# Cu-22TiH2连接Mo与Ti6Al4V接头的微观及 力学性能

#### 缪丝羽,蔡育琪,毛样武

武汉工程大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年1月15日; 录用日期: 2025年2月8日; 发布日期: 2025年2月17日

#### 摘要

采用Cu-22TiH₂焊料在930℃时钎焊了Mo与Ti6Al4V合金,连接区域由焊料层和靠近Ti6Al4V合金侧的扩散层组成。其中,焊料层主要含有TiCu、Ti2Cu、Ti(ss)(固溶体)及Mo等相,而扩散层主要由Ti(ss)和Ti2Cu相组成。接头的剪切强度为56.2±9.4 MPa,接头断裂发生在Mo母材上,这主要是由于接头残余热应力主要集中在热膨胀系数相对小的母材侧。

#### 关键词

真空钎焊,难熔金属,Mo

## Microstructure and Mechanical Properties of Mo/Ti6Al4V Joint with Cu-22TiH<sub>2</sub>

#### Siyu Miao, Yuqi Cai, Yangwu Mao

School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Jan. 15<sup>th</sup>, 2025; accepted: Feb. 8<sup>th</sup>, 2025; published: Feb. 17<sup>th</sup>, 2025

#### Abstract

Mo and Ti6Al4V alloys were brazed using Cu-22TiH<sub>2</sub> filler at 930°C. The joint area consists of a filler area and a diffusion area near the Ti6Al4V alloy substrate side. The filler area mainly contains TiCu, Ti<sub>2</sub>Cu, Ti(ss) (solid solution) and Mo phases, while the diffusion area mainly consists of Ti(ss) and Ti<sub>2</sub>Cu phases. The shear strength of the joint is 56.2  $\pm$  9.4 MPa, and the joint fracture occurs on the Mo substrate, which is mainly due to the fact that the residual thermal stresses in the joint were mainly concentrated on the base material side, which has a relatively small coefficient of thermal

#### expansion.

#### **Keywords**

#### Vacuum Brazing, Refractory Metal, Mo

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Вү

## 1. 引言

难熔金属 Mo 具有优异的高温强度、低热膨胀系数、良好的导电和导热性能、优异的抗热腐蚀及抗 热震性能,在真空电子、航空航天及核工业等领域有广泛的应用[1][2]。比如航空航天领域会涉及 Mo 与 Ti6Al4V 合金的连接[3]。因此, Mo 与 Ti6Al4V 的连接研究对于其在真空电子、航天航空及核工业等领 域的推广应用具有重要的意义。

Mo 与 Ti 及 Ti 合金的连接方法主要包括扩散焊和钎焊等[4]-[6]。姚青等[4]在连接温度为 950℃、保 温时间为 60 min 和连接压力为 20 MPa 的条件下直接扩散连接了 Mo 与 Ti6Al4V 合金。结果表明,随着 拉伸实验温度的升高,接头抗拉强度逐渐下降。Yao 等[5]采用 Cr-33Ni-33Ti-1Si 作为中间层,在连接件 上施加 20 MPa 的压力扩散连接了 Mo 与 Ti6Al4V 合金。结果表明,随着连接温度的升高,扩散层的厚度 增加,在 Mo 合金侧形成了孔洞。但扩散焊接对母材的表面质量要求较高,而且由于在连接过程中采用 较高的连接压力,对设备要求较高,因此连接成本也相对较高。

Ivannikov 等人[6]采用 Ti-18Cu-11Ni-7Zr-9Be-1V 和 Zr-30Ti-25Be-10Cu 焊料真空钎焊了 Ti 和 Mo, 其微观组成为 α-(Ti)、β-(Ti)、(Ti, Zr)<sub>2</sub>(Ni, Cu)和 Be 基金属间化合物。但焊料中所含有的 Be 及其化合物 均有剧毒性,且焊料成本较高。

考虑到由于钎焊具有操作简单、成本低和可重复性高等优势,因此采用钎焊对 Mo 和 Ti6Al4V 进行 连接。而 Cu 基焊料成本相对较低,因此拟采用 Cu 基焊料钎焊 Mo 与 Ti6Al4V。根据 Cu-Ti 二元合金相 图[7]可知,当 Cu 与 Ti 的质量比为 78:22 时,体系存在共晶点,且共晶温度为 875℃。同时,活性金属 Ti 的化学亲和性高,可促进焊料与母材的润湿性。因此,本研究采用 Cu-22TiH₂焊料钎焊 Mo 与 Ti6Al4V 合金,并对接头进行微观和力学性能表征。

## 2. 实验材料及方法

本试验所用母材包括 Mo 和 Ti6Al4V 合金。其中, Mo 母材的密度为 10.2 g/cm<sup>3</sup>, 纯度为 99.9%, 尺 寸为 10 mm×10 mm×3 mm, 购于东莞市圣泽金属材料有限公司; Ti6Al4V 合金母材的密度为 4.2 g/cm<sup>3</sup>, 其中 Al 含量为 5.5%~6.75%, V 含量为 3.5%~4.5%, 尺寸为 10 mm×10 mm, 购于宝鸡市深域蓝 鲸科技金属有限公司。

Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料为实验室自制,其液相线(即共晶温度)为 875℃,考虑到钎焊温度通常高于液相线温度 50℃~100℃,因此采用 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料时,钎焊温度设置为 930℃。实验室自制的 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料原料 粉体为 Cu 粉和 TiH<sub>2</sub> 粉(由于 Ti 粉活性较高,在空气中易氧化,本试验采用 TiH<sub>2</sub> 粉代替 Ti 粉),其粒径 均约为 50 µm,纯度均大于 99.5%,均购于北京兴荣源科技有限公司。图 1 为 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料的 XRD 图 谱。从图中可以看出,焊料主要存在 Cu 和 TiH<sub>2</sub>相。XRD 图谱中不存在其他杂相,说明在焊料制备过程

中未引起粉体之间发生化学反应。



Figure 1. XRD pattern of Cu-22TiH2 filler 图 1. Cu-22TiH2 焊料的 XRD 图谱

在进行连接试验之前,需要对 Mo 和 Ti6Al4V 合金的待连接面进行预处理,以去除母材待连接表面 的氧化物及杂质。首先,采用 180 #SiC 金相砂纸对 Mo 和 Ti6Al4V 合金的待连接表面进行抛光处理。随 后,将抛光处理后的母材放入去离子水中超声清洗 20 min,再将其放入无水乙醇中超声清洗 20 min。超 声清洗完成后,将母材取出干燥后备用。

连接前,首先分别在 Mo 和 Ti6Al4V 合金的待连接面涂覆 Cu-22TiH₂ 焊料,再以 Ti6Al4V 合金母材位于底部,Mo 母材位于上部的结构进行装配。此外,为了促进焊料与母材之间的界面结合,对每个连接件施加约 4.7 kPa 的压力。图 2 为采用 Cu-22TiH₂ 焊料钎焊 Mo 与 Ti6Al4V 的温度曲线图。首先以 10℃/min 的升温速率从室温升至 500℃并保温 30 min,目的是使焊料中的丙三醇和有机物充分挥发和分解。然后继续以 10℃/min 的升温速率从 500℃加热至 700℃,并在 700℃下保温 30 min,目的是使 Cu-22TiH₂ 焊料中的TiH₂ 完全分解成 Ti。之后再以 5℃/min 升温至钎焊温度 930℃,保温 10 min 后,连接件随炉冷却至室温。



**Figure 2.** Temperature profile of brazing Mo to Ti6Al4V with Cu-22TiH<sub>2</sub> filler 图 2. 采用 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料钎焊 Mo 与 Ti6Al4V 的温度曲线图

## 3. 结果与讨论

## 3.1. Mo 与 Ti6Al4V 接头微观分析

图 3 为采用 Cu-22TiH<sub>2</sub>焊料钎焊 Mo/Ti6Al4V 接头的微观形貌图和 EDS 元素面分布图。从图 3(a)中可以看出,采用 Cu-22TiH<sub>2</sub>焊料连接 Mo 与 Ti6Al4V 合金时,接头界面结合良好。连接区域包括焊料层和扩散层。其中,焊料层的厚度约为 140~145 μm,扩散层位于焊料层与 Ti6Al4V 母材之间,其厚度约为 15~20 μm,主要是由于 Cu-22TiH<sub>2</sub>焊料与 Ti6Al4V 母材发生互扩散而形成。Duan 等[8]采用 Cu-22TiH<sub>2</sub>焊料钎焊石墨与 Ti6Al4V 合金时,同样发现了靠近 Ti6Al4V 母材侧存在一层扩散层,且厚度约为 20 μm,与本研究结果较为一致。Yao 等[5]采用 Cr-33Ni-33Ti-1Si 焊料钎焊 Mo 与 Ti6Al4V 合金时,在 Ti6Al4V 母材侧也发现了厚度约为 25 μm 的扩散层。



**Figure 3.** Micromorphology (a) and EDS mappings (b)~(f) of the Mo/Ti6Al4V joint using Cu-22TiH<sub>2</sub> filler 图 3. 采用 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料钎焊 Mo/Ti6Al4V 合金接头的微观形貌图(a)和 EDS 元素面分布图(b)~(f)

从图 3(b)~(f)接头界面区域的 EDS 元素面分布图中可以看出, Mo 母材向焊料层中发生了部分扩散和 溶解。焊料层主要由 Ti 和 Cu 元素组成, 而扩散层主要含有 Ti 元素, 并含有少量的 Cu 元素。此外, 焊料层和扩散层中均分布着少量 Al 和 V 元素, 说明连接过程中 Ti6Al4V 合金中的 Al 和 V 等元素向扩散层 和焊料层中均发生了少量的扩散。Lin 等[9]采用 Ti-25Ni-15Nb 焊料钎焊 Mo 自身时, 也发现了 Mo 向焊 料层发生了少量的扩散和溶解。

图 4 为采用 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料钎焊 Mo/Ti6Al4V 接头界面区域的放大图。图 4(a)为接头中 Mo 母材/焊料层区域,图 4(b)为焊料层/扩散层/Ti6Al4V 母材区域。对图 4 中不同区域进行了 EDS 点分析,结果如表 1 所示。

对于焊料层中浅灰色微区 A, 其 Mo 含量高达 96.85 at.%,因此该浅灰色区域为 Mo,说明连接过程 中 Mo 母材向液态焊料中发生了部分扩散和溶解。对于焊料层中的灰色微区 B 和 F, Ti 与 Cu 元素的原

子比均约为 1:1,因此,焊料层中灰色微区可能为 TiCu 相。Liu 等[10]采用 Ti 箔在 800℃并保温 10 min 的 条件下连接 Mo/Cu 时,也在焊料层中发现了 TiCu 相。焊料层中深灰色块状微区 D 含有 59.57 at.% Ti 和 30.68 at.% Cu,原子比约为 2:1,推测深灰色块状区域为 Ti<sub>2</sub>Cu 相。黑色微区 E 含有大量 Ti 元素(92.70 at.%),推测为 Ti(ss) (固溶体)。对于靠近扩散层的焊料层中深灰色层状微区 G,主要由 Ti 和 Cu 元素组 成,且比例约为 2:1,说明该深灰色层为 Ti<sub>2</sub>Cu 相。Duan 等[8]采用 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料钎焊石墨与 Ti6Al4V 合金时,也在靠近扩散层处发现一层深灰色层状区域,微观分析表明该层为 Ti<sub>2</sub>Cu。



**Figure 4.** Magnified images of the interfacial region in the Mo/Ti6Al4V joint using Cu-22TiH<sub>2</sub> filler. (a) Mo/brazing region/diffusion layer/Ti6Al4V side

图 4. 采用 Cu-22TiH2 焊料钎焊 Mo/Ti6Al4V 接头界面区域放大图。(a) Mo 母材/焊料层;(b) 焊料层/扩散层/Ti6Al4V 母材

Table	1.	EDS results of microregions in Figure	4
表 1.	冬	4 中各微区的 EDS 点分析结果	

微区		十一的可能相				
	Mo	Ti	Cu	Al	V	土女的可能相
А	96.85	1.35	1.21	0.41	0.18	Мо
В	7.98	41.70	46.51	1.38	2.43	TiCu
D	0.06	59.57	30.68	9.52	0.17	Ti <sub>2</sub> Cu
Е	2.15	92.70	1.21	0.05	3.89	Ti(ss)
F	0.30	50.16	47.95	1.16	0.43	TiCu
G	0.11	62.18	31.05	5.12	1.54	Ti <sub>2</sub> Cu
Н	0.15	72.99	13.86	9.78	3.22	Ti(ss), Ti <sub>2</sub> Cu

对于扩散层中的微区 H,其主要含有 Ti 元素和少量 Cu 元素,推测主要由 Ti(ss)和 Ti<sub>2</sub>Cu 相组成。 Cui 等[11]采用 Ti-Zr-Cu-Ni 焊料连接 C<sub>f</sub>/SiC 复合材料与 Ti6Al4V 合金时,在 Ti6Al4V 母材附近也形成了 扩散层,扩散层主要由 Ti(ss)和 Ti<sub>2</sub>Cu 相组成。Guo 等[12]研究采用 Ag-Cu 焊料连接 C/C 复合材料与 Ti6Al4V 合金时,也发现靠近 Ti6Al4V 母材侧形成了由 Ti<sub>2</sub>Cu + Ti(ss)组成的扩散层。

图 5 为采用 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料钎焊 Mo/Ti6Al4V 接头连接区域的 XRD 图谱。

XRD 结果表明,Mo/Ti6Al4V 合金接头界面区域存在 TiCu、Ti<sub>2</sub>Cu、Ti 和 Mo 等相。根据 EDS 点分 析结果可知,Mo/Ti6Al4V 接头的焊料层主要含有 TiCu、Ti<sub>2</sub>Cu 以及少量的 Ti(ss)和 Mo,扩散层则主要含 有 Ti(ss)和 Ti<sub>2</sub>Cu。因此 XRD 结果证实了 EDS 点分析的结果,说明采用 Cu-22TiH<sub>2</sub>焊料连接 Mo 与 Ti6Al4V 合金时,焊料层主要含有 TiCu、Ti<sub>2</sub>Cu 以及少量的 Ti(ss)和 Mo,扩散层则主要由 Ti(ss)和 Ti<sub>2</sub>Cu 组成。

根据以上微观分析可知,采用 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料钎焊 Mo 与 Ti6Al4V 合金时,Mo 向液态焊料中发生了 少量的扩散和溶解,焊料层主要由 TiCu、Ti<sub>2</sub>Cu 以及少量的 Ti(ss)和 Mo 等组成。Ti6Al4V 合金与液态焊

料发生了相互扩散,在靠近 Ti6Al4V 母材侧形成了扩散层,扩散层主要由 Ti(ss)和 Ti2Cu 组成。



**Figure 5.** XRD pattern of the interfacial region in the Mo/Ti6Al4V joint with Cu-22TiH<sub>2</sub> filler 图 5. 采用 Cu-22TiH<sub>2</sub>焊料连接 Mo 与 Ti6Al4V 合金接头连接区域的 XRD 图谱

#### 3.2. Mo 与 Ti6Al4V 接头力学性能分析

图 6 为采用 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料钎焊 Mo/Ti6Al4V 接头的显微硬度分布图。对于 Mo/Ti6Al4V 接头中的 Mo 母材,其显微硬度值为 276 ± 14 HV<sub>0.1</sub>,与 Zhou 等[13]报道的 Mo 显微硬度值(290 HV)较为一致。 Mo/Ti6Al4V 接头中 Ti6Al4V 合金母材的显微硬度值为 366 ± 21 HV<sub>0.1</sub>。Hao 等人[14]研究采用 Cu 基焊料 钎焊 Ti6Al4V 合金与 304L 钢时,测得 Ti6Al4V 母材的显微硬度值在 350 HV 左右,与本研究的结果较为 一致。

Mo/Ti6Al4V 接头焊料层的显微硬度值为 369 HV<sub>0.1</sub>~439 HV<sub>0.1</sub>。结合微观分析可知, Mo/Ti6Al4V 接 头焊料层主要由 TiCu、Ti<sub>2</sub>Cu 以及少量的 Ti(ss)和 Mo 组成。根据文献[13] [15]-[17]可知, Mo、Ti<sub>2</sub>Cu、 Ti(ss)和 TiCu 相的显微硬度分别为 290 HV、508 HV、342 HV 和 415 HV。因此, Mo/Ti6Al4V 接头焊料 层硬度值应介于 342 HV~507 HV 之间,本研究测得的焊料层显微硬度结果与之较为符合。

对于 Mo/Ti6Al4V 接头的扩散层,其显微硬度值为 481 ± 29 HV<sub>0.1</sub>,高于焊料层的显微硬度值。根据 微观分析可知,Ti<sub>2</sub>Cu 相主要集中在靠近 Ti6Al4V 侧的扩散层处。而 Ti<sub>2</sub>Cu 相的显微硬度高于 TiCu 相。因此,Ti<sub>2</sub>Cu 相富集的扩散层具有更高的显微硬度值。

Mo/Ti6Al4V 接头的剪切强度值为 56.2 ± 9.4 MPa。Chang 等[3]报道称,扩散层的形成有利于焊料与 母材之间形成良好的界面结合。图 7 为 Mo/Ti6Al4V 接头的断口图。从图可知,Mo/Ti6Al4V 接头断裂发 生在 Mo 母材上。这一方面说明了 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料与 Mo 和 Ti6Al4V 合金母材的界面结合均较为良好。 但另一方面,由于 Mo 母材与焊料层及 Ti6Al4V 合金的热膨胀系数(CTE)差异(Mo 的 CTE 为 4.9 × 10<sup>-6</sup>/℃[18];焊料层的 CTE 为 10.9~13.5 × 10<sup>-6</sup>/℃[19] [20]; Ti6Al4V 合金的 CTE 为 8.6 × 10<sup>-6</sup>/℃[21]), 导致连接后会在接头中产生残余热应力。对于采用 Cu-22TiH<sub>2</sub>焊料连接 Mo 与 Ti6Al4V,接头中 Mo 母材 的 CTE 较低,因此接头残余热应力主要集中在 Mo 母材侧,从而导致剪切测试时接头断裂发生在 Mo 母 材侧。



**Figure 6.** Microhardness distribution map of Mo/Ti6Al4V joint brazed with Cu-22TiH<sub>2</sub> brazing filler metal 图 6. 采用 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料钎焊 Mo/Ti6Al4V 接头显微硬度分布图



Figure 7. Fracture morphology diagram of Mo/Ti6Al4V joint after shear strength testing using Cu-22TiH<sub>2</sub> brazing material for bonding

图 7. 采用 Cu-22TiH2 焊料连接 Mo/Ti6Al4V 接头经剪切强度测试后的断口形貌图

## 4. 结论

1) 采用 Cu-22TiH<sub>2</sub> 焊料在 930℃保温 10 min 的工艺条件下成功连接了连接 Mo 与 Ti6Al4V 合金。接 头由焊料层和靠近 Ti6Al4V 合金侧的扩散层组成,其中,焊料层主要含有 TiCu、Ti<sub>2</sub>Cu、Ti(ss)及 Mo 等 相,而扩散层主要由 Ti(ss)和 Ti<sub>2</sub>Cu 相组成。

2) Mo/Ti6Al4V 焊料层的显微硬度值为 369 HV<sub>0.1</sub>~439 HV<sub>0.1</sub>,其显微硬度值与焊料层的相组成结果较为符合。

3) Mo/Ti6Al4V 接头的剪切强度值为 56.2±9.4 MPa。Mo/Ti6Al4V 接头断裂发生在 Mo 母材上,这主要是由于接头中 Mo 母材的热膨胀系数较低,因此接头残余热应力主要集中在 Mo 母材侧,从而导致剪切测试时接头断裂发生在 Mo 母材侧。

## 参考文献

- Xu, B., Cai, Y., Haider, J., Khan, F.N., Shehbaz, T., Zhao, H., *et al.* (2023) Microstructural and Mechanical Characterizations of Mo/W and Mo/Graphite Joints with BNi2 Paste. *Advanced Engineering Materials*, 26, Article ID: 2301004. <u>https://doi.org/10.1002/adem.202301004</u>
- [2] Chakraborty, S.P., Banerjee, S., Sharma, I.G. and Suri, A.K. (2010) Development of Silicide Coating over Molybdenum Based Refractory Alloy and Its Characterization. *Journal of Nuclear Materials*, 403, 152-159. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.06.014
- [3] Chang, C.T. and Shiue, R.K. (2005) Infrared Brazing Ti-6Al-4V and Mo Using the Ti-15Cu-15Ni Braze Alloy. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **23**, 161-170. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2005.01.002</u>
- [4] 姚青, 成会朝. Mo/Ti6Al4V 扩散连接接头的高温性能[J]. 广东化工, 2019, 46(9): 24-25.

- [5] Yao, Q., Cheng, H., Fan, J., Yan, H. and Zhang, C. (2019) High Strength Mo/Ti6Al4V Diffusion Bonding Joints: Interfacial Microstructure and Mechanical Properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 82, 159-166. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.04.009</u>
- [6] Ivannikov, A.A., Popov, N.S., Abramov, A.V., Terekhova, S.M. and Chuvaeva, E.A. (2023) Microstructure Evolution of Vacuum-Brazed Ti/Mo Joints with Ti- and Zr-Based Filler Metals. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33, 11937-11943. https://doi.org/10.1007/s11665-023-08773-w
- [7] 唐仁政,田荣璋.二元合金相图及中间相晶体结构[M].长沙:中南大学出版社,2009.
- [8] Duan, Y., Mao, Y., Xu, Z., Deng, Q., Wang, G. and Wang, S. (2019) Joining of Graphite to Ti6Al4V Alloy Using Cubased Fillers. Advanced Engineering Materials, 21, Article ID: 1900719. <u>https://doi.org/10.1002/adem.201900719</u>
- [9] Lin, C.C., Chen, C., Shiue, R.K. and Shi, S.C. (2011) Vacuum Brazing Mo Using Ti-Ni-Nb Braze Alloys. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 29, 641-644. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.04.003</u>
- [10] Liu, M., Bai, L. and Deng, Y. (2022) Strong Mo/cu Interfacial Bonding Facilitated by Consumable Ti Interlayer. *Journal of Manufacturing Processes*, 74, 136-140. <u>https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.010</u>
- [11] Cui, B., Huang, J., Cai, C., Chen, S. and Zhao, X. (2014) Microstructures and Mechanical Properties of Ct/SiC Composite and TC4 Alloy Joints Brazed with (Ti-Zr-Cu-Ni)+W Composite Filler Materials. *Composites Science and Technology*, 97, 19-26. <u>https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.03.021</u>
- [12] Guo, W., Wang, L., Zhu, Y. and Chu, P.K. (2015) Microstructure and Mechanical Properties of C/C Composite/TC4 Joint with Inactive AgCu Filler Metal. *Ceramics International*, **41**, 7021-7027. <u>https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.02.006</u>
- [13] Zhou, X., Huang, Y., Chen, Y. and Peng, P. (2018) Laser Joining of Mo and Ta Sheets with Ti6Al4V or Ni Filler. Optics & Laser Technology, 106, 487-494. <u>https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.05.004</u>
- [14] Hao, X., Dong, H., Li, S., Xu, X. and Li, P. (2018) Lap Joining of TC4 Titanium Alloy to 304 Stainless Steel with Fillet Weld by GTAW Using Copper-Based Filler Wire. *Journal of Materials Processing Technology*, 257, 88-100. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.02.020
- [15] Chu, Q., Zhang, M., Li, J., Fan, Q., Xie, W. and Bi, Z. (2015) Joining of Cp-Ti/Q345 Sheets by Cu-Based Filler Metal and Effect on Interface. *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 67-76. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.05.017
- [16] Zong, W., Zhang, S., Zhang, C., Ren, L. and Wang, Q. (2020) Design and Characterization of Selective Laser-Melted Ti6Al4V-5Cu Alloy for Dental Implants. *Materials and Corrosion*, **71**, 1697-1710. https://doi.org/10.1002/maco.202011650
- [17] Konieczny, M. (2008) Processing and Microstructural Characterisation of Laminated Ti-Intermetallic Composites Synthesised Using Ti and Cu Foils. *Materials Letters*, 62, 2600-2602. <u>https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.067</u>
- [18] Lin, D., Chen, Q., Hu, J., Hu, S., Bian, H., Fu, W., *et al.* (2024) Microstructure Evolution and Mechanical Properties of SiC/Mo Joint Brazed with FeCoCrNi High-Entropy Alloy Filler. *Ceramics International*, **50**, 42045-42058. <u>https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.048</u>
- [19] Apblett, C. and Ficalora, P.J. (1991) Stress Generation in Thin Cu-Ti Films in Vacuum and Hydrogen. Journal of Applied Physics, 69, 4431-4432. <u>https://doi.org/10.1063/1.348370</u>
- [20] Wang, G., Wang, Z., Wang, W., He, R., Gui, K., Tan, C., et al. (2019) Microstructure and Shear Strength of ZrB<sub>2</sub>-SiC/Ti-6Al-4V Joint by TiCuZrNi with Cu Foam. Ceramics International, 45, 10223-10229. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.02.074
- [21] Thamae, M., Maringa, M. and du Preez, W. (2024) A Comparative Analysis of Low and High SiC Volume Fraction Additively Manufactured SiC/Ti6Al4V(ELI) Composites Based on the Best Process Parameters of Laser Power, Scanning Speed and Hatch Distance. *Materials*, 17, Article 2606. <u>https://doi.org/10.3390/ma17112606</u>