

# ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 681.78

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.6.108885

В.Г. Колобродов<sup>1</sup>, Д.В. Поздняков<sup>2\*</sup>, В.М. Тягур<sup>2</sup>

<sup>1</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

<sup>2</sup>Казенне підприємство спеціального приладобудування “Арсенал”, Київ, Україна

## ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЛЕГШЕННЯ НА ДЕФОРМАЦІЮ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЗЕРКАЛ

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

**Objective.** The aim of the paper is the analysis of the possibilities of axisymmetric mirror weight reduction by studying the geometrical parameters' influence of reduction and fastening on the deformation of their working surfaces under the gravity influence.

**Methods.** The influence of various variants of the axisymmetric mirrors' construction on their working surface deformation has been carried out by simulation in finite-element and optical analysis programs.

**Results.** The influence of design values, geometrical dimensions of reduction and fastening on the working surface deformation of axisymmetric mirrors is analyzed, and the recommendations for the application of various types of reduction are given. It is determined that hexagonal holes should be used for less deformation, and for the greatest reduction of weight it is necessary to use circular cuts. Particular attention when designing reduction should be drawn to the mechanical part of the mount, as the deformation of the mirror very much depends on it.

**Conclusions.** In the process, the effect of geometrical parameters of reduction on the working surface deformation of axisymmetric mirrors was carried out. Using the obtained data it is possible to optimize the design of relief and fastening to obtain the minimum weight and deformation of the mirror working surface on the ground.

**Keywords:** Zernike coefficients; weight reduction of mirrors.

### Вступ

Зменшення ваги корисного навантаження космічних апаратів є дуже важливим напрямом досліджень, оскільки вартість виводу на орбіту Землі кожного кілограма вантажу велика. Для космічних апаратів, які в своєму складі мають системи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), одним зі способів зменшення ваги є використання полегшених дзеркал в оптичних трактах цих систем.

У дзеркальних чи дзеркально-лінзових системах вхідної оптики ДЗЗ можуть бути застосовані два типи дзеркал: позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал та осесиметричні дзеркала. При використанні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал відсутнє центральне екранування, яке знижує модуляційну передавальну функцію системи на середніх частотах. Аналіз впливу полегшення на деформацію робочих поверхонь таких дзеркал наведений у [1]. Однак у більшості систем використовуються осесиметричні головні дзеркала, які простіші у виготовленні та контролі.

У роботах [2, 3] автори проводять порівняння різних типів полегшення осесиметрич-

них головних дзеркал і показують процес їх виготовлення. В [4–6] розглядаються деформації дзеркальної поверхні осесиметричних дзеркал залежно від положення дзеркал у кріпленні. У працях [7, 8] розглядається вплив геометричних розмірів полегшення та кріплення на деформацію дзеркала. Однак у всіх вказаних роботах дзеркало кріпиться на біподи.

Дослідженню впливу полегшення на деформацію дзеркал, тим більше при кріпленні на три отвори у задній стінці, приділено мало уваги.

### Постановка задачі

Мета роботи полягає в дослідженні впливу типу кріплення та геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні осесиметричних дзеркал під дією сили тяжіння при кріпленні за отвори в задній стінці.

### Вихідні положення для аналізу

Задача полегшення – це зменшення маси дзеркал за рахунок конструктивних вибірок. Дзеркало після полегшення повинно мати до-

\*corresponding author: pozdniakovd@gmail.com

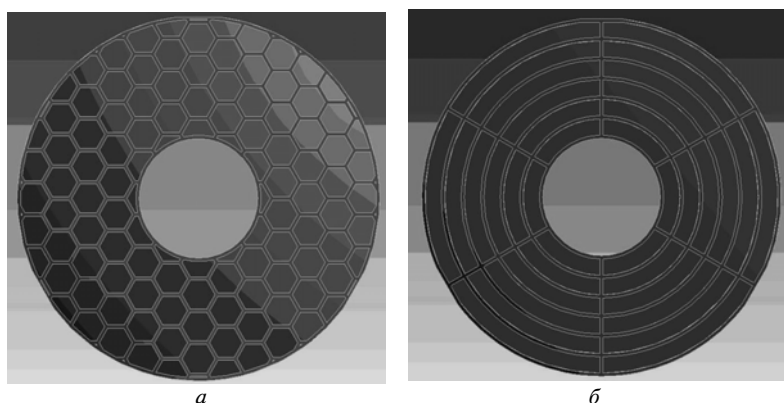


Рис. 1. Полегшення з вирізами двох типів: *a* – шестикутні, *б* – кільцеві

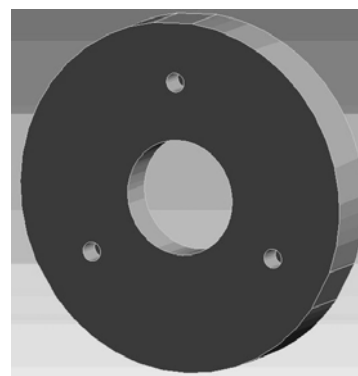


Рис. 2. Отвори у задній стінці для кріплення дзеркала

статні жорсткість і міцність, що необхідні при виготовленні, проведенні контрольних операцій та при виведенні системи на орбіту.

Для моделювання було вибрано полегшення з двома типами вирізів: шестикутними та кільцевими (рис. 1).

Основним критерієм, який ми використовуємо для визначення деформації робочої поверхні дзеркал, є середньквадратичне відхилення їх робочої поверхні (RMS), що визначається в довжинах хвиль (при  $\lambda = 630$  нм). RMS визначається за коефіцієнтами Церніке (Zernike Fringe Sag), які своєю чергою розраховуються за значеннями деформації в кожній точці робочої поверхні дзеркала. Після розрахунку 37 коефіцієнтів Церніке деформація подається у вигляді полінома. Перші чотири члени, що відповідають нахилам і зміщенню поверхні, прибираються, оскільки їх у реальних системах легко усунути юстуванням. Методика розрахунку наведена в [1].

У процесі дослідження було вибрано 12 параметрів, залежність деформації від яких розглядалася. При дослідженні дії одного з параметрів інші мали сталі стандартні значення. Для розрахунку були вибрані такі основні стандартні значення, які не змінювалися: діаметр дзеркала 550 мм, його товщина 55 мм, товщина ребер 5 мм, глибина отворів для кріплення 40 мм. Як задня стінка (ЗС) для шестикутних вирізів був вибраний варіант з отвором, діаметр якого дорівнює 0,6 від діаметра кола, вписаного в шестикутник. Для кільцевих вирізів розміри ЗС сталі – 5 мм із кожної сторони.

Як кріплення був вибраний варіант закріплення дзеркала за циліндричні поверхні трьох отворів, що розміщені у його задній стінці (рис. 2).

### Залежність деформації робочої поверхні дзеркала від різних факторів

**Розміщення отворів кріплення.** Для початку було проведено дослідження впливу повороту дзеркала відносно оптичної осі, тобто впливу розміщення отворів кріплення, на деформацію робочої поверхні дзеркала. Було промодельовано 6 варіантів розміщення отворів: від положення, коли 2 отвори містяться знизу (рис. 3) з поворотом відносно оптичної осі через кожні  $60^\circ$ . Аналіз показав, що RMS при цьому не змінюється, а отже, деформація дзеркала не залежить від положення дзеркала й отворів для кріплення. Моделювання було проведено на дзеркалі з полегшенням із шестикутними отворами.

**Конструктивні параметри дзеркала.** Для осесиметричних дзеркал можна виділити такі конструктивні параметри: діаметр дзеркала, діаметр центрального отвору, радіус дзеркальної поверхні та товщину дзеркала.

При збільшенні діаметра дзеркала деформація збільшується для обох варіантів полегшення майже однаково (400 мм –  $0,008\lambda$ , 800 мм –  $0,03\lambda$ ). Діаметр центрального отвору майже не впливає на деформацію незалежно від типу полегшення. Графік залежності деформації від радіуса дзеркальної поверхні має експоненційний вигляд: зі збільшенням радіуса до  $\sim 1000$  мм деформація різко зменшується, при подальшому збільшенні радіуса значення деформації майже не змінюється. Параметри, що розглянуті, вибираються з оптичних міркувань, тому вони не розглядаються при мінімізації деформацій.

Залежність деформації дзеркала від його товщини становить більший інтерес, оскільки від нього не залежать оптичні властивості дзерка

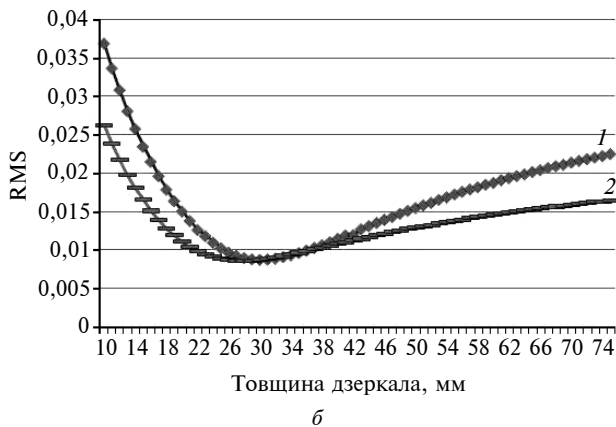
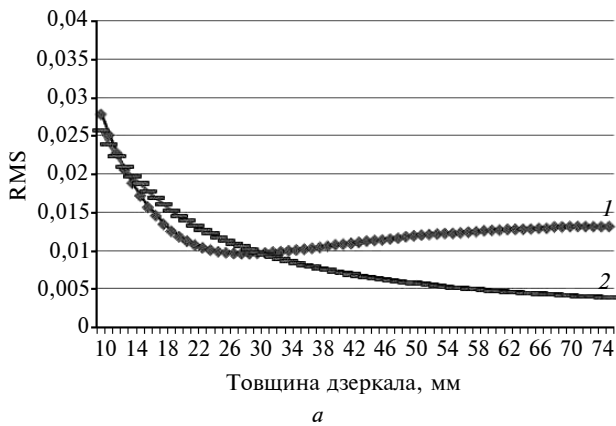


Рис. 3. Залежності деформації робочої поверхні дзеркала від його товщини при використанні полегшення: а – шестикутної форми, б – кільцевої форми; без ЗС (1) і з ЗС (0,6) (2)

ла. Залежності деформації від товщини для двох варіантів полегшення показані на рис. 3. При використанні шестикутних вирізів деформація зменшується при збільшенні товщини за умови використання дзеркала із задньою стінкою. Графік деформації дзеркала без задньої стінки має мінімум. При використанні кільцевих вирізів деформація робочої поверхні менша при використанні дзеркал із задньою стінкою. Дуже сильно ця різниця відчувається при використанні дуже тонких або товстих дзеркал, однак на практиці такі дзеркала не застосовуються.

Дослідження залежності деформації від товщини дзеркал проводилося за умови, що глибина кріплення (про яку мова йтиме пізніше) дорівнювала товщині дзеркала в кожній досліджуваній точці. Це призводить до того, що графіки подальших досліджень (де значення глибини отворів є сталим протягом дослідження) будуть зміщені по осі  $OY$  на деяку величину. При цьому форма графіків не змінюється.

**Геометричні параметри полегшення.** Для шестикутних вирізів параметром полегшення є розмір сторони шестикутника. Як видно з рис. 4, цей розмір впливає на деформацію досить сильно. Використання шестикутника з більшою стороною приводить до зменшення ваги дзеркала.

Для кільцевих вирізів параметрами полегшення є кількість кілець із вирізами (рис. 5) та кількість вирізів у кільцях (рис. 6). Як видно з графіків, при збільшенні кількості кілець жорсткість дзеркала збільшується, однак вага також збільшується. Те ж саме спостерігається при збільшенні кількості вирізів у кільцях.

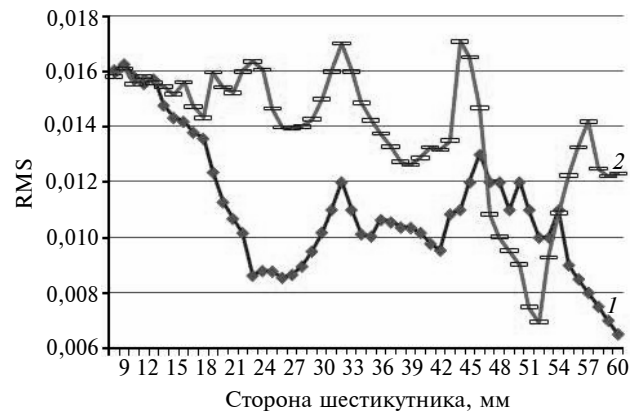


Рис. 4. Залежність деформації дзеркала від розміру шестикутника: 1 – без ЗС, 2 – із ЗС (0,6)

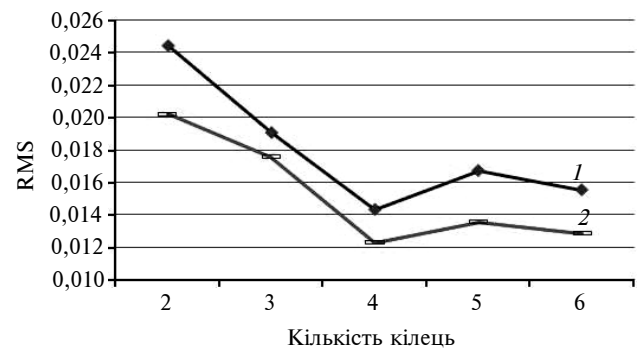


Рис. 5. Залежність деформації дзеркала від кількості кілець із вирізами у дзеркалі: 1 – без ЗС, 2 – із ЗС (0,6)

Як видно з рис. 7, за деякої кількості вирізів полегшення деформація збільшується. На це треба звертати увагу при розробці полегшення.

Спільним параметром для обох типів полегшення є товщина ребер (рис. 7). З графіків видно, що для шестикутних отворів деформація дзеркала не залежить від товщини ребер при використанні дзеркала із ЗС. При використанні дзеркала без ЗС є явний мінімум при товщині ребер 4,5 мм. При використанні кільцевих вирі-

зів графік має майже лінійний вигляд і зменшується зі збільшенням розміру ребра.



Рис. 6. Залежність деформації дзеркала від кількості вирізів у кожному з кільцевої полегшення

Наступним спільним параметром для обох варіантів полегшення є його глибина. Задачею полегшення є зменшення маси дзеркала, тому при використанні будь-якого типу полегшення доцільно буде робити отвори полегшення максимально глибокими. Однак буде цікаво дослідити залежність деформації від глибини отворів.

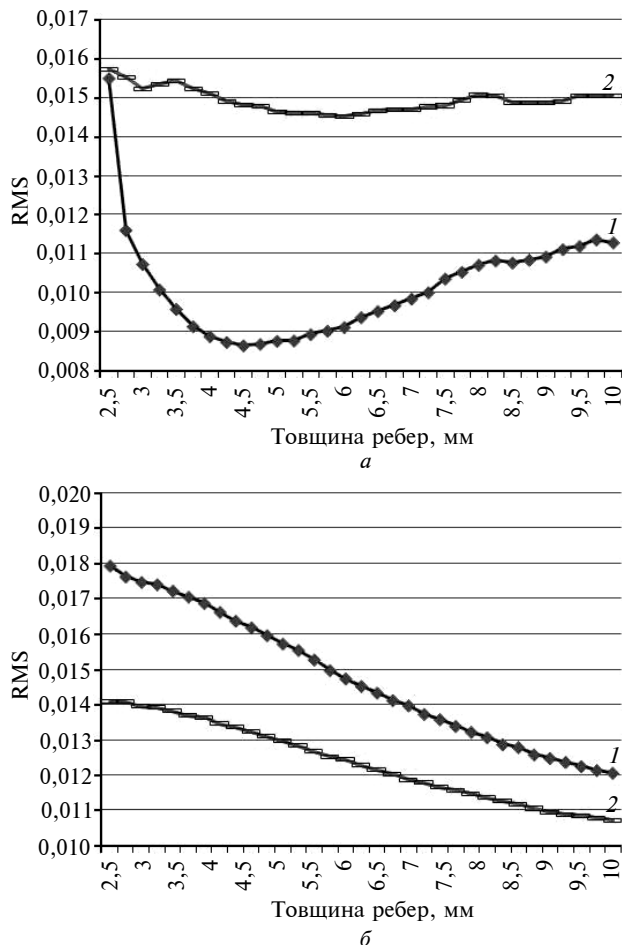


Рис. 7. Залежність деформації дзеркала від товщини ребер при використанні полегшення шестикутної (а) і кільцевої (б) форми: 1 – без ЗС, 2 – із ЗС (0,6)

З графіків на рис. 8. видно, що при використанні дзеркал без полегшення жорсткість системи буде високою, а отже, деформація малою. Однак при використанні дзеркал із полегшенням з найглибшими отворами деформація буде ще меншою. Це відбувається тому, що маса дзеркала зменшується швидше, ніж його жорсткість, і дзеркалу легше тримати свою форму. Застосовувати отвори з меншими глибинами недоцільно, оскільки при цьому деформація та вага значно зростають.

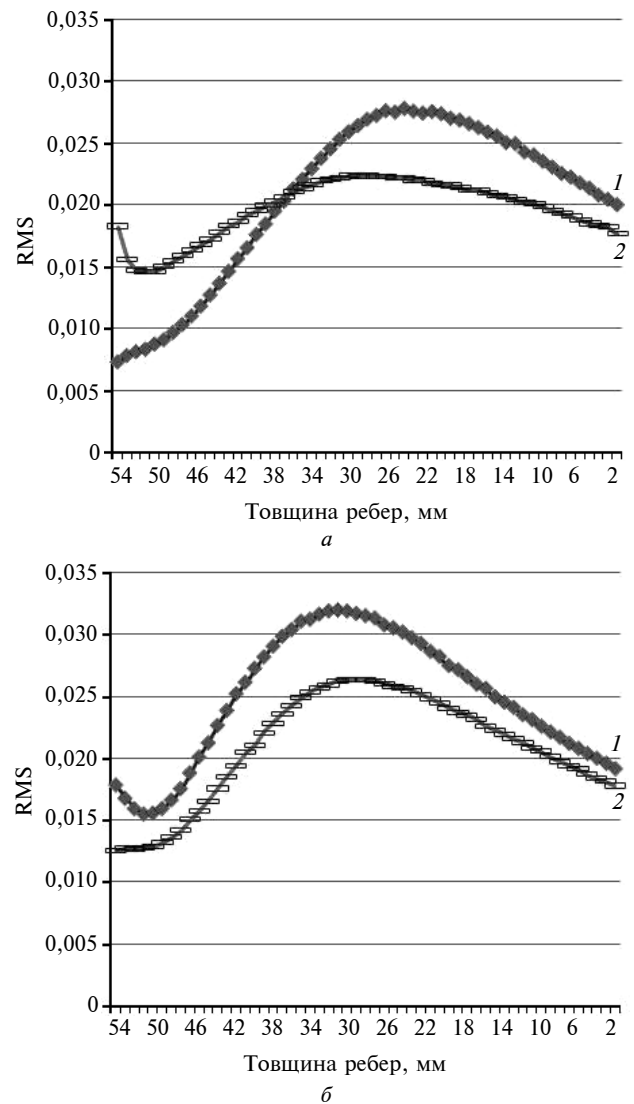


Рис. 8. Залежність деформації дзеркала від глибини отворів полегшення при використанні полегшення шестикутної (а) і кільцевої (б) форми: 1 – без ЗС, 2 – із ЗС (0,6)

**Геометричні параметри кріплення.** Велике значення в конструкції дзеркала має спосіб його закріплення на платформі. Найкращим є спосіб кріплення дзеркала на трьох жорстких опорах, які закріплені на оптимальному, з точки зору мінімуму деформацій, діаметрі [9]. Геометричними параметрами кріплення були вибрані такі: діаметр кола, на якому розміщені отвори для кріплення, діаметр отворів для кріплення, товщина стінок і глибина.

На рис. 9 наведено залежність деформації дзеркала від діаметра кола, на якому розміщено отвори для кріплення. Як видно з графіків, для шестикутних вирізів чим діаметр кола більший, тим більша деформація. Для кільцевих вирізів є явний мінімум, який розміщений приблизно на 0,6 від повного діаметра дзеркала. Також видно, що за вибраних стандартних значень параметрів при моделюванні для шес-

тикутників кращим є варіант полегшення без ЗС, а для кільцевих вирізів – із ЗС.

Залежність деформації від діаметра отвору для кріплення має експоненційний вигляд: деформація зменшується зі збільшенням діаметра (рис. 10). Таке збільшення не призводить до зміни ваги дзеркала.

Зміна товщини стінок майже не впливає на деформацію дзеркала для обох видів полегшення.

На рис. 11 показані графіки залежності деформації від глибини отворів для кріплення. Треба звернути увагу, що весь аналіз для шестикутних вирізів був проведений для глибини отворів для кріплення 40 мм, що виявилось мінімумом для варіанта полегшення без ЗС. При цій глибині отворів варіант полегшення із ЗС має майже в два рази більшу деформацію. Для кільцевих вирізів такого не спостерігається, на

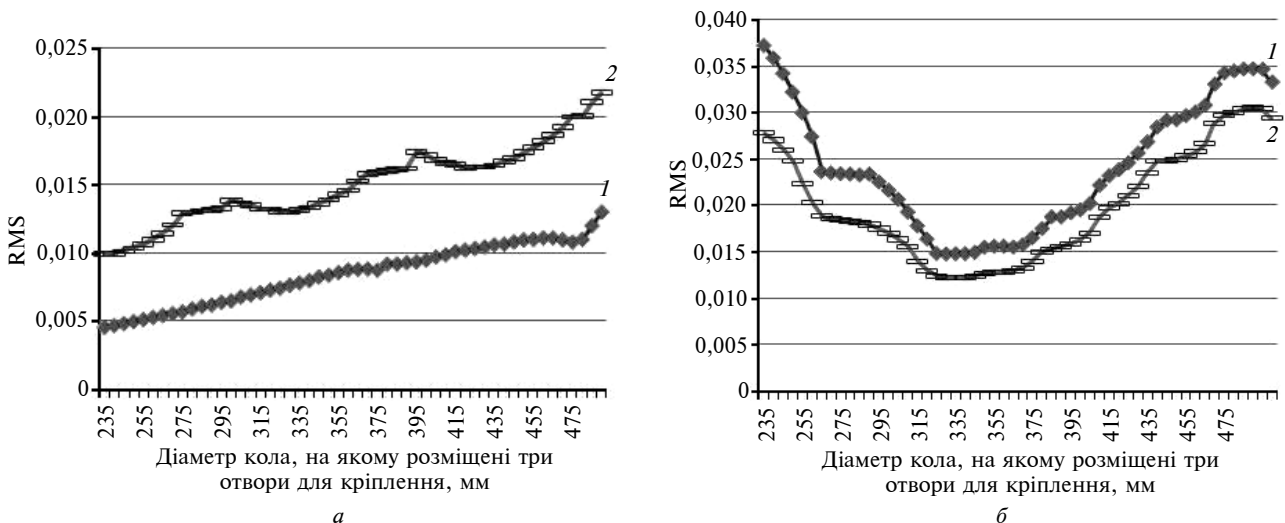


Рис. 9. Залежність деформації дзеркала від діаметра кола, на якому розміщені три отвори для кріплення, при використанні полегшення шестикутної (а) і кільцевої (б) форми: 1 – без ЗС, 2 – із ЗС (0,6)

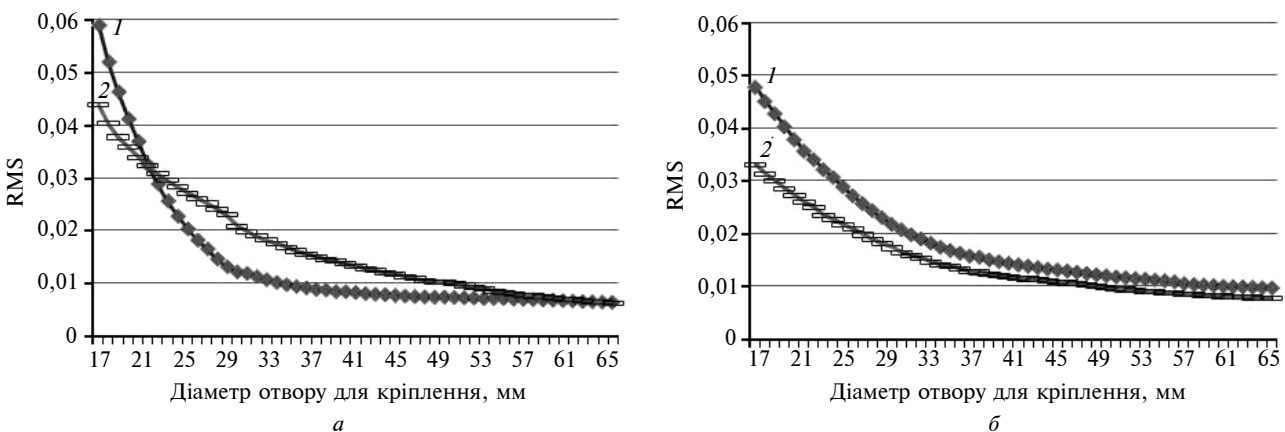


Рис. 10. Залежність деформації дзеркала від діаметра отворів для кріплення при використанні полегшення: а – шестикутної форми, б – кільцевої форми; без ЗС (1) і з ЗС (0,6) (2)

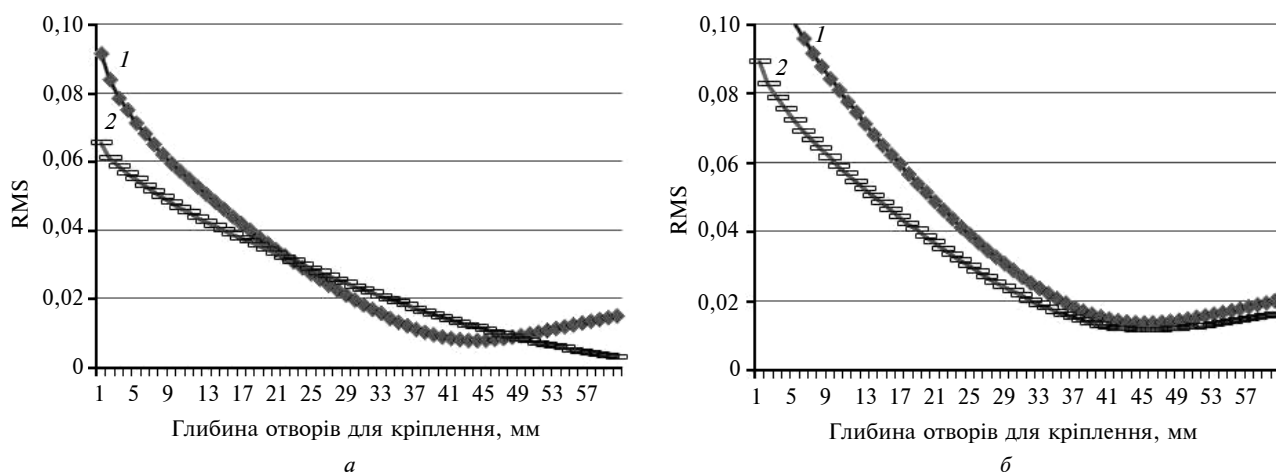


Рис. 11. Залежність деформації дзеркала від глибини отворів для кріплення при використанні полегшення: *a* – шестикутної форми, *б* – кільцевої форми; без ЗС (1) і з ЗС (0,6) (2)

вибраній глибині обидва варіанти полегшення (з та без ЗС) мають майже однакове значення деформації.

### Висновки

У процесі роботи з використанням розробленого в [1] алгоритму аналізувався вплив різних геометричних параметрів (конструктивних, параметрів полегшення та кріплення) на деформацію робочої поверхні осесиметричних дзеркал. Аналіз проводився для двох варіантів полегшення: з шестикутними та кільцевими вирізами з та без ЗС. Встановлено параметри, що впливають на деформацію найбільше: це товщина дзеркала, товщина ребер полегшення, його глибина, діаметр отворів для кріплення та їх глибина.

### Список літератури

1. Колобродов В.Г., Поздняков Д.В., Тягур В.М. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – № 2. – С. 89–96.
2. Design and fabrication of large-scale lightweight SiC space mirror / Z. Jianhan, Z. Yumin, H. Jiecai et al. // Proc. SPIE. – 2006. – **6148-0U**. – P. 1–6.
3. Abdula P.A., Tolstoba N.D. Comparing and analysis of design lightweight large mirrors for space basing // Proc. SPIE. – 2016. – **9889 1X**. – P. 1–4.
4. Selective reinforcement of a 2m-class lightweight mirror for horizontal beam optical testing / R.W. Besuner, K.P. Chow, S.E. Kendrick, S. Streetman. // Proc. SPIE. – 2008. – **7018**. – P. 1–12.
5. Study of bonding positions of isostatic mounts on a lightweight primary mirror / C.Y. Chan, Y.C. Chen, S.T. Chang et al. // Proc. SPIE. – 2012. – **8516 0M**. – P. 1–7.
6. Hagvong K., Ho-Soon Y., Yun-Woo L. Optomechanical analysis of a 1-m light-weight mirror system // J. Korean Phys. Soc. – 2013. – **62**, № 9. – P. 1239–1246.
7. Kang-Soo P., Jun Ho L., Sung-Kie Y. Lightweight mirror design method using topology optimization // Optical Eng. – 2005. – **44**, № 5. – P. 1–6.

Особливу увагу при розробці полегшення треба звернути на механічну частину кріплення, оскільки деформація дзеркала дуже сильно залежить саме від неї.

Використовуючи отримані графіки, можливо оптимізувати конструкцію полегшення та кріплення для одержання мінімальної деформації робочої поверхні дзеркала в земних умовах.

Подальша робота буде спрямована на дослідження деформації робочої поверхні дзеркал при використанні інших класичних типів полегшення (вирізів круглої та трикутної форми), при застосуванні інших матеріалів, а також при використанні методів оптимізації топології у програмах скінченноелементного аналізу.

8. *Hagyong K., Ho-Soon Y.* Design optimization of a 1-m lightweight mirror for a space telescope // *Proc. SPIE.* – 2013. – **52**, № 9. – P. 1–9.
9. *Савицкий А.М., Соколов И.М.* Вопросы конструирования облегченных главных зеркал космических телескопов // *Оптический журнал.* – 2009. – **76**, № 10. – С. 94–98.

### References

- [1] V. Kolobrodov *et al.*, “Influence of geometrical parameters of reduction on the deformation of working surface of the off-axis segments of axisymmetric mirrors”, *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 2, pp. 89–96, 2017 (in Ukrainian). doi: 10.20535/1810-0546.2017.2.94144
- [2] Z. Jianhan *et al.*, “Design and fabrication of large-scale lightweight SiC space mirror”, *Proc. SPIE*, vol. 6148-0U, pp. 1–6, 2006. doi: 10.1117/2.1201607.006582
- [3] P.A. Abdula *et al.*, “Comparing and analysis of design lightweight large mirrors for space basing”, *Proc. SPIE*, vol. 9889 1X, pp. 1–4, 2016. doi: 10.1117/12.2227889
- [4] R.W. Besuner *et al.*, “Selective reinforcement of a 2m-class lightweight mirror for horizontal beam optical testing”, *Proc. SPIE*, vol. 7018, pp. 1–12, 2008. doi: 10.1117/12.787477
- [5] C.Y. Chan *et al.*, “Study of bonding positions of isostatic mounts on a lightweight primary mirror”, *Proc. SPIE*, vol. 8516 0M, pp. 1–7, 2012. doi: 10.1117/12.929430
- [6] K. Hagyon *et al.*, “Optomechanical analysis of a 1-m light-weight mirror system”, *J. Korean Phys. Soc.*, 2013, vol. 62, no. 9, pp. 1239–1246. doi: 10.3938/jkps.62.1239
- [7] P. Kang-Soo *et al.*, “Lightweight mirror design method using topology optimization”, *Optical Eng.*, vol. 44, no. 5, pp. 1–6, 2005. doi: 10.1117/1.1901685
- [8] K. Hagyon *et al.*, “Design optimization of a 1-m lightweight mirror for a space telescope”, *Proc. SPIE*, vol. 52, no. 9, pp. 1–9, 2013. doi: 10.1117/1.OE.52.9.091806
- [9] A.M. Savytsky *et al.*, “Questions of designing lightweight primary mirrors of space telescopes”, *Opticheskiy Jurnal*, vol. 76, no. 10, pp. 94–98, 2009 (in Russian).

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

### ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЛЕГШЕННЯ НА ДЕФОРМАЦІЮ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЗЕРКАЛ

**Проблематика.** Полегшення дзеркал є актуальним питанням при розробці оптичних систем космічного базування. Однак дослідженню впливу полегшення на деформацію дзеркальної поверхні осесиметричних дзеркал приділяється мало уваги.

**Мета дослідження.** Аналіз можливостей полегшення осесиметричних дзеркал завдяки дослідженню впливу геометричних параметрів полегшення та кріплення на деформацію їх робочих поверхонь під дією сили тяжіння.

**Методика реалізації.** Проведено дослідження впливу різних варіантів побудови осесиметричних дзеркал на деформацію їх робочої поверхні через моделювання у програмах скінченноелементного та оптичного аналізу.

**Результати дослідження.** Проаналізовано вплив конструктивних параметрів, геометричних розмірів полегшення та кріплення на деформацію робочої поверхні осесиметричних дзеркал і дано рекомендації щодо застосування різних типів полегшення. Визначено, що для отримання меншої деформації необхідно використовувати шестикутні отвори, а для найбільшого зменшення ваги – кільцеві вирізи. Особливу увагу при розробці полегшення треба звернути на механічну частину кріплення, оскільки деформація дзеркала дуже сильно залежить саме від неї.

**Висновки.** Досліджено вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні осесиметричних дзеркал. Використовуючи отримані дані, можливо оптимізувати конструкцію полегшення і кріплення для отримання мінімальних ваги та деформації робочої поверхні дзеркала в земних умовах.

**Ключові слова:** коефіцієнти Церніке; полегшення дзеркал.

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

### ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛЕГЧЕНИЯ НА ДЕФОРМАЦИЮ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОСЕСИМЕТРИЧНЫХ ЗЕРКАЛ

**Проблематика.** Облегчение зеркал является актуальным вопросом при разработке оптических систем космического базирования. Однако исследованию влияния облегчения на деформацию зеркальной поверхности осесимметричных зеркал уделяется мало внимания.

**Цель исследования.** Анализ возможностей облегчения осесимметричных зеркал путем исследования влияния геометрических параметров облегчения и крепления на деформацию их рабочих поверхностей под действием силы тяжести.

**Методика реалізації.** Проведено дослідження впливу різних варіантів побудови осесиметричних дзеркал на деформацію їх робочої поверхності шляхом моделювання в програмах кінечноелементного і оптичного аналізу.

**Результати дослідження.** Проаналізовано вплив конструктивних параметрів, геометричних розмірів об'єднання і кріплення на деформацію робочої поверхності осесиметричних дзеркал, і дані рекомендації по застосуванню різних типів об'єднання. Визначено, що для отримання меншої деформації необхідно використовувати шестикутні отвори, а для найбільшого зменшення ваги – кільцеві вирізи. Особливу увагу при розробці об'єднання треба звернути на механічну частину кріплення, так як деформація дзеркала дуже сильно залежить саме від неї.

**Висновки.** Проведено дослідження впливу геометричних параметрів об'єднання на деформацію робочої поверхності осесиметричних дзеркал. Використовуючи отримані дані, можливо оптимізувати конструкцію об'єднання і кріплення для отримання мінімальної ваги і деформації робочої поверхності дзеркала в земних умовах.

**Ключові слова:** коефіцієнти Церніке; об'єднання дзеркал.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
09 вересня 2017 року