

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 681.78

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.2.94144

В.Г. Колобродов¹, Д.В. Поздняков^{2*}, В.М. Тягун²

¹КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

²Казенне підприємство спеціального приладобудування “Арсенал”, Київ, Україна

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЛЕГШЕННЯ НА ДЕФОРМАЦІЮ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ПОЗАОСЬОВИХ СЕГМЕНТІВ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЗЕРКАЛ

Background. Weight reduction of mirrors is an important issue in the development of space-based optical systems. However, the study of the influence of weight reduction on the deformation of the mirror surface of the off-axis segments of axially symmetric mirrors and methods of its calculation is given little attention.

Objective. Development of the algorithm for calculating the deformation of the working surface of the off-axis segments of axisymmetric mirrors, and analysis of the impact of different types of weight reduction and geometrical parameters on deformation of the working surface of the off-axis segments of axially symmetric mirror by gravity, using the algorithm developed.

Methods. Four work stages of the developed algorithm are described and the influence of the geometric parameters of weight reduction on the deformation of working surface of the off-axis segments of axially symmetric mirrors is studied.

Results. It was determined that the developed algorithm can be used to determine the deformation of any of the optical surfaces, the ratio at which related parties are less to more is greater 0.3. The influence of geometrical dimensions on deformation of the working surface of the off-axis segments of axially symmetric mirrors was analyzed by developed algorithm and recommendations on the use of various types of weight reduction was given.

Conclusions. In the process, an algorithm for determining the deformation of the working surfaces of optical components was proposed and the influence of the geometric parameters of weight reduction on the working surface of the off-axis segments of axially symmetric mirrors was studied.

Keywords: Zernike coefficients; weight reduction of mirrors.

Вступ

При розробці майже будь-якої системи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) із космосу (телескопи, сканери тощо), яка у своєму складі має дзеркальну чи дзеркально-лінзову вхідну оптику, розробники прагнуть збільшити діаметр дзеркал для збільшення апертури приладу. Але при цьому зростає і маса дзеркал, що набагато здорожчує вивід приладу на орбіту. Тому полегшення дзеркал є актуальним питанням при розробці оптичних систем космічного базування.

Для дзеркальної чи дзеркально-лінзової вхідної оптики систем ДЗЗ найкращим варіантом є умовно децентровані системи, що не мають центрального екранування, яке знижує модуляційну передавальну функцію на середніх частотах [1]. У таких об'єктивах часто використовуються позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал.

У працях [2–4] розглядаються конкретні системи з використанням позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал та вибрані варіанти полегшення. В той же час дослідженню впливу полегшення на деформацію дзеркальної поверхні та методам її розрахунку приділяється мало уваги.

Постановка задачі

Мета роботи полягає в дослідженні можливості застосування розробленого алгоритму для розрахунку деформацій робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал, а також в аналізі впливу різних типів полегшення та їх геометричних параметрів на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал під дією сили тяжіння з використанням розробленого алгоритму.

Вихідні положення для аналізу

Задача полегшення дзеркал — це зменшення маси дзеркал за рахунок конструктивних вибірок при забезпеченні достатніх жорсткості та міцності, що необхідні при виготовленні, при проведенні контрольних операцій та при виведенні системи на орбіту. Існують три класичні схеми полегшення дзеркал [5, 6]:

- 1) дзеркала зі спеціальним профілем задньої частини (англ. contoured back mirrors) (рис. 1);
- 2) двошарові (тришарові) дзеркала, так звані “сандвічі” (англ. sandwichmirrors) (рис. 2);

* corresponding author: pozia07@yandex.ru

3) дзеркала з відкритою задньою частиною (англ. open-backmirrors) (рис. 3).

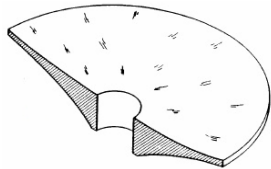
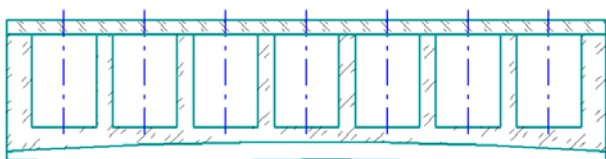
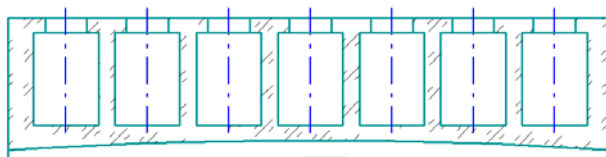


Рис. 1. Дзеркала зі спеціальним профілем задньої частини. Профіль може бути різним



a



б

Рис. 2. Двошарові (тришарові) дзеркала. Таке дзеркало являє собою основну деталь із робочою поверхнею і вирізами та задню пластину, що з'єднуються методом електроадгезії (*a*) (тришарове дзеркало складається з 3-х частин: робочої поверхні, конструкції з полегшенням та задньої пластини); проміжний варіант полегшення – за відсутності технології електроадгезії (*б*)

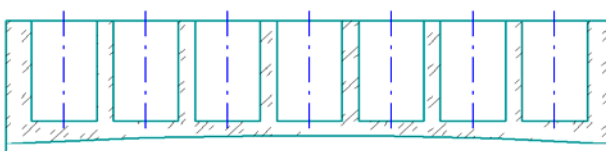


Рис. 3. Дзеркала з відкритою задньою частиною

Для подальшого моделювання та розрахунку вибрано варіанти полегшення, що показані на рис. 2 і 3. Полегшення, що показане на рис. 1, можна використовувати тільки для осесиметричних дзеркал.

Основним критерієм, який ми використовуємо для визначення деформації робочої поверхні дзеркал, є середньоквадратичне відхилення їх робочої поверхні (RMS), що визначається в довжинах хвиль (при $\lambda = 630$ нм). RMS обчислюється за коефіцієнтами Церніке (Zernike Fringe Sag), які своєю чергою розраховуються за значеннями деформації у кожній точці робочої поверхні дзеркала за методикою, що наведена у [7]. Після роз-

рахунку 37 коефіцієнтів Церніке деформація представлена у вигляді полінома. Перші чотири члени, що відповідають нахилам та зміщенню поверхні, прибираються, оскільки їх у реальних системах легко усунути юстуванням.

На рис. 4 показані чотири етапи роботи розробленого алгоритму.

1. Створення 3D-моделі дзеркала з кріпленням із потрібними параметрами полегшення (*a*);

2. Моделювання навантаження (сила тяжіння, удари, вібрації, зміна температури) за різних варіантів кріплення (*б*);

3. Розрахунок 37-ми коефіцієнтів Церніке (до 5-го порядку включно) у спеціальній програмі, написаній у програмному пакеті MatLab, та відновлення деформації робочої поверхні (*в*);

4. Усунення перших чотирьох коефіцієнтів Церніке та розрахунок RMS робочої поверхні дзеркала (*г*).

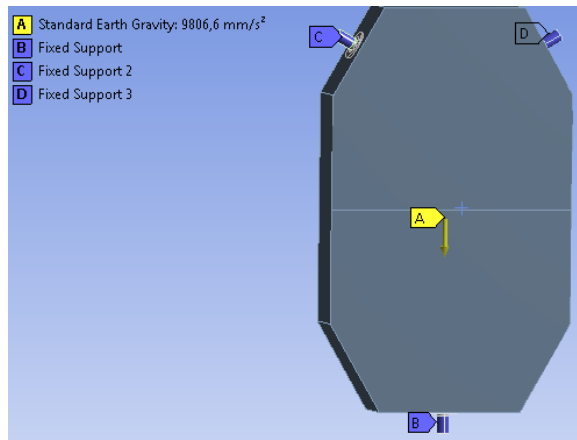
При використанні коефіцієнтів Церніке під час розрахунку RMS виникають похибки через те, що коефіцієнти визначаються в одиничному колі (рис. 4, *в*). Чим вужче дзеркало, тим більша похибка, однак вона досить мала при розрахунку дзеркал із відношенням меншої сторони до більшої понад 0,3. При відношенні менше 0,3 метод застосовувати не можна, оскільки похибка набагато збільшується та починає впливати на результати розрахунку.

Для аналізу вибрано трохи змінений варіант кріплення, що розглянутий у [3]. Кожне дзеркало має 3 отвори, вісі яких знаходяться в одній площині і перетинаються в спільній точці в межах площини дзеркала. У кожний отвір вклеюється втулка. У кожній втулці міститься шарнір, який далі закріплений на оправу дзеркала. Кожний окремих шарнір може вільно рухатися у втулці, однак при комбінації з 3-х шарнірів дзеркало буде закріплене в потрібному положенні. Таке кріплення не тільки забезпечує температурну розв'язку та не створює додаткових деформацій, а ще й дає змогу забезпечити простий механізм юстування кожного дзеркала в об'єктиві. Матеріалом дзеркала може бути будь-який матеріал із [6]. Матеріал втулок та шарнірів повинен мати майже однаковий із вибраним матеріалом дзеркала коефіцієнт теплового лінійного розширення.

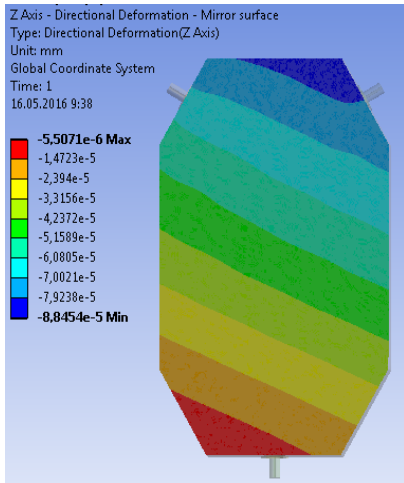
Весь аналіз був проведений за двох варіантів кріплення: 2 шарніри у дзеркалі знизу (рис. 5, *a*) та 2 шарніри у дзеркалі зверху (рис. 5, *б*).



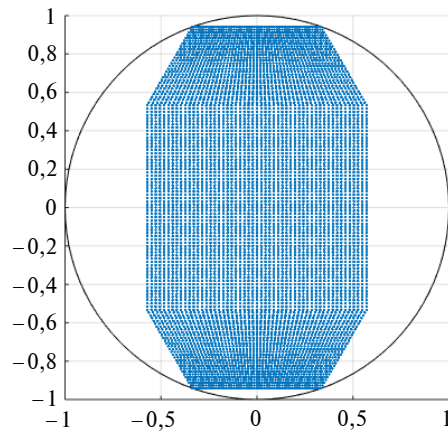
a



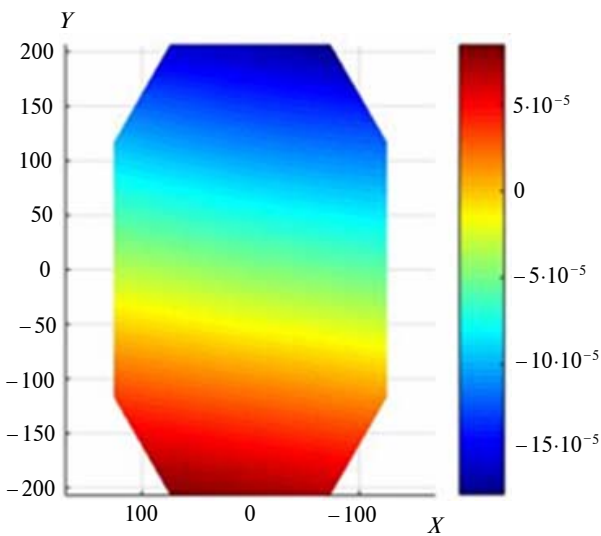
б



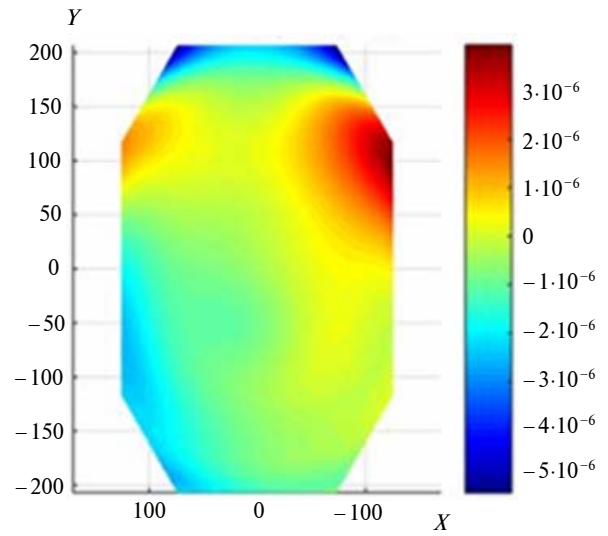
в



г



д



е

Рис. 4. 3D-модель дзеркала з кріпленням та полегшенням (*a*); моделювання навантаження (*б*); приклад результату розрахунку навантаження (*в*); одиничне коло та дзеркало (*г*); відновлення деформації дзеркальної поверхні за всіма коефіцієнтами Церніке у MathLab (*д*); усунення перших чотирьох коефіцієнтів Церніке та відновлення деформації дзеркальної поверхні дзеркала за тими коефіцієнтами, що залишились (*е*)

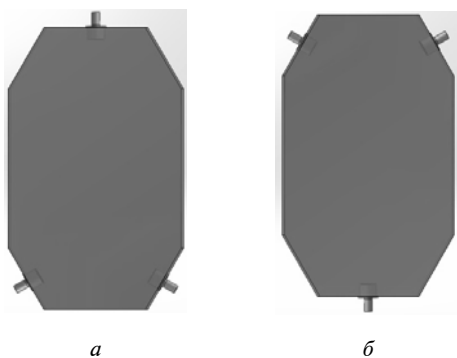


Рис. 5. Кріплення дзеркал: *a* – 2 шарніри знизу, *б* – 2 шарніри зверху

Також аналізувався вплив різних форм отворів полегшення (шестикутні, квадратні трикутні та круглі) та їх розміщення (рис. 6.) Усі подальші результати наведені для круглих отворів як найбільш оптимальних з точки зору зменшення ваги та деформацій дзеркальної поверхні.

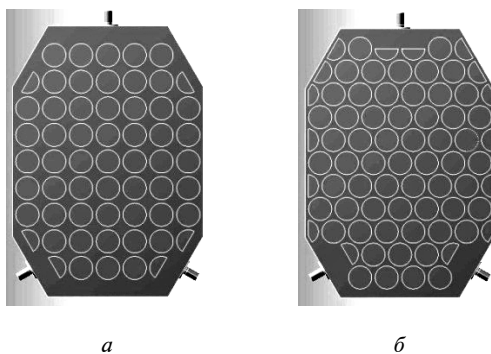


Рис. 6. Розміщення отворів полегшення: *a* – по рядках, *б* – у шаховому порядку

Залежність деформації робочої поверхні дзеркала від різних факторів

З використанням розробленого алгоритму було проведено дослідження залежності дефор-

мації робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал. При моделюванні робоча поверхня дзеркала може бути як сферичною, так і асферичною. Однак через те, що асферизація дзеркал дуже мала порівняно з їх товщиною, вона не буде впливати на результат навантаження дзеркала. Тому для спрощення розрахунків асферичних дзеркал при моделюванні можна обмежитися найближчою сферою.

1. *Залежність від глибини отворів.* На рис. 7, *a, б* показана залежність деформації дзеркальної поверхні дзеркала від глибини отворів круглої форми. На рис. 7, *в* відображена зміна ваги при цьому. Для розрахунку вибрані три дзеркала з різними габаритними розмірами: 400×200 мм, 400×240 мм і 400×280 мм, інші розміри однакові.

Як видно з графіків, якщо полегшення немає, кращим варіантом кріплення є варіант, коли 2 шарніри розміщені знизу. Однак при збільшенні глибини полегшення (при зменшенні ваги дзеркал) кращим стає варіант кріплення, коли 2 шарніри зверху. При глибині полегшення, що близька до товщини дзеркала по осі, найменш деформованим є вужче дзеркало (400×200). Для всіх трьох варіантів дзеркал закон зміни RMS майже однаковий, тому для подальших досліджень вибрано дзеркало з габаритними розмірами 400×280 мм.

2. *Наявність задньої стінки.* Для отримання меншої деформації дзеркальної поверхні можна додати до дзеркала задню стінку (ЗС). Найкращим методом створення такого дзеркала є з'єднання двох чи трьох деталей (передньої дзеркальної поверхні, середньої частини з вирізами та задньої стінки) методом електроадгезії [6]. Однак за відсутності такої технології необхідну структуру можна створити за допомогою вибірок потрібної форми з меншим діаметром зверху в ЗС та більшим усередині, як показано на рис. 8.

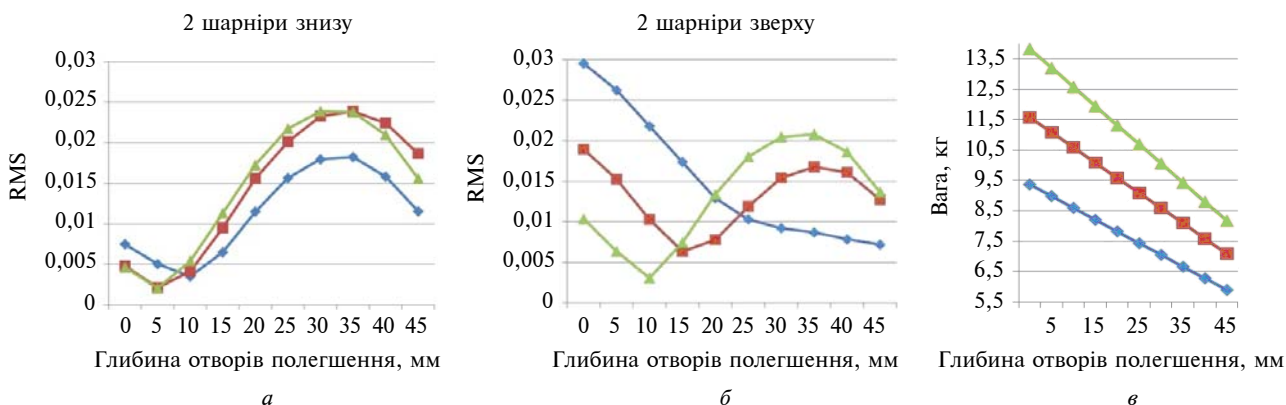


Рис. 7. Залежність деформації дзеркальної поверхні від глибини отворів полегшення: *a* – кріплення – 2 шарніри знизу; *б* – кріплення – 2 шарніри зверху; *в* – зміна ваги дзеркала: \blacklozenge – 400×200; \blacksquare – 400×240; \blacktriangle – 400×280

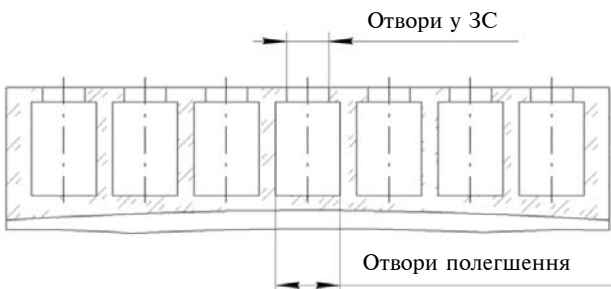


Рис. 8. Форма вибірок у дзеркалі із ЗС

Визначимо залежність деформації дзеркальної поверхні від геометричних розмірів ЗС. На рис. 9 показано залежність відношення діаметра отворів у ЗС до отворів полегшення та зміну ваги дзеркала при цьому.

При зменшенні діаметра отворів у ЗС RMS зменшується. Найменше значення RMS маємо, коли отворів у ЗС взагалі нема, тобто коли дзеркало складається з декількох частин, що з'єднані разом. Найменша деформація при кріпленні, коли 2 шарніри зверху. Вага при зменшенні діаметра отворів у ЗС збільшується на декілька відсотків відносно дзеркала без полегшення, однак деформація зменшується в 3 рази.

На рис. 10 показана залежність деформації від товщини ЗС. При її збільшенні деформація зменшується, однак росте вага. Кріплення, коли 2 шарніри зверху, найкраще.

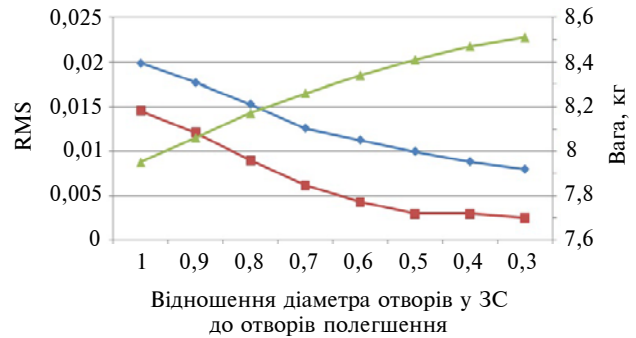


Рис. 9. Вплив на деформацію діаметра отворів у ЗС: — 2 шарніри знизу; — 2 шарніри зверху; — вага

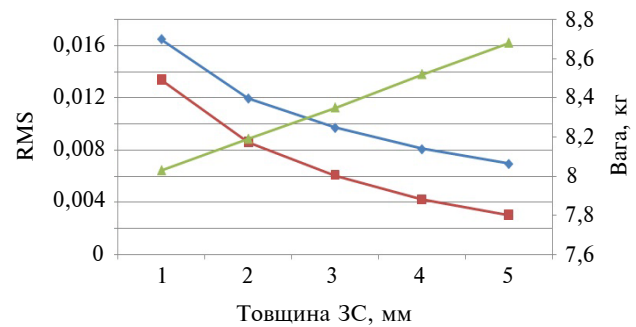


Рис. 10. Залежність деформації від товщини ЗС: — 2 шарніри знизу; — 2 шарніри зверху; — вага

3. Геометричні фактори. На рис. 11 показана залежність деформації від розміщення отворів (див. рис. 6), наявності ЗС і товщини ребер

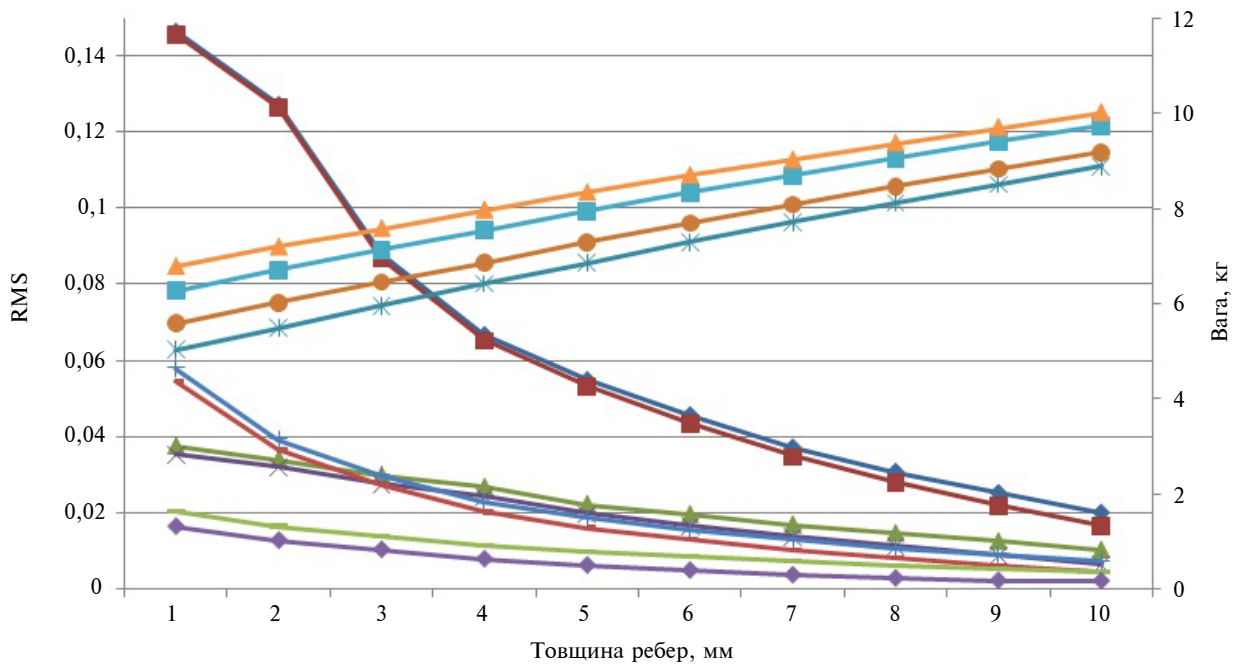


Рис. 11. Залежність деформації від розміщення отворів, наявності ЗС і товщини ребер: — шахи, 2 шарніри знизу, без ЗС; — шахи, 2 шарніри знизу, із ЗС; — ряди, 2 шарніри знизу, без ЗС; — ряди, 2 шарніри знизу, із ЗС; — шаховий порядок, вага без ЗС; — ряди, вага без ЗС; — шахи, 2 шарніри зверху, без ЗС; — шахи, 2 шарніри зверху, із ЗС; — ряди, 2 шарніри зверху, без ЗС; — ряди, 2 шарніри зверху, із ЗС; — шаховий порядок, вага із ЗС; — ряди, вага із ЗС

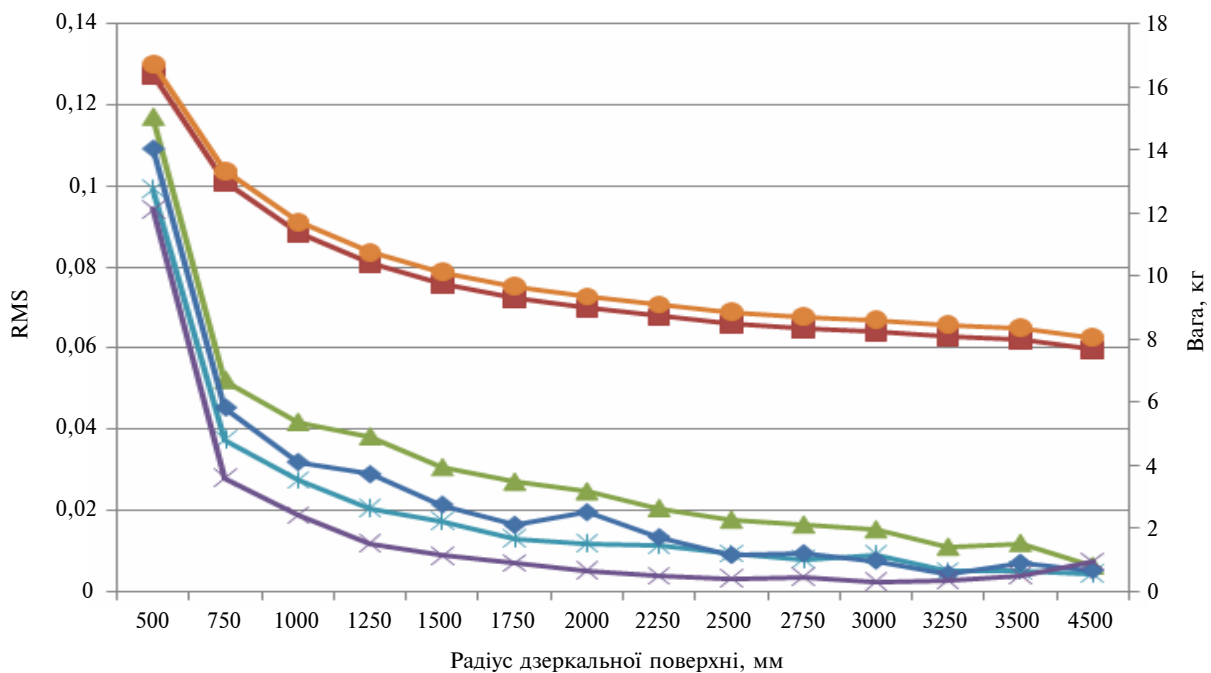


Рис. 12. Залежність деформації дзеркальної поверхні від її радіуса за наявності та за відсутності ЗС: \blacktriangle – 2 шарніри знизу, без ЗС; \blacklozenge – 2 шарніри знизу, із ЗС; \blacksquare – вага без ЗС; \blackstar – 2 шарніри зверху, без ЗС; \blacktimes – 2 шарніри зверху, із ЗС; \bullet – вага із ЗС

бер. Полегшення, що розміщене у шаховому порядку, дає змогу значно зменшити вагу, однак деформації, особливо при кріпленні, коли 2 шарніри містяться знизу, дуже великі. Найкращим варіантом за мінімумом деформації є варіант розміщення полегшення по рядках із ЗС при кріпленні 2 шарніри зверху; найкращим за мінімумом ваги – у шаховому порядку без ЗС, за обох варіантів кріплення деформація майже однакова.

На рис. 12 показана залежність деформації дзеркальної поверхні від її радіуса за наявності та за відсутності задньої стінки. Як видно з графіків, варіант, коли 2 шарніри зверху із ЗС, має меншу деформацію робочої поверхні. Хоча радіус вибирається з оптичних міркувань (для отримання необхідної фокусної відстані системи, для зменшення аберацій тощо), чим він більший, тим деформація менша за будь-якого варіанта кріплення та полегшення.

4. *Залежність від температури.* Важливо розглянути вплив на деформацію дзеркальної поверхні дзеркала температури, оскільки вона може змінюватися під час виготовлення, виконання контрольних операцій та експлуатації. Графік залежності деформації дзеркальної поверхні від температури всього дзеркала зображений на рис. 13. Температура в межах, у яких вона може коливатися при всіх трьох стадіях роботи, дуже мало впливає на деформацію поверхні. Розглядався

також вплив градієнтного розподілу температури в дзеркалі. Для цього на одну з граней дзеркала була прикладена температура $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, на протилежну – $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому значення RMS майже не змінювалося.

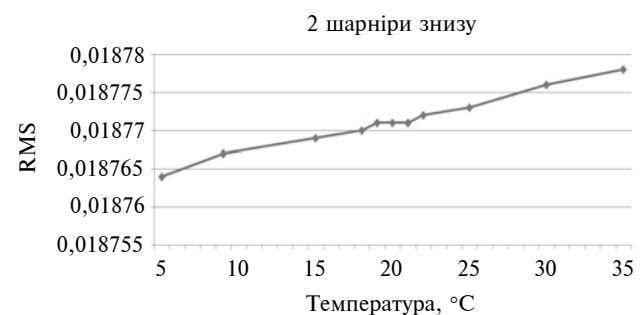


Рис. 13. Залежність деформації дзеркальної поверхні від температури

Висновки

У процесі роботи був розроблений алгоритм розрахунку деформації робочої поверхні дзеркал під дією зовнішніх факторів (сили тяжіння, інших сил, температури, вібрацій, ударів). Такий алгоритм можна застосовувати для визначення деформацій будь-яких оптичних поверхонь, відношення меншої сторони яких до більшої перевищує 0,3. Після розрахунку отримані дані мож-

на завантажувати в програми оптичного аналізу для подальшого дослідження впливу деформації на якість зображення.

Розробленим алгоритмом аналізувався вплив варіанта кріплення, геометричних параметрів полегшення і температури на позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал. Встановлено, що при використанні кріплення, коли 2 шарніри розміщені зверху (при кріпленні на 3 шарніри, дзеркало розміщене вертикально), деформація найменша. Для найбільшого зменшення ваги необхідно виготовляти дзеркало з отворами полегшення, що розміщені в шаховому порядку. Їх глибина має бути близькою до товщини дзеркала по осі. Товщина ребра має бути найменшою. Однак існує фактор ризику отримання бракованого дзеркала через недосконалість інструмента для обробки та неоднорідності матеріалу. Тому вибір товщини ребра між отворами полегшення потріб-

но здійснювати, виходячи з можливостей виробництва.

Для отримання більш жорсткої конструкції (з меншою деформацією дзеркальної поверхні, але з трохи збільшеною вагою) доцільно використовувати дзеркало із задньою стінкою.

Температура майже не впливає на деформацію робочої поверхні дзеркала, тому її можна не враховувати. Однак для визначення впливу температури на кріплення (втулок та шарнірів), що будуть використовуватися при виготовленні та виконанні контрольних елементів, такий аналіз необхідний.

Подальша робота буде спрямована на доопрацювання алгоритму та створення програмного пакета на його основі, а також на аналіз впливу різних варіантів полегшення на осесиметричні дзеркала.

Список літератури

1. Колобродов В.Г., Лихолім М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 364 с.
2. *Manufacturing of lightweight mirror* / Xie Jingjiang, Song Shurmei, Wu Qingwen, He Xin // *Optics Precis. Eng.* – 2001. – 9, № 5. – P. 474–477.
3. Fan Bin, Cai Wei-jun, Huang Ying. Design and test of a high performance off-axis TMA telescope [Online]. Available: http://www.congrexprojects.com/custom/icso/2012/papers/FP_ICSO-038.pdf
4. Design, manufacturing and testing of a four-mirror telescope with a wide field of view / P. Glosener, F. Wolfs, F. Lemagne et al. // *Int. Conf. Space Optics*, Rhodes, Greece, Oct. 4–8, 2010.
5. Vukobratovich D. *Lightweight Mirror Design* // *Optomechanical Engineering Handbook* / A. Ahmad, Ed. – Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
6. Савицкий А.М., Соколов И.М. Вопросы конструирования облегченных главных зеркал космических телескопов // *Оптический журнал*. – 2009. – 76, № 10. – С. 94–98.
7. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1989. – 221 с.

References

- [1] V.G. Kolobrodov et al., *Design and Television Thermal Imaging Surveillance Systems*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2007 (in Ukrainian).
- [2] Xie Jingjiang et al., “Manufacturing of lightweight mirror”, *Optics Precis. Eng.*, vol. 9, no. 5, pp. 474–477, 2001.
- [3] Fan Bin et al. (2012). *Design and test of a high performance off-axis TMA telescope* (Online). Available: http://www.congrexprojects.com/custom/icso/2012/papers/FP_ICSO-038.pdf
- [4] P. Glosener et al., “Design, manufacturing and testing of a four-mirror telescope with a wide field of view”, in *Proc. Int. Conf. Space Optics*, Rhodes, Greece, Oct. 4–8, 2010.
- [5] D. Vukobratovich, *Lightweight Mirror Design*, in *Optomechanical Engineering Handbook*, A. Ahmad, Ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [6] A.M. Savitskiy et al., “Questions of designing lightweight primary mirrors of space telescopes”, *Opticheskij Zhurnal*, vol. 76, no. 10, pp. 94–98, 2009 (in Russian).
- [7] M.N. Sokolsky, *Tolerances and Quality of the Optical Image*. Leningrad, SU: Mashinostroenie, 1989 (in Russian).

В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягун

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЛЕГШЕННЯ НА ДЕФОРМАЦІЮ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ПОЗАОСЬОВИХ СЕГМЕНТІВ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЗЕРКАЛ

Проблематика. Полегшення дзеркал є актуальним питанням при розробці оптичних систем космічного базування. Однак дослідженню впливу полегшення на деформацію дзеркальної поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал та методам її розрахунку приділяється мало уваги.

Мета дослідження. Розроблення алгоритму розрахунку деформацій робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал, а також аналіз впливу різних типів полегшення та їх геометричних параметрів на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал під дією сили тяжіння з використанням розробленого алгоритму.

Методика реалізації. Описано чотири етапи роботи розробленого алгоритму та проведено дослідження впливу геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал.

Результати дослідження. Визначено, що розроблений алгоритм можливо застосовувати для визначення деформацій будь-яких оптичних поверхонь, відношення меншої сторони яких до більшої перевищує 0,3. Розробленим алгоритмом проаналізовано вплив геометричних розмірів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал та дано рекомендації щодо застосування різних типів полегшення.

Висновки. Запропоновано алгоритм визначення деформації робочої поверхні оптичних компонентів та проведено дослідження впливу геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал.

Ключові слова: коефіцієнти Церніке; полегшення дзеркал.

В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягун

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛЕГЧЕНИЯ НА ДЕФОРМАЦИЮ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВНЕОСЕВЫХ СЕГМЕНТОВ ОСЕСИМЕТРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

Проблематика. Облегчение зеркал является актуальным вопросом при разработке оптических систем космического базирования. Однако исследованию влияния облегчения на деформацию зеркальной поверхности внеосевых сегментов осесиметричных зеркал и методам ее расчета уделяется мало внимания.

Цель исследования. Разработка алгоритма расчета деформаций рабочей поверхности внеосевых сегментов осесиметричных зеркал, а также анализ влияния различных типов облегчения и их геометрических параметров на деформацию рабочей поверхности внеосевых сегментов осесиметричных зеркал под действием силы тяжести с использованием разработанного алгоритма.

Методика реализации. Описаны четыре этапа работы разработанного алгоритма и проведено исследование влияния геометрических параметров облегчения на деформацию рабочей поверхности внеосевых сегментов осесиметричных зеркал.

Результаты исследования. Определено, что разработанный алгоритм можно применять для определения деформаций любых оптических поверхностей, отношение меньшей стороны которых к большей превышает 0,3. Разработанным алгоритмом проанализировано влияние геометрических размеров облегчения на деформацию рабочей поверхности внеосевых сегментов осесиметричных зеркал и даны рекомендации по применению различных типов облегчения.

Выводы. Предложен алгоритм определения деформации рабочей поверхности оптических компонентов и проведено исследование влияния геометрических параметров облегчения на деформацию рабочей поверхности внеосевых сегментов осесиметричных зеркал.

Ключевые слова: коэффициенты Цернике; облегчение зеркал.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
17 лютого 2017 року