

# Исследование процессов обработки

УДК 621.891:681.7:539.621

**В. В. Рогов, В. Н. Ткач, Н. Д. Рублев, А. В. Троян,  
В. Н. Попельнюк** (г. Киев)

## **Исследование состояния поверхностей деталей из сапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) после их финишной обработки**

*С использованием современных средств измерений элементов состояния поверхностного слоя (шероховатости  $R_{\text{max}}$  и глубины нарушенного слоя  $F$ ) приведены результаты экспериментальных исследований деталей из сапфира после их финишной обработки. Установлены факторы, влияющие на указанные параметры в процессе обработки и соотношение между ними, позволяющие производить расчет пооперационных припусков на обработку детали и построение ее технологии, обеспечивающей наивысшие оптические требования.*

**Ключевые слова:** *поверхностный слой, шероховатость, глубина нарушенного слоя, прецизионная обработка, полирование, оптические требования.*

Уникальные свойства синтетического сапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) сделали его перспективным конструкционным материалом для производства деталей оптических систем и электронной техники, в частности, светотехники XXI века (замена ламп накаливания и люминесцентных светодиодными излучателями) и одновременно определили и новый уровень требований к состоянию функциональных поверхностей указанных деталей (шероховатости  $R_a$ , классу  $P$  оптической чистоты, структуре реального поверхностного и глубине  $F$  нарушенного слоев). Эти требования —  $R_a \leq 0,3$  нм ( $\leq 3$  Å),  $P$  0—10 (наивысший класс оптической чистоты по ГОСТ 11140—76),  $F \leq 1$  нм — могут быть обеспечены только высоким уровнем оснащения и совершенством технологии обработки таких деталей. В результате комплекса научно-исследовательских работ, выполненных Институтом сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины за последние годы, имеются значительные наработки по созданию технологии финишной прецизионной обработки деталей из сапфира, обеспечивающей уровень вышеуказанных требований [1—4]. Дальнейшим развитием этих работ являются исследования и оценка состояния поверхностного слоя деталей в зависимости от характеристики обрабатывающего инструмента и условий финишной обработки им. С этой

© В. В. РОГОВ, В. Н. ТКАЧ, Н. Д. РУБЛЕВ, А. В. ТРОЯН, **В. Н. ПОПЕЛЬНЮК** 2008

целью в ИСМ НАН Украины были проведены исследования на образцах сапфира размером  $\varnothing 20 \times 10$  мм с кристаллографической ориентацией обрабатываемой плоскости (0001) производства Института монокристаллов НАН Украины, г. Харьков. Указанные образцы обрабатывали по технологии ИСМ НАН Украины. После каждой операции обработки оценивали шероховатость обработанной поверхности по параметрам  $Ra$  и  $Rmax$ , мкм, глубину нарушенного слоя  $F$ , мкм, а также характер нарушений поверхностного слоя. Измерение шероховатости поверхности и оценку характера нарушений поверхностного слоя производили с помощью атомно-силового микроскопа “Nano Scope IIIa”. Измерение глубины нарушенного слоя образцов сапфира после операций доводочного шлифования, алмазного и трибохимического полирования производили с помощью детектора упруго-отраженных электронов “HKL Channel-5” (приставки к электронному микроскопу “Zeis-50”) методом дифракции отраженных электронов, наблюдая линии Кикучи, видимые на глубине нарушенного слоя до  $\sim 250$  нм с точностью  $\pm 10$  %.

Результаты исследований представлены в таблице и на рис. 1—2.

### Состояние поверхности образцов сапфира после различных операций обработки

Образец	Технологическая операция обработки	Марка и зернистость алмазного порошка в инструменте или суспензии	Условия взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала*		Шероховатость обработанной поверхности**		Глубина нарушенного слоя $F$ , мкм	Линии Кикучи	Фактура обработанной поверхности при $\times 10000$
			Скорость перемещения час-тиц, м/с	$f$ , Н/зерно	$Ra$ , мкм	$Rmax$ , мкм			
1	Грубое шлифование	АС 20 80/63 в связке инструмента	35,8	—	0,285	1,425	9—11 ( $7Rmax$ )	Не обнаружены	Ровная матовая грубозернистая
2	Тонкое шлифование	АСМ 28/20 в суспензии на твердом шлифовальном инструменте	0,785	$4,55 \cdot 10^{-5}$	0,120	0,600	4—5 ( $7,5Rmax$ )	То же	Ровная матовая
3	Доводочное шлифование	АСМ 10/7 в суспензии на эластичном шлифовальном инструменте		$1,72 \cdot 10^{-5}$	0,005	0,084	0,25 ( $3Rmax$ )	Сильно размыты и не индексируются	Не классифицируется (рис. 1)

(Продолжение)

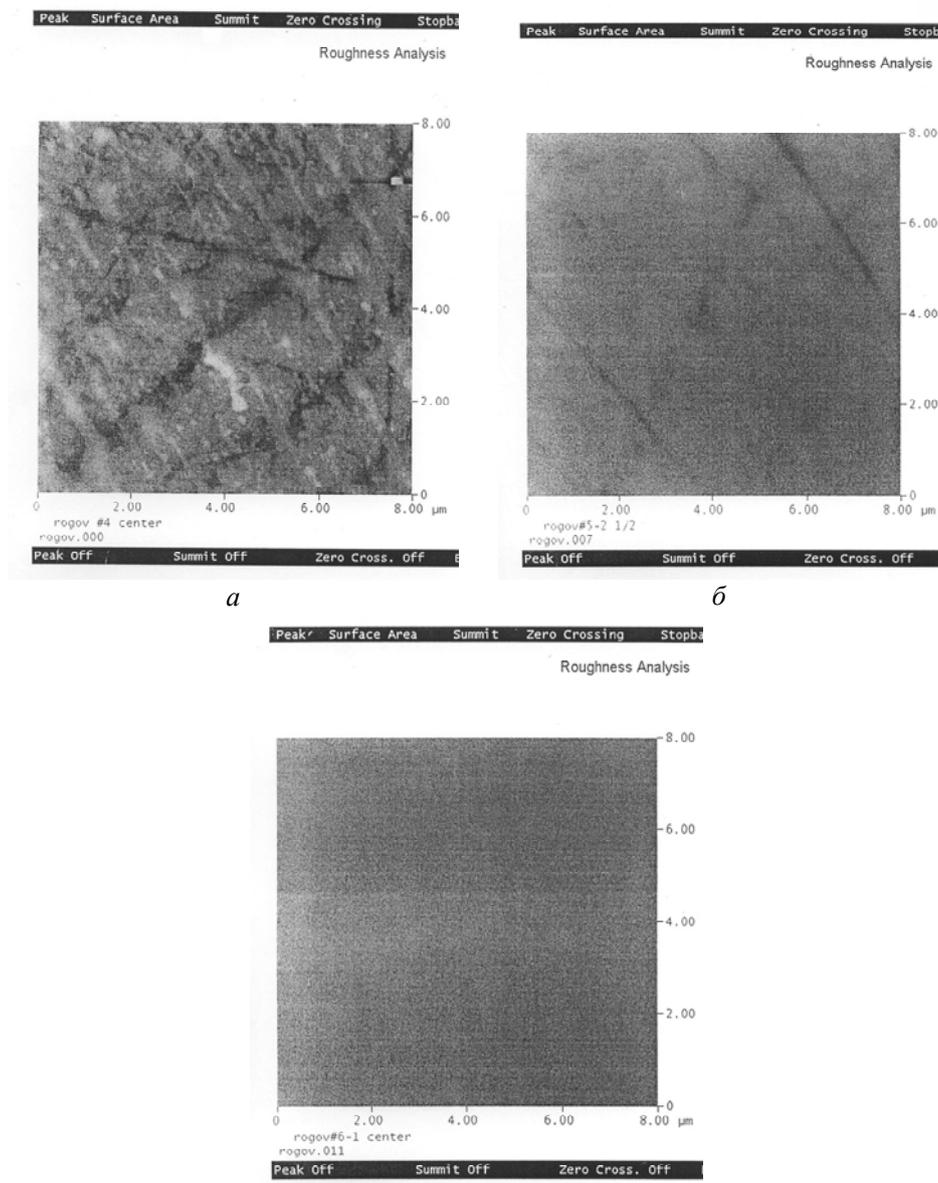
4	Алмазное полировальное	АСМ 2/1 в суспензии на мягком полировальном инструменте	$6,43 \cdot 10^{-7}$	0,002	0,027	0,13 (4,8Rmax)	Резкие	Не классифицируется (рис. 2)
5	Трибохимическое полирование	NALCO-2354 в полировальном составе на мягком полировальном инструменте	—	0,0003	0,0135	0,06 (4,4Rmax)	Наиболее четкие	P 0—10 (рис. 3)

\* Определены расчетом.

\*\* Средняя по трем измеренным точкам образца.

Как следует из приведенных данных, шероховатость обработанных поверхностей снижается, а фактура и чистота их улучшается по мере уменьшения зернистости алмазных порошков в инструменте или суспензии (75 % этиленгликоля + 25 % глицерина), а также при переходе от твердых шлифовальных инструментов (в том числе на металлической связке) на операциях грубого и тонкого шлифования к эластичным и мягким полировальным инструментам из полиуретана и замши на заключительных операциях обработки и соответственно от алмазно-абразивного резания к трибохимическому взаимодействию полировального состава NALCO-2354 с сапфиром при снятии припусков. При этом достигается наименьшая шероховатость обработанной поверхности  $Ra \leq 0,3$  нм (3 Å) и наивысший класс оптической чистоты P 0—10, когда при увеличении 10000 (см. рис. 1) не видно никаких следов обработки и дефектов поверхности. Из воздействующих на указанные закономерности факторов (условий) следует также отметить соответствующее снижение нормальной силы  $f = P_n/\text{зерно}$ , Н/зерно, действующей на зерно по мере уменьшения его размера. Идентично указанным изменениям шероховатости обработанной поверхности уменьшается и глубина нарушенного обработкой поверхностного слоя (см. рис. 2). При использовании метода дифракции электронов линии Кикучи, характеризующие глубину нарушенного слоя, обнаружены только на образцах 3—5 (см. таблицу), т. е. после доводочного шлифования, алмазного и трибохимического полирования (рис. 3). На образце 3 они сильно размыты и их индексирование невозможно. На этой же диаграмме имеются слабоконтрастные рефлексы в виде колец (гало), которые характеризуют полностью разрушенную кристаллическую решетку данного образца. Линии дифракции на диаграмме образца 4 более резкие, гало не наблюдается. Наиболее четкие линии Кикучи присутствуют на диаграмме образца 5, т. е. после трибохимического полирования. На этой диаграмме выполнено индексирование указанных линий и определена глубина нарушенного слоя на уровне 60 нм.

Контраст линий образца 5 близок к контрасту линий образца 4, однако полуширина линий у последнего в два раза больше, в связи с чем глубину его нарушенного слоя можно оценить в 130 нм, а у образца 3 — в 250 нм. Из-за



б

Рис. 1. Фрагменты поверхности образцов 3, 4 и 5 сапфира после доводочного алмазного шлифования (а), алмазного полирования (б) и трибохимического полирования ( $R_a = 0,302$  нм,  $R_{max} = 3000$  нм) (в) соответственно;  $\times 10000$ .

значительной шероховатости поверхности и, соответственно, глубины нарушенного слоя у образцов 1 и 2 обнаружение линий Кикучи по их диаграммам невозможно. Поэтому  $F$  на этих образцах определяли методом “косого шлифа” (см. таблицу) с точностью  $\pm 30\%$  [5]. Полученные результаты по глубине нарушенного слоя и условиям, влияющим на нее, имеют прикладное значение при расчете припусков на обработку различных деталей из сапфира и рациональном построении ее технологии. Учитывая, что современная наука, техника и производство располагают новейшими высокоточными средствами измерений параметров шероховатости обработанных поверхностей деталей с

высокой разрешающей способностью, а средств для измерения  $F$  такого уровня нет, в практике пользуются обычно соотношениями  $F/R_{\max}$  или  $F/R_z$ . В результате проведенных исследований установлено (см. таблицу), что

$$F/R_{\max} = 7,5—3,0, \quad (1)$$

при этом наибольшее (7,5—7,0) значение отношения — на образцах после грубого и тонкого шлифования. По данным других авторов это соотношение имеет другие значения. По [6] нарушенный слой, определенный рентгеновским методом на образцах сапфира после обработки на медном полировальном инструменте суспензией на основе алмазного микропорошка марки АСМ 3/2, равен  $\sim 19R_z$  или  $13R_{\max}$ , а после химико-механического полирования смесью коллоидного кремнезема с тем же алмазным микропорошком  $F = 0,05$  мкм,  $R_z = 0,05$  мкм, а  $F = R_z$ . По [7] шероховатость  $R_z \approx 0,01$  мкм и  $F$  — не более 2 мкм ( $200R_z$ ) имели образцы монокорунда после доводки их поверхности аэросилом на электростатической замше и последующем полировании в расплаве буры при  $1000^\circ\text{C}$ .

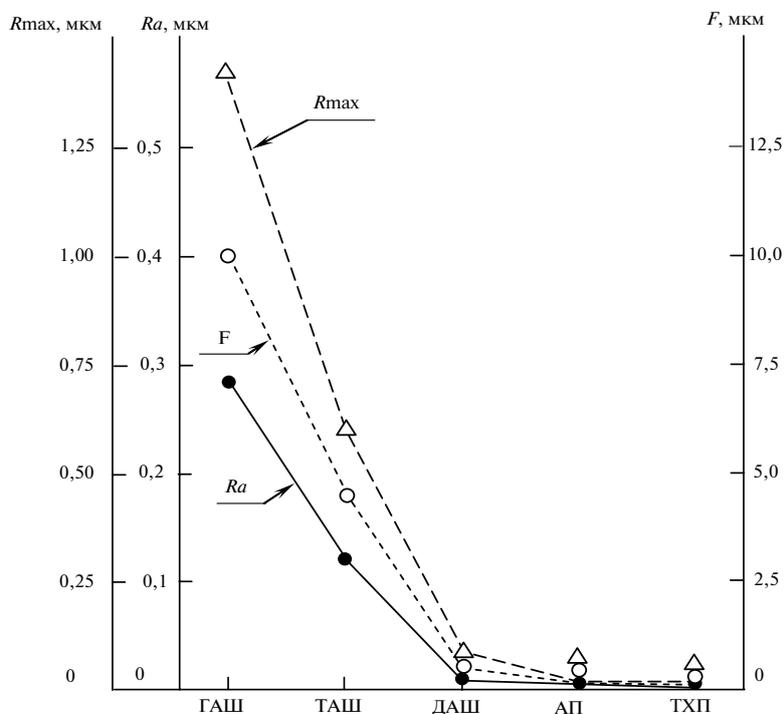


Рис. 2. Состояние поверхности образцов сапфира после операций обработки: грубого (ГАШ), тонкого (ТАШ), доводочного (ДАШ) алмазного шлифования; алмазного (АП) и трихимического (ТХП) полирования.

По данным авторов [8], полученным по электронограммам, снятым с поверхности образцов сапфира (0001), обработанных алмазными порошками различных зернистостей с последующим удалением разрушенного слоя трибохимическим полированием, значения  $F$  ( $l_0$ ) [8] выглядят нижеследующим образом: после шлифования алмазными микропорошками марок АМ 14/10, АМ 7/5 —  $R_a = 0,32$  мкм,  $R_z = 1,6$  мкм,  $F = 30$  мкм ( $18,75R_z$ ); после шлифования кругом с алмазами марки АМ 5/3 —  $R_a = 0,1$  мкм,  $R_z = 0,5$  мкм,  $F = 20—25$  мкм ( $(40—50)R_z$ ); после шлифования кругом с алмазами марки АМ 1/0 —



от зернистости абразивов и условий обработки на той или иной технологической операции, получить ориентировочную величину нарушенного слоя для этих условий и использовать ее, с учетом выбора наибольшего значения  $R_{max}$  при замере ее в разных точках поверхности образца, при расчете припусков на обработку и построении ее технологии.

С целью экспериментальной проверки правильности ориентации на соотношение (1)  $F \approx (7,5—3,0)R_{max}$  и в соответствии с ним были рассчитаны пооперационные припуски и произведена повторная обработка тех же образцов сапфира. В результате было установлено, что для получения поверхности с  $Ra \approx 0,0003$  мкм,  $R_{max} \approx 0,01$ ,  $P_0—10$  и  $F \approx 0,06—0,04$  нм (см. рис. 4, 5) необходимо значения припусков, рассчитанных исходя из  $F = (7,5—3,0)R_{max}$ , удвоить, т. е. ориентироваться на  $F = (15—6)R_{max}$ .

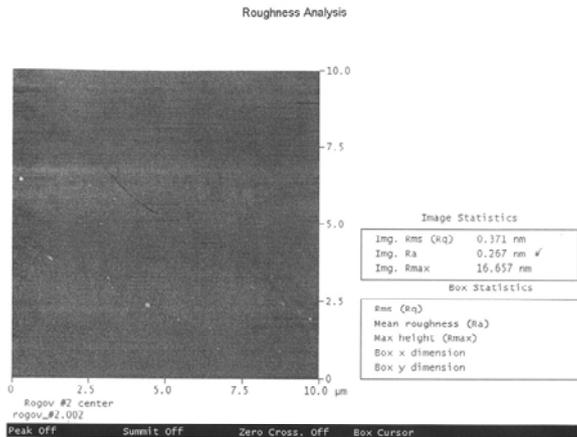


Рис. 4. Фрагмент поверхности образца 5 сапфира после операции трибохимического полирования (повторная обработка с операционными припусками исходя из  $F = (15—6)R_{max}$ );  $\times 10000$ .

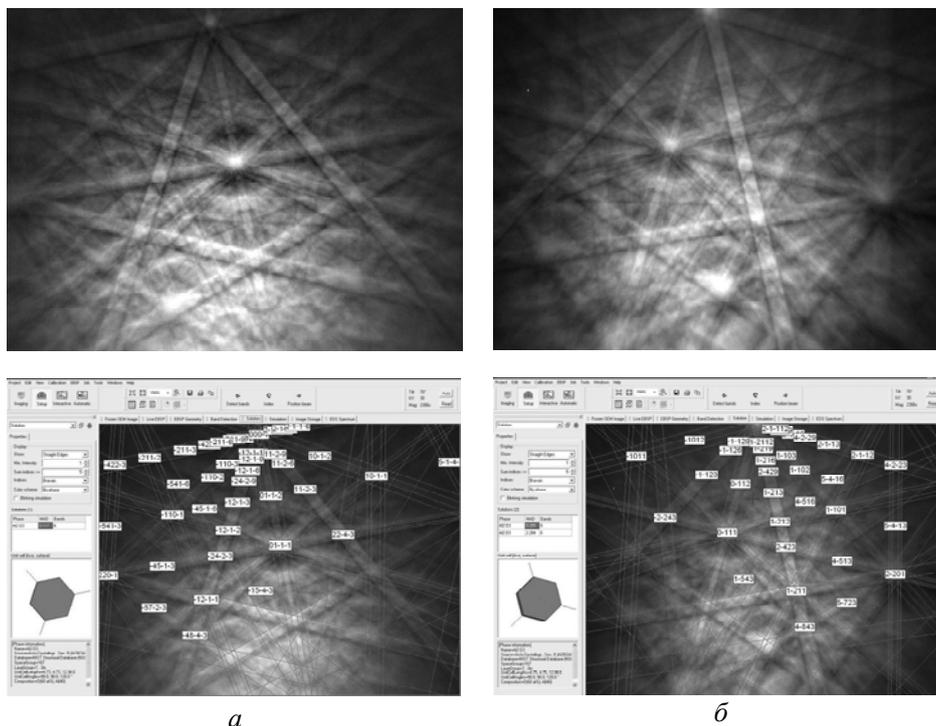


Рис. 5. Диаграмма Кикучи от поверхности образца 2 (нарушенный слой — 0,04 мкм (40 нм)) (а) и от поверхности того же образца после повторной обработки (нарушенный слой — 0,05 мкм (50 нм)) (б).

Указанное говорит о том, что для объективной оценки глубины нарушенного поверхностного слоя после алмазно-абразивной обработки необходимо располагать не только точными данными о состоянии рельефного слоя  $R_{\max}$ , но точно знать и глубины трещиноватого и дислокационных скоплений слоев, т. е. располагать более совершенными средствами их измерений.

1. *Рогов В. В., Рублев М. Д., Троян А. В., Попельнюк В. Н.* Развитие технологии финишной, прецизионной обработки функциональных поверхностей оптических и электронных деталей из синтетического монокорунда // *Сверхтв. материалы.* — 2002. — № 5. — С. 83—87.
2. *Деклараційний пат. 48581А Україна, МПК<sup>7</sup> В 24 В 1/00, В 24 D 3/34.* Спосіб фінішної, прецизійної обробки деталей з монокорунду і полірувальний інструмент // В. В. Рогов, М. Д. Рублев, О. В. Троян, Т. Л. Кротенко. — Оpubл. 15.08.02, Бюл. № 8.
3. *Деклараційний пат. 7397 Україна, МПК<sup>7</sup> В 24 В 1/00.* Спосіб фінішної обробки пластин з монокорунду (сапфіру) // В. В. Рогов, О. В. Троян, М. Д. Рублев, В. М. Попельнюк. — Оpubл. 15.06.05, Бюл. № 6.
4. *Новиков Н. В., Рогов В. В.* Инновационная технология финишной обработки элементов микроэлектроники и электронной светотехники XXI века из сапфира ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) // *Інструментальний світ.* — 2005. — № 1(25). — С. 10—11.
5. *Татаренков А. И., Епифанова К. Л., Русак Т. Ф., Гриднев В. Н.* Методы контроля нарушенных слоев при механической обработке монокристаллов. — М.: Энергия, 1978. — 64 с.
6. *Рогов Вл. В.* Разработка процессов механической и химико-механической обработки пластин арсенида галлия, кремния, сапфира, керамики для полупроводниковых приборов и интегральных схем. — Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: НИИ "Пульсар", 1992. — 71 с.
7. *Довгань М. Е., Зайцева В. И., Шахнович М. И.* Влияние способа полировки на состояние поверхности и прозрачность монокристаллического корунда // *Физика и химия обработки материалов.* — 1976. — № 4. — С. 146—149.
8. *Добровинская Е. Р., Литвинов Л. А., Пищак В. В.* Энциклопедия сапфира. — Харьков: Ин-т монокристаллов НАН Украины, 2004. — 508 с.

Ин-т сверхтвердых материалов  
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 17.12.07