

УДК 621.923

DOI: 10.30987/article\_5ad8d290a12e62.81742494

**А.В. Хандожко**, д.т.н.,

**А.Г. Федук**, аспирант

(Брянский государственный технический университет,  
241035, Россия, г. Брянск, бул. 50-лет Октября, 7)

E-mail: chandosh@yandex.ru

## **Особенности шлифования лейкосапфира алмазными кругами и их правки**

*Рассмотрены проблемы шлифования изделий из лейкосапфира алмазными шлифовальными кругами на металлической связке и вопросы правки кругов.*

**Ключевые слова:** лейкосапфир; шлифование; алмазный шлифовальный круг; правка; засаливание.

**A.V. Khandozhko**, D. Eng.,

**A.G. Fedukov**, Post graduate student

(Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Avenue, Bryansk, Russia, 241035)

## **Peculiarities of leucosapphire grinding with diamond disks and their stropping**

*Problems in grinding leucosapphire products with diamond abrasive disks on metal bonds and matters of disk stropping are considered.*

**Keywords:** leucosapphire; grinding; diamond grinding disk; stropping; loading (glazing).

Механическая обработка твердых монокристаллических материалов имеет специфику, связанную с их особыми свойствами – анизотропией, хрупкостью. Одним из наиболее характерных представителей таких материалов является лейкосапфир ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ). Его широко применяют для деталей оптики, электронной техники. Существует несколько методов выращивания лейкосапфира, наибольшее распространение получили технологии выращивания монокристалла из расплава в вакууме. Современные технологии позволяют получать кристаллы весом несколько десятков килограммов. Но из-за особенности процесса роста кристалл имеет неправильную грушевидную форму [1].

Для получения каких либо изделий из такой заготовки необходимо выполнить большое количество заготовительных операций. Как правило, эти операции включают вырезку заготовок из монокристалла в несколько этапов и шлифование. Обработка изделий включает операции шлифования, механического и химического полирования. Реже обработка выполняется с применением ультразвука, лазерных технологий.

Из-за высокой твердости и прочности механическая обработка лейкосапфира выполняется в основном алмазным инструментом. Поэтому на всех операциях (сверление, разрезка, шлифование, полирование) используется алмазный

инструмент со связанными или свободными зернами.

Так как твердость сапфира сопоставима с твердостью алмаза, его обработка имеет существенные отличия от традиционной алмазно-абразивной обработки. Особенно это относится к обработке закрепленным зерном, к шлифованию.

В отличие от упруго-пластичных материалов лейкосапфир при резании скалывается. При этом скалывание происходит не только в зоне резания. Согласно исследованиям Т.Б. Тепловой и В.В. Соловьева при финишной обработке лейкосапфира алмазным инструментом зернистостью 7/5 мкм на некоторой глубине от поверхности возникают большие пластические деформации и дефектный слой глубиной 15...25 мкм [3]. Шлифование при обработке лейкосапфира можно идентифицировать, как микрорезание (скалывание), сопровождающееся образованием поверхностных дефектов. Глубина дефектного слоя и величина сколов зависят, в первую очередь, от сил резания.

Главным методом борьбы с высокими силами резания является сохранение режущих свойств алмазного инструмента. Из-за высокой твердости и прочности лейкосапфира при резании алмазные зерна быстро изнашиваются и затупляются. Поскольку износ идет неравномерно, затупление круга сопровождается потерей геометрической точности — появлением биения и завалов краев круга. Для восстановления режущих свойств и точности нужно или организовать процесс шлифования в режиме самозатачивания или организовать правку.

Для обработки лейкосапфира обычно используют круги на металлической связке. Такая связка имеет высокую прочность, износостойкость и обеспечить режим самозатачивания для таких кругов крайне сложно. Это усугубляется спецификой стружкообразования. В результате резания возникает мелкодисперсная фракция, которая практически не изнашивает связку. Более того, в ходе исследований были зафиксированы случаи увеличения диаметра круга на 0,01...0,03 мм в ходе работы из-за внедрения большого количества шлама в связку. В ходе многочисленных экспериментов с варьированием условий шлифования удалось добиться лишь ограниченного самозатачивания при разрезке кристаллов тонкими отрезными кругами.

Таким образом, регулярная правка круга является обязательной при шлифовании лейкосапфира алмазными кругами на металлической связке. Существует несколько методов правки таких кругов. На практике, чаще всего, используется правка шлифованием абразивными кругами. Метод обеспечивает высокое качество правки, производителен, но требует больших энергозатрат и расхода абразивов.

Другими методами являются электрохимический и электрофизический, которые требуют создания специального оборудования, особых условий реализации. Электроэрозионный метод дает хорошие результаты по исправлению биений, производителен. Недостатком являются высокие локальные температуры при разрядах, что ведет к повреждению зерен и, как следствие, снижению стойкости кругов по сравнению с правкой шлифованием. Электрохимические анодные процессы обеспечивают щадящие условия правки, но малопродуктивны, плохо устраняют погрешности формы, провоцируют коррозию оборудования.

Интересную альтернативу представляют методы правки свободным абразивом, которые были разработаны, в первую очередь, в Донецком национальном техническом университете [5, 6].

Этот метод относительно легко реализуется, не наносит вреда оборудованию и экологии, эффективен. Некоторые ограничения существуют при восстановлении кругов работающих на врезание, кругов с малой шириной рабочей части. Результаты исследований эффективности различных методов правки приведены в данной статье.

Для реализации электрофизических и электрохимических методов была создана специальная лабораторная установка (рис. 1).

Основой установки является регулируемый привод вращения шпинделя, на который устанавливаются круги на оправке. Через скользящие контакты на круг и шпиндель подается ток. В зону контакта графитового электрода с кругом подается диэлектрическая жидкость (масло или дистиллированная вода) при электроэрозионной правке или электролит — при электро-химической правке. Частота вращения круга регулируется от 1,0 до 20 мин<sup>-1</sup>. Источник обеспечивает регулирование напряжения и силы тока.

Исследование правки свободным абразивом было проведено применительно к

одной из наиболее простых для реализации схем с подачей его в полусвязанном состоянии [5]. Схема правки показана на рис. 2, процесс правки – на рис. 3.

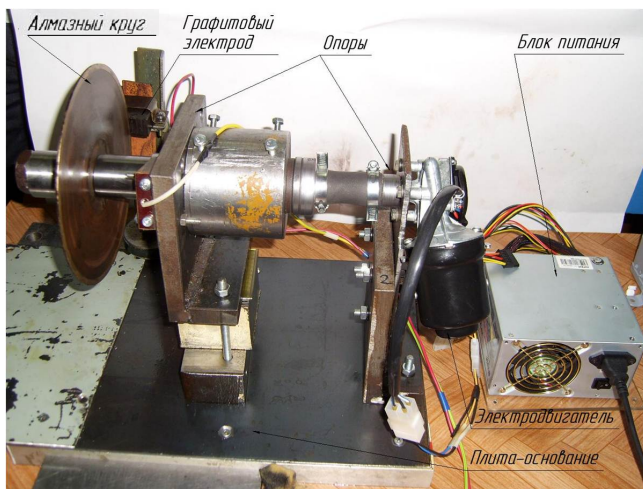


Рис. 1. Лабораторная установка для электроэрозионной и электрохимической правки алмазных кругов на металлической связке

В зазор между алмазным кругом и притиром постоянно подаются зерна абразива. Они захватываются кругом и движутся в этом зазоре. В процессе перекачивания зерно свободного абразива истирает связку, огибая алмазные зерна, обнажает их. Притир из мягкого материала (чугун, низкоуглеродистая сталь) по форме максимально приближен к кругу. Зазор в зоне контакта минимален, но достаточен для движения зерен правящего абразива. Длина рабочей части притира должна обеспечивать максимально возможную продолжительность взаимодействия зерен абразива со связкой круга. По мере изнашивания притира он периодически приближается к кругу.

Конструкция приспособления обеспечивает непрерывную подачу бруска с абразивом в зону правки. Брусок состоит из абразивного материала и мягкой связки (гипса). В качестве абразива были использованы шлифпорошок карбида бора и промытый речной песок.

Процесс происходил при непрерывной возвратно-поступательной поперечной подаче. Процесс выполнялся без использования СОТС.

Параметры процесса шлифования оценивались по силе резания, состоянию круга, его стойкости, шума и вибраций, параметры процесса правки – по длительности процесса и состоянию круга.

Силы резания измерялись с помощью специального динамометра (рис. 4). Динамометр

имеет плиту для установки заготовок, связанную с основанием плоскими пружинами. На пружины наклеены тензодатчики. Питание датчиков и обработка сигнала выполняется специальным контролером, связанным с ПЭВМ.

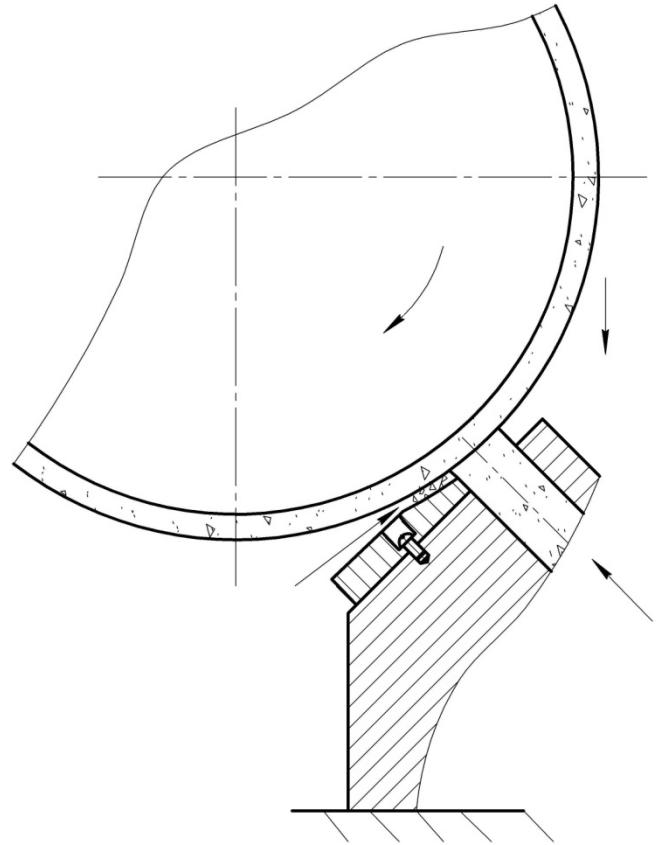


Рис. 2. Схема правки свободным абразивом с подачей его в зону в полусвязанном виде

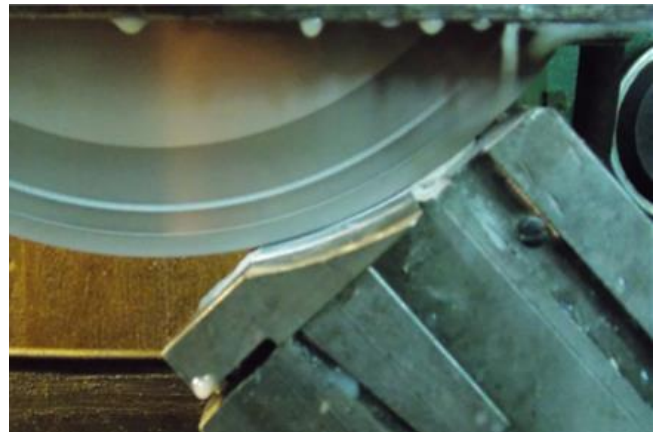


Рис. 3. Процесс правки алмазного шлифовального круга на металлической связке методом свободного абразива

На столе динамометра заготовки закреплялись механически, для установки на магнитной плите было изготовлено специальное приспособление (рис. 5).



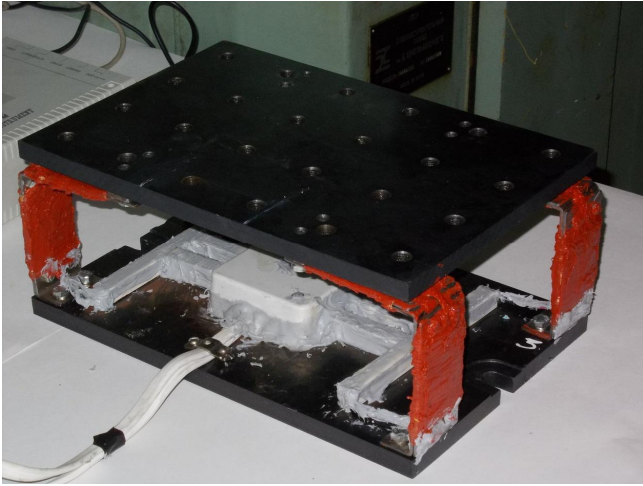


Рис. 4. Динамометр для измерения сил резания при шлифовании



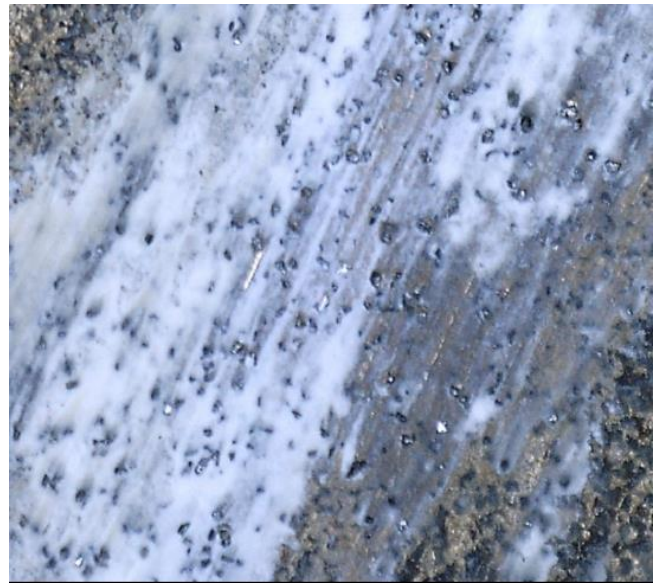
Рис. 5. Крепление заготовки из лейкосапфира для последующего его шлифования алмазным кругом на металлической связке

Приспособление представляет собой базовую шайбу, к которой винтами крепится кольцо. Контактующие плоскости шайбы и кольца притерты и параллельны основанию. Заготовки лейкосапфира устанавливались в нем с помощью клея (сургуча). Принятая схема базирования и закрепления обеспечила установку заготовок с погрешностью не более 0,03 мм.

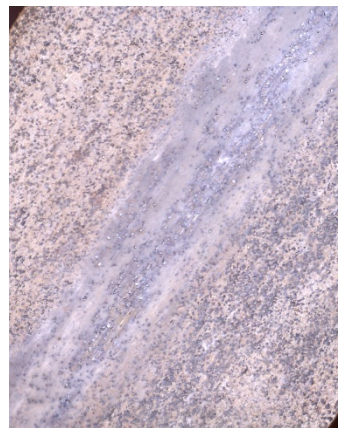
Измерения геометрических погрешностей круга (биения и завалов) проводились с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 1,0 и 5,0 мкм.

Визуальная оценка режущей части круга выполнялась с помощью специального микроскопа, подключаемого к ПЭВМ.

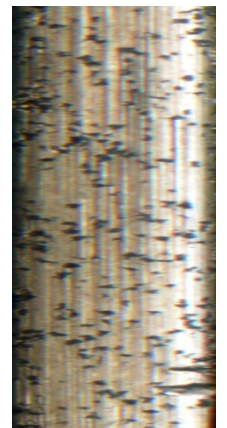
Исследования сил резания показали, что по мере изнашивания круга силы резания резко возрастают. Измерения показали, что компоненты сил резания возрастают примерно одинаково. При этом силы резания предельно изношенным кругом превышают силы резания заправленным кругом более чем в 2 раза. В этом состоянии резание практически прекращается, резко возрастает температура в зоне резания и вероятность появления микротрещин. Это объясняется состоянием режущей части круга. На рис. 6 показаны несколько фотографий кругов в предельно изношенном состоянии.



а)



б)



в)

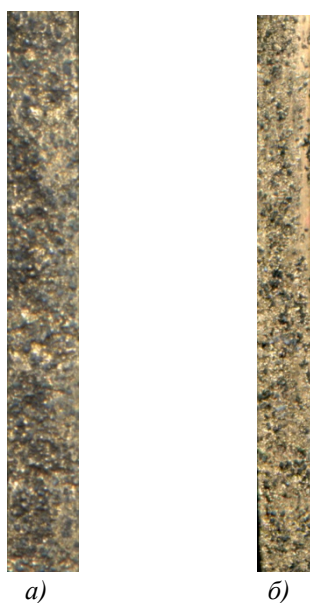
Рис. 6. Внешний вид рабочей части изношенного алмазного круга на металлической связке после шлифования лейкосапфира:

а – плоский круг,  $\times 40$ ; б – плоский круг,  $\times 5$ ;  
в – отрезной круг,  $\times 50$

У плоского круга наблюдается шаржирование связки шламом, зерна частично выкроше-

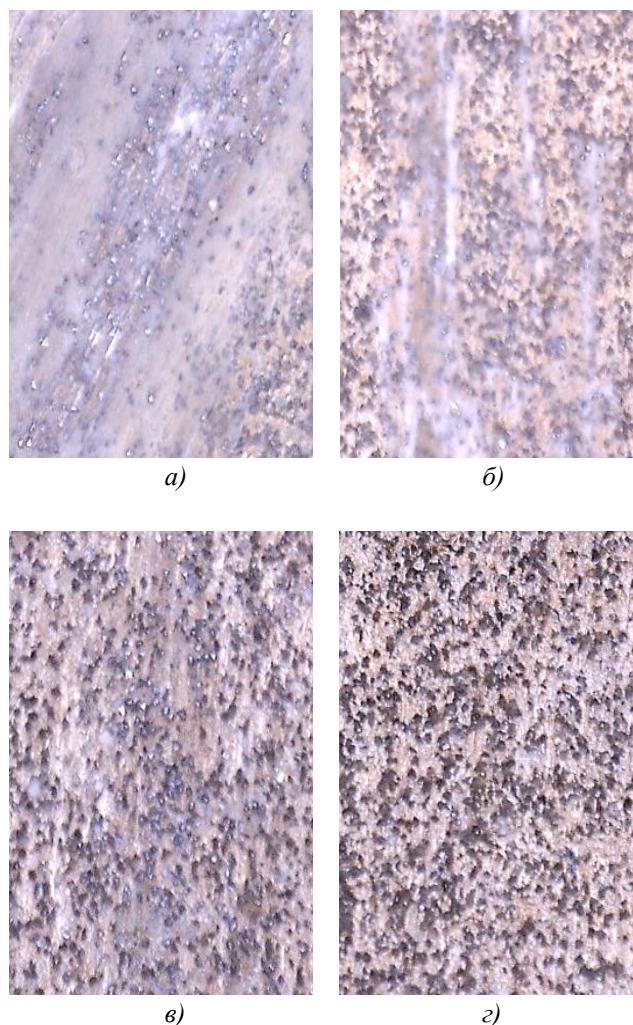
ны, частично полностью изношены. У отрезного круга все зерна выкрошены.

Эксперименты показали, что все рассмотренные методы правки обеспечили вскрытие новых режущих зерен. На рис. 7 показаны результаты электроэрозионной и электрохимической правки, на рис. 8 – правки свободным абразивом. Лучшую производительность при этом показала правка свободным абразивом. Процесс восстановления полностью изношенного профиля круга занимает не более 20 мин. При нормальном износе длительность составляет не более 5...10 мин.



**Рис. 7. Состояние кругов после правки:**  
*a* – электроэрозионная правка; *б* – электрохимическая правка

Несколько меньшую производительность показала электроэрозионная правка. Правка полностью изношенного круга составляет около 30 мин, т.е. больше почти на 50 %. Однако качество правки в этом случае значительно хуже. Вершины зерен (рис. 6, *a*) почернели, что свидетельствует о графитизации под действием высоких температур. Использование в качестве электрода пучка упругих проводников незначительно уменьшает повреждения режущих зерен. Испытания показали, что круги после такой правки имеют стойкость меньше, чем у заправленных свободным абразивом примерно на 20 %. Уменьшение напряжения снижает повреждаемость, но при этом быстро падает производительность процесса. Важным достоинством электроэрозионной правки является возможность восстановления точности профиля. Биения круга снижались в конце правки до 0,01 мм (сопоставимо с биением шпинделя станка).



**Рис. 8. Процесс правки алмазного шлифовального круга на металлической связке методом свободного абразива:**

*a* – засаленный алмазный шлифовальный круг; *б* – круг после 5...7 мин правки; *в* – круг после 10...12 мин правки; *г* – круг после 15...20 мин правки

Электрохимическая обработка имеет самую низкую производительность. Длительность процесса восстановления режущих свойств круга после полного износа превысила 45 мин. При этом обеспечено практически идеальное качество формируемого профиля круга. Наблюдалось и снижение биений, хотя и не в той степени, что при электроэрозионной правке (с 0,04 до 0,025 мм).

Протекание процесса правки свободным абразивом представлено на рис. 7. Правка в течение 10...12 мин практически полностью формирует работоспособный профиль круга. Однако при увеличении длительности процесса до 15...20 мин можно получить более развитый рельеф поверхности круга, обеспечивающий размещение шлама и улучшение процесса шлифования.



Для дополнительной оценки эффективности правки свободным абразивом были проведены исследования изменения профиля и формы круга.

Анализ профиля круга проводился в нескольких сечениях до обработки лейкосапфира, после обработки лейкосапфира и после

правки. Оценка состояния образующей проводилась в 5-ти радиальных сечениях и в 7-ми осевых сечениях с помощью индикатора часового типа. Средние результаты измерения формы образующей алмазного шлифовального круга на различных стадиях обработки представлены на рис. 9 и табл. 1.

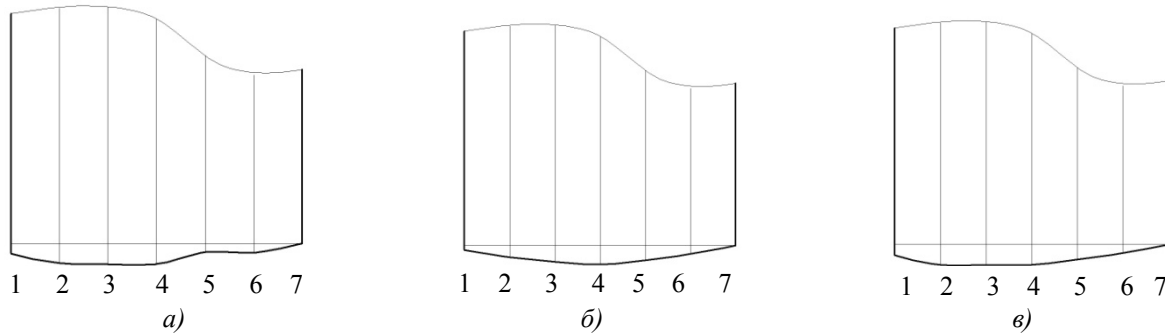


Рис. 9. Измерение профиля круга на различных этапах работы:

*a* – перед обработкой лейкосапфира; *б* – после обработки лейкосапфира; *в* – после правки методом свободного абразива

1. Результаты измерения профиля алмазного шлифовального круга на различных этапах работы

Этап обработки	Средние значения высоты профиля круга в разных сечениях, мм						
	1	2	3	4	5	6	7
До обработки лейкосапфира	0,024	0,042	0,045	0,045	0,034	0,020	0
После обработки лейкосапфира	0,007	0,020	0,031	0,038	0,021	0,010	0
После правки свободным абразивом	0,020	0,035	0,044	0,046	0,039	0,021	0

По результатам исследований было замечено, что по мере изнашивания круга, его образующая приобретает форму кривой, которая имеет максимум в середине. Величина завала кромок сопоставима с глубиной резания. Без удаления этого дефекта в процессе правки обработка будет вестись лишь частью круга, что негативно отразится на стойкости инструмента и качестве поверхности. В результате правки до полного вскрытия зерен профиль круга восстановлен лишь в средней части, завалы на краях сохранились. Эти показатели несколько хуже, чем при электроэрозионной правке.

Анализ радиального биения круга выполнялся в 16-ти сечениях в каждом из 5-ти осевых сечениях с помощью индикатора часового типа. Осредненные результаты измерений алмазного шлифовального круга на различных этапах обработки представлены на рис. 10 и табл. 2.

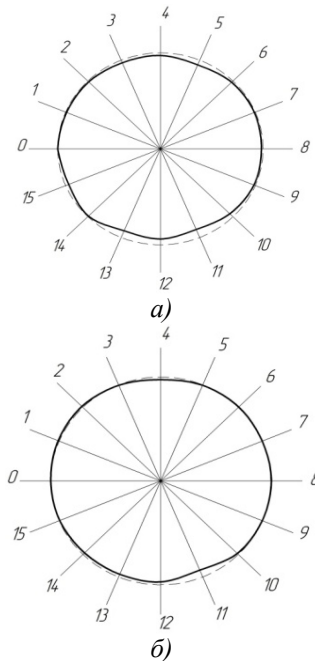


Рис. 10. Форма круга:

*a* – после обработки; *б* – после правки

1. Результаты измерения формы алмазного шлифовального круга на различных этапах работы

Этап работы	Средние значения высоты профиля круга в разных сечениях, мм							
	0	3	5	7	9	11	12	13
После обработки	0	-0,008	-0,014	-0,003	-0,004	-0,024	-0,015	-0,019
После правки	0	-0,001	-0,001	0	0	-0,019	-0,008	-0,007

Анализ результатов говорит о высокой эффективности правки свободным абразивом для исправления возникающих биений круга. При изнашивании радиальные биения круга увеличиваются. После правки биения уменьшаются. Практически во всех сечениях величина биения меньше 0,01 мм, а снижение погрешности произошло кратно.

В ходе исследований эффективности правки дополнительно были оценены технологические возможности алмазного плоского шлифования и пути управления этим процессом.

При шлифовании заправленным кругом на заготовке лейкосапфира нет краевых эффектов в виде завалов. Разнотолщинность образцов не превышает 0,01 мм.

Также была проведена оценка качества поверхностного слоя и степени влияния различных факторов на шероховатость. Шлифование выполнялось после правки свободным абразивом в течение 5...10 мин. Результаты измерений представлены в табл. 3.

3. Результаты измерения шероховатости лейкосапфира после правки методом свободного абразива шлифовального алмазного круга на металлической связке

$S_{\text{пол}}, \text{мм/ход}$	$t, \text{мкм}$	$Ra, \text{мкм}$	$Rz, \text{мкм}$	$R_{\text{max}}, \text{мкм}$
0,9	3	1,11...1,38	3,61...4,80	6,28...7,37
0,9	5	1,10...1,17	4,83...5,05	7,12...7,54
0,9	10	1,12...1,18	4,45...5,41	6,81...7,61
0,2	3	0,58...0,81	3,01...4,08	4,73...6,7
0,2	5	0,64...0,88	3,55...4,17	5,04...5,32
0,2	10	0,80...0,84	3,91...4,15	5,94...6,76

Анализ результатов показывает, что шероховатость поверхности зависит в основном от величины поперечной подачи. Некоторое влияние оказывает состояние круга. Как и для других материалов, наименьшая шероховатость получается при работе с кругом после его приработки.

**Выводы**

1. Алмазно-абразивная обработка лейкосапфира шлифованием при использовании алмазных кругов на металлической связке невозможна без принудительной правки.

2. Правка методом свободного абразива является одним из наиболее эффективных способов восстановления режущей способности и геометрической точности кругов.

3. Правка свободным абразивом обеспечивает вскрытие новых алмазных зерен без повреждения их острых граней.

4. Восстановление формы происходит медленнее, чем вскрытие режущих зерен.

5. При использовании принятой схемы правки возможно появление «завалов» на краях круга. По этой причине правка тонких кру-

гов (отрезных) методом свободного абразива малоэффективна.

6. Правка методом свободного абразива обеспечивает производительность не хуже электроэрозионной правки.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Добровинская, Е.Р., Литвинов, Л.А., Пищик, В.В. Энциклопедия сапфира. – Харьков: НТК «Институт монокристаллов», 2004. – 508 с.
2. Хандожко, А.В. Особенности технологии механической обработки при получении заготовок из выращенного кристалла лейкосапфира // Научные технологии в машиностроении. – 2012. – №2(8). – С.19 – 24.
3. Теплова, Т.Б., Коньшин, А.С., Соловьев, В.В., Ашкинази, Е.Е. О выборе рациональных режимов процесса микрошлифования монокристалла лейкосапфира // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – №9. – С. 76–83.
4. Новиков, Г.В. Прогрессивные технологии алмазно-абразивной обработки природных алмазов и бриллиантов. Одесса: 2009. 580 с.
5. Гусев, В.В., Медведев, А.Л. Закономерности изменения режущей способности алмазных шлифовальных кругов при правке свободным и полусвободным абразивом

вом // Вестник ДонГТУ, – 2009. №6. – С. 41–48.

6. **Калафатова, Л.П., Поезд, С.А., Шевченко, В.А.** Способ правки абразивного инструмента // Современные металлорежущие системы машиностроения / Матер. 5-й всеукр. студ. конфер. Вып. 5-й. - Донецк: ДонНТУ. 2004.- 179 с.

7. **Любимов, В.В., Могильников, В.А., Чмир, М.Я.** Комбинированные методы алмазного шлифования: учебное пособие: изд. 2-е, испр. и доп. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. – 100 с.

8. **Худобин, Л. В.** Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин; под. ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.

## REFERENCES

1. Dobrovinskaya, E.R., Litvinov, L.A., Pishchik, V.V. *Sapphire Encyclopedia*. – Kharkov: STC “Institute of Monocrystals”, 2004. – pp. 508.

2. Khandozhko, A.V. Machining technology peculiarities at manufacturing blanks of grown leucosapphire crystal // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – No.2(8). – pp. 19 – 24.

3. Teplova, T.B., Konshin, A.S., Soloviyov, V.V., Ashki-

nazy, E.E. Efficient mode choice for leucosapphire monocrystal micro-grinding // *Mining Information Analytical Bulletin*. – 2005. – No.9. – pp. 76-83.

4. Novikov, G.V. *Efficient Diamond-Abrasive Machining Technologies of Natural Diamonds and Brilliants*. Odesa: 2009, pp. 580.

5. Gusev, V.V., Medvedev, A.L. Regularities in changes of diamond grinding disk cutting ability at stropping with free and semi-free abrasive // *Bulletin of DonSTU*, - 2009, No.6. – pp. 41-48.

6. Kalafatova, L.P., Poezd, S.A., Shevchenko, V.A. Abrasive tool stropping method // *Modern Metal Cutting Systems in Mechanical Engineering / Proceedings of the 5-th All-Ukrainian Students' Conf.* 5-th edition – Donetsk: DonNTU. 2004. – pp. 179.

7. Lyubimov, V.V., Mogilnikov, V.A., Chmir, M.Ya. *Combined Methods of Diamond Grinding: manual: 2-d edition revised and supplemented*. – Tula: Publishing House of Tula-SU, 2007. – pp. 100.

8. Khudobin, L.V. *Minimization of Abrasive Disk Glazing / L.V. Khudobin, A.N. Unyanin; under the editorship of L.V. Khudobin*. – Ulyanovsk: UISTU, 2007. – pp. 298.

Рецензент д.т.н. С.Г. Бишутин

УДК 678.067621.892

DOI: 10.30987/article\_5ad8d291089c65.14476762

**Ю.М. Зубарев**, д.т.н.,  
(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
г. С-Петербург, Лоцманская ул, д.3)

**А.В. Приемышев**, к.т.н.,  
**А.С. Заостровский**, аспирант  
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251, г. С-Петербург, Политехническая ул., 29)  
E-mail: iuzubarev@mail.ru; priemyshev52@mail.ru

## Особенности силового контактного взаимодействия в зоне резания при лезвийной механической обработке заготовок из полимерных композитных материалов

На основе результатов экспериментов выполнен анализ влияния параметров процесса резания на составляющие силы резания при обработке композитов режущими кромками в разных условиях резания. Выполнен анализ круговых диаграмм составляющих силы резания, исходя из определенной роли каждой в процессе резания. Полученные результаты позволяют оценить возможности физических моделей при резании заготовок из полимерных композитных материалов.

**Ключевые слова:** тангенциальная и радиальная составляющие силы резания; полимерные композитные материалы; упругие и пластические деформации.