

УДК 681.78

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.1.119063

Д.В. Поздняков\*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ РОЗМІРІВ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЗЕРКАЛ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ НА ВИБІР ТИПУ ЇХ ПОЛЕГШЕННЯ

**Проблематика.** Полегшення дзеркал є актуальним питанням при розробці оптичних систем космічного базування. Однак дослідженню впливу розмірів та форми дзеркал (осесиметричних і позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал) на вибір типу полегшення приділяється мало уваги.

**Мета дослідження.** Аналіз можливостей мінімізації деформації робочої поверхні та ваги дзеркал через дослідження впливу розмірів та форми дзеркал на вибір типу полегшення (із суцільною задньою стінкою, із задньою стінкою з отворами та без неї).

**Методика реалізації.** Досліджено вплив розмірів та форми дзеркал на вибір типу полегшення. Розглянуто вплив типу дзеркала, його розмірів і товщини на деформації його робочої поверхні.

**Результати дослідження.** Проаналізовано вплив розмірів та типу дзеркала на деформації його робочої поверхні. Дано рекомендації щодо застосування задньої стінки при полегшенні шестикутними вирізами. Визначено, що для вузьких позаосьових дзеркал, відношення меншої сторони яких до більшої становить 0,5 і менше, а також для осесиметричних дзеркал із діаметром менше 400 мм можливо застосовувати полегшення без задньої стінки. Для більших дзеркал необхідно застосовувати полегшення із задньою стінкою з отворами. Для осесиметричних дзеркал з діаметром понад 650 мм необхідна суцільна задня стінка. Рекомендації дано для оптичного сканера дистанційного зондування Землі, для якого розраховане значення деформації не повинне перевищувати  $0,005\lambda$ .

**Висновки.** У процесі роботи спеціальним алгоритмом було проаналізовано залежність деформації робочої поверхні різних осесиметричних і позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал від їх розміру та від типу полегшення.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі; полегшення дзеркал; коефіцієнти Церніке.

### Вступ

При розробці оптичних пристроїв дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які мають високу роздільну здатність, без великогабаритних дзеркал обійтися не можливо. Такі дзеркала, в силу своїх розмірів, мають значну вагу, тому їх необхідно полегшувати. Задача полегшення – оптимізувати конструкцію дзеркала таким чином, щоб його вага та деформація робочої поверхні були мінімальними.

Для систем ДЗЗ, незалежно від типу дзеркала (осесиметричного або позаосьового сегмента осесиметричного дзеркала) можливо виділити три типи полегшення: із задньою стінкою (ЗС), без неї та проміжний варіант (ЗС наявна, але у ній є отвори) [1]. Задня стінка, з одного боку, може зменшити деформацію робочої поверхні, оскільки конструкція дзеркала з нею буде більш жорсткою, а з іншого боку, збільшує вагу дзеркала, яка своєю чергою буде збільшувати навантаження на елементи кріплення.

У багатьох працях [2–7], де автори наводять результати роботи з полегшення конкретних дзер-

кал, наявність або відсутність ЗС у моделі ніяк не пояснюється. В той же час у працях, де проводиться аналіз різних типів дзеркал, наприклад [8, 9], також не описується, у яких випадках ЗС необхідна, а у яких можливо обійтися без неї.

### Постановка задачі

Мета роботи полягає в дослідженні впливу розміру та форми дзеркала оптико-електронної системи ДЗЗ на його конструкцію (вибір типу полегшення) з метою мінімізації його деформації та ваги.

### Вихідні положення для аналізу

Основним критерієм, який ми використовуємо для визначення деформації робочої поверхні дзеркал, є середньоквадратичне відхилення їх робочої поверхні (англ. Root Mean Square Deviation – RMS), що визначається в довжинах хвиль (при  $\lambda = 695$  нм). RMS визначається за коефіцієнтами Церніке (Zernike Fringe Sag), які своєю чергою розраховуються за значеннями деформації в

\* corresponding author: pozdniakovd@gmail.com

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], алгоритм роботи програми – в [10].

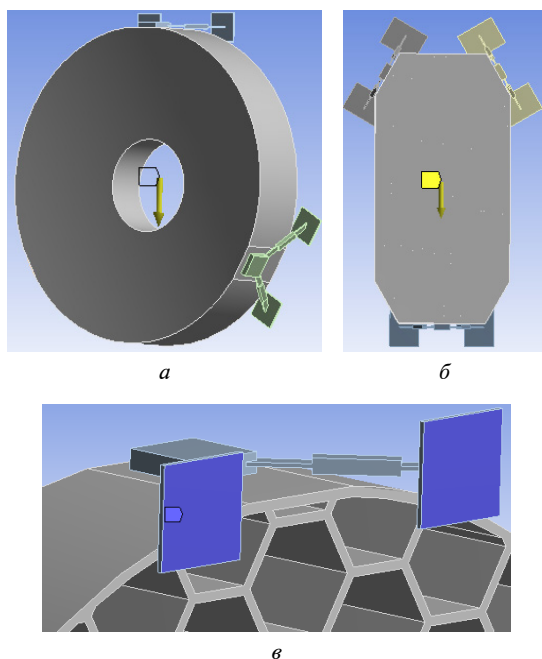


Рис. 1. Кріплення: *a* – осесиметричного дзеркала, *б* – позаосьового сегмента осесиметричного дзеркала, *в* – грані одного з біподів, що закріплені нерухомо на прикладі осесиметричного дзеркала. Стрілка – напрямок дії сили тяжіння

Як кріплення дзеркала були вибрані біподи, які з однієї сторони закріплюються за лиски на циліндричній поверхні дзеркала (для осесиметрич-

них) (рис. 1, *a*) або за фаски (для позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал) (рис. 1, *б*), а з іншої – закріплюються нерухомо (рис. 1, *в*) [4]. Дзеркала розміщені вертикально, напрямок дії сили тяжіння показаний на рис. 1 стрілками.

Положення кріплення має бути таким, щоб площа, у якій розміщені три точки перетину ніжок кожного з біподів, проходила через точку центра мас дзеркала. При такому положенні деформація буде мінімальною.

Як полегшення вибрані вирізи шестикутної форми. У наведених даних під ЗС розуміється задня стінка з отворами, діаметр яких дорівнює 0,6 від діаметра кола, вписаного у шестикутник.

### Позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал

Для дослідження впливу типу полегшення на деформацію робочої поверхні були вибрані прямокутні позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал з більшим розміром 400 мм. Менший розмір дорівнював 280 мм (відношення меншої сторони до більшої 0,7), 240 мм (0,6), 200 мм (0,5). Також змінним параметром була товщина дзеркала. Для дослідження було взято шість її значень: 30, 38, 46, 55, 64, 70 мм. Для кожного дзеркала та для кожного значення товщини знаходилося оптимальне положення кріплення для мінімізації деформації. Кожна точка на всіх графіках відповідає зміщенню кріплення на 0,1 мм.

На рис. 2–4 зображені графіки деформації робочої поверхні 3-х вибраних для дослідження дзеркал із ЗС та без неї за різної товщини дзеркала та різного положення кріплення відносно задньої грані.

Як видно з графіків, незалежно від розміру дзеркала чим воно товще, тим менше впливає положення кріплення на деформацію. Різниця між

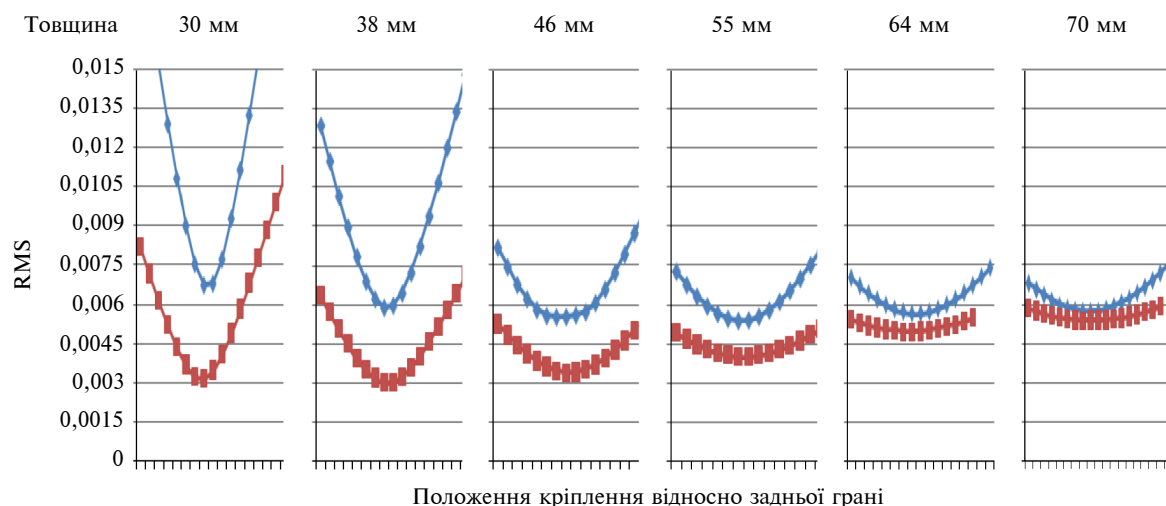


Рис. 2. Деформація робочої поверхні для дзеркала 400×280 мм (0,7): ◆ – без ЗС; ■ – із ЗС

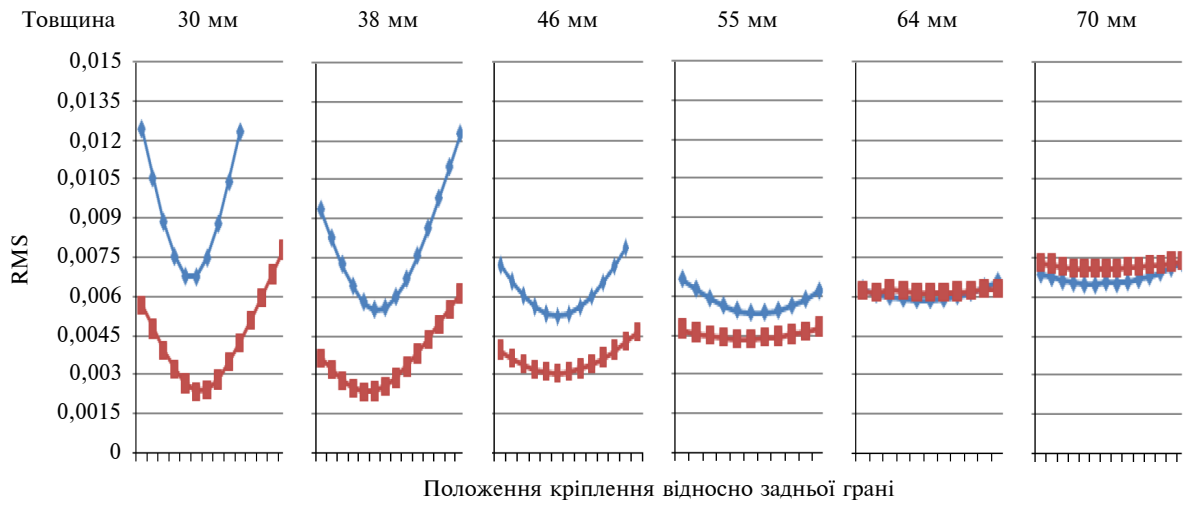


Рис. 3. Деформація робочої поверхні для дзеркала 400×240 мм (0,6): — без ЗС; — із ЗС

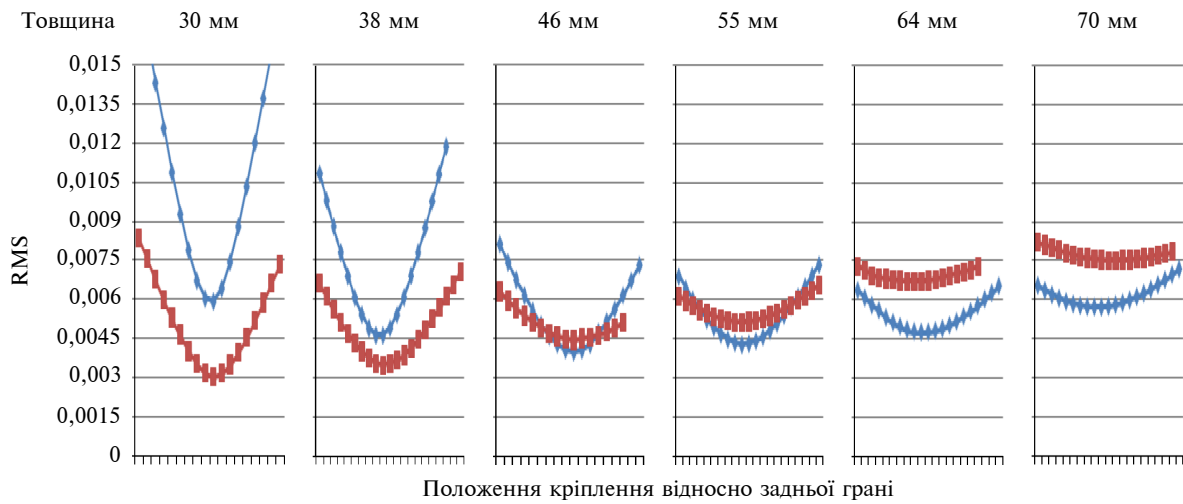


Рис. 4. Деформація робочої поверхні для дзеркала 400×200 мм (0,5): — без ЗС; — із ЗС

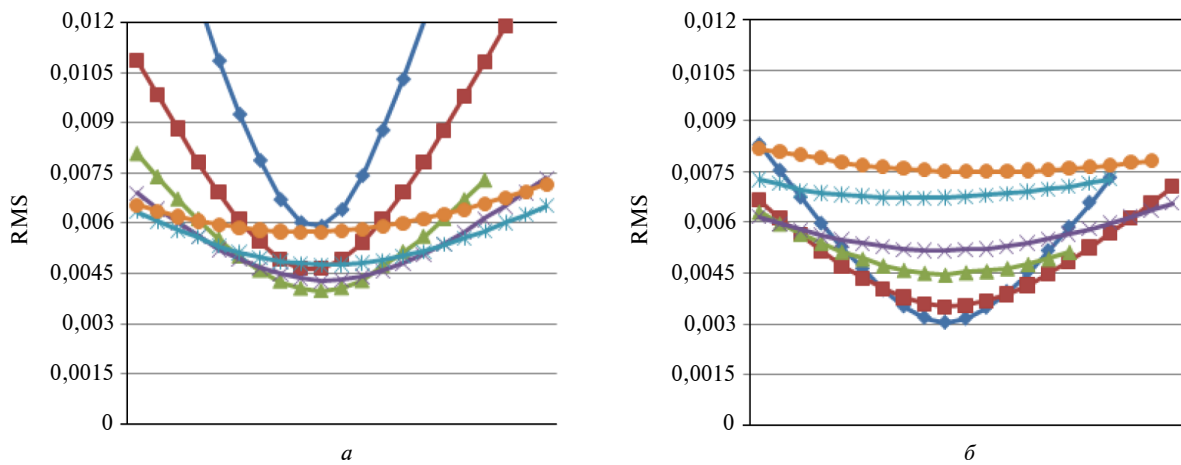


Рис. 5. Деформація робочої поверхні для дзеркала 400×200 мм (0,5): а – без ЗС; б – із ЗС; товщина: — 30 мм; — 38 мм; — 46 мм; — 55 мм; — 64 мм; — 70 мм

деформацією робочої поверхні дзеркал без ЗС та із ЗС зменшується при збільшенні товщини дзеркала. При звуженні дзеркала ця різниця стає від'ємною, тобто деформація без ЗС стає меншою від деформації із ЗС. При використанні більш вузького дзеркала можна застосовувати полегшення без ЗС.

На рис. 5. показана деформація робочої поверхні для дзеркала 400×200 мм. Видно, що найменша деформація для цього дзеркала без ЗС буде за товщини приблизно 46 мм, у той час як за наявності ЗС – при 30 мм. Для інших дзеркал форма графіків буде такою самою, однак вони зміщуються по осі  $Y$ .

Також із графіків на рис. 2–5 видно, що для дзеркал із ЗС деформація збільшується лінійно майже в 2 рази при зміні товщини з 30 до 70 мм. Для дзеркал без ЗС спостерігається спочатку зменшення деформації при збільшенні товщини до приблизно 46 мм, а потім її збільшення зі збільшенням товщини дзеркала.

### Осесиметричні дзеркала

Для дослідження типу полегшення на деформацію робочої поверхні були вибрані чотири осесиметричних дзеркала діаметром 650, 550, 450 і 350 мм. Усі дзеркала мають центральний отвір, діаметр якого становить 30 % від діаметра дзеркала. Розрахунок деформації проводився за шести значень товщини дзеркала при оптимальному положенні кріплення.

На рис. 6. наведені графіки деформації робочої поверхні для одного з чотирьох дзеркал, вибраних для дослідження. На графіках показана за-

лежність деформації від товщини дзеркала, положення кріплення та наявності чи відсутності ЗС.

Як видно з рис. 6, при збільшенні товщини дзеркала деформація робочої поверхні зменшується для обох варіантів полегшення, але для варіанта без ЗС сильніше. Різниця між деформаціями за відсутності та за наявності ЗС зменшується в 2 рази при зміні товщини з 30 до 70 мм. Також видно, що чим товще дзеркало, тим менше впливає положення кріплення на деформацію, хоча для осесиметричного дзеркала це проявляється набагато слабше, ніж для позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал.

Для дзеркал з іншими діаметрами спостерігаються такі самі залежності, однак зі зменшенням діаметра дзеркала деформація зменшується, і графіки зміщуються вниз по осі  $Y$  (рис. 7).

На рис. 8–11 зображені залежності деформацій для чотирьох осесиметричних дзеркал, що були вибрані для дослідження.

З графіків на рис. 7–11 видно, що для всіх дзеркал без ЗС різниця між значеннями деформації для різної товщини дзеркала залишається майже однаковою. Найменша деформація спостерігається за товщини дзеркала 70 мм, найбільша – при 30 мм.

Для всіх дзеркал із ЗС спостерігаються явне зміщення графіків та зміна їх форми – для більшого дзеркала мінімум деформації за товщини 70 мм, максимум – при 30 мм. Однак для найменшого з вибраних діаметрів дзеркала мінімум деформації буде за товщини дзеркала 38 мм. На рис. 7, б видно зміну форми кривої для найменшого з діаметрів. Також зі зменшенням діаметра дзеркала графіки стають більш вигнутими, тобто зміщення кріплення від оптимального положен-

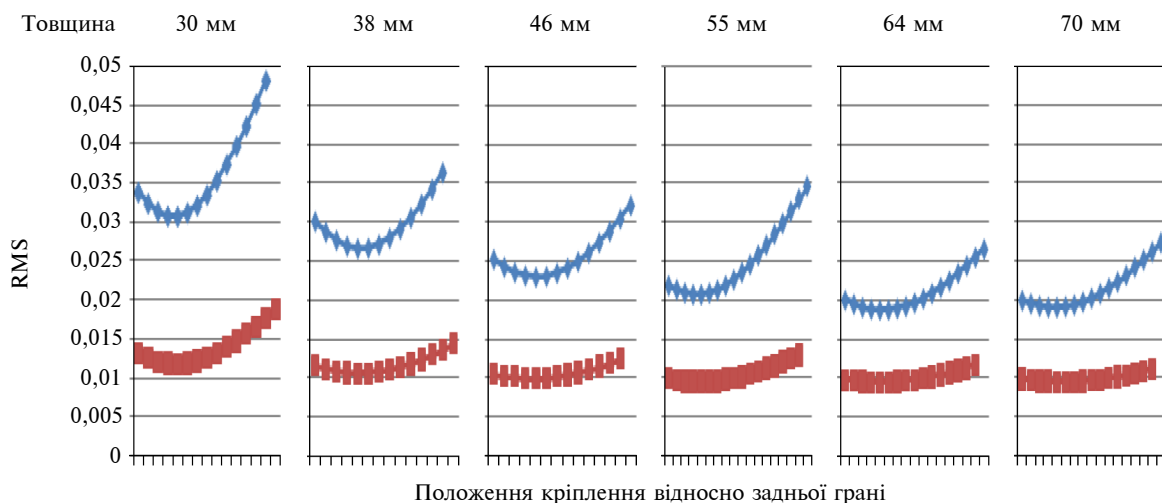


Рис. 6. Деформація робочої поверхні для дзеркала 650 мм:  $\blacklozenge$  – без ЗС;  $\blacksquare$  – із ЗС

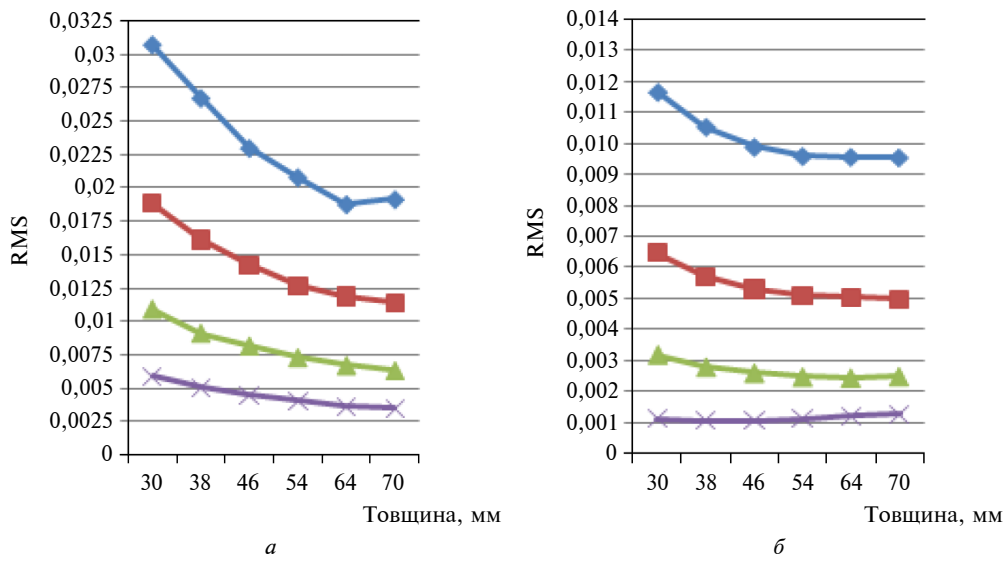


Рис. 7. Деформація робочої поверхні для осесиметричних дзеркал різних діаметрів: *a* – без ЗС; *б* – із ЗС; діаметр: —◆— 650 мм; —■— 550 мм; —▲— 450 мм; —×— 350 мм

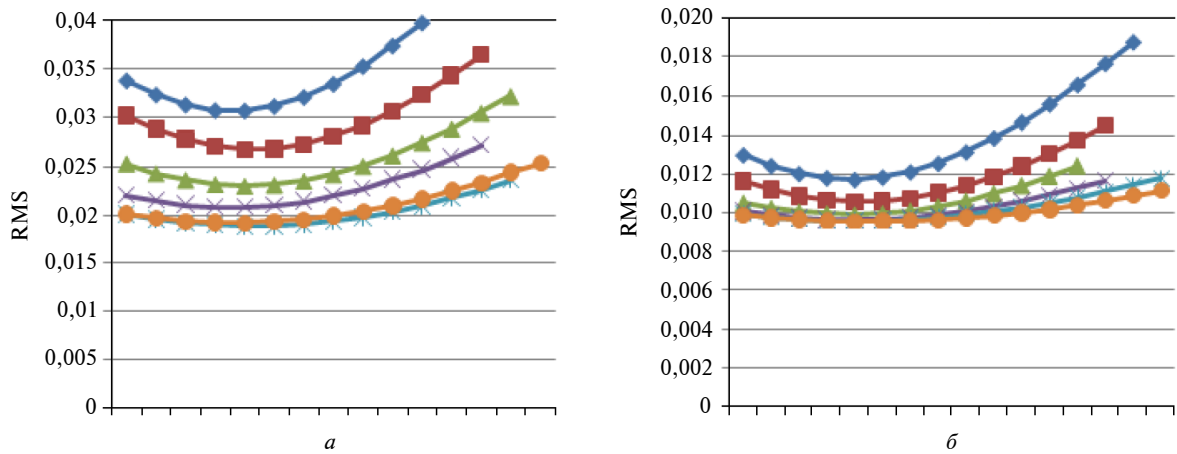


Рис. 8. Деформація робочої поверхні для дзеркала діаметром 650 мм: *a* – без ЗС; *б* – із ЗС; товщина: —◆— 30 мм; —■— 38 мм; —▲— 46 мм; —×— 55 мм; —\*— 64 мм; —●— 70 мм

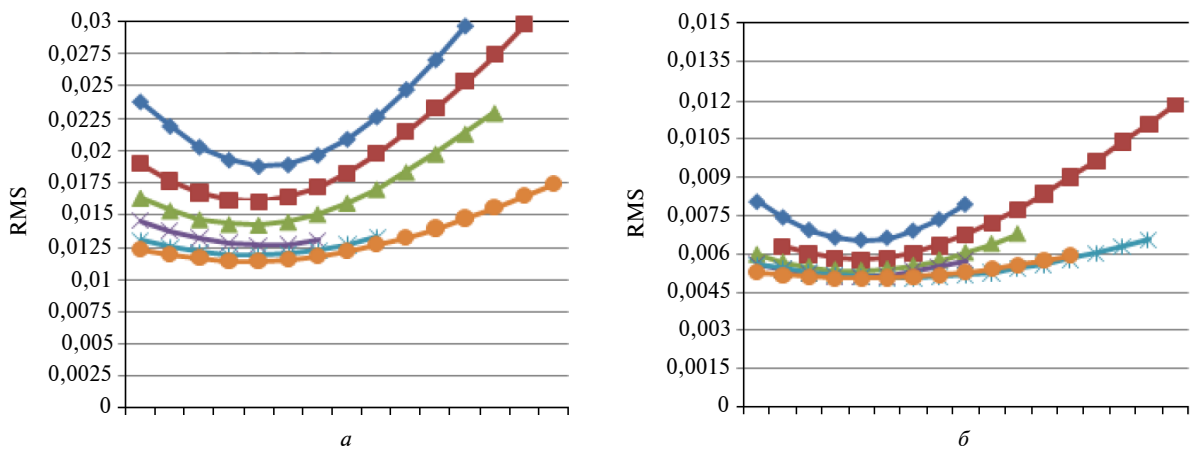


Рис. 9. Деформація робочої поверхні для дзеркала діаметром 550 мм: *a* – без ЗС; *б* – із ЗС; товщина: —◆— 30 мм; —■— 38 мм; —▲— 46 мм; —×— 55 мм; —\*— 64 мм; —●— 70 мм

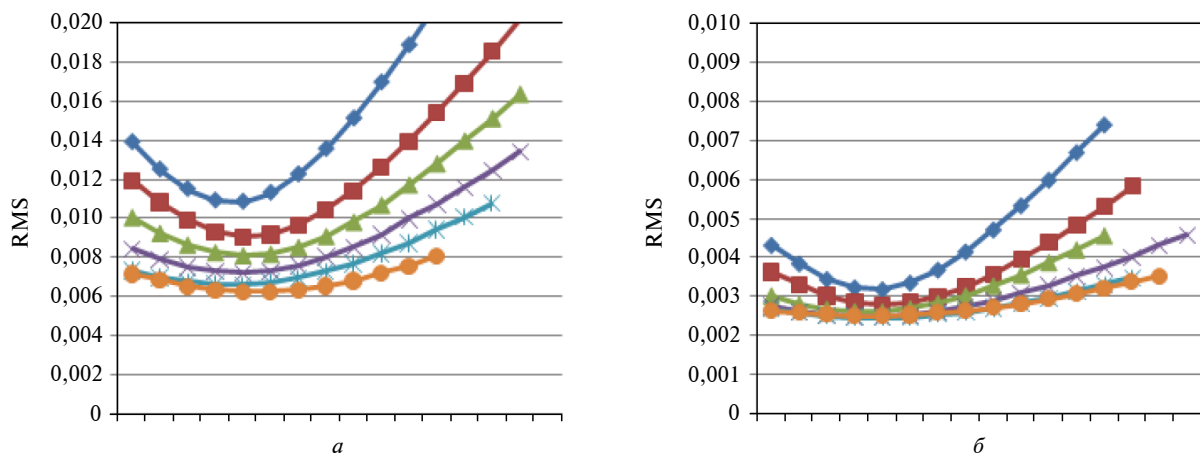


Рис. 10. Деформація робочої поверхні для дзеркала діаметром 450 мм: *a* – без ЗС, *б* – із ЗС; товщина:  $\blacklozenge$  – 30 мм;  $\blacksquare$  – 38 мм;  $\blacktriangle$  – 46 мм;  $\blacklozenge$  – 55 мм;  $\blackstar$  – 64 мм;  $\bullet$  – 70 мм

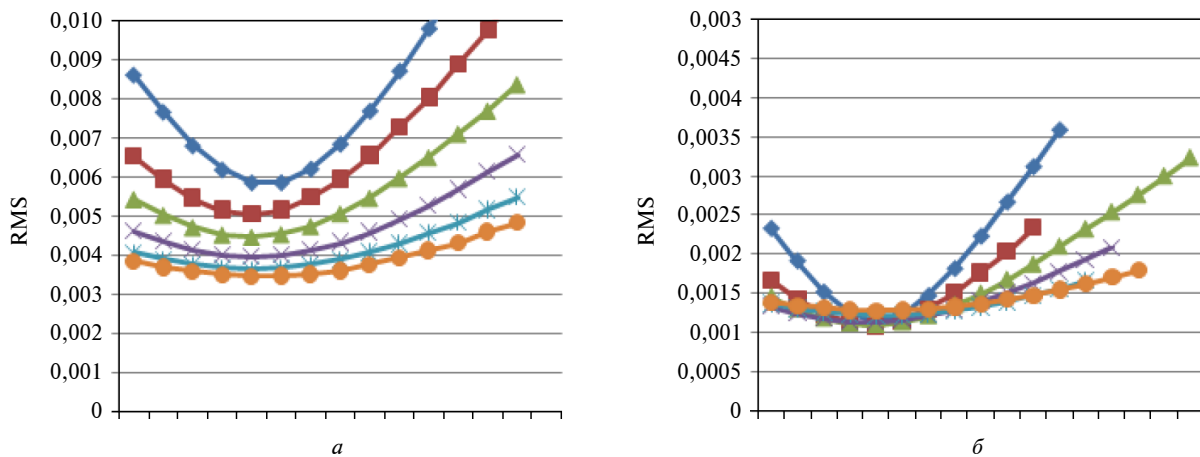


Рис. 11. Деформація робочої поверхні для дзеркала діаметром 350 мм: *a* – без ЗС, *б* – із ЗС; товщина:  $\blacklozenge$  – 30 мм;  $\blacksquare$  – 38 мм;  $\blacktriangle$  – 46 мм;  $\blacklozenge$  – 55 мм;  $\blackstar$  – 64 мм;  $\bullet$  – 70 мм

ня буде сильніше впливати на деформацію. Такий самий ефект спостерігається і для дзеркал без ЗС, однак там він дуже слабкий.

### Висновки

У процесі роботи спеціальним алгоритмом було проаналізовано залежність деформації робочої поверхні різних осесиметричних і позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал від їх розміру та від типу полегшення. Аналіз проводився для двох варіантів полегшення: із ЗС з отворами та без ЗС. Позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал були вибрані з різним відношенням меншої сторони до більшої: 0,7; 0,6 і 0,5, осесиметричні дзеркала – з різними діаметрами: 650, 550, 450 і 350 мм.

У результаті досліджень встановлено, що при використанні вузьких позаосьових сегментів

осесиметричних дзеркал із відношенням меншої сторони до більшої 0,5 і менше можливо застосувати полегшення без ЗС. Це дає змогу зменшити вагу дзеркала при отриманні мінімальної деформації робочої поверхні. При збільшенні відношення сторін рекомендується використовувати ЗС з отворами для зменшення деформації, однак у такому випадку трохи збільшуються вага дзеркала та важкість виробництва.

При використанні осесиметричних дзеркал за малих діаметрів (до приблизно 400 мм) також можна обійтися полегшенням без ЗС. Однак при подальшому збільшенні діаметра дзеркала деформація збільшується, і необхідно використовувати полегшення із ЗС з отворами. За діаметрів дзеркала більше 650 мм деформація зростає досить сильно, і для її зменшення можливо використовувати суцільну (без отворів) ЗС. При її використанні вага дзеркала збільшується, важкість виробниц-

тва збільшується суттєво, однак деформація зменшується приблизно на 40 % відносно ЗС із отворами.

Для обох типів дзеркал також можна вибирати товщину дзеркала для мінімізації ваги та деформації, однак при значному зменшенні товщини збільшується ризик отримання бракованого дзеркала.

Остаточний вибір варіанта полегшення дзеркал залежить від призначення оптичної системи,

де вони будуть застосовуватися. Рекомендації дані для оптичного сканера ДЗЗ, для якого розраховане значення деформації не повинне перевищувати  $0,005\lambda$ .

Подальша робота буде спрямована на дослідження різних типів кріплення дзеркал, у т.ч. і кріплення на біподи.

## 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] 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](http://www.congrexprojects.com/custom/icso/2012/papers/FP_ICSO-038.pdf)
- [3] K. Hanyong *et al.*, “Development of 1-m primary mirror for a spaceborne camera”, *Proc. SPIE*, vol. 95730W, pp. 1–6, 2015. doi: 10.1117/12.2187760
- [4] K. Hanyong *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
- [5] Chan Chia-Yen *et al.*, “Mirror lightweight for a spaceborne remote sensing instrument”, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, vol. 28, no. 2, pp. 139–147, 2017. doi: 10.3319/TAO.2016.03.29.02(EOF5)
- [6] Lee Haeng-Bor *et al.*, “Trade study of all-SiC lightweight primary mirror and metering structure for spaceborne telescope”, *Proc. SPIE*, vol. 95740D, pp. 1–12, 2015. doi: 10.1117/12.2188826
- [7] N.M. Abdulkadyrov *et al.*, “Optimization of the design of super-brightened astronomical mirrors”, *Kontenant*, vol. 14, no. 1, pp. 8–12, 2015 (in Russian).
- [8] D. Vukobratovich, “Lightweight mirror design”, in *Optomechanical Engineering Handbook*, A. Ahmad, Ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [9] P.A. Abdula *et al.*, “Comparing and analysis of design lightweight large mirrors for space basing”, *Proc. SPIE*, vol. 98891X, pp. 1–4, 2016. doi: 10.1117/12.2227889
- [10] D. Pozdniakov *et al.*, “Development of software for combining finite element and optical analyses”, *Eastern-Europe J. Enterprise Technol.*, no. 4, pp. 46–53, 2017. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108458

Д.В. Поздняков

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ВЫБОР ТИПА ИХ ОБЛЕГЧЕНИЯ

**Проблематика.** Облегчение зеркал является актуальным вопросом при разработке оптических систем космического базирования. Однако исследованию влияния размеров и формы зеркал (осесимметричных и внеосевых сегментов осесимметричных зеркал) на выбор типа облегчения уделяется мало внимания.

**Цель исследования.** Анализ возможностей минимизации деформации рабочей поверхности и веса зеркал путем исследования влияния размеров и формы зеркал на выбор типа облегчения (со сплошной задней стенкой, с задней стенкой с отверстиями и без нее).

**Методика реализации.** Проведено исследование влияния размеров и формы зеркал на выбор типа облегчения. Рассмотрено влияние типа зеркала, его размеров и толщины на деформации его рабочей поверхности.

**Результаты исследования.** Проанализировано влияние размеров и типа зеркала на деформации его рабочей поверхности. Даны рекомендации по применению задней стенки при облегчении шестиугольными вырезами. Определено, что для узких внеосевых зеркал, отношение меньшей стороны которых к большей составляет 0,5 и меньше, а также для осесимметричных зеркал диаметром менее 400 мм можно применять облегчения без задней стенки. Для больших зеркал необходимо применять облегчения с задней стенкой с отверстиями. Для осесимметричных зеркал диаметром более 650 мм необходима сплошная задняя стенка. Рекомендации даны для оптического сканера дистанционного зондирования Земли, для которого расчетное значение деформации не должно превышать  $0,005\lambda$ .

**Выводы.** В процессе работы специальным алгоритмом была проанализирована зависимость деформации рабочей поверхности различных осесимметричных и внеосевых сегментов осесимметричных зеркал от их размера и от типа облегчения.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли; облегчение зеркал; коэффициенты Цернике.

D.V. Pozdniakov

REGULARITIES OF EFFECT OF LARGE MIRROR DIMENSIONS FOR THE EARTH REMOTE SENSING ON THE SELECTION OF THEIR WEIGHT REDUCTION TYPE

**Background.** Mirror weight reduction is an important issue in the development of optical space-based systems. However, little attention is paid to the study of the influence of the mirror size and shape (axisymmetric and non-axial segments of axisymmetric mirrors) on the choice of weight reduction type.

**Objective.** The aim of the paper is the analysis of ways to minimize the working surface deformation and the mirror weight by studying the influence of the mirror size and shape on the choice of weight reduction type (with a solid back wall, with a back wall with holes, and without a back wall).

**Methods.** The study of the influence of the mirror sizes and shapes on the choice of weight reduction type is carried out. The influence of the mirror type, its size and thickness on the deformation of its working surface is considered.

**Results.** The influence of the mirror size and type on the deformation of its working surface is analyzed. The recommendations for the application of the back wall lightweight with hexagonal cuts are given. It is determined that the ratio of the smaller side to bigger is 0.5 and less for narrow non-axial mirrors. It is possible to reduce weight without the back wall for axisymmetric mirrors with a diameter of less than 400 mm. For larger mirrors, it is necessary to reduce weight with the back wall with holes. For axial symmetric mirrors with a diameter of more than 650 mm, a solid back wall is required. This recommendation is given for an optical scanner remote sensor, for which the calculated deformation value should not exceed  $0,005\lambda$ .

**Conclusions.** To analyze the dependence of the working surface deformation of different axisymmetric and non-axial segments of axisymmetric mirrors on their size and type of weight reduction a special algorithm was used.

**Keywords:** the Earth remote sensing; mirror weight reduction; Zernike coefficients.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
20 грудня 2017 року

Прийнята до публікації  
08 лютого 2018 року