УДК 621.922.079

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ РАСПИЛОВОЧНЫХ ДИСКОВ НА ПОДВИЖНОСТЬ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН В ПРОЦЕССЕ ИХ ШАРЖИРОВАНИЯ

д-р техн. наук, проф. М.Г. КИСЕЛЕВ, П.О. КОРЗУН
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматривается теоретическая оценка влияния параметров шероховатости поверхности распиловочных дисков на подвижность алмазных зерен в процессе их шаржирования. Получены аналитические зависимости для расчета параметров исходной шероховатости поверхности распиловочного диска, при которых в процессе её шаржирования зернами алмазных микропорошков различной зернистости отсутствует их перекатывание в зоне обработки. Полученные результаты позволяют обоснованно выбрать метод и режимы предварительной обработки боковых поверхностей распиловочных дисков, обеспечивающих требуемые параметры их шероховатости, при которых на последующей операции их шаржирования подвижность зерен алмазных микропорошков в зоне обработки за счет их перекатывания будет исключена.

Введение. Распиловочный диск – это режущий инструмент, предназначенный для распиливания монокристаллов алмаза при производстве из них бриллиантов и других изделий. Эти инструменты изготавливаются из оловянисто-фосфористой бронзы марки БрОФ 6,5-0,15 диаметром 76 мм и толщиной от 0,04 до 0,09 мм. На боковых поверхностях дисков путем шаржирования зерен алмазных микропорошков формируется алмазосодержащий (режущий) слой. Уровень эксплуатационных показателей, получаемых инструментов (режущая способность, стойкость, качество обработанных поверхностей), определяется качеством полученного алмазосодержащего слоя, в частности, количеством, размером и прочностью закрепления алмазных частиц в материале диска, а также их разновысотностью [1].

По существующей технологии операция шаржирования выполняется непосредственно после вырубки заготовок распиловочных дисков из прокатанной до требуемой толщины бронзовой ленты с использованием алмазной суспензии, состоящей из одной весовой части алмазного микропорошка АСН 20/14 и двух весовых частей касторового масла. Суспензия в виде капель наносится на боковую поверхность заготовки распиловочного диска и затем с помощью вращающейся твердосплавной шайбы (деформирующего инструмента) равномерным слоем растирается по обрабатываемой поверхности. При этом исходная шероховатость поверхности диска соответствует Ra = 0,3…0,63 мкм, т.е. высота микронеровностей оказывается более чем на порядок меньше среднего размера алмазных зёрен. Поэтому при шаржировании их взаимодействие с такой гладкой поверхностью характеризуется высокой степенью подвижности алмазных зерен в зоне обработки, что препятствует их внедрению и закреплению в материал диска, снижая тем самым качество шаржирования его поверхности. В этих условиях процесс шаржирования во времени протекает с четко выраженной стадией приработки, которая связана с формированием на поверхности диска шероховатости нового качества за счет воздействия на неё подвижных алмазных зерен. В частности, это образование на ней множества лунок в результате пластического деформирования металла вершинами перекатывающихся алмазных зерен, а также коротких царапин за счет срезания микростружек временно закрепившимися алмазными зернами. В свою очередь изменение шероховатости поверхности диска в сторону её увеличения сопровождается снижением подвижности алмазных зерен в зоне обработки, так как полученные на ней микронеровности играют роль своеобразных барьеров, препятствующих их перекатыванию. По времени это соответствует наступлению стадии активного шаржирования поверхности потерявшими подвижность алмазными зернами за счет внедрения в материал диска и закрепления в нем. Отсюда следует, что при шаржировании поверхности распиловочного диска в её исходном состоянии продолжительность выполнения операции, а соответственно, её производительность существенным образом зависят от времени протекания стадии приработки, которое затрачивается на формирование на поверхности шероховатости нового качества, обеспечивающей устранение (снижение) подвижности алмазных зерен в зоне обработки.

Учитывая данное обстоятельство, для повышения производительности и качества шаржирования заготовок распиловочных дисков предложено перед выполнением этой операции осуществлять предварительную обработку их боковых поверхностей различными методами с целью формирования на них шероховатости, при которой в процессе шаржирования подвижность алмазных зёрен в зоне обработки была исключена или, в крайнем случае, существенно ограничена [2, 3]. Другими словами, за счет такой предварительной обработки свести к минимуму стадию приработки в процессе шаржирования, обеспечив при этом благоприятные условия для внедрения алмазных зерен в материал диска и надежного закрепления в нём.

Успешное решение такой задачи в первую очередь связано с определением параметров шероховатости обработанной поверхности, обеспечивающих исключение подвижности (перекатывая) алмазных зерен в зоне обработки в процессе их шаржирования в материал диска. Вместе с тем отсутствие научно обоснованных данных такого плана определило цель данной работы, которая заключалась в теоретической оценке влияния параметров шероховатости на поверхности распиловочных дисков на подвижность алмазных зерен в процессе их шаржирования.

Расчетная модель. Для разработки расчетной модели вначале рассмотрим основные варианты взаимодействия алмазного зерна с контактирующими поверхностями в зоне шаржирования (рис. 1). Здесь алмазное зерно представлено в виде жесткого элемента *1*, который в плоскости рисунка имеет форму *n*-гранного многоугольника. Его центр масс (точка *O*) совпадает с геометрическим центром (рассматривается плоская задача). Промежуточный элемент (алмазное зерно) за счет статической нагрузки P_{CT} находится в силовом контакте с поверхностью распиловочного диска *2*, которая моделируется жесткопластическим основанием, и с гладкой поверхностью деформирующего инструмента *3*, твердость которой значительно выше твердости материала диска. Влияние жидкой фазы на подвижность алмазного зерна в данной работе не рассматривается.

На рисунке 1, а показан вариант, когда промежуточный слой взаимодействует с гладкой поверхностью подвижного основания, что в принципе соответствует начальной стадии шаржирования заготовки распиловочного диска в её исходном состоянии. В этом случае промежуточный элемент обладает высокой степенью подвижности, что обусловлено наличием благоприятных условий для её перекатывания между контактирующими поверхностями. При этом закон движения промежуточного элемента будет определяться скоростью поступательного перемещения его центра масс и угловой скоростью его вращения вокруг центра масс, которые при прочих равных условиях зависят от принятой кинематики процесса шаржирования, т.е. от направления и значений скоростей перемещения поверхности деформирующего инструмента и обрабатываемой поверхности.

Вариант взаимодействия промежуточного элемента с контактирующими поверхностями, когда на обрабатываемой поверхности предварительно сформирован микрорельеф с определенными геометрическими параметрами, приведен на рисунке 1, б. Он моделируется в виде одинаковых равномерно расположенных с шагом *s* и высотой *Rz* микровыступов. При этом поверхность деформирующего инструмента движется со скоростью v_3, а обрабатываемая поверхность – в противоположном направлении со скоростью v_2. Если $v_2 > v_3$, то промежуточный элемент имеет возможность вращаться со скоростью ω относительно мгновенного центра скоростей, как показано на рисунке 1, б.

а) б)

Рис. 1. Схема контакта промежуточного элемента с поверхностями деформирующего инструмента и заготовки:
а – с гладкой поверхностью заготовки;
б – при наличии на ней шероховатости с определенными высотными и шаговыми параметрами

Наличие на обрабатываемой поверхности заготовки микровыступов приводит к снижению подвижности (вращения) промежуточного элемента. Вместе с тем важно установить количественные соотношения, связывающие размеры и геометрию промежуточного элемента (алмазного зерна) с параметрами предварительно сформированного на поверхности заготовки микрорельефа. Для этого обратимся к расчетной схеме, приведенной на рисунке 2, которая соответствует варианту взаимодействия промежуточного элемента с контактирующими поверхностями, показанному на рисунке 1, б.

Промежуточный элемент *1* находится в положении, при котором одной своей вершиной он контактирует с неподвижной поверхностью деформирующего инструмента *3* в точке *A*. Противолежащая его грань (точка *B)* находится в контакте с боковой поверхностью лунки, имеющей коническую форму. Параметры лунки определяются из решения треугольника ΔCDB, где $CD = Rz$ – высота лунки, $\angle CDB = \alpha$ – угол её раскрытия. При этом поверхность лунки наклонена под таким же углом, что и касательная к поверхности алмазного зерна в точке касания.

Алмазное зерно в данных условиях целесообразно моделировать многоугольником. Для определения количества граней многоугольника воспользуемся соотношениями, приведенными в [3], согласно которым зёрна алмазных микропорошков АСН 10/7, АСН 14/10, АСН 20/14 и АСН 28/20 имеют угол заострения 50…120º (в исследуемой модели $\angle OED$). Очевидно, что только многоугольники с четырьмя, пятью и шестью гранями могут иметь углы заострения, соответствующие указанному диапазону. Исходя из этого примем граничное значение числа граней многоугольника, которым моделируется алмазное зерно, равным шести. Тогда значение угла γ определится из следующего соотношения:

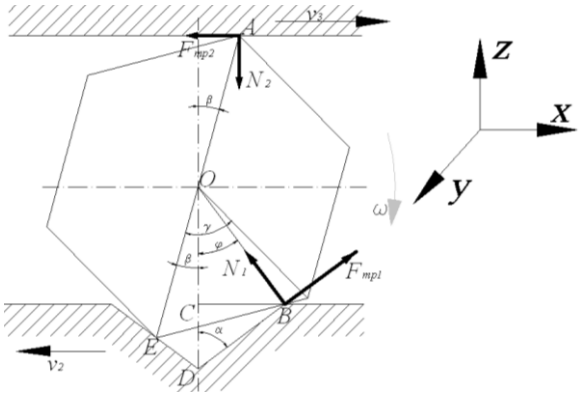

Рис. 2. Расчетная схема для определения условий устойчивости алмазного зерна на шероховатой поверхности

$$\gamma = \frac{360°}{n} = \frac{360°}{6} = 60° .$$

Примем, что в процессе обработки реализуется кинематика, при которой имеет место наибольшая подвижность промежуточного элемента, т.е. $v_2 = v_3$, что обеспечивает его вращательное движение с угловой скоростью ω относительно *Oy*. В результате этого вращения алмазное зерно может выйти из лунки и начать перемещение относительно поверхности распиловочного диска, при этом будет происходить перекатывание и дробление алмазных зерен. Для устранения этого необходимо, чтобы результирующая всех сил и сумма моментов сил относительно оси *Oy* были равны нулю.

Условие, при котором указанное вращение элемента будет отсутствовать и он займет устойчивое положение на обрабатываемой поверхности, имеет вид:

$$\begin{cases} \sum F_{Ox} = 0; \\ \sum F_{Oz} = 0; \\ \sum M_{yB} = 0, \end{cases} \tag{1}$$

где ΣF_{Ox} – сумма сил, действующих на элемент по оси *Ox*; ΣF_{Oz} – сумма сил, действующих на элемент по оси *Oz*; $\sum M_{yO}$ – сумма вращающих моментов сил, стремящихся повернуть элемент вокруг оси *Oy* относительно точки *B*.

Как известно, силы реакции направлены перпендикулярно поверхности, на которую опираются звенья, а силы трения действуют к силам реакции в направлении, противоположном направлению вращения. Согласно принятой расчетной схеме (см. рис. 2), с учетом действующих на элемент сил и моментов сил, систему уравнений (1) представим в виде:

$$\begin{cases} Ox: \quad F_{mp1} \cdot \cos(\varphi) - N_1 \cdot \sin(\varphi) - F_{mp2} = 0; \\ Oz: \quad -N_2 + F_{mp1} \cdot \sin(\varphi) + N_1 \cos(\varphi) = 0; \\ \sum My: \quad N_2 \cdot OA \cdot \sin(\beta) - F_{mp2} \cdot OA \cdot \cos(\beta) - F_{mp1} \cdot OB = 0, \end{cases}$$

где F_{mp1} – сила трения между алмазным зерном и поверхностью распиловочного диска; F_{mp2} – сила трения между алмазным зерном и поверхностью деформирующего элемента; φ – угол между направлением действия силы реакции N_1 и осью лунки; β – угол наклона оси зерна относительно оси лунки.

Учитывая зависимости между силами реакции и силами трения:

$$F_{mp1} = N_1 \cdot \mu_1 \text{ и } F_{mp2} = N_2 \cdot \mu_2 ,$$

где $\mu_1 = 0{,}5$ и $\mu_2 = 0{,}1$ – коэффициенты трения между алмазом и бронзой и алмазом и сталью соответственно.

Систему уравнений можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} Ox: \quad N_1 \cdot \mu_1 \cdot \cos(\varphi) - N_1 \cdot \sin(\varphi) - N_2 \cdot \mu_2 = 0; \\ Oz: \quad -N_2 + N_1 \cdot \mu_1 \cdot \sin(\varphi) + N_1 \cdot \cos(\varphi) = 0; \\ \sum My: \quad N_2 \cdot OA \cdot \sin(\beta) - N_2 \cdot \mu_2 \cdot OA \cdot \cos(\beta) - N_1 \cdot \mu_1 \cdot OB = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Решая совместно первых два уравнения системы (2) относительно угла φ, получим:

$$\varphi = \mathrm{arctg}\left(\frac{\mu_1 - \mu_2}{1 + \mu_1 \cdot \mu_2}\right) = 20°51'.$$

Тогда, зная угол φ, вычислим искомый угол раскрытия лунки α:

$$\alpha = 90° - \varphi = 69°9' \text{ и } 2\alpha = 138°18.$$

Для определения глубины лунки, при которой промежуточный элемент будет неподвижным относительно поверхности распиловочного диска, выразим плечи сил через $\frac{a}{2}$, где *a* – максимальный размер алмазного зерна.

Плечо силы $F_{тр1}$ найдем из решения треугольника Δ*OEB:*

$$OB = \frac{a \cdot \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{2 \cdot \cos\left(\beta + \varphi - \frac{\gamma}{2}\right)}.$$

Плечи сил $F_{тр2}$ и N_2 определятся соответственно, как $a \cdot \cos(\beta)$ и $a \cdot \sin(\beta)$.

Таким образом, получим уравнение (3), из которого определим угол β, значение которого для принятых условий составляет 30º14’.

$$N_2 \cdot \frac{a}{2} \cdot \sin(\beta) - N_2 \cdot \mu_2 \cdot \frac{a}{2} \cdot \cos(\beta) - N_1 \cdot \mu_1 \cdot \frac{a \cdot \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{2 \cdot \cos\left(\beta + \varphi - \frac{\gamma}{2}\right)} = 0. \quad (3)$$

Зная значение углов β и φ можно определить минимальную глубину лунки, т.е. минимальное значение высотного параметра *Rz*, при котором вращение элемента будет отсутствовать. Для этого выразим значение *Rz* через длину отрезка *OB*, решая треугольники Δ*OBC* и Δ*DBC*, имеющие общую сторону *CB*:

$$Rz = CD = OB \cdot \sin(\varphi) \cdot tg(\varphi) = \frac{a}{2} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cdot \sin(\varphi) \cdot tg(\varphi)}{\cos\left(\beta + \varphi - \frac{\gamma}{2}\right)}. \quad (4)$$

На рисунке 3 приведена диаграмма, отражающая зависимость высоты микронеровностей *Rz* на поверхности заготовки, обеспечивающая неподвижность на ней зерен алмазных микропорошков различной зернистости, которая получена решением уравнения (4).

Из приведенных данных видно, что с увеличением размера алмазных зерен, для обеспечения их неподвижности относительно обрабатываемой (шаржируемой) подвижности необходимо в процессе её предварительной (перед шаржированием) обработки сформировать на ней шероховатость с большим значением высоты микронеровностей. В свою очередь это позволяет обоснованно выбрать метод и режимы предварительной обработки боковых поверхностей распиловочных дисков, обеспечивающих требуемые параметры их шероховатости, при которых на последующей операции их шаржирования подвижность зерен алмазных микропорошков за счет их перекатывания в зоне обработки будет исключена. В конечном итоге это позволит повысить как производительность выполнения операции шаржирования,

так и эксплуатационные показатели сформированного на боковых поверхностях распиловочного диска алмазосодержащего слоя.

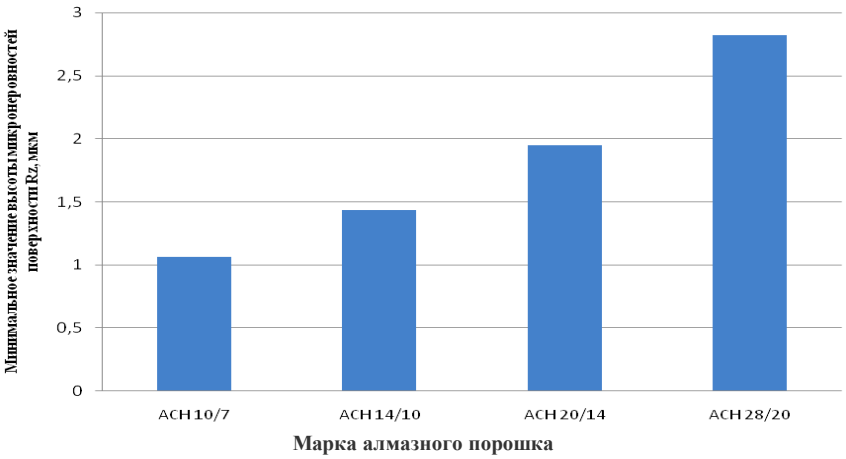

Рис. 3. Диаграмма зависимости минимального значения исходной высоты микронеровностей на поверхности распиловочного диска от марки используемого при её шаржировании алмазного микропорошка, при котором перекатывание алмазных зёрен в зоне обработки отсутствует

Как видно из диаграммы, при выборе способа предварительной обработки боковых поверхностей распиловочных дисков необходимо учитывать марку алмазного порошка, применяемого при последующем шаржировании. Более того, марка алмазного микропорошка может коренным образом менять не только параметры технологического процесса, но и сам процесс, например, заменяя обработку лепестковыми кругами на виброударную обработку.

Обобщая результаты выполненных исследований можно сформулировать следующие **выводы**:

1) предложена расчетная схема для определения условий, при которых отсутствует перекатывание алмазного зерна в процессе его шаржирования при контактировании с шероховатой поверхностью заготовки;

2) получены аналитические зависимости, позволяющие рассчитать необходимые параметры исходной шероховатости поверхности распиловочного диска, при которых в процессе её шаржирования зернами алмазных микропорошков различной зернистости отсутствует их перекатывание в зоне обработки. В частности, если на поверхности распиловочного диска формируется микрорельеф в виде множества лунок конической формы, то угол их раскрытия, обеспечивающий отсутствие перекатывания алмазных зерен, составляет порядка 140º;

3) установлено, что с увеличением размера алмазных зерен при установленном значении угла раскрытия лунки для обеспечения их неподвижности относительно обрабатываемой подвижности необходимо в процессе её предварительной обработки сформировать на ней шероховатость с большим значением высоты микронеровностей;

4) полученные результаты позволяют обоснованно выбрать метод и режимы предварительной обработки боковых поверхностей распиловочных дисков, обеспечивающих требуемые параметры их шероховатости, при которых на последующей операции их шаржирования подвижность зерен алмазных микропорошков в зоне обработки за счет их перекатывания будет исключена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов, В.И. Технология обработки алмазов в бриллианты / В.И. Епифанов, А.Я. Лесина, Л.В. Зыков; под ред. В.И. Епифанова. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.
2. Киселев, М.Г. Повышение качества шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков путем их предварительной абразивной обработки / М.Г. Киселев, П.О. Корзун // Вестн. БНТУ. – 2007. – № 3.
3. Епифанов, В.И. Линейно-геометрические параметры зерен алмазных микропорошков / В.И. Епифанов, В.С. Шерылахин //Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1981. – № 4. – С. 9 – 11.

Поступила 23.04.2009