

УДК 621.922.025:661.1.053.523

**А. М. Кузей**, д-р. техн. наук; **В. Я. Лебедев**, канд. техн. наук; **Н. И. Лащ**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск*

## **МЕХАНИЗМЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ХРУСТАЛЯ АЛМАЗОАБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ**

*Рассмотрены механизмы изнашивания при контактном взаимодействии алмазообразивного инструмента и хрусталя. Исследовано влияние добавления наполнителя в виде гранул карбид бора – стекло в связку на производительность инструмента. Показано, что введение наполнителя снижает адгезионное взаимодействие матрицы алмазосодержащего композиционного материала и хрусталя.*

**Ключевые слова:** алмазообразивный инструмент, композиционный материал, наполнитель, хрусталь, контактное взаимодействие.

Оптимальные эксплуатационные характеристики алмазообразивного инструмента достигаются в узком диапазоне режимов обработки. Эти режимы обеспечиваются согласованием скоростей износа матрицы (связки) алмазосодержащего композиционного материала и обновлением режущих граней алмазных зёрен за счёт их разрушения. При таком комплексном взаимодействии на рабочей поверхности инструмента постоянно поддерживается некоторая концентрация алмазных зёрен, участвующих в процессе резания [1–4]. Основными факторами, приводящими к дестабилизации режима «самозатачивания» инструмента является преимущественное разрушение и выкрашивание алмазных зёрен из матрицы алмазосодержащего композиционного материала и контактное взаимодействие матрицы с обрабатываемым материалом. В зависимости от химического состава, физико-механических характеристик связки и обрабатываемого материала происходит внедрение частиц обрабатываемого материала в связку (засаливание), либо переход материала связки в поверхностный слой обрабатываемого материала. При достижении такого состояния процесс шлифования дестабилизируется или полностью прекращается.

Шлифование хрусталя алмазообразивным инструментом протекает при непрерывном снижении его режущей способности [2]. В этих условиях возрастает влияние контактного взаимодействия матрицы композиционного материала с хрусталём на производительность шлифования и удельный расход алмаза. Механизмы процессов контактного взаимодействия малоизучены, хотя они определяют производительность шлифования и качество обработанной поверхности.

В работе методами электронной сканирующей микроскопии изучена морфология рабочих поверхностей алмазного инструмента и обработанных поверхностей изделий из хрусталя.

В качестве алмазосодержащих композиционных материалов использовали материалы систем медь – 20 масс. % олово и медь – 20 масс. % олово – 5 масс. % наполнитель. В качестве наполнителя применялись гранулы карбид бора – стекло. Размер гранул 40–50 мкм. Концентрация алмазных зёрен (фракция 80–63 мкм) в алмазосодержащих композиционных материалах 25 об. %. Обработку хрусталя проводили алмазообразивным кругом формы 1ЕЕ1 250×10×8×76×110° при частоте вращения 3000 об/мин, по методике согласно ГОСТ 30352-96 на стенде ФТИ 9.113 на базе универсального заточного станка ЗЕ642.

После вскрытия или правки алмазосодержащего слоя круга, алмазные зёрна выступают над поверхностью матрицы на 15–25 мкм. Вершины алмазных зёрен в основном не разрушены (рис 1 а, б).

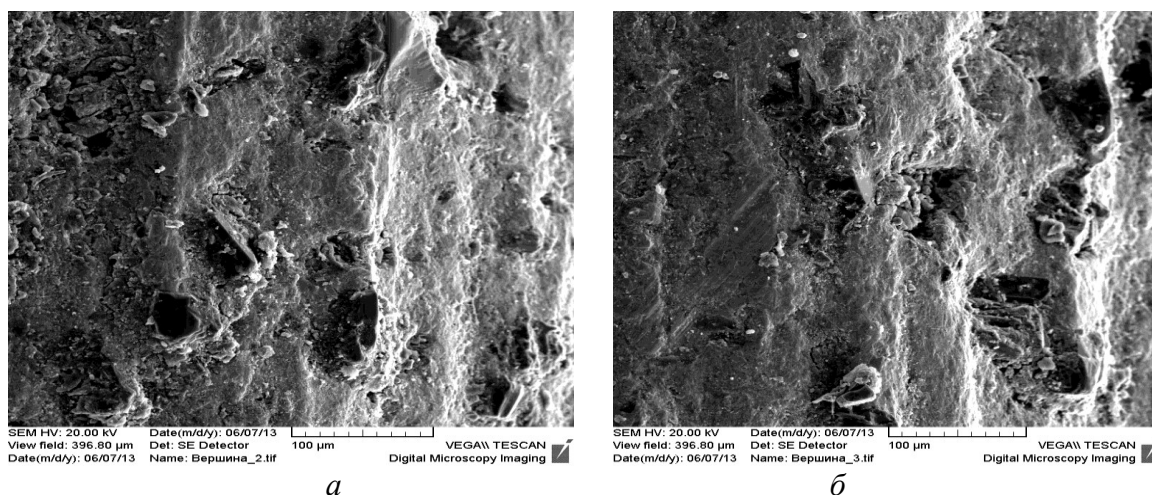


Рис. 1. Морфология поверхности алмазосодержащих композиционных материалов после правки и вскрытия инструмента: а – матрица Cu – 20 масс. % Sn, б – матрица Cu – 20 масс. % Sn – B<sub>4</sub>C

Процесс обработки хрусталя при данных режимах протекает с постепенным снижением режущей способности инструмента. Режущая способность инструмента с рабочим слоем из Cu – 20 масс. % Sn – алмаз снижается с 12 см<sup>3</sup>/мин после 1 минуты шлифования до 2,4 см<sup>3</sup>/мин после 30 минут шлифования. Для материала Cu – 20 масс. % Sn – B<sub>4</sub>C – алмаз снижение отмечено в меньшей степени: после 30 минут шлифования режущая способность снижается с 12,8 см<sup>3</sup>/мин до 4,9 см<sup>3</sup>/мин.

Морфология поверхности алмазосодержащего композиционного материала Cu – 20 масс. % Sn – алмаз после 1 минуты шлифования изменяется незначительно. Алмазные зёрна выступают над матрицей, их вершины не изношены, а на гранях появляются небольшие сколы. Исходный волнистый рельеф матрицы сглажен (рис 2 а, б), в углублениях микрорельефа расположены бесформенные и округлые частицы.

В композиционном материале Cu – 20 масс. % Sn – B<sub>4</sub>C – алмаз морфология поверхности матрицы более развитая (рис 2, в). Гранулы B<sub>4</sub>C разрушены, в углублениях находятся дисперсные частицы различной формы: округлой, игольчатой, пластинчатой (рис 2, б, г).

После 10 минут шлифования на поверхности алмазных зёрен, выступающих из матрицы, появляются сколы (рис 3 а, б). Высота алмазных зёрен, выступающих из матрицы, снижается, на поверхности матрицы появляются борозды образующиеся при контакте матрицы с хрусталём (рис 3, б). Поверхность матрицы сглажена, её микрорельеф образован углублениями, бороздами (царапинами), выступами. Присутствуют частицы различной формы: округлой, пластинчатой, игольчатой.

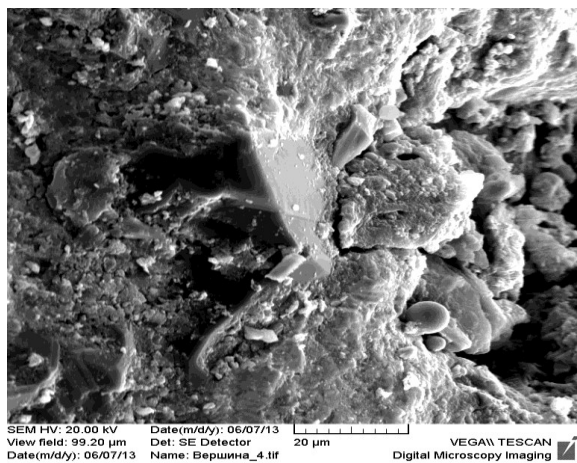
После 20 минут шлифования высота алмазных зёрен, выступающих над матрицей, снижается (рис 4), их вершины изношены, или частично разрушены. На поверхностях матрицы и алмазных зёрен присутствуют частицы округлой, овальной, пластинчатой форм.

После 30 минут шлифования вершины алмазных зёрен сильно изношены, разрушены и не выступают над матрицей. Гранулы B<sub>4</sub>C разрушены, на поверхности изношенных алмазных зёрен и матрицы присутствуют округлые частицы (рис 5). Поверхность матрицы сглаженная, её микрорельеф образуют микроскопические выступы, впадины, царапины (рис 5 в, г).

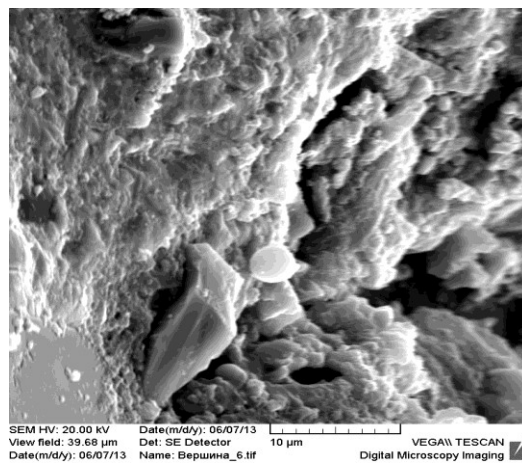
Одновременно с изменением морфологии поверхности алмазосодержащих композиционных материалов, по мере увеличения длительности процесса шлифования изменяется и морфология обработанной поверхности хрусталя (рис. 6).

После 1 минуты шлифования на поверхности хрусталя формируется развитый рельеф, представляющий собой совокупность острых кромок, выступов, борозд, в которых

находятся продукты износа в форме пластинчатых, игольчатых, округлых, осколочных частиц (рис. 6 а).



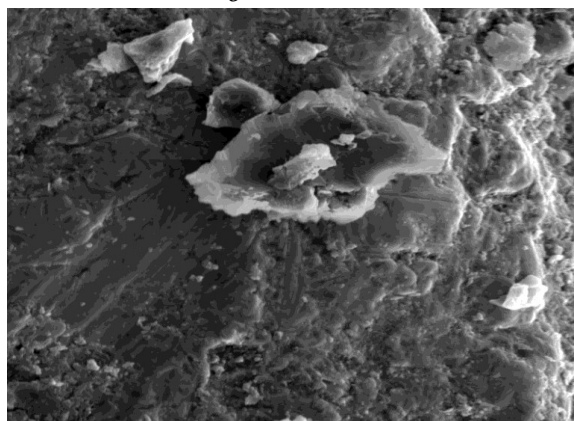
а



б

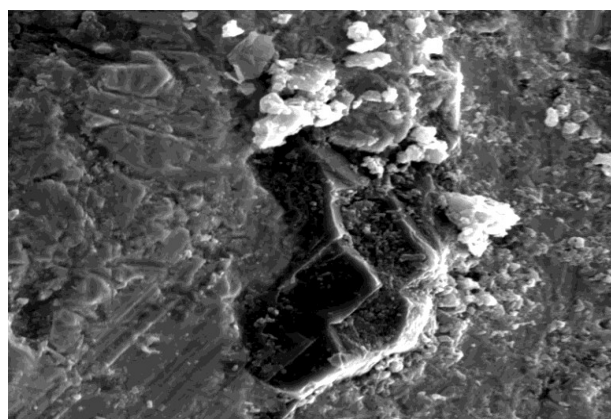


в

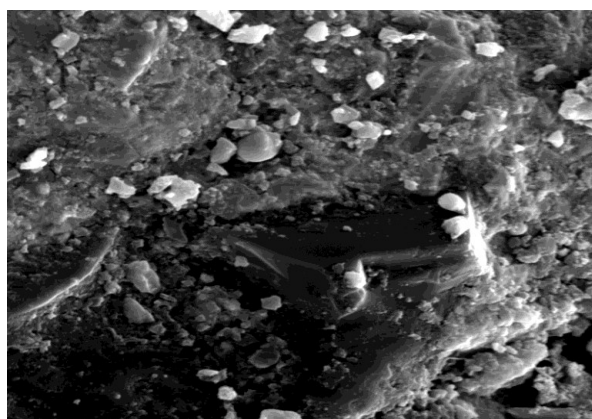


г

Рис. 2. Морфология поверхности износа алмазосодержащего композиционного материала после 1 минуты шлифования хрусталя: а, б – матрица  $Cu - 20 \text{ масс. \% Sn}$ ; в, г – матрица  $Cu - 20 \text{ масс. \% Sn} - B_4C$



а



б

Рис. 3. Морфология поверхности алмазосодержащих композиционных материалов после пяти минут шлифования хрусталя: а – матрица  $Cu - 20 \text{ масс. \% Sn}$ ; б – матрица  $Cu - 20 \text{ масс. \% Sn} - B_4C$

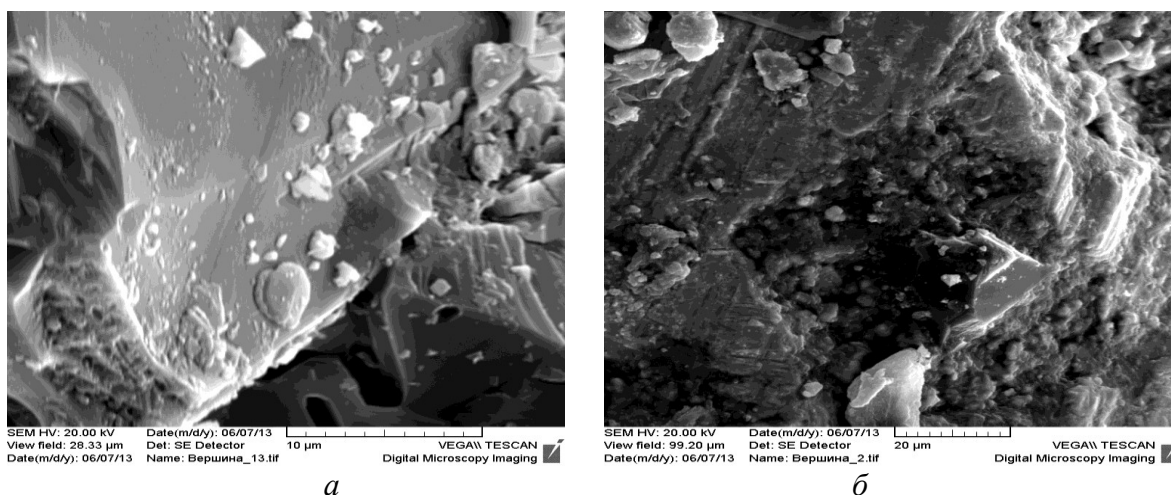


Рис. 4. Морфология поверхности алмазосодержащих композиционных материалов после двадцати минут шлифования хрусталя: а – матрица  $Cu - 20$  масс. %  $Sn$ ; б – матрица  $Cu - 20$  масс. %  $Sn - B_4C$

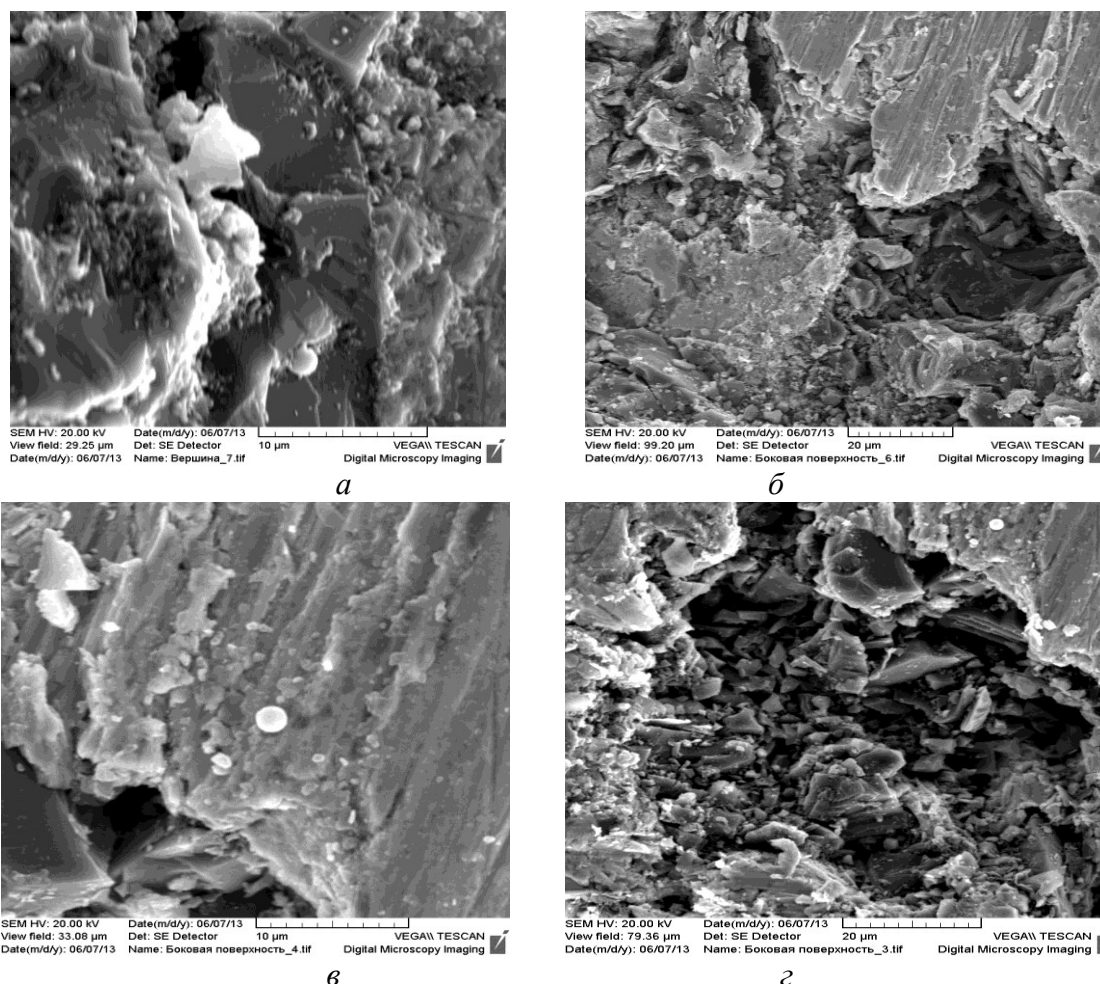


Рис. 5. Морфология поверхности алмазосодержащих композиционных материалов после 30 мин шлифования хрусталя: а, б – матрица  $Cu - 20$  масс. %  $Sn$ ; в, г – матрица  $Cu - 20$  масс. %  $Sn - B_4C$

Увеличение длительности процесса шлифования до 5 минут приводит к некоторому сглаживанию острых кромок, формирующих микрорельеф поверхности и изменению

морфологии продуктов износа. На сглаженных гребнях кромок появляются частицы в форме чешуек, часть которых окаймлена округлыми частицами (рис 6 б).

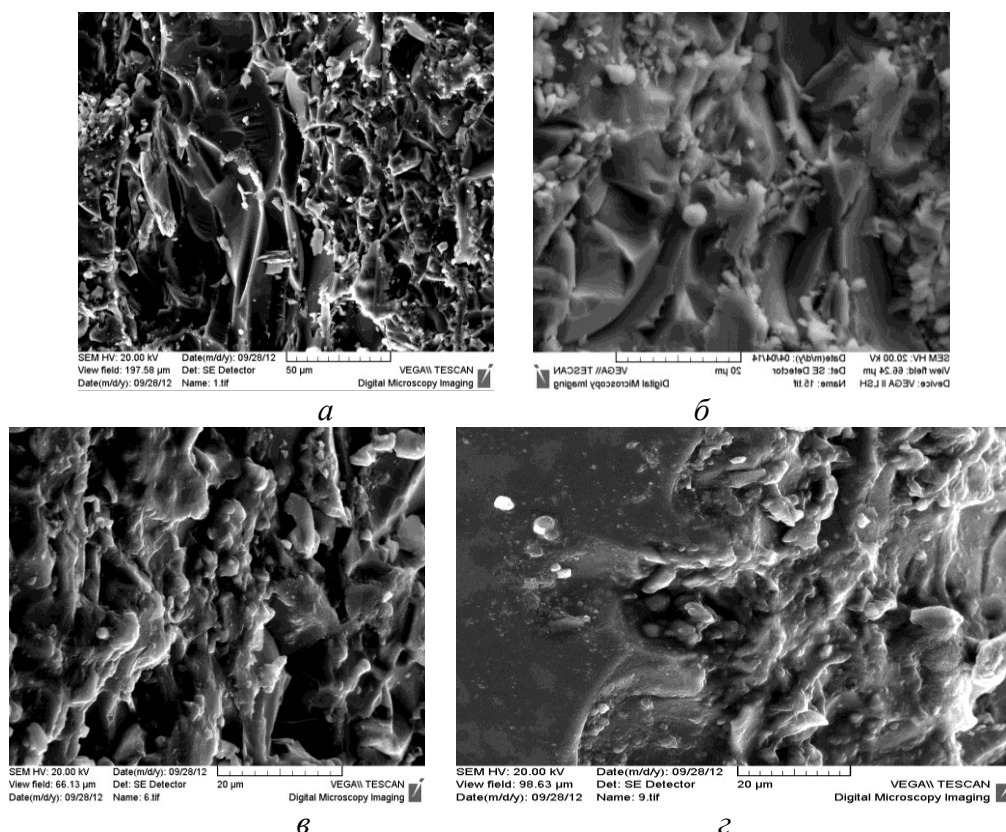


Рис. 6. Морфология поверхности хрусталя после шлифования: а – длительность шлифования 1 мин; б – длительность шлифования 5 мин; в – длительность шлифования 20 мин; г – длительность шлифования 30 мин

Последующее увеличение длительности процесса шлифования сопровождается сглаживанием острых кромок микрорельефа (после двадцати минут шлифования), появлением гладких участков поверхности. Продукты износа расположены во впадинах микрорельефа и представляют собой округлые, либо бесформенные частицы со сглаженными кромками.

Процесс шлифования хрусталя алмазоабразивным инструментом можно рассмотреть как их контактные динамические взаимодействия, которые приводят к износу обоих материалов. Износ хрусталя при таком взаимодействии может быть описан в рамках общепринятых представлений микрорезания единичными алмазными зёрнами (резцами) хрупких материалов [3].

При динамическом контакте вершин алмазного зерна (резца) с поверхностью хрусталя в зоне контакта возникает область напряжений. По мере увеличения давления и глубины внедрения вершины в хрусталь, в нём, как в хрупком материале, в области внедрения вершины зерна алмаза образуется объемная сеть микротрещин. Перемещение вершины алмазного зерна в хрустале сопровождается разрушением слоя. Последующие контакты вершин алмазных зёрен уже происходят с дефектным слоем хрусталя. Перемещение вершины алмазного зерна в дефектном, трещиноватом слое сопровождается разрушением последнего. Данная схема не учитывает взаимодействия обрабатываемого материала с матрицей алмазосодержащего композиционного материала и влияние теплового эффекта контактного взаимодействия.

В процессе шлифования одновременно с разрушением поверхности хрустала, происходит изнашивание рабочего слоя инструмента, который проявляется как скалывание и разрушение алмазных зёрен, истирание матрицы при трении об обрабатываемый материал (рис. 2–4). Процесс взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала характеризуется высокими температурами в контактных зонах.

Тепловой эффект контактного взаимодействия приводит к значительному повышению температуры на границе раздела алмазоабразивный композиционный материал – хрусталь и влияет на прочностные, физико-механические характеристики материалов на границе раздела и механизмы их изнашивания.

Механизм изнашивания хрустала и алмазосодержащего композиционного материала зависит от химических, физико-механических характеристик контактирующих материалов, силовых параметров динамического взаимодействия в зоне контакта. Обычно выделяют следующие виды (и механизмы) изнашивания: адгезионный, диффузионный, абразивный, хрупкое разрушение [1]. В реальных условиях алмазоабразивной обработки одновременно реализуется несколько механизмов изнашивания. Каждому из них соответствует характерная морфология поверхности: абразивному – риски вдоль направления шлифования, адгезионному – бугристая поверхность, диффузионному – гладкая поверхность, хрупкому разрушению – совокупность гладких поверхностей разделённых острыми кромками [1].

Морфология поверхности алмазосодержащего композиционного материала после обработки корундовым кругом (вскрытия) имеет характерный волнистый микрорельеф, образованный бороздками и выступами, ориентированными в направлении главного движения резания. Образование волнистого микрорельефа обусловлено меньшим износом матрицы за выступающими алмазными зёрнами, по сравнению с участками контактирующими с абразивным кругом. Такая морфология поверхности характерна для абразивного изнашивания (рис. 1).

Морфология поверхности алмазных зёрен после 1 минуты шлифования хрустала свидетельствует о хрупком механизме их разрушения (рис. 2). Характер морфологии поверхности матрицы композиционного материала свидетельствует о протекании одновременно нескольких механизмов изнашивания. Существование гладких участков матрицы должно указывать на диффузионный механизм, бугристых – на адгезионный (рис. 2).

Увеличение длительности шлифования приводит к изменению морфологии изношенных поверхностей алмазосодержащих композиционных материалов и хрустала. После пяти минут шлифования изнашивание алмазных зёрен происходит одновременно по механизмам хрупкого разрушения и адгезионного изнашивания (рис. 6). На это указывает форма осколков и присутствие на поверхности алмазных зёрен продуктов изнашивания (меднооловянного сплава и хрустала). Изнашивание матрицы происходит по абразивному и адгезионному механизмам (рис. 3). Далее (после двадцати и тридцати минут шлифования) изнашивание алмазных зёрен протекает хрупким разрушением, а так же за счёт адгезионного взаимодействия. О протекании этих механизмов изнашивания указывают трещины на алмазных зёрнах и плёнки частиц продуктов износа морфологически связанных с поверхностью. Для матрицы в этом временном интервале (двадцать - тридцать минут) шлифования характерны абразивный и адгезионный механизмы (рис. 6 б, в).

Изменение морфологии обработанных поверхностей хрустала показывает, что в начальный период шлифования (от одной до пяти минут) съём материала определяется его хрупким разрушением. В дальнейшем на поверхности хрустала появляются рельефы указывающие на протекание, наряду с хрупким разрушением, адгезионного (после двадцати минут шлифования), адгезионного и диффузионного (после тридцати минут шлифования) механизмов его изнашивания (рис. 6).

Увеличение длительности процесса шлифования сопровождается изменением высоты выступания алмазных зёрен. Снижение высоты алмазных зёрен приводит к увеличению площади контакта матрицы с хрусталём. Одновременно увеличивается и

давление на матрицу композиционного материала. Следствием этого является изменение морфологии обработанных поверхностей хрусталя.

Основными элементами структуры морфологии поверхностей алмазосодержащих композиционных материалов и хрусталя являются округлые частицы и плёнки продуктов износа (рис. 1–6). Округлые частицы и плёнки присутствуют как в углублениях матрицы, так и на поверхности алмазных зёрен (рис. 2–5). Типичной формой частиц продуктов износа при алмазоабразивной обработке хрупких материалов являются частицы осколочной формы. Морфология плёнок и округлых частиц на поверхности алмазных зёрен даёт основания полагать, что они прочно связаны с поверхностью алмазного зерна, то есть они адгезионно активны, и смачивают поверхность алмаза. Эти частицы могут представлять собой только продукты изнашивания хрусталя, так как медно–оловянные сплавы не смачивают поверхность алмаза [2]. Округлая форма наиболее характерна для частиц образующихся в результате охлаждения жидкой фазы. Однако округлые частицы присутствуют и на поверхности матрицы, причём некоторые из них органично связаны с ней (рис. 2 в, 5 в). Образование этих элементов структуры (округлых частиц и плёнок) на поверхности матрицы композиционного материала и поверхности хрусталя происходит, когда алмазные зёрна частично изношены и матрица в большей степени контактирует с хрусталём. Образование таких элементов структуры изношенных поверхностей, не характерно для абразивной обработки хрупких материалов и может быть объяснено в рамках следующей модели контактного взаимодействия алмазосодержащего композиционного материала с хрусталём.

Перемещение алмазного зерна в хрустале сопровождается его хрупким разрушением и одновременно, за счёт трения, тепловыделением. Матрица композиционного материала так же контактирует с поверхностью хрусталя и её температура повышается. Локальные повышения температуры в зоне взаимодействия алмазное зерно – хрусталь, матрица – хрусталь в динамических условиях приводят к повышению температуры не только матрицы, но и хрусталя. На это указывают характерные участки морфологии изношенной поверхности матрицы композиционного материала и хрусталя (рис. 2 г, 4 а, 4 б, 5 в, 6 б, 6 в).

Участки матрицы с температурой, превышающей температуру плавления сплава, оплавляются, образуя характерные структуры в форме капель, плёнок, плоских поверхностей (рис. 2 г, 5 в). Повышение температуры в пятнах контакта матрицы и хрусталя приводит к срыву и диспергированию оплавленного поверхностного слоя матрицы и переходу его в форму капель и плёнок на поверхности хрусталя (рис. 6 б, в). Одновременно с оплавлением поверхности матрицы композиционного материала, происходит и оплавление поверхности хрусталя, следствием которого является сглаживание рельефа типичного для изнашивания по механизму хрупкого разрушения и образование рельефа характерного для адгезионного механизма изнашивания. Часть оксидного расплава переносится на поверхность алмазных зёрен образуя на ней плёнки и округлые частицы (рис. 4, а), форма которых указывает на смачивание расплавом поверхности стекла.

Тепловыделение по границе раздела алмазосодержащий композиционный материал – хрусталь, в условиях динамического контакта изменяет механизм изнашивания и морфологию образующихся поверхностей. Оценка температур существующих на границах раздела композиционный материал – хрусталь по значениям температур образования жидкой фазы (1075–1150 К) и температур начала размягчения хрусталя (975–1175 К), показывает, что температура достигает значений 1125–1175 К. Повышение температуры на контактных поверхностях изменяет морфологию изношенной поверхности. Морфология изношенных поверхностей уже не позволяет судить о реальных механизмах разрушения материалов. Повышение температуры на поверхности композиционного материала должно привести к разрушению связки, перемещению алмазных зёрен в связке (рис. 1, 2). Всё это способствует снижению производительности шлифования и увеличению площади контакта связки с хрусталём. Однако большее влияние на эксплуатационные характеристики инструмента оказывает налипание хрусталя на алмазные зёрна.

### **Выводы**

Более высокая производительность шлифования хрусталя инструментом из композиционного материала, содержащего гранулы карбида бора, показывает, что введение хрупких частиц в матрицу снижает её адгезионное взаимодействие с обрабатываемым материалом.

*Rozглянуто механізми зношування при контактній взаємодії алмазообразивного інструменту і кристалу. Досліджено вплив додавання наповнювача у вигляді гранул карбід бору – скло в в'язку на продуктивність інструменту. Показано, що введення наповнювача знижує адгезійну взаємодію матриці алмазовмісного композиційного матеріалу і кристалу.*

**Ключові слова:** алмазообразивний інструмент, композиційний матеріал, наповнювач, кристаль, контактна взаємодія.

*The mechanisms of wear upon contact of diamond containing abrasive tool and crystal are considered. The effect of adding a filler in the form of pellets of boron carbide - glass into a binder on performance of the tool is investigated. It is shown that the above operation reduces the adhesive interaction of matrix of the diamond containing composite material and a crystal.*

**Key words:** diamond abrasive tools, composite material, filler, crystal, contact interaction.

### **Литература**

1. Новиков Н. В., Майстренко А. Л., Кулаковский В. Н. Сопротивление разрушению сверхтвёрдых композиционных материалов. Киев. Наук. Думка, 1993. 220 с.
2. Семёнова-Тян-Шанская А. С. Исследование сопротивления износу при шлифовании /. Новое направление развития алмазной обработки: Тр. ВНИИ Алмаз М., 1981. 102 с.
3. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. –М: Машиностроение, 1982. 320 с.
4. Балыков А. В. Алмазное сверление отверстий в деталях из хрупких неметаллических материалов. – М: Наука и технология, 2003. 187 с.

*Поступила 01.07.14*

УДК: 621.923.02

**О. І. Чернієнко; С. В. Ковальов, Г. А. Петасюк**, кандидати техн. наук;  
**О. О. Бочечка, Ю. Д. Філатов**, доктори техн. наук; **В. С. Гаврилова**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ*

### **ВИКОРИСТАННЯ АЛМАЗНОГО ПОРОШКУ, СИНТЕЗОВАНОГО В СИСТЕМІ Mg-Zn-B-C, ДЛЯ ТОНКОГО ШЛІФУВАННЯ САПФІРУ**

*Представлені результати дослідження процесу тонкого алмазного шліфування сапфіру при використанні напівпровідникового алмазного порошку, синтезованого в системі Mg-Zn-B-C. Показано, що використання алмазного порошку дозволяє підвищити продуктивність тонкого алмазного шліфування сапфіру до 27% та запобігти утворенню подряпин на оброблених поверхнях.*

**Ключові слова:** тонке алмазне шліфування, електропровідний алмаз.

### **Вступ**

Якість оброблених поверхонь деталей з неметалевих матеріалів, які використовуються в області оптичного та електронного приладобудування, має важливе значення. Одним із способів