

## DESIGN CONCEPTS AND OPTIMIZATION OF KINEMATIC MOUNTS USED IN SPACE APPLICATIONS

BURLOU Andreea

Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică, Specializarea: SIS, Anul de studii: Master 1,  
e-mail: andreeaburlou@gmail.com

Conducător științific: prof.dr.ing. **Dan Mihai CONSTANTINESCU**

*REZUMAT: The main idea of this study is represented by the development of bipod design concepts following a set of requirements. Several aspects must be analyzed, so in the end a single design concept will be selected for further optimization process. During the selection process a lot of factors are taken into account-cost efficiency, manufacturing process.*

*CUVINTE CHEIE: bipod, rigiditate laterală, fiber metal laminate, optimizare topologică, design final*

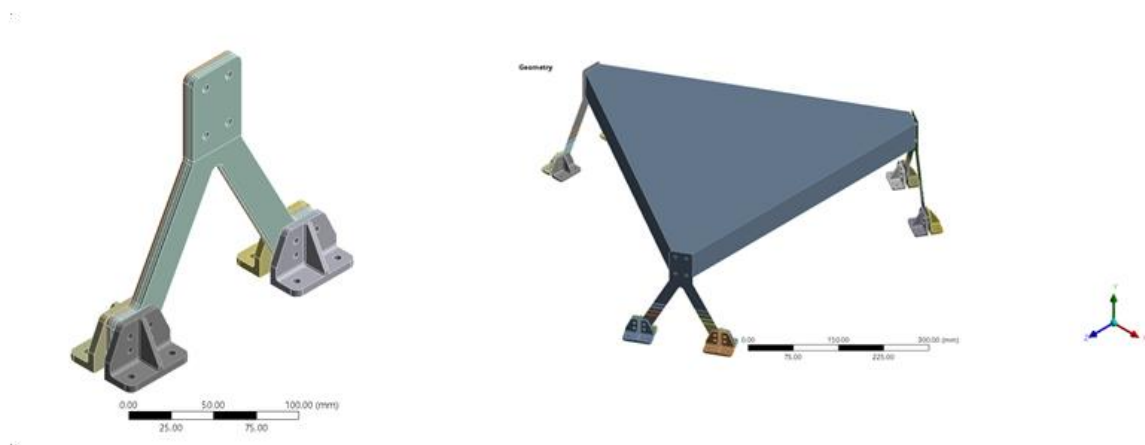
### 1. Introducere

Lucrarea se focusează pe urmărirea a două etape importante: faza de concept și faza de optimizare a bipozilor ”Kinematic Mount”.

Un bipod este un element structural folosit la asamblarea mai multor aplicații spațiale (hardware). Preponderent, bipozii ca elemente flexibile sunt utilizați când întâlnim probleme critice din punct de vedere al stabilității și rigidității ansamblului. În cele mai multe aplicații, acești bipozi joacă un rol important și în decuplajul termic al componentei hardware. Este important de menționat că ”kinematic mounts” sunt folosiți pentru instrumentele optice, telescoape, oglinzi etc.

Scopul lucrării se axează pe alegerea unui concept de proiectare și ulterior optimizarea lui pentru a satisface o serie de cerințe mecanice și termice.

În vederea alegerii unui concept, au fost analizate mai multe variante de proiectare, atât din punct de vedere al materialului utilizat, cât și din punct de vedere al design-ului. Ulterior, în funcție de rezultatele obținute, au fost alese două concepte propuse pentru următoarea fază, cea de optimizare.



**Figură 1 Design bipod. Design bipod încorporat în ansamblu**

În figura de mai sus, Figură 1, este prezentat conceptul inițial al unui bipod și integrarea sa în ansamblu. Cerințele mecanice pentru întregul ansamblu se rezumă la susținerea întregului echipament de către bipozi în condițiile lansării.

Cerințe care trebuie îndeplinite în vederea obținerii unui design final se împart în două clase principale: mecanice și termice.

- O reducere a masei de 25% față de prototip(370g).
- Pentru o analiză quasi-statică o accelerație de aproximativ 20g este aplicată pe toate cele trei direcții. Marginile de siguranță trebuie să aibă valori pozitive.
- Analiza modală trebuie să satisfacă un criteriu impus asupra primei frecvențe proprii a întregului ansamblu, ea trebuie să depășească valoarea de 80Hz.
- Rigiditatea laterală a bipodului trebuie să fie de aproximativ 10 N/mm.
- Din punct de vedere termic, pentru un bipod, valoarea conductivității termice nu trebuie să depășească 0.030W/K.
- Temperaturile de operare sunt: pentru heat source=373K, iar pentru heat sink=143K.

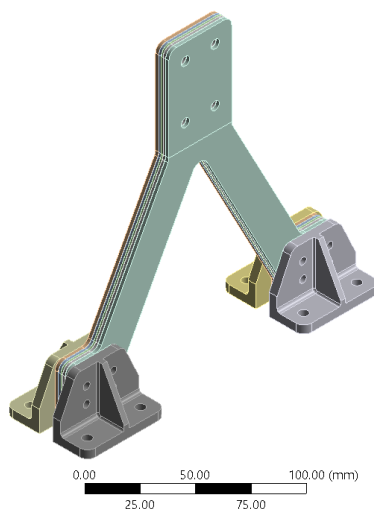
## 2. Stadiul actual

**Analiza și optimizarea Kinematic Mounts reprezintă un subiect de actualitate, întrucât utilizarea lor în aplicațiile spațiale este fundamentală. Este esențial să dezvoltăm un prototip optim care să fie capabil să susțină o componentă hardware în condițiile critice de lansare. Mai multe concepte de Kinematic Mount au fost dezvoltate de-a lungul timpului, dar fiecare aplicație spațială vine cu anumite caracteristici, ceea ce face imposibilă folosirea aceluiași prototip comun pentru toate aplicațiile.**

## 3. Concepte de proiectare

Pentru a proiecta un bipod am avut în vedere un model prezentat drept prototip, păstrând aceeași înălțime și aceleași interfețe. Motivul pentru care am păstrat interfețele prototipului este datorită integrării bipozilor într-un ansamblu. De cele mai multe ori se întâmplă ca părți dintr-un ansamblu să fie realizate în locuri diferite, de aceea interfețele trebuie să facă posibilă conectarea ulterioară.

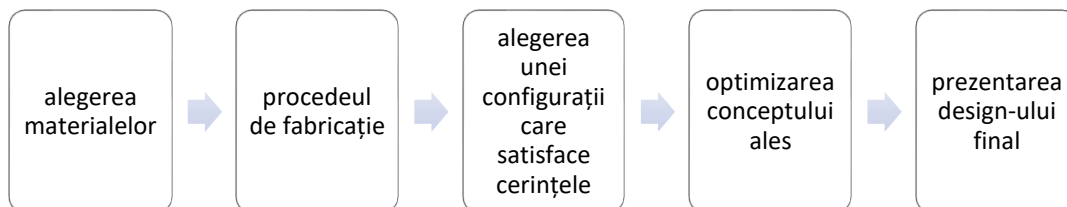
Așadar, conceptul de la care am plecat este:



**Figură 2 Design inițial**

După cum se poate observa, bipodul este alcătuit dintr-o lamelă a cărei configurație o voi prezenta sub formă tabelară și 4 suporturi. Interfața superioară va fi conectată la o altă componentă hardware, iar cea inferioară va fi prinsă de un alt suport.

Etapele parcurse pentru dezvoltarea conceptelor propuse spre analiză constă în:



În urma unui studiu parcurs pentru alegerea materialelor, am constatat că cele mai potrivite și folosite materiale pentru aplicațiile spațiale sunt aliajele de titan. Dar, din punct de vedere termic, aliajele de titan nu sunt cea mai bună opțiune, de aceea s-a ajuns la decizia de a folosi un aliaj de titan împreună cu o fibră de sticlă (bune proprietăți termice).

Ca metodă de fabricație, pentru lamele, ținând cont că vrem să utilizăm două materiale diferite, am optat pentru Fibre Metal Laminat.



**Figură 3 Fibre Metal Laminat Layup**

În cazul suporturilor, materialul ales este un aliaj de titan, dar interesant ar fi un studiu mai amănunțit pentru a vedea dacă aliajul de aluminiu poate fi folosit în locul celui de titan.

Pentru pasul următor, am propus mai multe configurații de grosimi și aranjare ale straturilor de titan și fibră de sticlă.

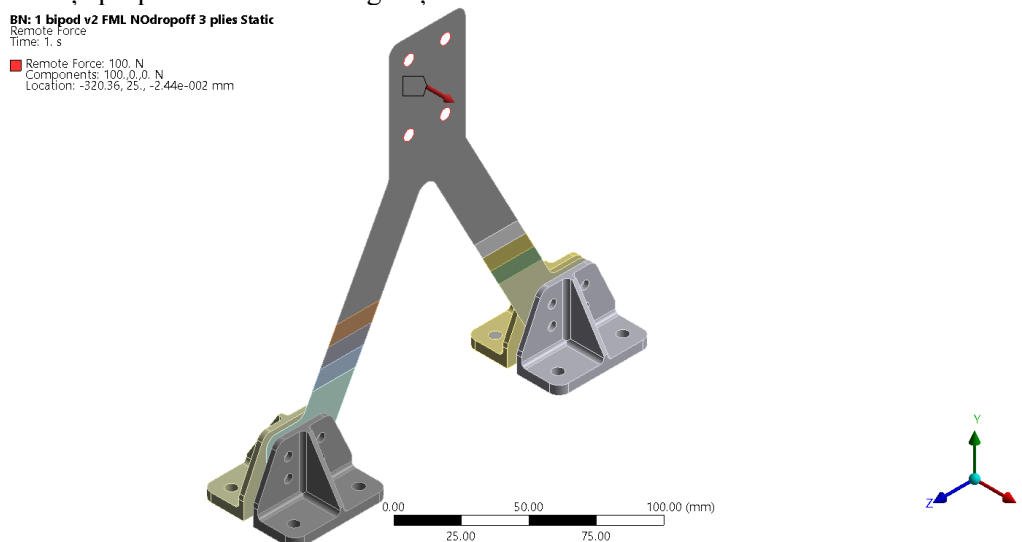
Tabel 1 Prezentare configurații

Configurație	Strat	1	3	5	7	9
Concept 1	Material	Titan	Fibră de sticlă	Titan	Fibră de sticlă	Titan
	Grosime [mm]	1	1.5	1	1.5	1
Concept 2	Material	Fibră de sticlă	Titan	Fibră de sticlă	Titan	Fibră de sticlă
	Grosime [mm]	1.5	1	1.5	1	1.5
Concept 3	Material	Titan	Fibră de sticlă	Titan		
	Grosime [mm]	1	1.5	1		

Aceste configurații au fost analizate pentru un bipod și au avut ca scop obținerea rezultatelor din punct de vedere al rigidității laterale. În același timp, am avut în vedere și aspectul masic. În funcție de rezultatele obținute, se va alege un concept sau două care ulterior vor fi analizate în întreg ansamblu (trei bipozi și greutatea care înlocuiește componenta hardware) pentru a urmări cerințele impuse pentru ansamblu.

#### 4. Rezultate

Pentru a obține valorile rigidității laterale a bipodului, a fost realizată o analiză statică în care bipodul este sollicitat cu o forță de 100N pe direcția X(out of plane). Conturul găurilor de pe talpa suporturilor este fixat pe toate cele 6 grade de libertate. Pe lângă analiza statică, am realizat și o analiză modală pentru a surprinde prima frecvență proprie a fiecărei configurații.



Figură 4 Solicitare pe bipod

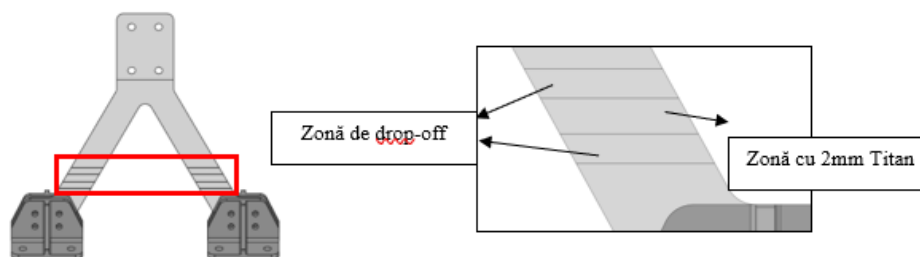
În tabelul de mai jos sunt prezentate rezultatele obținute în urma efectuării analizelor statice și modale.

**Tabel 2 Rezultate analiză statică și modală pentru 1 bipod**

Concept	Deplasare X [mm]	Prima frecvență proprie[Hz]
Prototip	8.72	66.8
Concept 1	1.68	196.7
Concept 2	2.91	157.1
Concept 3	6.05	134.6

Deoarece deplasările laterale au valori mai mici comparativ cu prototipul, pentru a obține o flexibilitate mai mare, am ales ca variantă de optimizare un design inspirat din laminatele compozite: drop-off plies.

## 5. Optimizare



**Figură 5 Configurație drop-off**

Pentru această etapă de optimizare am considerat următoarele configurații-Tabel 3. Schimbările aduse conceptelor anterioare se regăsesc la grosimile straturilor (deoarece obțineam o rigiditate prea mare) și în ordinea de stivuire a straturilor. Ultimele două au fibra de sticlă la exterior pentru a ajuta decuplajul termic.

**Tabel 3 Configurații optimizare**

Configurații	Strat	1	3	5	7	9
Concept dropoff 5 straturi	Material	titan	fibră de sticlă	titan	fibră de sticlă	titan
	Grosime[mm]	1	1	1.5	1	1
Concept dropoff 3 straturi	Material	fibră de sticlă	titan	fibră de sticlă		
	Grosime[mm]	1.5	2	1.5		
Concept fara dropoff 3 straturi	Material	fibră de sticlă	titan	fibră de sticlă		
	Grosime[mm]	1.5	2	1.5		

Rezultatele în urma efectuării analizelor statice și modale pentru configurațiile optimizate:

**Tabel 4 Rezultate optimizare layup Prima frecvență proprie[Hz]**

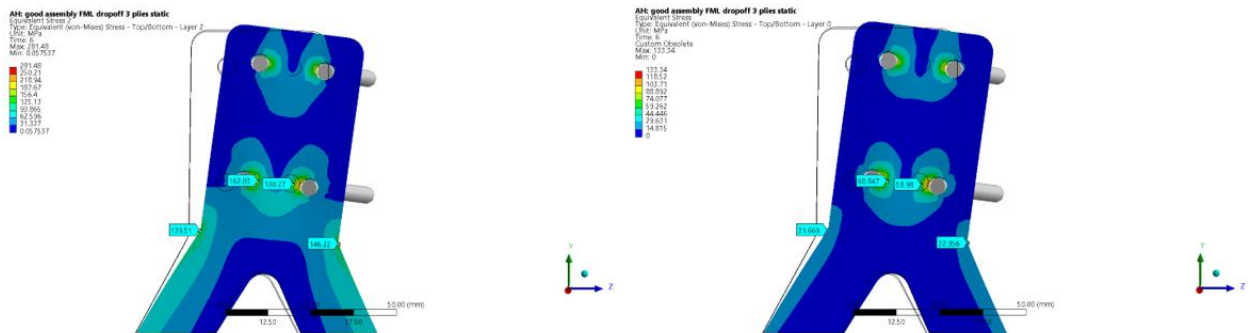
Concept	Deplasare X [mm]	Prima frecvență proprie[Hz]
<b>Concept dropoff 5 straturi</b>	10.58	77.4
<b>Concept dropoff 3 straturi</b>	10.78	89.1
<b>Concept fara dropoff 3 straturi</b>	7.71	105.2

Așadar, conceptele selectate pentru analiza bipodului integrat în ansamblu sunt: Conceptele cu 3 straturi cu și fără drop-off.

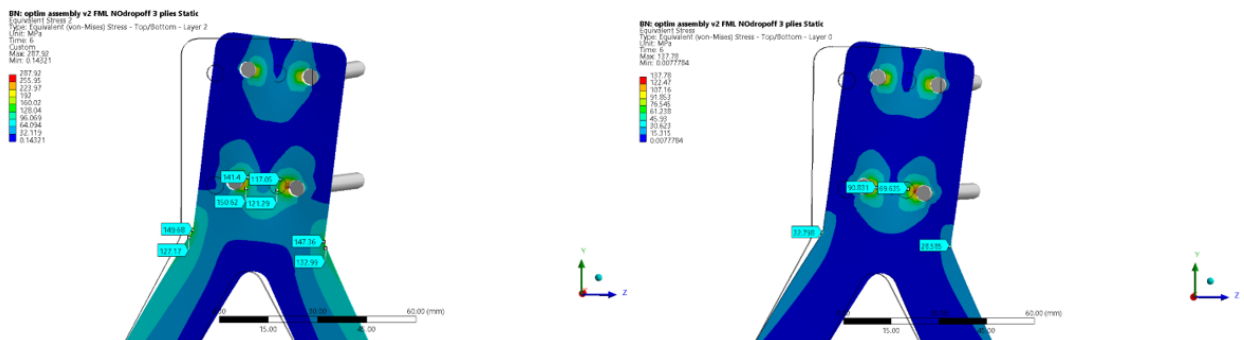
**Tabel 5 Rezultate ansamblu**

Concept	Material	Obiectiv prima frecventa proprie [Hz]	prima frecventa proprie [Hz]	Tensiune von Mises [MPa]	Tensile strength [MPa]	Compressi ve strength [MPa]	MOS (tensi le)	MOS (compre sive)
<b>Prototip</b>	Ti-6Al-4V	>80	91.6	211	880	970	2.16	2.48
<b>Concept dropoff 3</b>	Ti-6Al-4V	>80	86.8	150	880	970	3.44	3.90
	Fibră de sticlă			35	300	500	5.49	9.82
<b>Concept fara dropoff 3</b>	Ti-6Al-4V	>80	87.2	150	880	970	3.44	3.90
	Fibră de sticlă			35	300	500	5.49	9.82

Analiza quasi-statică și modală a întregului ansamblu este făcută pentru a vedea dacă cerințele formulate la început sunt îndeplinite. În urma analizei ansamblului, va fi selectat un design final al bipodului.



**Figură 6 Zone critice Concept cu drop-off**



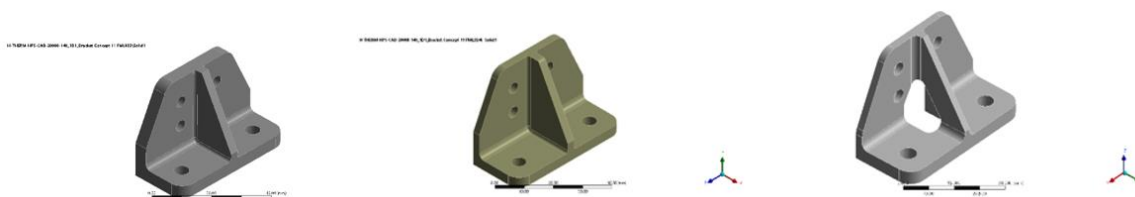
**Figură 7 Zone critice Concept fara drop-off**

Cazurile de încărcare pentru analiza quasi-statică sunt extrase din cerințele mecanice: o accelerație de 20g aplicată pe cele 3 direcții, dar care nu lucrează simultan. Conturul găurilor din tălpile suporturilor rămâne fixat.

Pe baza rezultatelor obținute, conceptul ales este cel fără drop-off, deoarece putem observa că, la nivel de ansamblu, nu se înregistrează diferențe semnificative. Deci, sacrificiul din punct de vedere al procedului de fabricație, nu aduce avantaje pe plan structural.

A fost analizată și posibilitatea de a fabrica suportii din aluminiu. Rezultatele prezentate arată că, din punct de vedere structural, aluminiul este o opțiune bună, ținând cont și avantajele reprezentate de reducerea masei și a costului de fabricație.

Pentru a reduce și mai mult masa unui bipod, am luat în considerare varianta de optimizare a suportilor. Pentru asta, am folosit modulul "topology optimization" al softului Ansys, Obiectivul impus este acela de a păstra tensiunile pe suport la același nivel, dar cu o reducere a masei sale de 25%.



**Figură 8 Optimizare suport**

Tabelul de mai jos va oferi o imagine de ansamblu asupra rezultatelor obținute în urma optimizării configurațiilor de FML și a suportilor.

**Tabel 6 Rezultate optimizare support + FML**

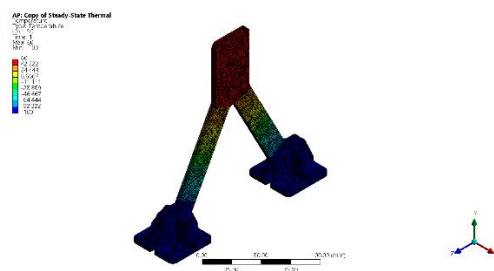
Concept	Masa bipod [g]	Reducere [%]
Prototip	370	-
Concept suport inițial	250	32%
Concept suport optimizat 1	210	43%
Concept suport optimizat 2	192	48%

Diferența dintre masele celor doi suportii optimizați nu este semnificativă atunci când privim în ansamblu întregul bipod, deoarece participația masică a suportilor este mai mică decât a lamelei. Așadar, designul final al bipodului este format din lamela concept fără drop-off cu 3 straturi și suportul optimizat 1.

Rezultatele privind conductanța termică au fost obținute în urma unei analize de tip steady-thermal unde, pe interfața superioară a fost aplicată o temperatură de 60°C, iar pe tălpile suportilor o temperatură de -100°C.

**Tabel 7 Rezultate analiză termică**

	Thermal power[W]	Temperature variation[K]	Cth[W/K]	Obiectiv[W/K]
Concept final	0.86	160	0.005375	0.03
Prototip	0.86	160	0.009	0.03



**Figură 9 Variația temperaturii**

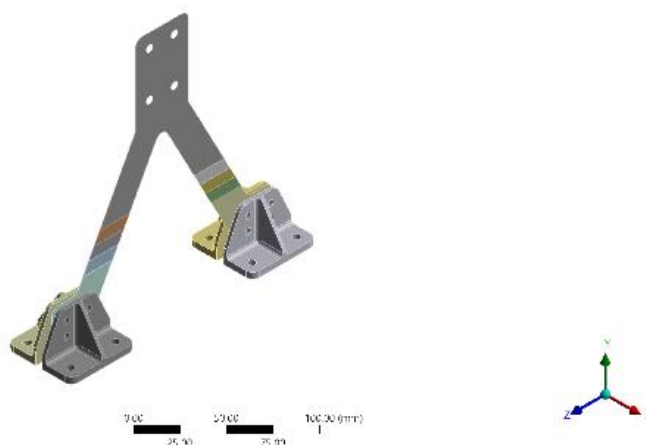
## 6. Concluzii

Această lucrare a avut ca scop principal prezentarea unui concept optim de proiectare pentru un bipod "Kinematic Mount". Un aspect secundar, dar în jurul căruia s-a dezvoltat subiectul, este cel constituit de condițiile impuse și prezentate în primele părți ale lucrării. Bipodul optim trebuie să satisfacă cerințele mecanice și termice și în același timp să fie eficient și din punct de vedere al costului de producție.

Tabel 8 Satisfacerea condițiilor impuse

Cerința	Descrierea	Rezultat	Conformitate
1	Reducerea masei de 25% față de prototip	Reducere de 43% (de la 370.5g la 211.8g)	Conform
2	Rigiditatea laterală a bipodului creat să fie comparabilă cu rigiditatea prototipului	Rigiditate de 12.97N/mm comparabilă cu prototipul 11.46N/mm	Conform
3	Prima frecvență proprie mai mare de 80 Hz	85.15Hz	Conform
4	Obiectivul pentru conductanța termică 0.030W/K	Conductanță termică 0.0053W	Conform

Geometry



Figură 10 Design final bipod



## 6. Bibliografie

- [1].Hale, L. C., & Slocum, A. H. (2001). "Optimal design techniques for kinematic couplings". *Precision Engineering*, 25(2), 114-127.
- [2].Kihm, H., Yang, H. S., Moon, I. K., Yeon, J. H., Lee, S. H., & Lee, Y. W. (2012). "Adjustable bipod flexures for mounting mirrors in a space telescope", *Applied optics*, 51(32), 7776-7783.
- [3].Weingrod, I., Chou, C. Y., Holmes, B., Hom, C., Irwin, J. W., Lindstrom, O., ... & Wüelser, J. P. (2013, September). "Design of bipod flexure mounts for the IRIS spectrometer". In *Optomechanical Engineering 2013* (Vol. 8836, p. 88360Q). International Society for Optics and Photonics.
- [4].Thompson, M. K., & Thompson, J. M. (2017). *ANSYS mechanical APDL for finite element analysis*. Butterworth-Heinemann.
- [5]. Wang, Y., Wang, P., & Liu, Z. (2021). Research and Design of Kinematic Support Flexibility for Metal Mirror. *Optik*, 166386.
- [6]. Huo, T., Yu, J., & Zhao, H. (2020). Design of a kinematic flexure mount for precision instruments based on stiffness characteristics of flexural pivot. *Mechanism and Machine Theory*, 150, 103868.