

УДК 621.7.01

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-31-37

Влияние режимов полирования и травления деталей из кварцевого стекла на качество обработанной поверхности

А. А. Башарова, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. В. Щенятский, доктор технических наук, профессор ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В составе современных навигационных изделий широкое применение находят гироскопы, основным элементом которых является чувствительный элемент – резонатор, выполненный из изотропных оптических материалов. Качество обработки поверхностей резонатора влияет на долговременную стабильность работы гироскопа и точность работы навигационной системы. Для достижения высокого качества поверхности применяются различные методы по обработке заготовки, одним из которых является метод удаления нарушенного слоя путем повторения операций механической и химической обработки.

Рассматривается влияние режимов обработки деталей из кварцевого стекла на шероховатость поверхности при выполнении операций полирования и травления в растворах кислот. Финишная обработка применяется к осесимметричным телам вращения. Проведены эксперименты по полированию образцов из кварцевого стекла с учетом факторов, влияющих на качество поверхности. Подробно рассмотрено влияние полировальной суспензии на сам процесс, при этом учтены такие факторы, как геометрия и шероховатость поверхности перед обработкой, качество инструмента для полирования, время обработки и относительные частоты вращения детали и инструмента. Частота вращения детали и инструмента назначена на основе данных о геометрии инструмента для полирования деталей из кварцевого стекла, разработанной математической модели движения единичного зерна абразива, а также его траектории для инструмента и детали. Оценена шероховатость поверхности при помощи зондового сканирующего микроскопа.

Данные исследования направлены на улучшение качества поверхности при физических и химических методах воздействия на деталь, а также обеспечения высокой геометрической точности обработки и качества поверхности без микротрещин и царапин.

Ключевые слова: полирование, травление, свободный абразив, траектория движения, кварцевое стекло, шероховатость поверхности.

Введение

В составе современных навигационных изделий широкое применение находят гироскопы, основным элементом которых является чувствительный элемент – резонатор, выполненный из изотропных оптических материалов [1]. Качество обработки поверхностей резонатора влияет на долговременную стабильность работы гироскопа и точность работы навигационной системы [2]. Для достижения высокого качества поверхности применяются различные методы по обработке заготовки, одним из которых является метод удаления нарушенного слоя [3] путем повторения операций механической и химической обработки.

Научно обоснованный подход к назначению технологических режимов финишных операций обработки заготовки, при котором качество обработанной поверхности соответствует техническим требованиям при гарантии целостности хрупкой детали, является одним из основных

направлений, дающих потенциал увеличения технологических возможностей процессов полирования и травления.

На рис. 1 представлена структурная схема процессов полирования и травления, отображающая совокупность отдельных подсистем процессов полирования и травления, а также определены функциональные связи между этими подсистемами и внутри них.

Качество обработки полированием зависит от влияния ряда факторов, таких как:

- профили и физико-технические характеристики поверхности инструмента [4, 5];
- равномерность распределения траекторий движения единичного зерна свободного абразива на поверхности детали и инструмента [6–8];
- количества абразивных зерен, подаваемых в зону контакта в единицу времени;
- давление и эпюра его распределения, оказываемые инструментом на заготовку;
- свойства материала детали;
- геометрия детали и другие факторы [9].

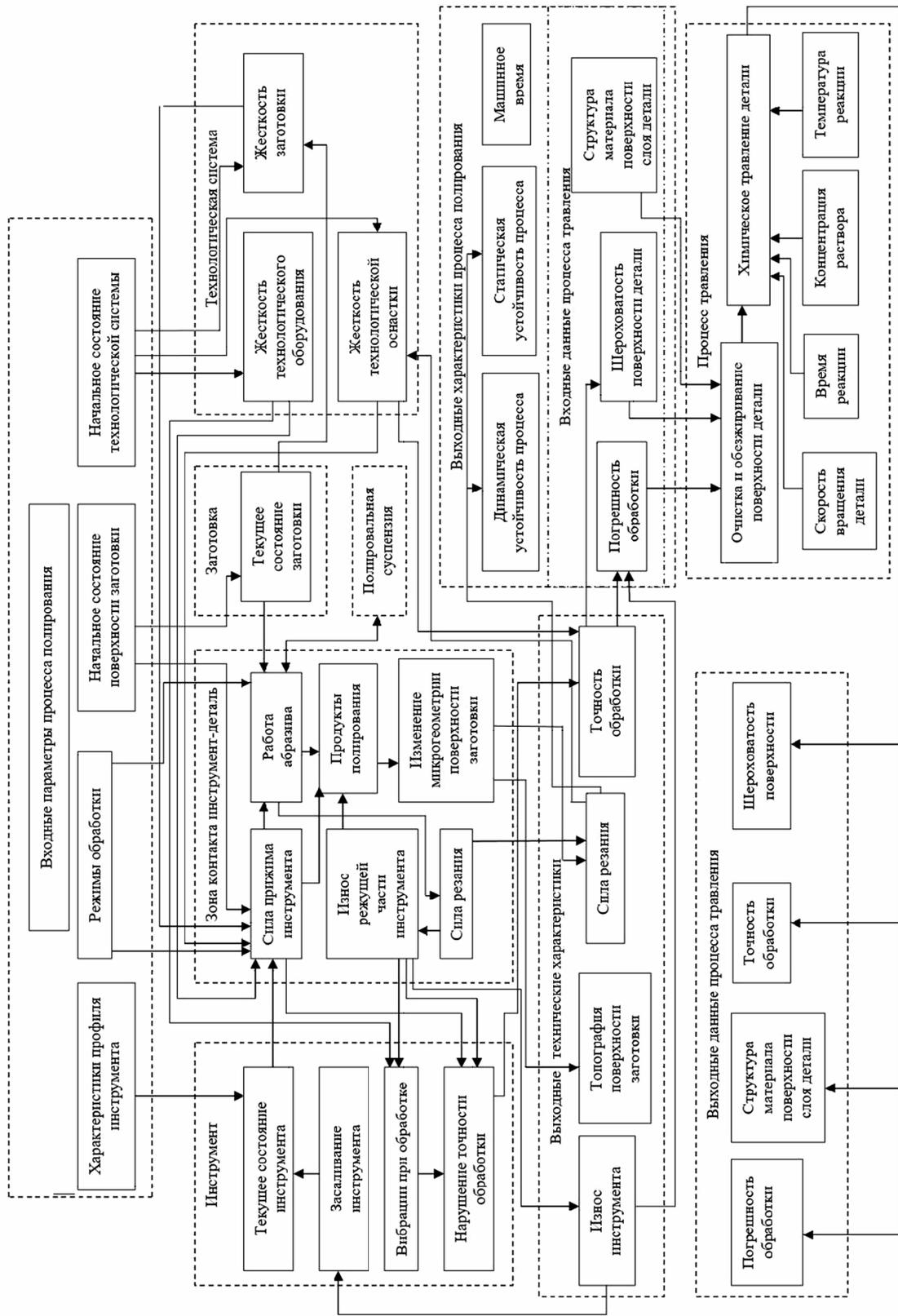


Рис. 1. Структурная схема процессов полирования и травления

Fig. 1. Block diagram of polishing and etching processes

Цель исследования – проанализировать воздействие совокупности факторов, влияющих на шероховатость поверхности при выполнении операций полирования и травления в растворах кислот деталей из кварцевого стекла.

Описание эксперимента

На данном этапе работы рассматривается влияние подачи полировальной суспензии в зону контакта детали и инструмента в единицу времени. Податливость реальных изделий, обладающих хрупкостью и малой жесткостью, не рассматривается. Для этого были подготовлены 2 образца высотой 4,8 мм и диаметром 35 мм, шероховатостью поверхности Ra 0,155 и 0,164 мкм и отполированы по плоской поверхности. Схема обработки представлена на рис. 2.

По результатам математического моделирования были выбраны начальные шероховатости образцов № 1 и 2, а также режимы их обработки полированием, которые представлены в табл. 1.

Для определения съема материала в единицу объема после полирования были проведены измерения высоты образцов, мкм, с помощью координатно-измерительной машины. Оценка качества обработанной поверхности была проведена на АСМ – микроскопе Solver 47-PRO – с предельной абсолютной погрешностью ±1,5 нм в диапазоне измерений 20...100 нм. Результаты по количественному и качественному показателю полирования представлены в табл. 2.

Результаты снимков на АСМ-микроскопе образцов № 1 и 2 после полирования представлены в табл. 3.

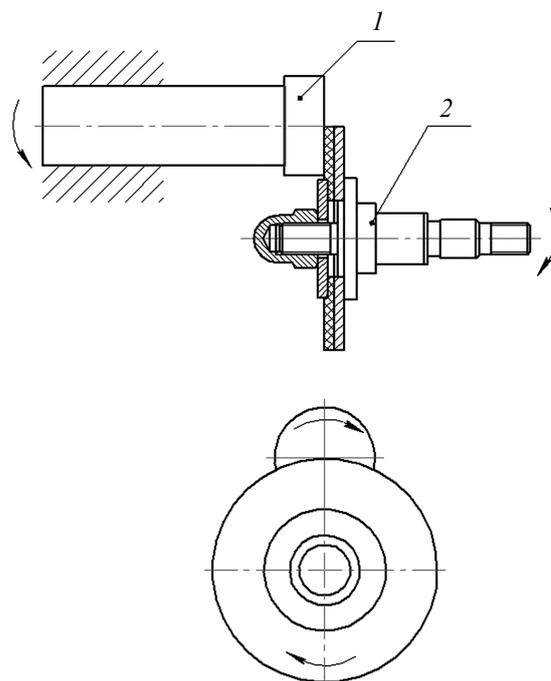


Рис. 2. Схема торцевой обработки плоских образцов инструментом для полирования: 1 – образец; 2 – инструмент для полирования

Fig. 2. Scheme of the mechanical processing of flat samples, tool for polishing: 1 - sample; 2 - polishing tool

Таблица 1. Режимы полирования образцов № 1 и 2

Table 1. The modes of polishing the samples no. 1 and 2

Исходные данные параметров обработки	Образец № 1	Образец № 2
Исходная шероховатость поверхности, мкм	0,155	0,164
Средний размер частиц абразивного порошка Сегох 1663, мкм	1...2	1...2
Частота вращения детали об/мин	250	250
Частота вращения инструмента, об/мин	600	600
Время обработки, мин	10	60
Сила прижима инструмента на деталь, Н	0,3	0,3
Концентрация абразивных зерен в объеме полировальной суспензии	Одинаковая (1:6)	Одинаковая (1:6)
Способ подачи	Капельным методом в течение 100 сек. с перерывом в подаче 20 сек.	Капельным методом в течение 0,2 сек. с перерывом в подаче 10 сек.

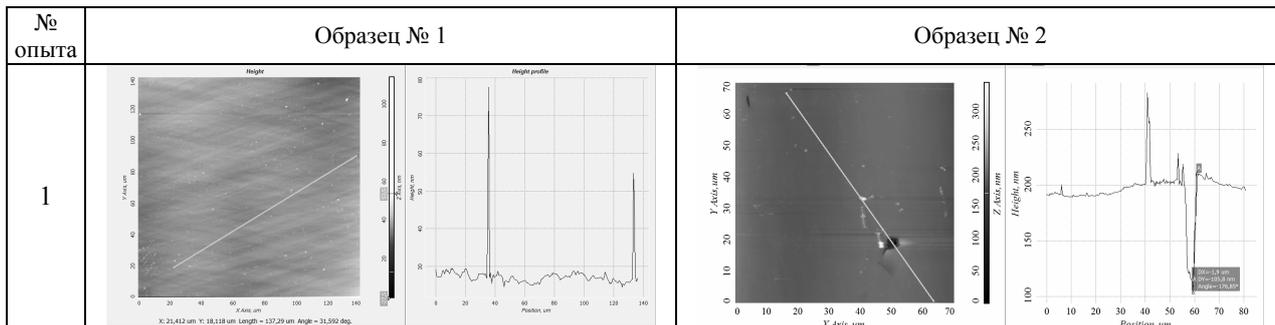
Таблица 2. Результаты полирования

Table 2. The results of the polishing

Показатель	Образец № 1	Образец № 2
Съем материала мг/мин	19,6	0,142
Шероховатость поверхности Ra, нм	2,1	6,0
Характеристика поверхности	Многочисленные выступы высотой до 50 нм	Отдельные выступы и кратеры высотой и глубиной порядка 105 нм

Таблица 3. Влияние режимов полирования деталей из кварцевого стекла на качество обработанной поверхности

Table 3. Influence of polishing modes of quartz glass parts on the quality of the treated surface



Для оценки глубины нарушенного слоя используются различные методы [10]. В данном исследовании были проведены эксперименты с травлением образцов в различных растворах на основе фтористоводородной и серной кислоты [11] с режимами, приведенными в табл. 4.

Данные по результатам измерения шероховатости поверхности на АСМ-микроскопе после полирования и травления занесены в табл. 5. Результаты снимков на АСМ-микроскопе образцов № 1 и 2 после травления представлены в табл. 6.

Таблица 4. Режимы травления

Table 4. Etching modes

№ опыта	№ раствора	Время реакции, мин	Температура, °С
1	1	10	22
2	2	2	57
3	2	10	22
4	1	2	57

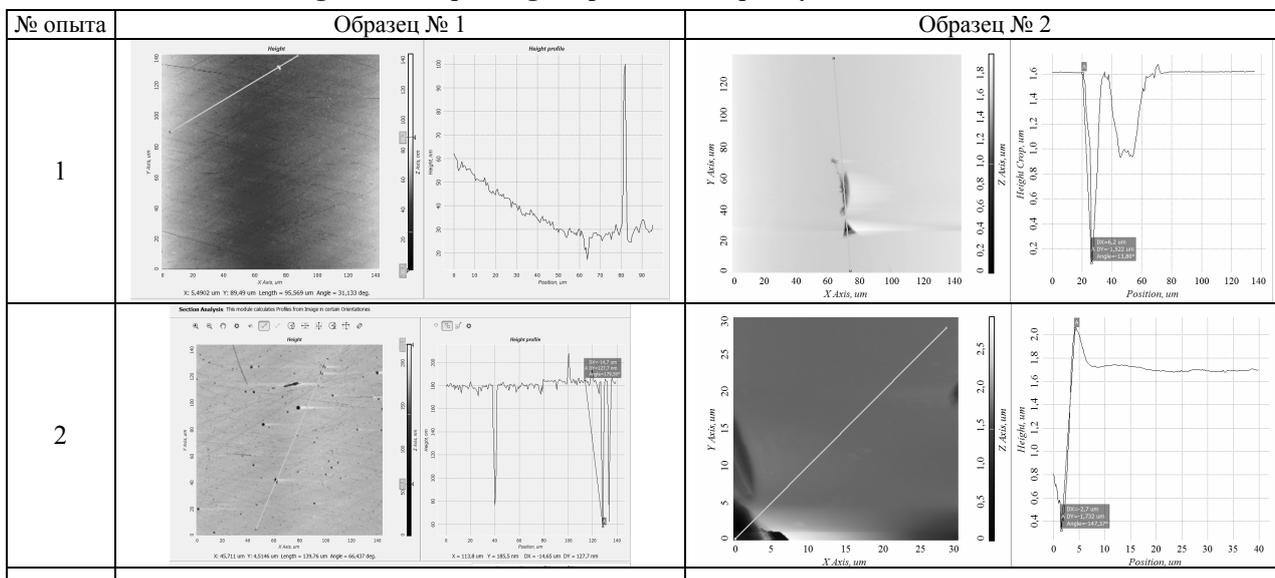
Таблица 5. Результаты измерения шероховатости поверхности на АСМ-микроскопе, нм

Table 5. Results of surface roughness measurement on AFM microscope, nm

№ образца	№ опыта				
	После полирования	1	2	3	4
1	2,1	10,0	2,7	3,6	4,3
2	6,0	54,5	66,8	2,6	2,5

Таблица 6. Влияние режимов травления деталей из кварцевого стекла на качество обработанной поверхности

Table 6. Influence of etching modes of quartz glass parts on the quality of the treated surface



Окончание табл. 6
Table 6 (continued)

№ опыта	Образец № 1	Образец № 2
3		
4		

Заключение

По данным, полученным в ходе экспериментов, можно сделать вывод, что наибольший съём материала при менее длительной обработке был получен на образце № 1. Постоянная подача капельным методом в зону обработки полировальной суспензии повышает съём кварцевого стекла в единицу времени и приводит к уменьшению значения параметра шероховатости. Однако результаты снимков показывают наличие царапин и многочисленных выступов высотой до 50 нм, что свидетельствует о неравномерности распределения абразивных зерен в зоне резания и значительном колебании их размеров.

Таким образом, для получения поверхности с более низким уровнем и числом дефектов необходимо:

- обеспечить постоянную и равномерную подачу свободного абразива в зону обработки с учетом вязкости полировальной суспензии, температуры и концентрации зерен в соответствии с требуемым снятием припуска материала в единицу времени;
- уменьшить концентрацию абразивных зерен в полировальной суспензии;
- использовать меньшее по размерам единичное зерно свободного абразива;
- обеспечить равномерную концентрацию абразивных зерен в объеме жидкости, чтобы исключить образование больших агрегатов и их дальнейшее формирование в конгломераты;
- учесть реальную глубину, длину и ориентацию микроцарапин при изучении ее влияния на напряженно-деформированное состояние и долговечность изделия при эксплуатации.

Библиографические ссылки

1. Котельников М. А., Щенятский А. В. Расчет и сравнительный анализ чувствительного элемента навигационных приборов // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами оборудования : материалы VII Междунар. конф. : в 2 т. 2019. Т. 1. С. 255–261.
2. Лунин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология : монография. М. : Радиотехника, 2014. 174 с.
3. Ветошкин В. М., Крылов П. Н. Влияние обработки низкоэнергетичными ионами на шероховатость подложек из ситалла, поликора и кварца // Поверхность. Рентгеновские синхронные и нейтронные исследования. 2010. № 10. С. 57–59.
4. Shchenyatsky A., Basharova A., Pivarčiová E. Analysis of the results of the finishing process for manufacturing low-hardness products from non-metallic structural materials. *Materials Today*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 2576-2580. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.251>.
5. Братан С. М., Колесов А. Г., Роцупкин С. И. Идентификация параметров съема при комбинированном шлифовании токопроводящих хрупких материалов // Вестник современных технологий. 2017. № 8. С. 16–22.
6. Huanpan Xiao, Zhi Chen, Hairong Wang, Jiuhan Wang, Nan Zhu. Effects of grinding parameters on surface roughness and subsurface damage and their evaluation in fused silica. *Optics express*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 4638-4655. <https://doi.org/10.1364/OE.26.004638>.
7. Щенятский А. В., Башарова А. А. Параметры обрабатываемого инструмента и качество элементов изделий // Вестник ИЖГТ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 2. С. 3–10. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-3-10
8. Братан С. М., Богуцкий В. Б., Колесов А. Г. Математическое моделирование процесса доводки прецизионных поверхностей упругих пластин с поверх-

ностно-активными веществами // Научное издание // Технологии в машиностроении. 2016. Вып. 10 (64). С. 26–32.

9. Xianqun H., Chaoshui X. Specific Energy as an Index to Identify the Critical Failure Mode Transition Depth in Rock Cutting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 49, pp. 1461-1478.

10. Salvati E. [The effect of eigenstrain induced by ion beam damage on the apparent strain relief in FIB-DIC residual stress evaluation]. *Materials and Design*, 2016, no. 92, pp. 649-658.

11. Ахметшин Э. А., Чередниченко А. Г. Исследование процессов декорирования кварца методом химического травления // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. XXXI, № 15. С. 66–69.

References

1. Kotelnikov M.A., Schenytskyi A.V. *Raschet i sravnitel'nyi analiz chuvstvitel'nogo elementa navigatsionnykh priborov* [Calculation and comparative analysis of the sensitive element of navigation devices]. *Tekhnicheskie universitety: integratsiya s evropeiskimi i mirovymi sistemami oborudovaniya : materialy VII Mezhdunar. konf.* [Proc. of the VII International conference “Technical universities: integration with European and world equipment systems”], 2019, vol. 1, pp. 255-261 (in Russ.).

2. Lunin B.S., Matveev V.A., Basarab M.A. *Volnoy tverdotelnui giroskop. Teoriya i tekhnologiya* [Wave solid-state gyroscope. Theory and technology]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014, 174 p. (in Russ.).

3. Vetoshkin V.M., Krilov P.N. [Effect of low-energy ion treatment on the roughness of Sitall, polycor, and quartz substrates]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie sinkhronnye i neitronnye issledovaniya*, 2010, no. 10, pp. 57-59 (in Russ.).

4. Shchenyatsky A., Basharova A., Pivarčiová E. Analysis of the results of the finishing process for manufacturing low-hardness products from non-metallic structural materials. *Materials Today*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 2576-2580. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.251>.

5. Bratan S.M., Kolesov A.G., Roshchupkin S.I. [Identification of removal parameters for combined grinding of conductive brittle materials]. *Vestnik sovremennykh tekhnologii*, 2017, no. 8, pp. 16-22 (in Russ.).

6. Huapan Xiao, Zhi Chen, Hairong Wang, Jiuhan Wang, Nan Zhu. Effects of grinding parameters on surface roughness and subsurface damage and their evaluation in fused silica. *Optics express*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 4638-4655. <https://doi.org/10.1364/OE.26.004638>.

7. Shchenyatsky A., Basharova A. [Parameters of the processing tool and quality of product elements]. *Vestnik IzhGT imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 3-10 (in Russ.).

8. Bratan S.M., Bogutsky V.B., Kolesov A.G. [Mathematical modeling of the process of finishing precision surfaces of elastic plates with surfactants]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2016, vol. 10, pp. 26-32 (in Russ.).

9. Xianqun H., Chaoshui X. Specific Energy as an Index to Identify the Critical Failure Mode Transition Depth in Rock Cutting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, vol. 49, pp. 1461-1478.

10. Salvati E. [The effect of eigenstrain induced by ion beam damage on the apparent strain relief in FIB-DIC residual stress evaluation]. *Materials and Design*, 2016, no. 92, pp. 649-658.

11. Ahmetshin E.A., Cherednichenko A.G. [Investigation of quartz decoration processes by chemical etching]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2017, vol. XXXI, no. 15, pp. 66-69 (in Russ.).

Influence of Polishing and Etching Modes for Fragile Non-Metallic Parts Made of Quartz Glass on the Quality of the Treated Surface

A.A. Basharova, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.V. Shchenyatskiy, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

In modern navigation products, gyroscopes are widely used, the main element of which is a sensitive element – a resonator made of isotropic optical materials. The quality of the resonator surface treatment affects the long-term stability of the gyroscope and the accuracy of the navigation system. To achieve high surface quality, various methods are used for processing the workpiece, one of which is the method of layer-by-layer removal of the disturbed layer by repeating the operations of mechanical and chemical processing. The paper considers the influence of polishing and etching modes of quartz glass parts on the quality of the treated surface. Finish machining is applied to axi-symmetric bodies of revolution. Experiments on polishing quartz glass samples were performed, taking into account the factors that affect the surface quality. The influence of the polishing suspension on the polishing process is considered in detail, while other factors are taken into account, such as the geometry and surface roughness before processing, the quality of the polishing tool, the processing time and mode. Processing modes are assigned based on data about the geometry of the tool for polishing quartz glass parts, the developed mathematical model of the movement of a single grain of abrasive, as well as its trajectory for the tool and part. The surface roughness was estimated using a probe scanning microscope. These studies are aimed at improving the surface quality with physical and chemical methods of impact on the part, as well as ensuring high accuracy of processing and surface quality without micro-cracks and scratches.

Keywords: polishing, etching, loose abrasive, trajectory, quartz glass, surface roughness.

Получено 18.05.2020

Образец цитирования

Башарова А. А., Щенятский А. В. Влияние режимов полирования и травления деталей из кварцевого стекла на качество обработанной поверхности // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 3. С. 31–37. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-31-37.

For Citation

Basharova A. A., Shchenyatskii A. V. [Influence of Polishing and Etching Modes for Fragile Non-Metallic Parts Made of Quartz Glass on the Quality of the Treated Surface]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 31-37 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-31-37.