

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Е.Б. Шершневу, А.Н. Купо

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

OPTIMIZATION OF BRITTLE NON-METALLIC MATERIALS PROCESSING IN THE PRODUCTION OF ELECTRONIC PRODUCTS

E.B. Shershnev, A.N. Kupo

Francisk Skorina Gomel State University

Аннотация. Предложена методика расчёта и определены оптимальные параметры обработки твёрдых неметаллических материалов, которые нашли своё применение в электронной технике. Показано, что предложенная методика позволяет оптимизировать обработку таких материалов, как кремний, германий, арсенид галлия, кварцевое стекло, природный и синтетический алмаз. При расчёте оптимальных параметров обработки используются значения физико-механических свойств указанных материалов. Полученные результаты могут быть использованы при определении технологических параметров процессов обработки твёрдых хрупких неметаллических материалов в электронике.

Ключевые слова: оптимизация процессов, твёрдые хрупкие материалы, изделия и компоненты электроники.

Для цитирования: Шершневу, Е.Б. Оптимизация процессов обработки хрупких неметаллических материалов в производстве изделий электронной техники / Е.Б. Шершневу, А.Н. Купо // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 2 (63). – С. 84–90. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_2_63_84. – EDN: KTINLJ

Abstract. The paper proposes a calculation method and determines the optimal parameters for processing hard non-metallic materials, which have found their application in electronic engineering. It is shown that the proposed method makes it possible to optimize the processing of such materials as silicon, germanium, gallium arsenide, quartz glass, natural and synthetic diamond. When calculating the optimal processing parameters, the values of the physical and mechanical properties of these materials are used. The results obtained can be used to determine the technological parameters of hard brittle non-metallic materials processing in electronics.

Keywords: process optimization, hard brittle materials, electronic products and components.

For citation: Shershnev, E.B. Optimization of brittle non-metallic materials processing in the production of electronic products / E.B. Shershnev, A.N. Kupo // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2025. – № 2 (63). – P. 84–90. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_2_63_84 (in Russian). – EDN: KTINLJ

Введение

В настоящее время одним из материалов, применяемых в резонаторах и фототаблонах для субмикронных интегральных микросхем, является кристаллический и аморфный кварц. Это обусловлено тем, что кварц обладает широкой спектральной областью прозрачности, низким коэффициентом линейного температурного расширения $0,54 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и высокой теплопроводностью $1,38 \text{ Вт/(м·К)}$. При производстве интегральных микросхем по нормам проектирования меньше 10^{-6} м чистота кварцевых фототаблонов определяет качество полученных изделий микроэлектроники [1].

Алмаз используется в качестве теплоотводящих оснований для изделий высокотемпературной электронной техники, преобразователей УФ-излучения, подложки для эпитаксиального наращивания полупроводниковых монокристаллических алмазных слоёв для СВЧ-транзисторов,

оптических окон для источников мощного излучения, акустоэлектронных устройств [2].

В устройствах отображения информации на основе жидкокристаллических экранов и электронно-оптических систем, формирования прецизионного зазора и изготовление компонент электронной техники из сверхтвёрдых неметаллических материалов, таких как аморфный и кристаллический кварц, природный и синтетический алмаз с высокой производительностью и точностью является актуальной задачей [3]–[5].

1 Расчет оптимального технологического процесса

Технологический процесс обработки сверхтвёрдых хрупких неметаллических материалов строится на основе эмпирических данных, при этом на разных производствах при одних и тех же требованиях к изделию технологические операции значительно отличаются между собой по

числу необходимых действий и длительности обработки.

Предлагается методика для расчёта зависимостей оптимального числа операций n , минимального основного времени обработки T_{min} и времени обработки T_n для числа операций:

$$n = 2,3 \lg \frac{R_{z_0}}{R_{z_n}}, \quad (1.1)$$

$$T_{min} = 2,72n\gamma, \quad (1.2)$$

$$T_n = n\gamma \left(\frac{R_{z_0}}{R_{z_n}} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (1.3)$$

где R_{z_0} , R_{z_n} – шероховатость поверхности до и после обработки, мкм; $\gamma = \frac{k\beta}{\alpha}$, при этом коэф-

фициенты k , β и α взяты из следующих зависимостей: $F = kR_z$, $v = \alpha D$ и $R_z = \beta D$ (F – глубина нарушенного слоя, мкм; v – скорость съёма материала, мкм/мин; D – зернистость абразивного материала, мкм).

Однако формулы (1.1)–(1.3) не учитывают влияния свойств обрабатываемого материала на процесс обработки.

Можно полагать, что производительность обработки Q и шероховатость поверхности R зависят от физико-механических свойств обрабатываемого материала, таких как микротвердость, микропрочность на отрыв и модуль упругости или модуль сдвига в зависимости от направления обработки:

$$Q = k_2 H^{-2}, \quad (1.4)$$

$$Q = k_3 R^{-\frac{3}{2}}, \quad (1.5)$$

$$R_z = k'_2 H^{\frac{2}{3}}, \quad (1.6)$$

$$R_z = k'_3 H^{-\frac{1}{2}}, \quad (1.7)$$

$$Q = k_5 \frac{\mu\rho(1+\mu)}{E} = k_5 \frac{\mu\rho}{2G}, \quad (1.8)$$

$$R_z = k'_5 \left[\frac{\mu\rho(1+\mu)}{E} \right]^{\frac{1}{3}} = k'_5 \left(\frac{\mu\rho}{2G} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1.9)$$

где H – микротвердость, R – микропрочность на отрыв, μ – коэффициент Пуассона, ρ – плотность, E – модуль упругости, G – модуль сдвига, k_2 , k'_2 , k'_3 – эмпирические коэффициенты.

С увеличением микротвердости, микропрочности на отрыв и модуля упругости (модуля сдвига) производительность процесса снижается и снижается шероховатость обработанной поверхности. Следовательно, технологический процесс обработки материала, имеющего максимальные значения H , R и E (G) (таким материалом является алмаз), обеспечивает минимальный съём материала и получение минимальной

шероховатости поверхности. При расчёте технологического процесса обработки других твердых хрупких материалов в формулы (1.1) и (1.3) необходимо ввести коэффициент λ , учитывающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала (по отношению к алмазу).

Значение коэффициента λ можно определить из зависимости:

$$\lambda = \frac{R_{Z(ал)}}{R_{Z(м)}}, \quad (1.10)$$

где $R_{Z(ал)}$ и $R_{Z(м)}$ – шероховатости поверхности алмаза и сопоставляемого материала при одинаковых условиях обработки.

На основании формул (1.4)–(1.9) зависимость (1.10) можно записать в следующем виде:

$$\lambda_H = \left(\frac{H_m}{H_{ал}} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1.11)$$

$$\lambda_R = \left(\frac{R_m}{R_{ал}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.12)$$

$$\lambda_{E(G)} = \left[\frac{\mu_{ал}\rho_{ал}(1+\mu_{ал})E_m}{\mu_m\rho_m(1+\mu_{ал})E_{ал}} \right]^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\mu_{ал}\rho_{ал}G_m}{\mu_m\rho_mG_{ал}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1.13)$$

где λ_H , λ_R , $\lambda_{E(G)}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на шероховатость обработанной поверхности её физико-механических свойств.

На основании сопоставления предварительных расчетов с экспериментальными данными по обработке некоторых твердых хрупких материалов коэффициент λ , в комплексе учитывающий влияние основных физико-механических свойств на шероховатость, был определен в следующем виде:

$$\lambda = (\lambda_H \lambda_R \lambda_{E(G)})^{\frac{1}{3}}. \quad (1.14)$$

В этом случае формулы (1.1) и (1.3) примут вид:

$$n = 2,3 \lg \left(\lambda \frac{R_{z_0}}{R_{z_n}} \right), \quad (1.15)$$

$$T_n = n\gamma \left(\lambda \frac{R_{z_0}}{R_{z_n}} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (1.16)$$

Значения коэффициентов λ_H , λ_R , $\lambda_{E(G)}$ и комплексного коэффициента λ для некоторых твердых хрупких материалов приведены в таблице 1.1.

С помощью полученных зависимостей можно рассчитать параметры и результаты выполнения технологических процессов обработки твердых хрупких неметаллических материалов. Исходные данные для определения числа операций и времени обработки приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.1 – Значения физико-механических свойств неметаллических материалов, используемых в микроэлектронике

Материал	H , кгс/мм ²	λ_H	R , кгс/мм ²	λ_R	E , кгс/мм ²	μ	ρ , г/см ³	$\lambda_{E(G)}$	λ
Алмаз	10000	1,00	1800*	1,00	90000	0,25	3,5	1,00	1,00
Монокорунд	2300	0,38	1040	0,76	45000	0,20	3,9	0,83	0,62
Кремний	1050	0,21	400	0,47	15000	0,27	2,4	0,60	0,39
Германий	900	0,20	170	0,31	16000	0,25	5,4	0,49	0,31
Кварцевое стекло	800	0,19	350	0,44	7100	0,14	2,2	0,64	0,38
Арсенид галлия	715	0,17	189	0,32	9100	0,29	5,4	0,38	0,27

Таблица 1.2 – Оптимальные параметры технологических процессов обработки твердых хрупких материалов, используемых в микроэлектронике

Материал	R_{z_0} , мкм	R_{z_n} , мкм	$n_{расч}$	$n_{оптимальное}$	$T_{min}\gamma$	$T_2\gamma$	$T_3\gamma$	$\frac{T_2}{T_{min}}$, %	$\frac{T_3}{T_{min}}$, %
Монокорунд	3,2	0,05	3,68	4	10,88	12,60	10,23	116	94
	2,5	0,05	3,43			11,14	9,42	102	87
	2,5	0,04	3,66			12,45	10,15	114	93
Кремний	2,5	0,032	3,42	3	8,16	11,04	–	135	–
	2,0	0,032	3,19			9,87		121	
	2,5	0,05	2,97			8,83		108	
	2,0	0,05	2,74			7,90		97	
Германий	2,0*	0,05	2,51	3	8,16	7,04	–	86	–
	2,0	0,032	2,96			8,80		107	
	2,5*	0,05	2,74			7,87		96	
	2,5	0,032	3,18			9,84		121	
Кварцевое стекло	3,2	0,05	3,19	3	8,16	9,86	–	121	–
	2,5	0,032	3,39			10,90		134	
	2,5	0,05	2,94			8,71		106	
Арсенид галлия	1,6	0,05	2,15	2	5,44	–	–	–	–
	2,0	0,05	2,37						
	1,6	0,032	2,60	3	8,16	8,21	–	101	–
	2,0	0,032	2,83						

Число операций для приведенных в таблице 1.2 значений R_{z_0} и R_{z_n} можно определить по формуле (1.15) и, округлив расчетные значения $n_{расч}$, получить оптимальное число операций $n_{оптимальное}$.

Поверхность, отвечающую заданным требованиям, можно получить при большем или меньшем числе операций. Время обработки при таком технологическом процессе, рассчитанное по формуле (1.16), приведено в столбце для $T_2\gamma$ и $T_3\gamma$ (см. таблицу 1.2).

Из полученных данных можно заключить, что при обработке, например, монокорунда оптимальным следует считать трехоперационный ($n = 3$) процесс. Оптимальным для случая обработки арсенида галлия является технологический процесс в две операции; для кремния, германия и кварцевого стекла – трехоперационный. Однако при некоторых исходных значениях шероховатости для кремния и германия оптимальным будет

двухоперационный процесс. На ряде предприятий электронной промышленности при изготовлении кремниевых пластин успешно применяют трехоперационный технологический процесс вместо процесса в пять-шесть операций, использовавшегося ранее, причем для обработки нерабочей стороны, шероховатость которой должна соответствовать $R_z = 0,1$, применяют процесс в две операции.

Следует отметить, что при выбранном оптимальном числе операций иногда бывает целесообразным переход к технологическому процессу с меньшим числом операций, так как, несмотря на некоторое увеличение основного (машинного) времени, оперативное время обработки снижается за счет сокращения вспомогательного времени, затрачиваемого при переходе от одной операции к другой. Например, на финишных операциях вспомогательное время при подготовке смоляных полировальников или доведении полировальника по плоскостности значительно

превосходит время обработки на предварительных операциях. Поэтому в каждом конкретном случае при выборе числа операций, отличающихся от оптимального технологического процесса, необходимо проведение технико-экономического анализа.

Рассчитаны и внедрены в производство процессы обработки кварцевого стекла. Предложенная методика расчета оптимального числа операций дает возможность значительно снизить себестоимость обработки хрупких материалов [6], [7].

2 Технологические процессы изнашивания синтетического алмаза

В процессе исследования зависимости изнашивания поверхности синтетических алмазов от шероховатости поверхности алмазного инструмента установлена динамика изменения режущего рельефа органичного диска путем периодического профилографирования в процессе обработки. В качестве исследуемого алмазного инструмента использовали гальванические ограничные диски с алмазосодержащими слоями.

Процессы контактного взаимодействия шлифуемого искусственного алмаза и ограниченного инструмента зависят от характера распределения неровностей рабочей поверхности последнего [8], [9]. Это распределение можно описать рядом параметров (R_a , R_q , γ и др.).

Наиболее функциональным является геометрическая характеристика шероховатости поверхности среднеарифметическое отклонение R_a . Экспериментально установлено, что наибольшая интенсивность изнашивания искусственного алмаза соответствует такой стадии подготовки абразивной поверхности алмазного инструмента, когда контактирующее алмазосодержащее покрытие рабочего полотна диска после укатки характеризуется $R_a = 0,158$ мкм.

Для реализации высокой интенсивности изнашивания монокристаллов искусственного алмаза, обрабатываемых ограничными дисками с различными алмазосодержащими покрытиями, необходима технологическая операция их укатки. Для укатки применялся поликристалл на металлической связке. Исследовали зависимость характеристик изнашивания искусственного алмаза от марки алмазного порошка и усилия в контакте монокристалл-инструмент. Механизм изнашивания искусственного алмаза базируется на сочетании взаимосвязанных физико-химических и термических процессов [10], протекающих в тонком поверхностном слое обрабатываемого монокристалла под действием температурно-силового фактора. О преобладании влияния того или иного процесса на изнашивание искусственного алмаза можно судить только в реальных технологических условиях его обработки.

В процессе экспериментальных исследований зависимости характеристик изнашивания искусственного алмаза от марки алмазного порошка при разных удельных давлениях на кристалл применяли алмазные синтетические порошки АСН 7 / 5, АСН 10 / 7, АСН 20 / 14, АСН 28 / 20. Их концентрация в покрытии на диске составляла 0,0028 кар/см² для каждой исследуемой марки. Образцы монокристаллов ориентировали в плоскости октаэдра. Усилие на заготовку искусственного алмаза равнялось 0,98–3,43 МПа, частота вращения ограничного диска – 3500–4000 об/мин.

В результате исследований установлено, что для обработки плоских поверхностей искусственного алмаза оптимальным для применения является чугунный ограничный диск, укатанный с двойным алмазосодержащим слоем: первый слой – порошок АСН 14 / 10, зарощенный Ni, второй алмазосодержащий слой с порошком АСН 10 / 7, зарощенный Fe. Для повышения работоспособности алмазного инструмента в режиме полирования плоских поверхностей искусственного алмаза предложен способ подготовки рабочей поверхности ограничного диска, заключающийся в повторном нанесении на алмазосодержащее покрытие равномерного слоя пасты алмазной металлзированной марки ПОМ АСМ 7 / 5 или АСМ 5 / 3. Полирующая способность ограничного алмазного инструмента возникает в результате образования на алмазных зернах площадок износа и сохраняется до тех пор, пока размер их не превышает 3 мкм в поперечнике. При отсутствии повторно нанесенных алмазных субмикropорошков площадка износа на микropорошках значительно увеличивается, соответственно этому возрастает глубина рисков обрабатываемой поверхности. Наличие алмазной пасты способствует более длительному сохранению полирующей способности ограничного алмазного инструмента.

Методом плоского шлифования и полирования поверхности изготавливаются следующие виды инструмента: иглы из алмаза в виде четырехгранной пирамиды для правки абразивных кругов; резцы для скрайбирования; наконечник пирамидальный для определения твердости по методу Виккерса.

Процесс изнашивания цилиндрических и конических поверхностей на монокристаллах искусственного алмаза имеет отличительные особенности по сравнению с процессом изнашивания его плоских поверхностей. Это прежде всего наличие на обрабатываемой поверхности кристаллографических плоскостей с различными физико-механическими свойствами. Кроме того, если при изнашивании плоских поверхностей искусственного алмаза необходимо получение шероховатости высокого класса, то для цилиндрических достаточно обеспечить шероховатость поверхности $R_a = 0,6$ –1,25 мкм.

Теоретические исследования взаимодействия алмазного инструмента с монокристаллом синтетического алмаза показали, что на контролируемых поверхностях обрабатываемого кристалла и алмазного инструмента под действием приложенной нагрузки возникают контактные напряжения и, если их значения превышают прочность алмаза, происходит его разрушение, т. е. изнашивание.

При этом следует учитывать, что вероятность разрушения хрупких кристаллических тел в том или ином направлении определяется наиболее благоприятным сочетанием плотности их кристаллографических сеток, межплоскостного расстояния и количества разрываемых межатомных связей на единицу поперечного сечения.

Исследовался механизм износа искусственного алмаза при шлифовании различным алмазным инструментом.

Объектами исследования служили монокристаллы искусственного алмаза. В качестве инструмента применяли алмазные круги формы А1 диаметром 250 мм на металлической (система Cu-Sn) и органической связках. Размер зерен алмазного синтетического порошка составлял 63–40, 80–63 мкм. Режимы обработки – линейная скорость шлифования 1–2 м/с, ток травления для кругов на металлической связке 2,0–3,0 А для заготовок диаметром 3–4,5 мм. Для сравнения морфологии обрабатываемых поверхностей осуществляли шлифование инструментом на металлической связке (Cu – Sn) с электрохимическим восстановлением (растворением) профиля. После обработок исследовали морфологии поверхности монокристалла искусственного алмаза инструментом на металлической связке (максимальная скорость растворения 160–170 мкм/час, зерно АС-6, 80–63 мкм). Морфология поверхности представляет собой рельеф из параллельно расположенных углублений (царапин) длиной 1–3 мм, глубиной 15–30 мкм, шириной 7–40 мкм. Микрорельеф такой поверхности представлен кратерами размерами 8–2 мкм, глубиной 1–4 мкм. При снижении интенсивности растворения металлической связки происходит изменение морфологии поверхности кристалла – грубый, глубокий рельеф сглаживается. На фоне сглаженного рельефа появляются острые царапины, узкие в начале и расширяющиеся затем с образованием углубления (кратера).

Анализ морфологии поверхности инструмента показывает, что при скоростях растворения металлической связки 120–140 мкм/час поверхность приобретает грубый рельеф. Глубина впадин достигает 100–200 мкм. Растворение поверхности сплава неравномерное. Алмазные зерна имеют площадки износа, на поверхности связки имеются углубления (отпечатки) от выкрошившихся зерен. При снижении скорости растворения (30–50 мкм/час) рельеф

поверхности связки не меняется. Отпечатков выкрошившихся зерен больше. На зернах выступающих из связки имеются площадки износа.

Анализ морфологии поверхности кристалла обработанного инструментом на органической связке с тем же размером зерен алмазного синтетического порошка показывает, что рельеф поверхности выражен в меньшей степени. Углубления (царапины) на поверхности кристалла менее глубокие, можно идентифицировать отдельные из них. При повышенных скоростях растворения связки отдельные царапины имеют узкое начало, а заканчиваются углублением. Микрорельеф представлен углублениями размером 102 мкм с четко выраженным рельефом. Морфология поверхности алмазоабразивной композиции гладкая, однородная, глубина микрорельефа составляет 3–10 мкм. Зерна алмаза имеют, как правило, острые вершины. Наряду с зернами в связке имеются углубления, заполненные несколькими кристаллами (алмаза). Продукты износа состоят из 5–10% мас. частиц фракции 40–20 мкм, 20–30% мас. частиц фракции 20–13 мкм, 10–15% мас. частиц фракции 14–10 мкм. Остальные частицы имеют размеры менее 10 мкм, причем значительная доля частиц фракции 0,1–1 мкм.

Таким образом, анализ морфологии поверхностей алмазоабразивных композиций на металлической, органической связке, изменения характера морфологии кристалла искусственного алмаза в зависимости от скорости износа связки показал, что износ поверхности кристалла искусственного алмаза происходит следующим образом.

При растворении связки зерно выступает над ее поверхностью и перемещается по кристаллу искусственного алмаза. При достижении определенного давления вершина разрушается (крошится) с образованием площадки износа. Зерно контактирует с поверхностью плоской вершиной.

По мере растворения связки давление на вершину возрастает. Зерно разрушается на несколько осколков размерами 20–1 мкм. Одновременно перемещаясь и соударяясь с поверхностью, зерно с плоской вершиной деформирует поверхность кристалла. Накопление дефектов приводит к выкрошиванию фрагментов размерами 0,1–1 мкм. Об этом свидетельствует микрорельеф поверхности кристалла (выступы и впадины с характерным масштабом 0,1–1 мкм).

Одновременно наблюдается и иной механизм разрушения поверхности кристалла. Зерно при соударении с кристаллом вдавливается в дефектный слой кристалла, постепенно разрушается, формируя расширяющуюся царапину. Затем зерно с плоской вершиной разрушается на несколько частиц, которые сохраняются в связке. Осколки, удерживаемые связкой, также участвуют в износе поверхности кристалла и далее

разрушаются. Совокупность таких царапин формирует морфологию поверхности. Чем больше размер зерна (и больше его прочность) тем глубже рельеф, формируемый на поверхности кристалла. Существование на поверхности кристалла царапин с различной морфологией микро-рельефа и характерным масштабом элементов 0,1–1 мкм небольшое (5–10% мас.). Содержание в продуктах износа крупных осколков искусственного алмаза показывает, что износ поверхности кристалла при алмазобрабатывающей обработке протекает как за счет разрушения (резания) поверхности острой вершиной, так и путем микросколов при соударении плоской вершины с поверхностью кристалла. Варьирование характеристик связки позволяет изменять и морфологию поверхности кристалла.

Различия в механизмах износа алмазобрабатываемых композиций на органической и металлической связках определяют и эксплуатационные характеристики инструмента. Композиции на органической связке способны адаптироваться к изменению условий в обработке (давления шлифования, вибрация), формируют менее глубокий рельеф с менее выраженным дефектным слоем – микротрещины под цилиндрической или конической поверхностью. Удельный расход алмазного порошка несколько больше, чем в композициях на металлической связке (до 20%) при более высокой (на 20–40%) скорости шлифования однородных матовых обрабатываемых поверхностей.

Экспериментально установлено, что для получения цилиндрической и конической поверхности при черновой обточке лучше всего использовать круги на органической связке с размером зерна алмазного порошка 63 / 40, при этом шероховатость поверхности после обработки $R_a = 2,5\text{--}5$ мкм. Для полустачевой обточки необходимо использовать круги на органической связке с размером зерна 20 / 14, при этом шероховатость обработанной поверхности – $R_a = 0,08\text{--}0,16$ мкм.

Заготовка иглы для правки фильер закрепляется в специальное приспособление для полировки конусов, которое размещено над рабочей поверхностью ограночного диска. Приспособление дает возможность перемещения зажимного устройства относительно заданной оси наклона от 0 до 60 мм; вращения обрабатываемой иглы со скоростью от 0 до 400 об/мин.

Возможность разворота зажимного устройства в вертикальной плоскости от нулевого горизонтального положения до 80 градусов угла наклона.

При изготовлении наконечников типа НК необходимо задать сферическую рабочую поверхность наконечника. Эта поверхность также задается на станке ОАБ-4 «М» на специальном ограночном диске с использованием установки для полировки сфер. Специальный ограночный

диск изготавливается из стали 40 или стали 45. Рабочее полотно специального ограночного диска состоит из двух рабочих зон. Периферийная зона футерована текстолитовым материалом шириной до 60 мм в рабочей зоне ограночного диска; вторая зона, расположенная ближе к центру – из стали корпуса. Специальный ограночный диск притирается карбидом кремния N 8 и шаржируется алмазным порошком АСН 7 / 5 на клеевой связке БФ-6.

Проводилась опытная работа по определению оптимальных параметров нагрузки при обработке цилиндрических и конических поверхностей искусственного алмаза в процессе изготовления алмазного инструмента. Обработка кристаллов проводилась на полуавтомате круглошлифовальной модели ЛЗ-270, оснащённом ваттметром для замера нагрузок задаваемых обдирочным кругом на обрабатываемый кристалл. Использовался круг алмазный 1А1 250x10x5x76 АСБ 63 / 40 СО АЛН 03-358.000-05. Задавалась нагрузка от 6,88Н до 10,2Н.

Заключение

В работе показана методика расчёта оптимальных параметров и прогнозирования режимов обработки хрупких сверхтвёрдых неметаллических материалов в технологиях электроники с использованием эмпирических коэффициентов и с учётом физико-механических свойств основных материалов электронной техники. В результате экспериментальных и теоретических исследований установлены некоторые оптимальные режимы обработки указанных материалов электронной промышленности. Предложенные методики нашли своё применение и проходят апробацию на ведущих предприятиях отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов, В.А. Двухлучевая лазерная очистка кварцевого сырья / В.А. Емельянов, Е.Б. Шершнёв, С.И. Соколов // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 40–48.
2. Шершнев, Е.Б. Лазерные технологии и оборудование в электронике / Е.Б. Шершнев, С.И. Соколов, В.А. Емельянов. – Минск: Интеграл Полиграф, 2023. – 204 с.
3. Изучение влияния примесей на процессы формообразования синтетического алмаза в зоне термического влияния лазерного излучения / В.А. Емельянов, Е.Б. Шершнев, А.Н. Купо, С.И. Соколов // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2022. – № 3 (132). – С. 117–120.
4. Оптимизация лазерной полировки аморфного кварца с использованием метода планирования вычислительных экспериментов / В.А. Емельянов, Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, И.Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 26–30.

5. *Оптимизация параметров лазерной обработки алмазов* / В.А. Емельянов, Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, И.Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 4 (53). – С. 30–36.

6. *Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники* / А.П. Достанко, С.М. Аваков, Д.А. Голосов, В.В. Емельянов, С.М. Завадский, В.В. Колос, В.Л. Ланин, С.И. Мадвейко, С.Н. Мельников, Ю.В. Никитюк, А.Н. Петлицкий, И.Б. Петухов, В.А. Пилипенко, В.И. Плебанович, В.А. Солодуха, С.И. Соколов, Е.В. Телеш, Е.Б. Шершнев; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Беларус. навука, 2020. – 260 с.

7. *Шершнев, Е.Б.* Лазерные технологии и оборудование в электронике / Е.Б. Шершнев, С.И. Соколов, В.А. Емельянов. – Минск: Интеграл Полиграф, 2023. – 204 с.

8. *Кондратенко, В.С.* Высокоэффективные технологии обработки материалов на базе новых

типов алмазного инструмента // Стекло и керамика. – 2018. – Т. 91, № 5. – С. 39–43.

9. *Новый алмазный инструмент для обработки оптических материалов* / В.С. Кондратенко [и др.] // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84, № 6. – С. 54–57.

10. *Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов* / В.Ю. Попов, А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, В.Ю. Скиба // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 3 (23). – С. 68–74.

Поступила в редакцию 14.02.2025.

Информация об авторах

Шершнев Евгений Борисович – д.т.н., доцент

Купо Александр Николаевич – к.т.н., доцент