

PHÂN TÍCH SỰ BIẾN DẠNG MẶT GƯƠNG DO TÁC DỤNG CỦA HỆ LỰC GÁ KẸP VÀ ỨNG DỤNG TRONG THIẾT KẾ KẾT CẤU CỤM GƯƠNG CHÍNH CỦA ỐNG CHUẨN TRỰC HỒNG NGOẠI

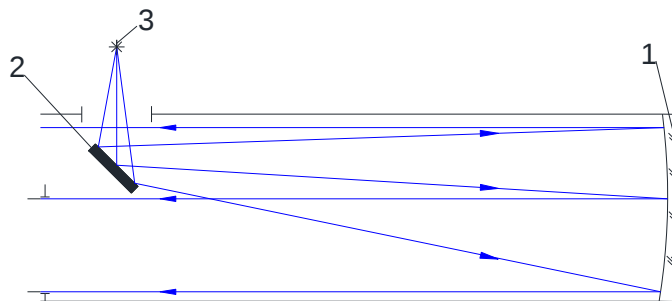
Trần Anh Quang¹, Lê Hoàng Hải¹, Phạm Văn Quân¹, Lê Duy Tuấn^{1*}, Trần Xuân Diệu²

Tóm tắt: Trong ống chuẩn trực hồng ngoại dùng để đo kiểm, cụm gương chính có vai trò quyết định độ chính xác chùm tia đi ra. Bề mặt gương phải được gia công với độ chính xác cao, đồng thời các kết cấu cơ khí giữ gương phải đảm bảo không gây biến dạng đáng kể đến bề mặt làm việc của gương. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng phương pháp tính toán phần tử hữu hạn để khảo sát tác động của các chi tiết cơ khí đến biến dạng của chi tiết quang học. Từ đó, đề xuất giải pháp để giảm thiểu tác động của lực gá kẹp đến chi tiết quang học. Khi áp dụng giải pháp này, chúng tôi đã thiết kế và chế tạo thành công cụm gương chính của ống chuẩn trực hồng ngoại với độ chính xác cao, các kết quả thực nghiệm cho thấy ống chuẩn trực hoạt động chính xác, quang sai mặt sóng đạt $0,044\lambda$, đủ điều kiện để đo kiểm các ống kính ảnh nhiệt hoạt động trong vùng phổ 8-12 μm .

Từ khóa: Biến dạng mặt gương; Cơ cấu gá lắp gương.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong hệ thống đo kiểm quang học, ống chuẩn trực là một trong những thành phần quan trọng nhất, nó có chức năng tạo ra mục tiêu chuẩn ở xa vô cùng, mặt sóng của chùm bức xạ đi ra từ ống chuẩn trực là mặt sóng phẳng với sai số nhỏ hơn $\lambda/10$ [1]. Hệ thống quang học của ống chuẩn trực hồng ngoại thường là hệ hai gương theo sơ đồ trên hình 1, trong đó gương chính là một gương cầu hoặc parabol, kết hợp với một gương phẳng thứ cấp để đổi hướng chùm tia [2].



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của hệ chuẩn trực.

1 - Gương chính; 2 - Gương phụ; 3 - Nguồn sáng.

Hệ chuẩn trực loại này có cấu trúc đơn giản, quang sai nhỏ, tuy nhiên yêu cầu gương chính phải đạt độ chính xác rất cao. Sai số của gương sẽ làm mặt sóng bị biến dạng một lượng gấp đôi khi phản xạ từ bề mặt gương. Trình độ gia công trong nước hoàn toàn có thể đảm bảo độ chính xác của gương [3]. Tuy nhiên, để nâng cao chất lượng và độ tin cậy cần tiếp tục nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng và độ chính xác của ống chuẩn trực. Một trong những yếu tố đó là độ biến dạng mặt gương chính khi chịu lực ép vào kết cấu gá lắp. Gương chính có kích thước lớn nên khi bị tác dụng bởi hệ lực dù nhỏ cũng sẽ làm cho bề mặt gương bị biến dạng, với giá trị chỉ vài chục nano mét cũng đã ảnh hưởng đến chất lượng hoạt động của toàn hệ thống. Theo tính toán của chúng tôi, đối với ống chuẩn trực hồng ngoại hoạt động trong vùng phổ 8-12 μm , độ biến dạng của mặt gương chính không được vượt quá 0,13 μm .

Một trong những cách đơn giản, hiện đang được các hãng chế tạo thiết bị quang học sử dụng để giảm thiểu tác dụng của cơ cấu gá là dán gương vào đế bằng keo. Tuy nhiên, phương pháp này chỉ tin cậy đối với những gương có kích thước nhỏ, ngoài ra keo dán sẽ bị lão hóa theo thời

gian sử dụng, làm giảm tuổi thọ của thiết bị. Đối với các gương có kích thước lớn vẫn phải sử dụng phương pháp gá kẹp bằng các kết cấu cơ khí. Vì vậy, việc tính toán tác động của cơ cấu gá cơ khí đến biến dạng của gương là bài toán rất quan trọng.

Để giải quyết vấn đề này, từ năm 1954, A. Conder và Gerhard Schwesinger [4] đã có một số nghiên cứu ban đầu đối với gá lắp gương có kích thước lớn. Tiếp theo đó, A. J. Malvick [5] phân tích biến dạng đàn hồi của gương có đường kính 230 mm và 154 mm trong các sơ đồ gá lắp khác nhau. Tuy nhiên, việc tính toán tương đối công kênh, bỏ qua một số thông số dẫn đến kết quả tính toán biến dạng sẽ có sai số lớn.

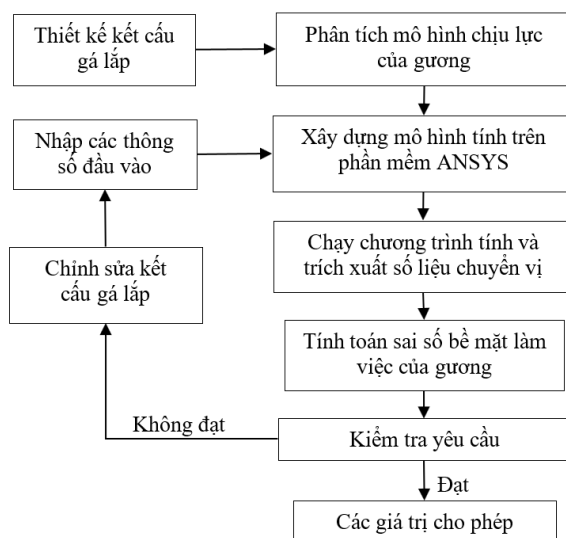
Đến năm 1985, bằng phương pháp phần tử hữu hạn, Alson E. Hatheway [6] xây dựng mô hình của gương và tính toán các biến dạng trong trường hợp gá lắp đặc biệt. Xu Rongwei, Liu Liren, Luan Zhu, Liu Hongzhan [7] phân tích ảnh hưởng của lực gá lắp trong các phương án bố trí khác nhau đối với gương dùng trong giao thoa kế. Chia-Yen Chan, Zhen-Ting You, Ting-Ming Huang, Yi-Cheng Chen và Fong-Zhi Chen [8] phân tích và thử nghiệm để điều chỉnh biến dạng bề mặt gương trực chuẩn có kích thước 620 mm. Nhưng các nghiên cứu trên hầu hết chỉ đưa ra mô hình gá lắp và kết quả tính toán mà chưa trình bày phương pháp tính toán cụ thể, tường minh. Việc tính toán như trên có thể dẫn tới biến dạng thực tế của gương khi lắp ráp cao hơn dự kiến khiến cho việc lắp ráp, đo kiểm và hiệu chỉnh cụm gương phải lắp lại nhiều lần, tốn nhiều thời gian và công sức.

Trong bài báo này, chúng tôi ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn [9, 10], cho phép tính toán chính xác độ biến dạng của mặt gương khi chịu tác dụng của lực gá kẹp. Từ đó, có thể đưa ra giải pháp để hạn chế ảnh hưởng của cơ cấu cơ khí gá lắp, cũng như khống chế lực kẹp để biến dạng của gương nằm trong giới hạn cho phép.

2. KHẢO SÁT BIẾN DẠNG CỦA MẶT GƯƠNG

2.1. Xây dựng quy trình tính toán

Việc tính toán theo phương pháp phần tử hữu hạn được chúng tôi thực hiện trên phần mềm ANSYS. Phần mềm này được trang bị những thuật toán mạnh mẽ, cho phép tính toán nhanh chóng, chính xác với hàng chục nghìn phần tử. Có khả năng mô tả chính xác đối tượng theo mô hình 3D, kết quả tính toán được cung cấp dưới dạng bảng hoặc đồ thị trực quan rất thuận tiện trong các phân tích và tính toán tiếp theo. Với sự hỗ trợ của phần mềm tính toán biến dạng của bề mặt gương, việc thiết kế cụm gá lắp được thực hiện theo quy trình trên hình 2.

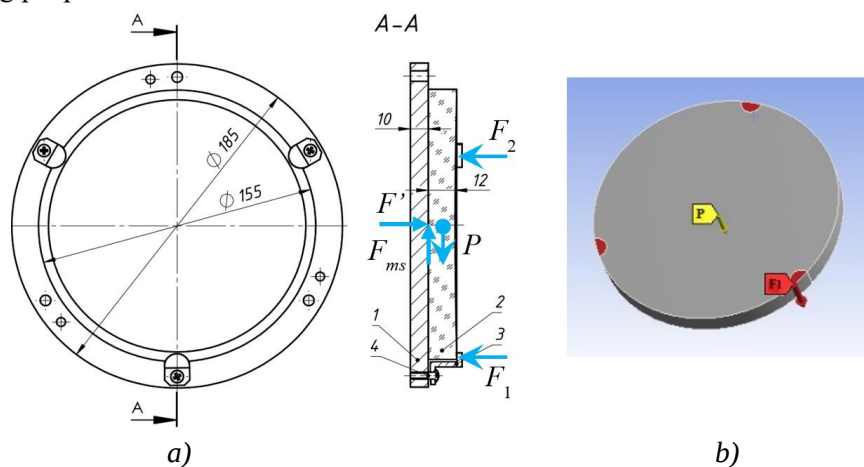


Hình 2. Quy trình tính toán, hiệu chỉnh kết cấu gá lắp gương.

Trước hết kết cấu cụm gương chính được thiết kế sơ bộ theo kinh nghiệm hoặc theo các kết cấu điển hình. Từ kết cấu này sẽ phân tích tìm hệ ngoại lực tác dụng vào gương và xây dựng mô hình tính trong ANSYS. Sau khi chạy các thuật toán phân tích phần tử hữu hạn, ta sẽ nhận được bộ số liệu chuyển vị của các từng phần tử. Các số liệu này được sử dụng để tính toán độ biến dạng của mặt gương. Nếu sự biến dạng gây ra quang sai mặt sóng vượt quá giá trị cho phép, ta có thể nghiên cứu biểu đồ chuyển vị để phát hiện các khu vực có độ biến dạng lớn và tìm cách khắc phục, chỉnh sửa kết cấu gá lắp ban đầu.

2.2. Thiết kế kết cấu gá gương và phân tích mô hình chịu lực

Qua nghiên cứu một số kết cấu gá lắp gương có kích thước lớn đã được trình bày trên một số công bố trên thế giới [11, 12], chúng tôi lựa chọn một phương án gá lắp điển hình để minh họa cho phương pháp tính toán như trên hình 3.



Hình 3. Cơ cấu gá lắp và mô hình lực tác dụng.

a) Bản vẽ kết cấu gá lắp gương; b) Mô hình trong ANSYS.

Các thông số của gương: Đường kính $D = 155 \text{ mm}$; $R_1 = 1500 \text{ mm}$; $R_2 = \infty$;
Chiều dày $d = 12 \text{ mm}$; Vật liệu: thủy tinh K8; Khối lượng: $0,74 \text{ kg}$.

- Phương án gá lắp được trình bày trên hình 3a: Gương chính (2) được đặt lên đĩa phẳng bằng kim loại (hợp kim nhôm 6061) đóng vai trò là đế (1) của cả cụm, đế này sẽ liên kết với thân của ống chuẩn trực. Mặt sau của gương không làm việc được mài phẳng sẽ tiếp xúc với mặt đế. Gương được cố định lên đế bằng ba mẫu hình chữ Z (3) phân bố đều trên chu vi của gương. Khi xiết vít 4, các mẫu này sẽ ép chặt gương vào đế kim loại, nhờ đó gương được gá lắp đảm bảo chắc chắn trong quá trình hoạt động. Lực ép của mẫu tác dụng vào gương có thể được điều chỉnh thông qua lực vặn vít.

- Với phương án này, hệ ngoại lực tác dụng lên gương gồm ba lực $\vec{F}$ tại các mẫu chữ Z vuông góc với mặt gương; trọng lực $\vec{P}$; phản lực $\vec{F}'$ của đế; lực ma sát $\vec{F}_{ms}$ giữa đế và gương. Phản lực của đế sẽ cân bằng với lực ép, lực ma sát sẽ cân bằng với trọng lực.

- Để giữ cho gương được gá chắc chắn, tin cậy, tổng lực ép tại các mẫu liên kết phải tạo ra lực ma sát lớn hơn trọng lượng của gương:

$$F_{ms} = k \cdot F > P$$

Trong đó, $k = 0,5 - 0,7$ là hệ số ma sát giữa thủy tinh và kim loại.

Bên cạnh đó, việc tính toán hệ cơ cấu trong trạng thái tĩnh nên để đảm bảo an toàn trong trường hợp có rung động nhẹ ta tính đến hệ số an toàn $s = 10$, từ đó ta có:

$$k \cdot F = s \cdot P \Rightarrow F = s \cdot P / k = s \cdot m \cdot g / k = 145,2 \text{ N}$$

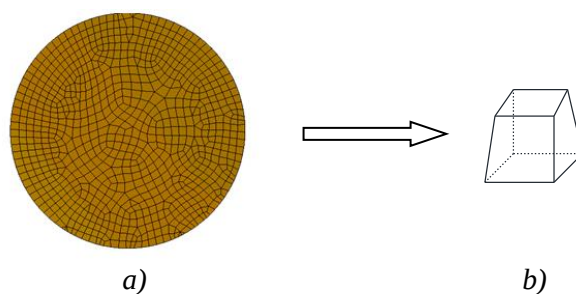
- Giá trị của lực ép tại các mẫu liên kết: $F_1 = F_2 = F_3 = F/3 = 48,4 \text{ N}$.

Khi mặt sau của gương được ép chặt vào đế kim loại, về mặt lý thuyết đây là tiếp xúc mặt, tuy nhiên trên thực tế, do có lỗi gia công nên sẽ xuất hiện các khu vực lồi lõm, hai chi tiết sẽ tiếp xúc nhau tại các điểm lồi nhất. Phản lực của đế và lực ma sát tác dụng vào gương sẽ xuất hiện tại các vị trí này. Các lực liên kết và phản lực sẽ làm cho cả hai chi tiết bị biến dạng, nhưng ở đây đối tượng xem xét đang là chi tiết gương, vì vậy, ta coi các điểm tiếp xúc thuộc đế là các gối đỡ. Nếu các gối đỡ và điểm đặt lực không trùng nhau, gương sẽ bị uốn làm biến dạng bề mặt làm việc. Độ biến dạng của gương đạt cực đại khi các điểm tiếp xúc cách xa điểm đặt lực nhất, đó là trường hợp bề mặt lắp ghép bị lỗi, điểm tiếp xúc nằm ở tâm gương.

Mô hình của gương trong phần mềm ANSYS được thể hiện trên hình 3b, trong phần mềm này, ta chỉ cần mô tả các lực liên kết tác dụng vào gương, khu vực cố định nằm tại tâm gương. Các lực ma sát, và phản lực của đế tác dụng vào gương sẽ được phần mềm tự động tính toán theo các phương trình tĩnh học.

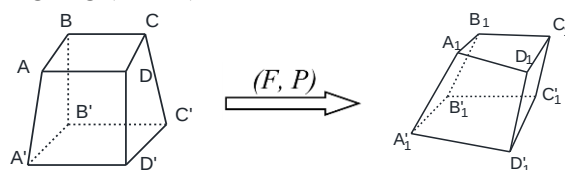
2.3. Tính toán chuyển vị của các điểm trên bề mặt gương khi chịu lực

Khi sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, gương sẽ được chia thành 17400 phần tử, mỗi phần tử có dạng khối gồm 6 mặt, 8 điểm nút trong đó có 4 điểm nút nằm trên bề mặt làm việc của gương (hình 4).



Hình 4. Sơ đồ chia gương thành các phần tử dạng 6 mặt, 8 nút.
a) Chia gương thành 17400 phần tử; b) Hình dạng một phần tử.

Mỗi phần tử dạng khối ABCD.A'B'C'D' khi chịu tác dụng bởi ngoại lực F và trọng lực P sẽ bị biến dạng. Khi đó, các điểm nút A, B, C, D, A', B', C', D' sẽ dịch chuyển đến vị trí $A_1, B_1, C_1, D_1, A'_1, B'_1, C'_1, D'_1$ tương ứng (hình 5).



Hình 5. Sơ đồ mô tả sự biến dạng của một phần tử khi chịu tác dụng lực.

Tọa độ của các điểm nút sau khi chuyển vị sẽ được tính bằng tổng tọa độ ban đầu và giá trị chuyển vị của điểm nút theo phương Ox, Oy, Oz tương ứng, nghĩa là:

$$A_i(x_i, y_i, z_i) \xrightarrow{(F, P)} A'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, z_i + \Delta z_i)$$

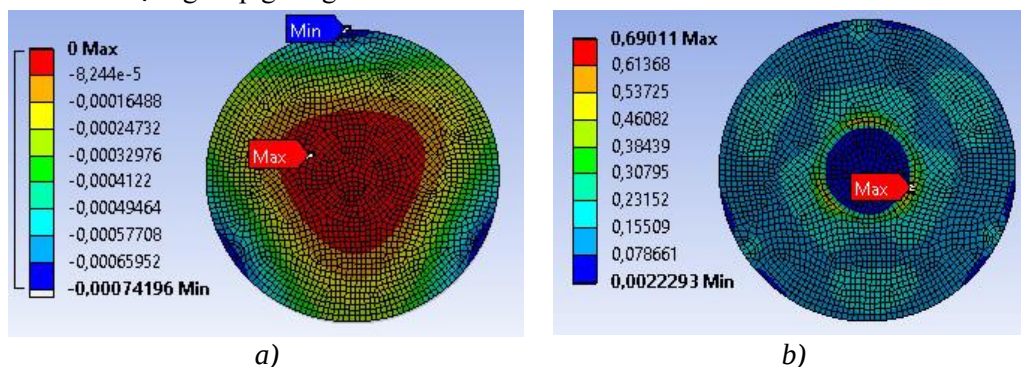
Trong đó: $A_i(x_i, y_i, z_i)$, $A'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, z_i + \Delta z_i)$ là tọa độ điểm nút trước và sau khi biến dạng, $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ là lượng chuyển vị theo các phương Ox, Oy, Oz.

Đối với bài toán khảo sát biến dạng của gương chính của ống chuẩn trực ta chỉ cần tính chuyển vị của các điểm nút trên bề mặt làm việc của gương. Ngoài ra, do bán kính mặt làm việc của gương rất lớn, gần như phẳng nên chuyển vị của các điểm nút theo phương X, Y dọc theo mặt gương sẽ không gây ra sai số đáng kể, ta chỉ quan tâm đến chuyển vị Δz_i theo trục Z vuông

góc với mặt gương. Do tính chất phản xạ, quang sai mặt sóng của chùm tia sẽ gấp đôi độ biến dạng mặt gương $\Delta W_i = 2\Delta z_i$. Vì vậy, số liệu chuyển vị theo phương Z sẽ được sử dụng để phân tích, cải tiến phương án gá lắp cho cụm gương chính.

2.4. Phân tích kết quả tính, hiệu chỉnh kết cấu

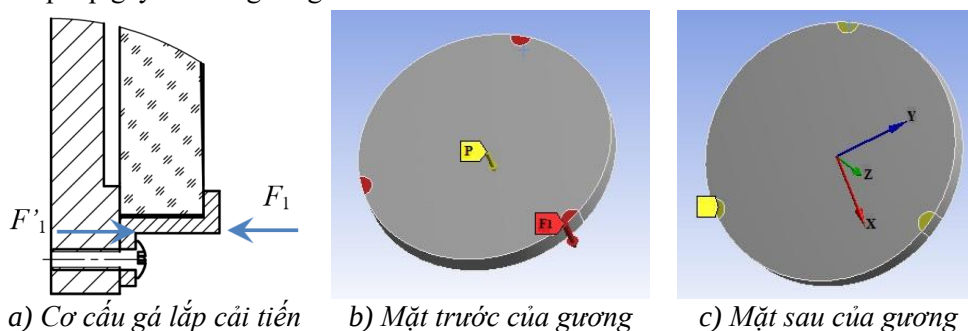
Kết quả phân tích mô hình chịu lực của gương được thể hiện thông qua biểu đồ biến dạng (hình 6a) và ứng suất (hình 6b). Do có sự tiếp xúc ở khu vực giữa mặt sau gương và đế nên mô men uốn xuất hiện làm bề mặt gương bị biến dạng mạnh. Mô men uốn cũng làm cho ứng suất xuất hiện trên toàn bộ gương và tăng cục bộ tại khu vực tiếp xúc giữa gương và đế. Giá trị biến dạng lớn nhất là $\Delta Z_{max} = 0,741 \mu\text{m}$, lớn hơn nhiều so với giá trị cho phép, như vậy, cần phải sửa lại kết cấu của cụm gá lắp gương.



Hình 6. Kết quả phân tích mô hình chịu lực của gương.

a) Biểu đồ biến dạng bề mặt gương theo phương Z; b) Biểu đồ ứng suất.

Để loại bỏ các điểm tiếp xúc gây mô men uốn mặt gương, cần chủ động đưa các điểm đỡ gương về vị trí đối diện với điểm đặt lực. Trên bề mặt đế, chúng tôi tạo thêm ba mẫu tì tương ứng vị trí của các mẫu ép chữ Z (hình 7a). Các mẫu này đóng vai trò là gối đỡ gương, khi lắp ráp lực liên kết ép xuống gương sẽ được truyền thẳng xuống đế tại các vị trí này (hình 7c), như vậy sẽ không gây ra mô men uốn. Tuy nhiên, việc tạo các mẫu tì cũng dẫn tới tăng ứng suất tại các điểm lắp ghép. Vì vậy, cần phải kiểm tra ứng suất tại các vị trí này để đảm bảo ứng suất không vượt quá giá trị cho phép gây nứt mẻ gương.



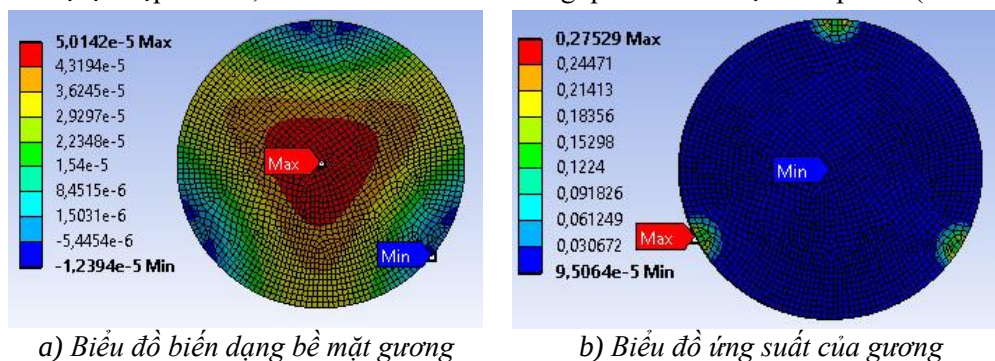
Hình 7. Kết cấu cụm gương cải tiến.

Với kết cấu gá lắp mới, mô hình của chịu lực của gương trong ANSYS được thay đổi lại như trên hình 7. Các điểm móc cố định được dịch chuyển về vị trí của điểm đặt lực. Kết quả tính biến dạng ứng suất của gương được thể hiện trên hình 8.

Từ biểu đồ biến dạng ta nhận thấy, giá trị biến dạng của mặt gương đã được giảm rất nhiều so với phương án ban đầu, sai lệch lớn nhất trên toàn bộ mặt gương thể hiện qua giá trị đỉnh-đáy: $PV = 5,0142 \cdot 10^{-5} + 1,2394 \cdot 10^{-5} = 6,25 \cdot 10^{-5} \text{ mm} = 0,065 \mu\text{m}$, nhỏ hơn 9,6 lần so với phương án ban đầu. Độ biến dạng này hoàn toàn thỏa mãn yêu cầu.

Ngoài ra từ biểu đồ ứng suất (hình 8b) cũng có thể thấy, ứng suất trên toàn bộ mặt gương cơ bản đã được loại trừ, chỉ tập trung vào các mẫu liên kết với giá trị lớn nhất là 0,275 MPa. Đối chiếu với độ bền nén của thủy tinh quang học đạt khoảng 600 Mpa [13], có thể thấy ứng suất này còn cách rất xa ngưỡng an toàn, không thể gây hại cho gương.

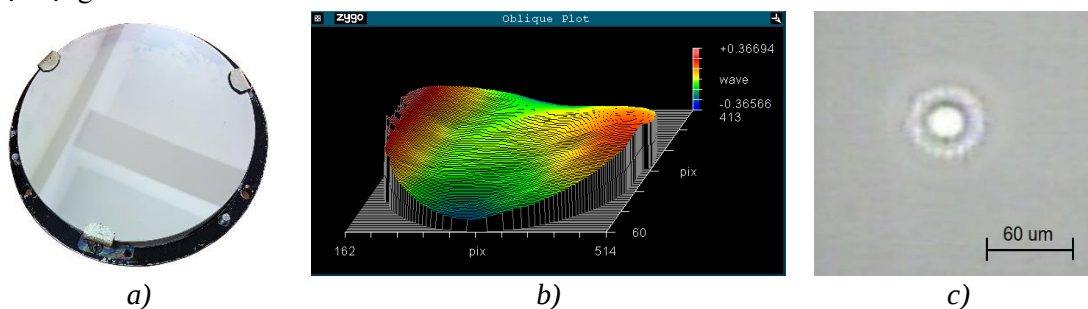
Như vậy, kết cấu gá lắp được cải tiến hoàn toàn thỏa mãn yêu cầu về độ biến dạng và ứng suất. Giá trị lực kẹp $F = 48,2$ N có thể kiểm soát thông qua mô men vặn vít ép số 4 (hình 3a).



Hình 8. Kết quả phân tích mô hình gá lắp cải tiến.

2.5. Một số kết quả thực nghiệm

Trên hình 9a là hình ảnh thực của cụm gương chính. Sau khi được lắp ráp vào ống chuẩn trực với lực kẹp gương tại các vít $F = 49$ N, chúng tôi đo kiểm tra sai sóng của chùm tia đi ra từ ống chuẩn trực. Phép đo được thực hiện trên giao thoa kế Verifire XP/D với bước sóng đo $\lambda_m = 0,6328 \mu\text{m}$, không phải vùng hồng ngoại. Tuy nhiên, do hệ chuẩn trực là hệ gương nên ta có thể quy đổi các giá trị đo được sang bước sóng hồng ngoại $\lambda_{IR} = 10,6 \mu\text{m}$ bằng cách nhân với hệ số tỷ lệ $k = \lambda_m / \lambda_{IR}$. Biểu đồ sai sóng được trích từ phần mềm xử lý ảnh giao thoa được thể hiện trên hình 8b. Giá trị thực nghiệm sau khi quy đổi sang bước sóng λ_{IR} là $PV = 0,044\lambda$ ($\approx \lambda/20$); $RMS = 0,066\lambda$, như vậy chất lượng chùm tia đạt yêu cầu. Trên hình 9c là kết quả sử dụng ống chuẩn trực hồng ngoại để kiểm tra chất lượng ảnh của ống kính ảnh nhiệt, hình ảnh vết nhiễu xạ thu được thể hiện rõ các vòng sáng tối theo đúng lý thuyết, điều đó chứng tỏ ống chuẩn trực đã hoạt động tốt.



Hình 9. Kết quả gia công, lắp ráp cụm gương chính:

- a) Cụm gương chính; b) Kết quả đo sai sóng của chùm tia phát ra từ ống chuẩn trực;
c) Hình ảnh vết nhiễu xạ khi kiểm tra chất lượng của ống kính ảnh nhiệt.

3. KẾT LUẬN

Việc tính toán theo phương pháp phần tử hữu hạn đã hỗ trợ rất hiệu quả cho quá trình thiết kế cụm gá lắp gương chính của ống chuẩn trực hồng ngoại. Các kết quả tính toán từ phần mềm ANSYS cho phép phân tích tình trạng ứng suất và biến dạng của mặt gương, từ đó, đưa ra phương án hiệu chỉnh kết cấu gá lắp và kiểm tra đảm bảo sai số của gương không vượt quá giá trị

cho phép. Quy trình thiết kế và phương pháp tính toán này hoàn toàn có thể áp dụng để thiết kế các cụm chi tiết quang cơ khác cho thiết bị quang học đòi hỏi độ chính xác cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. V.A. Panov, "Microscopy optics, 1976".
- [2]. K. Chrzanowski, "Evaluation of infrared collimators for testing thermal imaging systems", Opto-electron, Rev. 15, No. 2, 2007;
- [3]. Le Duy Tuan, Tran Anh Quang, Le Hoang Hai, "Design and manufacture of an ir-collimator used to test thermal imaging lenses working in the spectral region of $8\div 12\ \mu\text{m}$ ", The 11th International Conference on Photonics & Applications, 2021.
- [4]. Gerhard Schwesinger, "Optical effect of flexure in vertically mounted precision mirrors", 1954.
- [5]. A. J. Malvick, "Theoretical elastic deformations of the Steward Observatory 230-cm and the Science Center 154-cm mirrors", 1972.
- [6]. Alson E. Hatheway, "Finite element methods for evaluating optical system performance", 1984.
- [7]. Xu Rongwei, Liu Liren, Luan Zhu, Liu Hongzhan, "Support schemes and thermal effects analyses of large-aperture interferometer mirrors", 2004.
- [8]. Chia-Yen Chan, Zhen-Ting You, Ting-Ming Huang, Yi-Cheng Chen, Fong-Zhi Chen, "Analysis and experimental investigation for collimator reflective mirror surface deformation adjustment", 2017.
- [9]. Singiresu S. Rao, "The Finite Element Method in Engineering, 4th Edition, Elsevier Science & Technology Books", 2004.
- [10]. Erdogan Madenci and Ibrahim Guven, "The Finite Element Method and applications in Engineering using ANSYS", Springer, 2006.
- [11]. Paul R. Yoder, Jr, "Opto-Mechanical Systems Design Third Edition", 2006.
- [12]. Под общ. ред. В. А. Панова, "Справочник конструктора оптико-механических приборов", Панов В.А., Кругер М.Я., Кулагин В.В. и др; Третье издание переработанное и дополненное – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1980.
- [13]. Lê Duy Tuấn, Nguyễn Hồng Ngọc, "Giáo trình công nghệ gia công chi tiết quang học", NXB QĐND, 2018.

ABSTRACT

RESEARCH ON EFFECTS OF A MOUNTING MECHANISM ON DEFORMATION OF A MAIN MIRROR IN THE INFRARED COLLIMATOR

In the infrared collimator used to measure, the main mirror plays a very important role, that decides the accuracy of the outgoing beam. The mirror surface must be machined with high precision, the mechanical mechanisms holding the mirror must ensure that the working surface of the mirror is not significantly deformed. In this paper, we used the finite element method to investigate the impact of mechanical parts on deformation of optical components. Since then, solutions have been proposed to minimize the impact of clamping forces on optical components. When applying these solutions, we have successfully designed and fabricated the main mirror assembly of the infrared collimator with high accuracy, experimental results show that the collimator works correctly, wavefront aberration of 0.044λ is sufficient to test thermal imaging lenses operating in the $8\text{-}12\ \mu\text{m}$ spectral region.

Keywords: Deformation of mirrors; Mirror mounting mechanism.

Nhận bài ngày 14 tháng 8 năm 2021

Hoàn thiện ngày 29 tháng 9 năm 2021

Chấp nhận đăng ngày 10 tháng 10 năm 2021

Địa chỉ: ¹Học viện Kỹ thuật Quân sự;

²Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

*Email: duytuanktq@gmail.com.