

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-417-424

Магнитореологическое полирование поверхностей карбида кремния до ангстремного уровня шероховатости

В.М. Холод¹, А.Л. Худолей¹, П.С. Гринчук¹, В.А. Лапицкая^{1,2}

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Беларусь.

²Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 30.10.2025

Принята к печати 25.11.2025

Монокристаллический карбид кремния является перспективным полупроводниковым материалом третьего поколения. Благодаря большой величине запрещённой зоны электроника на его основе может выдерживать экстремальные температуры эксплуатации до 500 °С и выше и устойчива к радиационному воздействию. Высокоточная полировка пластин из карбида кремния позволяет повысить надёжность электронных компонент, изготавливаемых на его основе. В работе представлены результаты финишной полировки магнитореологическим методом монокристаллов карбида кремния политипов 4Н и 6Н, а также реакционно-спечённой двухфазной Si-SiC (6Н и 15R) керамики. Достигнуты ангстремные значения шероховатости ($R_a = 1,6 \text{ \AA}$ для монокристаллов 4Н-SiC и $2,2 \text{ \AA}$ для 6Н-SiC), сравнимые с длиной связи Si-C ($\approx 1,9 \text{ \AA}$) и соответствующие лучшим мировым аналогам, получаемым при полировке другими известными методами. В результате полировки монокристаллов SiC с начальной шероховатостью 50 и 1030 $\text{\AA}$ в течение 1 ч достигается одно и то же конечное и, возможно, предельное значение $R_a \approx 2 \text{ \AA}$. Для реакционно-спечённой керамики характерны значения R_a порядка 10 $\text{\AA}$, обусловленные перепадом высоты профиля на границах фаз Si и SiC вследствие различий их твёрдости и уноса материала при полировке.

Ключевые слова: магнитореологическая полировка, карбид кремния, шероховатость, финишная обработка, поверхность

Адрес для переписки:

Лапицкая В.А.
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Address for correspondence:

Lapitskaya V.A.
A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus,
P. Brovki str., 15, Minsk 220072, Belarus
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Для цитирования:

В.М. Холод, А.Л. Худолей, П.С. Гринчук, В.А. Лапицкая.
Магнитореологическое полирование поверхностей карбида
кремния до ангстремного уровня шероховатости.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 4. С. 417–424.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-417-424

For citation:

Kholad VM, Khudoley AL, Grinchuk PS, Lapitskaya VA.
Magnetorheological Polishing of Silicon Carbide to Angstrom-Scale
Surface Roughness.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(4):417–424. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-417-424

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-417-424

Magnetorheological Polishing of Silicon Carbide to Angstrom-Scale Surface Roughness

V.M. Kholad¹, A.L. Khudoley¹, P.S. Grinchuk¹, V.A. Lapitskaya^{1,2}

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus,
P. Brovki str., 15, Minsk 220072, Belarus

²Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 30.10.2025

Accepted for publication 25.11.2025

Abstract

Single-crystal silicon carbide is a promising third-generation semiconductor material. Thanks to its large band gap, electronics based on it can withstand extreme operating temperatures of up to 500 °C and above and are resistant to radiation. High-precision polishing of silicon carbide wafers improves the reliability of electronic components manufactured with it. This paper presents the results of magnetorheological finishing polishing of 4H and 6H polytype single-crystal silicon carbide, as well as reaction-sintered two-phase Si-SiC (6H and 15R) ceramics. An angstrom-level surface roughness was achieved ($R_a = 1.6 \text{ \AA}$ for 4H-SiC and $2.2 \text{ \AA}$ for 6H-SiC single crystals), which is comparable to the Si–C bond length ($\approx 1.9 \text{ \AA}$) and is on par with the best results obtained by other state-of-the-art polishing techniques. After one hour of polishing, SiC single crystals with initial roughness values of $50 \text{ \AA}$ and $1030 \text{ \AA}$ reached the same final, and likely ultimate, R_a value of $\approx 2 \text{ \AA}$. For the reaction-sintered ceramics, the R_a values were on the order of $10 \text{ \AA}$, which is attributed to the height differential at the Si/SiC phase boundaries due to differences in their hardness and material removal rates during polishing.

Keywords: magnetorheological polishing, silicon carbide, roughness, finishing, surface

Адрес для переписки:

Лапицкая В.А.
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Address for correspondence:

Lapitskaya V.A.
A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus,
P. Brovki str., 15, Minsk 220072, Belarus
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Для цитирования:

В.М. Холод, А.Л. Худoley, П.С. Гринчук, В.А. Лапицкая.
Магнитореологическое полирование поверхностей карбида
кремния до ангстремного уровня шероховатости.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 4. С. 417–424.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-417-424

For citation:

Kholad VM, Khudoley AL, Grinchuk PS, Lapitskaya VA.
Magnetorheological Polishing of Silicon Carbide to Angstrom-Scale
Surface Roughness.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(4):417–424. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-417-424

Введение

Карбид кремния обладает уникальными свойствами – широкая запрещённая зона, высокое электрическое поле пробоя и высокая теплопроводность, что делает его перспективным полупроводниковым материалом третьего поколения. Его потенциальные применения охватывают широкий спектр областей, включая оптоэлектронные устройства, силовую электронику, радиочастотные и микроволновые устройства, лазеры и детекторы. Обладая высокой твёрдостью, малым весом и высокой теплопроводностью, он подходит для изготовления зеркал космических телескопов и форм для стеклянных линз [1–3].

Этот материал отличается исключительной твёрдостью и устойчивостью к кислотным и щелочным средам. Ввиду этих факторов карбид кремния характеризуется как трудно-обрабатываемый, что значительно ограничивает его промышленное применение. Для использования карбида кремния в оптике и электронике необходима его гладкая и свободная от повреждений поверхность. Процессы грубого шлифования, в которых преобладает механическое воздействие, могут помимо прочего приводить к образованию дефектов, таких как царапины и микротрещины, которые необходимо устранять в последующих процессах тонкого шлифования или полировки. Для использования карбида кремния в качестве подложки для зеркал телескопов особенно важна высококачественная поверхность без царапин и трещин, а также точность формы поверхности на нанометровом уровне и шероховатость поверхности на субнанометровом уровне. Для достижения таких результатов следует использовать специальные технологии полировки, такие как химико-механическая полировка, магнитореологическая полировка, электрохимическая полировка, плазменная полировка и др. [4, 5].

Рассматриваемый в данной работе метод магнитореологического полирования (МРП) отличается сравнительной простотой реализации и относительно мягкими требованиями к помещениям и виброизоляции при сопоставимом качестве обработки, хорошо поддаётся автоматизации и роботизации. Метод МРП был изобретён в 1980-х гг. в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

(Минск, Республика Беларусь) [6], где в настоящее время продолжает развиваться, а коммерческую реализацию и всемирную известность приобрел под аббревиатурой MRF (Magnetorheological finishing) после патентования в США [7]. МРП обладает хорошей стабильностью функции уноса, высокой точностью обработки поверхности и обеспечивает хорошее качество подповерхностного слоя [8, 9]. Обработка ведётся магнитореологической жидкостью (МРЖ) – суспензией, управляемой внешним магнитным полем с быстродействием в миллисекунды. Обычно МРЖ состоит из дисперсионной фазы (воды), ферромагнитных частиц, наноабразива и химических стабилизаторов (ПАВ, ингибиторы коррозии). Под действием поля выше 0,3 Тл вязкость МРЖ возрастает на величину до трёх порядков, а сама жидкость разделяется: один слой состоит из жёсткой каркасной структуры магнитных частиц, а второй остается жидким и содержит наноабразив [9]. К преимуществам МРП относятся возможность локальной обработки сложных участков, применимость к диэлектрикам (в отличие от электрохимической полировки), отсутствие перегрева поверхности, пластичное удаление материала без повреждения подповерхностного слоя, гибкость контроля параметров (магнитного поля и состава МРЖ) [10, 11].

Известны применения МРП, например, для полировки карбидокремниевых зеркал дециметровых размеров до шероховатости 15 Å [8]. Однако использование данного метода для полировки монокристаллов карбида кремния не освещено в литературе. В работе представлены результаты полировки монокристаллов 4H-SiC и 6H-SiC методом МРП и показана возможность достижения данным методом шероховатости на уровне межатомного расстояния. Для сравнения приведены результаты полировки реакционно-спечённой керамики (Reaction-Bonded SiC), представляющей собой двухфазный поликристаллический композит Si-SiC и широко используемой для изготовления зеркал [1, 8, 12].

Методика эксперимента и материалы

В данной работе были использованы следующие образцы карбида кремния:

1. Коммерчески доступный образец	
монокристаллической подложки	для

микроэлектронных изделий с размерами $0,5 \times 0,5$ мм, представляющий собой кристалл 4H-SiC с наклоном кристаллографических плоскостей (001) под углом $4^\circ \pm 0,5^\circ$ к поверхности, обрабатываемой МРП.

2. Монокристалл 6H-SiC, выращенный методом ЛЭТИ, характеризующийся высокой оптической прозрачностью и имеющий слабую окраску желтоватого оттенка.

3. Реакционно-связанный карбид кремния, изготовленный в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова [2], содержащий по массе около 95 % поликристаллического SiC (приблизительно 80 % поли типа 6H и 20 % поли типа 15R) и менее 5 % свободного кремния.

4. Монокристалл карбида кремния 6H-SiC, выращенный методом Ачесона. Образец отобран из продуктов промышленного синтеза абразивного карбида кремния. Предоставлен ОАО «Волжский абразивный завод» (Российская Федерация).

Для финишной обработки поверхностей образцов из карбида кремния применялась магнитореологическая обработка с использованием магнитоуправляемой суспензии. Полирование проводили на лабораторной установке кюветного типа [10]. Линейная скорость потока составляла 1 м/с, соотношение скоростей вращения кюветы с жидкостью и образца – 4:5. Суспензия была изготовлена на водной основе с добавлением магнитных микрочастиц карбонильного железа марки P10, абразивных частиц в виде наноразмерных синтетических алмазов дисперсностью ≈ 50 нм и стабилизаторов жидкости. Время полирования каждого из образцов было одинаковым и составляло 1 ч.

Шероховатость поверхности измеряли с помощью 3D-профилометра MicroXam 800 (KLA Tencor, США), представляющего собой лазерный микроинтерферометр. Измерения проводили в фазовом режиме с использованием объектива Nikon с увеличением $\times 50$ и источника зелёного лазерного излучения, что обеспечивало поле сканирования размером 116×152 мкм. Вычисление параметров шероховатости в соответствии со стандартом ISO 4287 выполняли с использованием программного обеспечения Arx 3D Basic. Также микроструктура и шероховатость поверхности исследовались методом атомно-силовой микроскопии (АСМ),

с помощью микроскопа Dimension FastScan (Bruker, США). Использовали стандартный кремниевый зонд ScanAsyst-Air (Bruker, Германия) с радиусом закругления 8 нм и жёсткостью консоли 0,4 Н/м в режиме PeakForceQNM. Исследование поверхности проводилось методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), с использованием сканирующего электронного микроскопа Leo-1420 (диаметр зондируемого участка – 3 мкм).

Результаты и обсуждение

Результаты измерения характеристик поверхности полированных образцов представлены в таблице. Указаны значения среднеарифметического отклонения профиля R_a и высота неровностей R_z до и после магнитореологической полировки.

Прежде всего, отметим высокую скорость уноса материала с поверхности при МРП, которая составляла порядка 1 мкм/ч, что сопоставимо с другими методами, обеспечивающими аналогичный уровень шероховатости (рисунок 32 в [13]). Композитный образец (№ 3) после МРП имеет более высокий уровень шероховатости (в 2–3 раза) по сравнению с монокристаллическими образцами. Это объясняется гетерогенной структурой композита, содержащего разнородные фазы с различными механическими свойствами. В частности, наличие в материале более мягкого кремния и твёрдого карбида кремния приводит к неравномерному уносу компонентов при механической обработке: кремний удаляется быстрее, тогда как частицы карбида кремния выступают над поверхностью, создавая нанорельеф. В результате, на полированной поверхности композита наблюдаются перепады высот до ≈ 40 Å, в то время как монокристаллические образцы, благодаря однородной структуре, демонстрируют сверхгладкую поверхность на всем поле сканирования после аналогичной обработки (рисунок 1). На рисунке 2 показаны профилограммы образцов вдоль ширины полей сканирования.

Анализ снимков СЭМ и АСМ (рисунок 3), показал, что на поверхности образцов отсутствуют видимые следы полировки. Хотя с помощью средств АСМ на некоторых микроучастках образцов выявляются следы

царапин (рисунок 3б). По всей видимости, они являются результатом неидеально подобранной последовательности операций предварительной более грубой шлифовки. В целом же

поверхность гладкая и ровная, не содержит царапин и трещин, что свидетельствует о высокой эффективности финишной полировки методом МРП.

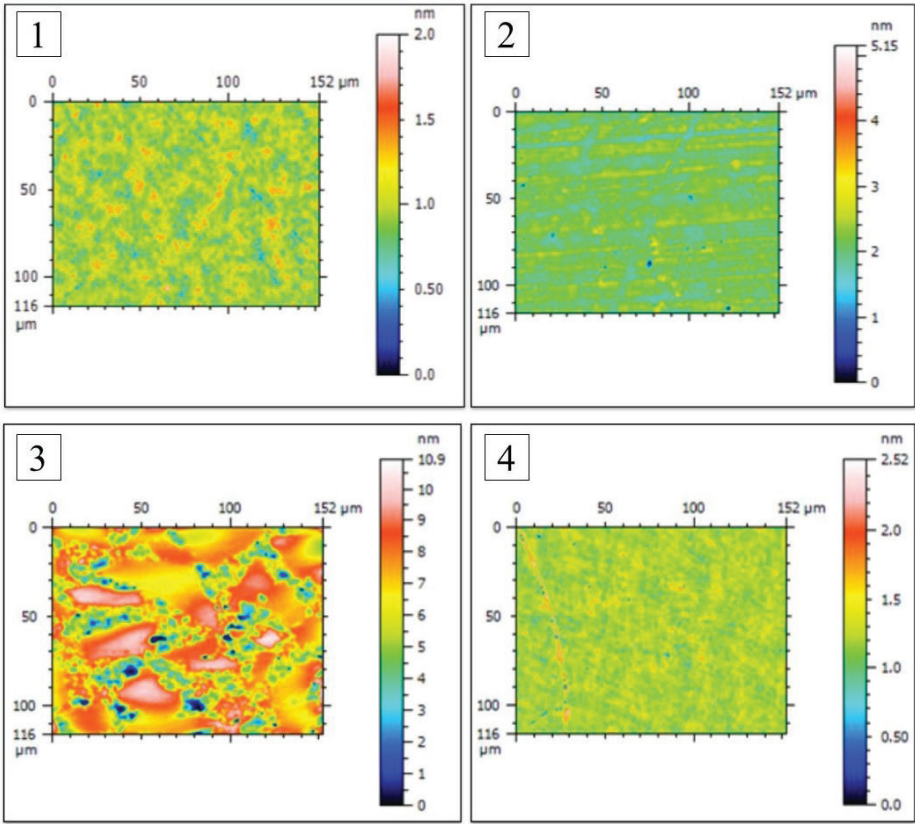


Рисунок 1 – Топографии поверхностей образцов 1–4 SiC после магнитореологического полирования
Figure 1 – Surface topographies of 1–4 SiC samples after magnetorheological polishing

Таблица / Table

Среднеарифметическое отклонение профиля (R_a) и высота неровностей (R_z) до и после обработки

Arithmetic mean deviation (R_a) and mean roughness depth (R_z) before and after processing

Номер образца Sample number	До обработки Before processing		После обработки / After procesisng			
	3D-профилومتر 3D-profilometr		3D-профилومتر 3D-profilometr		ACM / AFM	
	$R_z, \text{\AA}$	$R_a, \text{\AA}$	$R_z, \text{\AA}$	$R_a, \text{\AA}$	$R_z, \text{\AA}$	$R_a, \text{\AA}$
1	-	-	11.2	1.6	-	-
2	316.0	48.9	16.6	2.2	7.2	2.2
3	144.0	26.4	38.5	6.8	38.7	12.4
4	9200	1030	14.3	2.1	-	-

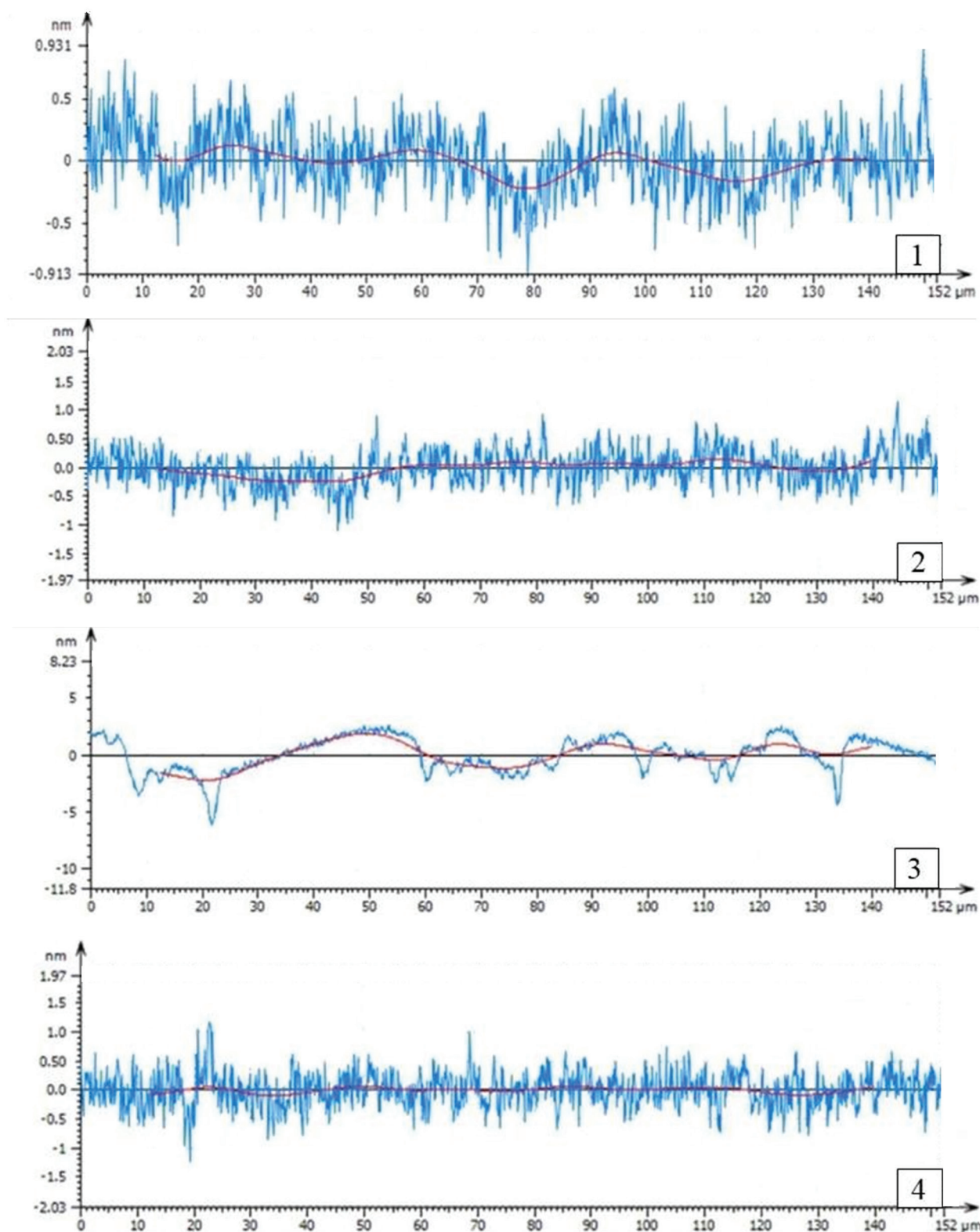


Рисунок 2 – Профилограммы образцов 1–4 SiC после магнитореологического полирования

Figure 2 – Profilograms of 1–4 SiC samples after magnetorheological polishing

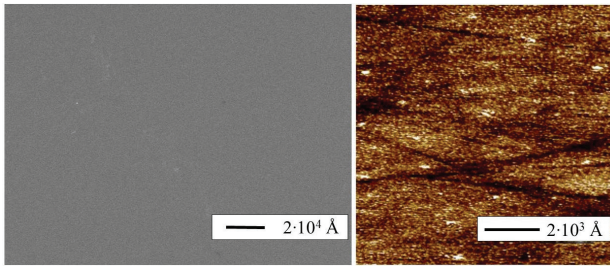


Рисунок 3 – Изображения со сканирующего электронного микроскопа (а) и атомно-силового микроскопа (b) поверхности образца 2 после магнитореологической полировки

Figure 3 – Scanning electron microscope (a) and atomic force microscope (b) images of the sample surface 2 after magnetorheological polishing

Важным дискуссионным вопросом является физический предел возможностей повышения гладкости поверхности для кристаллов вообще и для кристаллов карбида кремния в частности. Для политипов карбида кремния 4Н и 6Н расстояние между соседними кристаллографическими плоскостями семейства (001) составляет 2,368 и 2,527 Å соответственно. Длина связи Si-C в разных политипах карбида кремния составляет около 1,89 Å. В модельном представлении атомной решётки в виде упаковки сфер можно ожидать, что минимально возможные перепады профиля поверхности должны быть сопоставимы с половиной межатомного расстояния. Меньшие величины могут получаться только вследствие процедуры статистического усреднения, свойственного для всех методов измерения шероховатости и заложенного в само определение этой величины. Эти аргументы позволяют предположить, что результат обработки методом МРП вплотную приблизился к физическому пределу гладкости поверхности для монокристаллов карбида кремния.

Заключение

Экспериментально показано, что магнитореологическое полирование может быть эффективно использовано для финишной обработки монокристаллов карбида кремния политипов 4Н и 6Н, а также реакционно-спечённой двухфазной Si-SiC (6Н и 15R) керамики. Для образцов из монокристаллов

карбида кремния достигнуто снижение уровня шероховатости на 1,5–3 порядка с достижением параметра $R_a \approx 2$ Å. Шероховатость поверхности реакционно-спечённой керамики $R_a \approx 10$ Å определяется её морфологическим строением и зависит от размера включений разных фаз и перепадов высоты профиля на границах фаз.

Наиболее низкий уровень шероховатости R_a 1,6 Å зафиксирован для образца монокристаллического карбида кремния (4Н-SiC), что достаточно близко к физическому пределу для данного материала и подтверждает формирование атомарногладкой поверхности.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ОАО «Волжский абразивный завод» в лице директора за предоставленные образцы монокристаллического карбида кремния, выращенного по методу Ачесона, и А.В. Булатову за предоставленный образец монокристаллического карбида кремния, выращенный по методу ЛЭТИ. Также авторы выражают благодарность сотруднику лаборатории высокоточной обработки поверхности Н.Е. Халявкиной за помощь в полировке образцов.

Список использованных источников

1. Лебедев А.А. Электроника на основе SiC (к 100-летию Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН) / А.А. Лебедев [и др.] // Успехи физических наук. – 2019. – Т. 189. – № 7. – С. 803–848. DOI: 10.3367/UFNr.2018.10.038437
2. Grinchuk P.S. Advanced reaction-bonded SiC ceramics for space mirror blanks / P.S. Grinchuk [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 113. – P. 275–290. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.069
3. Izhevskiy V.A. Review article: Silicon carbide. Structure, properties and processing / V.A. Izhevskiy [et al.] // Ceramica. – 2000. – Vol. 46, № 297. – P. 4–13. DOI: 10.1590/S0366-69132000000100002
4. Chen G. Chemical mechanical polishing of silicon carbide (SiC) based on coupling effect of ultrasonic vibration and catalysis / G. Chen, Z. Hu, G. Pan, J. Lu, J. Guo // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2023. – Vol. 11, № 5. – P. 111080. DOI: 10.1016/j.jece.2023.111080
5. Deng H. Damage-free finishing of CVD-SiC by a combination of dry plasma etching and plasma-assisted

polishing / H. Deng, K. Endo, K. Yamamura // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2017. – Vol. 115. – P. 38–46.

DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2016.11.002

6. Патент 1563878 СССР, МПК В24В 31/112. Способ магнитно-абразивной обработки / В.Н. Чачин, Н.С. Хомич, В.С. Яркович, Л.К. Глеб, Г.Р. Городкин; заявитель и патентообладатель Белорусский политехнический институт. – № 4321165/25-08; заявл. 21.03.1988; опубл. 23.05.1990, Бюл. № 19.

7. Патент 5449313 США, МПК В24В 31/112. Magnetorheological polishing devices and methods / W.I. Kordonsky, I.V. Prokhorov, S.R. Gorodkin, G.R. Gorodkin, L.K. Gleb, B.E. Kashevsky; патентообладатель Byelocorp Scientific Inc. – № 08/141,803; заявл. 27.10.1993; опубл. 12.09.1995.

8. Du H. Study on Surface Roughness of Modified Silicon Carbide Mirrors polished by Magnetorheological Finishing / H. Du, C. Song, S. Li // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 301. – P. 012164. **DOI:** 10.1088/1757-899X/301/1/012164

9. Кан В.Е. Исследование поверхности и подповерхностного слоя подложек, полученных из CVD-алмазов после ультратонкой полировки / В.Е. Кан [и др.] // Журнал технической физики. – 2025. – Т. 95, № 2. – С. 351–356.

DOI: 10.61011/JTF.2025.02.59731.357-24

10. Худoley А.Л. Магнитореологическая обработка точных изделий / А.Л. Худoley // Наука и инновации. – 2018. – № 11 (189). – С. 31–39.

11. Zhao F. Advanced nonlinear rheology magnetorheological finishing: A review / F. Zhao [et al.] // Chinese Journal of Aeronautics. – 2024. – Vol. 37, № 4. – P. 54–92. **DOI:** 10.1016/j.cja.2023.06.006

12. Zhang Z. Challenges and strategies in high-accuracy manufacturing of the world's largest SiC aspheric mirror / Z. Zhang [et al.] // Light: Science & Applications. – 2022. – Vol. 11. – P. 310.

DOI: 10.21203/rs.3.rs-1835299/v1

13. Ma G. A Review on Precision Polishing Technology of Single-Crystal SiC / G. Ma [et al.] // Crystals. – 2022. – Vol. 12, № 1. – P. 101. **DOI:** 10.3390/cryst12010101

Acknowledgments

The authors are grateful to JSC Volzhsky Abrasive Works and its Director for providing the samples of Acheson-grown monocrystalline silicon carbide, and to A.V. Bulatov for providing the sample of monocrystalline silicon carbide grown by the LETI method. The authors also extend their thanks to N.E. Khalyavkina of the High-Precision Surface Processing Laboratory for her assistance in polishing the samples.

References

1. Lebedev AA [et al.]. SiC-based electronics (on the 100th anniversary of the Ioffe Physical Technical Institute of the Russian Academy of Sciences). Physics-Uspekhi. 2019;189(7):803-848. **DOI:** 10.3367/UFNr.2018.10.038437

2. Grinchuk PS [et al.]. Advanced reaction-bonded SiC ceramics for space mirror blanks. Journal of Manufacturing Processes. 2024;(113):275-290.

DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.069

3. Izhevskiy VA [et al.] Review article: Silicon carbide. Structure, properties and processing. Ceramica. 2000;46(297):4-13. **DOI:** 10.1590/S0366-69132000000100002

4. Chen G [et al.]. Chemical mechanical polishing of silicon carbide (SiC) based on coupling effect of ultrasonic vibration and catalysis. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023;11(5):111080.

DOI: 10.1016/j.jece.2023.111080

5. Deng H, Endo K, Yamamura K. Damage-free finishing of CVD-SiC by a combination of dry plasma etching and plasma-assisted polishing. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2017;(115):38-46.

DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2016.11.002

6. Chachin VN, Khomich NS, Yarkovich VS, Gleb LK, Gorodkin GR. (1990). Method of magnetic-abrasive processing (USSR Patent No. SU 1563878 A1). Byelorussian Polytechnic Institute.

7. Kordonsky WI [et al.]. (1995). Magnetorheological polishing devices and methods (U.S. Patent No. US 5449313 A). Byelocorp Scientific Inc.

8. Du H, Song C, Li S. Study on Surface Roughness of Modified Silicon Carbide Mirrors polished by Magnetorheological Finishing. OP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018;(301):012164.

DOI: 10.1088/1757-899X/301/1/012164

9. Kan VE, Khudolei AL, Irzhak DV, Knyazev MA, Teplova TB. Investigation of the surface and subsurface layer of substrates made from CVD diamonds after ultra-precision polishing. Technical Physics. 2025;95(2):351-356. **DOI:** 10.61011/JTF.2025.02.59731.357-24

10. Khudolei AL. Magnetorheological finishing of precision components. Science and Innovations. 2018;11(189):31-39.

11. Zhao F [et al.]. Advanced nonlinear rheology magnetorheological finishing: A review. Chinese Journal of Aeronautics. 2024;37(4):54-92.

DOI: 10.1016/j.cja.2023.06.006

12. Zhang Z [et al.]. Challenges and strategies in high-accuracy manufacturing of the world's largest SiC aspheric mirror. Light: Science & Applications. 2022;(11):310 p.

DOI: 10.21203/rs.3.rs-1835299/v1

13. Ma G [et al.]. A Review on Precision Polishing Technology of Single-Crystal SiC. Crystals. 2022;12(1):101. **DOI:** 10.3390/cryst12010101