

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ВНЕОСЕВЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ПЕЧАТИ ПРИ ПОМОЩИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Бердников Н.С.¹, Шкитов Д.А.²

¹НИ ТПУ, ИЯТШ, гр. ОБМЗ1

Email: nsb20@tpu.ru

²НИ ТПУ, ИИШФВП, к.ф.-м.н., научный сотрудник

Email: shkitovda@tpu.ru

Введение

В коллективе, работающем на микротроне ТПУ, возникла потребность в изготовлении внеосевых параболических зеркал большого диаметра. Стандартные коммерчески доступные оптические параболические зеркала, как правило, ограничены диаметром до 100 мм, например [1]. Существуют доступные технологии производства больших диаметров (до 640 мм) [2], однако по этой технологии по некоторым характеристикам (внеосевой угол, фокусное расстояние), данный способ не подходит. Также существуют подходы, развитые в силовой адаптивной оптике [3], но данный способ для поставленной задачи слишком трудоёмкий. Современные производственные технологии, как из нашего опыта видится сейчас, позволяют разработать более простую технологию изготовления подобных зеркал, например, с применением аддитивных технологий. Ранее нами были уже опробованы методы 3D-печати пластиком для изготовления спиральных мишеней [4, 5] и методы магнетронного напыления металлов на пластики [6]. Поэтому, было решено изготовить аналогичным же способом широкоапертурные внеосевые параболические зеркала. В данной работе описывается процесс проектирования данных зеркал. Для примера на рис. 1 приведены фотографии ранее использовавшегося осевых параболических зеркал из листовой меди, тестовый образец напечатанного ABS пластиком зеркала с напылением из Cu, неудавшийся пример печати, где видно внутреннее строение. Отметим, что внеосевые зеркала являются лучшим выбором, по сравнению с осевыми, в условиях, когда необходимо фокусировать излучение под углом от оси распространения регистрируемого излучения.

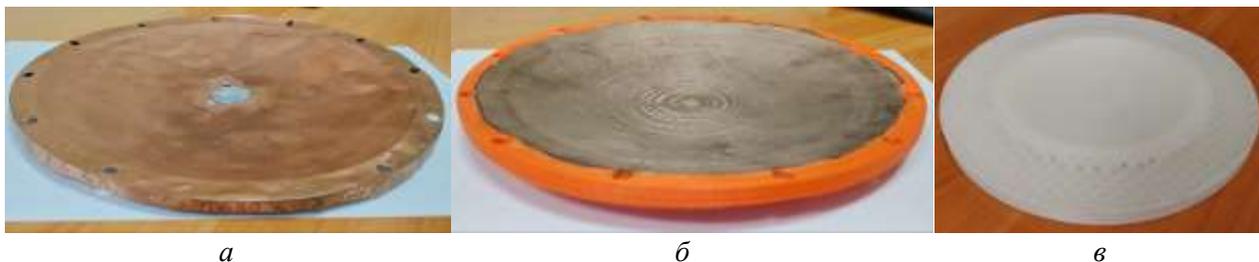


Рис. 1. Параболические зеркала:

a – старое зеркало; *б* – тестовый образец с напылением из Cu; *в* – неудачный пример печати

Проектирование моделей

Перед началом проектирования внеосевых параболических зеркал необходимо было определиться с первичными требованиями к ним. Было решено, что диаметр зеркал должен составлять 6 (152,4 мм) и 8 (203,2 мм) дюймов, полная высота зеркала не должна превышать 150 мм, а фокусное расстояние зеркала (расстояние от оптического центра зеркала до точки фокуса) должно быть больше радиуса зеркала, чтобы избежать перекрытия исходного излучения детектором, находящимся в фокусе зеркала, так как основной задачей данных зеркал является фокусировка излучения. Диаметр выбирался в дюймах, т. к. это является в определенной степени стандартом при изготовлении оптических компонентов. Также в модели зеркала должен присутствовать элемент, выполняющий функцию «бобышки», за которую зер-

кало будет крепиться. «Бобышка» имеет диаметр 2 дюйма (50,8 мм) и высоту 10 мм, под стандартный оптический держатель [7].

Для точного подбора необходимых параметров зеркала была создана специальная интерактивная схема, изображающая наибольшее по площади поперечное сечение зеркала. Созданная схема позволяет изменять такие параметры зеркала, как фокусное расстояние, угол отражения и диаметр зеркала и в реальном времени отслеживать видоизменения сечения. Схема была реализована в пакете символьной математики Wolfram Mathematica (14 версия). Параболическая кривая была построена на основе аналитических зависимостей, приведенных в [8]. На рис. 2 представлены схемы внеосевых параболических зеркал с параметрами, представленными в табл. 1. Параметры для двух моделей подобраны так, чтобы точка фокуса находилась на уровне высоты зеркала, что хорошо видно на схемах.

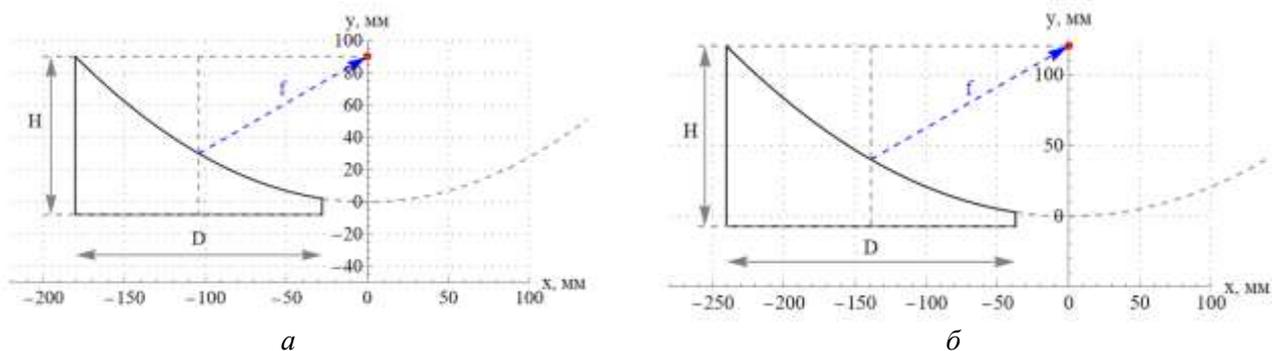


Рис. 2. Схемы моделей внеосевых параболических зеркал № 1 (а) и № 2 (б):
 f – фокусное расстояние зеркала; H – высота зеркала; D – диаметр зеркала

Таблица 2

Параметры моделей внеосевых параболических зеркал

№ модели	Диаметр зеркала	Высота зеркала	Фокусное расстояние зеркала	Угол отражения
1	152,4 мм	100,1 мм	120,2 мм	60°
2	203,2 мм	130,2 мм	160,3 мм	

Средой создания 3D-моделей внеосевых параболических зеркал выступила упомянутая выше Wolfram Mathematica. Модели зеркал создавались путем выполнения ряда логических операций с геометрическими регионами, выступающих предикатами. Ключевыми параметрами в создании моделей зеркал выступили фокусное расстояние зеркала, угол отражения и диаметр зеркала. Алгоритм создания 3D-модели зеркала можно представить в виде следующих действий:

- при помощи неравенства создаётся геометрия региона в виде параболоида вращения, фокусное расстояние которого определяется через фокусное расстояние зеркала и угла отражения;
- далее, при помощи встроенной функции Cylinder, создается цилиндр, который будет служить основным телом зеркала. Диаметр этого цилиндра тождественен диаметру зеркала;
- после создается второй цилиндр, который будет служить бобышкой, и посредством встроенной функции RegionUnion соединяется с основным цилиндром;
- в конце, из геометрического региона основного цилиндра вычитается посредством встроенной функции RegionDifference геометрический регион параболоида вращения (расположение параболоида относительно цилиндра определяется через фокусное расстояние зеркала и угол отражения);
- полученный геометрический регион экспортируется в формат STL (который является самым популярным в области 3D-печати).

На рис. 3 представлены разные вариации полученных моделей внеосевых параболических зеркал. На рис. 3, *а* модель была создана при помощи встроенной функции `DiscretizeRegion`, на рис. 3, *б* – при помощи функции `RegionPlot3D`. По внешнему виду моделей становятся очевидны преимущества и недостатки каждой из функций. `DiscretizeRegion` позволяет создать 3D-модель с четкими гранями, но не позволяет создать высоко детализированную модель. `RegionPlot3D` напротив, позволяет создать модель с высоким разрешением, но при генерировании модели её грани деформируются. К сожалению, недостатки каждой из функций не позволяют создать 3D-модель одновременно высоко детализированную и с четкими гранями. Поэтому было решено перейти в другое ПО для создания 3D-моделей внеосевых параболических зеркал.

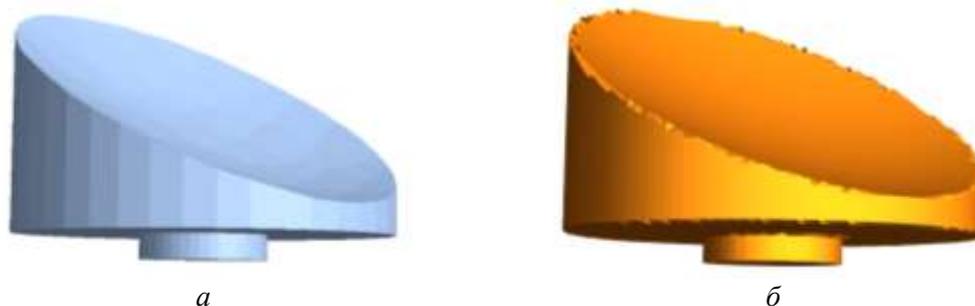


Рис. 3. 3D-модели внеосевых параболических зеркал, созданных функциями `DiscretizeRegion` (*а*) и `RegionPlot3D` (*б*)

Заключение

В данной работе описан процесс и представлен результат проектирования моделей широкоапертурных внеосевых параболических зеркал для печати методами аддитивных технологий. Для подбора параметров зеркал (фокусного расстояния зеркала, угла отражения и диаметра) в пакете `Wolfram Mathematica` была реализована интерактивная схема сечения зеркала. Далее по выбранным параметрам были созданы 3D-модели зеркал. Однако, из-за недостатков `Wolfram Mathematica` в построении высокодетализированных 3D-моделей было решено перейти в другое ПО для создания таких 3D-моделей внеосевых параболических зеркал. Отметим, что после печати необходима последующая относительно небольшая механическая обработка заготовок с помощью мелкозернистой наждачной бумаги ручным способом. После этого для сглаживания неизбежной шероховатости следует произвести обработку в парах растворителя (ацетона). После напыления также возможна полировка поверхности зеркал с помощью оптической обработки лазером [9]. Также отметим, что габариты и конструкция зеркал были согласованы с оператором магнетронного напыления.

Авторы благодарят школьников Лицея при ТПУ К.М. Шульгу и Ф.М. Байдина за создание 3D-моделей осевых параболических зеркал [10]. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ («Наука» № FSWW-2023-0003).

Список литературы

1. Внеосевые параболические зеркала // *Wavelength opto-electronics*: сайт. – URL: <https://wavelength-oe.com/laser-optics/optical-mirrors/parabolic-mirrors/> (дата обращения: 14.11.2024).
2. Внеосевые параболические зеркала // *Tydex*: сайт. – URL: https://www.tydexoptics.com/pdf/ru/OAP_ru.pdf (дата обращения: 14.11.2024).
3. Шанин О.И. Широкоапертурная силовая адаптивная оптика // *Фотоника*. – № 1/31. – 2012. – С. 24. – URL: https://www.photonics.su/files/article_pdf/3/article_3112_923.pdf.
4. Бердников Н.С., Григорьева А.А. Поиск технологий по созданию спиральных мишеней для генерации излучения с винтовым волновым фронтом от электронного пучка / науч. рук. Д.А. Шкитов // *Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных*

трудов XX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 25–28 апреля 2023 г.: в 7 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2023. – Т. 1 : Физика. – С. 66–68. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54398393>.

5. Бердников Н.С., Шкитов Д.А. Особенности проектирования спиральных мишеней для генерации излучения с дислокацией волнового фронта от электронного пучка // Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения: сборник научных трудов Международной научно-технической молодежной конференции; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2023. – С. 347–349. – URL: <https://mt.tpu.ru/archive/2023/>.

6. Семенов В.А., Работкин С.В., Гренадеров А.С., Соловьев А.А., Бердников Н.С., Шевелёв М.В., Шкитов Д.А. Металлизация методом магнетронного напыления пластин из пластика, изготовленных на 3D-принтере // Materials. Technologies. Design. – 2023. – Т. 5, № 3(13). – С. 99–108. – Режим доступа: <http://journal.ugatu.su/index.php/mtd/article/view/3706/3156>.

7. 5MBM24 Держатель зеркал // Vicon-SE: сайт. – URL: https://vicon-se.ru/catalog/reguliruemye_derzhateli_optiki/derzhateli_s_regulirovkoj_po_2_3_osyam/derzhatel_zerkal/.

8. Chen L., Gao Z., Xu N., Cao X., Zhang J., Wang L., Ye J., Yuan Q. Construction of freeform mirrors for an off-axis telecentric scanning system through multiple surfaces expansion and mixing // Results in Physics. – 2020. – V. 19. – 103354. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379720318210>.

9. Хузнахметов Р.М., Вологжанина С.А., Амяга Д.В., Рамос Веласкес А. Разработка технологии полирования поверхности изделий из латуни с помощью импульсного инфракрасного волоконного лазера // Современные проблемы машиностроения: сборник статей XVI Международной научно-технической конференции, г. Томск, 27 ноября – 1 декабря 2023 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2024. – С. 260–263. – URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/77361>.

10. Байдин Ф., Шульга К. Проектирование параболических зеркал для использования при регистрации излучения в ГГц диапазоне частот // Юные исследователи – науке и технике: сборник трудов XXV Всероссийской конференции-конкурса Исследовательских работ старшеклассников «Юные исследователи – науке и технике». – Томск: Изд-во ТПУ, 2024. – С. 81–84. – URL: <https://school-conf.tpu.ru/archive/2024/>.