

УДК 621.941.1

Алмазная лезвийная обработка оптических структурированных поверхностей на примере круговой линзы Френеля

**Грубый С.В.^{1,*}, Титов С.Н.^{1,2},
Лапшин В.В.²**

[*grusv@yandex.ru](mailto:grusv@yandex.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский
инструментальный институт, Москва,
Россия

В статье приведены результаты технологических исследований по алмазной лезвийной обработке оптических структурированных поверхностей – круговой линзы Френеля. Разобраны конструктивные особенности линз со структурированными поверхностями. Представлены требования к сверхточному оборудованию и конструктивные особенности алмазных монокристаллических резцов для обработки структурированных поверхностей. Изложена технология обработки линз, приведены режимы и условия алмазного точения. Приведены результаты метрологического контроля обработанных матриц по точности профиля и шероховатости обработанных поверхностей и рекомендации по схеме обработки, исключающей образование заусенцев. Разработанная технология была реализована в ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" при изготовлении круговой линзы диаметром 76,7 мм из полиметилметакрилата (ПММА).

Ключевые слова: круговые линзы Френеля; алмазные резцы; лезвийная обработка; сверхточный станок; оптическая поверхность

Введение

Основными элементами оптических систем являются линзы или зеркала (сферические или асферические), а также линзы или зеркала со сложным профилем (линзы Френеля) [1]. Линзы Френеля используют в качестве увеличительных, коллиматорных линз, концентраторов солнечной энергии, а также в качестве конденсоров в осветительных приборах [3 - 5]. Основными преимуществами линз подобного рода являются малые габариты, вес, а также низкая стоимость. Линзы Френеля могут иметь две базовые конфигурации: линейную и круговую. Круговая линза представляет собой плоский оптический эле-

мент, поверхность которого состоит из большого количества малых концентрических колец (канавок) заданного профиля. Эти канавки отдельно действуют как отражатели, поскольку каждая из них аппроксимируется плоской поверхностью, отражающей световой поток так, как это осуществляется обычной линзой [6].

1. Требования к линзам

Круговая линза Френеля (рис.1) представляет собой линзу толщиной 2 мм и диаметром 76,7 мм с обработанным профилем.

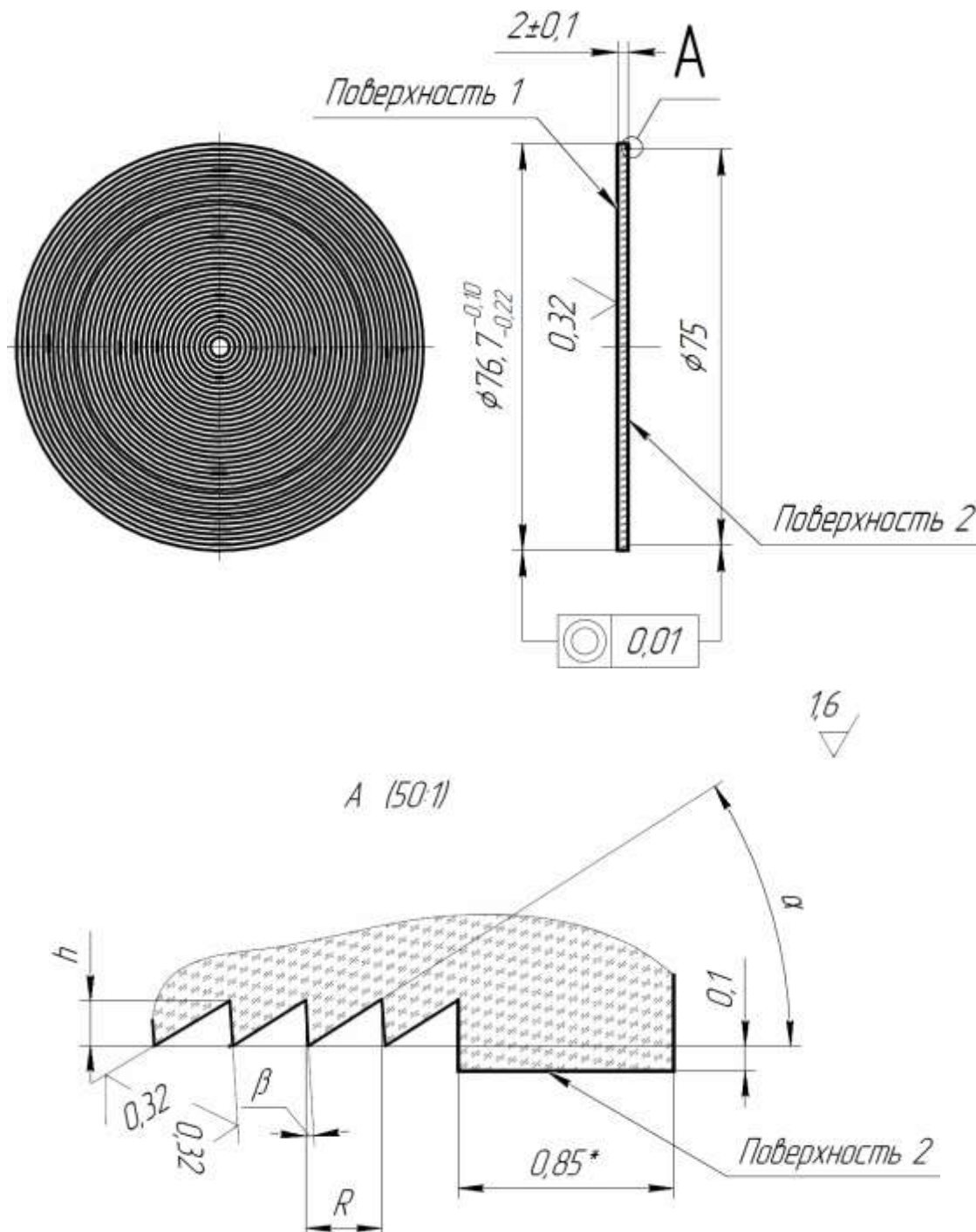


Рис.1. Эскиз круговой линзы Френеля

Материалом такой линзы является полиметилметакрилат (ПММА) - жесткий аморфный полимер, обладающий высокой прозрачностью, атмосферостойкостью, хорошими физико-механическими и электроизоляционными свойствами. ПММА имеет следующие усредненные характеристики: плотность $\rho = 1,18 \text{ г/см}^3$; предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{и}} = 125 \text{ МПа}$; предел прочности при растяжении $\sigma_{\text{р}} = 75 \text{ МПа}$; модуль упругости $E = 3\,300 \text{ МПа}$; относительное удлинение $\delta = 4,5 \%$; температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_t = (7 \dots 19) \cdot 10^{-5}$; температура размягчения 72°C ; рабочий диапазон температур $-40 \div +80^\circ\text{C}$, светопрозрачность 92% [2]. Данный материал обладает хорошим пропусканием в ультрафиолетовой области спектра.

Профиль линзы состоит из 126 концентрических колец с шагом по впадинам, равным 0,3 мм – рис. 2. Кольца располагаются на диаметре $\varnothing 75 \text{ мм}$. Глубина профиля колец варьируется от 2,1 мкм до 337,4 мкм, при этом угол наклона α изменяется в пределах от $0,406^\circ$ до $48,361^\circ$, начиная с 44 профиля появляется угол β , изменяющийся в пределах от $0,195^\circ$ до $18,303^\circ$.

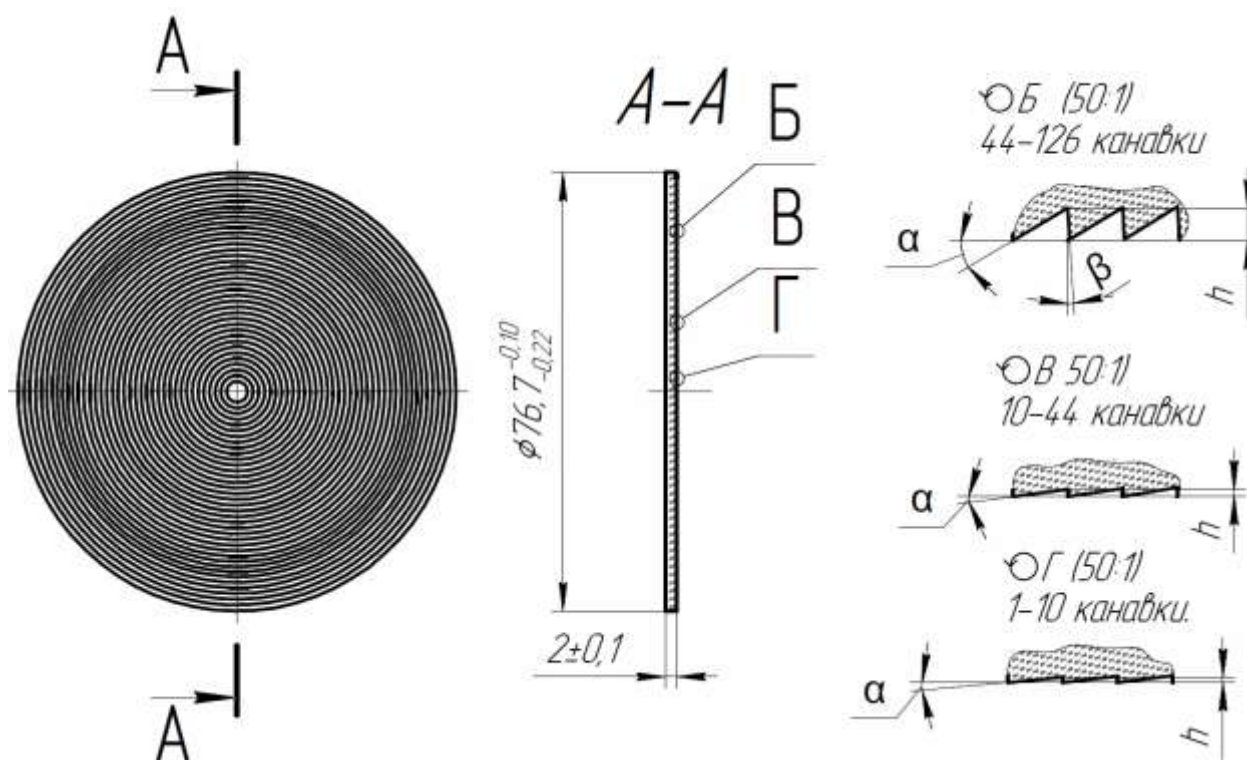


Рис.2. Геометрические параметры колец

В качестве примера в таблице 1 приведены геометрические параметры по 4 канавкам каждого типа.

Таблица 1. Заданные параметры канавок для обработки

Номер канавки	Шаг канавок R (мм)	Угол канавки α (град)	Глубина врезания резца h (мм)	Угол не-рабочей грани β (град)	Подвод резца в стартовую позицию X1 (мм)	Подвод резца в стартовую позицию Z1(мм)
1	0,3	0,406	0,0021	0	0,3	0,05
2	0,6	1,22	0,0064	0	0,6	0,05
3	0,9	2,035	0,0107	0	0,9	0,05
4	1,2	2,85	0,0149	0	1,2	0,05
10	3	7,73	0,0407	0	3	0,05
...						
11	3,3	8,535	0,0450	0	3,3	0,05
12	3,6	9,337	0,0493	0	3,6	0,05
13	3,9	10,134	0,0536	0	3,9	0,05
...						
44	13,2	30,704	0,1782	0,195	13,20078	0,05
45	13,5	31,202	0,1817	0,704	13,50285	0,049996
46	13,8	31,689	0,1852	1,202	13,80493	0,049989
47	14,1	32,166	0,1887	1,689	14,10704	0,049978

К линзам предъявляются высокие требования по качеству поверхности и точности изготовления. Шероховатость структурированных поверхностей должна быть не более Rz 0,32 мкм, допуск на основные линейные размеры составляет менее 100 мкм, допуск на угол α составляет 0,1°.

Для изготовления линз с указанными требованиями по точности и качеству использовано алмазное точение на сверхточном станке с числовым программным управлением (ЧПУ).

2. Требования к сверхточному станку для изготовления линз Френеля

Линзы обработаны на сверхточном станке с ЧПУ мод. «Асферика» в специализированной лаборатории ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ». Станок предназначен для алмазного точения и фрезерования сверхточных поверхностей деталей из различных материалов. Станок позволяет обрабатывать осесимметричные поверхности сложной формы с оптическим качеством, в т.ч. асферические, и френелевую оптику.

Сверхточный станок имеет следующие характеристики:

- аэростатические опоры в основных формообразующих узлах;
- приводы станка синхронные, линейные, маловиброактивные;
- станина станка установлена на виброизолирующих опорах;
- система ЧПУ станка обеспечивает погрешность позиционирования менее 0,1 мкм.

Станок оснащён метрологическим оборудованием для выставления инструмента в центр вращения поворотного стола. При обработке оптических элементов станок позволя-

ет обеспечить шероховатость поверхности менее $Ra\ 0,01$ мкм и погрешность формы менее 1 мкм. На данном станке имеется опыт обработки аналогичных по точности и качеству поверхностей [7,8].

3. Режущие инструменты

В качестве режущего инструмента использованы резцы из природного монокристаллического алмаза со специальной геометрией режущей части. Шероховатость рабочих поверхностей заточенных резцов составляет менее $Ra\ 0,01$ мкм, а радиус округления режущей кромки r находится в пределах $30\div 50$ нм.

Для обработки линз использованы острозаточенные алмазные резцы отечественного производства (рис.3) и алмазные резцы с радиусом при вершине 20 мкм голландской фирмы «Contour» (рис. 4). Погрешность радиуса при вершине резца фирмы «Contour» составляет менее 1 мкм. Использование инструмента с заданным радиусом при вершине позволяет внести в управляющую программу необходимые корректоры на радиус и повысить точность обработки профиля.

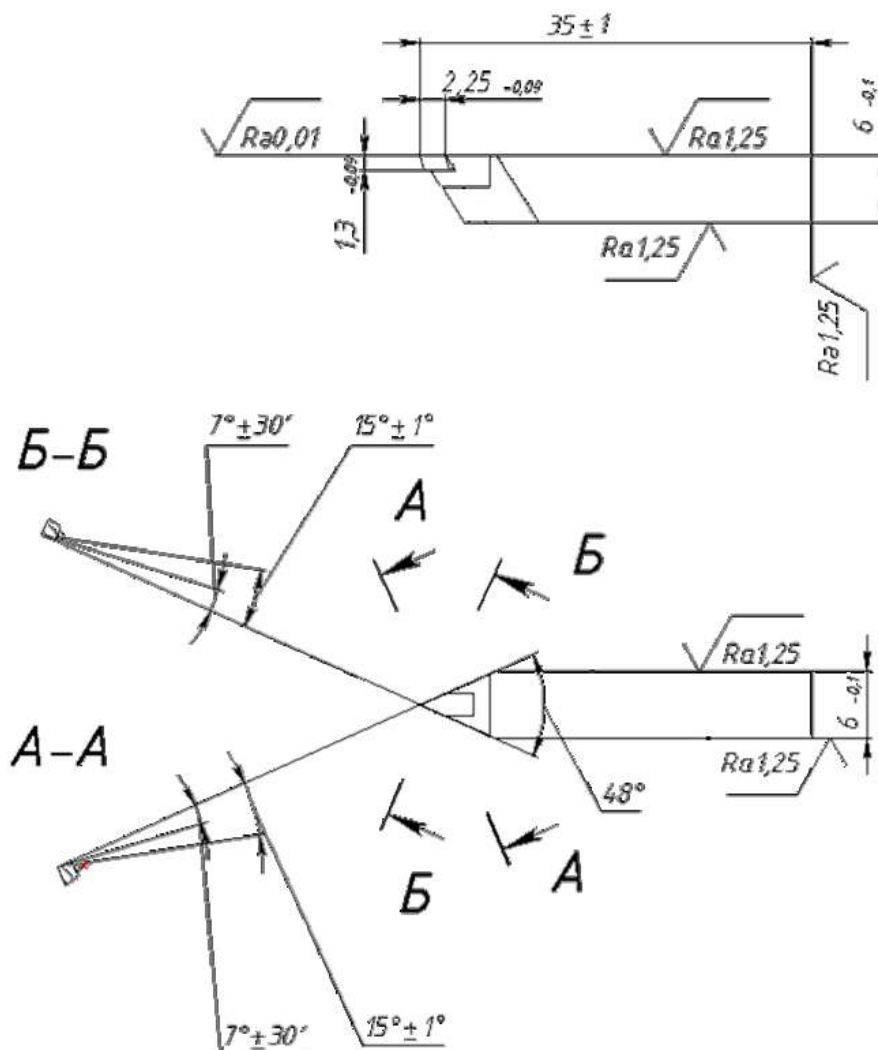


Рис.3. Острозаточенный алмазный резец отечественного производства

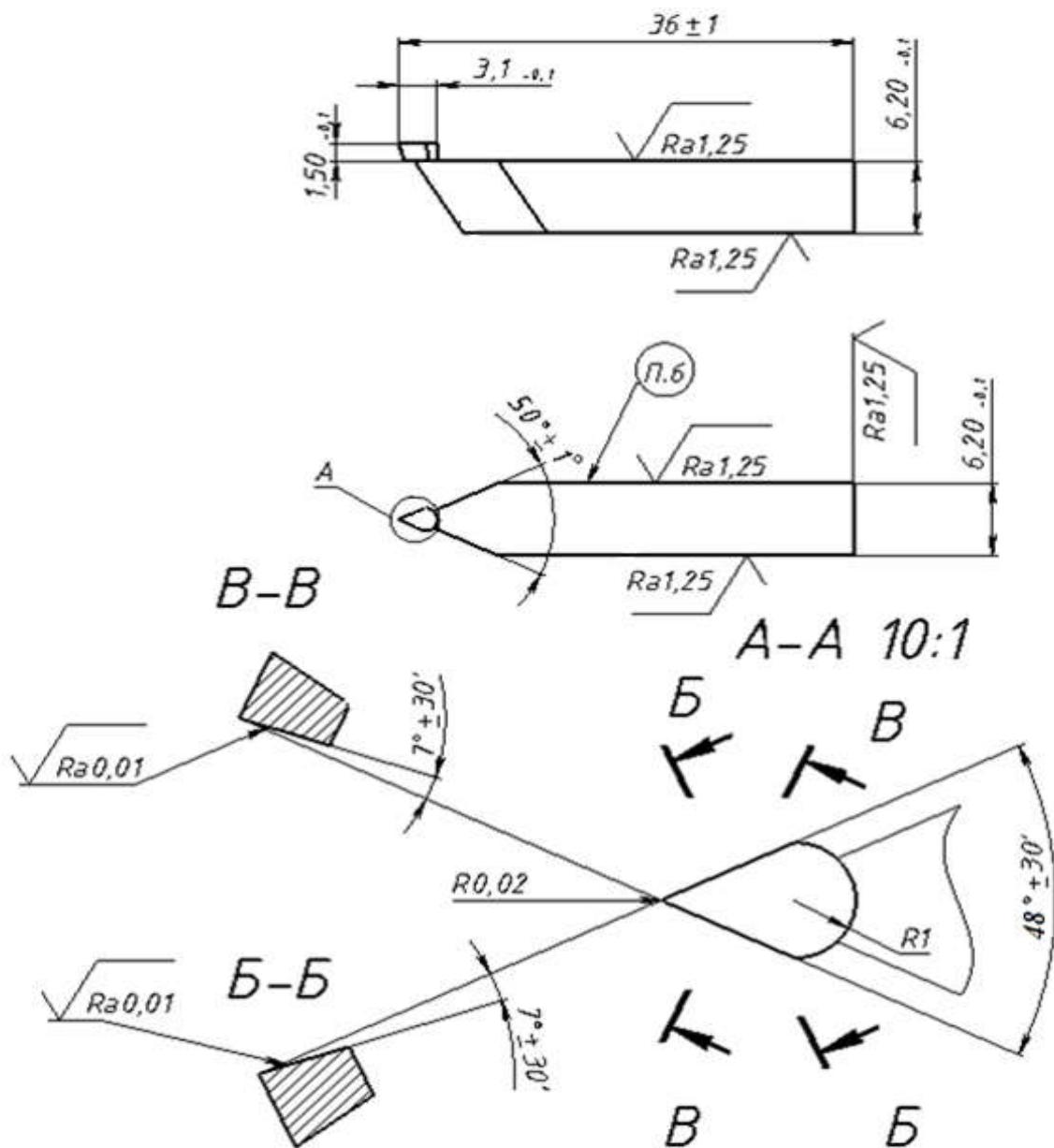


Рис.4. Острозаточенный алмазный резец фирмы «Адамас»

4. Технология изготовления и режимы обработки

Для изготовления линз использована заготовка в виде диска из полиметилметакрилата (ПММА). Заготовка $\varnothing 76,7$ мм и толщиной 2 мм, при помощи воска приклеена к металлическому диску $\varnothing 77$ мм, который прикрепляется к планшайбе, установленной на шпинделе станка.

Алмазный резец установлен в резцедержатель, который располагают на поворотном столе. Используемый резцедержатель имеет возможность регулировки инструмента по высоте центров шпинделя станка.

Перед обработкой линзы необходимо выполнить ряд подготовительных операций. После установки планшайбы с диском и заготовкой на шпиндель станка, необходимо проточить место под канавки до требуемого размера по толщине 0,1 мм и по диаметру $\varnothing 75$ мм. Точение по наружному цилиндру выполняется алмазным резцом с радиусом при вершине 2 мм, а подрезание торцев осуществляется черновым острозаточенным резцом. Обработка выполняется на ускоренных режимах, так как при предварительной обработке не требуется высокая точность и качество поверхности. Затем в резцедержатель устанавливается чистовой алмазный резец для обработки линз. Совмещение вершины инструмента с центром вращения поворотного стола выполняется с помощью микроскопа, перекрестие которого предварительно совмещено с центром.

Далее выполняют наладку с целью определения положения инструмента в системе координат относительно обрабатываемой детали. Для этого на станок устанавливают увеличительную камеру, с помощью которой определяют касание инструмента с обрабатываемой деталью. Также определяют угловые координаты, при которых правая и левая режущая кромка резца становятся параллельными образующей цилиндрической заготовки. После выполнения подготовительных операций в систему ЧПУ станка заносятся корректуры, которые задают необходимые системы координат.

После выполнения всех подготовительных наладок и составления текста программы обрабатывается профиль линзы.

Рассмотрено 2 схемы обработки профиля линзы: первая схема предусматривает точение от центра к периферии, однако эта схема была отклонена в связи с низким качеством обработки и образованием заусенцев.

Для второй схемы реализовано точение от периферии к центру заготовки. Последовательность обработки профиля по этой схеме состоит из следующих переходов(рис.5):

- 1) Подвод резца в стартовую позицию.
- 2) Обработка канавки врезным методом и формирование угла β , D_{s1} .
- 3) Выглаживание канавки D_{s2} .
- 4) Вывод резца из зоны обработки D_{s3} .
- 5) Отвод резца для выбора люфта, разворот на угол α_i , D_{s4} .
- 6) Перемещение резца в стартовую позицию D_{s5} .

Обработка по второй схеме позволила в значительной степени уменьшить количество холостых ходов, следствием чего послужило сокращение основного технологического времени на обработку с 4,5 часов до 1,5 часов.

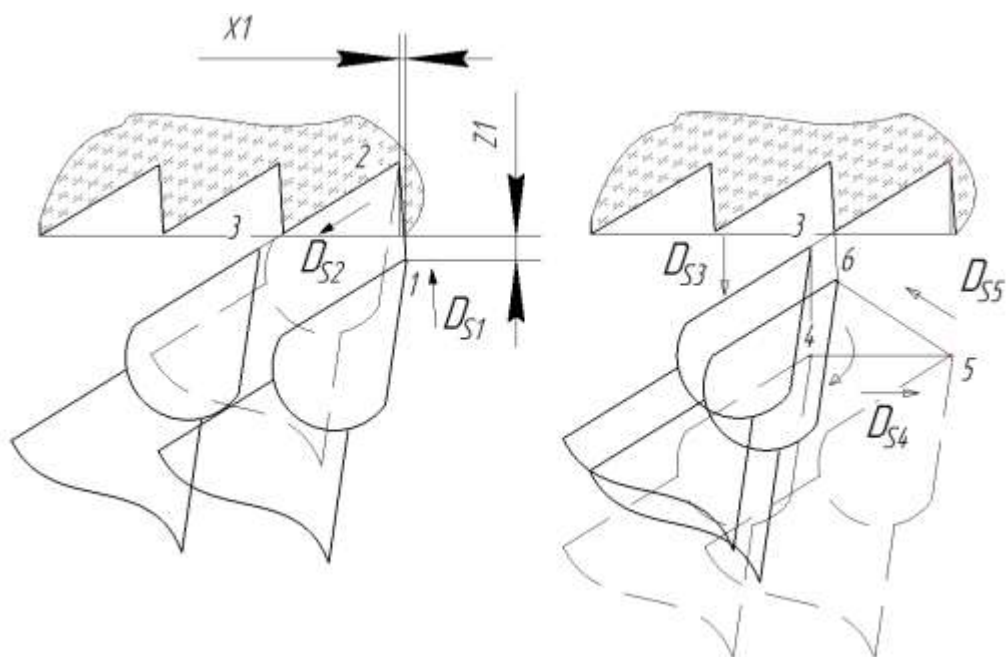


Рис.5. Последовательность обработки канавок с 1 по 126

Угол α образуется за счет разворота резца, угол β образуется в результате перемещение инструмента по заданной траектории из точки с координатами $(X1; Z1)$ в вершину канавки. Кинематическая схема обработки представлена в двух видах: главный вид (рис.6) и вид сверху (рис.7).

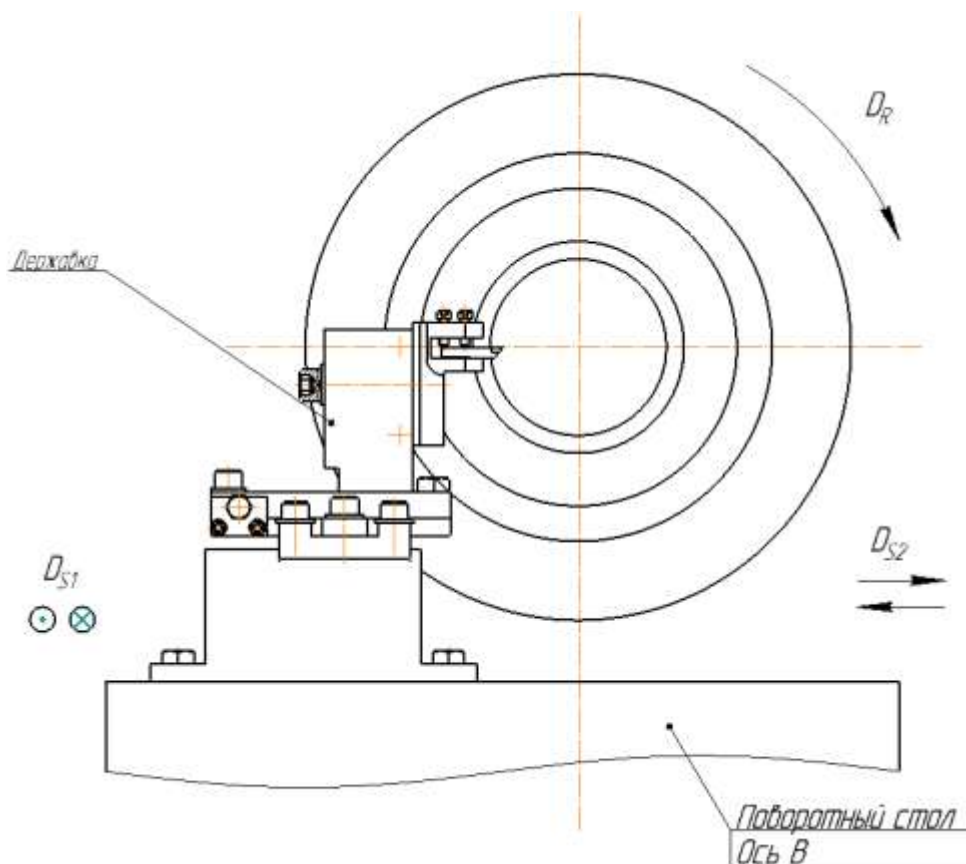


Рис.6. Кинематическая схема обработки круговых линз Френеля (главный вид)

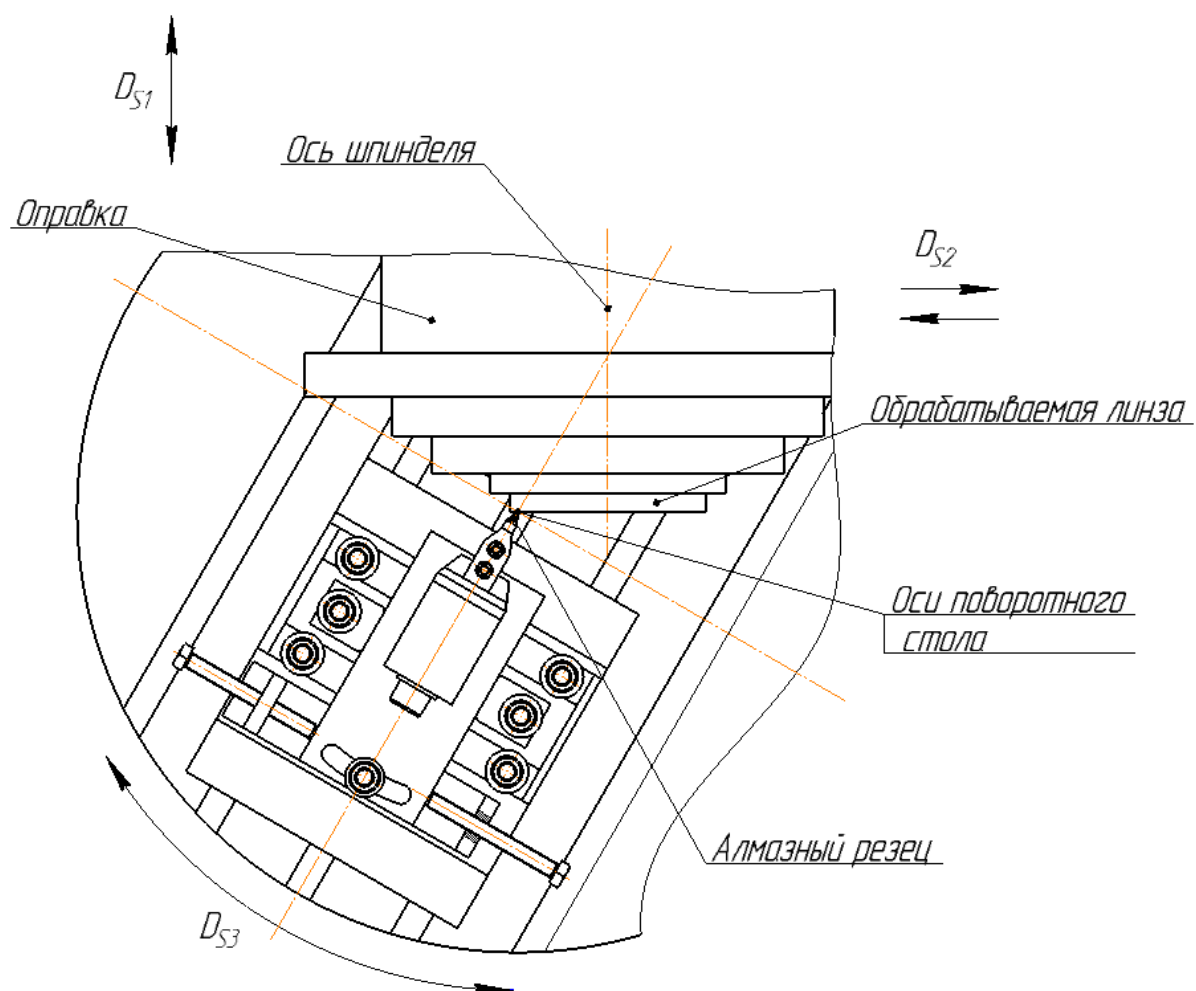


Рис.7. Кинематическая схема обработки круговых линз Френеля (вид сверху)

Установлены рациональные режимы обработки: частота вращения шпинделя $n = 500$ об/мин, подача $S = 2$ мкм/об.

После обработки линзы был проведен необходимый метрологический контроль параметров шероховатости и точности обработки. В качестве измерительного оборудования использовалась система NanoFocus® μ Surf, в которой реализован принцип конфокальной микроскопии. Ввиду того, что данный прибор не может выполнять сканирование поверхностей с большими наклонами, измерения шероховатости и точности обработки выполнялись на канавках с углом наклона не более 10° . Поворот стола прибора при измерениях осуществляется автоматически. Замеры шероховатости представлены на рис.8. Измерения проведены по 3-м образцам.

Обобщенные результаты контроля составили:

- шероховатость обработанных поверхностей $R_a - 0,015$ мкм;
- погрешность шага R – менее 1 мкм;
- погрешность угла профиля канавки – менее $0,1^\circ$.

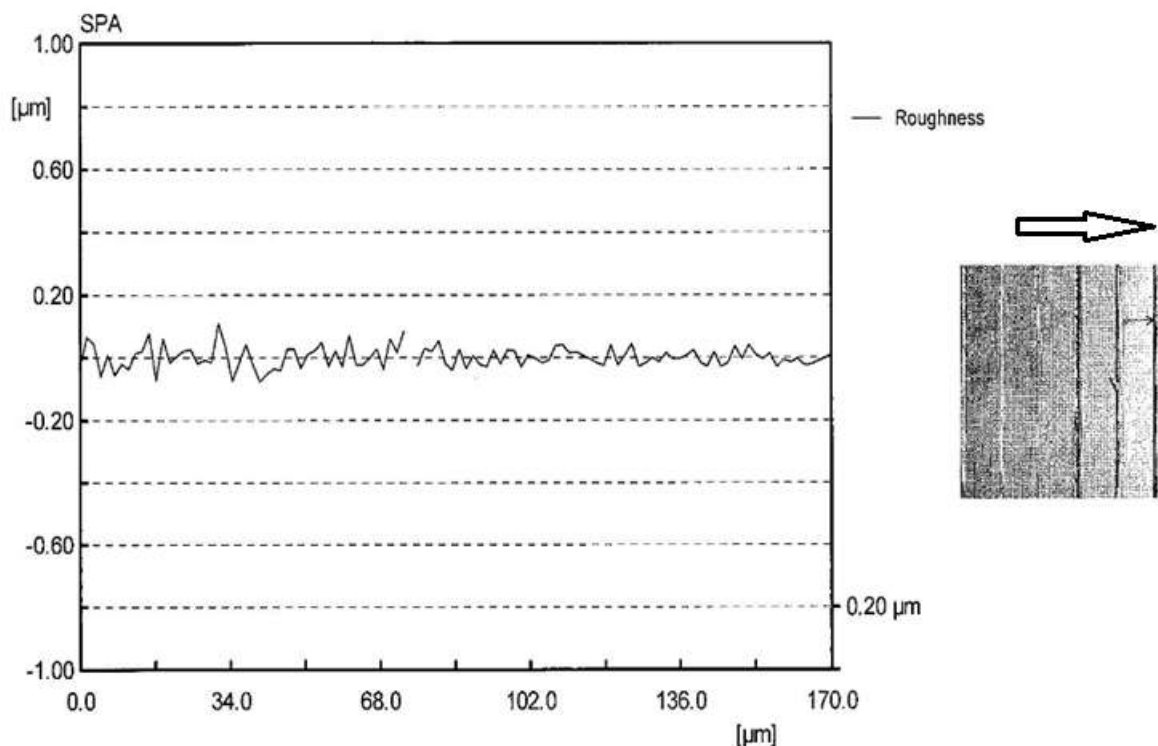


Рис.8 Пример профилограммы шероховатости обработанной поверхности

5. Заключение

В качестве метода обработки структурированных поверхностей на примере круговой линзы Френеля из полиметилметакрилата было выбрано точение алмазным монокристаллическим резцом, что удовлетворяет возможностям производства и заданным техническим параметрам оптической детали.

В качестве оборудования использован сверхточный станок, имеющий аэростатические опоры в основных формообразующих узлах, виброизолирующие опоры, систему числового управления с погрешностью позиционирования менее 0,1 мкм.

В качестве режущего инструмента использованы резцы из природного монокристаллического алмаза со специальной геометрией режущей части. Шероховатость рабочих поверхностей резцов составляет менее R_a 0,01 мкм, радиус округления режущей кромки r находится в пределах 30÷50 нм.

Выбрана схема обработки –точение поверхности линзы от периферии к центру заготовки, что позволяет устранить наличие заусенцев и получить линзу, удовлетворяющую заданным техническим требованиям.

Результаты метрологического контроля проведены по 3-м обработанным линзам. Полученные обобщенные данные контроля составили: профиля канавок R_a 0,015 мкм; погрешность шага R менее 1 мкм; погрешность угла α – менее 0,1°.

Разработанная технология рекомендована для использования при обработке структурированных поверхностей из оргстекла различных типоразмеров и назначения.

Список литературы

1. Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1981. 431 с.
2. Лосев И.П., Тростянская Е.Б. Химия синтетических полимеров. 3-е изд. М.: Химия, 1971. 615 с.
3. Davis A., Kuhnlenz F. Optical design using Fresnel lenses: Basic principles and some practical examples // Optik & Photonik. 2007. Vol. 4. Iss. 2. Pp. 52-55. Режим доступа: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/opph.201190287/pdf> (дата обращения 3.06.2017).
4. Gaurav A. Madhugiri, Karale S.R. High solar energy concentration with a Fresnel lens: A review // Intern. J. of Modern Engineering Research. 2012. Vol. 2. Iss. 3. Pp. 1381-1385. Режим доступа: http://www.ijmer.com/papers/vol2_issue3/EP2313811385.pdf (дата обращения 3.06.2017).
5. Sierra C., Vazquez A.J. High solar energy concentration with a Fresnel lens // J. of Materials Science. 2005. Vol. 40. Iss. 6. Pp. 1339-1343. DOI: [10.1007/s10853-005-0562-6](https://doi.org/10.1007/s10853-005-0562-6)
6. Khamooshi M., Salati H., Egelioglu F., Ali Hooshyar Faghiri, Tarabishi J., Saeed Babadi. A review of solar photovoltaic concentrators // Intern. J. of Photoenergy. 2014. Vol. 2014. Article ID 958521. 17 p. DOI: [10.1155/2014/958521](https://doi.org/10.1155/2014/958521)
7. Лапшин В.В., Захаревич Е.М., Грубый С.В. Технология обработки линейных негативных матриц для линз и призм Френеля // Вестник машиностроения. 2016. № 7. С. 60-65. Режим доступа: http://www.mashin.ru/eshop/journals/vestnik_mashinostroeniya/2016/07/ (дата обращения 3.06.2017).

Diamond Machining of Optical Structured Surfaces Using a Circular Fresnel Lens as an Example

S.V. Grubiy^{1,*}, S.N. Titov^{1,2},
V.V. Lapshin²

* grusv@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Russian Research & Development Tooling Institute,
Moscow, Russia

Keywords: circle Fresnel lens; diamond cutter; diamond turning; ultra precision machine; optical surface

Components of optical systems for various purposes include optical elements with structured surfaces, i.e. linear and circular Fresnel lenses. The objective of the conducted studies is to analyse design parameters and technological development of modes and conditions to ensure manufacturing circular Fresnel lenses with specified technology requirements.

The subject of the study is a circular Fresnel lens, which has a thickness of 2 mm and a diameter of 76.7 mm; its processed profile consists of 126 concentric rings with a valley pitch equal to 0.3 mm. The profile depth of the rings varies from 2.1 μm to 337.4 μm, with the profile angle varying from 0.406 ° to 48.361 °. The lens material is polymethyl methacrylate (PMMA) - a tough amorphous polymer, which has high transparency, weather resistance, good physical-mechanical and electrical insulating properties.

The article presents the results of applied research related to diamond machining of a Fresnel circular lens. Substantiates that there is a need to use an ultra-precise machine for lens processing and gives its main technical characteristics.

The design features and recommended domestic and foreign diamond mono-crystalline cutters for preliminary and finishing processing of structured surfaces, including Fresnel lenses are analysed.

The technology of diamond edge cutting machining of lenses is proposed, the modes and conditions of diamond turning to exclude finning are given.

The results of metrological control have confirmed the requirements for the profile accuracy and the roughness of surfaces machined.

The JSC "VNIINSTRUMENT" has implemented the developed technology on the ultra-precise specialised NC machine and recommended its use in machining the structured plexiglass surfaces of various sizes for different purposes.

References

1. Begunov B.N., Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. *Teoriia opticheskikh system* [Theory of optical systems]. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 431 p. (in Russian).
2. Losev I.P., Trostianskaia E.B. *Khimiia sinteticheskikh polimerov* [Synthetic polymers chemistry]. 3rd ed. Moscow: Khimia Publ., 1971. 615 c. (in Russian).
3. Davis A., Kuhnlenz F. Optical design using Fresnel lenses: Basic principles and some practical examples. *Optik & Photonik*, 2007, vol. 4, iss. 2, pp. 52-55. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/opph.201190287/pdf>, accessed 3.06.2017.
4. Gaurav A. Madhugiri, Karale S.R. High solar energy concentration with a Fresnel lens: A review. *Intern. J. of Modern Engineering Research*, 2012, vol. 2, iss. 3, pp. 1381-1385. Available at: http://www.ijmer.com/papers/vol2_issue3/EP2313811385.pdf, accessed 3.06.2017.
5. Sierra C., Vazquez A.J. High solar energy concentration with a Fresnel lens. *J. of Materials Science*, 2005, vol. 40, iss. 6, pp. 1339-1343. DOI: [10.1007/s10853-005-0562-6](https://doi.org/10.1007/s10853-005-0562-6)
6. Khamooshi M., Salati H., Egelioglu F., Ali Hooshyar Faghiri, Tarabishi J., Saeed Babadi. A review of solar photovoltaic concentrators. *Intern. J. of Photoenergy*, 2014, vol. 2014. Article ID 958521. 17 p. DOI: [10.1155/2014/958521](https://doi.org/10.1155/2014/958521)
7. Lapshin V.V., Zakharevich E.M., Grubiy S.V. Machining of linear negative matrices for Fresnel lenses and prisms. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 10, pp. 826-830. DOI: [10.3103/S1068798X16100105](https://doi.org/10.3103/S1068798X16100105)