تاثیر جهات اورتوتروپی بر رفتار تنش حرارتی یک موج­ساز کریستالی

حمیدرضا خیاطی1، یداله علی نیا2\*

1- مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

\* سبزوار، صندوق پستی 397، y.alinia@hsu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، توزیع تنش‌های به وجود آمده در یک موج‌ساز کریستالی تحت اثر گرادیان‌های دمایی و بارگذاری مکانیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مجموعه موج‌ساز شامل یک غشای نازک سرامیکی و یک بستر سیلیکونی است. خواص ترمومکانیکی غشای نازک به صورت ایزوتروپیک و برای بستر به صورت اورتوتروپیک در نظر گرفته می‌شود. مسأله مورد اشاره تحت تأثیر توزیع دمای نمایی و یکنواخت و همچنین بارگذاری کششی در نرم‌افزار اجزای محدود شبیه‌سازی می­شود. تفاوت ضریب انبساط حرارتی دو ماده بر روی فصل مشترک، عدم انطباق کرنش طولی را به دنبال دارد که در نهایت منجر به تولید تنش­های برشی و خمشی در غشای نازک خواهد شد. تأثیر تغییر زاویه جهت‌های اصلی اورتوتروپی بر تنش‌های روی سطح ارائه می‌گردد. نتایج حاکی از آن است که تغییر زاویه تأثیری بر توزیع تنش‌های غشای نازک ندارد ولیکن با افزایش زاویه جهت‌های اصلی تنش‌های کششی در سطح بستر به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. علاوه بر این، رفتار مجموعه تحت بارگذاری کششی یکنواخت تا حد زیادی مشابه بارگذاری حرارتی است. همچنین به علت عدم تقارن ریزساختار ماده، توزیع تنش داخل صفحه برای بستر سیلیکونی نامتقارن است اگرچه بارگذاری و هندسه مساله متقارن است.

**کلی**د‌واژگ**ان**

موج­ساز کریستالی، تنش حرارتی، غشای نازک، جهت اورتوتروپی، روش اجزای محدود

On the effect of orthotropy parameters on the thermo-elastic behavior of a crystalline undulator

Hamidreza Khayyati 1, Yadolah Alinia 2\*

1- Engineering Department, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

2- Engineering Department, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

\* P.O.B. 397 Sabzevar, Iran, [y.alinia@hsu.ac.ir](mailto:y.alinia@hsu.ac.ir)

Abstract

In this paper, the thermo-elastic stress analysis of a crystalline undulator is considered under prescribed temperature gradients and static loading. A thin film of the silicon nitride (Si3N4) ceramic is assumed to be perfectly bonded to an orthotropic silicon substrate. It is assumed that the silicon substrate possesses orthotropic behavior whereas the thin film exhibits material isotropy. The finite element software is employed to simulate the constant and the exponential temperature gradients as well as the uniform tension loading. Due to the difference between the thermal expansions of the undulator constituents, a tangential misfit strain exists along the interface which consequently results in thermal stress development. This study focuses on the impact of orientation of material orthotropy directions on the surface stresses distribution. The results indicate that the film stresses are less sensitive to the orientation of the material orthotropy. However, the maximum tensile peak and the near edge singularities of the substrate in-plane stress significantly decreases as the orientation of orthotropy directions approaches 90°. In addition, the stress field for the uniform tension loading is similar to the constant temperature gradient. Also, the material anisotropy results in asymmetric in-plane stress distribution within the substrate yet the geometry and the loading are symmetric.

Keywords

Crystalline undulator, Thermal stress, Thin film, Orthotropy directions, Finite element method

1. مقدمه

امروزه سیستم‌های متشکل از غشای نازک[[1]](#footnote-1) به طور گسترده‌ای در صنایع پیشرفته به کار برده می‌شوند همانند سیستم‌های میکروالکترومکانیکی[[2]](#footnote-2)، راکتورهای شیمیایی، مدارات مجتمع، پوشش‌های محافظ، نیمه هادی‌ها و پوشش‌های اپتیکی. عموماً این پوشش‌ها به دو روش لایه‌ نشانی شیمیایی[[3]](#footnote-3) و لایه نشانی فیزیکی[[4]](#footnote-4) بر روی یک بستر میزبان تولید می شوند. بسیاری از اوقات، غشای نازک تحت اثر گرادیان‌های شدید تنش و حرارت قرار می‌گیرند که در نتیجه خرابی، جدایش و تغییر شکل دائمی سیستم را به دنبال دارد. بر این اساس، پیش‌بینی وضعیت تنش در سیستم‌های متشکل از غشای نازک حائز اهمیت است [1]. اعوجاج ترموالاستیک یکی از مهم‌ترین حالت‌های ناپایداری در مسأله غشای نازک است. از آنجا که ضریب انبساط حرارتی غشای نازک و بستر میزبان متفاوت است بنابراین در صورت تغییر دمای سیستم، کرنش حرارتی دو ماده متفاوت خواهد بود. این عدم انطباق کرنش[[5]](#footnote-5) موجب بروز تنش حرارتی در سیستم به خصوص بر روی فصل مشترک غشای نازک و بستر می**‌**گردد.خرابی ناشی از تنش‌های حرارتی می تواند به صورت ترک خوردن، جدایش، کمانش و باد کردن غشای نازک ظاهر شود [2]. از مهمترین کاربردهای غشای نازک در حوزه اپتیک می‌توان به آینه‌ها**[[6]](#footnote-6)** و موج سازها**[[7]](#footnote-7)** اشاره کرد که در دستگاه های کریستالوگرافی به خدمت گرفته می‌شوند. عموماً موج سازها با لایه نشانی یک غشای نازک از سرامیک سیلیکون نیترید**[[8]](#footnote-8)** بر روی یک بستر سیلیکونی یا ژرمانیمی ساخته می‌شوند. طی فرآیند ساخت یا هنگام کاربرد این موج‌سازها دمای سیستم ممکن است به صورت یکنواخت (مثلاً در روش لایه نشانی شیمیایی) یا به صورت محلی (همانند تابش لیزر در ابزارهای اپتیکی) افزایش یابد بنابراین لازم است توزیع تنش‌های مکانیکی تحت این شرایط تعیین شوند [3].

مسأله رفتار ترموالاستیک غشای نازک توسط پژوهشگران متعددی بررسی شده است. ایوان و همکاران [4] تنش‌های به وجود آمده در حافظه‌های نوری**[[9]](#footnote-9)** بر اثر تابش لیزر را به کمک روش اجزای محدود محاسبه نمودند. نتایج حاکی از آن است که تنش‌های حرارتی ممکن است به حد بحرانی ماده برسند. کانت [5] به کمک تبدیلات لاپلاس و فوریه معادله انتقال حرارت گذرای ناشی از تابش لحظه­ای لیزر را در یک سیستم چند لایه حل کرد. حل عددی او نشان می­دهد که گرادیان دمایی شدید حتی بعد از خاموش شدن لیزر به طور قابل ملاحظه­ای در لایه­ها باقی می­ماند. تاکاهاشی و شیبویا [6] مساله ترموالاستیک یک سیستم غشای نازک/ بستر را با استفاده از روش اجزای مرزی بررسی و تکینگی تنش در لبه اتصال غشای نازک را ارایه نمودند. بر اساس نتایج آنها، تغییرات تنش برشی بروی فصل مشترک در لبه اتصال از مرتبه است. لانزونی و راد [7] توزیع تنش حرارتی را در یک موج­ساز کریستالی به صورت تحلیلی استخراج نموند. با توجه به بررسی آنها، توزیع تنش خمشی داخل بستر تقریبا به صورت خطی می­باشد بنابراین می­توان از تئوری خمش تیرها برای تحلیل این مسأله بهره برد. از آنجا که ماده سیلیکون به صورت گسترده­ای در ساخت سیستم­های الکترومکانیکی استفاده می­شود بنابراین شناخت خواص ترمومکانیکی آن حایز اهمیت است.

هوپکروفت و همکاران [8] طی یک پژوهش نشان دادند که سیلیکون رفتار اورتروپی از خود نشان می­دهد. بر این اساس، فالوپ و همکاران [9]، رفتار ترموالاستیک یک موج­ساز کریستالی را با در نظر گرفتن رفتار اورتوتروپی بستر سیلیکونی مورد توجه قرار دادند. نتایج آنها نشان می­دهد که میدان جابجایی بدست آمده با فرض رفتار ایزوتروپی حدود 16% بیشتر از حالت اورتوترویک است. با توجه به مطالب اخیر، در این پژوهش رفتار ترموالاستیک یک موج­ساز کریستالی مدنظر قرار می­گیرد. به کمک شبیه­سازی در نرم­افزار اجزای محدود، تاثیر تغییر جهت­های اصلی اورتوتروپی در بستر سیلیکونی بر میدان تنش سیستم غشای نازک/ بستر مطالعه می­گردد.

|  |
| --- |
| ­ |
| **Fig. 1** The schematic of a crystalline undulator |
| **شكل 1** شماتیک یک موج­ساز کریستالی |

**جدول 1** ابعاد هندسی سیستم موج­ساز (تمامی ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشد)

**Table 1** The geometrical parameters of the system (all dimensions are in mm)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
| 600 | 300 | 30 | 1 |

**جدول 2** خواص ترمومکانیکی سیستم غشای نازک/ بستر [8-9]

**Table 2** Thermo-mechanical properties of the thin film/ substrate system [8-9]

|  |  |
| --- | --- |
| خاصیت | مقدار |
|  | 169 (GPa) |
|  | 130 (GPa) |
|  | 79.6 (GPa) |
|  | 50.9 (GPa) |
|  | 0.064 |
|  | 0.36 |
|  | 0.28 |
|  | 3 (10-6/K) |
|  | 290(GPa) |
|  | 2 (10-6/K) |
|  | 0.25 |

|  |
| --- |
| C:\Users\Y0BEE~1.ALI\AppData\Local\Temp\Rar$DIa1788.18603\Drawing1.jpg­ |
| **Fig. 2** The mesh scheme for the finite element model of the thin film |
| **شكل 2** توزیع المان­ها برای مدل اجزای محدود مساله در اطراف غشای نازک |

1. تعریف مسأله

"شکل 1" شماتیک یک موج‌ساز کریستالی را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود سیستم موج‌ساز متشکل از یک بستر سیلیکونی و یک غشای نازک نیترید سیلیکون است. بعد از لایه نشانی غشای سرامیکی بر روی بستر سیلیکونی، به علت تفاوت ضریب انبساط حرارتی دو ماده، سیستم موج‌ساز دچار اعوجاج ترموالاستیک قابل توجهی خواهد شد بنابراین پیش‌بینی رفتار آن و ارئه راهکارهایی برای کاهش تنش‌های حرارتی حائز اهمیت است.

ابعاد هندسی سیستم موج‌ساز در جدول 1 و خواص ترمومکانیکی بستر و غشای نازک در جدول 2 آمده‌اند. در اینجا فرض می‌شود که بستر سیلیکونی دارای خواص اورتوتروپی با جهات اصلی 1 و 2 می‌باشد که با محور افقی، ، زاویه دلخواه را می‌سازد. در اینجا فرض می‌شود که میدان الاستیک به وجود آمده در مجموعه ناشی از اعمال تغییرات درجه حرارت به غشای نازک است. تغییر درجه حرارت غشای نازک به صورت توزیع یکنواخت و توزیع نمایی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، مقدار تغییر دما به صورت زیر در نظر گرفته می­شود:

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| (1) | توزیع دمای ثابت  توزیع دمای نمایی |

در روابط فوق برای توزیع دمای ثابت و نمایی به ترتیب برابر و و همچنین مقدار پارامتر در نظر گرفته می شود.

به منظور شبیه‌سازی مسأله مورد بررسی از نرم‌ افزار اجزای محدود آباکوس و المان دو بعدی CPE4R تحت شرایط کرنش صفحه‌ای استفاده می‌شود. از آنجا که تغییرات دما محدود به غشای نازک است بنابراین می‌توان انتظار داشت که سطح تنش‌ها در محل اتصال غشای نازک به بستر بسیار بزرگتر از سایر نقاط است. بر این اساس توزیع المان‌ها (مش‌بندی[[10]](#footnote-10)) به گونه‌ای است که بر روی فصل مشترک سیستم اندازه المان‌ها بسیار کوچک و در نواحی دوردست بزرگتر باشند. علاوه بر این، در اطراف لبه اتصال غشای نازک به بستر از المان‌های با اندازه بسیار ریز استفاده می‌شود تا بتوان تکینگی تنش در آن منطقه را مدل‌سازی کرد. "شکل 2" مدل اجزا محدود مسأله مورد نظر را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مرز پایینی بستر در راستای محور عمودی () مقید شده است. همچنین اتصال غشای نازک و بستر توسط قید گره زدن[[11]](#footnote-11) اعمال می‌شود.

1. نتایج

در این بخش ابتدا نتایج تحقیق حاضر با نتایج ارائه شده در پژوهش سیف و همکاران [10] اعتبارسنجی می‌شود. سیف و همکاران [10] مسأله ترموالاستیک یک غشای نازک متصل شده به بستر ایزوتروپیک را تحت توزیع دمای نمایی بررسی نمودند. بدین منظور خواص ترمومکانیکی بستر سیلیکونی در هر سه جهت اصلی اورتوتروپی به صورت یکسان وارد مدل اجزای محدود می‌شود. نتایج بدست آمده در "شکل 3" نشان می‌دهد که نتایج پژوهش حاضر تطابق مناسبی با نتایج مرجع [10] دارد. ضمناً در این پژوهش پارامتر برای بی­بعد سازی کمیت تنش تعریف شده است.

|  |
| --- |
| C:\Users\Y.Alinia\Downloads\1 (1).jpg ­ |
| **Fig. 3** Validation of current study results with those given by Saif et al. [10] |
| **شكل 3** اعتبارسنجی نتایج تحقیق حاضر با نتایج پژوهش سیف و همکاران [10] |

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 4** The surface stresses variation versus the orthotropy angle orientation for the exponential temperature distribution |
| **شكل 4** تغییرات تنش­های روی سطح برحسب زاویه جهت­های اورتوتروپی برای توزیع دمای نمایی |

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 5** The surface stresses variation versus the orthotropy angle orientation for the constant temperature distribution |
| **شكل 5** تغییرات تنش­های روی سطح برحسب زاویه جهت­های اورتوتروپی برای توزیع دمای ثابت |

در اینجا، ابتدا تأثیر تغییر زاویه جهت‌های اصلی اورتوتروپی بر رفتار تنش‌های روی سطح به ازای توزیع نمایی درجه حرارت بررسی می‌شود. "شکل 4" تغییرات تنش برشی روی فصل مشترک ()، تنش خمشی در غشای نازک () و تنش داخل صفحه در بستر اورتوتروپیک () را بر حسب زاویه قرارگیری جهات اصلی اورتوتروپی () نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با تغییر زاویه ، مقدار و توزیع تنش برشی روی فصل مشترک و تنش خمشی غشای نازک تغییرات محسوسی ندارند. در مقابل توزیع تنش داخل صفحه بستر دارای تغییرات چشمگیر نسبت به تغییر زاویه است. بر اساس نتایج بدست آمده، ماکزیمم تنش کششی با افزایش زاویه کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد به نحوی که برای حالت مقدار ماکزیمم تنش بیش از 90% نسبت به حالت کاهش می‌یابد. همچنین برای زوایای بین تا به دلیل عدم تقارن ریزساختار بستر اورتوتروپ نسبت به صفحه ، توزیع تنش داخل صفحه برای بستر نامتقارن خواهد بود.

به طور مشابه، تغییرات تنش‌های روی سطح به ازای مقادیر مختلف زاویه جهت‌های اصلی اورتوتروپی و توزیع درجه حرارت یکنواخت در "شکل 5" آمده است. نتایج نشان می‌دهند که تغییر زاویه جهت‌های اصلی تأثیری بر توزیع تنش‌های غشای نازک نخواهد داشت. در مقابل، تغییر زاویه جهت‌های اصلی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر توزیع تنش داخل صفحه بستر دارد به نحوی که با انحراف از مقدار ابتدا تکینگی تنش در لبه غشای افزایش می‌یابد. در ادامه با حرکت به سمت زاویه مقدار تکینگی و متوسط تنش کاهش قابل توجهی خواهد داشت. در اینجا هم عدم تقارن توزیع تنش به دلیل نامتقارن بودن ساختار ماده مشهود است.

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 6** The surface stresses variation versus the orthotropy angle orientation for the uniform tension field () |
| **شكل 6** تغییرات تنش­های روی سطح برحسب زاویه جهت­های اورتوتروپی تحت بارگذاری کششی یکنواخت () |

|  |
| --- |
| C:\Users\Y.Alinia\Downloads\EXP.jpg  C:\Users\Y.Alinia\Downloads\constant.jpg  C:\Users\Y.Alinia\Downloads\Pressure.jpg |
| **Fig. 7** Variation of the in-plane stress through the thickness of the thin film (): a) Exponential temperature distribution b) Constant temperature distribution c) Uniform tension field |
| **شكل 7** تغییرات تنش داخل صفحه در راستای ضخامتِ غشای نازک (): الف) توزیع دمای نمایی ب)توزیع دمای ثابت پ) بارگذاری کششی یکنواخت |

"شکل 6" توزیع تنش‌های روی سطح را به ازای بارگذاری کششی یکنواخت اعمال شده بر غشای نازک نشان می‌دهد. در این حالت، غشای نازک از دو لبه تحت اثر کشش یکنواخت قرار می­گیرد. به طور کلی، رفتار سیستم تحت بارگذاری اخیر مشابه نتایج بدست آمده از تغییر درجه حرارت یکنواخت است. نتایج نشان می‌دهد کمترین ریسک در مقابل تشکیل ترک در بستر و جدایش لبه غشای نازک از آن به ازای زاویه حاصل می‌شود.

عموماً برای حل مساله سیستم غشای نازک/ بستر فرض می­شود که توزیع تنش خمشی در راستای ضخامت غشای نازک یکنواخت است [11-12]. با این حال فرض اخیر برای محدود خاصی از ضخامت غشای نازک برقرار است. به عبارت دیگر، اگر ضخامت غشای نازک از حد معینی بیشتر شود آنگاه توزیع تنش خمشی لزوما یکنواخت نخواهد بود. بدین منظور، توزیع تنش خمشی در راستای ضخامتِ غشای نارک به ازای مقادیر مختلف ضخامت استخراج می­شود. همان طور که از "شکل 7" پیدا است اگر نسبت باشد آنگاه می­توان توزیع تنش داخل صفحه در راستای ضخامتِ غشای نازک را یکنواخت فرض کرد. با این حال، برای توزیع دمای ثابت و بارگذاری کششی یکنواخت، تقریب اخیر تا نسبت از دقت مناسبی برخوردار است.

1. نتیجه­گیری

در این مقاله مساله ترموالاستیک یک موج­ساز کریستالی تحت تاثیر گرادیان­های دمایی معین بررسی شد. با فرض اینکه غشای سرامیکی و بستر اورتوتروپیک به صورت کامل به هم متصل هستند، توزیع تنش­های روی سطح با استفاده از روش اجزای محدود استخراج گردید. تحلیل حساسیت میدان تنش به ازای مقادیر مختلف زاویه قرارگیری جهت­های اصلی اورتوتروپی انجام شد. بر پایه نتایج بدست آمده، توزیع تنش خمشی در طول غشای نازک و تنش برشی بر روی فصل مشترک وابستگی چندانی به تغییر زاویه اورتوتروپی ندارد. با این حال، زاویه قرارگیری جهات اصلی اورتوتروپی تاثیر چشمگیری بر توزیع تنش داخل صفحه بستر خواهد داشت به نحوی که ماکزیمم مقدار این تنش تا 90% قابل کاهش است. علاوه بر این، تغییرات تنش در راستای ضخامت غشای نازک را می­توان به صورت یکنواخت فرض کرد مشروط بر اینکه نسبت ضخامت غشای نازک به طول آن کمتر از 0.015 باشد.

5- مراجع

[1] Lejeune E, Javili A, Linder C. Understanding geometric instabilities in thin films via a multi-layer model. *Soft Matter.* 2016;12(3):806-16.

[2] Lanzoni L. Analysis of stress singularities in thin coatings bonded to a semi-infinite elastic substrate. *International journal of solids and structures*. 2011 Jun 15;48(13):1915-26.

[3] Guidi V, Antonini A, Baricordi S, Logallo F, Malagù C, Milan E, Ronzoni A, Stefancich M, Martinelli G, Vomiero A. Tailoring of silicon crystals for relativistic-particle channeling. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 2005 May 1;234(1-2):40-6.

[4] Evans KE, Nkansah MA, Abbott SJ. Finite element analysis of thermal stresses in optical storage media. *Journal of applied physics.* 1988 Oct 1;64(7):3398-401.

[5] Kant R. Laser-induced heating of a multilayered medium resting on a half-space: part I—stationary source. *Journal of applied mechanics.* 1988 Mar 1;55(1):93-7..

[6] Takahashi M, Shibuya Y. Thermoelastic analysis of interfacial stress and stress singularity between a thin film and its substrate. *Journal of thermal stresses.* 2003 Oct 1;26(10):963-76.

[7] Lanzoni L, Radi E. Thermally induced deformations in a partially coated elastic layer. *International Journal of Solids and Structures.* 2009 Mar 15;46(6):1402-12.

[8] Matthew AH, William DN, Thomas WK. What is the Young’s modulus of silicon. *Journal of Microelectromechanical Systems.* 2010 Apr;19(2):229-382.

[9] Falope FO, Lanzoni L, Radi E, Marcello Tarantino A. Thin film bonded to elastic orthotropic substrate under thermal loading*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design.* 2016 May;51(4):256-69.

[10] Saif MT, Hui CY, Zehnder AT. Interface shear stresses induced by non-uniform heating of a film on a substrate. *Thin Solid Films.* 1993 Mar 15;224(2):159-67.

[11] Guler MA. Mechanical modeling of thin films and cover plates bonded to graded substrates. *Journal of applied mechanics*. 2008 Sep 1;75(5).

[12] Guler MA, Guelver YF, Nart E. Contact analysis of thin films bonded to graded coatings. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2012 Feb 1;55(1):50-64.

1. Thin film [↑](#footnote-ref-1)
2. MEMS [↑](#footnote-ref-2)
3. Chemical vapor deposition [↑](#footnote-ref-3)
4. Physical vapor deposition [↑](#footnote-ref-4)
5. Misfit strain [↑](#footnote-ref-5)
6. Mirrors [↑](#footnote-ref-6)
7. Undulator [↑](#footnote-ref-7)
8. Silicon Nitride(Si3N4) [↑](#footnote-ref-8)
9. Optical Storage [↑](#footnote-ref-9)
10. Mesh Scheme [↑](#footnote-ref-10)
11. Tie constraint [↑](#footnote-ref-11)