

УДК 621.937

М. Г. Киселев, д-р техн. наук, проф., Д. А. Степаненко

ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В ФОРМИРОВАНИИ КЛЕЕВОГО АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЛОЯ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ОГРАНОЧНЫХ ДИСКОВ

На основе экспериментальных данных дано объяснение механизма образования экранирующей пленки на поверхности ограночных дисков. Рассмотрены влияние температурных режимов укатки на свойства экранирующей пленки и ее роль в формировании алмазосодержащего слоя. Доказана необходимость управления технологическими параметрами процесса укатки с целью обеспечения оптимальных тепловых режимов, а также целесообразность применения дополнительных источников энергии, в частности ультразвуковых колебаний.

Введение

В алмазообрабатывающей промышленности для шлифования и полирования (огранки) монокристаллов алмаза применяют ограночные диски, которые представляют собой абразивный инструмент с алмазосодержащим поверхностным слоем. В настоящее время на предприятиях РБ для формирования алмазосодержащего слоя на рабочих поверхностях ограночных дисков применяют метод гальваностегии (осаждения композиционных покрытий никель–бор–алмаз) [1]. Этот метод обеспечивает высокие эксплуатационные показатели инструмента, однако является энергоемким и связан с применением экологически вредных растворов электролитов. В связи с этим представляет интерес задача совершенствования метода механического шаржирования, для реализации которого применяют технологическую операцию, известную под названием «укатка». Однако решение этой задачи затруднено ограниченностью имеющихся данных о процессе укатки, в частности, о физико-химических явлениях, лежащих в его основе. Согласно имеющимся литературным данным [2], в процессе укатки происходит внедрение (шаржирование) зерен алмазного микропорошка в материал диска, в качестве которого используется износостойкий серый чугун с включениями графита. При этом зерна закрепляются преимущественно в графитовых

включениях, размер которых должен соответствовать зернистости применяемого порошка. Перед укаткой зерна алмазного порошка предварительно закрепляются на поверхности диска с помощью клея БФ-2. Для этого производят распыление суспензии, состоящей из алмазного микропорошка, взвешенного в спиртовом растворе клея [3]. Укатка производится с помощью конического деформирующего инструмента, изготавливаемого из алмазного композита типа «баллас» и закрепляемого во вращающейся цапге укаточного приспособления, которое монтируется на ограночном станке типа ОАБ-4 или специализированном укаточном станке. При этом вначале производят так называемую прикатку, характеризующуюся низким значением нагрузки на деформирующий инструмент, а затем ее постепенно увеличивают. Резкое увеличение нагрузки может привести к нарушению целостности напыленного слоя, т. к. вследствие линейного контакта деформирующего инструмента с его поверхностью возникает значительное контактное давление и силы трения, приводящие к срыву слоя. Качество укатки оценивается путем визуального сравнения внешнего вида укатанного диска с эталонным образцом. На поверхности правильно укатанного ограночного диска происходит образование черной блестящей пленки, обладающей

высокой износостойкостью и труднорастворимой в органических растворителях. В процессе обработки монокристалла алмаза эта пленка экранирует чугунную поверхность ограночного диска от контакта с обрабатываемой поверхностью алмаза, что принципиально важно для обеспечения высокого качества огранки, т. к. в случае непосредственного контакта указанных поверхностей возникает дефект огранки, известный как «седина». Для обеспечения высоких эксплуатационных показателей диска экранирующая пленка должна обладать рядом свойств, в частности, высокой износостойкостью, адгезией к материалу диска и тепловой стойкостью. Эти свойства должны обеспечивать сохранение целостности пленки на протяжении длительного времени при большом контактом давлении и высоких температурах, возникающих в процессе огранки. Для обеспечения указанных свойств необходимо, прежде всего, выяснить причины образования экранирующей пленки и выявить влияющие на них факторы. В доступных литературных источниках эта задача ранее не рассматривалась и в связи с этим имеет важное практическое значение. В данной статье на основе экспериментальных данных дано объяснение механизма образования экранирующей пленки на поверхности ограночных дисков и рассмотрена ее роль в процессе формирования алмазосодержащего слоя.

Методика проведения исследований и их результаты

На основе анализа литературных данных, а также результатов собственных наблюдений авторами было выдвинута гипотеза о том, что значительная роль в процессе формирования экранирующей пленки принадлежит тепловым явлениям, протекающим в зоне взаимодействия балласа с напыленным слоем. В частности, при скоростях вращения ограночного диска порядка 1000 об/мин наблюдается интенсивный нагрев балласа, который

может быть зафиксирован по испарению жидкостей, наносимых на поверхность цанги укаточного приспособления, и появлению на ней цветов побежалости с окраской от соломенно-желтой до синей, что свидетельствует о нагреве цанги в диапазоне температур от 220 до 310 °С. Кроме того, при исследовании процесса укатки в производственных условиях при скоростях вращения ограночного диска порядка 4000 об/мин наблюдалось покраснение балласа, что также свидетельствует о протекании интенсивных тепловых процессов. Возникновение высоких температур при укатке также подтверждается тем фактом, что при шлифовании и износе сверхтвердых материалов (СТМ) (в частности, при огранке алмазов в бриллианты) возникает интенсивное тепловыделение, возрастающее с увеличением твердости. Это явление используется при поиске «мягкого» (легко обрабатываемого) направления при шлифовании монокристаллов алмаза, обладающих анизотропией твердости [4]. Учитывая, что баллас представляет собой СТМ с твердостью, превышающей твердость алмаза в «мягком» направлении, естественно предположить, что при его изнашивании в результате взаимодействия с алмазным порошком развиваются высокие температуры.

Для выяснения механизма воздействия тепловых полей на свойства клея БФ–2, применяемого для предварительного закрепления зерен алмазных микропорошков, были изучены литературные данные о его химическом составе и свойствах. Как известно [5, 6], клей БФ–2 принадлежит к классу клеящих веществ на основе терморезистивных полимеров. Он представляет собой резольную фенолоформальдегидную смолу (ФФС), т. е. низкомолекулярное соединение с молекулярным весом 700–1000, образующееся при поликонденсации фенола и формальдегида в соотношениях, близких к эквимолекулярным, или

при избытке формальдегида. Для снижения хрупкости отвержденного клея ФФС модифицируется поливинилбутиралем. Резольная ФФС характеризуется хрупкостью и легко растворяется в органических растворителях, в частности, в этиловом спирте. Благодаря наличию метилольных групп реакция поликонденсации может быть возобновлена при повышении температуры. Ее протекание сопровождается сшиванием линейных полимерных цепей в пространственную структуру с образованием так называемого резита – высокомолекулярного соединения, характеризующегося высокой твердостью и нерастворимостью в органических растворителях. При температурах выше 280 °С происходит деструкция полимера. При протекании поликонденсации фенола и формальдегида при избытке фенола образуются низкомолекулярные продукты, не содержащие метилольных групп (так называемые новолаки). Они могут быть непосредственно превращены в резит в результате реакции с гексаметилентетраминном.

Приведенные данные можно рассматривать как доводы в пользу выдвинутой гипотезы о влиянии тепловых процессов на изменение свойств клеевого слоя. Для ее подтверждения была проведена серия специальных экспериментов. На подложки из стекла и алюминия, зафиксированные на поверхности вращающегося ограничного диска, методом распыления наносилась алмазосодержащая суспензия, после чего производилась термическая обработка образцов при различных температурах и времени выдержки. Испытания напыленного слоя на срыв производились на специально разработанном стенде, содержащем направляющую, на которой закреплялся образец, привод перемещения направляющей и ножевидный инструмент. В результате установлены три характерные стадии изменения свойств клеевого слоя, которые описаны ниже в последовательности их появления по мере увеличения температуры и времени выдержки. На первой

стадии клеевая пленка имела низкую адгезию к подложке и легко срывалась с нее в результате механического воздействия. При этом изменение цвета пленки по сравнению с ее исходным состоянием не наблюдалось. На второй стадии ее цвет изменялся на светлорыжий, причем для пленки, нанесенной на стеклянную подложку, наблюдалось изменение светопрозрачности. Адгезия пленки к подложке существенно возросла по сравнению с первой стадией. На третьей стадии наблюдалось изменение цвета пленки до темно-коричневого или близкого к черному. В последнем случае наблюдалась деградация пленки, проявляющаяся в образовании сажеобразного слоя, легко удаляющегося путем механического воздействия, и, соответственно, в резком падении ее адгезии к подложке. Фотографии пленки на различных стадиях изменения ее свойств приведены на рис. 1.

Пленка на верхнем образце соответствует первой стадии, а пленка на нижнем образце – второй стадии. На двух образцах имеются следы, оставленные на пленке инструментом при испытании на срыв. При этом отчетливо видно, что ширина следа на верхнем образце значительно больше, чем на нижнем. Кроме того, испытание пленки на верхнем образце сопровождалось ее срывом с образованием «стружки» перед инструментом. В результате края следа имеют неровную форму и между ними хорошо заметен вскрывшийся участок материала подложки. На правом крае следа, соответствующем конечной точке траектории инструмента, видна образовавшаяся перед ним «стружка». При испытании пленки на нижнем образце срыв не наблюдался и вскрытие подложки не происходило. На двух образцах имеется четко выраженная граница между свободным участком поверхности подложки, по которому производилось их закрепление на ограничном диске, и участком с напыленным

клеевым слоем.

Из полученных результатов вытекает важный с практической точки зрения вывод о наличии оптимального диапазона

температур, в котором происходит образование соединений с высокими механическими характеристиками и адгезией к подложке.

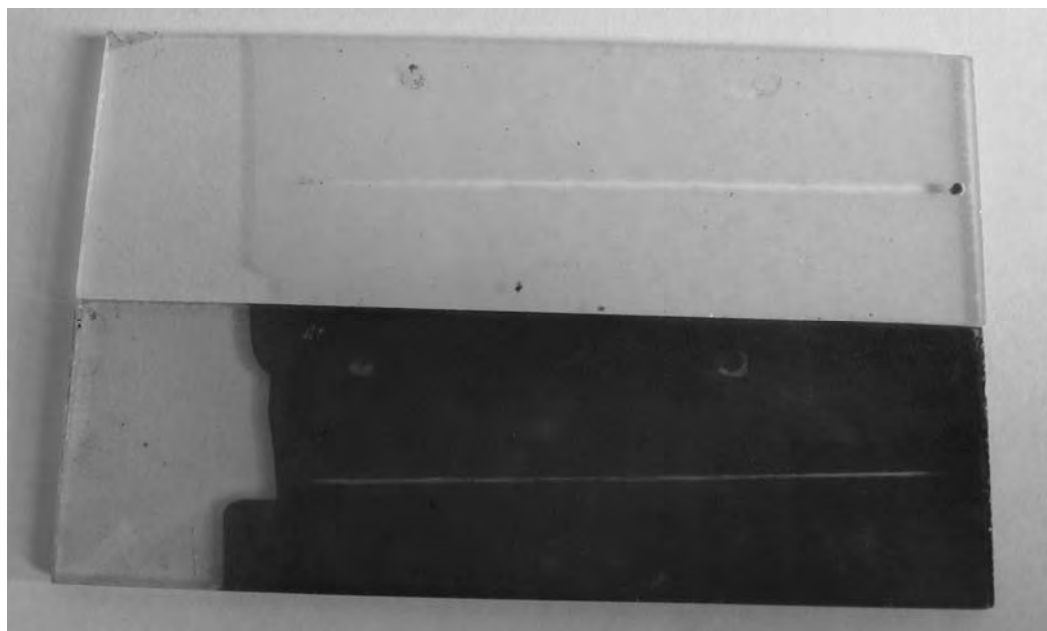


Рис. 1. Фотографии клеевого слоя на различных стадиях изменения свойств

Явление усиления адгезии клея к подложке под действием высокой температуры используется на практике при осуществлении так называемого горячего склеивания. Соединение деталей производят под давлением при температуре 160–175 °С [6].

Протекание интенсивных тепловых явлений в зоне взаимодействия балласа с напыленным слоем обусловлено, прежде всего, контактным трением и абразивным износом балласа, поэтому управление этими явлениями может быть реализовано, в первую очередь, путем изменения технологических параметров процесса укатки, определяющих работу сил трения за единицу времени и интенсивность износа балласа, а именно: скорости вращения диска и нагрузки на деформирующий инструмент. Помимо этого для повышения интенсивности нагрева могут быть использованы дополнительные ис-

точники энергии, в частности, сообщение балласу ультразвуковых колебаний (УЗК). В этом случае будет иметь место граничная диссипация акустической энергии с ее переходом в тепловую форму. Важным эффектом от применения УЗК является также изменение условий трения за счет реализации особой кинематики и динамики взаимодействия элементов пары трения «деформирующий инструмент – ограниченный диск». С одной стороны, это приводит к увеличению работы сил трения за единицу времени, часть которой преобразуется в тепловую энергию [7]. С другой стороны, происходит снижение среднего по времени значения сил трения, что позволяет снизить вероятность срыва напыленного слоя и образования дефекта укатки, известного под названием «елочка» [8]. УЗК также оказывают существенное воздей-

ствие на прочность закрепления алмазных частиц в материале диска, что подтверждается имеющимися данными о влиянии ультразвука на процесс внедрения жестких инденторов [9]. По данным работы [8] применение УЗК в процессе укатки ограночных дисков приводит к увеличению их износостойкости в 1,5 раза. Использование ультразвука позволяет помимо чугунов шаржировать диски, изготовленные из других материалов, что объясняется интенсифицирующим воздействием УЗК на процесс пластической деформации. В частности, исследования, проведенные на Гомельском ПО «Кристалл», показали, что в качестве материала дисков может применяться конверторная сталь марки ОС, из которой изготавливают оси железнодорожных вагонов. Диски из этой стали обладают высокой износостойкостью и прочностью на разрыв. В случае применения УЗК управ-

ление интенсивностью тепловыделения может осуществляться путем изменения такого фактора, как амплитуда колебаний.

Для оценки влияния УЗК на процесс срыва клеевого слоя был выполнен эксперимент, в ходе которого производилось испытание на срыв клеевого слоя, не подвергавшегося термической обработке, в условиях воздействия УЗК и при статическом нагружении. Ножевидный инструмент крепился с помощью резьбового хвостовика к ступенчатому концентратору УЗК, связанному с электроакустическим преобразователем типа Ланжевена. Возбуждение преобразователя осуществлялось от опытного генератора типа ВНТ 34М с выходной мощностью 50 Вт. Фотография образца с полученными на нем следами приведена на рис. 2.



Рис. 2. Фотография следов инструмента при статическом нагружении и при наложении УЗК

Верхний след соответствует статическому нагружению инструмента, а нижний получен при наложении на него УЗК. Как следует из анализа рисунка, применение УЗК позволяет избежать срыва напыленного слоя даже при малых значениях его адгезии к подложке.

Описанный выше механизм изменения свойств клеевого слоя позволяет объяснить некоторые особенности традици-

онной технологии укатки. В частности, прикатка производится при малой нагрузке, чтобы исключить срыв клеевой пленки, обладающей на первой стадии низкой адгезией к материалу диска. С повышением нагрузки происходит увеличение адгезии, что позволяет увеличивать нагрузку при каждом последующем ходе укаточной головки, не опасаясь срыва пленки. Это увеличение

должно производиться до тех пор, пока не будет достигнута оптимальная величина адгезии. Особенность формирования экранирующей пленки в процессе укатки по сравнению с использованным модельным представлением состоит в наличии одновременного воздействия на напыленный слой интенсивных тепловых полей и значительного контактного давления, что приводит к дополнительному увеличению адгезии. При этом процесс формирования адгезионного соединения пленки с материалом диска напоминает процесс контактной тепловой сварки. Необходимо также указать на роль экранирующей пленки в процессе формирования алмазосодержащего слоя. Сам процесс его формирования можно разбить на три этапа. На первом происходит внедрение алмазных частиц в графитовые включения материала диска, которое сопровождается погружением их выступающих вершин ниже уровня клеевого слоя. Второй – это этап выглаживания микронеровностей на поверхности клеевого слоя, который сопровождается приданием ему зеркального блеска. Этот этап должен происходить на стадии прикатки, чтобы избежать срыва напыленного слоя. Погружение зерен в клеевой слой на стадии прикатки подтверждается результатами микроскопических исследований поверхности диска. Если в исходном слое под микроскопом отчетливо видно множество зерен, равномерно покрывающих поле зрения, то после прикатки наблюдаются лишь вершины отдельных, наиболее выступающих зерен. На третьем этапе повышение температуры за счет увеличения скорости вращения диска и нагрузки на деформирующий инструмент приводит к модификации физико-химических свойств напыленного слоя с образованием экранирующей пленки и протеканием ее «контактной сварки» с материалом диска. При этом за счет изменения механических характеристик пленки по сравнению с исходным слоем она может играть существ-

венную роль в удержании зерен в алмазосодержащем слое, выполняя роль связки. Применение ФФС в качестве связки ограночного инструмента описано в [10]. Алмазосодержащий слой формируется из зерен алмазного порошка, смоченных в новолачной ФФС, содержащей в качестве отвердителя гексаметилентетрамин, с последующей термообработкой при температуре 160–200 °С. ФФС также составляют основу бакелитовой связки, названной по имени американского химика и изобретателя Бакеланда и применяемой для изготовления абразивного инструмента. Учитывая связующую функцию экранирующей пленки, достижение ее оптимальных физико-механических свойств, в частности, адгезии к материалу диска, твердости, износостойкости и степени удержания алмазных частиц, позволит получать высокое качество алмазосодержащего слоя ограночных дисков и, соответственно, обеспечит повышение их эксплуатационных показателей, в частности износостойкости.

Следует отметить, что дополнительным фактором повышения прочности клеевого слоя является уменьшение его толщины при укатке, которое, с одной стороны, связано с его пластической деформацией на стадии выглаживания неровностей, а с другой стороны, – с усадкой в результате поликонденсации. Уменьшение толщины слоя приводит к снижению вероятности его срыва, т. к. максимальное сдвиговое напряжение, возникающее в нем, пропорционально толщине.

Для повышения адгезии напыленного клеевого слоя к материалу диска могут быть использованы способы, известные из технологии клеевых соединений (тщательное обезжиривание поверхности и придание ей шероховатости, например, путем крацевания проволочным инструментом). Создание

благоприятного микрорельефа также способствует интенсификации процесса шаржирования.

Для повышения теплостойкости экранирующей пленки в ее состав могут вводиться различные наполнители, способствующие улучшению теплоотвода в процессе огранки и снижению контактного трения. Например, известен состав для шаржирования ограночных дисков, содержащий смесь алмазного и медного порошков в отношении 1:2 [11]. Для снижения коэффициента трения при огранке могут использоваться порошки графита и дисульфида молибдена.

Выводы

На основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. На основе имеющихся сведений о химическом составе и свойствах клея БФ-2, применяемого для предварительной фиксации алмазных частиц на поверхности ограночных дисков, установлено, что под действием высоких температур, возникающих в процессе укатки, происходит химическое превращение клея с образованием так называемого резита, отличающегося высокими физико-механическими показателями, в частности, адгезией к материалу диска и степенью удержания алмазных частиц.

2. Экспериментально доказано, что существует диапазон значений температуры, в котором величины перечисленных выше физико-механических показателей принимают оптимальные значения.

3. Доказана необходимость управления технологическими параметрами процесса укатки, например, нагрузкой на деформирующий инструмент и скоростью вращения диска, с целью обеспечения оптимальных температурных режимов.

4. Установлена возможность и целесообразность применения дополнительных источников энергии с целью повышения

интенсивности тепловыделения при укатке, в частности, энергии УЗК. Применение УЗК также позволяет снизить вероятность срыва напыленного слоя, повысить прочность закрепления алмазных частиц в материале диска и его износостойкость, а также осуществлять шаржирование стальных дисков.

5. Установлено, что в процессе формирования алмазосодержащего слоя образующийся в результате химического превращения клея резит выполняет роль связки, участвующей в удержании алмазных частиц. Таким образом, свойства резита, а следовательно, и тепловые режимы процесса укатки, оказывающие на них непосредственное влияние, определяют эксплуатационные показатели формируемого алмазосодержащего слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бекиш, Ю. Н.** Композиционное покрытие никель-бор-алмаз / Ю. Н. Бекиш, Т. В. Гаевская, Л. С. Цыбульская // Новые материалы и технологии : порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия : материалы докл. 7-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2006. – 259 с.
2. **Киселев, М. Г.** Особенности формирования алмазосодержащего слоя на поверхностях ограночных дисков методом укатки с применением ультразвука / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, Д. А. Степаненко // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия : материалы докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2002. – С. 135–136.
3. **Епифанов, В. И.** Технология обработки алмазов в бриллианты / В. И. Епифанов, А. Я. Песина, Л. В. Зыков. – М., 1982. – 335 с.
4. Offenlegungsschrift DE 2065557, Int. Cl. B24B 9/16. Verfahren zum Bestimmen der idealen Schleifrichtung für das Schleifen von Schmuck- und Edelsteinen.
5. Смолы феноло-формальдегидные : краткая химическая энциклопедия в 5 т. – М., 1965. – Т. 4. – 1182 с.
6. **Кардашов, Д. А.** Синтетические клеи / Д. А. Кардашов. – М., 1976. – 504 с.
7. **Северденко, В. П.** Влияние ультразвуковых колебаний различного направления

на контактное трение / В. П. Северденко, А. В. Степаненко, И. В. Заяш // Доклады Академии наук БССР. – Т. 13, № 10. – 1969. – С. 907–910.

8. Исследование возможности применения ультразвуковых колебаний при укатке ограночных дисков : отчет о НИР (заключ.). – № ГР 81078073; В. А. Цымбалист. – Барнаул, 1983. – 52 с.

9. **Киселев, М. Г.** Исследование процесса внедрения жесткого индентора при различных направлениях нагрузки в условиях статического и ультразвукового воздействий / М. Г. Киселев,

Д. А. Степаненко // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2005. – № 10. – С. 102–104.

10. **Михайлов, М. И.** Износостойкость ограночных дисков / М. И. Михайлов, В. Я. Щерба, В. Я. Прушак. – Гомель, 1996. – 157 с.

11. **А. с. СССР № 410928, МПК В 24 D 17/00.** Состав для шаржирования ограночных дисков / А. И. Литвяк, В. П. Макеенков. – № 1679156/25-8 ; заявл. 08.07.71 ; опубл. 15.01.74, Бюл. № 2. – 3 с.

Белорусского национального технического университета
Материал поступил 25.04.2007

M. G. Kiselev, D. A. Stepanenko
Investigation of the role of thermal phenomena in the formation of adhesive diamond-bearing layer on the working surfaces of scaives
Belarusian National Technical University

On the basis of experimental data explanation of the mechanism of screening film formation on the surface of scaives is given. Effect of charging temperature conditions on the properties of screening film and its role in the formation of diamond-bearing layer are considered. Necessity of control of charging process technological parameters for the purpose of providing optimal temperature conditions and utility of application of additional energy sources, particularly ultrasonic oscillations, are proved.