



Effect of Silicon Addition on the Microstructure and Hardness of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by Selective Laser Melting

Amir Hossein Gholami¹, Seyed Farshid Kashani-Bozorg^{2*}, Mohammad Reza Barati³

¹MSc Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

²Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

³Assistant Professor, Department of Advanced Materials and New Technologies, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran.

*Corresponding Author's Email: fkashani@ut.ac.ir (Seyed Farshid Kashani-Bozorg)

Paper History:

Received: 2025-08-21

Revised: 2025-11-24

Accepted: 2025-12-22

Keywords:

Selective Laser Melting,
Ti6Al4V Alloy,
Silicon,
Microstructure,
Microhardness

ABSTRACT The application of additive manufacturing technologies for titanium alloys is expanding in both research and industrial sectors. In this study, selective laser melting was employed to fabricate and investigate the effects of adding 1 wt.% silicon to the Ti-6Al-4V alloy. The microstructure of the fabricated selective laser melting samples consisted of fish-type melted regions normal to the build direction. Columnar β -Ti grains grew in the opposite direction of heat flow, namely along the build direction. The results indicated that the addition of 1 wt.% silicon led to grain refinement and a reduction in the width of the primary columnar β -Ti grains from approximately 70 to approximately 40 μm . This grain refinement, resulting from the presence of silicon, also contributed to an increase in the average microhardness of the alloy, such that the microhardness value increased from approximately 417 to approximately 481 HV in the build direction plane.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.541757.1336>

URL: https://www.jamt.ir/article_243773.html

1. INTRODUCTION

In recent decades, additive manufacturing (AM) technologies have gained significant attention in both industry and academia due to their numerous advantages, including reduced material waste, shorter processing times, high flexibility, suitability for producing complex components, and a shortened product development cycle (Meng et al., 2021).

Grain refinement is an effective approach for enhancing mechanical properties, as it simultaneously improves both the strength and ductility of the component. The addition of a solute element enhances the strength of components produced by additive manufacturing through three main strengthening mechanisms: solid solution strengthening, second-phase precipitation, and grain refinement strengthening (Leuders et al., 2013). In this study, the effect of adding 1 wt. % silicon on the microstructure of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting (SLM) was investigated. The results revealed that the addition of silicon led to a reduction in the size of the primary β grains during the 3D printing process, resulting in grain refinement.

2. MATERIALS AND METHODS

Spherical Ti-6Al-4V ELI alloy powder (Suoyi Company, Guangzhou, China) with a particle size range of 15–45 μm , as well as elemental silicon powder with particle sizes below 45 μm , were used in this study (Figure 1). The selective laser melting process

parameters used for sample fabrication included a laser power of 200 W, a scanning speed of 1200 mm/s, a hatch spacing of 60 μm , and a layer thickness of 30 μm .

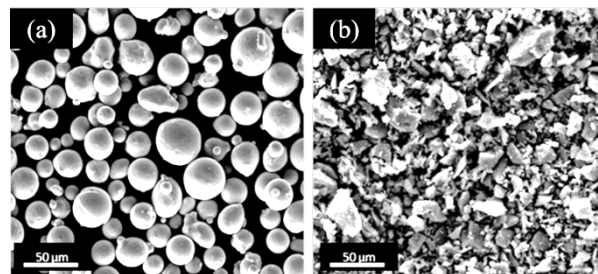


Figure 1. Scanning Electron Microscopy images of the used powders: (a) Ti6Al4V-ELI and (b) Silicon.

Crystal structure and microstructure were studied using X-ray diffractometry and optical & scanning electron microscopy, respectively. Mechanical assessment was done by microhardness testing using a Vickers indenter.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Microstructure of the Ti6Al4V alloy

The microstructure of the Ti-6Al-4V sample in the build direction consists of elongated primary β columnar grains, with an average width of approximately 68 μm , which grew opposite to the heat flow direction, at an angle of approximately 20 degrees relative to the build direction. These textured grains were formed epitaxially



from the remelted grains of the underlying solidified layers due to directional solidification.

3.2. Microstructure of the Ti6Al4V-1Si alloy

Similar to the microstructural features of the Ti-6Al-4V alloy, fine needle-like α' martensite is observed in planes both along and normal to the build direction. The α' martensite primarily nucleated at the boundaries of the primary β grains and grew within the β grains; however, some α' martensite also extended into adjacent β grains. In the microstructure of the printed samples along the build direction, primary β columnar grains are clearly visible, growing along the build direction (opposite to the heat flow direction), which is a typical feature of the SLM process.

A comparison of the microstructures and measured grain sizes for the Ti-6Al-4V and Ti-6Al-4V-1Si alloys reveals that silicon has a significant effect on the morphology and size of the primary β grains in samples produced via SLM (Simonelli et al., 2014).

The addition of silicon as a soluble element notably reduces the grain size, including the width of the columnar grains. Based on the linear intercept method, the average width of the columnar grains decreased from approximately 70 μm in the Ti-6Al-4V alloy to approximately 38 μm in the Ti-6Al-4V-1Si alloy.

3.3. Effect of Silicon Addition on the Hardness of Ti-6Al-4V

To investigate the effect of silicon addition on the hardness of the Ti-6Al-4V-1Si alloy processed via selective laser melting (SLM), microhardness testing was performed using the Vickers hardness method. The average microhardness was measured both in the build plane and along the build direction. A comparison of the average microhardness values for the Ti-6Al-4V and Ti-6Al-4V-1Si samples in the two directions is presented in Table 1. The results indicate that the average

microhardness increased in both directions following the addition of 1 wt.% silicon.

Table 1. Average microhardness values for the SLM-fabricated samples in two different directions

Sample	Vickers microhardness(HV-200)	
	Plane of direction	Plane normal to the build direction
Ti6Al4V	12 \pm 417.2	\pm 18 414.2
Ti6Al4V-1Si	\pm 17 481.7	22 461.7 \pm

4. CONCLUSIONS

The microstructure of the Ti-6Al-4V-1Si alloy sample fabricated using the SLM process consisted of columnar grains grown opposite to the heat flow direction, namely along the build direction. A comparison with the reference sample (Ti-6Al-4V) shows that the average width of the primary β columnar grains was reduced from approximately 70 μm to approximately 40 μm in the Ti-6Al-4V-1Si alloy. The average microhardness of the samples slightly increased in both the build plane and the build direction due to grain refinement, demonstrating an enhancement resulting from the addition of 1 wt.% silicon to the Ti-6Al-4V alloy.

REFERENCES

- Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. a., & Maier, H. (2013). On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International journal of fatigue*, 48, 300-307. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011>.
- Meng, X., Min, J., Sun, Z., Zhang, W., Chang, H., & Han, Y. (2021). Columnar to equiaxed grain transition of laser deposited Ti6Al4V using nano-sized B4C particles. *Composites Part B: Engineering*, 212, 108667. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108667>
- Simonelli, M., Tse, Y. Y., & Tuck, C. (2014). On the Texture Formation of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45(6), 2863-2872. [doi:10.1007/s11661-014-2218-0](https://doi.org/10.1007/s11661-014-2218-0)



مقاله کامل پژوهشی

اثر افزودن سیلیسیم بر ریزساختار و سختی آلیاژ Ti-6Al-4V تولیدشده به روش ذوب گزینشی با لیزر

امیرحسین غلامی^۱، سیدفرشید کاشانی بزرگ^{۲*}، محمدرضا براتی^۳

^۱ کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده‌گان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده‌گان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استادیار، پژوهشکده مواد پیشرفته و فناوری‌های نوین، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳

پذیرش قطعی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

ذوب گزینشی با لیزر،

آلیاژ Ti6Al4V،

سیلیسیم،

ریزساختار،

ریزسختی

چکیده امروزه فناوری‌های ساخت افزایشی آلیاژهای تیتانیوم در کاربردهای مختلف صنعتی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، آلیاژی بر پایه Ti6Al4V، با افزودن یک درصد وزنی سیلیسیم و به روش ذوب گزینشی با لیزر ساخته شد و سپس ریزساختار و سختی آن مورد بررسی قرار گرفت. ریزساختار نمونه‌های تولیدشده به روش ذوب گزینشی با لیزر شامل حوضچه‌های انجمادی با شکل فلس‌ماهی بود که درون آن‌ها، دانه‌های هم‌بافت ستونی در خلاف جهت انتقال حرارت، یعنی در راستای ساخت قطعه، رشد کردند. نتایج نشان داد که افزودن یک درصد سیلیسیم به آلیاژ Ti6Al4V منجر به ریزدانه‌گی و کاهش عرض دانه‌های ستونی β اولیه می‌شود؛ به طوری که عرض دانه‌های ستونی از حدود ۷۰ به ۴۰ میکرومتر کاهش یافت. این ریزدانه‌گی به جهت افزوده شدن سیلیسیم به آلیاژ Ti6Al4V، باعث افزایش میانگین ریزسختی نمونه نیز شد؛ به طوری که مقدار سختی در صفحه در جهت ساخت نمونه‌ها از حدود ۴۱۷ به ۴۸۱ ویکرز رسید.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.541757.1336>

URL: https://www.jamt.ir/article_243773.html

۱- مقدمه

دهد و در نتیجه، محصول نهایی با دقت بالا ساخته می‌شود (Meng et al., 2021).

در میان انواع مختلف فرایندهای ساخت افزایشی، فرایندهای مبتنی بر پودر، مانند ذوب بستر پودر، لایه‌نشانی مواد با استفاده از یک منبع انرژی مستقیم و پاشش چسب، بیشترین کاربردها را در تولید و فرآوری قطعات فلزی دارند.

در این میان، ذوب گزینشی با لیزر یکی از مهم‌ترین فناوری‌های ساخت افزایشی به شمار می‌رود که با بهره‌گیری از انرژی لیزر و در قالب فرایند ذوب بستر پودری، امکان تولید دقیق قطعات فلزی را فراهم می‌کند و تحت عنوان ذوب بستر

فناوری ساخت افزایشی^۱ در چند دهه اخیر به دلیل مزایای فراوان، هم در صنعت و هم در پژوهش‌های دانشگاهی مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این مزایا می‌توان به کاهش هدررفت مواد، کوتاه شدن زمان فرایند، امکان تولید قطعات پیچیده و کاهش چرخه توسعه محصول، اشاره کرد. ساخت افزایشی با بهره‌گیری از یک روش منحصربه‌فرد، از فایل استریولیتوگرافی^۲ استخراج شده از یک مدل طراحی به کمک رایانه^۳، جهت ساخت یک جسم استفاده می‌کند. این فایل، دستگاه را هدایت می‌کند تا قطعه را به صورت لایه‌به‌لایه تشکیل

1. Additive manufacturing
2. Stereolithography
3. Computer Aided Design

*عهده‌دار مکاتبات: سیدفرشید کاشانی بزرگ

نشانی: ایران، تهران، دانشکده‌گان فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

پیام‌نگار: fkashani@ut.ac.ir

دانه‌های β اولیه، ضخامت و اندازه لایه‌های α' بستگی دارد که این موارد به شدت تحت تأثیر متغیرهای فرایندی و یا ترکیب آلیاژ قرار دارند. به دلیل سازوکار ذوب کامل فرایند SLM و همچنین متغیرهای فرایندی که برای به حداکثر رساندن چگالی انتخاب می‌شوند، نرخ سرمایش در طول فرآوری آلیاژ Ti6Al4V به وسیله ذوب‌گزینی با لیزر در حدود 10^3 تا 10^8 کلوین بر ثانیه است. در این بازه، مارتنزیت سوزنی با ساختار بلوری هگزاگونال فشرده، مشاهده می‌شود و برای نرخ‌های سرمایش بالاتر از 10^5 کلوین بر ثانیه، مارتنزیت سوزنی ریزتری تشکیل می‌شود؛ بنابراین، کنترل نرخ سرمایش در طول انجماد، رایج‌ترین روش برای اثرگذاری بر ریزساختار است (Kaki Sahneh, 2024; Leuders et al., 2013; Sutton et al., 2017).

افزودن جزء انحلالی، باعث افزایش استحکام قطعه تولیدشده به روش ساخت افزایشی از طریق سه سازوکار استحکام‌بخشی محلول جامد، رسوب فاز دوم و استحکام‌بخشی از طریق ریزدانه‌گی می‌شود. ریزدانه‌گی یک روش مناسب برای بهبود خواص مکانیکی است که به صورت هم‌زمان منجر به بهبود استحکام و انعطاف‌پذیری قطعه خواهد شد و رابطه بین اندازه دانه و استحکام تسلیم توسط رابطه معروف هال-پیچ توصیف می‌شود.

در پژوهش انجام‌شده توسط یون و همکاران (Yoon et al., 2004) نشان داده شد که افزودن مقادیر اندک سیلیسیم به آلیاژهای تیتانیوم و آلومینایدهای تیتانیوم می‌تواند منجر به بهبود قابل توجه مقاومت به خزش در دمای بالا شود. افزودن بر بهبود خواص خزش، مشخص شده است که افزودن سیلیسیم می‌تواند مقاومت به اکسایش آلیاژهای تیتانیوم را در دماهای بالا افزایش دهد (Sagar et al., 1995).

همچنین مردی^۴ و همکاران (Meredy et al., 2017)، اثر افزودن سیلیسیم به تیتانیوم خالص تا حداکثر ۰/۷۵ درصد وزنی را در فرایند ساخت افزایشی قوس سیمی^۵ مورد بررسی قرار دادند. افزودن عنصر سیلیسیم به تیتانیوم خالص منجر به ریزدانه‌گی دانه‌های β اولیه شد؛ این پدیده به واسطه ایجاد تحت تبرید غلظتی و محدود شدن رشد دانه‌ها رخ می‌دهد. در این پژوهش اثر افزودن یک درصد وزنی سیلیسیم و تأثیر آن بر

پودری^۱ با استفاده از لیزر نیز شناخته می‌شود. کیفیت قطعه تولیدشده با این روش، تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله: توان لیزر، سرعت‌های روبش، نقشه‌های روبش، ضخامت لایه، فاصله مسیرهای روبش، اندرکنش لیزر با پودر و بسیاری از موارد دیگر قرار می‌گیرد (Mukherjee et al., 2023; Riazi, 2025; Zhu et al., 2021).

آلیاژ Ti6Al4V پرمصرف‌ترین آلیاژ تیتانیوم است که بیش از ۵۰ درصد کل مصرف تیتانیوم جهان را به خود اختصاص می‌دهد و این کاربرد گسترده، به دلیل پایداری آن در دمای عملیاتی بالا، استحکام ویژه بالا و مقاومت مناسب در برابر خوردگی است. با وجود مزایای فراوان فرایند ذوب‌گزینی با لیزر آلیاژ Ti6Al4V، چالش‌های مهمی نیز وجود دارد. به دلیل نرخ سرمایش بالا، ریزساختار اجزای Ti6Al4V تولیدشده با این روش، عمدتاً از مارتنزیت α' سوزنی تشکیل می‌شود و همین امر، باعث استحکام کششی بالا اما شکل‌پذیری پایین در قطعات نهائی می‌شود. یکی دیگر از مشکلات فرایند، وجود تنش‌های پس‌ماند ناشی از سرمایش سریع و شیب‌های دمایی در طول عملیات است که تأثیر زیادی بر رفتار رشد ترک دارد. علاوه بر این، آلیاژ Ti6Al4V فرآوری‌شده از طریق ذوب‌گزینی با لیزر ممکن است دچار عیوب ریزساختاری مانند توپی شدن^۲ و تخلخل شود که در نتیجه، مقاومت به خستگی قطعه کاهش می‌یابد (Pede et al., 2022; Vrancken et al., 2014; Zhang et al., 2018).

آلیاژ Ti6Al4V، یک آلیاژ با ساختار دوفازی α و β است که در آن، عناصر آلومینیوم و وانادیوم به ترتیب به عنوان پایدارساز فازهای α و β عمل می‌کنند. روش‌های فرآوری مختلف می‌تواند باعث دستیابی آلیاژهای تیتانیوم به ریزساختارهای هم‌محور، لایه‌ای یا دوگانه شود که هر کدام دارای ویژگی‌های مکانیکی متفاوتی هستند. برای قطعاتی که به استحکام بالایی نیاز دارند، ریزساختار مارتنزیتی ممکن است گزینه‌ای ایده‌آل باشد؛ اما در مورد قطعاتی مانند کاشتنی‌های پزشکی که عملکرد خستگی اهمیت بیشتری دارد، یک ریزساختار هم‌محور و تعادلی مناسب‌تر است. خواص مکانیکی ریزساختارهایی که اغلب در فرایند ذوب‌لیزری انتخابی^۳ (SLM) مشاهده می‌شوند، به اندازه

1. Powder Bed Fusion
2. Balling
3. Selective Laser Melting
4. Meredy
5. Wire Arc Additive Manufacturing

استفاده شد. برای مقایسه اثر یک درصد وزنی سیلیسیم بر ریزساختار Ti6Al4V، ابتدا نمونه آلیاژی Ti6Al4V بدون افزودن عنصر سیلیسیم، تحت فرایند ساخت افزایشی قرار گرفت و از آن به عنوان نمونه شاهد یا نشان استفاده شد. سپس با استفاده از فرایند اختلاط مکانیکی، مقدار یک درصد وزنی سیلیسیم به پودر آلیاژی Ti6Al4V افزوده شد و دوباره تحت فرایند چاپ قرار گرفت. متغیرهای فرایندی تولید شامل توان لیزر ۲۰۰ وات، سرعت رویش لیزر ۱۲۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، فاصله بین خطوط رویش ۶۰ میکرومتر و ضخامت لایه برابر ۳۰ میکرومتر بود که برای به حداقل رساندن میزان تخلخل در نمونه‌ها بهینه شد.

باتوجه به این متغیرها میزان انرژی پرتو لیزر در واحد حجم ماده طبق رابطه چگالی انرژی، برابر $(92/6 \text{ J.mm}^{-3})$ به دست آمد:

$$E = \frac{P}{V \times h \times t} \quad (\text{J.m}^{-3}) \quad (1)$$

به منظور پیشگیری از تاب برداشتن نمونه در حین فرایند چاپ، بهتر است تا حد امکان جنس میز کار و آلیاژ تحت فرایند چاپ، یکسان باشد و به این دلیل جنس میز کار از آلیاژ Ti6Al4V انتخاب شد.

۲-۳- درصد تخلخل و چگالی ظاهری قطعات

برای محاسبه درصد تخلخل و چگالی ظاهری قطعات چاپ شده به روش SLM، از روش ارشمیدس استفاده شد. برای این منظور در ابتدا با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم، وزن نمونه‌ها در حالت خشک و نیز پس از غوطه‌وری در آب مقطر اندازه‌گیری شد.

میانگین چگالی ظاهری به دست آمده برای نمونه‌های ساخت افزایشی، $4/37 \text{ g/cm}^3$ محاسبه شد. باتوجه به میانگین چگالی قطعات تولید شده به روش SLM و چگالی نظری آلیاژ Ti-6Al-4V که برابر با $4/43 \text{ g/cm}^3$ تعریف شده است (Khorasani et al., 2019).

جدول ۱. ترکیب شیمیایی پودر کروی آلیاژ Ti6Al4V-ELI

نماد عنصر	Ti	Al	V	Fe	C	N	O	H
درصد وزنی (%wt)	توازن	۵/۵-۶/۵	۳/۵-۴/۵	۰/۲۵≤	۰/۰۴	۰/۰۱۸	۰/۰۹۶	۰/۰۰۹

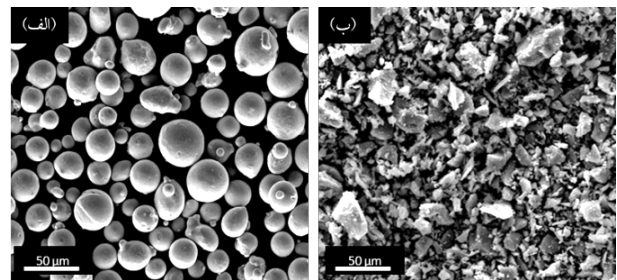
ریزساختار و سختی آلیاژ Ti6Al4V تولید شده به روش ذوب گزینشی با لیزر، بررسی شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

ذوب گزینشی با لیزر از زیرمجموعه‌های فرایند ساخت افزایشی از طریق همجوشی بستر پودر است و ماده اولیه مورد استفاده، پودرهای عنصری است. برای این منظور، پودر کروی آلیاژ فلزی Ti6Al4V-ELI (شرکت Suoyi، گوانگژو، چین) با محدوده اندازه ذرات ۱۵ تا ۴۵ میکرومتر و همچنین پودر عنصری سیلیسیم با اندازه ذرات پودری کمتر از ۴۵ میکرومتر تهیه شد.

از میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل‌های ۱-الف و ب) برای مشاهده ریخت‌شناسی پودرها استفاده شد. همچنین جدول ۱ ترکیب شیمیایی پودر Ti6Al4V-ELI تهیه شده را نشان می‌دهد که با آزمون طیف‌نگار نوری^۱ حاصل شد.



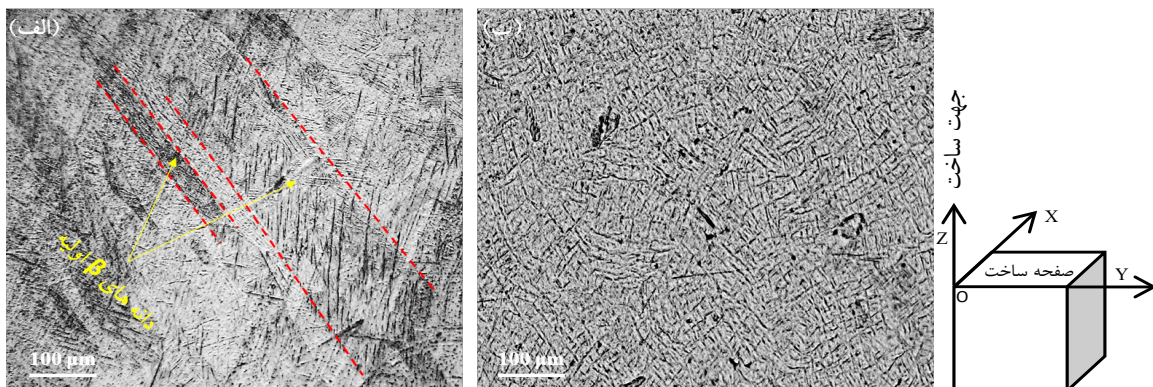
شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات پودری: (الف) Ti6Al4V-ELI و (ب) سیلیسیم.

۲-۲- روش ساخت

برای ساخت نمونه قطعات آلیاژی، از دستگاه SLM شرکت نورا لایه‌نگار تحت عنوان NouraM100P و مجهز به لیزر فیبری ۳۰۰ وات و قطر نقطه‌اثر تقریبی ۸۰ میکرومتر استفاده شد. پس از تخلیه کامل محیط محفظه ساخت توسط پمپ خلأ، به منظور پیشگیری از اکسایش و آلودگی قطعات، از گاز بی‌اثر آرگون

ریزساختار آلیاژ Ti6Al4V را که از طریق فرایند SLM فرآوری شده، نشان می‌دهد. ریزساختار نمونه در جهت ساخت قطعه (شکل ۲-الف)، متشکل از دانه‌های ستونی هم‌بافت کشیده β اولیه است (میانگین طول در حدود چند میلی‌متر) که در خلاف جهت انتقال حرارت و در راستای دانه‌بندی ترجیحی $\langle 100 \rangle$ با زاویه حدود ۲۰ درجه نسبت به جهت ساخت، رشد کرده‌اند و دانه‌های هم‌بافت، در نتیجه رشد از روی دانه‌های مجدد ذوب‌شده لایه‌های جامد قبلی و انجماد جهت‌دار تشکیل می‌شود (Simonelli et al., 2014a). در فرایند SLM، دمای حوضچه مذاب به‌طور کلی بالاتر از ناحیه تشکیل تک‌فاز β است و به سبب نرخ سرمایش فوق‌العاده بالای موجود در فرایند (در حدود 10^6 کلوین بر ثانیه) از دگرگونی فازی β به α جلوگیری می‌شود و در نتیجه دگرگونی مارتزیتی، فاز α' سوزنی ریز، شکل می‌گیرد. فاز α' به سبب دگرگونی مارتزیتی درون دانه‌های β اولیه، شکل می‌گیرد که یکی از مشخصه‌های مهم این فاز در جهت ساخت قطعه، زاویه ۴۵ یا ۹۰ درجه لایه‌های مارتزیتی سوزنی نسبت به جهت ساخت قطعه است که معمولاً حاوی مقادیر بالایی از وانادیوم و چگالی نابجایی هستند (Simonelli et al., 2014b).

با استفاده از روش تقاطع خطی برای تخمین اندازه دانه، میانگین عرض دانه‌های β اولیه در این نمونه، حدود ۶۸ میکرومتر است. صفحه ساخت نمونه نیز مقاطع عرضی دانه‌های ستونی β اولیه را نشان می‌دهد (شکل ۲-ب) که تقاطع لایه‌های مارتزیتی با یکدیگر کاملاً مشخص است. مارتزیت‌های ریز با فاصله کم می‌توانند حرکت نابجایی‌ها را محدود کنند و در نتیجه، باعث کاهش بیشتر انعطاف‌پذیری شوند.



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی نوری ریز ساختار نمونه Ti6Al4V فرآوری شده از طریق ساخت افزایشی: (الف) جهت ساخت نمونه (z) و (ب) صفحه عمود بر جهت ساخت نمونه (xoy).

چگالی نسبی برحسب درصد براساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود که در این مورد چگالی نسبی بیش از ۹۸ درصد است:

$$\rho = (M_a / (M_a - M_w)) \times \rho_w \quad (2)$$

در این رابطه، ρ چگالی نمونه چاپ‌شده، M_a وزن نمونه در حالت خشک، M_w وزن نمونه غوطه‌ور شده در آب و ρ_w چگالی آب است.

۲-۳- مشخصه‌یابی نمونه‌ها

از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی برای مطالعه ریخت‌شناسی پودرهای تهیه‌شده، بررسی ریزساختار و تعیین میزان چگال بودن قطعات چاپ‌شده استفاده شد. پس از فرایند چاپ قطعات، نمونه‌هایی از مقاطع عرضی و طولی با استفاده از روش برش سیمی^۱ تهیه شدند. پس از فرایند برش، قالب‌گیری نمونه‌ها با استفاده از قالب‌گیری سه‌جزیی و سنباده‌زنی انجام شد و در نهایت، بعد از خشک کردن سطح، به‌منظور مشخص نمودن ویژگی‌های ریزساختاری، نمونه‌ها در محلولی حاوی ۹۸ میلی‌لیتر آب مقطر، ۲۰ گرم اگزالیک‌اسید و ۲۰ میلی‌لیتر هیدروفلوریک‌اسید به مدت ۱۵ ثانیه حکاکی شدند.

۳- نتایج و بحث

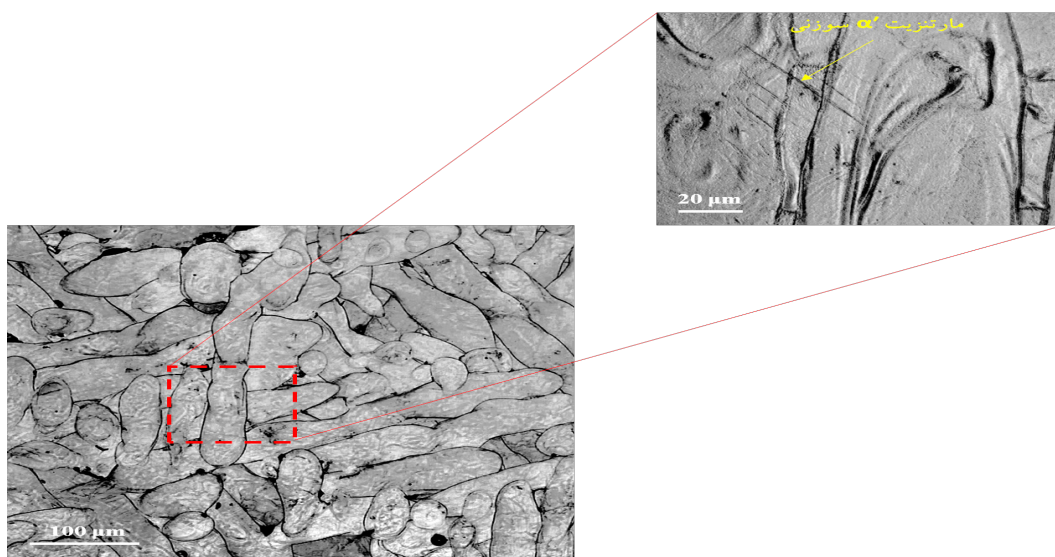
۳-۱- ریزساختار نمونه آلیاژ Ti6Al4V

برای بررسی اثر افزوده شدن یک درصد وزنی سیلیسیم به آلیاژ Ti6Al4V و تأثیر آن بر ریزساختار ماده، از نمونه آلیاژ Ti6Al4V تولیدشده به روش ساخت افزایشی SLM، به‌عنوان نمونه نشان استفاده شد. شکل ۲، تصویر میکروسکوپ نوری

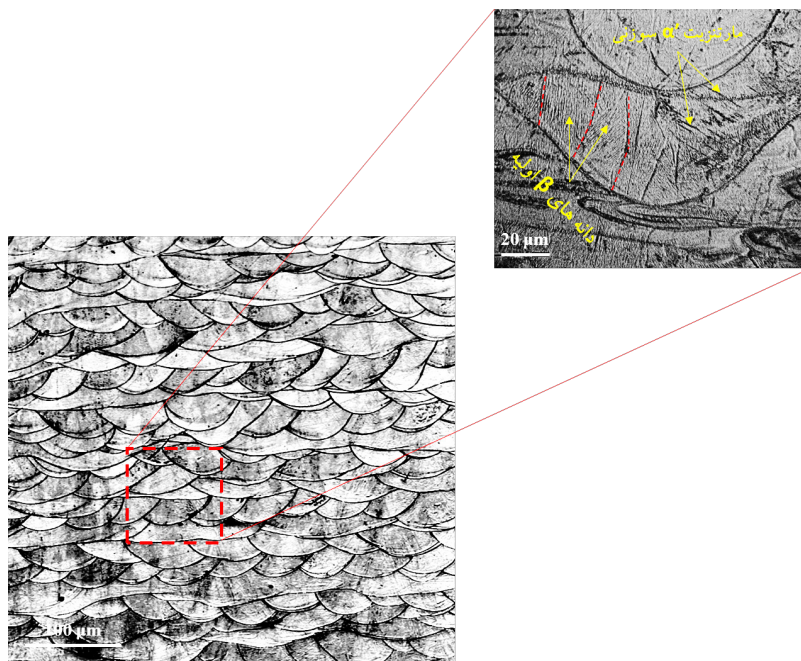
۳-۲- ریزساختار نمونه آلیاژی Ti6Al4V-1Si

همان‌طور که در تصاویر نوری نمونه‌های تولیدشده به روش SLM (شکل‌های ۳ و ۴) مشاهده می‌شود، پیوند متالورژیکی نسبتاً قوی بین مسیرهای لایه‌نشانی تحت متغیر فرایندی مناسب دیده می‌شود. در شکل ۳، ساختار الگوی روبش ۶۷ درجه‌ای در صفحه عمود بر جهت ساخت مشاهده می‌شود که مسیرهای روبش متقاطع بین لایه‌های همسایه را تولید می‌کند. مشابه تصاویر ریزساختاری آلیاژ Ti6Al4V، در صفحات راستای ساخت و عمود بر راستای ساخت، مارتنزیت‌های سوزنی شکل ریز α' مشاهده می‌شوند.

عمدتاً مارتنزیت‌های α' در مرز دانه‌های β اولیه جوانه می‌زنند و در داخل دانه‌های β رشد می‌کنند؛ ولی باین حال برخی از مارتنزیت‌های α' به دانه‌های β مجاور نیز گسترش می‌یابند. بیشتر تخلخل‌ها در نواحی اتصال مسیرهای لیزر و یا مرزهای حوضچه‌های ذوب قرار دارند. به‌طورکلی، تغییرات در چگالی نسبی به تفاوت در متغیرهای فرایند (مانند چگالی انرژی و تعداد عبورهای لیزر) نسبت داده می‌شود. چگالی انرژی لیزر (که با کاهش سرعت روبش حاصل می‌شود) نسبت به متغیر راهبردی روبش، تأثیر قوی‌تری بر فرایند چگالش (تراکم ماده) دارد.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی نوری ریزساختار نمونه Ti6Al4V-1Si فرآوری‌شده از طریق ساخت افزایشی در صفحه عمود بر جهت ساخت



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی نوری ریزساختار نمونه Ti6Al4V-1Si فرآوری‌شده از طریق ساخت افزایشی در صفحه جهت ساخت.

از زیرساخت‌های سلولی را نمی‌توان به‌عنوان دانه‌ای جداگانه در نظر گرفت؛ اما به‌طور کلی، تغییرات جهت‌گیری مجموعه سلول‌های انجمادی درون حوضچه‌های مذاب، منجر به شکل‌گیری مرزهای زاویه بزرگ می‌شود.

درون حوضچه‌های مذاب شکل گرفته، تشکیل لایه‌های مارتنزیتی در راستای زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت ساخت قطعه نیز از مشخصه‌های ریزساختاری این نمونه است که قبلاً به آن اشاره شد.

مرزهای حوضچه مذاب در ریزساختار نمونه و در جهت ساخت، به‌وضوح قابل مشاهده‌اند و ممکن است به‌عنوان محل‌های هسته‌زایی برای دانه‌های جدید عمل کنند. با این حال، بیشتر دانه‌ها به‌صورت هم‌بافت از میان مرزهای حوضچه مذاب رشد می‌کنند و دانه‌های کشیده‌ای را تشکیل می‌دهند.

به‌دلیل سازوکار ذوب کامل در فرایند SLM، این روش مستعد ناپایداری حوضچه مذاب است که همراه با متغیرهای فرایندی نامناسب، منجر به عیوب ریزساختاری می‌شود. تشکیل تخلخل‌های کروی یا ترک‌مانند و به‌وجود آمدن ریزترک‌ها از جمله عیوبی هستند که در فرایند قابل مشاهده است.

با مقایسه ریزساختارها و اندازه دانه‌های اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های آلیاژی Ti6Al4V و Ti6Al4V-1Si مشخص می‌شود که سیلیسیم، به‌طور چشمگیری بر ریخت‌شناسی و اندازه دانه‌های β اولیه در نمونه‌هایی که با فرایند SLM تولید شده‌اند، تأثیر می‌گذارد. به‌عبارت‌دیگر، حضور سیلیسیم می‌تواند ساختار و اندازه دانه‌های β اولیه را تغییر دهد و به کاهش اندازه دانه‌ها و بهبود یکنواختی ساختار منجر شود. افزودن عنصر محلول سیلیسیم به‌طور قابل توجهی اندازه دانه‌ها، از جمله عرض دانه‌های ستونی را کاهش می‌دهد.

با استفاده از روش تقاطع خطی برای تخمین اندازه دانه، عرض متوسط دانه‌های ستونی از تقریباً ۷۰ میکرومتر در آلیاژ Ti6Al4V به تقریباً ۳۸ میکرومتر در آلیاژ Ti6Al4V-1Si کاهش یافته است.

مشاهده این‌که افزودن سیلیسیم موجب کاهش عرض دانه‌های ستونی β اولیه می‌شود، بدون آن‌که به تشکیل دانه‌های هم‌محور بیانجامد، با توجه به نحوه تأثیر سیلیسیم بر ریزدانه شدن اندازه دانه‌های β ، کاملاً قابل انتظار است.

ساختار انجماد سلولی در نتیجه سرمایه‌گذاری سریع ناشی از فرایند تولید، از ویژگی‌های ریزساختار انجمادی قطعات تولید شده به روش SLM در جهات ساخت مختلف است. اختلاف جهت‌گیری ساختارهای سلولی انجمادی به دلیل اختلاف جهت انتقال حرارت، منجر به شکل‌گیری مرزهای زاویه بزرگ می‌شود.

ریزساختار نمونه‌های چاپ شده در صفحه جهت ساخت شامل اجتماعی از حوضچه‌های مذاب منجمد شده به شکل فلس ماهی است (شکل ۴) که زیر یکدیگر قرار گرفته‌اند و در واقع ترتیب قرارگیری حوضچه‌های مذاب، شکل و اندازه هر کدام از آن‌ها، به الگوی روبش لیزر و متغیرهای فرایند وابسته است.

درون حوضچه‌های مذاب، برخی تخلخل‌های کروی قابل مشاهده است که عمدتاً به‌عنوان تخلخل‌های گازی شناخته می‌شوند. تخلخل‌های گازی معمولاً بر اثر به دام افتادن گاز، اشباع بیش‌ازحد گازهای محلول در مذاب یا وقوع برخی واکنش‌های شیمیایی که منجر به تولید گاز می‌شوند، شکل می‌گیرند. اگر فشار داخلی گازهای ایجاد شده از مقاومت ناشی از فشار هیدرواستاتیکی فراتر رود، احتمال تشکیل این حباب‌های گازی بیشتر می‌شود.

در شرایطی که فرایند انجماد با سرعت پایین‌تری انجام شود، فرصت بیشتری برای رشد این حباب‌های گازی فراهم می‌شود و ممکن است با حفره‌های مجاور نیز ادغام شوند. (Tucho et al., 2018). به‌طور کلی، حباب‌های گازی و عیوب ناشی از فرایند SLM در نمونه‌های چاپ شده، به دلیل بهینه بودن متغیرهای فرایند ساخت، کمتر وجود دارند.

با بزرگنمایی بیشتر در صفحه جهت ساخت، دانه‌های ستونی β اولیه در جهت ساخت (جهت منفی جریان گرمایی حوضچه مذاب) به‌وضوح قابل مشاهده‌اند؛ پدیده‌ای که از ویژگی‌های طبیعی فرایند SLM به شمار می‌رود. با توجه به این شکل درون حوضچه‌های مذاب موجود در ریزساختار نمونه، زیرساخت‌های سلولی^۱ وجود دارند که بیانگر ساختار انجمادی مذاب در حین فرایند چاپ هستند.

مرزهای زیرساخت‌های سلولی، مرزهایی کوچک‌زاویه و کمتر از ۱۵ درجه نسبت به یکدیگر هستند و از این رو، هر کدام

جدول ۲. میانگین ریزسختی برای نمونه‌های SLM در دو جهت مختلف

ریزسختی ویکرز (HV-200)		نمونه
صفحه در راستای ساخت (انحراف استاندارد)	صفحه عمود بر جهت ساخت (انحراف استاندارد)	
۱۲ ± ۴۱۷	۱۸ ± ۴۱۴	Ti6Al4V
۱۷ ± ۴۸۱	۲۲ ± ۴۶۱	Ti6Al4V-1Si

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر متالورژیکی افزودن سیلیسیم بر آلیاژ Ti6Al4V و فرآوری آن از طریق فرایند ذوب گزینشی با لیزر مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱- میانگین عرض دانه‌های ستونی β اولیه در آلیاژ Ti6Al4V-1Si در مقایسه با ریزساختار نمونه نشان، از حدود ۷۰ میکرومتر به حدود ۴۰ میکرومتر کاهش یافت که علت آن به نقش عنصر سیلیسیم در جهت جلوگیری از رشد عرضی دانه‌های ستونی مرتبط است.

۲- میانگین ریزسختی نمونه‌های تولیدشده در هر دو صفحه ساخت و جهت ساخت، بیش از پانزده درصد افزایش یافت و به ترتیب به مقادیر حدود ۴۸۱ و ۴۶۱ ویکرز رسید که به دلیل افزودن مقدار یک درصد وزنی سیلیسیم به آلیاژ Ti6Al4V و دستیابی به ریزدانه‌گی بود و این موضوع با توجه به رابطه‌ی هال-پیچ و اثر کاهش اندازه دانه بر روی سختی و استحکام ماده، قابل بیان است.

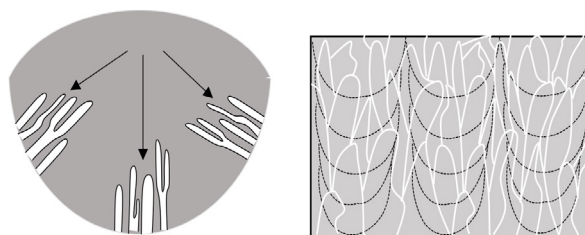
سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت آزمایشگاه مواد و لایه‌های نانو ساختار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه تهران انجام شده است.

مراجع

- Kaki Sahneh, K., Ostad Shabani, M. & Razavi, M. (2024). Simulation of Residual Stress in Additive Manufacturing Process Using Finite Element Analysis. <https://www.sid.ir/paper/1514367/en>
- Khorasani, A., Gibson, I., Awan, U. S., & Ghaderi, A. (2019). The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 25, 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.002>

به نظر می‌رسد که افزودن یک درصد وزنی سیلیسیم به آلیاژ Ti6Al4V و به دنبال آن ریزدانه‌گی دانه‌های ستونی در جهت ساخت قطعه و کاهش میانگین عرض آن‌ها، موجب بهبود خواص مکانیکی قطعات می‌شود. این پدیده با رابطه‌ی هال-پیچ قابل تبیین است که در آن، کاهش اندازه دانه به طور معکوس با افزایش استحکام ماده ارتباط دارد. همچنین لازم به ذکر است که سازوکار ریزدانه‌سازی تنها راه استحکام‌بخشی است که علاوه بر بهبود استحکام ماده، منجر به بهبود رفتار انعطاف‌پذیری و تغییر شکل ماده می‌شود. شکل ۵ نشان‌دهنده طرحواره نحوه رشد سلول‌ها و دانه‌های ستونی در لایه‌نشانی به توسط SLM است. به هنگام چاپ نمونه، دانه‌های ستونی در امتداد جهت $\langle 100 \rangle$ درون این قطعات در حال شکل‌گیری است. با توجه به این که عمدتاً رشد ترک تحت زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت بارگذاری رخ می‌دهد (Zhao et al., 2022)، بنابراین با کاهش عرض دانه‌های ستونی و دستیابی به ریزدانه‌گی بیشتر، موانع رشد ترک افزایش یافته و منجر به بهبود انعطاف‌پذیری این نمونه‌ها نیز خواهد شد.



شکل ۵. طرح‌واره نحوه رشد سلول‌ها و دانه‌های ستونی در قطعات تولیدشده به روش SLM.

۳-۳- اثر افزودن سیلیسیم بر سختی آلیاژ Ti6Al4V

به منظور بررسی اثر افزودن سیلیسیم بر سختی نمونه فرآوری شده به روش ذوب گزینشی با لیزر آلیاژ Ti6Al4V-1Si، آزمون ریزسختی به روش سختی‌سنجی ویکرز انجام شد و میانگین ریزسختی در صفحه ساخت و در جهت ساخت برای نمونه اندازه‌گیری شد. رابطه‌ی هال-پیچ نشان می‌دهد با کاهش میانگین اندازه دانه، انتظار می‌رود که ریزسختی ماده نیز افزایش یابد. مقایسه میانگین ریزسختی برای نمونه نشان آلیاژ Ti6Al4V و نمونه Ti6Al4V-1Si در دو جهت ساخت و صفحه ساخت، در جدول ۲ نشان داده شده است و میانگین ریزسختی در دو جهت مختلف، پس از افزودن یک درصد سیلیسیم، افزایش یافته است.

3. Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. a., & Maier, H. (2013). On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International journal of fatigue*, 48, 300-307. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011>
4. Meng, X., Min, J., Sun, Z., Zhang, W., Chang, H., & Han, Y. (2021). Columnar to equiaxed grain transition of laser deposited Ti6Al4V using nano-sized B4C particles. *Composites Part B: Engineering*, 212, 108667. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108667>
5. Mereddy, S., Bermingham, M. J., StJohn, D. H., & Dargusch, M. S. (2017). Grain refinement of wire arc additively manufactured titanium by the addition of silicon. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 2097-2103. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.049>
6. Mukherjee, T., Elmer, J. W., Wei, H. L., Lienert, T. J., Zhang, W., Kou, S., & DebRoy, T. (2023). Control of grain structure, phases, and defects in additive manufacturing of high-performance metallic components. *Progress in Materials Science*, 138, 101153. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101153>
7. Pede, D., Li, M., Virovac, L., Poleske, T., Balle, F., Müller, C., & Mozaffari-Jovein, H. (2022). Microstructure and corrosion resistance of novel β -type titanium alloys manufactured by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 4598-4612. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.021>
8. Riazi, A., Razavi, S. H., Khavandi, A., Amirjan, M., Ostad Shabani, M., & Davarzani, H. (2025). Investigation of the Effect of Scan Speed and Laser Power on the Microstructure and Hardness Distribution of IN625 Deposited on a Gas Turbine Blade Using the LPBF Process. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 14(1), 43-61. [In Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2025.515817.1325>
9. Sagar, P. K., Nandy, T. K., Gogia, A. K., Muraleedharan, K., & Banerjee, D. (1995). Effect of silicon on the elevated temperature properties of a Ti3Al base alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 192, 799-804. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)03317-X](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)03317-X)
10. Simonelli, M., Tse, Y. Y., & Tuck, C. (2014a). Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 616, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.07.086>
11. Simonelli, M., Tse, Y. Y., & Tuck, C. (2014b). On the Texture Formation of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45(6), 2863-2872. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2218-0>
12. Sutton, A. T., Kriewall, C. S., Leu, M. C., & Newkirk, J. W. (2017). Powder characterisation techniques and effects of powder characteristics on part properties in powder-bed fusion processes. *Virtual and physical prototyping*, 12(1), 3-29. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1250605>
13. Tucho, W. M., Lysne, V. H., Austbø, H., Sjolyst-Kverneland, A., & Hansen, V. (2018). Investigation of effects of process parameters on microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L. *Journal of Alloys and Compounds*, 740, 910-925. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.098>
14. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2014). Microstructure and mechanical properties of a novel β titanium metallic composite by selective laser melting. *Acta Materialia*, 68, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.018>
15. Yoon, J. W., Kim, E., Jeong, H. W., Hyun, Y. T., Kim, S. E., & Lee, Y. T. (2004). Effect of Si Content on the Creep Properties of Ti-6Al-4Fe-xSi Alloys. *Key Engineering Materials*, 261, 1141-1146. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.261-263.1141>
16. Zhang, H., Gu, D., Yang, J., Dai, D., Zhao, T., Hong, C., ... & Poprawe, R. (2018). Selective laser melting of rare earth element Sc modified aluminum alloy: Thermodynamics of precipitation behavior and its influence on mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 23, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.07.002>
17. Zhao, J., Liu, H., Zhou, Y., Chen, Y., & Gong, J. (2022). Effect of relative density on the compressive properties of Ti6Al4V diamond lattice structures with shells. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(22), 3301-3315. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1893418>
18. Zhu, H., Wang, Z., Muránsky, O., Davis, J., Yu, S., Kent, D., ... & Dargusch, M. S. (2021). The characterisation and formation of novel microstructural features in a Ti-Nb-Zr-Mo-Sn alloy manufactured by Laser Engineered Net Shaping (LENS). *Additive Manufacturing*, 37, 101705. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101705>