

ГАШЕВ ЕВГЕНИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОВОДКИ И ПОЛИРОВАНИЯ
ПЛАСТИН ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ**

05.02.07 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ФГБОУ ВО ПНИПУ)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор кафедры "Материалы технологии и конструирование машин" **Муратов Карим Равилевич**

Официальные оппоненты:

Шиляев Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобили и металлообрабатывающее оборудование», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова», г. Ижевск.

Цветков Егор Викторович, кандидат технических наук, ведущий специалист ЭТЦ ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань.

Защита диссертации состоится « 25 » декабря 2018 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д212.210.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва» по адресу: 152934, г.Рыбинск, ул.Пушкина, д.53, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва», <http://www.rsatu.ru/>

Автореферат разослан «23» октября 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, доцент

Надеждин Игорь Валентинович

Актуальность темы. В последнее время существенно увеличилась номенклатура кристаллических материалов, используемых в промышленной микроэлектронике. Монокристаллы ниобата лития наиболее часто используются в интегральной оптике, благодаря высоким значениям оптических и электрооптических коэффициентов. Интегрально-оптическая схема на основе монокристалла ниобата лития является ключевым элементом в производстве отечественных высокоточных волоконно-оптических гироскопических приборов, применяемых в гражданской и военной авиации, морской технике. В процессе изготовления интегрально-оптической схемы наиболее трудоёмкими являются операции механической обработки торцов, такие как доводка и полирование. Технологические трудности, возникающие при выполнении этих операций, обуславливаются физико-механическими свойствами материала, а также требованиями к шероховатости и отклонению от плоскостности полированной поверхности. В результате выполнения операций алмазной отрезки на поверхности образуются сколы и микротрещины из-за высокой хрупкости материала. В условиях производства выполнение этих требований достигается путем многократной ручной доводки и полирования свободным абразивом. Данная технология имеет существенные недостатки: высокую трудоемкость, низкую производительность и требует от исполнителя высокой квалификации. Поэтому тема работы, направленная на повышение эффективности финишной обработки поверхностей методами механизации абразивной доводки и полирования торцов пластин монокристалла ниобата лития, является актуальной задачей.

Цель работы. Повышение эффективности доводки и полирования путём механизации процесса финишной абразивной обработки торцов пластин монокристалла ниобата лития.

Задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели, заключаются в следующем:

1. Произвести анализ видов существующего оборудования для доводки и полирования торцов пластин монокристалла ниобата лития, отличающихся траекторией рабочего движения инструмента.

2. Установить параметры приспособления для закрепления заготовок монокристалла ниобата лития и параметры наладки оборудования, обеспечивающие равномерный износ притира.

3. Установить зависимости механизированной доводки, обеспечивающие повышение эффективности обработки по параметрам качества и производительности за счёт управления износом инструмента и позволяющие получать обработанную поверхность, свободную от механических повреждений, пригодную для последующего полирования.

4. Исследовать возможность достижения требуемых параметров качества поверхности торцов пластин монокристалла ниобата лития на основе механизации процессов полирования и установить количественные и качественные показатели эффективности предложенных решений.

Научная новизна.

На основе исследований кинематики рабочего движения инструмента и износа притира повышена эффективность доводки и полирования торцов пла-

стин монокристалла ниобата лития. В результате исследований установлены:

- закономерности влияния кинематики движения инструмента на геометрическую точность обрабатываемых поверхностей, показавшие предпочтительность круговых траекторий относительного движения притира и деталей;

- экстремальный характер зависимости, позволяющей прогнозировать износ инструмента относительно геометрических размеров рабочей поверхности притира и детали, их взаимного расположения, а также траектории и скорости их движений, что позволило уменьшить величину износа инструмента в 13 раз и повысить точность геометрической формы торцов пластин в процессе абразивной доводки;

- закономерности изменения глубины разрушенного слоя в зависимости от высотных параметров рельефного слоя (R_{max}) для достижения шероховатости поверхности торцов пластин монокристалла ниобата лития по параметру R_a 0,003 мкм, свободной от механических повреждений.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

1. На основании проведенных исследований создан комплекс оборудования, состоящий из модернизированных станков с вращательной кинематикой рабочего движения притира, оснастки, инструмента, а также выданы рекомендации по его использованию для серийной доводки и полирования торцов пластин с обеспечением требуемых параметров качества поверхности.

2. Разработаны технологические рекомендации по рациональным режимам обработки, позволяющим обеспечивать параметры шероховатости ($R_a = 0,003$ мкм), отклонение от плоскостности (менее 1 мкм) и при этом сохранить поверхность свободную от механических повреждений.

3. Разработан способ и получен патент на операцию доводки деталей микроударным методом на нешаржируемом инструменте из оптического стекла с применением микропорошка зернистостью 3–7 мкм с добавлением СОЖ, повышающий производительность и качество обработанной поверхности.

4. Результаты работы внедрены на предприятии УВОК ПАО «ЛНППК», г. Пермь. Программа выпуска пластин монокристалла ниобата лития увеличена в 12 раз.

Методы исследований. Теоретические исследования базируются на основе теории абразивной обработки, теории математического моделирования, теории абразивного изнашивания, теории механизмов и машин. Экспериментальные исследования выполнялись на модернизированном оборудовании с применением разработанных методик. Компьютерное моделирование осуществлялось в среде разработанного автором программного обеспечения. Измерения выполнялись с помощью поверенных высокоточных приборов.

Апробация работы. Результаты работы представлены к обсуждению на нескольких международных и всероссийских конференциях.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 15 научных работ, в том числе 8 работ в изданиях рекомендованных ВАК РФ, индексированных в международных базах цитирования WoS и Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа представлена введением, пятью главами, заключением, списком использованной литературы (86

наименований) и приложениями. Объем работы составляет 151 страница машинописного текста, 20 таблиц, 66 рисунков.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе рассмотрена физическая сущность процессов доводки и полирования хрупких оптических материалов. В работах В. М. Винокурова, Ф. Престона, Н. Н. Качалова, И. Е. Александрова, А. Л. Ардамацкого, А. С. Артёмова, Н. П. Липатовой и др. отмечается, что механизмы абразивного разрушения хрупких оптических материалов, таких как неорганические стекла, ситаллы, кристаллы, оптическая керамика в значительной степени отличаются от механизмов разрушения пластических материалов. Кроме того, существуют различия в используемых абразивных материалах и способах их применения. На финишных операциях при обработке хрупких оптических материалов преобладают суспензии микропорошков различной концентрации, а также круги с жестко закреплённым алмазным слоем. Следует отметить, что имеются некоторые различия в работе свободных и закреплённых абразивных зёрен, оказывающие существенное влияние на механизм воздействия, величину разрушенного слоя и микрорельеф обработанной поверхности. В научно-технической литературе сведения о доводке связанным абразивом торцовых поверхностей пластин из монокристалла лития не обнаружены. Исследователями установлено, что при обработке кристаллических материалов возникают микротрещины, которые проникают на некоторую глубину от поверхности и формируют разрушенный подповерхностный слой. Задачей последующей операции полировки является снижение шероховатости, удаление разрушенного слоя, и получение поверхности, свободной от механических повреждений. Однако остается практически не исследованным вопрос об особенностях прецизионной обработки и глубине разрушенного слоя современных монокристаллических материалов.

П. Н. Орловым, Л. С. Цеснеком, Р. Г. Кудояровым, В. П. Некрасовым отмечается, что для управления и стабилизации процесса доводки необходимо выполнение двух условий: равномерное изнашивание поверхности инструмента и неизменность его формы во времени. Задача усложняется при финишной обработке поверхностей малой площади по отношению к площади притира, что приводит к образованию локального износа и негативно сказывается на качестве обработанной поверхности. Поэтому обеспечение равномерного распределения следов обработки в зависимости от соотношения размеров обрабатываемой поверхности и инструмента, а также кинематики их относительного движения является актуальной задачей.

Во второй главе представлено исследование влияния кинематики движения инструмента на показатели процесса доводки. На первом этапе экспериментальных исследований определена степень влияния вида траектории рабочего движения на качество доведенной поверхности и производительность процесса. В сравнительных исследованиях были опробованы станки с растровой (Растр 220) и циклоидальной траекторией движения притира, а также станок с вращательным движением инструмента. Для удержания деталей и сооб-

щения им перемещения по поверхности притира использовалось многместное приспособление. В приспособление были установлены три пакета пластин, по четыре пластины в каждом пакете. Геометрические характеристики обрабатываемых пластин 36x3x1 мм.




В экспериментах использовались два типа притиров:

1) Стекланный диск из оптического стекла марки К8. В качестве абразива выступала суспензия из электрокорунда белого 24А зернистостью М7 на основе деионизированной воды, концентрацией 1/5;

2) Притир со связанным абразивом АСН 10/7-В3-01-2, СОЖ – вода.

Режимы обработки, такие как средняя скорость резания – 0,18 м/с, среднее давление $P = 64$ кПа при нагрузке 0,24 кг, поддерживались постоянными. Обработка осуществлялась в течении 1 минуты. В таблице 1 представлены средние значения выходных параметров обработки.

Таблица 1 – Влияние кинематики на показатели процесса доводки.

Траектория / Инструмент	Вращение 	Циклоида 	Растр 	Шероховатость и производительность
Свободный абразив 24А М7	0,173	0,183	0,170	Ra, мкм
	1,322	1,375	1,215	Rz, мкм
	1,491	1,556	1,555	Rmax, мкм
	7,1	9,4	10,4	Q, мкм/мин
Связанный абразив АСН 10/ 7	0,078	0,074	0,088	Ra, мкм
	0,674	0,553	0,694	Rz, мкм
	0,852	0,669	0,809	Rmax, мкм
	8,4	11,4	12	Q, мкм/мин

При любом методе доводки при усложнении кинематики движения притира производительность обработки увеличивается на 25-30%, шероховатость поверхности при этом практически не изменяется. При фотографировании торцов пластин до и после обработки была выявлена закономерность увеличения вероятности возникновения сколов по мере усложнения траектории. Самые крупные сколы (глубиной более 45 мкм) зафиксированы после обработки связанным абразивом на станке Растр 220, поэтому станки с рабочим движением обладающим знакопеременной скоростью не рекомендуются для операций доводки и полирования таких хрупких материалов как монокристалл ниобата лития.

Удовлетворительные результаты по качеству обработки пластин из монокристалла ниобата лития были получены при доводке на станке с вращательным движением притира. Независимо от вида использованного инструмента крупных сколов не наблюдалось.

По техническим требованиям шероховатость окончательно обработанной поверхности не должна превышать 0,003 мкм по параметру Ra, при этом отдельные риски и сколы на поверхности и кромках не допускаются. Учитывая чрезвычайно высокую хрупкость данного материала и малую площадь обрабатываемой поверхности одной пластины, сформулированы следующие основные

требования к приспособлению для закрепления пластин, а также к выбору параметров наладки станка: 1) для увеличения площади обрабатываемой поверхности возникает необходимость обработки пластин пакетом по 3-5 штук; 2) для самоустановки приспособления с деталями на поверхности притира количество пакетов должно быть не менее трех; 3) при разработке механического крепления пластин из ниобата лития необходимы сведения об их допустимой деформации изгиба; 4) для создания рабочего давления ввиду высокой хрупкости материала не допускается использование штатных прижимных пружинных или пневматических механизмов и станков; 5) для исключения сколов на обрабатываемой поверхности и кромках обработка с выходом деталей за пределы притира не допускается; 6) параметры наладки должны обеспечивать равномерный минимально возможный износ притира; 7) для снижения вероятности скалывания кромки и повреждения осколками материала обрабатываемой поверхности локальный износ притира не должен превышать 20 мкм.

На основании сформулированных требований к приспособлению и параметрам наладки выполнен полный факторный эксперимент (таблица 2) и получено уравнение регрессии, позволяющее оценить величину локального износа притира:

$$y = 8,389 + 5,461 \cdot x_1 + 0,54 \cdot x_2 + 1,313 \cdot x_3 \quad (1)$$

Для раскодирования использованы выражения натуральных значений факторов:

$$x_1 = 2 \cdot \frac{r - r_0}{r_{\max} - r_{\min}}, \quad x_2 = 2 \cdot \frac{n - n_0}{n_{\max} - n_{\min}}, \quad x_3 = \left(2 \cdot \frac{r - r_0}{r_{\max} - r_{\min}} \right)^2, \quad (2)$$

где r - радиус расположения деталей в приспособлении, мм (пределы: $r_{\min}=25$ мм, $r_{\max}=44,5$ мм); n - частота вращения притира, об/мин (пределы: $n_{\min}=42$ об/мин, $n_{\max}=150$ об/мин); $r_0 = (r_{\max} + r_{\min})/2$ - основной уровень фактора, мм; $n_0 = (n_{\max} + n_{\min})/2$ - основной уровень фактора, об/мин.

Подставив (2) в (1) получим математическую зависимость:

$$\Delta h = 55 + 0,06 \cdot r^2 - 3,61 \cdot r + 0,01 \cdot n, \quad (3)$$

где Δh - износ рабочей поверхности инструмента, мкм.

Для удобства использования приведём выражение (3) к безразмерному виду: $\Delta h / h_{\text{дон}} = 2,75 + 3,62 \cdot (r/r_0)^2 - 6,27 \cdot r/r_0 + 0,05 \cdot n/n_0$,

где $h_{\text{дон}} = 20$ - величина допустимого износа, мкм.

Полученная зависимость износа притира от радиуса приспособления и частоты вращения инструмента прошла проверку значимости по критерию Фишера с доверительной вероятностью 95%. Уравнение позволяет построить поверхность отклика функции, а также графики функций при нулевых уровнях в зависимости от влияния изменяемых параметров на выходные параметры процесса (рисунок 1). На-

Таблица 2 – Матрица планирования.

№	x_0	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	x_3	x_4	Δh	$\Delta h_{\text{расч}}$
1	+1	-1	-1	+1	0,33	0,33	2,6	2,92
2	+1	+1	-1	-1	0,33	0,33	17,7	15,43
3	+1	-1	+1	-1	0,33	0,33	4	4
4	+1	+1	+1	+1	0,33	0,33	17,2	16,51
5	+1	-1	0	0	0,33	-0,67	3,7	3,46
6	+1	+1	0	0	0,33	-0,67	17,2	15,97
7	+1	0	-1	0	-0,67	0,33	3,6	2,58
8	+1	0	+1	0	-0,67	0,33	5,8	3,66
9	+1	0	0	0	-0,67	-0,67	3,7	3,12

меньший локальный износ инструмента достигается при расположении деталей в приспособлении на радиусе $r=30$ мм и возрастает в 13 раз при увеличении этого значения до предельной величины 44,5 мм (в этом случае диаметр приспособления перекрывает половину диаметра притира). Частота вращения притира на локальный износ инструмента оказывает менее значимое влияние: при увеличении частоты n более чем в 3,5 раза глубина локальной выработки увеличивается на 2-3%. Поэтому для обеспечения высокой производительности частоту вращения притира и, как следствие, скорость резания следует выбирать максимально возможной.

Для решения задачи равномерного распределения следов обработки по поверхности притира разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее прогнозировать износ инструмента в зависимости от наладочных (размеры приспособления и притира, смещение осей их вращения), кинематических (траектория и скорость относительного перемещения), а также технологических (материал детали и инструмента, зернистость, концентрация, тип связки рабочее давление) параметров доводки. ПО реализовано при помощи языка программирования Python на платформе PyQt5 с использованием библиотеки Matplotlib (рисунок 2). Результаты, полученные путём моделирования в ПО, прошли экспериментальную проверку в реальных условиях обработки. Отклонение геометрической формы инструмента в результате реальной обработки совпадает со смоделированным как качественно (локальный износ в центре), так и количественно (величина износа 4,5 мкм).

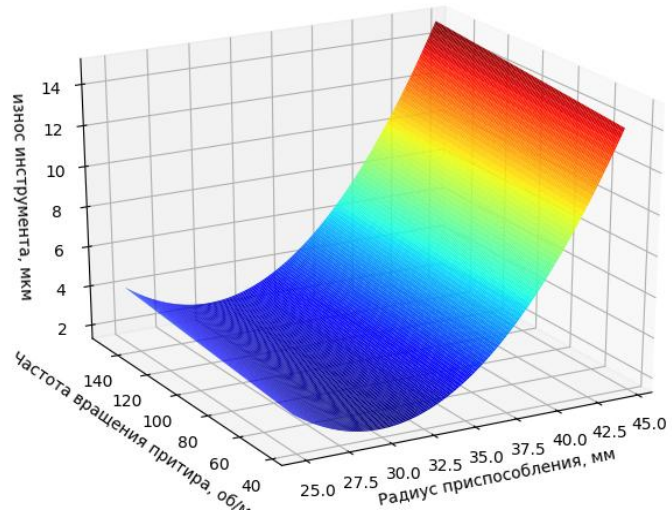


Рисунок 1 – Поверхность отклика.

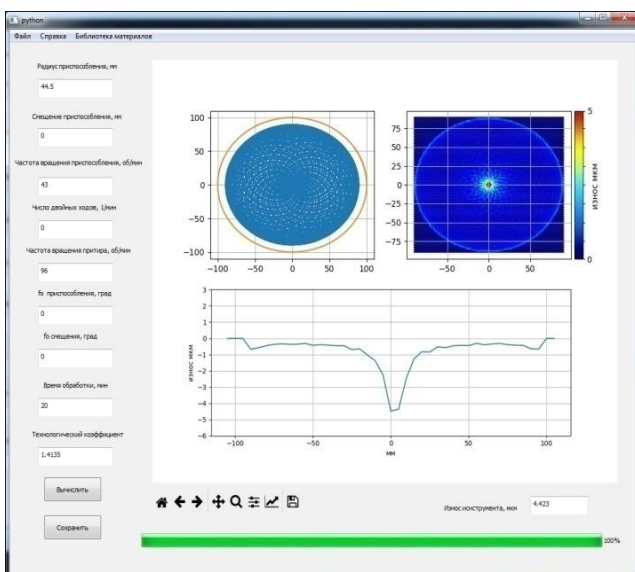


Рисунок 2 – Результат моделирования.

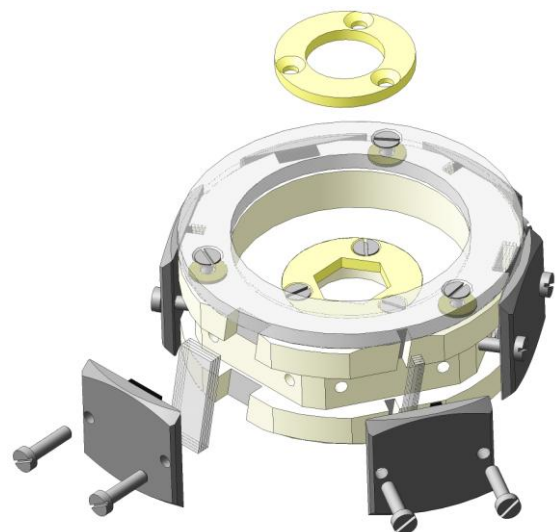


Рисунок 3 – Приспособление.

По результатам факторного эксперимента и моделирования вариантов наладки в ПО разработано и изготовлено универсальное многоместное приспособление (рисунок 3), позволяющее обеспечить механизированную доводку и полирование торцов пластин пакетом и увеличить программу выпуска готовых деталей в 12 раз. Благодаря самоустановке приспособления с деталями на поверхности притира или полировальника была решена проблема «завала краёв». С помощью приспособления удалось добиться стабильного обеспечения допуска геометрической формы в пределах 1 мкм, что в 3 раза больше по сравнению с ручной обработкой. Пакеты пластин в корпусе приспособления расположены на радиусе 30 мм и исполняют роль правильного кольца, что способствует более равномерному износу притира.

В третьей главе представлена методика исследований, образцы и режимы обработки, инструмент и абразивы для доводки и полирования. В качестве образцов в экспериментах использовались пластины из монокристалла ниобата лития после алмазной отрезки. Длина заготовки 37 мм, ширина 3,04 мм и 12,84 мм. Обработка торцов пластин осуществлялась пакетами по 4-5 штук в специальном приспособлении.

Исходная и обработанная поверхности торцов оценивалась визуально и путем фотографирования на микроскопе Olympus GX51 и MC 01 USB. С помощью компьютерного профилометра-профилографа Mahr Perthometer S2 осуществлялись измерения параметров шероховатости поверхности Ra, Rz, Rmax, и запись профилограмм для оценки характера микрорельефа. Измерения отклонения геометрической формы обрабатываемых пластин из монокристалла ниобата лития и инструмента выполнялись на измерительной машине MarForm MMQ400 фирмы Mahr.

Производительность процесса (скорость съёма) оценивалась по величине линейного съёма $\Delta_{\text{ср}}$ (мкм) материала в единицу времени Q (мкм/мин). Для измерения величины съёма использовались вертикальный оптический длинномер ИЗВ-2 с ценой деления 1 мкм, а также специальное измерительное устройство, позволяющее оперативно и с минимальным измерительным усилием проводить измерения с высокой точностью.

Создание необходимого давления в контакте инструмент – обрабатываемая поверхность изменялось с помощью тарированных грузов.

В исследованиях доводки свободным абразивом использовались суспензии, приготовленные на основе смеси деионизированной воды и микропорошков из электрокорунда белого следующих зернистостей: 24А М14, 24А М7, 24А М3. Концентрация абразивной суспензии по массе 1/5. В сравнительных экспериментах базовой суспензией принята на основе 24А М7. Полирование осуществлялось суспензий на основе деионизированной воды и синтетических алмазных микропорошков АСМ зернистостью 1/0,5 и 0,5/0. Концентрация суспензии по массе 1/10.

Исследование процесса доводки с использованием суспензий проводились на круглых притирах диаметром 200 мм из оптического стекла марок К8 и ЛК5. Доводка связанным абразивом осуществлялось на алмазных притирах: АСН 10/7–В3-01–2; АСН 10/7–М2-01–2.

В экспериментах в качестве полировальников использовались тканые и нетканые гидрофобные материалы: плащевая ткань (болонья); капроновая сетка толщиной 0,09мм, размер ячеек ~ 0,1мм; полиэтиленовая пленка толщиной 0,14 мм; плащевая ткань (80% - полиамид, 20% - полиуретан); тентовая синтетическая ткань с водоотталкивающим покрытием; полировальник VelTex Buehler; полировальник Microlap Remet; искусственная кожа СК-8.

Стойкость рабочей поверхности притира оценивалась временем наработки между правками. Стойкость полировальников также оценивалась суммарным временем наработки до появления локальных очагов физического износа на рабочей поверхности или до значимого снижения полирующей способности и появления видимых рисок на обработанной поверхности.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса доводки торцов пластин из ниобата лития. Задачей исследования доводки является установление условий процесса, обеспечивающих производительный съем припуска и получение рабочей поверхности с минимальными механическими повреждениями перед операцией полирования. Увеличение зернистости крупнее М14 при сохранении той же концентрации приводит к уменьшению количества абразивных зёрен в контакте инструмент деталь, что, в свою очередь, приводит к увеличению локальных нагрузок на отдельные зёрна и, как следствие, возникновению рисок и сколов на обрабатываемой поверхности (таблица 3).

С увеличением давления и скорости резания производительность съема возрастает по линейному закону в 2,5-3 раза (рисунок 4 а, б). Шероховатость обработанной поверхности изменяется незначительно.

Таблица 3 – Влияние зернистости абразива на показатели процесса доводки.

Зернистость абразива	Ra, мкм	Q, мкм/мин	Технологические и кинематические параметры доводки
24А М3 – 1/5	0,079	5,09	Притир К8, P = 63,7 кПа, n _{пр} = 96 об/мин
24А М7 – 1/5	0,186	10,70	
24А М14 – 1/5	0,334	23,40	

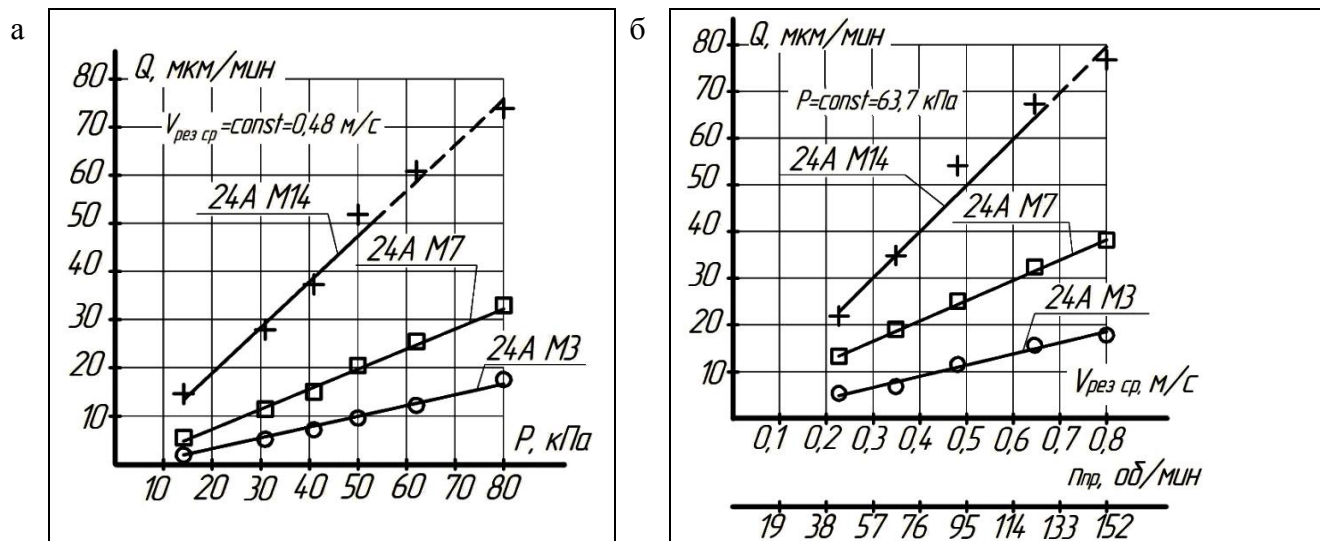


Рисунок 4 – Влияние давления (а) и средней скорости резания (б) на производительность доводки свободным абразивом.

Ввиду хрупкости монокристалла ниобата лития, при превышении допустимого давления происходит возникновение глубоких царапин, трещин и сколов на обрабатываемой поверхности. Кроме того, при увеличении частоты вращения притира более 120 об/мин в результате действия центробежной силы абразивная суспензия срывается с поверхности притира, что может привести к «сухому» трению и возникновению аналогичных дефектов.

По сравнению с доводкой абразивными суспензиями процесс обработки с применением связанного абразива имеет ряд преимуществ. Результаты по производительности и шероховатости поверхности после обработки связанным абразивом по величине располагаются между результатами, полученными после доводки суспензиями 24А М3 и 24А М7 (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты доводки монокристалла ниобата лития свободным и связанным абразивом.

Характеристика абразивного слоя	Шероховатость, мкм			Q, мкм/мин
	Ra	Rz	Rmax	
Суспензия 24А М3 – 1/5	0,08	0,60	0,70	5,1
Суспензия 24А М7 – 1/5	0,19	1,43	1,90	11,3
Притир АСН 10/7 – В3-01 – 2	0,07	0,52	0,61	10,2
Притир АСН 10/7 – М2-01 – 2	0,13	1,02	1,28	7,8

Анализ результатов показал, что при увеличении давления в три раза практически пропорционально возрастает производительность съема. С увеличением скорости резания от 0,22 до 1,1 м/с производительность съема возрастает в 3,5-4 раза. На параметры шероховатости, изменение давления и скорости резания существенного влияния не оказывают. Кроме того, в органической связке В3-01, которая применяется в основном для чистовой доводки, в качестве наполнителя используется резиновая мука, что способствует повышению полирующего действия и снижению шероховатости (рисунок 5 а, б).

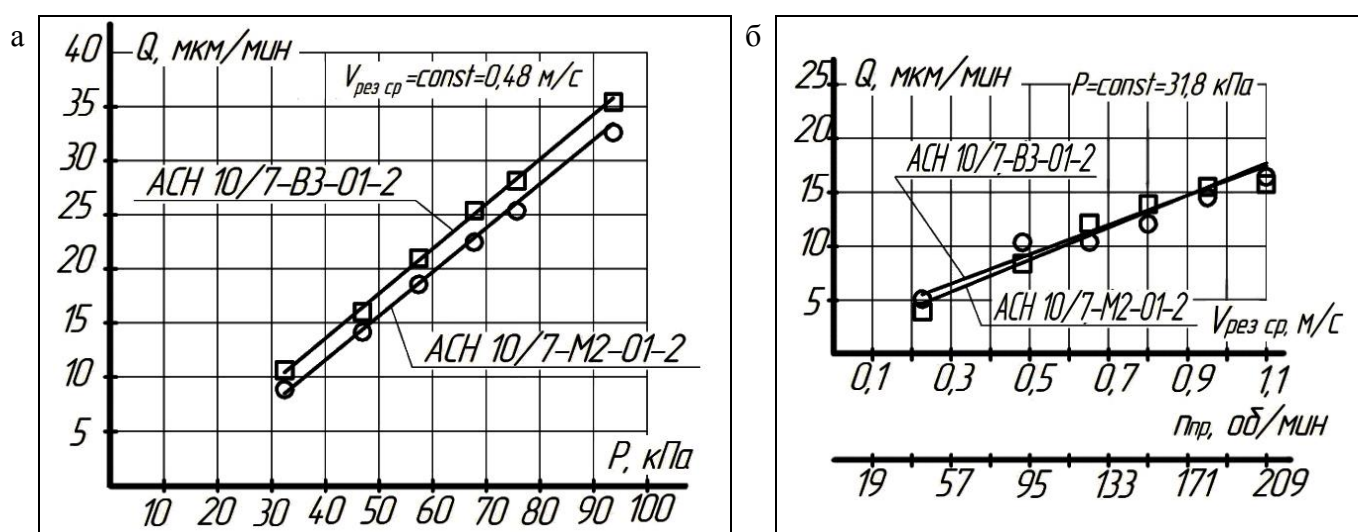


Рисунок 5 – Влияние давления (а) и средней скорости резания (б) на производительность доводки связанным абразивом.

Величина отклонения от прямолинейности торцов пластин после доводки на притире из стекла марки ЛК5 суспензиями 24А зернистостью от 3 до 14 мкм на длине 12 мм не превышала 0,3-0,5 мкм, для притира АСН10/7-М2-01-2 не превышала 0,4-0,5 мкм.

Установлено, что величина разрушенного слоя F (рисунок 6) после доводки пропорциональна величине рельефного слоя h , т.е. шероховатости R_{max} , и для монокристалла ниобата лития имеет соотношение: $F=12 \cdot R_{max}$. Этот слой необходимо удалить на последующей операции полирования.

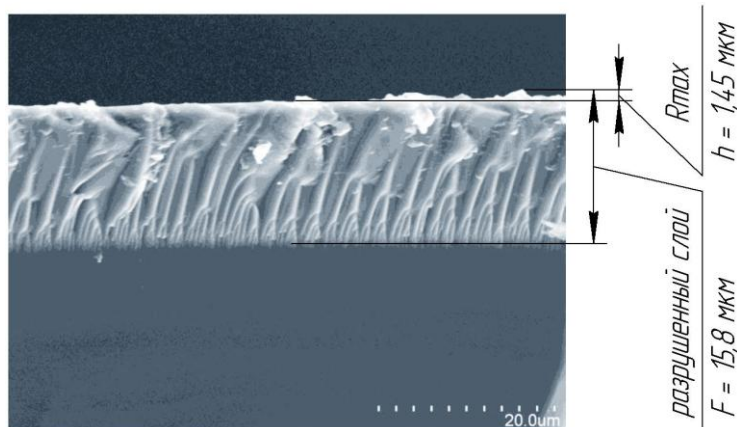


Рисунок 6 – Разрушенный слой после доводки на притире из стекла марки К8 суспензией 24А М7 – 1/5.

В пятой главе рассмотрено полирование торцов пластин из монокристалла ниобата лития, которое является финишной операцией в технологическом процессе механической обработки. Задачей полирования является сьем материала, превышающего величину разрушенного слоя после операции доводки и получение поверхности, свободной от механических повреждений.

В сравнительных опытах опробованы все полировальники, предусмотренные методикой. Результаты сравнительных экспериментов по производительности полирования и качеству обработанной поверхности представлены в таблице 5. Стойкость полировальников оценивалась суммарным машинным временем $\Sigma t_{\text{маш}}$ наработки до появления локальных очагов физического износа на рабочей поверхности или до значимого снижения полирующей способности и появления видимых рисок на полированной поверхности.

Таблица 5 – Влияние материала полировальника на показатели процесса полирования.

Материал полировальника		Шероховатость, мкм			Q , мкм/мин	Стойкость $\Sigma t_{\text{маш}}$, мин
		Ra	Rz	Rmax		
Тканые	плащевая ткань (болонья)	0,004	0,014	0,017	3,23	~ 40-50
	плащевая ткань (80% -полиамид, 20% - полиуретан)	0,002	0,011	0,013	2,97	
	тентовая синтетическая ткань с водоотталкивающим покрытием	0,002	0,013	0,014	3,17	
	капроновая сетка толщиной 0,09 мм, размер ячеек ~ 0,10мм 0,12 мм;	0,001	0,010	0,012	0,61	~ 6-10
Нетканые	композиционный полировальник на целлюлозной основе	0,001	0,007	0,008	0,29	~ 12-18
	полиэтиленовая пленка 0,14 мм	0,001	0,009	0,011	1,78	~ 6-10
	искусственная кожа СК-8	0,001	0,005	0,007	1,12	Более 120
	Microlap Remet и VelTex Buehler	0,001	0,006	0,006	2,91	

Из таблицы 5 видно, что наибольшую производительность съема показали синтетические тканые гидрофобные материалы типа плащевых тканей, а также фирменные нетканые полировальники Microlap и VelTex. Однако по па-

раметрам шероховатости полировальники из тканых материалов несколько уступают нетканым. Это может объясняться большей эластичностью и однородностью структуры нетканых материалов, обеспечивающие более равномерное выступание зерен в абразивной прослойке, а также хорошей «приспосабливаемостью» полировальников к обрабатываемой поверхности.

Сравнение суммарного машинного времени $\Sigma t_{\text{маш}}$ наработки, приведенное в таблице 5, показывает, что при обработке торцовых поверхностей пластин с малой площадью контакта, стойкость полировальника определяется не только прочностью материала, но и его структурой.

В результате воздействия острых кромок обрабатываемых пластин волокна полировальников разрушаются, на поверхности полировальника появляются локальные разрывы и разрезы. Наибольшую стойкость показали нетканые полировальники с ворсистой структурой – искусственная кожа СК-8, полировальники Microlar Remet и VelTex Buehler. Даже после двух часов наработки сохранялось стабильное качество полированной поверхности, материал полировальника оставался пригодным для дальнейшей обработки.

В зависимости от физико-механических свойств полировальника и абразива имеются верхний и нижний пределы размера зерен полировального порошка. В связи с этим проведены сравнительные исследования процесса полирования ниобата лития алмазной суспензией зернистостью 0,5/0 и 1/0,5, концентрацией 1/10 на базовых режимах. При полировании на более толстых и мягких (ворсистых) полировальниках типа плащевой ткани, Microlar или VelTex уменьшение зернистости суспензии до 0,5/0 существенно снижает скорость сполировывания при одновременном ухудшении качества поверхности (дефекты в виде лунок и наплывов).

Для окончательного обоснования выбора полировальника выполнен сравнительный анализ отклонения от прямолинейности полированной поверхности. Отклонение формы при механической полировке на коже СК-8 почти в три раза меньше, чем при ручной полировке, и не превышает 1 мкм. При полировке на полировальнике VelTex Buehler погрешности геометрической формы еще меньшие, что объясняется более однородной структурой и толщиной рабочего слоя по сравнению с кожей СК-8.

Исследования влияния давления на производительность полирования показали, что производительность линейно возрастает пропорционально давлению. Шероховатость полированной поверхности в диапазоне давлений 44–104 кПа практически не изменяется. При давлении менее 31 кПа наблюдается ухудшение шероховатости в 1,5 раза в результате непрополировки. При низких давлениях, во-первых, в большей степени сказываются упругие свойства полировальника, во-вторых, в работе участвуют лишь зерна крупной фракции. Ограничением давления являются прочность полировальника и опасность возникновения сухого трения.

Производительность полирования практически прямо пропорциональна средней скорости резания. Увеличение скорости в четыре раза практически не влияет на шероховатость полированной поверхности. Ограничением скорости являются те же причины, что и при доводке – опасность возникновения «сухо-

го» трения и стойкость полировальника.

Задачей операции полирования является не только создание требуемой шероховатости, но и удаление слоя, разрушенного доводкой. Как видно из графика (рисунок 7), требуемая шероховатость устанавливается уже после 2-3 минут обработки. Однако разрушенный слой за это время будет удалён не полностью. Зная производительность съема при полировании, максимальную глубину h рельефного слоя, которая определяется параметром R_{max} и соотношением глубин разрушенного F и рельефного h слоев для монокристалла ниобата лития 1:12, можно рассчитать минимальное время полирования.

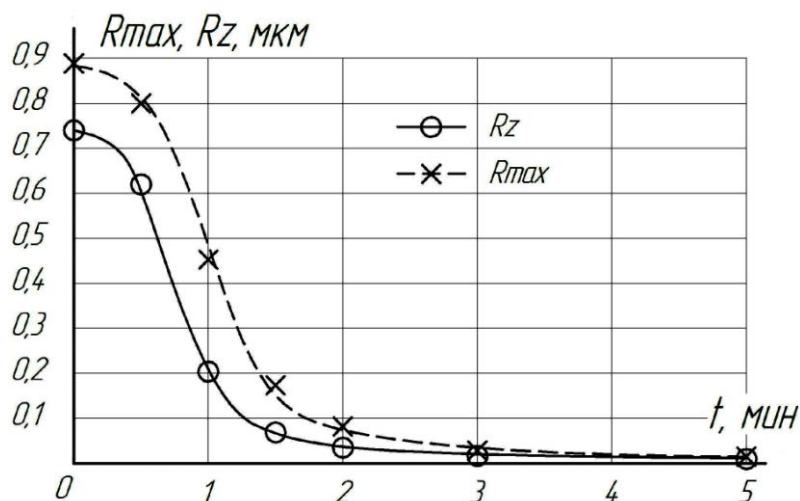


Рисунок 7 – Влияние времени цикла полирования на шероховатость поверхности монокристалла ниобата лития

Таким образом, при финишной абразивной обработке кристаллических материалов, в частности торцов пластин из монокристалла ниобата лития, для расчета общей глубины разрушенного доводкой слоя и минимального времени полирования, необходимого для его удаления, можно воспользоваться следующими выражениями: $F = 12 \cdot R_{max}$, мкм; $T_{\text{цикл. пол.}} \geq F / Q_{\text{пол.}}$, мин.

В производственных условиях расчет минимального времени цикла полирования позволил повысить эффективность обработки за счёт сокращения времени операции полирования, уменьшения количества брака, вызванного непрополировкой, а также сократить расход абразивных материалов.

Заключение

Основные научные выводы, практические результаты и рекомендации:

1. Исследования кинематики движения инструмента показали, что для доводки и полирования таких хрупких материалов, как монокристалл ниобат лития, целесообразно использовать станки с вращательным рабочим движением. Станки с колебательной или поступательной кинематикой по причине высокой частоты смены направления вектора скорости и ускорения не рекомендуются для выполнения финишных операций обработки торцов пластин.

2. Полученная математическая зависимость величины локального износа инструмента имеет экстремальный характер. Установлено, что наименьшая величина износа притира достигается при расположении деталей в приспособлении на радиусе $r=30$ мм и возрастает в 13 раз при увеличении этого значения до предельной величины 44,5 мм. При увеличении частоты n более чем в 3,5 раза глубина локальной выработки увеличивается на 2-3%. Поэтому, для обеспечения высокой производительности, частоту вращения притира и, как следствие, скорость резания следует выбирать максимально возможной.

3. Разработанное программное обеспечение, позволило прогнозировать

износ инструмента в зависимости от наладочных (размеры приспособления и притира, смещение осей их вращения), кинематических (траектория и скорость относительного перемещения), а также технологических (материал детали и инструмента, зернистость, концентрация, тип связки рабочее давление) параметров доводки.

4. Разработанное универсальное приспособление позволило реализовать механизированную доводку и полирование торцов пластин пакетом и увеличить программу выпуска готовых деталей в 12 раз. Благодаря самоустановке приспособления с деталями на поверхности притира или полировальника была решена проблема «завала краёв». С помощью приспособления удалось добиться стабильного обеспечения допуска геометрической формы в пределах 1 мкм, что в 3 раза больше по сравнению с ручной обработкой.

5. Результаты исследований по доводке пластин свободным абразивом на стеклянном притире показали, что с увеличением давления и скорости резания производительность съема возрастает линейно. Шероховатость обработанной поверхности изменяется незначимо. Допустимые значения давления зависят от вида, зернистости абразива и концентрации суспензии. При использовании суспензии 24А М14, концентрации 1/5 допустимое давление не более 40 кПа, а при зернистости 24А М7 и 24А М3 той же концентрации давление может быть увеличено до 80 кПа. Увеличение зернистости абразива крупнее М14 мкм не целесообразно. Рекомендуемая частота вращения притира не должна превышать 120 об/мин.

6. Установлена возможность применения метода доводки связанным абразивом, обладающим рядом существенных преимуществ, на алмазных притирах АСН10/7–В3-01–2 для обработки хрупких материалов, таких как монокристалл ниобата лития. Характер зависимости производительности съема и шероховатости обработанной поверхности от давления и скорости резания совпадает с результатами, полученными при доводке свободным абразивом. При одинаковой зернистости и прочих равных условиях производительность съема и шероховатость поверхности, обработанной связанным абразивом несколько ниже, чем при доводке свободным абразивом.

7. Доказана эффективность процесса полирования с применением нетканых полировальников Microlap Remet и VelTex Buehler и искусственной кожи СК-8, для которых определен нижний предел зернистости алмазной полировальной суспензии равный 1/0,5 мкм и рекомендованы следующие режимы обработки: частота вращения полировальника 180-220 об/мин и давление 80-100 кПа, при которых обеспечивается требуемое качество и высокая производительность обработки.

8. Для расчета общей глубины, разрушенного доводкой слоя F и минимального времени полирования необходимого для его удаления можно рекомендовать следующие выражения: $F = 12 \cdot R_{max}$, мкм; $T_{\text{цикл. пол.}} = F / Q_{\text{пол., мин.}}$

9. Результаты работы внедрены на предприятии УВОК ПАО «ПНППК». Создан комплекс оборудования, состоящий из модернизированных станков с вращательной кинематикой рабочего движения притира, оснастки, инструмента, а также выданы рекомендации по его использованию для серийной доводки

и полирования торцов пластин монокристалла ниобата лития с обеспечением требуемых параметров качества поверхности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I В изданиях, рекомендованных ВАК при министерстве образования и науки РФ.

Всего 15 работ в ведущих рецензируемых изданиях, в том числе 8 работ в изданиях рекомендованных ВАК РФ. Наиболее значимые из них:

1. **Гашев, Е.А.** Исследование процесса шлифования монокристалла на станках с различной кинематикой [Текст] / Муратов Р.А., Муратов К.Р., Гашев Е.А. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4–5. – С. 1270–1272.
2. **Гашев, Е.А.** Шлифование монокристалла связанным абразивом [Текст] / Муратов К.Р., Ханов А.М., Гашев Е.А. // СТИН. – 2015. – № 4. – С. 16–18.
3. **Гашев, Е.А.** Влияние некоторых технологических параметров на производительность и качество финишной обработки монокристалла [Текст] / Муратов К.Р., Муратов Р.А., Гашев Е.А., Ханов А.М. // СТИН. – 2015. – № 3. – С. 31–34.
4. **Гашев, Е.А.** Исследование полировального инструмента для абразивной обработки оптического материала [Текст] / Муратов К.Р., Гашев Е.А., Сиротенко Л.Д. // СТИН. – 2016. – № 5. – С. 36–40.
5. **Гашев, Е.А.** Сравнительные исследования режимов полирования поверхностей монокристалла ниобата лития [Текст] / Гашев Е.А., Муратов К.Р. // СТИН. – 2016. – № 5. – С. 34–36.
6. **Гашев Е.А.** Анализ результирующей циклоидальной траектории при доводке плоскостей [Текст] / К. Р. Муратов, Е. А. Гашев // СТИН. - 2015. - № 10. - С. 26-28.
7. **Гашев Е.А.** Финишная абразивная обработка хрупких материалов [Текст] / А.М. Ханов, К.Р. Муратов, Р.А. Муратов, Е.А. Гашев // СТИН. – 2014. – № 4. – С. 33–37.
8. **Гашев Е.А.** Управление траекторией рабочего движения при доводке плоскостей [Текст] / А.М. Ханов, В.А. Иванов, К.Р. Муратов, Е.А. Гашев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 1–3. – С. 667–669.
9. **Пат. 2626706 Российская Федерация, МПК В24 В1/00.** Способ финишной обработки деталей [Текст] / Гашев Е.А., Муратов К.Р., Муратов Р.А., Лагунов Д. М., Ханов А.М.; заявитель и патентообладатель Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – № 2016144923/02; заявл. 15.11.2016; опубл. 31.07.2017, Бюл. № 22.