УДК 621.922.079

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАСЕЛ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ АЛМАЗНОЙ СУСПЕНЗИИ, НА АДГЕЗИЮ ПОЛУЧАЕМОГО АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО ПОКРЫТИЯ К ПОВЕРХНОСТИ РАСПИЛОВОЧНОГО ДИСКА

Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г., канд. техн. наук ДРОЗДОВ А. В., асп. КОРЗУН П. О., магистрант ЛЁТЫЧ В. А.

Белорусский национальный технический университет

Распиловочный диск – это специальный режущий инструмент, применяемый для механического распиливания монокристаллов алмаза при производстве из них бриллиантов и других изделий. Изготовляются эти инструменты из оловянисто-фосфористой бронзы марки БрОФ 6,5-0,15 диаметром 76 мм и толщиной от 0,04 до 0,09 мм, которая определяется массой обрабатываемого кристалла.

Процесс изготовления распиловочных дисков состоит из трех основных технологических операций [1]. На первой из прокатанной до требуемой толщины бронзовой ленты вырубаются исходные заготовки дисков, конструкция одной из которых приведена на рис. 1а.

Затем производится операция шаржирования боковых поверхностей получаемых заготовок зернами алмазного микропорошка, в результате чего на них формируется кольцевая зона алмазосодержащего слоя (рис. 1б). На завершающей операции осуществляется термоправка дисков для придания им требуемой плоскостности и снятия внутренних напряжений.

Уровень эксплуатационных показателей получаемых таким образом инструментов (режущая способность, стойкость, качество обработанных поверхностей) в первую очередь определяется качеством сформированного на их боковых поверхностях алмазосодержащего слоя. Оно, в свою очередь, характеризуется количеством и равномерностью распределения по поверхности диска алмазных частиц, степенью их закрепления на ней, а также значением их разновысотности.

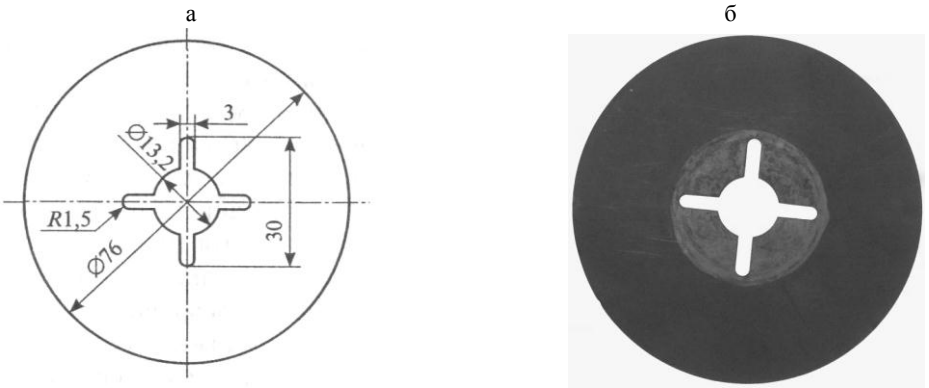

Рис. 1. а – конструктивное исполнение заготовки распиловочного диска; б – фотография распиловочного диска после выполнения операции шаржирования его боковых поверхностей

В настоящее время на алмазообрабатывающих предприятиях операция шаржирования заготовок распиловочных дисков выполняется путем втирания в их боковые поверхности зерен алмазных микропорошков с помощью вращающегося деформирующего инструмента с плоской в виде круга рабочей поверхностью, диаметр которой соответствует ширине кольцевой дорожки, формируемой на обрабатываемой поверхности заготовки [2]. Предварительно на эту поверхность посредством кисточки в виде капель наносится заранее приготовленная алмазная суспензия, состоящая из одной весовой части микропорошка АСН 20/14 и трех весовых частей касторового масла. В процессе шаржирования за счет сложения вращательного движения деформирующего инструмента и вращения заготовки диска вокруг своей оси алмазная суспензия тонким однородным слоем растирается по всей обрабатываемой на ней кольцевой дорожке.

При неизменных параметрах скоростного и силового взаимодействия контактирующих поверхностей условия формирования этого слоя, а также его характеристики (толщина слоя и ее постоянство, количество и характер распределения в нем алмазных зерен) определяются свойствами алмазной суспензии, в частности уровнем смачиваемости и адгезии ее жидкой фазы (касторового масла) как к алмазным зернам, так и к контактирующим поверхностям, а также силами поверхностного натяжения и вязкого трения. В процессе шаржирования поведение алмазных зерен в зоне обработки характеризуется протеканием следующих основных явлений. Так, зерна, располагающиеся в зоне обработки монослоем и имеющие на данный момент наибольший размер, непосредственно взаимодействуют с поверхностями заготовки и деформирующего инструмента. В зависимости от геометрии и ориентации этих зерен, а также уровня их силового и скоростного нагружения это взаимодействие может сопровождаться перекатыванием зерен в зоне обработки, их разрушением и внедрением (закреплением) некоторых из них в поверхность заготовки. Более мелкие зерна, включая осколки разрушенных зерен, практически не оказывают механического воздействия на контактирующие поверхности, а перемещаются между ними вместе с жидкой фазой (касторовым маслом) в соответствии с направлением ее движения.

Особо следует подчеркнуть, что по существующей технологии после выполнения операции шаржирования диски не промываются, а только с помощью мягкой ветоши удаляются явно выраженные излишки алмазной суспензии, оставшиеся на обработанной поверхности. В результате на боковых поверхностях заготовок дисков остается тонкое покрытие, состоящее из слоя жидкого касторового масла, в котором находятся алмазные частицы. Часть из них удерживается только за счет сил поверхностного натяжения жидкости, а часть – имеет дополнительное закрепление в результате их частичного внедрения в материал диска. Однако в таком виде это покрытие из-за низкой степени удержания в нем алмазных частиц не способно обеспечить инструменту необходимой режущей способности.

Для придания этому покрытию и распиловочному диску в целом высокой режущей способности и стойкости, а также необходимой плоскостности после шаржирования ее боковых поверхностей проводят операцию термообработки (термоправка). Она выполняется с использованием специального приспособления, конструкция которого показана на рис. 2.

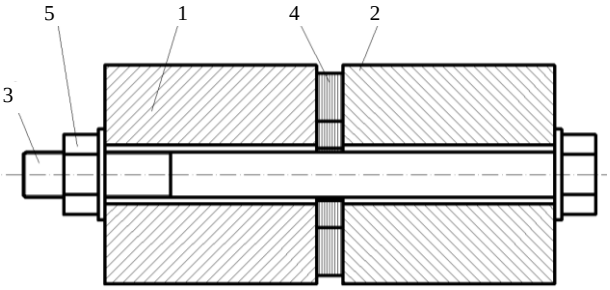

Рис. 2. Конструкция приспособления, применяемого для термообработки распиловочных дисков

Приспособление состоит из двух массивных стальных цилиндров 1 и 2 диаметром 82 мм, имеющих осевые отверстия, через которые проходит стяжной болт 3. Шаржированные заготовки дисков 4 набирают в пакет не более 25–30 шт. и зажимают между торцевыми поверхностями цилиндров с помощью гайки 5. После этого приспособление помещают в печь и выдерживают в течение трех часов при тем-

пературе 285 ± 5 °С. После охлаждения на воздухе приспособление разбирают и аккуратно разделяют пакет распиловочных дисков на отдельные инструменты.

В результате выполнения этой операции, во-первых, обеспечивается необходимая плоскостность распиловочного диска (аспект термоправки), а, во-вторых, за счет высыхания касторового масла на боковых поверхностях образуется уже твердое алмазосодержащее покрытие (аспект спекания). Понятно, что уровень эксплуатационных показателей полученного распиловочного диска (режущая способность, стойкость, качество обработанных поверхностей), в первую очередь, будет определяться как прочностью удержания алмазных частиц в этом покрытии, так и прочностью сцепления (адгезии) последнего с поверхностью диска. Отсюда следует, что при прочих равных условиях значения этих прочностных показателей покрытия напрямую связаны с определенными свойствами применяемого масла, выполняющего роль связки. Однако, несмотря на очевидность этого обстоятельства, в доступных литературных источниках практически отсутствуют сведения как экспериментального, так и теоретического плана, позволяющие установить тот комплекс свойств, которым должно обладать масло, чтобы обеспечить в процессе изготовления распиловочного диска наибольшую прочность сцепления (адгезии) получаемого алмазосодержащего слоя с его боковыми поверхностями. Располагая такими данными, можно будет, с одной стороны, научно обосновать необходимость применения конкретного вида масла, а с другой – определить направление совершенствования технологии формирования алмазосодержащего покрытия на поверхности распилочного диска с целью повышения прочности их сцепления.

Последнее обстоятельство определило цель данной работы, которая состоит в экспериментальной оценке степени влияния различных видов масел, входящих в состав алмазной суспензии, на адгезию получаемого алмазосодержащего покрытия к поверхности распиловочного диска.

Методика проведения исследований. Для выполнения экспериментов использовались четыре вида растительных масел: касторовое, льняное, оливковое и подсолнечное. Их основные свойства [3] приведены в табл. 1.

Следует подчеркнуть, что эти масла, во-первых, являются недефицитными, т. е. они экономически доступны, а, во-вторых, они существенно отличаются значениями своих отдельных характеристик: типом масла, его вязкостью и температурой вспышки, что имеет принципиально важное значение для последующего сравнительного анализа полученных экспериментальных данных и установления соответствующих закономерностей влияния отмеченных характеристик масел на прочностные показатели формируемого алмазосодержащего покрытия.

В зависимости от температуры и длительности высыхания все масла подразделяются на высыхающие (высыхают в течение короткого промежутка времени при нормальных условиях), полувысыхающие (при нормальных условиях довольно долго находятся в жидком состоянии) и невысыхающие (сохраняют жидкое состояние при нормальных условиях в течение длительного промежутка времени). Из приведенных в табл. 1 данных видно, что к невысыхающим маслам относится только касторовое масло, которое по сравнению с остальными имеет также наибольшие температуру вспышки и вязкость.

Таблица 1

Свойства масел, примененных в исследованиях

Характеристика	Масло			
	Касторовое	Льняное	Оливковое	Подсолнечное
Цвет	От бесцветного до темно-желтого	От желтого до бурого	Золотисто-желтый	Золотисто-желтый
Тип	Невысыхающее	Высыхающее	Высыхающее	Полувысыхающее
Температура вспышки	275 °С	260 °С	250 °С	225 °С
Застывание	–16 °С	–(18–27) °С	–(2–8) °С	–(16–19) °С

Вязкость при 20 °С, 10^{-6} м^2/с	110	15,5	28,8	60,6

Помимо указанных справочных данных, характеризующих конкретное масло, на процесс адгезии существенное влияние оказывает степень смачиваемости им поверхности твердого тела. В связи с тем, что она зависит от большого числа факторов (материал твердого тела, микрогеометрия контактирующей поверхности, величина поверхностной энергии и т. д.), авторами экспериментально была определена степень смачиваемости поверхности исходной заготовки распиловочного диска принятыми в исследованиях маслами. Для этого использовали метод свободно лежащей на исследуемой поверхности капли с определением краевого угла смачивания [4]. Методика проведения экспериментов включала в себя последовательное выполнение следующих процедур. На горизонтально расположенную поверхность заготовки распиловочного диска с помощью приспособления для формирования капли (шприц с иглой, внутренний диаметр которой составляет 0,1 мм, закрепленные на штативе) наносилось исследуемое масло. Затем профиль капли фотографировался цифровой фотокамерой в режиме макросъемки. Полученные с камеры снимки передавались на персональный компьютер, где с помощью программного пакета AutoCad 2007 производилось измерение длины l и высоты капли h (рис. 3).

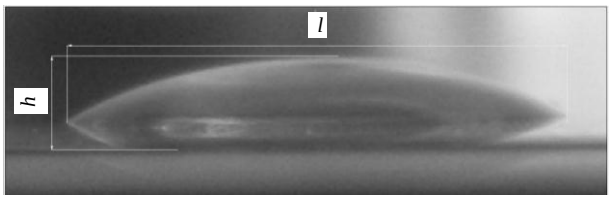

Рис. 3. Фотография капли касторового масла в режиме макросъемки

Полученные результаты измерений используют [4] для определения краевого угла смачивания

$$\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)=\frac{lh}{\left(\frac{l}{2}\right)^2+h^2}. \qquad (1)$$

В результате было установлено, что наименьший угол смачивания бронзовой поверхности распиловочного диска – у касторового масла, далее идут льняное и подсолнечное масла. Наибольший угол смачивания имеет оливковое масло.

В ходе проведения данных исследований были выполнены две серии экспериментов. В первой оценивалась адгезия только исследуемого масла к поверхности распиловочного диска, во второй – адгезия алмазной суспензии, состоящей из микропорошка АСН 20/14 и трех весовых частей исследуемого масла. В обоих случаях для получения на поверхности заготовки диска как только масляного покрытия, так и алмазосодержащего покрытия использовалась установка для двустороннего шаржирования боковых поверхностей распилочных дисков при неизменных режимах обработки [2].

Методика подготовки образцов распиловочных дисков включала в себя следующую последовательность. Исходная заготовка диска устанавливалась на шпинделе установки, затем на ее боковые поверхности наносилось дозированное количество капель исследуемого масла либо алмазной суспензии соответствующего состава. Затем обрабатывались боковые поверхности заготовок с помощью синхронно вращающихся деформирующих инструментов, в результате происходило растирание масла или алмазной суспензии с формированием на них соответствующего покрытия в виде кольцеобразной дорожки. С использованием описанного выше приспособления и на указанных там же режимах проводилась термообработка образцов распиловочных дисков. И, наконец, полученные образцы подвергались соответствующим испытаниям.

Для сравнительной оценки адгезии полученных твердых покрытий к поверхности диска в работе использован метод решетчатых надрезов [5], сущность которого заключается в следующем. С помощью тонкого режущего инструмента с определенной геометрией режущей кромки (в работе применялось соответствующим образом доведенное лезвие бритвы) и линейки на испытуемом участке распиловочного диска делали пять параллельных надрезов до металла длиной до 10 мм на расстоянии 1 мм друг от друга. Аналогичным образом делали

надрезы в перпендикулярном направлении, в результате чего на поверхности образовывалась решетка квадратов одинакового размера. Для удаления отслоившихся кусочков покрытия проводили мягкой кистью из натурального материала по поверхности решетки в диагональном направлении по пять раз в прямом и обратном направлениях. Затем с помощью микроскопа оценивали степени адгезии полученного покрытия к поверхности распиловочного диска по следующим параметрам состояния решетки: характеру краев надрезов; наличию отслоений на поверхности покрытия; наличию сколов; подсчету количества полностью отслоившихся ячеек.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 4 приведены фотографии, иллюстрирующие состояние решетки надрезов, полученных на покрытиях, сформированных на поверхности распиловочного диска с использова-
нием исследуемых масел.

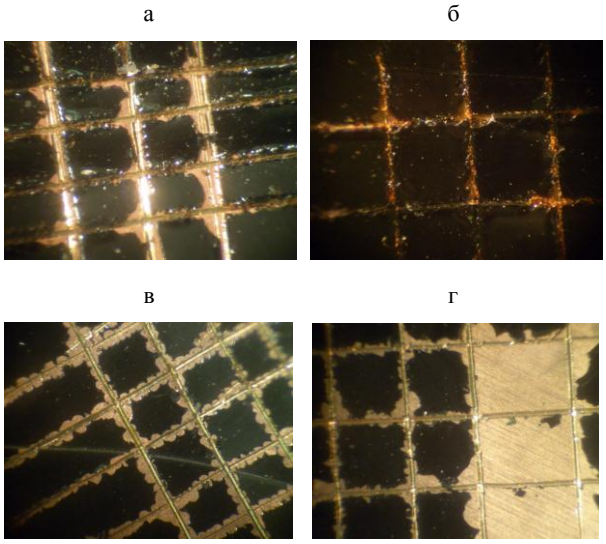

Рис. 4. Состояние решеток надрезов на покрытиях, полученных на поверхности распиловочного диска с использованием масел: а – касторового; б – подсолнечного; в – оливкового; г – льняного

При их анализе можно четко выделить ряд характерных особенностей состояния решетки надрезов, которые позволяют дать сравнительную оценку адгезии покрытий к поверхности диска.

Решетка надрезов, полученная на покрытии с использованием касторового масла (рис. 4а), характеризуется довольно ровными краями, отслоения ячеек решетки не наблюдается, имеет место частичное удаление покрытия в зонах пересечения надрезов за счет отрыва небольших фрагментов полимерной пленки. Исходя из этого можно констатировать, что такое покрытие обладает высокой адгезией к поверхности распиловочного диска и обладает определенной пластичностью.

Покрытие, полученное с использованием подсолнечного масла (рис. 4б), также имеет высокую адгезию к поверхности диска и обладает высокой прочностью. Это подтверждается ровными краями надрезов и практически полным отсутствием каких-либо нарушений покрытия.

Решетка надрезов на покрытии, полученном с применением оливкового масла (рис. 4в), характеризуется наличием множества мелких сколов, прилегающих непосредственно к линии надреза, но при этом отслоение ячеек решетки отсутствует. Это свидетельствует о том, что покрытие имеет достаточно высокую адгезию к поверхности диска, но его материал является весьма хрупким.

Покрытие, полученное с использованием льняного масла (рис. 4г), в отличие от рассмотренных выше имеет низкую адгезию к поверхности диска и обладает повышенной хрупкостью. Данный вывод подтверждается наличием интенсивного отслоения ячеек решетки надрезов, а также присутствием вдоль линии надреза множества мелких сколов, обусловленных высокой хрупкостью материала покрытия.

Таким образом, в результате выполнения первой серии экспериментальных исследований получены данные, отражающие степень адгезии покрытий к поверхности распиловочного диска, сформированных с использованием различных масел, а также сведения о некоторых свойствах этих покрытий. Вместе с тем, важно знать уровень этих показателей применительно к алмазосодержащему покрытию, формируемому на поверхности распиловочного диска, после выполнения операций шаржирования и термообработки. Следует ожидать, что присутствие в масле зерен алмазных микропорошков окажет определенное влияние как на условия формирования этого слоя, так и на адгезию к поверхности диска.

Данное предположение получило свое экспериментальное подтверждение, что наглядно иллюстрируется фотографиями решеток надрезов (рис. 5), полученных на алмазосодержащих покрытиях, сформированных на поверхности распиловочного диска с использованием различных масел.

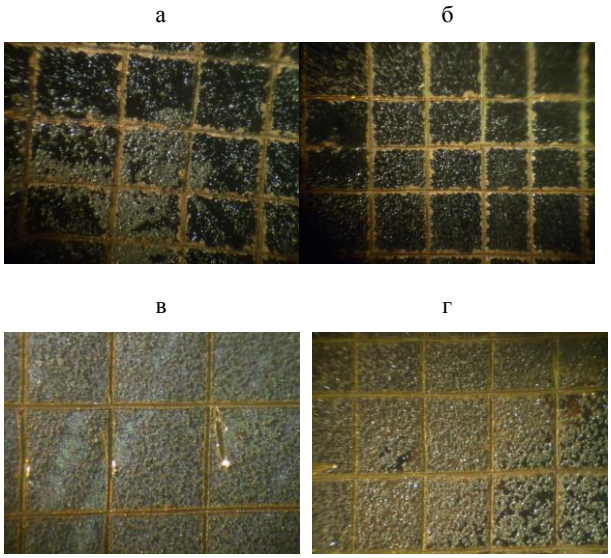

Рис. 5. Состояние решеток надрезов на алмазосодержащих покрытиях, полученных на поверхности распиловочного диска с использованием различных масел: а – касторового; б – подсолнечного; в – оливкового; г – льняного

Из сравнительного анализа состояния решеток надрезов (рис. 4, 5) следует, что наличие в масле зерен алмазного микропорошка во всех случаях приводит к повышению адгезии алмазосодержащего слоя к поверхности распиловочного диска, что особенно проявляется при использовании оливкового и льняного масел. Об этом свидетельствует отсутствие на алмазосодержащем покрытии отслоения ячеек решеток, края резов во всех случаях оказываются ровными, и они не содержат четко выраженных фрагментов хрупкого разрушения покрытий.

Отмеченные изменения, вносимые алмазными зернами в состояние и свойства получаемых покрытий, можно объяснить следующими причинами. Обратимся к схеме строения однослойного алмазосодержащего покрытия, полученного на поверхности распиловочного диска после выполнения операций ее шаржирования и термообработки (рис. 6).

В этом случае образующаяся при высыхании полимерная пленка 1 адгезионно взаимодействует как с поверхностью диска 2 (она принята абсолютно гладкой), так и с поверхностью находящихся в ней алмазных частиц. При этом часть из них (зерна 3 и 4) после выполнения операции шаржирования оказываются закрепленными в поверхностном слое за счет их внедрения на некоторую глубину в материал диска и имеющими с ним достаточно прочную механическую связь. В полученном после термообработки твердом покрытии эти зерна выполняют роль своеобразных армирующих элементов, придавая ему большую механическую прочность и повышая его адгезию к поверхности диска.

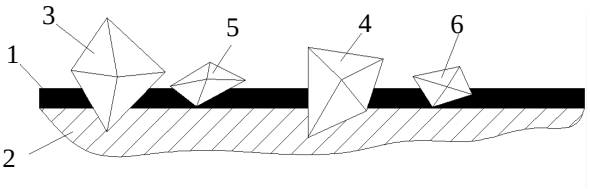

Рис. 6. Схема строения однослойного алмазосодержащего покрытия на поверхности распиловочного диска после выполнения операций ее шаржирования и термообработки: 1 – полимерная пленка, образовавшаяся в результате высыхания масла; 2 – поверхность распиловочного диска; 3 и 4 – шаржированные в материал диска алмазные зерна; 5 и 6 – алмазные зерна, закрепленные только полимерной пленкой

При прочих равных условиях уровень этих показателей у получаемых покрытий будет зависеть от степени смачиваемости поверхности алмазных частиц применяемым маслом. В ходе выполнения экспериментов авторы наблюдали две характерные ситуации. Так, при использовании касторового и подсолнечного масел выступающие из полимерной пленки части алмазных зерен не были покрыты маслом, и при их боковом освещении они давали характерные блики. В тех случаях, когда применялись оливковое и льняное масла, поверхность алмазных зерен была полностью покрыта масляной пленкой, что подтверждается как визуальным наблюдением, так и отсутствием бликов при соответствующем освещении полученных покрытий. Это позволяет сделать заключение о том, что оливковое и льняное масла по сравнению

с касторовым и подсолнечным в большей степени смачивают поверхности алмазных зерен, повышая тем самым прочность их удержания в покрытии.

Уместно заметить, что рассмотренный процесс формирования алмазосодержащего покрытия и его строение имеют в принципе общие положения с процессом гальваностегии. Различие состоит в том, что в последнем случае закрепление алмазных зерен на поверхности инструмента происходит за счет гальванически осажденного металла, а в данном – за счет полимерной пленки, образующейся в результате высыхания масла.

Исходя из представленного механизма формирования алмазосодержащего покрытия на поверхностях распиловочного диска и анализа протекающих процессов, ответственных за его прочностные характеристики, можно определить основные направления их повышения. В частности, для этого следует целенаправленно модифицировать поверхность исходной заготовки путем формирования на ней новой микрогеометрии и придания поверхностному слою необходимых свойств. Что касается микрогеометрии, то ее параметры должны быть такими, чтобы при шаржировании обеспечивалась максимальная степень насыщения поверхности алмазными зернами при высокой прочности их закрепления. Как было показано выше, при выполнении этих требований прочность сцепления сформированного покрытия с поверхностью диска будет повышаться благодаря возрастанию в ней доли механической составляющей за счет увеличения количества шаржированных в материал диска алмазных зерен, выполняющих роль армирующих элементов покрытия.

Кроме того, за счет увеличения исходной шероховатости поверхности заготовки диска возрастает фактическая площадь ее контакта с жидкой фазой алмазной суспензии (маслом), а соответственно повышается адгезионная составляющая прочности сцепления покрытия с материалом диска.

Приведенные рассуждения позволяют обоснованно утверждать, что с целью повышения прочностных характеристик формируемого на поверхностях распиловочного диска алмазосодержащего слоя необходимо перед операцией шаржирования производить их целенаправленную модификацию, используя для этого соответствующие методы поверхностной обработки материалов.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что уровень эксплуатационных показателей распиловочных дисков (режущая способность, стойкость, качество обработанных поверхностей), применяемых для механического распиливания монокристаллов алмаза, в первую очередь определяется прочностными характеристиками формируемого на их боковых поверхностях алмазосодержащего покрытия, включая прочность как удержания в нем зерен алмазного микропорошка, так и прочность его сцепления (адгезии) с поверхностью диска.

2. Показано, что значения этих характеристик определяются применяемой технологией формирования алмазосодержащего покрытия, которая включает в себя шаржирование боковых поверхностей исходных заготовок с использованием алмазной суспензии на основе касторового масла и последующую их термообработку, в ходе которой в результате его высыхания на поверхности диска образуется твердое алмазосодержащее покрытие. При этом указано на отсутствие сведений, позволяющих обосновать необходимые свойства применяемого масла, включая касторовое, обеспечивающие высокие прочностные показатели получаемого на поверхности диска алмазосодержащего покрытия.

3. С использованием метода свободно лежащей капли на поверхности исходной заготовки распиловочного диска экспериментально определены значения краевого угла смачивания различных масел. Установлено, что наибольшей и практически одинаковой степенью смачиваемости обладают касторовое и льняное масла, меньшей – подсолнечное, а хуже всего поверхность диска смачивается оливковым маслом.

4. На основе использования метода решетчатых надрезов разработана методика проведения экспериментов, позволяющая исследовать адгезию сформированных твердых покрытий к поверхности распиловочного диска, полученных с использованием четырех видов масел. При этом в одной серии экспериментов покрытие формировалось только с применением исследуемых масел, а в другой – с использовани-

ем алмазной суспензии, приготовленной на их основе (алмазосодержащее покрытие).

5. Экспериментально установлено, что наибольшую адгезию к поверхности распиловочного диска имеют твердые покрытия, полученные с применением касторового и подсолнечного масел, меньшую – оливкового масла и весьма низкую адгезию имеет покрытие с использованием льняного масла. При этом покрытия, полученные с применением оливкового и льняного масел, характеризуются высокой хрупкостью, в то время как покрытия с использованием касторового и подсолнечного масел проявляют определенную пластичность.

6. Экспериментально установлено, что наличие в масле зерен алмазного микропорошка (алмазная суспензия) приводит к повышению адгезии получаемого алмазосодержащего слоя к поверхности распиловочного диска, что особенно характерно для оливкового и льняного масел. Показано, что в этом случае образующаяся при высыхании масла полимерная пленка адгезионно взаимодействует с поверхностью как распиловочного диска, так и находящихся
в ней алмазных зерен. При этом некоторые из них после выполнения операции шаржирования оказываются закрепленными в поверхностном слое за счет их внедрения на определенную глубину в материал диска и имеющими с ним достаточно прочную механическую связь. В результате в полученном после термообработки твердом покрытии эти зерна выполняют роль своеобразных армирующих элементов, придавая ему большую механическую прочность и повышая его адгезию к поверхности диска.

7. Исходя из представленного механизма формирования алмазосодержащего покрытия на поверхностях распиловочного диска и анализа протекающих процессов, ответственных за его прочностные характеристики, обосновано положение о том, что с целью их повышения необходимо перед операцией шаржирования поверхности диска проводить целенаправленную модификацию ее микрогеометрии путем применения соответствующих методов поверхностной обработки материалов.

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.** Определение оптимальных режимов ультразвукового шаржирования распиловочных дисков с фрикционной передачей вращающего момента по их абразивной способности / М. Г. Киселев, А. А. Новиков, Д. А. Степаненко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Респ. науч.-техн. конф. асп., магистр. и студ., Могилев, 27 января 2005 г. / ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 54–55.

3. **Тютюнников, Б. Н.** Химия жиров / Б. Н. Тютюнников. – М., 1974. – 475 с.

4. **Киселев, М. Г.** Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях / М. Г. Киселев, В. В. Савич, Т. П. Павич // Вестник БНТУ. – 2006. – № 1. – С. 38–41.

5. **Лакокрасочные покрытия.** Методы определения адгезии: ГОСТ 15140.

Поступила 11.11.2008

УДК 681.511

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ КОРНЕВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Канд. техн. наук, доц. НЕСЕНЧУК А. А.

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

Одной из важнейших задач, решаемых в процессе анализа и синтеза систем автоматического управления (САУ), является установление характера влияния изменения параметров системы на статические и динамические свойства процесса управления (точность, времен-