когда $V_{покр.} = V_{св.}$, уровни связки круга и покрытия со временем выровняются и будут пребывать в таком состоянии до полного износа круга (рис. 6 б).

Как установлено в работе [15], определяющим фактором, ответственным за характер износа алмазных зерен, является высота их выступания над уровнем связки круга. Находясь в промежуточной среде (покрытии), зерно может иметь гораздо большую (до двух раз) высоту выступания над связкой. Исходя из этого факта, первая (рис. 6 а) и последняя (рис. 6 в) схемы взаимного расположения элементов подсистемы будут способствовать вероятнее всего преимущественному проявлению механизмов микро- и макроразрушения зерен соответственно.

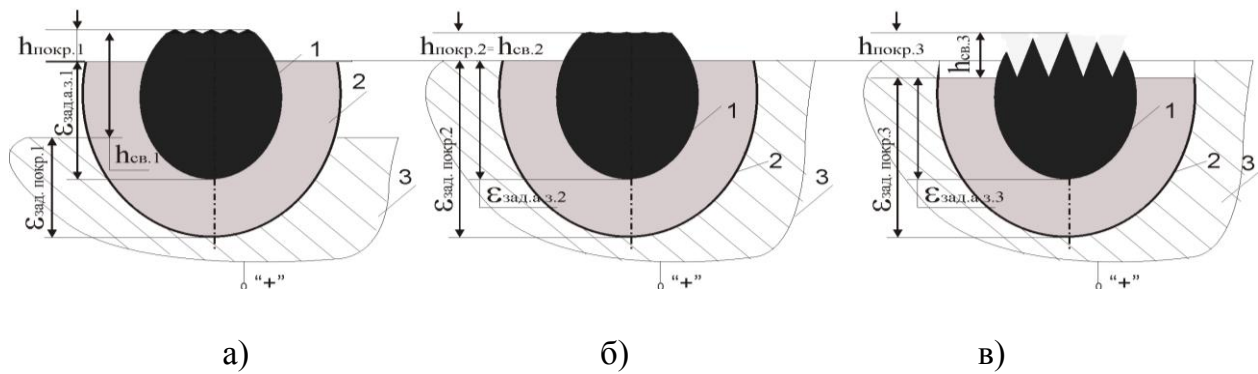


Рисунок 6 – Схемы взаимного расположения элементов подсистемы «связка круга – покрытие - алмазное зерно»: 1 – алмазное зерно; 2 – металлическое покрытие; 3 – связка круга.

Таким образом, управляя процессом разрушения (самозатачивания) зерен микропорошка путем изменения соотношения скоростей удаления связки круга и покрытия, можно в определенной-то степени влиять на значения выходных показателей обработки. На практике это достигается, например, путем определенного сочетания свойств пары «металлическое покрытие – связка круга».

Установлено, что совместно с другими эффектами это даст возможность в целом приблизить удельный расход алмазов круга на основе микропорошков алмаза к уровню, который характерен для кругов на основе алмазных шлифовальных порошков.

Для примера проанализируем, например, ситуацию применительно к наиболее распространенной металлической связке М2-01 (имеющей в своем составе 80% Cu и 20% Sn) в случае использования покрытия на основе Ni. Расчеты показывают, что электрохимический эквивалент этой связки составляет $\approx 0,363$ мГ/Кл, а двухвалентного никеля $\approx 0,304$ мГ/Кл. Близкие значения имеют и коэффициенты выхода по току [14] (соответственно $\eta_{Cu} \approx 98\%$, $\eta_{Ni} \approx 96\%$). Эти данные свидетельствуют о том, что скорость удаления покрытия несколько меньше интенсивности растворения связки. В результате этого само покрытие выступает на некоторую величину над уровнем связки (принятым за «нулевое» положение), а зерно в нем будет иметь максимальную заделку ($h_{зад.з.1} \rightarrow \max$), что позволит создать условия для наиболее рациональной схемы закрепления зерна в покрытии, а покрытия в связке (рис. 6 а). На практике в таких благоприятных с точки зрения закрепления зерна условиях, по всей видимости, будет реализован механизм микроразрушения зерен, что должно способствовать максимально возможному использованию их потенциальных режущих свойств.

В случае использования связки на основе алюминия (электрохимический эквивалент которого $\approx 0,093$ мг/Кл) картина обратная. В этом случае происходит опережающее растворение материала покрытия, что создает условия для реализации механизма макроразрушения зерна.

Такой вариант менее предпочтителен, нежели тот, при котором связка растворяется несколько более интенсивно, чем покрытие, т.к. в случае даже достаточной величины заделки покрытия в связке само зерно, находясь в нем, может существенно оголиться и преждевременно выпасть.

Экспериментальные данные показали, что удельный расход кругов на связке М1-01 (на основе алюминия) в 1,3 – 1,4 выше, чем у связки М2-01, что в определенной степени может являться подтверждением изложенных выше рассуждений.

Таким образом, свойства материалов покрытия и связки круга представляют определенный интерес с точки зрения управления механизмом разрушения зерен микропорошка алмаза, а, следовательно, и выходными показателями процесса шлифования ПСТМ кругами на их основе. В случае реализации электрохимического управления определяющими являются такие факторы, как коэффициент выхода по току и электрохимический эквивалент материалов связки и покрытия.

В тех случаях, когда к лезвийным инструментам из ПСТМ предъявляются повышенные требования (сюда в первую очередь следует отнести прецизионные инструменты и инструменты со сложным профилем) к состоянию рабочей поверхности кругов должны предъявляться повышенные требования.

Они состоят в том, что с одной стороны существует необходимость обеспечить равенство скоростей удаления связки и износа зерен круга, а с другой - поддержания необходимого профиля РПК. Сюда же непосредственно примыкает вопрос устранения первоначального торцового или радиального биения круга, значение которого объясняется, в том числе и повышенной жесткостью кругов на металлических связках.

Одной из важных особенностей при использовании токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза является то, что высота их рельефа настолько мала, что становится сопоставимой с биением круга. Как показано в работе [16], радиальные колебания периферийного круга оказывают существенное влияние на шероховатость поверхности даже при обработке пластичных материалов, что требует особого отношения к предварительной правке круга. Это подтверждает необходимость особого подхода к процессам управления РПК в плане создания научных

предпосылок для обеспечения технологической устойчивости в процессе формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ (без чего стабилизации силовой и тепловой напряженности процесса шлифования на допустимом уровне практически невозможна). В связи с этим было выдвинуто следующее положение применительно к чистовой обработке (когда с ПСТМ снимаются незначительные припуски): благодаря малым величинам межэлектродных зазоров не только становится целесообразным использование электроискрового управления, но и значительно расширяются технологические возможности этого процесса. На практике это проявляется в возможности обеспечения электрических импульсов с достаточно большими либо предельно малыми значениями энергии (в зависимости от характера стоящих задач).

Отмеченные преимущества можно использовать комплексно, что позволяет обеспечивать точность и качество обработки при максимальной эффективности процесса шлифования. Так, например, комбинируя процессы интенсивного электрохимического и локального электроискрового управления, можно основную часть погрешностей профиля РПК удалять с помощью высокопроизводительного электрохимического, а окончательное его формообразование путем избирательного электроискрового воздействий на РПК токопроводящего круга. Этот подход обусловлен тем, что в случае существенного различия в значениях электрохимических эквивалентов компонентов связки, а также некоторых других факторов электрохимическое воздействие не позволяет обеспечивать достаточно ровную поверхность последней (экспериментально установлено, что для существующих связок круга $\delta \leq 0,015-0,02\text{мм}$). А это весьма нежелательно при использовании мелкозернистых кругов. Эффективность такого подхода подтверждается экспериментально (рис. 7).

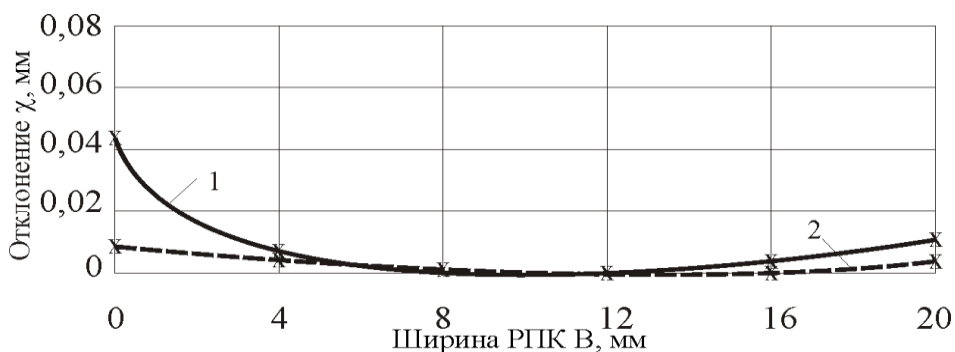


Рисунок 7 – Влияние способа управления на отклонение (χ) поперечного профиля рабочей поверхности торцевого круга: 1 - электрохимический способ; 2 - электроискровой способ.

Обоснование конкурентоспособности предложенного подхода с позиции инжиниринга качества. Известно, что традиционные показатели качества шлифованных изделий не всегда однозначно влияют на предполагаемую работоспособность изделий. Поэтому считается, что оценка работоспособности по другим (косвенным) критериям требует весьма взвешенного подхода. Здесь может быть весьма полезна концепция инжиниринга качества, предложенная Г. Тагути [17]. Главное в философии Тагути - это повышение качества с одновременным снижением расходов. При этом экономический фактор (стоимость) и качество анализируются совместно и таким образом связываются общей характеристикой, называемой функцией потерь. При анализе важно рассматривать потери, как со стороны потребителя, так и со стороны производителя.

Существует множество подходов, реализующих идею инжиниринга качества. Основной же его идеей следует считать необходимость постоянного совершенствования процессов и как следствие качества продукции. Согласно методу Тагути качество не должно рассматриваться как мера соответствия требованиям стандартов, т.к. зачастую не просто требуется факт нахождения показателя в пределах допуска, а учет фактора неравноценности значений показателя внутри допуска.

Основываясь на идее инжиниринга качества, выполним анализ существующих (способы 1 и 2) и предложенного (способ 3 - ЭЭО непрофилированным электродом-инструментом с последующей доводкой токопроводящим кругом на основе микропорошков алмаза) процессов формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ на примере изготовления режущей части резца (см. рис. 1). В качестве существующих приняты следующие процессы: доводка кругом на основе микропорошков алмаза на органической связке В2-01 (способ 1) и электроэрозионная обработка профилированным (дисковым) графитовым электродом – инструментом [8] (способ 2). Для этого рассмотрим важнейшие составляющие суммарной технологической себестоимости. Последняя выступает в данном случае в качестве интегрального показателя качества [18], который, в какой степени можно сравнить с функцией надежности Тагути.

К таким составляющим можно отнести:

- технологическую себестоимость формообразования режущих элементов резца (технологическая себестоимость у изготовителя);
- длину пути резания как функция фактора неравноценности значений показателя качества внутри допуска;

- длину пути резания как функция качества обработки рабочих элементов режущей части резца.

При этом последние два показателя косвенно отражают технологическую себестоимость у потребителя.

Технологическая себестоимость у изготовителя. Если принять значение технологической себестоимости у изготовителя при использовании способа 1 за 100%, то остальные методы будут располагаться следующим образом (см. рис. 8).

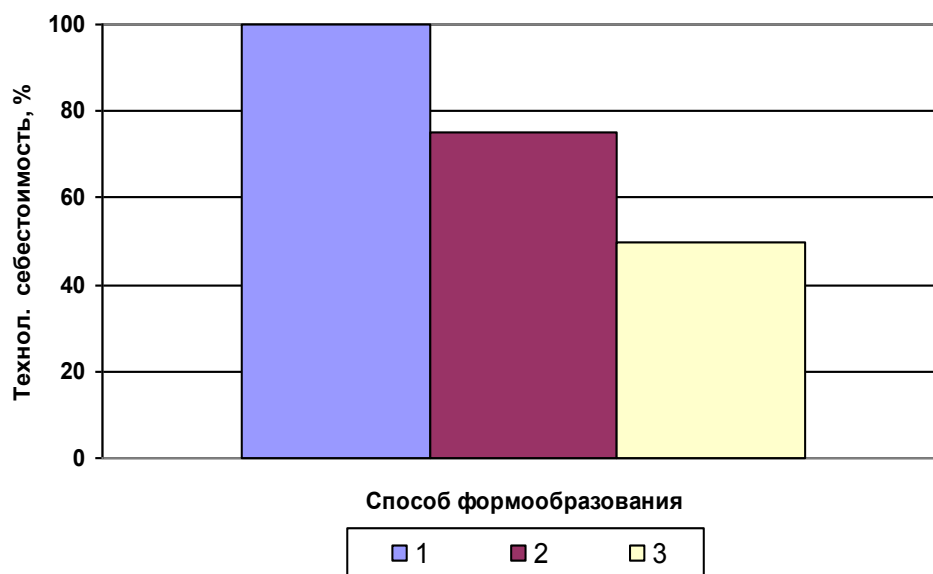


Рисунок 8 – Сопоставление технологической себестоимости при различных методах формообразования

Высокое значение технологической себестоимости при использовании способа 1 связана в первую очередь со значительным браком изделий по причине выхода размера за пределы допуска (провалы размеров во время мгновенного самозатачивания круга) и повышенного расхода алмазов круга. Способ 2 имеет худшие показатели по сравнению со способом 3 по причине дороговизны (капитальные затраты) и сложности оборудования, что влечет за собой увеличение затрат, связанных с технологией изготовления (основная и дополнительная заработная плата производственного рабочего и наладчика, затраты на электроэнергию, затраты на амортизацию оборудования, затраты на ремонт оборудования и приспособлений, затраты на режущий инструмент, затраты на содержание производственной площади, затраты на вспомогательные материалы).

Длина пути резания как функция фактора неравноценности значений показателя качества внутри допуска. Важность этого фактора

связана в первую очередь с тем, что в данном случае резец является мерным инструментом, т.к. его размер переносится на размер выполняемой канавки. Следовательно, резцы, изготовленные в пределах допуска на размер, не будут равноценны с точки зрения длины пути резания, которую они будут обеспечивать до момента достижения допустимой величины износа. В данном случае согласно техпроцессу наименьший изношенный размер резца составляет 0,96мм. Это означает, что резец, изготовленный в размер 1,02мм, может полностью реализовать свой ресурс (критерий износа при чистовой обработке, например, обрабатываемых материалов первой группы $h_3 \sim 0,05$ мм [19]), в то время как резец с размером 0,99мм нет. Таким образом, резец, изготовленный по верхнему предельному размеру, обеспечит большую длину резания по сравнению с резцом, изготовленным по нижнему предельному размеру.

Картину, максимально приближенную к реальной, можно проиллюстрировать схемой, приведенной на рис. 9.

Здесь V и b ширины паза и резца соответственно, а цифры относятся к способу формообразования его режущей части. Среднестатистический резец, изготовленный с допуском на ширину ($T_{b_{1,2}}$) меньшим чертежного ($T_{b_{\text{черт.}}}$) значения, имеет размер $b_{2,3}$. Поэтому в отличие от резца со среднестатистическим размером b_1 он имеет больший запас на износ. Следовательно, способ формообразования резца через уровень достижимой точности формирует его новое качественное состояние.

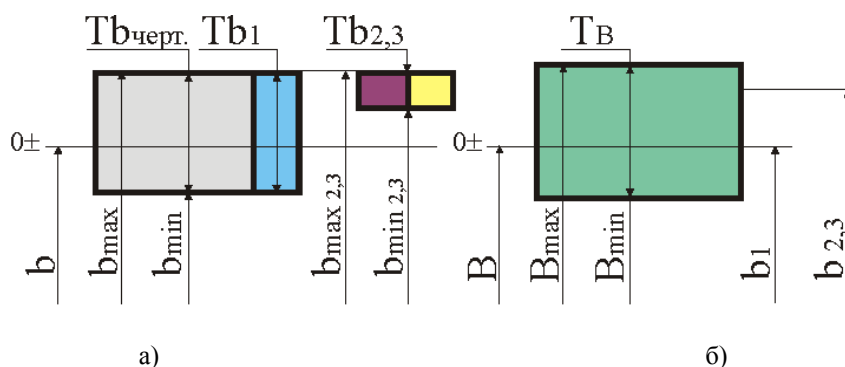


Рисунок 9 – Иллюстрация фактора неравноценности значений показателя качества внутри допуска

Если за 100% принять длину пути резания для способа 3, то остальные методы будут располагаться следующим образом рис. 10).

Объяснить приведенные данные можно следующим образом. При реализации первого метода размеры выполняются с использованием всего поля допуска. Два других способа практически равноценны по достигаемой точности ($\pm 2,5$ мкм), а, значит, позволяют использовать при

изготовлении резца только часть поля допуска, которая в данном случае должна включать в себя верхнее предельное отклонение. Однако, как будет показано ниже, стойкость резца по способу 2 несколько ниже из-за худшего качества рабочих элементов.

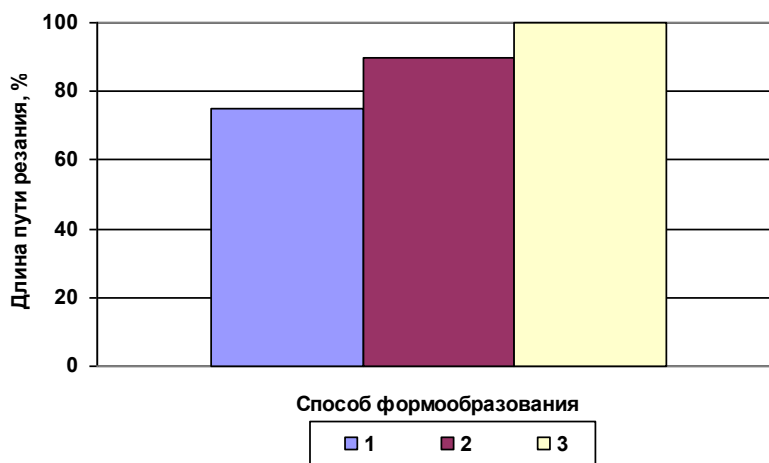


Рисунок 10 – Сопоставление длины пути резания при различных методах формообразования

Длина пути резания как функция качества обработки рабочих элементов режущей части резца. Наилучшее качество рабочих элементов резец будет иметь в случае использования способа 1. Очень близкие к этим показатели имеет резец, заточенный по способу 3. Способ 2 имеет худшие результаты из-за неравномерности воздействия электрических импульсов на гетерогенный материал. Особенно это касается качества режущих кромок, что связано с существованием так называемого «краевого» эффекта, описанного выше.

Для иллюстрации изложенного приведем, например, данные по величине радиуса округления режущих кромок (рис. 11).

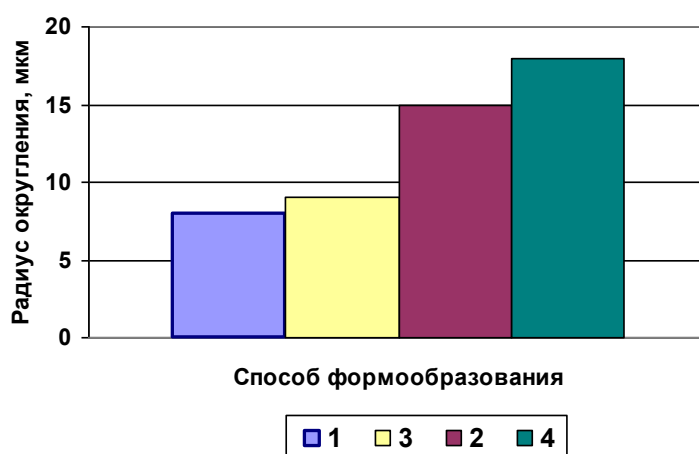


Рисунок 11 – Зависимость радиуса округления режущих кромок от метода формообразования

Здесь способ 4 соответствует заточке токопроводящим кругом на основе алмазных шлифовальных зерен зернистостью $Z=50/40$ в комбинированном процессе шлифования ([20], приведен для сравнения).

Если принять длину пути резания по способу 1 за 100%, то остальные методы будут располагаться следующим образом (рис. 12).

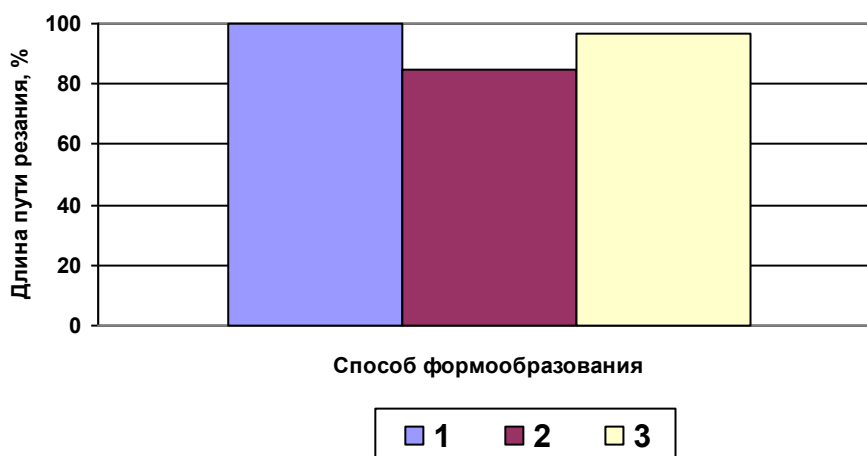


Рисунок 12 – Сопоставление длины пути резания при различных методах формообразования

Выводы и перспективы развития. 1. Выявлена ключевая роль процентного содержания металлической связки в составе ПСТМ в формировании качества режущих кромок при ЭЭО непрофилированными и профилированными электродами-инструментами. Неравномерность распределение связки в ПСТМ приводит как к возникновению отклонения режущей кромки от прямолинейности, что особенно характерно для ПСТМ с большим содержанием металлической связки, так и к появлению достаточно крупных кратеров (напоминающим сколы после шлифования), являющихся результатом удаления блока алмазных зерен, охваченных металлической связкой. 2. Установлено, что благодаря комбинированным процессам шлифования алмазные зерна с металлическими покрытиями не только могут быть использованы в кругах на прочных металлических (токопроводящих) связках, но, наоборот, в условиях, когда отсутствует внедрение шлифовальных зерен в обрабатываемый материал, имеющаяся возможность удаления материала (металла) покрытия (равно как и связки круга) электрофизикохимическим способом открывает новые перспективы в плане управления режущим рельефом круга. В частности, отдельно управляя интенсивностями электрофизикохимического удаления связки круга и материала покрытия (путем выравнивания их значений или

использования эффекта опережения одного из них), можно целенаправленно влиять на механизм износа алмазных зерен. 3. Для наиболее эффективного управления рабочей поверхностью круга следует использовать способ, основанный на комбинации процессов интенсивного электрохимического и локального электроискрового воздействия на связку круга. При этом основная часть погрешностей профиля РПК удаляется с помощью высокопроизводительного электрохимического, а окончательное его формообразование путем избирательного электроискрового воздействия. 4. Наиболее рациональное решение проблемы формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ возможно на основе использования принципа выборочной предпочтительной целесообразной последовательности реализации достоинств различных процессов обработки. При этом наикратчайшим путем достижения высоких значений размерной точности и качества обработки является последовательное использование электроэрозионной обработки непрофилированным электродом – инструментом и комбинированные процессы алмазного шлифования с электрохимическим и электроискровым воздействием на рабочую поверхность круга соответственно. 5. Эффективность электроискрового процесса для управления РПК связана в первую очередь с возможностью реализации малых величин МЭЗ, поскольку его минимальные значения ограничиваются высотой рельефа круга. На практике это позволяет подводить в зону управления РПК электрические импульсы с малой энергией, а, следовательно, обеспечить высокие значения качества и точности управления РПК, что нашло свое подтверждение на практике. 6. Доказана эффективность использования токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза с рельефными толстослойными металлическими покрытиями в комбинированных процессах шлифования для решения проблемы формообразования прецизионных лезвийных инструментов из ПСТМ. Это во многом стало возможным благодаря использованию принципа выборочной предпочтительной последовательности применения достоинств различных процессов формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ, что подтверждено оценкой, базирующейся на идее инжиниринга качества.

Список использованных источников: 1. Пыжов И.Н. Некоторые особенности электроэрозионной обработки сложных изделий из ПСТМ профилированным и непрофилированным электродами-инструментами / Пыжов И. Н. // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ «ХПІ» - Харків: 2007.-Вип. 1 (14).-С. 70-79. 2. Пыжов И.Н. Некоторые особенности формообразования рабочих поверхностей лезвийных инструментов из ПНТМ при алмазном шлифовании /

Грабченко А. И., Пыжов И. Н. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.-Харьков: 2006.-Вып.70.-С. 132-137. **3.** Пыжов И.Н. К особенностям обработки поликристаллических сверхтвердых материалов токопроводящими кругами на основе микропорошков алмаза / Грабченко А. И., Пыжов И. Н. // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ «ХП».-Харків: 2006.-Вип. 2 (13).-С. 24-34. **4.** Особенности применения токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза при заточке лезвийных инструментов из ПНТМ / [Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А., Пыжов И.Н., Гаращенко Я.Н.] // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение.-К.: 2008.-Вип. 52.-С. 384–397. **5.** Теоретическое обоснование эффективности использования микропорошков в алмазных кругах на металлических связках / Пыжов И.Н., Федорович В.А., Русанов В.В., Калита И.Н. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2008.-Вып.74.-С. 258-266. **6.** Фадеев В.А. Формообразование высококачественных прецизионных сложнопрофильных лезвийных инструментов из ПСТМ. / [Фадеев В.А., Пыжов И.Н., Федорович В.А.] // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2009.-Вып.76.-С. 225-235. **7.** Аренков А.Б. Основы электро-физических методов обработки материалов / Аренков А.Б. - М.: Машиностроение, 1967.- 372с. **8.** Магазеев М.Г. Повышение эффективности изготовления профильных инструментов из сверхтвердых и керамических материалов за счет сочетания электроэрозионной и алмазной обработки: дис...канд. техн. наук: 05.03.01/Магазеев Михаил Геннадиевич. - Харьков, 1997. - 204 с. **9.** [Schneidstoffe in der holzbearbeitenden Industrie. http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_2_/15_art/Art15_02_03.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_2_/15_art/Art15_02_03.htm). **10.** Spur G. Funkenerosives Trennen polykristalliner Diamantwerkzeuge / Spur G., Schönbeck J. // Industrie Diamanten Rundschau. - 1991. - №3. - S. 179-185. **11.** Ставицкий Б.И. Особенности электроискрового формообразования в воде (из истории электроискровой обработки). Оборудование и инструмент для профессионалов (металлообработка) / Ставицкий Б.И. - М.: - 3 /2008. - С. 66 - 69. **12.** [Funkenerosive Bearbeitung von Cvdite CDE und Syndite-Produkten. http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004_4/13_art/Art13_04_04.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004_4/13_art/Art13_04_04.htm). **13.** Размерная электрическая обработка металлов: Учебное пособие для студентов вузов / [Б.А. Артамонов, А.Л. Вишницкий, Ю.С. Волков., А.В. Глазков]. Под ред. А.В. Глазкова. - М.: Высш. школа, 1978. -336с. **14.** Попилов Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов / Попилов Д.Я. - М.: Машиностроение, 1982. - 400с. **15.** Семко М.Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. **16.** Азарова Н.В. Расчет параметров шероховатости шлифованной поверхности с учетом радиальных колебаний рабочей поверхности круга / Азарова Н.В., Матюха П.Г. // Сверхтвердые материалы. - 2006. - № 3. - С. 52- 61. **17.** Лapidус В.А. Гуру менеджмента качества и их концепции: Э. Деминг, Дж. Джуран, Ф. Кросби, К. Исикава, А. Фейгенбаум, Т. Тагути / Лapidус В.А. // <http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/mech/tsunikova/library/2.htm>. **18.** Узунян М.Д. Инжиниринг качества шлифования / Узунян М.Д. // Резание и инструмент в технологических системах. – 2005. - Вып. 69. - С. 329 - 334. **19.** Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Грабченко А.І., Вerezуб М.В., Внуков Ю.М. та ін.; за редакцією А.І. Грабченка. - Житомир, ЖДТУ, 2003 р.- 451 с. **20.** Русанов В.В. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазном шлифовании композиций «СТМ - сталь»: дис... канд. техн. наук 05.03.01 / Русанов Виктор Васильевич. - Харьков, 1980. - 259 с.