

УДК 621.7.01

DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-3-10

ПАРАМЕТРЫ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И КАЧЕСТВО ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА *

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

Рассматриваются методы обработки стекла, в том числе кварцевого. Исследования направлены на улучшение качества поверхности при физическом и химическом методах воздействия на изделие, обеспечение высокой точности обработки и качества поверхности без микротрещин и царапин. Обработка применялась к телам вращения. В качестве полирующего инструмента применялись полиуретаны с твердыми включениями. Исследованы параметры твердых включений и оценено их влияние на качество получаемой поверхности. Жесткость станка, оснастки значительно превышала жесткость обрабатываемой детали и полирующего инструмента, подпружиненного в осевом направлении.

Получены результаты исследования для операций шлифования, полирования и травления образцов кварцевого стекла с разными режимами обработки. Проведена оценка влияния этих процессов на значение параметра шероховатости поверхности кварцевого стекла. Установлено, что существует ряд факторов, влияющих на качество поверхности стекла при обработке: геометрия и шероховатость поверхности перед обработкой; качество инструмента для полирования, механизм процесса травления; время и режимы при полировании, а также влияние полирующей суспензии. При обработке происходит изменение параметра шероховатости, зависящее от формирования макрогеометрии обрабатываемой поверхности в процессе полирования и травления; как следствие, происходит разделение на условные границы зон обработки. Формирование макрогеометрии обусловлено схемой полирования, размерами и геометрией инструмента, а также точностью юстировки станка. Наглядно представлены результаты исследования, проанализированы полученные данные экспериментов по полированию и травлению, сделаны выводы по данной работе.

Ключевые слова: кварцевое стекло, шероховатость, шлифование, полирование, травление, полиуретаны.

Введение

В настоящее время изделия из кварцевого стекла широко применяются для различных технических объектов и измерительных систем [1]. Для отработки геометрии изделий из хрупких материалов, в том числе из кварцевого стекла, проводится моделирование изделия с помощью метода конечных элементов [2]. Технологические способы достижения высокой точности [3–5] не всегда обеспечивают требуемую работоспособность изделия. В некоторых случаях для компенсации погрешностей изготовления сопрягаемых поверхностей применяют различные компаунды [6]. Особое место в технологии занимают способы сборки соединения с натягом [7]. Однако совершенствование технологии, включающее в себя как механиче-

скую, так и химическую виды обработки, требует более подробного изучения.

Цель исследования – определить, как совершенствование процессов химической и физико-технической обработки хрупких неметаллических изделий влияет на повышение качества поверхности обрабатываемой заготовки.

Об инструментах и процессе полирования хрупких неметаллических материалов

Процесс обработки хрупких неметаллических материалов, в частности кварцевого стекла, заключается в нескольких этапах обработки: механической – шлифование, полирование; химической – травление, снятие внутренних напряжений в стекле – отжига. Рассматривается процесс полирования кварцевого стекла, его особенности, а также влияние других процессов

© Щенятский А. В., Башарова А. А., 2019

* Статья подготовлена в рамках работ по проекту 01.06.01/18ЩАВ «Динамика, прочность, напряженно-деформированное состояние соединений и чувствительных элементов навигационных приборов», реализуемому на основании приказа ректора ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» № 1493 от 29 декабря 2018 г. «О грантовой поддержке приоритетных исследований ученых ИжГТУ имени М. Т. Калашникова».

обработки. Процесс полирования является завершающим этапом механической обработки кварцевого стекла, предназначенный для создания гладкой, прозрачной и точной поверхности с шероховатостью не более сотых долей микрометра. Искажение формы обработанной поверхности, а также наличие на ней других дефектов недопустимо для деталей из кварцевого стекла, применяемых для точных приборов, используемых в навигации. Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что процесс механической обработки с заданными параметрами геометрии и качества обрабатываемой поверхности является актуальным для приборов, используемых в качестве систем навигации.

О механизме полирования твердых кристаллов, таких как кварцевое стекло, известно мало [10–13]. Задача исследования заключается в разработке режимов полирования, учитывая особенности кварцевого стекла, обладающего, с одной стороны, изотропными свойствами и анизотропностью и спайностью кристаллов – с другой, что затрудняет механическую обработку полированием.

Для полирования деталей широко используются полиуретаны [14]. В работе процесс полирования плоских образцов из кварцевого стекла марки КУ-1 осуществляется кругом из полиуретана твердостью по Шору $0,6 \pm 3$ усл. ед. и кажущейся плотностью $0,8 \pm 0,03$ г/см³ (рис. 1).

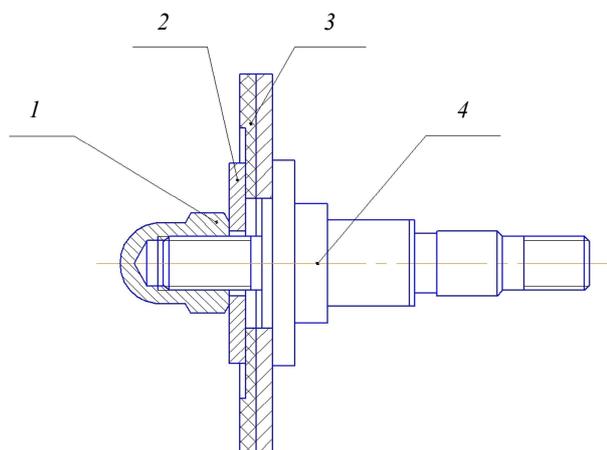


Рис. 1. Инструмент для полирования: 1 – гайка; 2 – шайба; 3 – диск полировальный; 4 – полировальник

Fig. 1. Polishing tool: 1 - nut; 2 - washer; 3 - buff wheel; 4 - polishing tool

Исследование макроструктуры полиуретана, используемого в качестве материала, приклеенного к оправке, показало, что в полиуретане есть минеральная составляющая (тонкоизмельченный кварцевый порошок) с частицами не-

правильной формы размером 15...70 мкм (рис. 2). То есть размеры абразива отличаются в некоторых случаях более чем в 4 раза, что может отрицательно сказаться на обеспечении качества обрабатываемой поверхности.

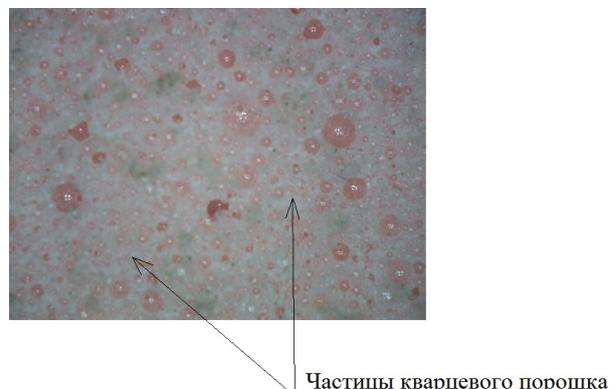


Рис. 2. Частицы кварцевого порошка 15...70 мкм в структуре полиуретана ($\times 16$)

Fig. 2. Particles of quartz powder 15...70 мкм in the structure of polyurethane ($\times 16$)

Обработка образцов из кварцевого стекла химико-механическим методом.

Анализ результатов

Для исследования было изготовлено 3 образца размерами $\varnothing 20$ мм и высотой $h = 9$ мм. Плоская поверхность образцов получена шлифованием алмазными кругами с зернистостью 125/100, 80/63 и 40/28 мкм (ГОСТ 3647–80 Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля) на высоту 2 мм. После операции шлифования образцы подвергались травлению в растворе плавиковой кислоты при температуре $T = 57 \pm 3$ °С в течение 11 мин. После каждой обработки у плоской поверхности образцов контролировался параметр шероховатости R_a (табл. 1). Измерение параметра шероховатости проводилось на приборе для измерения отклонения от круглости фирмы Mahr, точность измерения прибора 0,02 мкм.

Как видно из табл. 1, шероховатость поверхности увеличивается после травления образца № 1 в 4,08 раза, образца № 2 – в 2,5 раза, образца № 3 – в 8 раз.

Первое полирование всех образцов проводилось при ниже приведенных условиях. Деталь устанавливается на высокоточный токарный станок; радиальное биение установленной детали не более 1 мкм; инструмент предварительно замочен в деионизованной воде в течение 5 мин. При полировании осуществлялась подача полировальной суспензии, средний размер частиц

которой составляет 1-2 мкм, периодичность 1 раз в 60 сек. Частота вращения инструмента 100 об/мин, детали – 100 об/мин. Угловые скорости

инструмента и детали имеют разные направления, время обработки 6 ч. Схема обработки представлена на рис. 3.

Таблица 1. Данные измерения шероховатости образцов после шлифовки и травления

Table 1. Sample roughness measurement data after grinding and etching

Шероховатость	Образец № 1 шлифован зерном 125/100 мкм	Образец № 2 шлифован зерном 80/63 мкм	Образец № 3 шлифован зерном 40/28 мкм
После шлифования, Ra, мкм	0,12	0,02	0,01
После травления, Ra, мкм	0,49	0,05	0,08

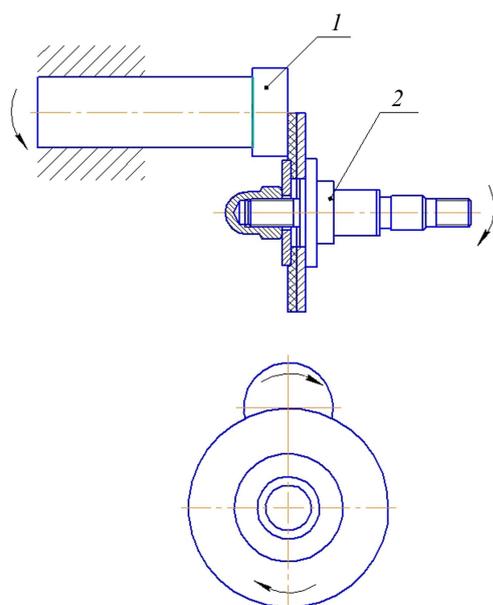


Рис. 3. Схема торцевой обработки плоских образцов инструментом для полирования: 1 – образец; 2 – инструмент для полирования

Fig. 3. Scheme of the mechanical processing of flat samples, tool for polishing: 1 - sample; 2 - polishing tool

Контроль деталей, после операции полирования показал, что снятие материала на образцах прошло неравномерно. Дальнейшие замеры

шероховатости учитывали неплоскостность образцов. На рис. 4 показана схема измерения шероховатости на образцах № 1, 2, 3.

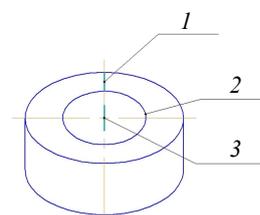


Рис. 4. Схема измерения шероховатости плоской поверхности образцов после обработки: 1 – участок измерения AB; 2 – участок изменения шероховатости поверхности; 3 – участок измерения CD

Fig. 4. The scheme of measurement of roughness the flat surface sample after processing: 1 - measurement area AB; 2 - the area changes the surface; 3 - measurement area CD

Измерения проводились в зоне отрезков AB и CD, не имеющих четкую границу. Длина каждого замера на отрезках составила 1,75 мм. Далее образцы № 1, 2, 3 были протравлены в растворе плавиковой кислоты в течение 2 мин. Данные по измерению шероховатости образцов после полировки № 1 и травления в течение 2 мин. представлены в табл. 2.

Таблица 2. Данные измерения шероховатости образцов после первого полирования и травления в течение 2 мин

Table 2. Measurement data of the roughness of the samples after the first polishing and etching for 2 min

Шероховатость	Образец № 1 шлифован зерном 125/100 мкм		Образец № 2 шлифован зерном 80/63 мкм		Образец № 3 шлифован зерном 40/28 мкм	
	AB	CD	AB	CD	AB	CD
После полирования № 1, Ra, мкм	0,15	2,68	0,01	0,03	0,00	0,00
После травления 2 мин, Ra, мкм	0,01	2,41	0,01	0,02	0,00	0,00

По полученным результатам выявлено, что в зоне отрезка AB на всех образцах после полирования шероховатость меньше, чем в зоне отрезка CD, для образца № 1 в 17,9 раз, № 2 – в 3 раза, № 3 – не изменилось. Уменьшение зна-

чения параметра шероховатости после травления в зоне отрезка AB составило для образца № 1 в 15 раз, № 2 – не изменилось, № 3 – не изменилось; в зоне отрезка CD для образца № 1 в 1,1 раза, № 2 – в 1,5 раза, № 3 – не изменилось.

Таким образом, выяснено, что травление в течение 2 мин для образцов № 1, 2 с заданными характеристиками ведет к уменьшению значения параметра шероховатости и сглаживанию поверхности, для образца № 3 значение параметра шероховатости не изменилось.

Второе полирование проводилось при тех же условиях, что и первое: частота вращения детали 200 об/мин, частота вращения инструмента 100 об/мин, время обработки 3 ч. Также было проведено травление в растворе плавиковой кислоты в течение 4 мин. Данные по измерению шероховатости образцов после второго полирования и травления в течение 4 мин. отображены в табл. 3.

По данным, приведенным в табл. 3, можно сделать вывод о том, что значение параметра

шероховатости после травления в течение 4 мин. для образца № 1 в зоне отрезка *AB* уменьшилось в 5 раз, а в зоне отрезка *CD* – в 3,6 раза. Противоположные зависимости можно увидеть для образцов № 2 и 3. Значения параметров шероховатости после травления: для образца № 2 в зоне отрезка *AB* увеличились в 10 раз, в зоне отрезка *CD* – в 4 раза; для образца № 3 в зоне отрезка *AB* увеличилось в 13,1 раза, в зоне отрезка *CD* – в 2,5 раза.

Третье полирование проводилось способом, представленным ранее. Частота вращения детали 400 об/мин, частота вращения инструмента 100 об/мин, время обработки 6 ч. Данные по результатам полирования представлены в табл. 4.

Таблица 3. Данные измерения шероховатости образцов после второго полирования и травления в течение 4 мин

Table 3. Measurement data for sample roughness after the second polishing and pickling for 4 min

Шероховатость	Образец № 1 шлифован зерном 125/100 мкм		Образец № 2 шлифован зерном 80/63 мкм		Образец № 3 шлифован зерном 40/28 мкм	
	<i>AB</i>	<i>CD</i>	<i>AB</i>	<i>CD</i>	<i>AB</i>	<i>CD</i>
После полирования № 2; Ra, мкм	0,01	2,16	0,00	0,01	0,00	0,01
После травления 4 мин, Ra, мкм	0,00	0,61	0,01	0,02	0,01	0,01

Таблица 4. Данные измерения шероховатости образцов после третьего полирования

Table 4. Measurement data of sample roughness after third polishing

Шероховатость	Образец № 1 шлифован зерном 125/100 мкм		Образец № 2 шлифован зерном 80/63 мкм		Образец № 3 шлифован зерном 40/28 мкм	
	<i>AB</i>	<i>CD</i>	<i>AB</i>	<i>CD</i>	<i>AB</i>	<i>CD</i>
После полирования № 3, Ra, мкм	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

По результатам замера шероховатости на образцах № 1, 2, 3 можно сделать вывод, что поверхность образцов в зоне отрезка *AB* и *CD* выровнялась после третьего полирования, и изменение величины параметра шероховатости стало в пределах 0,001...0,004 мкм. Все испытания проводились при условии обеспечения одинаковой силы поджатия полировального инструмента к обрабатываемой заготовке, что позволило снизить влияния жесткостей обрабатывающего инструмента и заготовки на конечный результат. В случае когда жесткость заготовки становится небольшой необходимо будет учитывать деформации хрупкой заготовки и обрабатывающего инструмента, для повышения скорости и точности обработки.

На рис. 5–10 представлены графики изменения параметра шероховатости на образцах № 1, 2, 3 согласно схеме замеров. По оси абсцисс расположено изменение шероховатости поверхности, по оси ординат проводимые операции.

Заключение

По полученным зависимостям параметра шероховатости образцов № 1, 2 и 3 от технологических факторов можно сделать вывод, что на качество поверхности кварцевого стекла при обработке влияют:

- геометрия и шероховатость поверхности, полученные шлифованием;
- инструмент для полирования и его качество, точность юстировки станка, а также используемый в качестве абразива материал;
- режимы, число и последовательность операций травления;
- время, режимы и операции полирования.

Проведенные в работе эксперименты показали, что для достижения требуемого качества поверхности, в том числе и параметра шероховатости, а также повышения эффективности технологических процессов полирования и травления необходимо дальнейшее изучение влияния основных факторов, влияющих на качество по-

верхности кварцевого стекла, определение оптимальных режимов обработки, сочетания жесткостей обрабатываемой детали и обрабаты-

вающего инструмента, исследование влияния СОТС и производительности ее подачи в зону обработки.

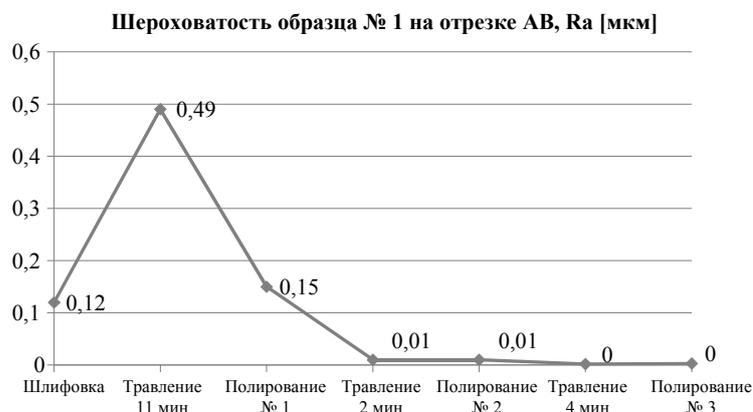


Рис. 5. Изменение параметра шероховатости образца № 1 в зоне отрезка АВ

Fig. 5. Changing the roughness parameter of sample no. 1 in the zone of segment AB

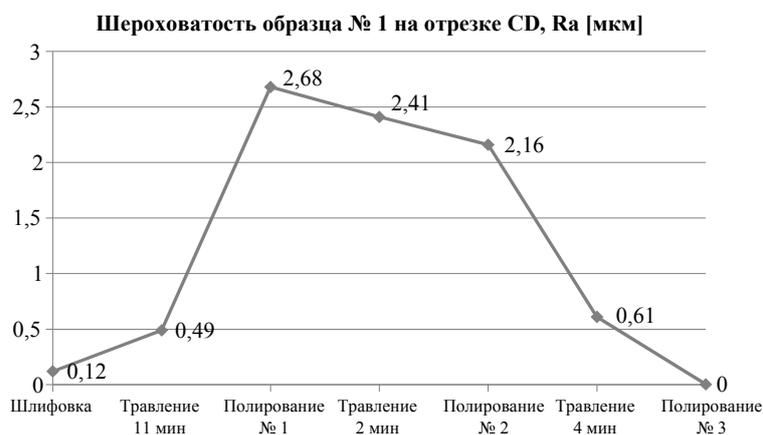


Рис. 6. Изменение параметра шероховатости образца № 1 в зоне отрезка CD

Fig. 6. Changing the roughness parameter of sample no. 1 in the zone of segment CD



Рис. 7. Изменение параметра шероховатости образца № 2 в зоне отрезка АВ

Fig. 7. Changing the roughness parameter of sample no. 2 in the zone of segment AB



Рис. 8. Изменение параметра шероховатости образца № 2 в зоне отрезка CD

Fig. 8. Changing the roughness parameter of sample no. 2 in the zone of segment CD



Рис. 9. Изменение параметра шероховатости образца № 3 в зоне отрезка AB

Fig. 9. Changing the roughness parameter of sample no. 3 in the zone of segment AB



Рис. 10. Изменение параметра шероховатости образца № 3 в зоне отрезка C

Fig. 10. Changing the roughness parameter of sample no. 3 in the zone of segment CD

Библиографические ссылки

1. Котельников М. А., Щенятский А. В. Анализ стержневого чувствительного элемента твердотельного волнового гироскопа // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 1. С. 189–195.
2. Постановка задачи математического моделирования стержневого чувствительного элемента твердотельного волнового гироскопа / М. А. Котельников, А. А. Башарова, П. В. Лekomцев, А. В. Щенятский // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 1. С. 12–14.
3. Dagmar Hulsenberg, Alf Harnisch, Alexander Bismarck. Microstructuring of Glasses. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2008, 339 p.
4. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов [и др.]. М. : Машиностроение, 1985. 187 с.
5. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов, Э. А. Антонов, А. Байгожин [и др.] ; под ред. М. А. Окатова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : Политехника, 2004. 679 с.
6. Усынн В. А. Многослойные прессовые соединения с прослойкой из компаунда // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 2. С. 55–58.
7. Теория и технология гидропрессовых соединений : монография / А. В. Щенятский, И. В. Абрамов, Э. В. Соснович, К. А. Глухова. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2012. 496 с.
8. Селетков С. Г., Иванова С. С. Объект, субъект и предмет научно-квалификационной работы // Вестник ИжГТУ. 2014. № 1. С. 175–178.
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, Is. 4, vol. 49, pp. 1461-1478.
10. Орлов П. Н., Нестеров Ю. И., Полухин В. А. Процессы доводки прецизионных деталей пастами и суспензиями. М. : Машиностроение, 1975. 56 с.
11. Механическая обработка деталей из керамики и ситаллов / В. А. Хрульков, В. А. Тародей, А. Я. Головань, Ю. М. Буки. Саратов : Изд-во Саратовского университета, 1975. 352 с.
12. Яцерицын П. И., Зайцев А. Г., Барботько А. И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. Минск : Наука и техника, 1976. 328 с.
13. Masahiko Y., Sivanandam A., Matsumura T. Critical depth of hard brittle materials on nano plastic forming. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 59-70.
14. Филатов Ю. Д., Филатов А. Ю., Руденко М. А. Состояние поверхности рабочего слоя инструмента при полировании неметаллических материалов // Вісник СевНТУ: зб. наук. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. 2012. № 129. С. 258–263.

References

1. Kotelnikov M.A., Schenytskyi A.V. [Analysis of a rod sensitive element of a solid-state wave gyro]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2016, no. 1, pp. 189-195 (in Russ.).
2. Kotelnikov M.A., Basharova A.A., Lekomcev P.V., Schenytskyi A.V. [Statement of the problem of mathematical modeling of a rod sensitive element of a solid-state wave gyroscope]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2016, no. 1, pp. 12-14 (in Russ.).
3. Dagmar Hulsenberg, Alf Harnisch, Alexander Bismarck. Microstructuring of Glasses. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2008, 339 p.
4. Zubakov V.G., Semibratov M.N. *Tehnologiya opticheskikh detalei* [Technology optical details]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 187 p. (in Russ.).
5. Okatov M.A., Antonov E.A., Baigoghin A. *Spravochnik tehnologa-optika*. [Directory for technologist-opticist]. St. Petersburg, Politechnica Pybl., 2004, 679 p. (in Russ.).
6. Usynin V.A. [Multilayer press joints with compound interlayer]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2016, no. 2, pp. 55-58 (in Russ.).
7. Schenyatskyi A.V., Abramov I.V., Sosonovich E.V., Gluhova K.A. *Teoriya i tehnologiya gidropressovih soedineniy* [Theory and technology of hydraulic press connections]. Izhevsk, IzhGTU Publ., 2012, 496 p. (in Russ.).
8. Seletkov S.G., Ivanova S.S. [Object, subject and subject of scientific and qualification work]. *Vestnik IzhGTU*, 2014, no. 1, pp. 175-178 (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, Is. 4, vol. 49, pp. 1461-1478.
10. Orlov P.N., Nesterov U.I., Poluhin V.A. *Processy dovodki precizionnykh detalej pastami i suspenzijami* [Precision parts finishing processes with pastes and suspensions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 56 p. (in Russ.).
11. Hrul'kov V.A., Tarodej V.A., Golovan' A.Ja., Buki Ju.M. *Mehanicheskaja obrabotka detalej iz keramiki i sitallov* [Machining of parts made of ceramics and glass]. Saratov, Saratov University Publ., 1975, 352 p. (in Russ.).
12. Jashhericyn P.I., Zajcev A.G., Barbot'ko A.I. *Tonkie dovodochnye processy obrabotki detalej mashin i priborov* [Subtle finishing processes for processing machine parts and instruments]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976, 328 p. (in Russ.).
13. Masahiko Y., Sivanandam A., Matsumura T. Critical depth of hard brittle materials on nano plastic forming. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 59-70.
14. Filatov U.D., Filatov A.U., Rudenko M.A. [The state of the surface of the working layer of the tool when polishing non-metallic materials]. *Bulletin of SevNTU, Seriya mashinopriborostroenie i transport*, 2012, no. 129, pp. 258-263 (in Russ.).

Parameters of the Machining Tool and Quality of Quartz Glass Elements

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

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

This paper discusses the methods of processing glass, including quartz. Research is aimed at improving the quality of the surface in the physical and chemical methods of exposure to the product, to ensure high precision machining and surface quality without microcracks and scratches. Processing was applied to rotation bodies. Polyurethanes with solid inclusions were used as a polishing tool. The parameters of solid inclusions are investigated and their influence on the quality of the surface obtained is evaluated. The rigidity of the machine tooling significantly exceeded the rigidity of the workpiece and the polishing tool, spring-loaded in the axial direction.

The results of the study were obtained for the operations of grinding, polishing and etching quartz glass samples with different processing modes. The influence of these processes on the value of the surface roughness of silica glass was evaluated. It was established that there is a number of factors affecting the quality of the glass surface during processing, such as: geometry and surface roughness before processing; the quality of the polishing tool; the etching mechanism; time and modes during polishing, as well as the effect of the polishing slurry. During processing, a change in the roughness parameter occurs, depending on the formation of the macrogeometry of the surface to be treated in the course of polishing and etching, as a result, the division into conditional boundaries of the treatment zones occurs.

Keywords: quartz glass, roughness, grinding, polishing, etching, polyurethane.

Получено 17.12.2018

Образец цитирования

Щенятский А. В., Башарова А. А. Параметры обрабатывающего инструмента и качество элементов изделий из кварцевого стекла // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 2. С. 3–10. DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-3-10.

For Citation

Shchenyatskiy A.V., Basharova A.A. [Parameters of the machining tool and quality of quartz glass elements]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 3-10 (in Russ). DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-3-10.