

УДК 536.5:621.9

Д. А. БЛИЗНЕЦ, П. Н. БОГДАНОВИЧ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

ФРИКЦИОННЫЙ НАГРЕВ И РАЗРУШЕНИЕ ЮВЕЛИРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСПИЛИВАНИИ

Приводятся экспериментальные данные о фрикционном взаимодействии боковой поверхности распиловочного диска и ювелирных кристаллов. Показано, что при превышении допустимых нагрузок боковая поверхность распиловочного диска содержит следы углерода и признаки пластического оттеснения, а на поверхности распила кристалла алмаза образуются усталостные трещины.

Ключевые слова: алмаз, графитизация, диск, нагрузка, распиливание, трение, температура, фрикционный контакт.

Интенсивное развитие высокотехнологичных способов разделения оптических и ювелирных заготовок на части привело к смещению основного акцента научных исследований в область изучения закономерностей управляемого лазерного раскалывания, электроэрозионного разрушения и др. [1]. Однако когда природные кристаллы алмаза содержат включения, распиливание их возможно только механическим способом [2]. Кроме того, ряд операций размерной обработки оптических изделий также производятся механическим способом. В этих случаях фрикционное взаимодействие в зоне резания приводит к интенсивному тепловыделению в обрабатываемую заготовку и инструмент, непрерывно изменяя контактные условия, зональные и локальные свойства обрабатываемого материала и инструмента [3, 4]. Неконтролируемое генерирование тепловой энергии способно заметно ухудшить качество обработанных поверхностей за счет появления термически инициированных трещин и сколов (лейкосапфир, силикатное стекло), а также изменения цветовых характеристик и графитизации (алмаз, алмазот) [5].

Исследования по регистрации температурных полей и оценке состояния контактной поверхности при распиливании ювелирных материалов проводились на образцах природного и синтетического алмазов на высокоскоростной испытательной установке, реализующей схему контакта «распиловочный диск – образец» (рисунок 1) [6]. Образец 1, представляющий собой природный или синтетический кристалл алмаза, закреплялся в оправке 2 и устанавливался на секцию станка ШП-2. Распиловочный диск 3 диаметром 76 мм и толщиной 0,05–0,07 мм был изготовлен из бронзы БрОФ 6,5–0,15. По мере снижения режущих свойств диска его цилиндрическая поверхность шаржировалась алмазным порошком АСН 20/14 (зернистость 14–20 мкм). Частота вращения шпинделя станка составляла 12000 об/мин, что соответст-

вует линейной скорости 42,6 м/с. Нагрузки изменяли в пределах 0,43–2,4 Н. Продолжительность испытаний определялась технологическим временем распиливания кристалла алмаза.

Тепловые процессы, протекающие в зоне распиливания природного алмаза, регистрировались при помощи комплекса IRTIS200, состоящего из портативного компьютера и тепловизионной камеры с охлаждаемой матрицей. Получение контрастных снимков с большим разрешением на распиленных поверхностях алмаза и алмазота осуществлялось с помощью растрового электронного микроскопа VEGA II LSH. Образцы предварительно протравливались в течение 30 мин в смеси нитратов натрия и калия в равных долях при температуре 500–550 °С.

При экстремальных режимах резания тепловые явления могут вносить существенный вклад в изнашивание алмаза, не только за счет инициируемого ими процесса графитизации. Более высоким становится градиент температуры, что способствует развитию высоких напряжений и увеличению вероятности образования усталостных микротрещин. Последние появляются на плоскости распила, ориентируясь перпендикулярно вектору скорости скольжения, и могут распространяться в микрообъемы алмаза, прилегающие к плоскости резания. Впоследствии многочисленные циклы нагружения приводят к повороту, встречному росту и слиянию этих микротрещин, вплоть до образования крупных частиц износа.

Косвенным подтверждением этого явления может служить тепловизионное изображение нагретых областей кромки распиловочного диска. В частности, на рисунке 2 представлено распределение температуры вдоль режущей кромки распиловочного диска 3. Здесь алмазная заготовка закреплена в оправке 2, которая фиксируется в нагружающем устройстве 1. Распиловочный диск удерживается прижимными фланцами 5 на оси вращения 4, приводимой в движение с помощью ременной передачи. Видно, что до наиболее высокой температуры нагревается распиливаемая заготовка, а режущая кромка диска после выхода из зоны резания охлаждается до температуры около 30 °С. Однако в случае, когда температура в зоне резания достигала порядка 330–350 °С, на кромке диска, в вышедшей из зоны контакта области, зачастую появлялось пятно, нагретое до температуры ≈ 90 °С. Наличие такой области обусловлено выходом еще не успевшей остыть крупной частицы износа алмаза.

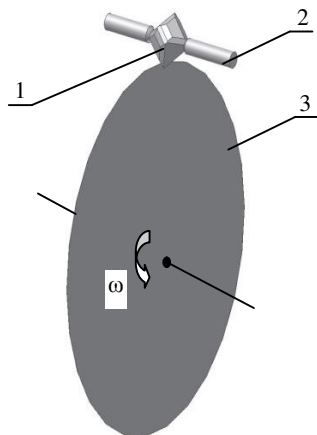


Рисунок 1 – Схема контакта образца и диска при распиливании алмаза:

1 – кристалл алмаза; 2 – оправка;
3 – распиловочный диск

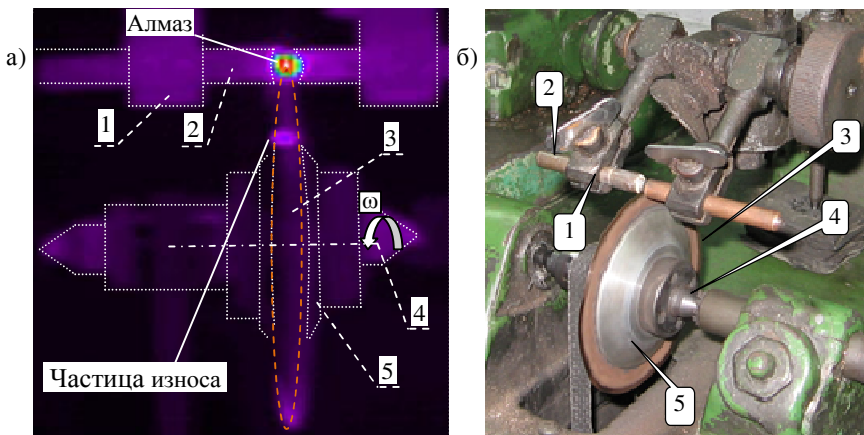


Рисунок 2 – Термограмма распиливания алмаза (а) и распиловочный узел (б):

- 1 – держатель оправки; 2 – оправка для алмаза; 3 – распиловочный диск;
4 – ось распиловочной секции; 5 – прижимные фланцы

С увеличением давления в зоне контакта «абразивный инструмент – заготовка» наступает такой момент, когда растягивающие напряжения от действия единичного зерна абразива будут близки к прочности алмаза [7]. В этом случае происходит образование полукольцевой микротрещины. Зерна абразива, перемещающиеся по этому же пути, увеличивают первоначальную микротрещину, а также способствуют образованию новых неоднородностей. Пересекающиеся микротрещины образуют сетку, в результате часть частиц обрабатываемого кристалла теряет связь с основным объемом материала.

Свидетельства высоких фрикционных температур в зоне контакта алмазоабразивного инструмента и поверхности кристалла были получены в результате анализа боковых поверхностей распиловочного диска, прилегающих к режущей кромке. Предварительно было проведено математическое моделирование процесса нагружения испытуемого узла трения в среде ANSYS и выявлена вероятность взаимодействия боковой поверхности распиловочного диска с пропиленной частью образца [8]. Для экспериментального подтверждения такого взаимодействия были изучены поверхности распиловочного диска с помощью электронного микроскопа.

На рисунке 3, а приведен снимок боковой поверхности распиловочного диска после эксплуатации при нагрузке на распиливаемый кристалл 2,1 Н и скорости скольжения 42,6 м/с, на котором выделены три кольцевых участка диска. На участке 1 отмечаются абразивные полосы скольжения, которые появились в результате воздействия острых граней распиливаемого кристалла на мягкий материал диска. На участке 2, явно отличающемся морфологи-

ей от участков 1 и 3, был проведен химический анализ с помощью приставки к электронному микроскопу VEGA II LSH. Было проанализировано три спектра снятых на этом участке распиловочного диска. В отличие от спектра 1, где по химическому составу идентифицируется бронза, спектры 2 и 3 содержат более 50 % углерода и 6–9 % кислорода (рисунок 3, б). Наличие кислорода может свидетельствовать об интенсивном процессе окисления (горения), а углерод, если судить по морфологии поверхности, представляет собой графитизированный за счет высоких температур алмаз с боковых поверхностей пропиленного кристалла.

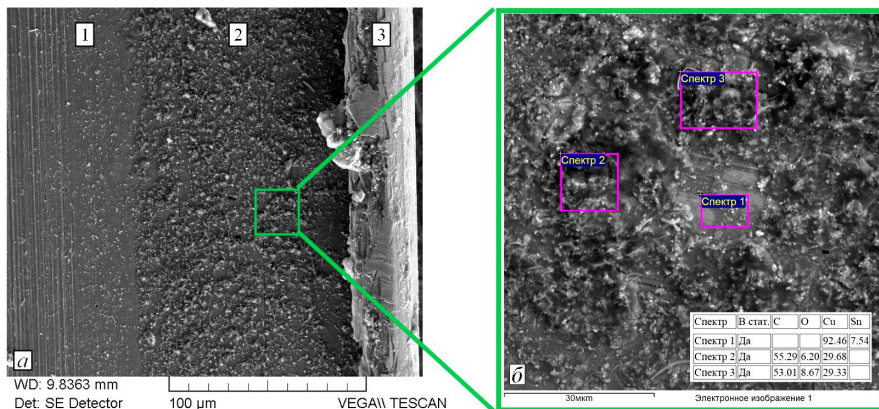


Рисунок 3 – Боковая поверхность распиловочного диска:
 а – фотография распиловочного диска;
 б – масштабированное изображение выделенной области

Участок 3 представляет собой режущую кромку, которая подвергается пластическому деформированию и формированию слоистой структуры. Наличие участков 2 и 3 подтверждает факт достижения высокой температуры в зоне фрикционного контакта. Это возможно в случае, если участок 2 диска изгибается под воздействием нормальной нагрузки и входит в контакт боковой поверхностью [9]. Выявленный углерод в этой области может быть продуктом деструкции алмаза, протекающей при температуре около 600 °С.

На рисунке 4 приведен снимок боковой поверхности менее нагруженного распиловочного диска: нагрузка на распиливаемый кристалл составляла 0,84 Н, а скорость скольжения – 42,6 м/с. Видно, что морфология включений несколько отличается от предыдущего случая. На расстоянии 70–100 мкм от режущей кромки на боковой поверхности диска присутствуют включения углерода (рисунок 4, б). Исходя из морфологии включений и химического состава, можно предположить, что они являются внедренными частицами, образовавшимися в результате хрупкого разрушения обрабатываемого алмаза.

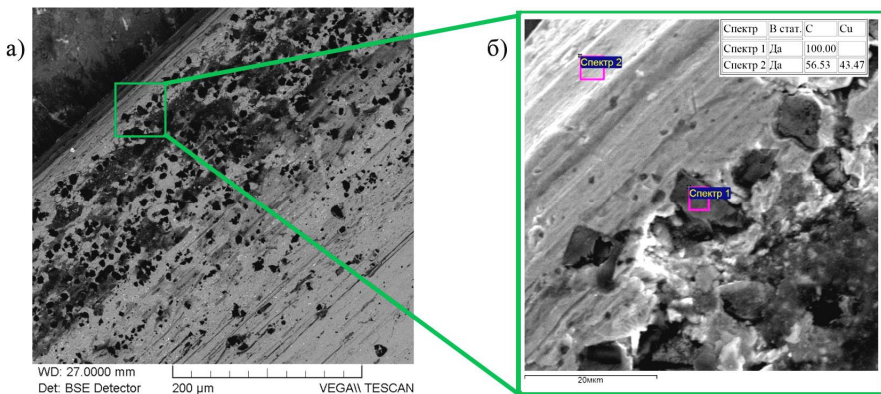


Рисунок 4 – Боковая поверхность распиловочного диска с включениями:
а – фотография распиловочного диска;
б – масштабированное изображение выделенной области

Наличие слоистой структуры материала распиловочного диска зафиксировано в обоих случаях (рисунок 5) и позволяет судить о том, что боковой поверхностью инструмента совершается множественный высокотемпературный фрикционный контакт. В результате материал поверхностного слоя диска размягчается и «сползает» по режущей кромке. При многократных циклах взаимодействия формируются отдельные частицы износа диска чешуйчатой формы.

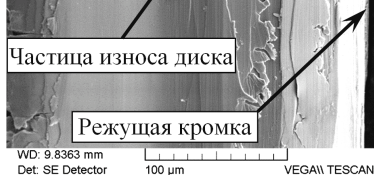


Рисунок 5 – Слоистая структура режущей кромки распиловочного диска

Выполненные ранее исследования и приведенные в настоящей работе данные позволяют утверждать, что доминирующее влияние на теплообразование в зоне фрикционного контакта при распиливании алмаза оказывают особенности структуры конкретной заготовки, наличие внутренних дефектов и прикладываемая нагрузка. Зарегистрированная температура на поверхности распиливаемого образца превышает 360 °С, что по существующим представлениям дает основание полагать, что температура вспышки на локальных пятнах контакта достигает точки начала полиморфных превращений [9].

Описанные явления приводят не только к изнашиванию боковой поверхности распиловочного диска. Существенному разрушению подвергается поверхность распила как искусственного, так и природного алмаза. В процессе

распиливания на ней образуются микротрещины размером в несколько десятков микрометров, растущие вглубь кристалла (рисунок 6).

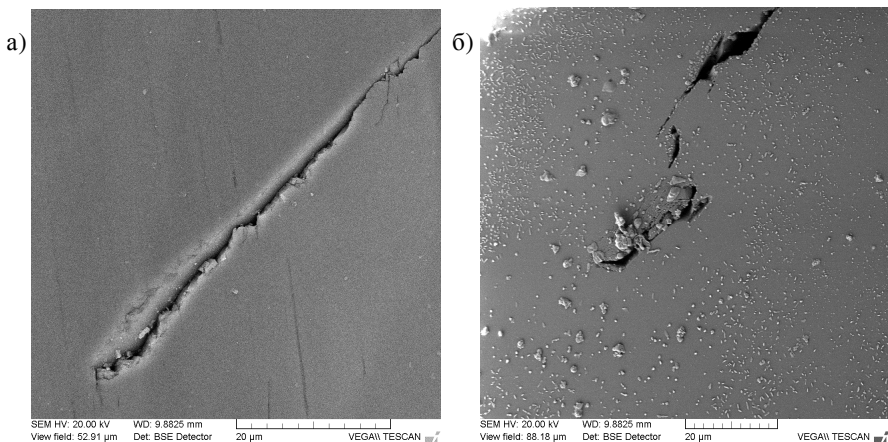


Рисунок 6 – Трещины на боковой поверхности распиленного природного алмаза:
 $a - N = 0,84$ Н; $б - N = 2,1$ Н

Глубина распространения таких микротрещин будет определять толщину дефектного слоя, подлежащего удалению при последующей обработке алмаза. Отсюда следует, что превышение допустимой нагрузки (зависит от напряженного состояния, дефектов в кристалле, направления распиливания и т.д.) на распиливаемый кристалл, вызывающей изгиб распиловочного диска, приводит к возникновению фрикционного контакта боковой поверхности диска с пропиленной поверхностью алмаза. При этом происходит интенсивный разогрев поверхностного слоя кристалла, сопровождающийся возникновением внутренних напряжений, графитизацией, изменением цвета и оптических свойств алмаза и зарождением усталостных трещин.

Заключение. Распиливание заготовок из исследованных материалов сопровождается локальным усталостным разрушением слоя, прилегающего к боковым поверхностям распила. Экспериментально установлено, что при нагрузке выше 0,8 Н происходит волнообразный изгиб распиловочного диска и реализуется его фрикционное взаимодействие с боковой поверхностью распила, на которой появляются следы адгезионного переноса меди и участки выкрашивания. В результате образуется дефектный слой, удаление которого сопряжено со значительными потерями сырья и затратами времени на обработку. При нагрузках свыше 1,5 Н происходит и локальная графитизация микровыступов поверхности алмаза, что значительно ухудшает оптические свойства изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Никитюк, Ю. В.** Физические закономерности лазерного термораскалывания силикатных стекол и алюмооксидной керамики : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.21 / Ю. В. Никитюк; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2009. – 166 с.

2 **Ucun, I.** Stress analysis of marble sawing disc in cutting process / I. Ucun, M. Colakoglu, S. Tasgetiren // Journal of Applied Sciences. – 2008. – Vol. 8. – P. 876–880.

3 **Mirsalimov, V.** Contact problem on partial interaction of faces of a variable thickness slot under the influence of temperature field / V. Mirsalimov, A. Musrafayev // *Mechanika*. – 2015. – Vol. 21, No. 1. – P. 19–22.

4 Механизмы контактных взаимодействий при алмазобразивной обработке хрупких материалов / А. М. Кузей [и др.] // Процессы механической обработки в машиностроении : сб. науч. тр. / Житомир. гос. технол. ун-т. – Житомир, 2015. – Вып. 15. – С. 139–150.

5 **Yevtushenko, A. A.** Transient temperature of local moving areas of sliding contact / A. A. Yevtushenko, E. G. Ivanyk, O. M. Ukhanska // *Tribology International*. – 1997. – Vol. 30, Is. 3. – P. 209–214.

6 **Богданович, П. Н.** Экспериментальная установка для изучения тепловых процессов в динамическом контакте твердых тел / П. Н. Богданович, Д. А. Близнец, Д. В. Ткачук // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. – № 8. – С. 17–22.

7 **Епифанов, В. И.** Технология обработки алмазов в бриллианты : учебник для сред. проф.-тех. училищ / В. И. Епифанов, А. Я. Песина, Л. В. Зыков. – М. : Высш. шк., 1982. – 351 с.

8 **Bogdanovich, P. N.** Theoretical and experimental analysis of the sawing process for hard and ultra-hard materials / P. N. Bogdanovich [et al.] // *International journal of mechanical engineering and robotics research*. – 2018. – Vol. 7, No. 2. – P. 120–125.

9 **Богданович, П. Н.** Тепловые и термомеханические явления в контакте скольжения / П. Н. Богданович, Д. В. Ткачук // Трение и износ. – 2009. – Т. 30, № 3. – С. 214–229.

D. A. BLIZNETS, P. N. BOGDANOVICH

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

FRICION HEATING AND DESTRUCTION OF JEWELERY MATERIALS WHEN CUTTING

Experimental data on the frictional interaction of the lateral surface of the sawing disk and jewelry crystals are presented. It is shown that when the permissible loads are exceeded, the side surface of the sawing disk contains traces of carbon and signs of plastic displacement, and fatigue cracks form on the surface of the diamond crystal.

Получено 06.11.2019