

**А. В. Волошин, Е. Ф. Долженкова, Л. А. Литвинов,
А. А. Петухов, Е. В. Слюнин** (г. Харьков)

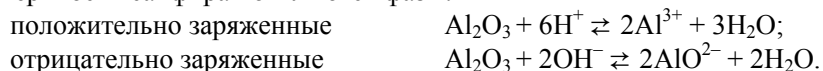
Влияние рН смазочно-охлаждающей технологической среды на производительность механической обработки сапфира

Изучено проявление эффекта Ребиндера при абразивной обработке сапфира в зависимости от рН смазочно-охлаждающей технологической среды. Изменение рН от нейтральной до кислой привело к увеличению скорости шлифования закрепленным абразивом в 1,8 раза. Щелочная среда также способствовала повышению скорости истирания поверхности закрепленным абразивом. Применение как смазочно-охлаждающей технологической среды кислого раствора привело к увеличению производительности процесса полирования сапфира, щелочной – к ее снижению.

Ключевые слова: сапфир, шлифование, полирование, смазочно-охлаждающая технологическая среда, эффект Ребиндера.

Одним из способов повышения производительности обработки сапфира является выбор смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС). Механизмы действия СОТС не до конца раскрыты. Основной ряда гипотез, объясняющих воздействие СОТС на границе фаз обрабатываемый материал–жидкость, является эффект Ребиндера.

Известно [1, 2], что в водном растворе на границе раздела сапфира и жидкой фазы происходит взаимодействие кристалла с H^+ и с OH^- при низком и высоком значении рН жидкости соответственно. В результате реакции на поверхности сапфира появляются фазы:



Если количество разноименно заряженных ионов одинаково, т. е. когда заряды положительных и отрицательных ионов компенсируют друг друга, на поверхности имеет место изоэлектрическое состояние. Система в этом состоянии не проявляет электрокинетических свойств, значение дзетта-потенциала становится равным нулю. Для большинства неметаллических твердых тел при $\xi = 0$ наблюдается максимальная твердость. Дзетта-потенциал сапфира равен нулю, если значение водородного показателя рН жидкой среды находится в интервале 4,5–6 (для различных кристаллографических плоскостей) [1, 3], в случае поликристаллического состояния – при изменении значения рН от 8 до 9,3 [1]. Такое различие объясняется наличием гидроксильных групп OH^- на поверхности поликристалла и большим ее сродством к катиону водорода H^+ , чем монокристалла. В [4, 5] показано, что как для моно-, так и для поликристаллов корунда в водных растворах с различным значением рН в изоэлектрическом состоянии наблюдается максимум твердости, а также наименьшее сопротивление алмазному сверлению. Нуле-

вое значение электрокинетического потенциала характеризуется минимальной величиной износа корунда [4]. Наиболее распространенным на сегодняшний день объяснением механизма изменения механических свойств является предположение Вествуда и Щукина [6] об увеличении длины свободного пробега дислокаций при деформации либо, напротив, затруднении движения дислокаций. В результате воздействия жидкой среды происходит перезарядка точечных дефектов и ядер дислокаций в поверхностном слое кристалла. Подвижность дислокаций при этом изменяется, так как изменяется характер их взаимодействия с решеткой, вакансиями и междоузельными атомами.

Различия в наблюдаемой картине изменения механических свойств сапфира в изоэлектрическом состоянии авторы [4, 5] объясняют различиями видов разрушения. Так, твердость определяется сопротивлением кристалла пластической деформации, при алмазном сверлении энергия преимущественно расходуется на создание трещин и хрупкое разрушение материала, абразивная обработка происходит при наличии одновременно процессов разрушения и деформации поверхности.

Авторы [7] изучали влияние изменения рН поверхностно-активной среды в интервале от 6 до 12 на состояние обрабатываемой поверхности при шлифовании оптической керамики α - Al_2O_3 . Было показано, что при $\xi = 0$ наблюдается минимальное и максимальное значения параметра шероховатости поверхности Ra для грубого и тонкого шлифования соответственно. Также был определен характер изменения напряжений в нормальном и касательном направлениях к поверхности корунда – при грубом шлифовании в изоэлектрическом состоянии сопротивление вдавливанию было максимальным, а сопротивление хрупкому разрушению минимальным, в случае тонкого шлифования наблюдали противоположную картину.

Механические свойства изделий из корунда в значительной степени определяются условиями их абразивной обработки. Так, в [7] было показано, что прочность на изгиб образцов оптической керамики α - Al_2O_3 изменяется с изменением рН жидкой среды и определяется шероховатостью поверхности. Максимум значения прочности соответствовал образцам с наименьшими значениями параметра шероховатости.

В настоящее время физико-химическое воздействие жидкой среды на твердость корунда в процессе износа изучено недостаточно. Поэтому для дальнейшего совершенствования технологии абразивной обработки данных кристаллов необходимо более детальное изучение механизма эффекта Ребиндера.

В данной работе исследовали влияние рН СОТС на производительность шлифования и полирования сапфира, а также на шероховатость обрабатываемой поверхности и ее трещиностойкость.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на образцах диаметром 13 мм и высотой 5 мм из сапфира с ориентацией (0001) вдоль цилиндра. Торцы образцов обрабатывали на алмазной планшайбе из микропорошка АСМ 60/40, шлифпорошком карбида бора М40 зернистостью 28–40 мкм на станке мод. ЗПП-350М при частоте вращения шпинделя 100 об/мин и нагрузках 0,22–0,5 кПа, а затем полировали на капроновом полировальнике алмазными микропорошками АСМ 28/20 в свободном состоянии на станке модификации 4ПД-200 при 100 об/мин и нагрузке 0,22 кПа. На каждом переходе контролировали шеро-

ховатость Ra и скорость износа поверхности $v_{\text{изн}}$. Шероховатость поверхности после различных видов обработки измеряли профилометром-профилографом TR-200. Для каждого образца шероховатость Ra определяли по результатам четырех-пяти измерений. Величину износа контролировали с помощью индикатора часового типа (цена деления 1 мкм). Стандартное отклонение составляло для параметра шероховатости 6,3 %, для величины износа – 5,4 %.

В качестве СОТС были выбраны вода и водные растворы кислоты HNO_3 (0,2 моль/л) и щелочи NH_4OH (0,1 моль/л). Водородный показатель воды составил 7,53, раствора кислоты – 0,12, раствора щелочи – 11,78. Растворы приготавливали не более чем за 0,5 ч до применения.

Трещиностойкость сапфира оценивали по величине критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} при индентировании пирамидой Виккерса с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузке на индентор $P = 3,5 \text{ Н}$ по результатам не менее 30 измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В табл. 1 приведены значения величины износа сапфира при шлифовании на алмазной планшайбе из микропорошка АСМ 60/40 и шлифпорошком карбида бора М40 в свободном состоянии с применением СОТС с различным значением рН. Как видим, изменение рН жидкой среды от нейтральной (рН = 7,53) до кислой (рН \approx 0,12) привело к увеличению скорости шлифования закрепленным абразивом в $\sim 1,8$ раза, а свободным абразивом – к незначительному увеличению (до 1,1 раза). Щелочная среда (рН \approx 11,78) также способствовала ускорению процесса шлифования поверхности на алмазной планшайбе (хотя и несколько меньшему, чем кислая среда – в 1,4 раза) и практически не оказывала влияния при использовании абразива в свободном состоянии. Изменение нагрузки в пределах 0,22–0,5 кПа не влияло на характер воздействия жидкой среды с разными значениями рН на обрабатываемость сапфира.

Таблица 1. Влияние СОТС на производительность обработки сапфира при шлифовании

рН среды	Производительность обработки, мкм/ч, абразивом			
	закрепленным АСМ 60/40		свободным М40	
	при нагрузке, $\times 10^{-4}$ МПа			
	2,2	5	2,2	5
0,12	6,12	13,2	1,37	3,2
7,53	3,39	7,79	1,29	3,0
11,78	4,8	10,8	1,29	2,96

Полученные результаты соответствуют литературным данным. Величина износа обратно пропорциональна твердости обрабатываемого материала. В [2, 5] было показано, что как кислая, так и щелочная жидкие среды способствуют снижению поверхностной твердости сапфира. Поэтому наблюдаемое увеличение производительности обработки кристалла с изменением рН среды является результатом проявления эффекта Ребиндера.

Физико-химическое взаимодействие СОТС с обрабатываемой поверхностью сапфира способствовало также изменению ее шероховатости (табл. 2). Наибольшую шероховатость наблюдали после шлифования закрепленным

абразивом с применением кислой среды. Высота микрорельефа образцов, обработанных в щелочной среде, также превышает высоту неровностей поверхности кристалла, полученной в нейтральной среде. Известно, что снижение твердости кристалла приводит к снижению его сопротивления вдавливанию и увеличению его сопротивления царапанию в процессе шлифования [7, 8]. Таким образом, использование кислой и щелочной жидких сред способствует фактически увеличению контакта абразива с обрабатываемой поверхностью. Глубина проникновения образующихся в ходе шлифования трещин увеличивается, скорость абразивной обработки повышается. При этом высота микронеровностей на поверхности после обработки в кислой и щелочной средах также несколько увеличивается, по сравнению с обработкой в нейтральной среде, из-за увеличения размеров частиц выкальвываемого материала. Влияние СОТС на процесс шлифования проявляется одинаково при использовании как закрепленного, так и свободного абразивов, однако в случае закрепленного – в большей степени.

Таблица 2. Влияние СОТС на параметр шероховатости R_a сапфира при шлифовании

рН среды	Параметр шероховатости R_a , мкм, при шлифовании абразивом			
	закрепленным АСМ 60/40		свободным М40	
	при нагрузке, $\times 10^{-4}$ МПа			
	2,2	5	2,2	5
0,12	1,324	1,423	0,893	0,949
7,53	1,241	1,301	0,727	0,744
11,78	1,267	1,388	0,729	0,755

При полировании сапфира ориентации (0001) наблюдали несколько иную картину. Применение кислой среды увеличило производительность обработки по сравнению с нейтральной и щелочной средами в первые 30 мин полирования, шероховатость поверхности при этом также снизилась (рис. 1, 2). Дальнейшая обработка в кислой среде не привела к существенному изменению высоты микрорельефа поверхности сапфира, скорость полирования практически не изменялась. На начальной стадии скорость полирования в щелочной среде была ниже, чем в нейтральной. В случае нейтральной и щелочной жидких сред шероховатость поверхности уменьшалась на протяжении всего процесса полирования и была практически одинаковой после обработки в течение 60 мин.

Полирование – завершающий процесс обработки, механические воздействия полировальника на обрабатываемый кристалл малы. Пластическое деформирование становится определяющим в балансе затрат энергии на диспергирование поверхности даже в таком хрупком материале, как сапфир. Снижение твердости сапфира при обработке в жидкой среде с $\text{pH} \approx 0,12$ приводит к снижению энергии, необходимой для диспергирования поверхности кристалла, сопротивление вдавливанию абразива при этом увеличивается. Таким образом, жидкая среда способствует уменьшению глубины внедрения образующихся при полировании царапин и трещин, и, следовательно, дополнительному уменьшению размеров отделяемых от поверхности частиц, образующихся в результате многократных пересечений этих трещин. Высота микрорельефа полированной поверхности достигает своего минимального значения уже через 30 мин полирования.

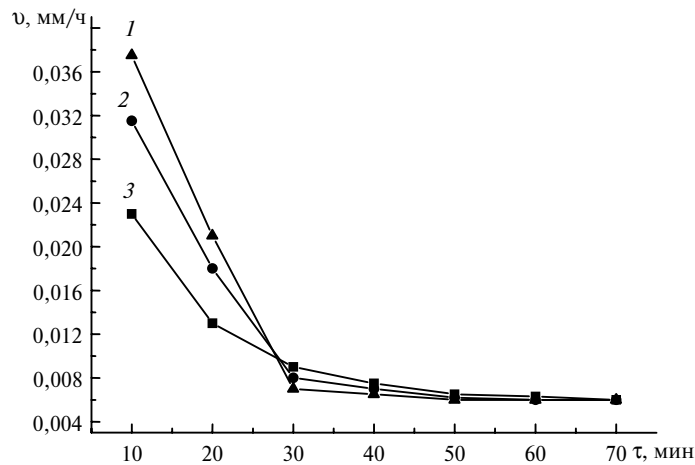


Рис. 1. Зависимость скорости полирования от времени обработки при pH жидкой среды 0,12 (1), 7,53 (2), 11,7 (3).

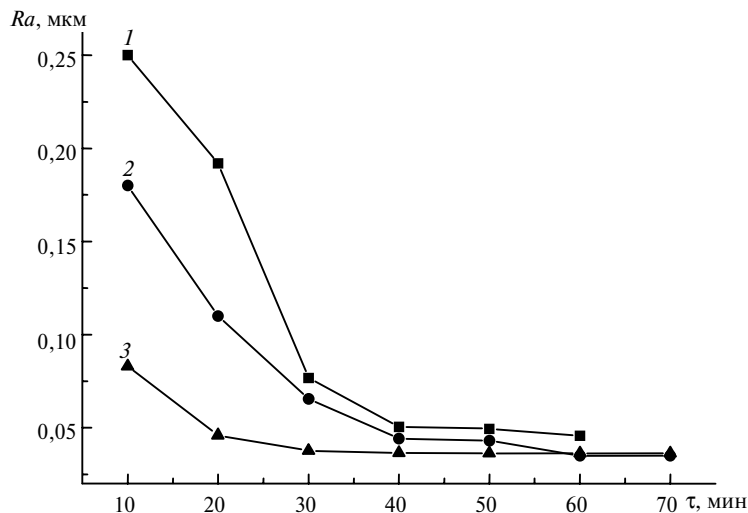


Рис. 2. Зависимость параметра шероховатости Ra от времени обработки при pH жидкой среды 11,7 (1), 7,53 (2), 0,12 (3).

Применение щелочного раствора привело к снижению скорости полирования, высота микрорельефа поверхности также превосходила неровности на поверхности кристалла, обработанного в нейтральной среде. В [4] было показано, что производительность абразивной обработки сапфира в одноатомных спиртах снижается. Авторы объяснили это достаточно высокой вязкостью применяемых гидроксильных соединений и увеличением толщины слоя между обрабатываемой поверхностью и полировальником. Замедление полирования сапфира в растворе NH_4OH (0,1 моль/л) также, вероятнее всего, связано с уменьшением контакта абразива с поверхностью. Известно, что для плоскости (0001) изоэлектрическое состояние наблюдается при $\text{pH} \approx 5,5$ [1, 3]. Поэтому при высоком уровне pH (щелочная среда) концентрация противоионов у заряженной поверхности оказывается существенно большей, чем при низком (кислая среда) [9]. Большей является также и толщина двойного электрического слоя, что приводит к тому, что часть зерен алмаза не принимает активного участия в полировании.

Применение кислой среды увеличило трещиностойкость поверхности сапфира по сравнению с его полированием в нейтральной среде – критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} составил 3,8 и 3,2 МН·м^{-3/2} соответственно. Как и следовало ожидать, поверхность, которая характеризуется наименьшей шероховатостью, демонстрирует наибольшее сопротивление распространению трещины. Обработка с использованием щелочного раствора не привела к изменению трещиностойкости поверхности. Коэффициент интенсивности напряжений по сравнению с нейтральной средой находится в пределах ошибки измерения.

ВЫВОДЫ

При изменении pH жидкой среды от нейтральной до кислой и щелочной можно повысить производительность процесса механической обработки сапфира и снизить его шероховатость.

Применение СОТС способствует повышению трещиностойкости обрабатываемой поверхности.

Вивчено прояв ефекту Ребіндера при абразивній обробці сапфіру в залежності від pH змазуючо-охолоджувальної рідини. Зміна pH від нейтральної до кислої привела до збільшення швидкості шліфування закріпленим абразивом в 1,8 рази. Лужне середовище також сприяло підвищенню швидкості стирання поверхні закріпленим абразивом. Застосування кислого розчину як охолоджувальної рідини привело до збільшення продуктивності процесу полірування сапфіру, лужної – до її зниження.

Ключові слова: сапфір, шліфування, полірування, змазуючо-охолоджувальна рідина, ефект Ребіндера.

The manifestation of Reh binder effect in abrasive machining of sapphire has been studied versus coolant pH. The change of pH from neutral to acidic results in an 1.8 times higher rate of grinding with a bound abrasive. An alkaline medium also facilitates the workpiece surface attrition by a bound abrasive. The use of an acidic solution as a coolant leads to an increase in efficiency of polishing sapphire, while an alkaline one lowers the polishing efficiency.

Keywords: sapphire, grinding, polishing, coolant, Reh binder effect.

1. Franks G. V., Meagher L. The isoelectric point of sapphire crystals and alpha-alumina powder // Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. – 2003. – **214**. – P. 99–110.
2. Zhu H., Niesz D. E., Greenhut V. A. The effect of abrasive hardness on the chemical-assisted polishing of (0001) plane sapphire // J. Mater. Res. – 2005. – **20**, N 2. – P. 504–520.
3. Fitts J. P., Shang X., Flynn G. W. et al. Electrostatic surface charge at aqueous/ α -Al₂O₃ single-crystal interfaces as probed by optical second-harmonic generation // J. Phys. Chem. – 2005. – **109**. – P. 7981–7986.
4. Swain M. V., Latanision R. M., Westwood A. R. C. Further studies on environment-sensitive hardness and machinability of Al₂O₃ // J. Amer. Ceram. Soc. – 1975. – **58**, N 9–10. – P. 372–376.
5. Alley D. W., Devereux O. F. Coolant pH control for optimum ceramic grinding. I. Rebinder effect in polycrystalline aluminum oxide // J. Mater. Sci. – 2002. – **37**, N 23. – P. 5135–5140.
6. Shchukin E. D. The influence of surface-active media on the mechanical properties of materials // Adv. Colloid. Interface Sci. – 2006. – **123–126**. – P. 33–47.
7. Alley D. W., Devereux O. F. Coolant pH control for optimum ceramic grinding. I. Influence of the Rebinder effect on the surface grinding of aluminum oxide // J. Mater. Sci. – 2003. – **38**, N 6. – P. 1353–1358.
8. Ардамацкий А. Л. Алмазная обработка оптических деталей. – Л.: Машиностроение. – 1978. – 232 с.
9. Писаренко А. П., Поспелова К. А., Яковлев А. Г. Курс коллоидной химии. – М.: Высш. школа. – 1964. – 248 с.