13

Термохимическая полировка монокристаллических HPHT-алмазных подложек: анализ поверхности

© К.А. Иржевский,[1,2] И.В. Клепиков,[1,2,3] А.В. Колядин,[4] Ю.В. Патренин,[3] М.А. Жильцов,[5] В.А. Шепелев,[2] А.А. Алтухов[2]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия
[2] Российский технологический университет Московский институт радиотехники, электроники и автоматики,
119454 Москва, Россия
[3] Научно-производственный комплекс „Алмаз“,
197706 Санкт-Петербург, Россия
[4] Научно-производственный комплекс „Алмаз-Карабаново“,
197706 Карабаново, Россия
[5] КРИСТАЛИН,
656006 Барнаул, Россия
e-mail: Kirillirjevskii01@mail.ru

Поступило в Редакцию 21 октября 2024 г.
В окончательной редакции 21 октября 2024 г.
Принято к публикации 21 октября 2024 г.

Рассмотрены результаты обработки монокристаллических HPHT-алмазных подложек методом термохимической полировки. Основное применение данного метода — доведение поверхности механически полированных алмазных подложек до состояния, близкого к атомарно гладкому. С помощью метода оптической профилометрии впервые получены результаты исследования всей площади поверхности $(4 \times 4\,\text{mm})$ алмазных подложек высокого качества. Показано, что термохимическая полировка может значительно улучшить морфологические характеристики алмазных подложек вплоть до того, что на 80–90 % их площади перепады высот составляют менее 200 nm. Данные, полученные с помощью метода атомно-силовой микроскопии, свидетельствуют о снижении шероховатости поверхности до уровня Ra $(0.5-0.7)$ nm. В процессе полировки также формируются углубления различной величины и глубины, распределенные неравномерно; с увеличением однородности поверхности их количество может увеличиваться. Результаты исследования демонстрируют значительные перспективы термохимической полировки алмазных подложек для их промышленного применения в высокотехнологичных областях микроэлектроники и микромеханики, требующих плоских поверхностей с минимальной шероховатостью.

Ключевые слова: HPHT-алмаз, термохимическая полировка, механическая полировка, шероховатость поверхности, плоскостность.

DOI: 10.61011/JTF.2025.03.59868.284-24

Введение

Алмаз — очень перспективный материал для использования в электронике [1,2], оптике [3,4], в качестве детекторов ионизирующего излучения [5–7] и теплоотводов [8] ввиду его уникальных физических свойств. Для всех этих приложений необходима плоская, ровная поверхность с наименьшей шероховатостью $Ra \approx 1-3$ Å [9]. Однако алмаз известен своей высочайшей твердостью, что представляет особую сложность при его полировке. Обычные методы механической полировки (МП) требуют применения алмазного порошка на вращающемся с большой скоростью железном диске. С помощью этого подхода обычно достигается уровень шероховатости поверхности в единицы нанометров (единицы измерения Ra и Rq — среднее арифметическое и среднеквадратичное отклонение высот прифиля соответственно). Более того, данный метод характеризуется сильной анизотропией по отношению к направлению полировки, а поверхность, обработанная механически, значительно исштрихована, что ограничивает ее использование в высокотехнологичных приложениях [10]. Поэтому очень часто МП используют как первичную обработку (шлифовку и полировку), а финишную полировку делают уже другими методами прецизионной обработки поверхности. Были предложены альтернативные методы полировки, основанные на других физических принципах: химические реакции (химико-механическая полировка, травление в плазме), графитизация (термохимическая полировка, полировка динамическим трением), испарение и выбивание атомов углерода (лазерная полировка, ионное распыление) и некоторые другие [9]. Все методы имеют свои преимущества, недостатки и физические ограничения.

В 1953 г. в работе [11] был предложен метод полировки с использованием горячего металлического диска, который в настоящее время называется термохимической полировкой (ТХП). Активное развитие

этого метода началось в конце XX в. и проводилось в работах [12–15]. Метод ТХП основан на способности некоторых металлов (Fe, Ni, Mn, La, Ce и др.) растворять углерод при нагревании [16]. При этом считается, что металлы катализируют переход алмаза в неалмазные формы углерода (графит и аморфный углерод), которые, в свою очередь, с легкостью диффундируют в металл при высоких температурах [17]. Сила взаимодействия металлов с углеродом определяется, в большей степени, заполненностью d-подуровня. Так, металлы без электронов на нем (например, Cu, Zn) относительно инертны к углероду, металлы с почти заполненным d-подуровнем (например, Ti, V) образуют карбиды, а металлы с несколькими электронами (например, Fe, Ni) эффективно растворяют углерод. Последние также катализируют переход алмаза в графит, поэтому и используются при ТХП [16], современные исследования демонстрируют также новые возможности использования Ni для ТХП [18]. В литературе немного информации о влиянии различных составов полировального диска на поверхность алмаза при ТХП. В работе [12] было показано, что железный диск показывает лучшие результаты, чем никелевый. Чугунные и молибденовые диски не оказывают заметного влияния на полируемую поверхность.

ТХП проходит при вращении (или иногда в статическом положении) металлического диска, при небольшом прижиме и скоростях, не превышающих 10 rpm. Наибольшему воздействию и, как следствие, удалению подвергаются выступающие части кристалла, что приводит к выравниванию поверхности. Минимальная температура, при которой возможна полировка — 700 °C, однако в таком случае скорость полировки очень мала. При температуре более 950 °C весь графитизированный углерод не успевает диффундировать в диск, что приводит к его накоплению, поэтому высокие температуры обычно не используют, либо проводят ТХП в газообразной среде, в которой графитизированный углерод образует летучие продукты (например, CH_x в среде водорода) и таким образом удаляется с границы раздела металл/алмаз. Более того, полировку часто проводят в два этапа: сначала при высокой температуре, а затем при низкой, чтобы избавиться от всех остатков графитизированного углерода и добиться наиболее качественной поверхности [13]. Помимо температуры другим важным фактором, определяющим результат ТХП, является состав атмосферы, в которой она происходит. Проводить полировку можно в вакууме, водороде, инертных газах и азоте. Скорость полировки в этом ряду падает от вакуума к азоту. В условиях вакуума скорость полировки алмаза самая высокая, так как сцепление полировального диска и полируемого кристалла увеличивается за счет пониженного давления. Более того, остаточный кислород в камере может дополнительно протравливать алмаз. В водороде скорость полировки выше, чем в инертных газах, так как первый способен реагировать с углеродом, растворенным в полировальном диске, что позволяет металлу дольше достигать состояния насыщения. Скорость полировки в азоте меньше, чем в инертных газах, так как азот поглощается поверхностью металлической пластины и задерживает диффузию углерода [12]. В работе [14] было предложено использовать поперечные вибрации полировального диска для уменьшения сильного трения с полируемым образцом, которое всегда возникает в результате образования адгезионного переходного слоя на границе раздела алмаз–металл. Эти вибрации „отрывают“ образец от полировального диска. Важной особенность ТХП является отсутствие существенного влияния кристаллографической ориентации на конечный результат [19]. В настоящей работе рассмотрен метод ТХП и исследованы его возможности при полировке монокристаллических алмазных HPHT-подложек. Приведен детальный анализ параметров геометрии и шероховатости поверхности алмазных подложек после их обработки методом ТХП.

1. Методы исследования и образцы

В настоящей работе приведены результаты исследования девяти монокристаллических многосекторных HPHT-алмазных подложек типа IIa, ориентации $\langle 100 \rangle$, размерами $4 \times 4 \times 0.5$ mm. Подложки были предоставлены ООО НПК „Алмаз“, ООО „Нью Даймонд Технолоджи“ (г. Сестрорецк, Санкт-Петербург). Все образцы сначала были подвергнуты МП, которая отработана и применяется в промышленных масштабах на данных предприятиях. Поэтому в качестве демонстрирования результатов МП приведены снимки характерных образов, отражающих общие особенности обработки производимых пластин. Можно со значительной степенью точности гарантировать воспроизводитмость результатов МП, так как она производится по единой для всех подложек технологии на ограночном станке „DialitV Super Table^{TM}“ алмазным порошком марки АСМ 10/7. ТХП производилась в ООО „КРИСТАЛИН“ (г. Барнаул), на установке Микротом-3 с вращающимся железным диском, в атмосфере водорода, при температуре 750–800 °C. ТХП для всех образцов проводилась в несколько отличающихся локальных условиях (длительность полировки, степень прижима образца). Изучение влияния каждого из факторов выходит за рамки задач настоящей работы. Морфология, шероховатость и плоскостность поверхности исследовалась атомно-силовом микроскопе (АСМ) Integra-Aura в ресурсном центре „Микроскопии и микроанализа“ СПбГУ и на оптическом профилометре Zygo ZeGage PRO HR в лаборатории „Алмазная СВЧ-электроника“ РТУ МИРЭА. Данный профилометр позволяет делать 3D-сканы поверхности на большой площади, впоследствии объединяя участки методом сшивки. Границы между сшитыми сканами иногда проявляются на итоговом изображении, но они не являются характеристикой поверхности.

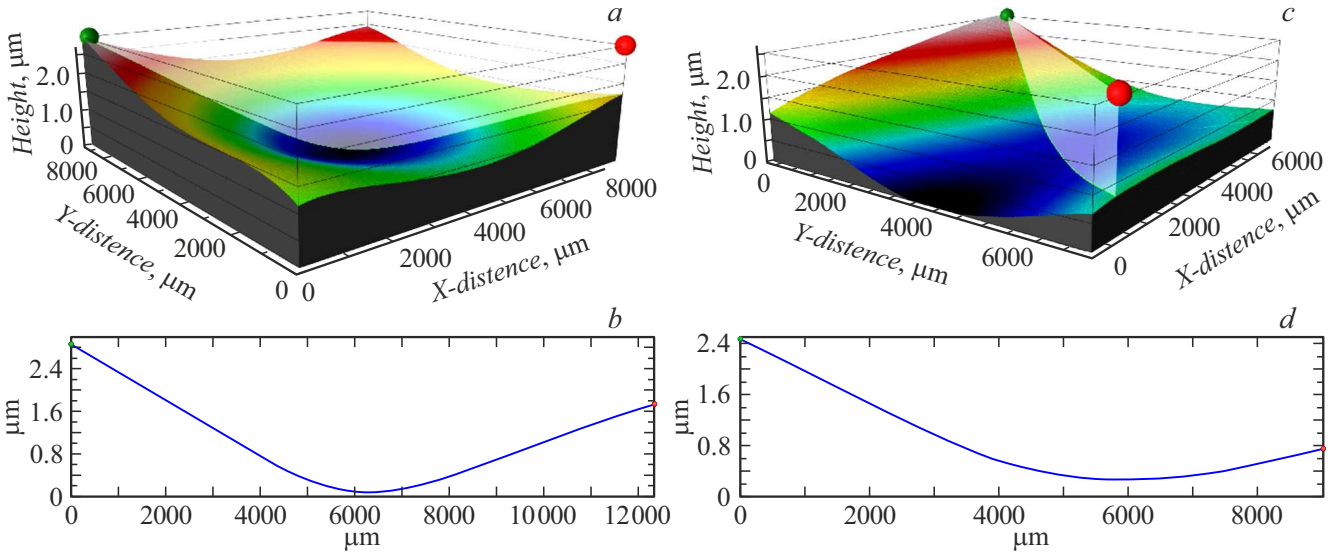


Рис. 1. 3*D*-сканы на оптическом профилометре поверхности алмазных подложек после МП: *a* — изометричный прогиб в центральной части подложки; *b* — профиль по линии, указанной на рис. 1, *a*; *c* — U-образный прогиб в центральной части подложки; *d* — профиль по линии, указанной на рис. 1, *c*.

2. Результаты

2.1. Геометрия алмазных подложек до и после ТХП

2.1.1. Предварительная МП

Геометрия всех исследуемых подложек после МП характеризуется прогибом в центральной части, с перепадом высот от 1 до 3 μm. Эта особенность обусловлена стандартным механизмом закрепки подложек и технологической оснастки, на которую оказывается неравномерное давление. Последнее приводит к увеличенному удалению материала из центральной части подложки. В зависимости от равномерности давления формируется разнообразная геометрия прогиба, однако находящаяся в пределах технологических допусков. Например, при избыточном, но равномерном давлении на центральную часть подложки формируется относительно изометричное углубление (рис. 1, *a*). Если при закрепке оказывается неравномерное давление, могут возникнуть скошенные или даже U-образные углубления (рис. 1, *b*). В случае, когда один из держателей оказывает значительно большее давление, возможно получение относительно ровной подложки с небольшими перепадами высот в пределах первых сотен нанометров. Тем не менее на одном из ее углов будет образоваться уступ в 1–2 микрометра.

2.1.2. ТХП

После ТХП пяти алмазных подложек обнаружены существенные изменения геометрии поверхности, не характерные для использованной технологии МП. На двух образцах наблюдается значительное уменьшение прогиба, выравнивание плоскостности поверхности, еще на двух прогиб сменился незначительно выпуклой центральной частью, на одной выявлена выпуклость центральной части до 2 μm.

Из особенностей образовавшегося прогиба пластин после ТХП можно выделить: 1) прогиб, расположенный в центре пластины, с неравномерными повышениями к краям (образец 33725, рис. 2, *a*), перепад высот около 150 nm в центральной части, 350 nm по всей площади; 2) скошенный U-образный прогиб, проходящий посередине пластины с перепадом высот $\sim 0.6\,\mu$m в центре пластины, достигающий 1.8 μm на одном из ее краев (образец 33892, рис. 2, *b*).

В двух подложках со слабо выраженным неравномерным возвышением в центральной части пластины наблюдается перепад высот около 200 nm на основной площади подложки (образцы 35211 и 40113, рис. 3). Неоднородности, достигающие перепада высот в 1 μm, наблюдаются у краев алмазных подложек № 35211, 40113 и, вероятнее всего, они связаны со стандартным механизмом закрепки пластин при ТХП.

Геометрия одной из подложек (образец 44271, рис. 4) существенно отличается от других: в ее центральной части имеется значительное возвышение с плавными понижениями к краям. Перепады высот на краях варьируются от 2 до 6 μm, тогда как в центральной части перепад составляет не более 1 μm. Кроме того, поверхность этой подложки усеяна большим количеством углублений. Такое существенное изменение геометрии может быть связано с избыточной продолжительностью полировки.

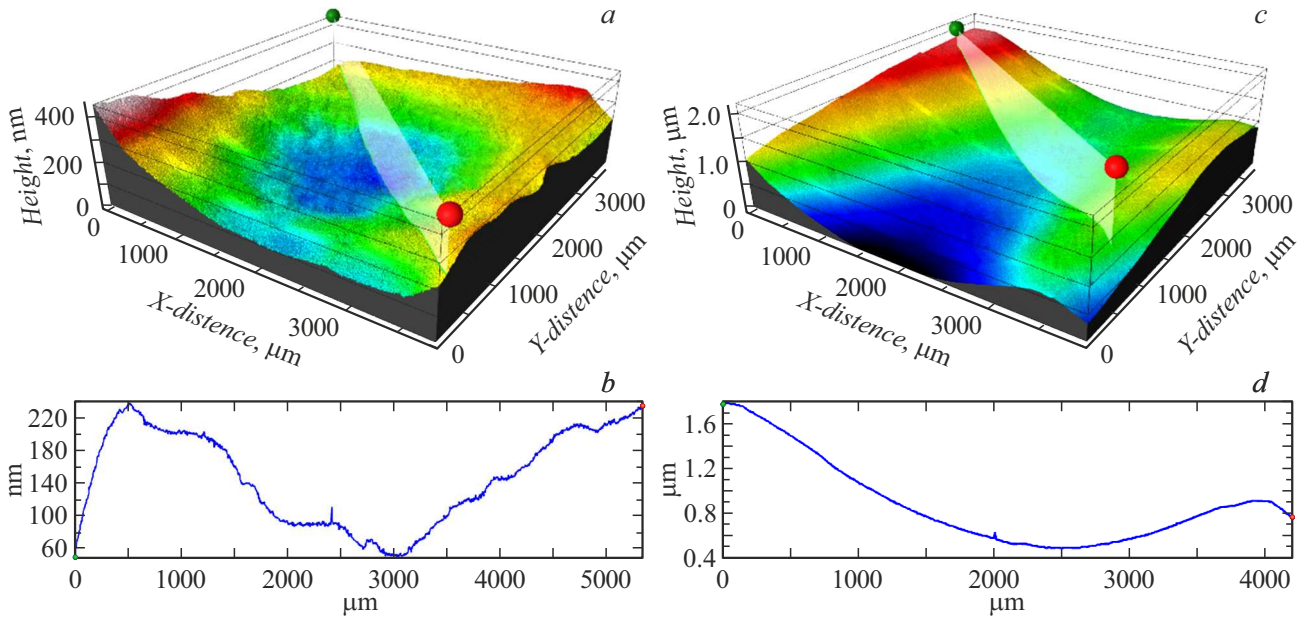


Рис. 2. 3*D*-сканы на оптическом профилометре алмазных подложек после ТХП: *a* — прогиб в центре подложки (образец 33725); *b* — профиль по линии, указанной на рис. 2, *a*; *c* — скошенное U-образное углубление (образец 33892); *d* — профиль по линии, указанной на рис. 2, *c*.

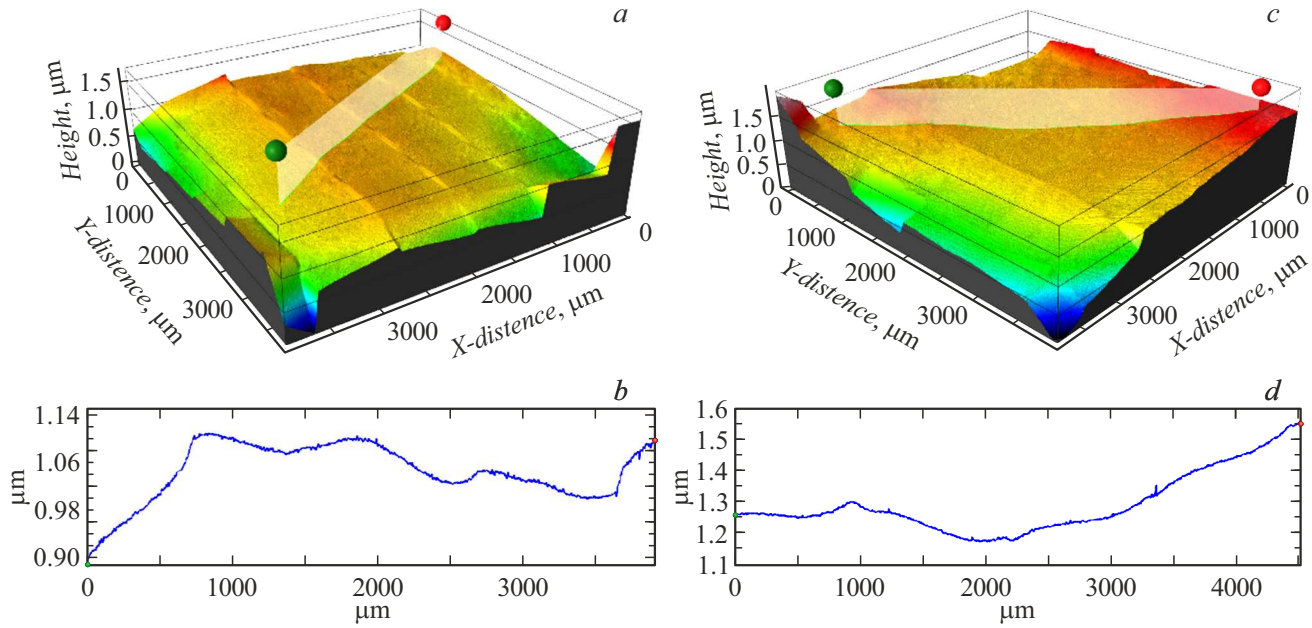


Рис. 3. 3*D*-сканы алмазных подложек на оптическом профилометре после ТХП, характеризующиеся слабо выраженным неравномерным возвышением в центральной части подложки и неоднородностями на ее краях. *a* — образец 35211, *b* — профиль по линии, указанной на рис. 3, *a*; *c* — образец 40113; *d* — профиль по линии, указанной на рис. 3, *c*.

2.2. Шероховатость поверхности алмазных подложек до и после ТХП

2.2.1. Предварительная МП

Качественная МП обеспечивает уровень шероховатости поверхности $Ra \sim 1$ nm. Дальнейшее снижение шероховатости поверхности этим методом возможно, но требует гораздо более скрупулезного подхода. Поверхность после использованной стандартной МП значительно осложнена параллельной штриховкой с различной периодичностью, которую хорошо видно на профиле (рис. 5). Перепады высот достигают 8 nm. Следует отметить, что поверхность любого материала после МП характеризуется повышенными напряжениями, наруше-

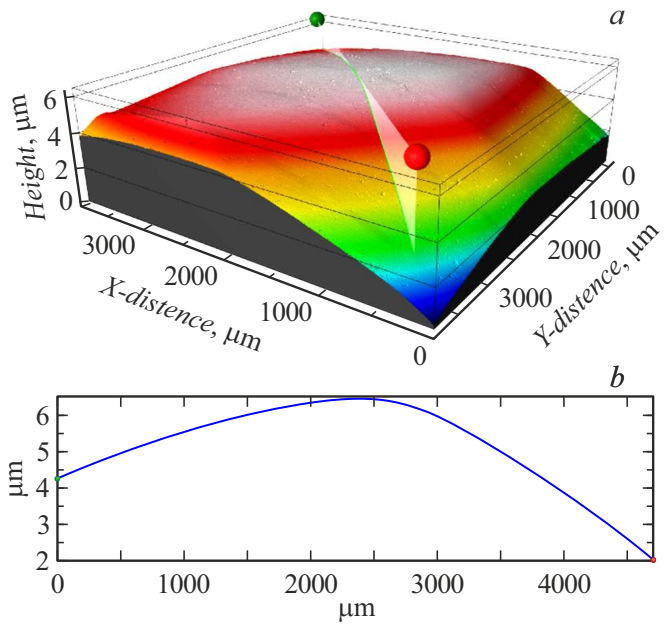


Рис. 4. *a* — 3*D*-скан на оптическом профилометре алмазной подложки № 44271 после ТХП, характеризующийся значительным возвышением с плавными понижениями к краям; *b* — профиль по линии, указанной на рис. 4, *a*.

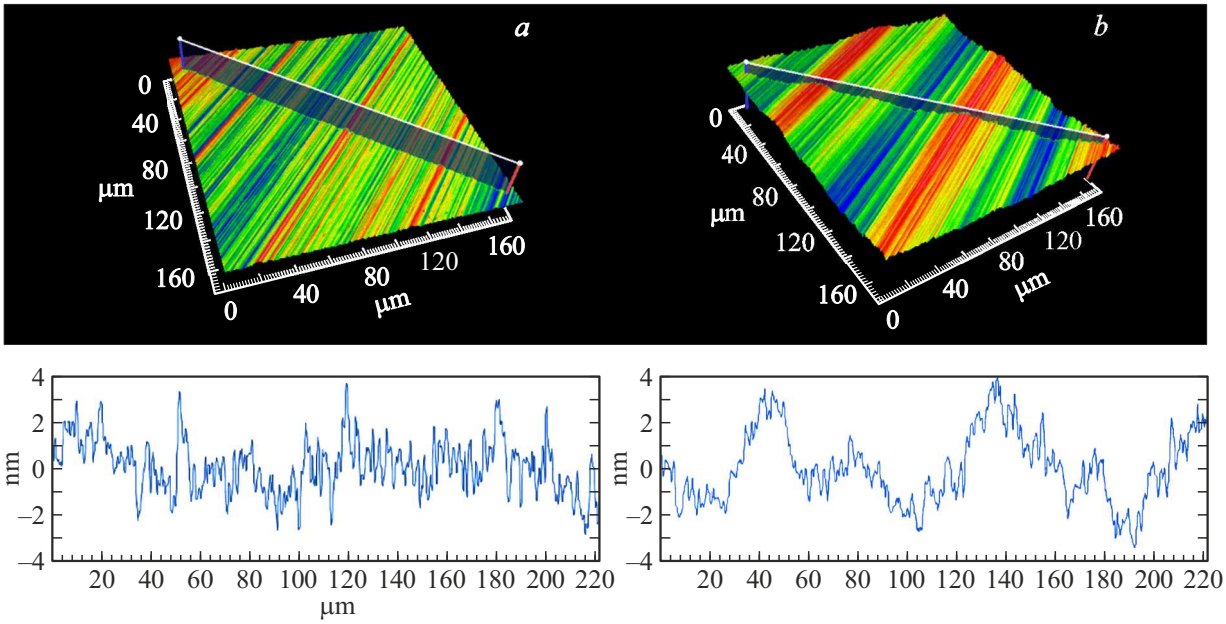


Рис. 5. Детальные 3*D*-сканы на оптическом профилометре алмазных подложек после МП: *a* — относительно однородная штриховка с перепадами высот на профиле до 7 nm; *b* — периодичная штриховка с перепадами высот до 8 nm.

ниями и участками с аморфным углеродом, образованными давлением абразива в процессе полировки.

2.2.2. ТХП

Наиболее важная общая особенность поверхности алмазных подложек после ТХП — отсутствие штриховки МП или ее значительно более сглаженный характер с шероховатостью Ra (0.5–0.7) nm. Также на поверхности появляются скульптуры: углубления округлой и овальной формы, размерами от ~ 0.01 до $0.5\,\mu$m, глубиной от ~ 0.001 до $0.2\,\mu$m. Некоторые из них иногда располагаются сериями. В таблице представлены данные по количественному и размерному соотношению углублений на локальных участках поверхности алмазных подложек, полученные при изучении методом АСМ. Углублениями считались изометричные локальные понижения высоты более чем 5 nm. Количество углублений в каждой ячейке

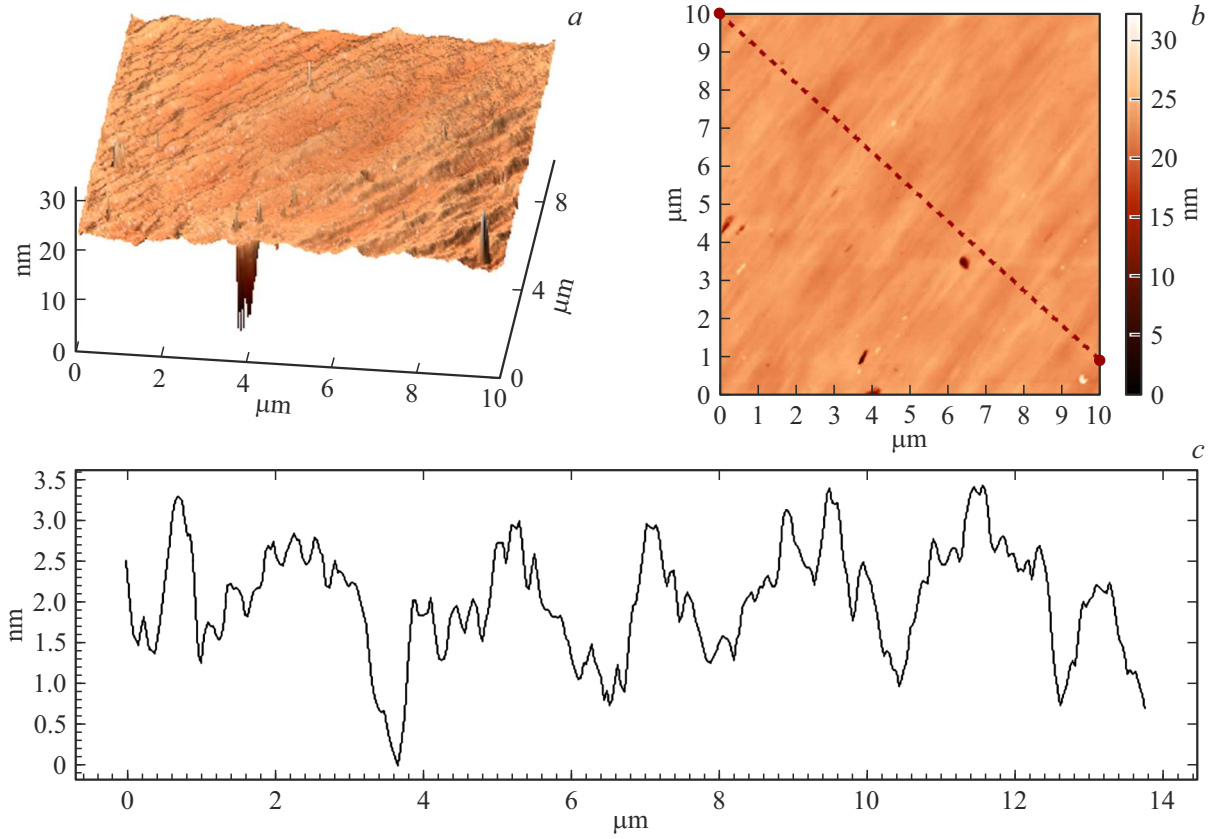


Рис. 6. АСМ снимки поверхности образца 33892 после ТХП: *a* — трехмерное изображение его поверхности; *b* — двухмерное изображение поверхности, показанной на рис. 6, *a*; *c* — профиль высот по линии, проведенной на рис. 6, *b*.

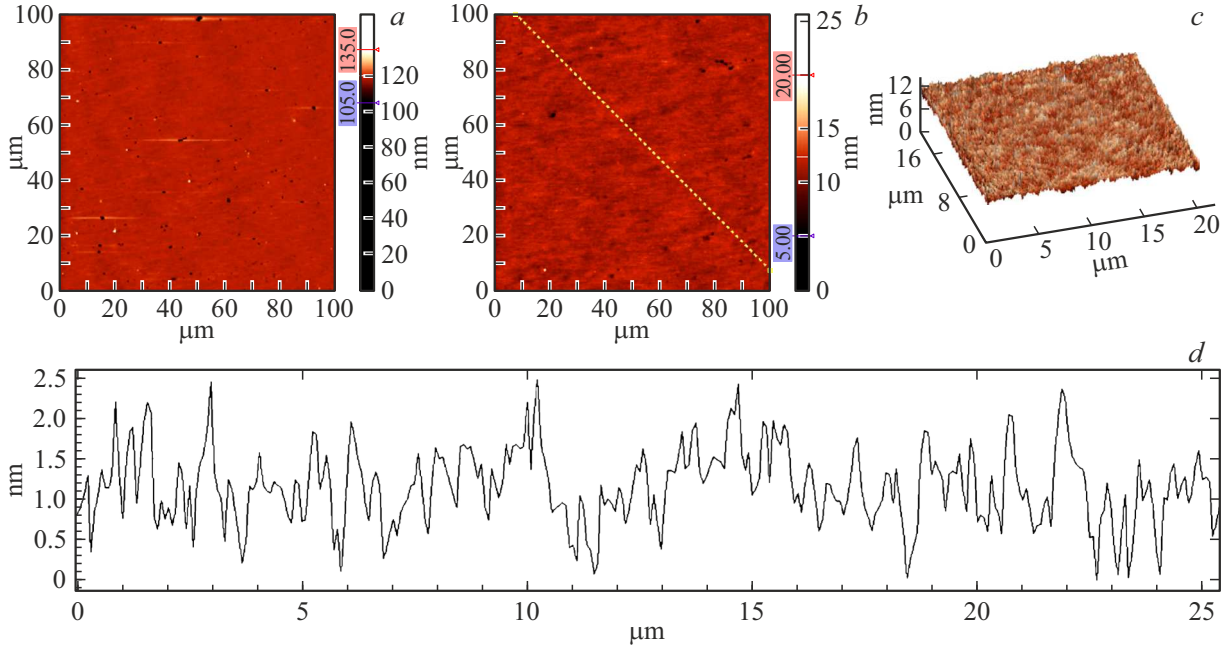


Рис. 7. Снимки поверхности образца 44060, полученные с помощью АСМ: *a* — двухмерное изображение участка его поверхности размером $100 \times 100\,\mu$m; *b* — двухмерное изображение участка его поверхности $20 \times 20\,\mu$m; *c* — трехмерное изображение поверхности, показанной на рис. 7, *b*; *d* — профиль высот по линии, проведенной на рис. 7, *b*.

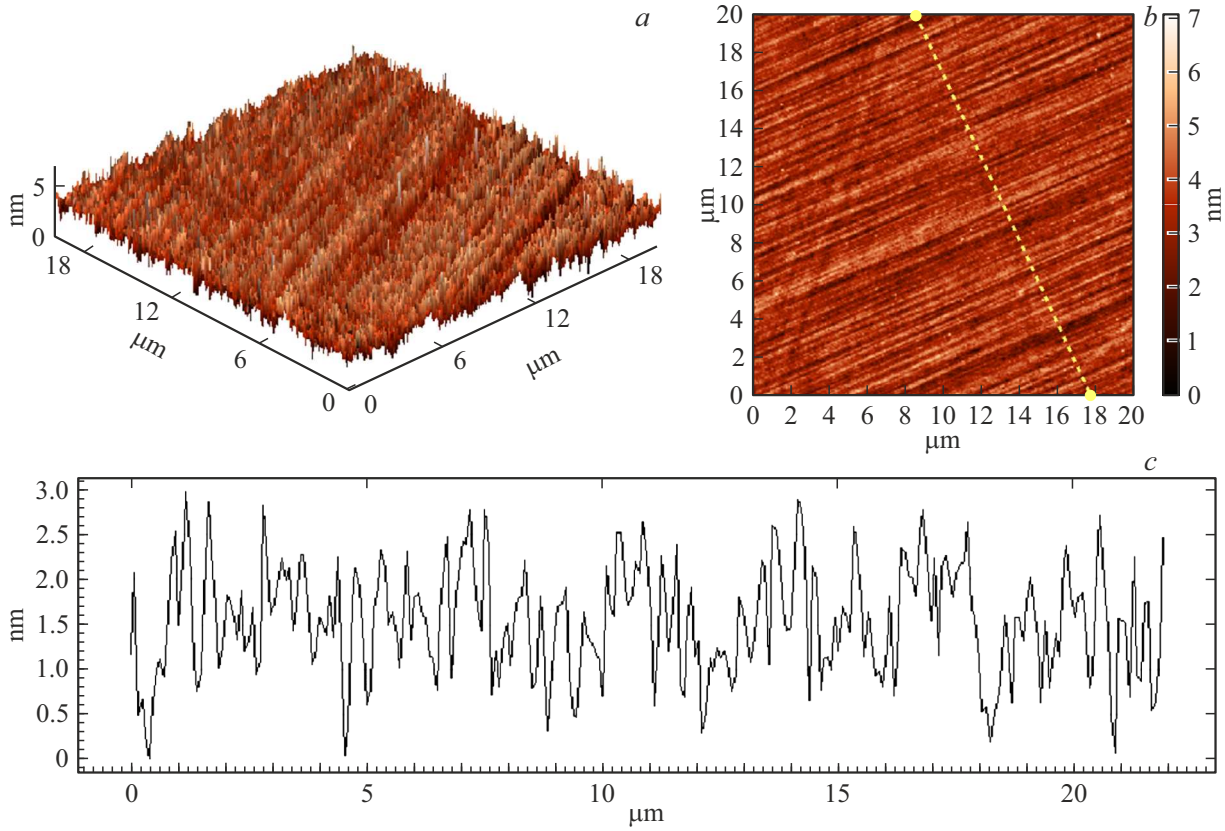


Рис. 8. АСМ снимки поверхности образца 35211: *a* — трехмерное изображение его поверхности; *b* — двухмерное изображение поверхности, показанной на рис. 8, *a*; *c* — профиль высот по линии, проведенной на рис. 8, *b*.

таблицы указано для различных АСМ снимков площадью $100 \times 100\,\mu\text{m}^2$.

Поверхность алмазной подложки № 38577 (рис. 6) имеет штриховку, которая является значительно более сглаженной и редкой по сравнению со штриховкой от использованной МП. Эта штриховка может быть как остаточной от механической обработки, так и образованной из-за неоднородностей полировального диска.

Поверхность образцов 44060 (рис. 7) и 38577 преимущественно однородна, штриховка почти не проявлена, однако на них более проявлены углубления, распределенные очень неравномерно. Особенно хорошо это видно на рис. 6, *a*.

Единственный образец, на котором отсутствуют углубления, — 35211 (рис. 8). Локальные понижения на профиле не превышают 4–5 nm, однако вся поверхность покрыта штриховкой, явно унаследованной от механической полировки. Это может указывать на недостаточную интенсивность или продолжительность термохимической полировки. Тем не менее шероховатость поверхности снизилась, а перепады высоты на профиле стали составлять около 3 nm. Более того, данная штриховка более однородна, чем на пластинах, полированных только механически, описанных в начале разд. 2.2.

3. Обсуждение результатов

Метод ТХП оказывает значительное влияние на формирование геометрии поверхности монокристаллических алмазных подложек. Можно предположить, что изначально наследуется геометрия механически полированных пластин, однако в процессе съема материала при ТХП происходит выравнивание поверхности, также во многом зависящее от технологической оснастки. Технологическая оснастка для закрепки, позиционирования и прижима алмазных подложек очень существенно влияет на геометрию итоговой поверхности. Это справедливо как для метода ТХП, так и для метода МП. При ТХП возникают также новые особенности геометрии. Некоторые из подложек характеризуются перепадами высот, не превышающими 200 nm на (80–90) % площади пластины. С помощью метода ТХП можно достичь весьма ровной поверхности, что представляет интерес для применения данного метода с целью достижения наилучшей плоскостности алмазных подложек.

Наиболее важная общая особенность шероховатости поверхности алмазных подложек после ТХП — отсутствие штриховки МП или ее значительно более сглаженный характер, и снижение значения *Ra* до уровня ангстрем. Обычные перепады высот на профиле составляют до 3 nm, тогда как для механически полированных

Количественное и размерное соотношение углублений на локальных участках поверхности алмазных подложек, полированных термохимически, полученные при изучении методом АСМ

Номер образца	Шероховатость поверхности на участке	Количество и глубина углублений	
38577	$25 \times 25\,\mu$m $Rq = 0.891$ nm; $Ra = 0.554$ nm $25 \times 25\,\mu$m $Rq = 1.165$ nm; $Ra = 0.479$ nm $20 \times 20\,\mu$m $Rq = 1.138$ nm; $Ra = 0.641$ nm $14 \times 14\,\mu$m $Rq = 0.909$ nm; $Ra = 0.482$ nm	**98** 53 > 10 nm 23 > 20 nm 6 > 50 nm Max 184 nm	**44** 19 > 10 nm 8 > 20 nm 3 > 50 nm Max 84 nm
44060	$25 \times 25\,\mu$m $Rq = 1.385$ nm; $Ra = 0.666$ nm $25 \times 25\,\mu$m $Rq = 1.428$ nm; $Ra = 0.668$ nm $60 \times 60\,\mu$m $Rq = 1.239$ nm; $Ra = 0.598$ nm $55 \times 55\,\mu$m $Rq = 1.231$ nm; $Ra = 0.602$ nm $100 \times 100\,\mu$m $Rq = 1.935$ nm; $Ra = 0.716$ nm $60 \times 60\,\mu$m $Rq = 1.366$ nm; $Ra = 0.739$ nm $20 \times 20\,\mu$m $Rq = 0.614$ nm; $Ra = 0.460$ nm	**148** 55 > 10 nm 14 > 20 nm Max 37 nm	**127** 68 > 10 nm 28 > 20 nm Max 63 nm
		92 37 > 10 nm 13 > 20 nm Max 76 nm	**120** 61 > 10 nm 26 > 20 nm 8 > 50 nm Max 119 nm
		72 34 > 10 nm 14 > 10 nm 5 > 50 nm Max 124	
35211	$20 \times 20\,\mu$m $Rq = 0.829$ nm; $Ra = 0.639$ nm $25 \times 25\,\mu$m $Rq = 1.036$ nm; $Ra = 0.732$ nm $25 \times 25\,\mu$m $Rq = 0.844$ nm; $Ra = 0.679$ nm	Отсутствуют	
33892	$10 \times 10\,\mu$m $Rq = 0.636$ nm; $Ra = 0.483$ nm $10 \times 10\,\mu$m $Rq = 0.755$ nm; $Ra = 0.490$ nm $10 \times 10\,\mu$m $Rq = 0.629$ nm; $Ra = 0.478$ nm	**47** 20 > 10 nm 9 > 20 nm Max 85 nm	**71** 38 > 10 nm 20 > 20 nm 7 > 50 nm Max 70 nm
		135 84 > 10 nm 48 > 20 nm 29 > 50 nm Max 131 nm	

подложек около 8 nm. Термохимический метод обработки приводит к образованию углублений. На основе анализа табличных данных можно сделать вывод, что шероховатость образцов, полированных термохимически, по площади изменяется незначительно. С другой стороны, количество и глубина углублений существенно варьируются. Это характерно не только для разных алмазных подложек, но и для одной и той же подложки. В литературе нет единого мнения насчет механизма образования углублений. В работе [12] авторы считают, что углубления образуются в результате травления газами, составляющими атмосферу, в которой проводится полировка (или остаточными газами в случае полировки в вакууме). Однако другие исследователи [19] связывают их образование с повышенной концентрацией металлов–катализаторов на некоторых участках. Следовательно, эти углубления могут образоваться по тому же механизму, который отвечает за полировку, но в их случае реакция продолжается независимо от контакта с полировальным диском, поэтому протекает дольше.

Заключение

В настоящей работе продемонстрировано влияние метода ТХП на качество поверхности монокристаллических алмазных подложек, а также впервые представлены профилограммы всей площади подложек после ТХП. Данные результаты показывают, что почти во всех случаях плоскостность алмазных пластин улучшается при ТХП, наиболее ровные пластины имеют на 80–90 % площади перепады высот не более 200 nm. Этот метод показал возможность эффективного удале-

ния/сглаживания штриховки, унаследованной от механической обработки с воспроизводимыми значениями параметров шероховатости поверхности Ra 0.5–0.7 nm. Однако параллельно с этим происходит формирование маленьких изометричных углублений, явных закономерностей в площадном распределении и глубине которых не обнаружено. Их количество положительно коррелирует со степенью однородности пластин, поэтому необходимы дальнейшие исследования для оптимизации параметров полировки.

Финансирование работы

Результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFZ-2022-0006).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Umezawa Hitoshi, Ikeda Kazuhiro, Kumaresan Ramanujam, Tatsumi Natsuo, Shikata Shin Ichi. IEEE Electron Device Lett., **30**, 960 (2009). DOI: 10.1109/ LED.2009.2026439
[2] Matsumoto Tsubasa, Yamakawa Tomoya, Kato Hiromitsu, Makino Toshiharu, Ogura Masahiko, Zhang Xufang, Inokuma Takao, Yamasaki Satoshi, Tokuda Norio. Appl. Phys. Lett., **119** (12), 242105 (2021). DOI: 10.1063/5.0075964
[3] R.S. Sussmann, C.S.J. Pickles, J.R. Brandon, J.H. Wort, S.E. Coe, A. Wasenczuk, C.N. Dodge, A.C. Beale, A.J. Krehan, P. Dor, A. Nucara, P. Calvani. Nouv. Cim. D., **20**, 503 (1998). DOI: 10.1007/BF03185545
[4] Y. Shvydko. *X-ray optics high energy resolution applications* (Springer, Berlin, 2004)
[5] C.S. Bodie, G. Lioliou, G. Lefeuvre, A.M. Barnett. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **989**, 164950 (2021). DOI: 10.1016/j.nima.2020.164950
[6] C.S. Bodie, G. Lioliou, G. Lefeuvre, A.M. Barnett. Appl. Radiat. Isotopes, **180**, 110027 (2022). DOI: 10.1016/j.apradiso.2021.110027
[7] C.S. Bodie, G. Lioliou, M.D.C. Whitaker, A.M. Barnett. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **1058**, 168882 (2024). DOI: 10.1016/j.nima.2023.168882
[8] А. Колядин, В. Лучинин, Ю. Ягудаев, О. Бохов, С. Ильин, И. Клепиков, А. Ножкина. Электроника: наука, технология, бизнес, **5**, 00216 (2022). DOI: 10.22184/1992-4178.2022.216.5.50.61
[9] Luo Hu, Ajmal Khan Muhammad, Liu Wang, Yamamura Kazuya, Deng Hui. Intern. J. Extreme Manufacturing, **3** (2), 022003 (2021). DOI: 10.1088/2631-7990/abe915
[10] Schuelke Thomas, A. Grotjohn Timothy. Diamond and Related Mater., **32**, 17 (2013). DOI: 10.1016/j.diamond.2012.11.007
[11] P. Grodzinski. *Diamond technology: production methods for diamond and gem stones* (N.A.G. Press, London, 1953)
[12] Tokura Hitoshi, Yang Cheng-Feng, Yoshikawa Masanori. Thin Solid Films, **212** (1), 49 (1992). DOI: 10.1016/0040-6090(92)90499-2
[13] A.D. Weima Jeffrey, R. Fahrner Wolfgang, Job Reinhart. J. Solid State Electrochem., **5**, 112 (2001). DOI: 10.1007/S100080000118
[14] A.M. Zaitsev, G. Kosaca, B. Richarz, V. Raiko, R. Job, T. Fries, W.R. Fahrner. Diamond and Related Mater., **7** (8), 1108 (1998). DOI: 10.1016/S0925-9635(98)00158-7
[15] А.А. Алтухов, А.В. Митенкин, Т.Б. Теплова, М.А. Доронин. Научный вестник Московского гос. горного ун-та, **7**, 3 (2013).
[16] Sung Chien-Min, Tai Ming-Fong. Intern. J. Refractory Metals and Hard Mater., **15** (4), 237 (1997). DOI: 10.1016/S0263-4368(97)00003-6
[17] A.P. Malshe, B.S. Park, W.D. Brown, H.A. Naseem. Diamond and Related Mater., **8** (7), 1198 (1999). DOI: 10.1016/S0263-4368(97)00003-6
[18] Sakauchi Kazuto, Nagai Masatsugu, Tabakoya Taira, Yuto Nakamura, Satoshi Yamasaki, C.E. Nebel, Xufang Zhang, Tsubasa Matsumoto, Takao Inokuma, Norio Tokuda. Diamond and Related Mater., **116**, 108390 (2021). DOI: 10.1016/j.diamond.2021.108390
[19] C.F. Hickey, T.P. Thorpe, A.A. Morrish, J.E. Butler, C. Vold, K.A. Snail. SPIE, **1534**, 67 (1991). DOI: 10.1117/12.48281