

The Effects of Energy Density on the Density and Microstructure of 316L Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting

Mohammadamin Bakhtiarian¹, Alborz Fathi Younesi², Hamid Omidvar^{3,4}

¹ MSc, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

² Master of Material Science and Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

³ Associate Professor, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

⁴ Center for International Scientific Studies and Collaborations (CISSC) of Iran, Tehran, Iran.

*Corresponding Author's Email: Omidvar@aut.ac.ir (Hamid Omidvar)

Paper History:

Received: 2024-04-14

Revised: 2024-05-08

Accepted: 2024-09-16

Keywords:

Stainless Steel 316L,
Selective Laser Melting,
Energy Density,
Relative Density,
Microstructure

Abstract The selective laser melting process is one of the additive manufacturing processes of metals in which a laser beam melts selected areas on a powder bed and creates the parts in layers. One of the important challenges of this method is to make a part without any defects and reaching 100% density. The material selected for this study is stainless steel 316L powder and the NOURA M100P machine was used to make the samples. In this research, six samples with different energy densities were made from 160 J/mm³ to 260 J/mm³. After making the samples, their density was measured by the Archimedes method. A sample made with an energy density of 220 J/mm³ has the highest relative density of 97.93. By examining the microstructure of the printed samples, it was determined that the samples have grain boundary cracks and incomplete fusion cavities and keyhole phenomenon.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2024.451706.1299>

URL: https://www.jamt.ir/article_205941.html

1. INTRODUCTION

This study investigates the influence of energy density on the density and microstructural features of 316 L stainless steel fabricated using SLM, a pioneering technique in the field of additive manufacturing of metals. SLM allows the layer-by-layer production of metal parts, relying on the selective melting of metal powders by a high-power laser (Bakhtiarian et al., 2024). Full density and reduction of defects, including porosity, cracks, and keyhole formation, remain some of the important challenges in this process (Pilehrood et al., 2021). This study aims to investigate the influence of different energy densities on the component quality fabricated by SLM, with an emphasis on the optimization of parameters that will enable defect-free production.

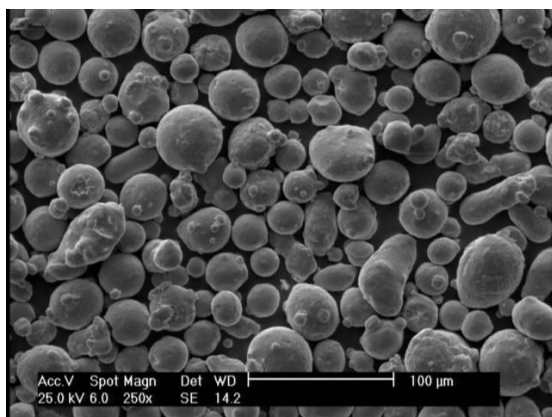


Figure 1: SEM image of the stainless steel 316L powder used in this study.

2. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, 316 L of stainless-steel powder was employed, and six samples were fabricated using a NOURA M100P machine with energy densities ranging between 160 and 260 J/mm³. At figure 1, the morphology of the stainless-steel powder indicates spherical shapes, which provide good flowability and uniformity within the powder layer during the SLM process.

As illustrated at figure 2, the evolution of sample density with energy input. Insufficient energy densities resulted in incomplete fusion, whereas higher energy densities (> 240 J/mm³) resulted in the formation of keyhole defects.

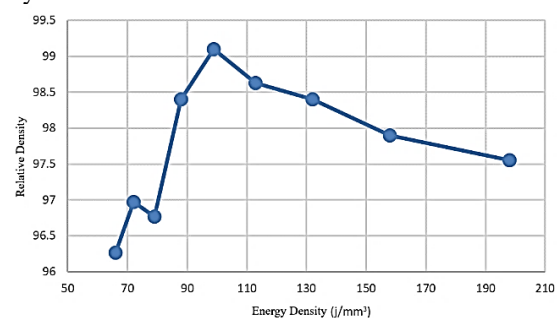


Figure 2: The relationship between energy density and relative density of the printed samples

Further evidence regarding the effects of energy density on defect formation was obtained from the microstructural examination. Figure 3(a) shows that the specimens produced at lower energy densities demonstrated incomplete fusion and large spherical



pores, while the specimens built with higher energy densities demonstrated keyhole defects owing to excessive energy input.

The localized thermal stress led to melt pool instability (Qu et al., 2022), which in turn created keyhole defects, as shown in Figure 3(b). These types of defects can significantly reduce the mechanical properties of a material and lead to premature failure during structural use (Liverani et al., 2017).

Significantly, the specimen manufactured at an energy density of 220 J/mm³ displayed the fewest

defects, as shown in Figure 3(c) the microstructure of this specimen was almost devoid of porosity, suggesting that this energy density approached the ideal level for the fabrication of high-density defect-free components.

No keyholes were present in this sample, and the fusion was incomplete. This indicates that 220 J/mm³ is sufficient energy to melt the powder without overheating or making the melt pool unstable (Wang et al., 2023). These results emphasize the importance of optimizing energy density in the SLM process.

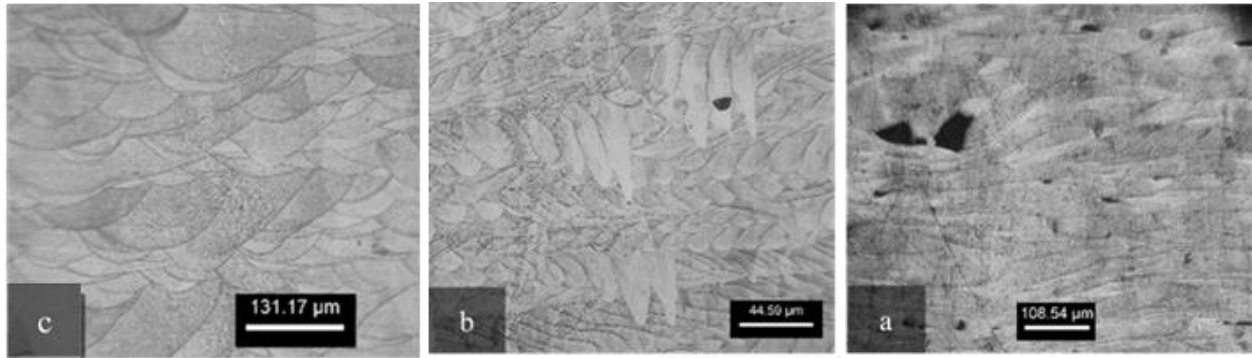


Figure 3. (a) Optical micrographs of microstructure, (b) showing the defects (keyhole and incomplete fusion) at different energy densities, (c) Microstructure of the sample fabricated at 220 J/mm³, showing minimal defects and nearly no porosity.

Table 1. The hardness test's results.

Sample	Energy Density) j/mm ³ (Scanning Speed (mm/s)	Vickers hardness (HV)
D-1	198	800	200
D-2	158	1000	201
D-3	132	1200	213
D-4	113	1400	210
D-5	99	1600	219
D-6	88	1800	209
D-7	79	2000	195
D-8	72	2200	193
D-9	66	2400	185

In addition to density and microstructural analysis, the hardness of the samples was also measured using the Vickers hardness test. The results, summarized in Table 1, show that hardness increased with energy density up to a point, reaching a maximum hardness of 219 HV at 220 J/mm³, which corresponds to the sample with the highest density. As energy densities continued to rise beyond this point, the formation of keyhole defects and excessive grain growth led to a decrease in hardness values (Tucho et al., 2018).

The hardness results match the microstructural results, which can be seen in Figure 3. The highest hardness was found at 220 J/mm³, which means there were the fewest holes and the best grain structure. Conversely, at higher energy densities, excessive heat caused grain coarsening and defect formation, reducing the material's hardness.

A low energy density leads to poor melting and low bonding between the layers. When the energy density was too high, keyhole defects, grain boundary cracks, and increased porosity occurred (Brennan et al., 2021). In this case, the identification of an ideal energy density of 220 J/mm³ allows a high density of the part with minimal microstructural defects, as shown in Figure 3.c,

where a sample shows minimal development of a keyhole or voids in the structure.

This work contributes to the literature of additive manufacturing by explaining the relationship between the energy density and quality of manufactured parts. By optimizing the process parameters, particularly the energy density, manufacturers can improve the mechanical properties and structural strength of 316 L stainless steel components. Further optimization of the scanning speed, laser power, and post-processing techniques could be performed in future research work to enhance the mechanical performance and reduce defects in SLM-manufactured parts. This work may be used in space, automotive, and biomedical engineering industries owing to the demand for high-performance, defect-free components.

REFERENCES

- Bakhtiarian, M., Omidvar, H., Mashhuriazar, A., Sajuri, Z., & Gur, C. H. (2024). The effects of SLM process parameters on the relative density and hardness of austenitic stainless steel 316L. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 1616–1629. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.237>
- Brennan, M. C., Keist, J. S., & Palmer, T. A. (2021). *Defects in metal additive manufacturing processes*. Springer. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v24.a0006557>
- Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., & Fortunato, A. (2017).

- Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042>
4. Pilehrood, A. E., Mashhuriazar, A., Baghdadi, A. H., Sajuri, Z., & Omidvar, H. (2021). Effect of Laser Metal Deposition Parameters on the Characteristics of Stellite 6 Deposited Layers on Precipitation-Hardened Stainless Steel. *Materials*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/ma14195662>
 5. Qu, M., Guo, Q., Escano, L. I., Nabaa, A., Hojjatzadeh, S. M. H., Young, Z. A., & Chen, L. (2022). Controlling process instability for defect lean metal additive manufacturing. *Nature Communications*, 13(1), 1079. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29295-4>
 6. 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>
 7. Wang, J., Zhu, R., Liu, Y., & Zhang, L. (2023). Understanding melt pool characteristics in laser powder bed fusion: An overview of single-and multi-track melt pools for process optimization. *Advanced Powder Materials*, 2(4), 100137. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2023.100137>



مقاله کامل پژوهشی

بررسی اثر چگالی انرژی بر میزان چگالی و ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ تولیدشده به روش ساخت افزایشی ذوبی - لیزری

محمدامین بختیاریان^۱، البرز فتحی یونسی^۲، حمید امیدوار^{۳*}

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی جوشکاری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی جوشکاری، دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

مركز مطالعات و همکارهای علمی بین‌المللی وزارت علوم و تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۳/۰۱/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹

پذیرش قطعی: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

کلیدواژه‌ها:

فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن، فرایند ذوبی انتخابی لیزری، چگالی انرژی، چگالی نسبی، ریزساختار

چکیده طی دهه گذشته، ساخت افزایشی فلزات از نظر توسعه و صلاحیت نوعی تکنیک تولید بالغ شده است که دارای پتانسیل بالایی است. فرایند ذوب انتخابی توسط لیزر یکی از فرایندهای ساخت افزایشی فلزات است که در آن پرتو لیزر مناطق انتخاب‌شده را روی یک بستر پودر ذوب می‌کند و قطعات را به صورت لایه‌لایه ایجاد می‌کند. یکی از چالش‌های مهم این روش ساخت قطعه بدون حفره و چگالی ۱۰۰ درصد است. ماده انتخاب‌شده برای این مطالعه پودر آلیاژ فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن است و از دستگاه NOURA M100P برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. در این پژوهش، شش نمونه با چگالی انرژی‌های مختلف از میزان ۱۶۰ تا ۲۶۰ ژول بر میلی‌متر مکعب ساخته شد. سپس، چگالی آن‌ها به روش ارشمیدس اندازه‌گیری شد. نمونه ساخته‌شده با چگالی انرژی ۲۲۰ ژول بر میلی‌متر مکعب بالاترین چگالی نسبی با مقداری برابر با ۹۷/۹۳ را دارد. با بررسی ریزساختار نمونه‌های پرینت‌شده مشخص شد که نمونه‌ها حاوی ترک‌های مرزدانه‌ای و حفره‌های ذوب ناقص و پدیده سوراخ کلید هستند که اثر چگالی انرژی بر این موضوع نیز بررسی شده است.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2024.451706.1299>

URL: https://www.jamt.ir/article_205941.html

۱- مقدمه

به‌راحتی فراهم می‌آید (García-Domínguez et al., 2020;

[Bakhtiarian et al., 2024](#)).

روش ذوب انتخابی توسط لیزر یکی از پیشرفته‌ترین و مؤثرترین فرایندهای ساخت افزایشی فلزات است که در دهه‌های اخیر به‌ویژه با پیشرفت‌های تکنولوژیک به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در صنعت فلزات شناخته شده است. در این فرایند، از پرتو لیزر به‌عنوان منبع انرژی استفاده می‌شود که، به‌وسیله آن، پودر فلزی را در نقاط دقیق مورد نظر ذوب می‌کند و به تدریج قطعات فلزی را به صورت لایه‌هایی می‌سازد و شکل می‌دهد. فرایند ذوب انتخابی توسط لیزر، به‌عنوان یکی از روش‌های ساخت افزایشی فلزات، امکان ساخت قطعات با

در دهه‌های اخیر، فناوری‌های ساخت افزایشی فلزات به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نوآوری‌ها در زمینه صنایع فلزی مطرح شده‌اند. این روش‌ها با استفاده از فرایندهای پیشرفته‌ای مانند فرایند ذوب انتخابی توسط لیزر قادر هستند قطعات فلزی را بدون نیاز به قالب‌های سنتی به صورت لایه‌لایه و به شکل سه‌بعدی ایجاد کنند. ساخت افزایشی فلزات امکانات فراوانی برای صنایع گوناگون از جمله صنایع هوافضا، خودروسازی، پزشکی و ابزارهای دقیق فراهم می‌کند. با توجه به اینکه این فرایند به دستگاه‌های کامپیوتری کنترل‌شده متصل شده است، امکان ساخت قطعات با هندسه‌های پیچیده و ساختارهای دقیق

عهده‌دار مکاتبات: حمید امیدوار

نشانی: ایران، تهران، منطقه ۶، خیابان حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، دانشکده مهندسی و علم مواد

پيام‌نگار: Omidvar@aut.ac.ir

فناوری‌های تولیدی پیشرفته قدیمی دارد، دارای برخی معایب و مشکلات است. از جمله عیوب یا چالش‌های موجود در فرایند ذوب انتخابی توسط لیزر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

چگالی ناهمگن: در برخی موارد، ممکن است چگالی قطعات ساخته‌شده با این روش ناهمگن باشد. این مشکل می‌تواند به دلیل عدم توزیع یکنواخت انرژی لیزر یا تنظیم نامناسب پارامترهای فرایند باشد.

ترک‌ها: در قطعات ساخته‌شده ممکن است ترک‌ها یا نقاط ضعف وجود داشته باشد که می‌تواند به عدم استحکام و کیفیت ناپایدار قطعه منجر شود. این مشکلات معمولاً به دلیل تغییرات دمایی ناگهانی یا ناهمگنی در ضخامت لایه‌های پودری پیش می‌آید.

پدیده سوراخ کلید: به ایجاد سوراخ‌های کوچک و ناهمواری‌های سطحی در قطعات ساخته‌شده با این روش «پدیده سوراخ کلید» گفته می‌شود. این مشکل معمولاً به دلیل عدم کنترل دقیق پارامترهای فرایند یا ناهمگنی در ضخامت لایه‌های پودری رخ می‌دهد (Yadroitsev et al., 2021).

با وجود این، با پیشرفت فناوری و تحقیقات بیشتر، بسیاری از این عیوب و چالش‌ها می‌تواند کاهش یابد و روش ذوب انتخابی توسط لیزر به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر و پیشرفته ساخت افزایشی فلزات شناخته شود.

به‌منظور تعیین کمیت پارامترهای مختلف ماشین در یک پارامتر واحد، اصطلاحی که به‌عنوان چگالی انرژی شناخته می‌شود فرموله می‌شود. روش‌های فرمول‌بندی بسیاری وجود دارد که هنگام ساخت در بستر SLM ارائه شده است. این اصطلاحات از یک تا سه بعد متغیر است.

همان‌طور که در معادله ۱ نشان داده شده است، با ترکیب توان لیزر، سرعت اسکن لیزر، ضخامت لایه پودر و فاصله بین خطوط اسکن، انرژی در واحد حجم z/mm^3 به دست می‌آید (Yadroitsev et al., 2021). این فرمول در بیشتر پژوهش‌های علمی استفاده می‌شود و نام‌های چگالی انرژی حجمی^۱، چگالی لیزر^۲ و انرژی در واحد حجم مسیر لیزر^۳ برای آن به کار می‌رود:

$$\text{VED} = P / (V \cdot S \cdot h) \quad (1)$$

هندسه‌های پیچیده و دقیق به‌ویژه در سطوح سه‌بعدی را فراهم می‌کند که با روش‌های سنتی مانند ریخته‌گری و ماشین‌کاری دستی به‌سختی انجام می‌شود (Yang et al., 2021).

در روش ذوب انتخابی توسط لیزر، پودر در سطحی نازک به‌ترتیب ۳۰ تا ۱۰۰ میکرومتر در یک منطقه پخش می‌شود. سپس، پودر توسط تیغه‌ای متحرک پخش می‌شود. منبع انرژی به‌طور انتخابی انرژی را روی سطح متمرکز می‌کند. در نتیجه، هم ذرات مجاور لایه و هم در لایه قبلی، ذوب موضعی و هم‌جوشی پودر انجام می‌شود (Gatões et al., 2022).

در فرایند ذوب انتخابی توسط لیزر، تعدادی پارامتر مؤثر در کنترل فرایند و کیفیت نهایی قطعات وجود دارد. این پارامترها شامل موارد زیر هستند:

توان لیزر: توان لیزر به میزان انرژی‌ای اشاره دارد که تأیید می‌شود. این پارامتر مقدار حرارت مورد نیاز برای ذوب کردن پودر فلزی را تعیین می‌کند. تنظیم نامناسب توان لیزر می‌تواند به ذوب ناهمگن پودر، ترک‌های سطحی و کیفیت ناپایدار قطعه منجر شود.

سرعت اسکن: سرعت لیزر به میزان حرکت پرتو لیزر بر روی سطح پودر اشاره دارد. این پارامتر زمانی را تعیین می‌کند که لیزر در هر نقطه از سطح پودر تأیید می‌شود. سرعت لیزر باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که زمان کافی برای ذوب کردن پودر وجود داشته باشد، اما آن‌قدر سریع باشد که بتواند زمان تولید قطعه را کاهش دهد.

ضخامت لایه پودر: ضخامت لایه پودر به میزان عمق پودر، که توسط تیغه دستگاه بر روی صفحه ساخت قرار داده می‌شود، اشاره دارد.

فاصله بین خطوط لیزر: این پارامتر باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که لیزر بتواند از تمامی نقاط سطح پودر عبور کند. تنظیم نامناسب فاصله بین خطوط لیزر ممکن است به عدم تابش لیزر به‌صورت مناسب و در نتیجه کاهش کیفیت قطعه منجر شود (Gatões et al., 2022; Miranda et al., 2022; Liu et al., 2020; Bang et al., 2021; Dutt et al., 2023; Gajera et al., 2022; Larimian et al., 2021; Huang et al., 2019; Pilehrood et al., 2021).

این فناوری جدید، با وجود مزایای زیادی که در مقایسه با

در مطالعات متعدد نشان داده شده است که بین انرژی ورودی و چگالی قطعه رابطه مستقیم وجود دارد، به طوری که با افزایش انرژی ورودی چگالی نیز افزایش می‌یابد. نکته قابل تأمل در این خصوص این است که افزایش انرژی ورودی دیگر چگالی نمونه را افزایش نمی‌دهد یا در سایر موارد در واقع چگالی حاصل را کاهش می‌دهد. همچنین، نشان داده شده است که با افزایش انرژی ورودی، اندازه متوسط دانه نیز افزایش می‌یابد که باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شود. اندازه دانه نه تنها تغییر می‌کند، بلکه شکل دانه نیز تابعی از پارامترهای دستگاه است. در ورودی‌های انرژی بالاتر، دانه‌ها ستونی‌تر و، در انرژی ورودی پایین‌تر، دانه‌ها شکل هم‌محور پیدا می‌کنند. مطالعه‌ای دیگر نشان داده است، وقتی همان منطقه چندین بار در معرض ذوب قرار گیرد و باعث گرم شدن یک منطقه شود، دانه‌های ستونی شکل می‌گیرند (Tucho et al., 2018).

در پژوهشی که گنگ^۱ و همکاران (H. Gong et al., 2014) روی آلیاژ Ti-6Al-4V انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت اسکن در توان ثابت، با توجه به سازوکار ایجاد تخلخل، ابتدا چگالی نمونه به دلیل انرژی بیش‌ازحد کاهش پیدا می‌کند و سپس چگالی نمونه به بالاترین میزان خود می‌رسد و در نهایت دوباره به دلیل کمبود انرژی و ذوب ناقص کاهش پیدا می‌کند. ابتدا تخلخل‌های به وجود آمده در سرعت پایین از نوع سوراخ کلید هستند و سرعت اسکن بالا عیوب ذوب ناقص مشاهده می‌شود.

در این پژوهش، تأثیر سرعت اسکن بر روی چگالی نمونه‌ها و تشکیل انواع مختلف عیوب در ریزساختار نمونه‌ها بررسی شد و چگالی انرژی بهینه برای پودر ۳۱۶ کم کربن به دست آمد.

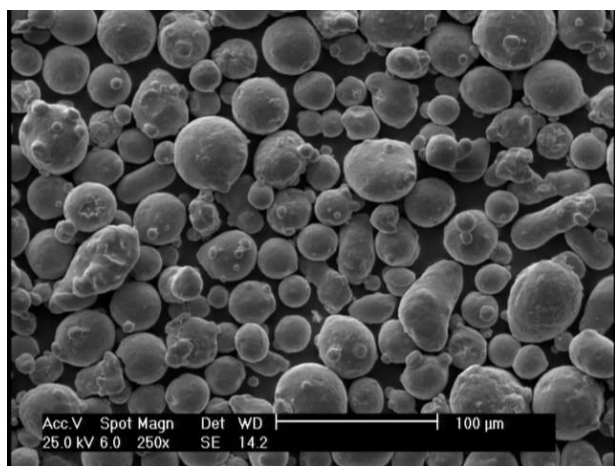
۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

ماده مورد استفاده برای این مطالعه پودر فولاد زنگ‌نزن 316L اتمیزه شده توسط گاز N₂ است که از شرکت VISTEC TECHNOLOGY SERVICES خریداری شده است. توزیع اندازه ذرات آن از ۱۵ تا ۴۰ میکرون است. چگالی ظاهری (D₁₀=15μm, D₅₀=25μm, D₉₀=40μm)، چگالی ۲۳/۴ g/(cm)³، چگالی نشست ۴/۶۷ g/(cm)³ و آهنگ جریان

جدول ۱. ترکیب شیمیایی پودر ۳۱۶ کم کربن ارائه شده توسط تولیدکننده

عنصر	حداقل (%)	حداکثر (%)	نتیجه آزمایش (%)
C	-	۰.۰۳	۰.۰۱۴
Cr	۱۶.۰۰	۱۸.۰۰	۱۷.۳۱
Fe	-	-	-
Mn	-	۲.۰۰	۱.۴۹
Ni	۱۰.۰۰	۱۴.۰۰	۱۱.۳۱
O	-	۰.۰۴	۰.۰۴
p	-	۰.۰۴	۰.۰۱۱
S	-	۰.۰۳	۰.۰۰۸
Si	-	۱.۰۰	۰.۸۱
N	-	۰.۱۰	۰.۰۷
Mo	۲.۰۰	۳.۰۰	۲.۵۷



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از پودر فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۱۶ کم کربن

۲-۲- روش ساخت

¹ H. Gong

استاندارد ASTM B962 (Than & Percent, 2012) استفاده شد. از ترازوی الکترونیکی با دقت ۰/۰۰۱ گرم برای وزن کردن نمونه‌ها استفاده شد. وزن هر نمونه ابتدا در هوا و سپس وزن هنگام غوطه‌ور شدن در آب مقطر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری هر نمونه پنج بار تکرار شد و نمونه‌ها قبل از هر بار اندازه‌گیری متوالی کاملاً خشک شدند. پس‌از آن، چگالی نسبی نمونه‌ها از معادله زیر محاسبه شد:

$$\rho = (m_a / (m_a - m_w)) \times \rho_w \quad (2)$$

در معادله ۲، اصطلاح ρ چگالی نمونه است، m_a جرم نمونه در هوا است، m_w جرم نمونه غوطه‌ور در آب و ρ_w چگالی آب است. نمونه‌ها به منظور بررسی ریزساختاری در جهت عمود بر جهت ساخت متالوگرافی شدند. برای مشاهده عیوب و ریخت‌شناسی فازها از میکروسکوپ نوری استفاده شد. به منظور بررسی اثر چگالی انرژی بر روی خواص مکانیکی نمونه‌ها، سختی همه آن‌ها به روش ویکرز اندازه‌گیری و بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر چگالی انرژی بر چگالی

نتایج چگالی‌سنجی به روش ارشمیدس برای نمونه‌های مکعبی در جدول ۳ نشان داده شده است. درصد چگالی‌های اندازه‌گیری‌شده در بازه ۹۶/۲۷ درصد تا ۹۹/۱۰ درصد قرار دارند.

جدول ۳. نتایج چگالی نمونه‌های پرینت‌شده

شماره نمونه	سرعت (mm/s)	چگالی انرژی (j/mm^3)	درصد چگالی (%)	درصد تخلخل (%)
D-1	۸۰۰	۱۹۸	۹۷/۵۵	۲/۴۵
D-2	۱۰۰۰	۱۵۸	۹۷/۹۰	۲/۱
D-3	۱۲۰۰	۱۳۲	۹۸/۴۰	۱/۶
D-4	۱۴۰۰	۱۱۳	۹۸/۶۳	۱/۳۷
D-5	۱۶۰۰	۹۹	۹۹/۱۰	۰/۹
D-6	۱۸۰۰	۸۸	۹۸/۴۰	۱/۶
D-7	۲۰۰۰	۷۹	۹۶/۷۷	۳/۲۳
D-8	۲۲۰۰	۷۲	۹۶/۹۷	۳/۰۳
D-9	۲۴۰۰	۶۶	۹۶/۲۷	۳/۷۳

همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، با افزایش سرعت اسکن، مقدار چگالی نمونه ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا کرده

دستگاه SLM مورد استفاده در این مطالعه (NOURA M100P) مجهز به لیزر فیبر موج پیوسته است. مشخصات فنی پرینتر در جدول ۱ نشان داده شده است. قبل از شروع ساخت، از فرایند پیش‌گرم استفاده شده است، بستر و پودر گرم می‌شوند و در دمای ۸۰ درجه سلسیوس نگهداری می‌شوند تا شیب حرارتی کاهش یابد و بخار آب داخل ذرات پودر از بین برود. فرایند چاپ تحت گاز خنثای Ar انجام می‌شود و، در هنگام فرایند، جریان گاز Ar چرخشی برای از بین بردن میعان‌ات تولیدشده وجود دارد.

جدول ۱. مشخصات فنی دستگاه NOURA M100P

حجم محفظه ساخت	Ø125 میلی‌متر × ۱۵۰ میلی‌متر ارتفاع
ضخامت لایه پودر	۲۰-۸۰ میکرون
حداکثر توان لیزر	لیزر فیبری ۳۰۰ وات (پیوسته)
سیستم اپتیک	لنز-F؛ اسکنر سرعت بالا
سرعت اسکن	تا ۷۰۰ متر بر ثانیه
قطر فوکوس	حدود ۸۰ میکرون
سرعت ساخت	تا ۲۰ سانتی‌متر مکعب در ساعت
گاز محافظ	نیترژن یا آرگون

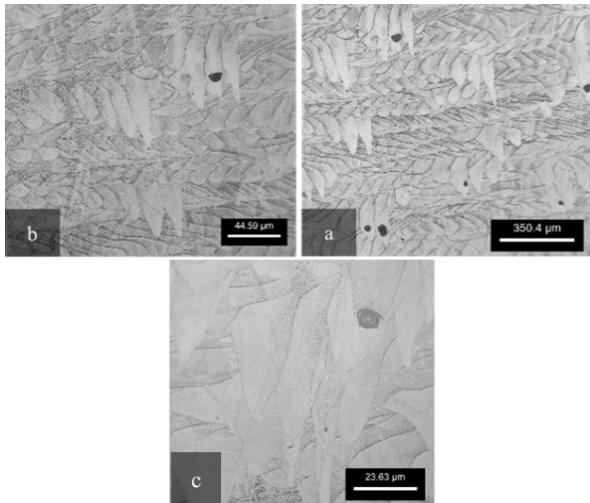
۳-۲- روش تحقیق

در این پژوهش، برای بررسی اثر چگالی انرژی بر چگالی قطعه نهایی، هشت نمونه مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 5$ (طول، عرض و ارتفاع) میلی‌متر با چگالی انرژی متفاوت ساخته شد. در این آزمایش، توان لیزر ۱۹۰ وات، فاصله بین خطوط اسکن $40 \mu m$ و ضخامت لایه‌های پودر $30 \mu m$ ثابت در نظر گرفته شد. تغییر چگالی انرژی از $66 j/mm^3$ تا $198 j/mm^3$ متغیر در نظر گرفته شد.

نمونه‌های ساخته‌شده ابتدا شماره‌گذاری و سپس به وسیله وایرکات از صفحه ساخت جدا شدند. بعد از جداسازی نمونه‌ها، برای افزایش دقت اندازه‌گیری چگالی، نمونه‌ها سنگ زده شدند. سپس توسط سناده شماره ۱۵۰ سطح آن‌ها صاف شد.

مطابق با پژوهش اسپیرینگر و همکاران (Spierings et al., 2011) بر روی دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری چگالی نمونه‌های ضدآب ساخت‌شده به روش ساخت افزایشی، روش ارشمیدس دقیق‌ترین و سریع‌ترین روش برای اندازه‌گیری چگالی است.

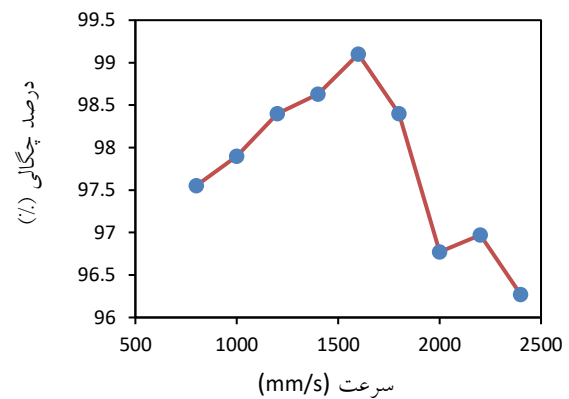
از آنجایی که بیشتر مقالات از این روش استفاده کرده‌اند، برای اندازه‌گیری چگالی مکعب‌ها از روش ارشمیدس مطابق با



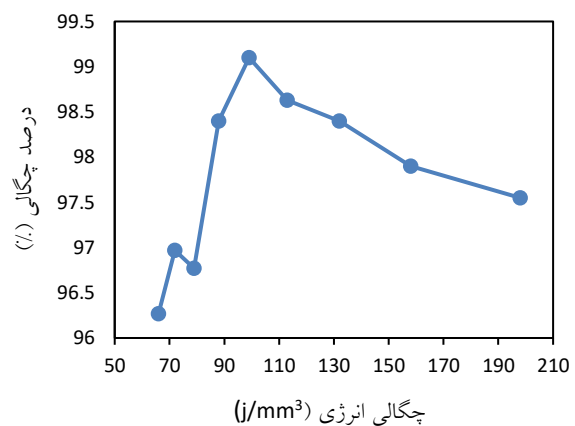
شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی نوری (a) نمونه D-1، (b) نمونه D-2 در جهت عمود بر پرینت، (c) نمونه D-2 در جهت عمود بر پرینت

در شکل ۴، حوضچه‌های مذاب بسیار عمیقی مشاهده می‌شود. حفره‌های کروی در ابعاد مختلف مشاهده می‌شود. ابعاد و ریخت‌شناسی اکثر این حفره‌ها و همچنین موقعیت قرارگیری آن‌ها در انتهای حوضچه مذاب نشان می‌دهد که این حفره‌ها بر اثر پدیده سوراخ کلید به وجود آمده‌اند که به دلیل بالا بودن چگالی انرژی در نتیجه پایین بودن سرعت اسکن تشکیل شده‌اند. در شکل ۴a، نمونه D-1 در توان ۱۹۰ وات و سرعت اسکن ۸۰۰ میلی‌متر بر ثانیه ساخته شده است و، در شکل‌های ۴b و ۴c، نمونه D-2 در توان ۱۹۰ وات و سرعت اسکن ۱۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه ساخته شده است نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، با افزایش توان، نسبت عمق به عرض حوضچه‌های مذاب بسیار زیاد شده و در نتیجه تعداد حفره‌های سوراخ کلید افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، حفره‌های سوراخ کلید تقریباً کروی شکل هستند و ابعاد آن‌ها در حدود ۴۰ میکرون تا ۷۰ میکرون است. بدون کنترل دقیق در ذوب شدن حوضچه مذاب، سوراخ‌های کلید ناپایدار تشکیل می‌شوند و فضای خالی را که از بخار تشکیل شده در داخل مذاب به جای می‌گذارند. تخلخل سوراخ کلید برای فرایند SLM نتیجه بالا بودن چگالی انرژی در لیزرهای پیوسته است. ناسازگاری روی سطح سازنده باعث ایجاد رفتاری نوسانی می‌شود که حوضچه مذاب را در سطح به‌شکلی مؤثر گسترش می‌دهد. در برخی موارد، عدم ثبات در حوضچه‌های مذاب به بیرون ریختن مواد و در نتیجه تشکیل حفره‌هایی در کف حوضچه

است. در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی انرژی، درصد چگالی ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. با توجه به فرمول ۱ می‌دانیم سرعت اسکن و چگالی انرژی رابطه معکوس دارند. با افزایش سرعت، میزان چگالی انرژی کاهش می‌یابد. در سرعت اسکن پایین، مقدار چگالی انرژی بیشتر از مقدار بهینه است و باعث تشکیل عیوب سوراخ کلید می‌شود و در سرعت اسکن بالا چگالی انرژی بسیار پایین است و باعث تشکیل عیوب ذوب ناقص و تویی شدن می‌شود (Liu et al., 2020; Larimian et al., 2021; Zhang et al., 2013).



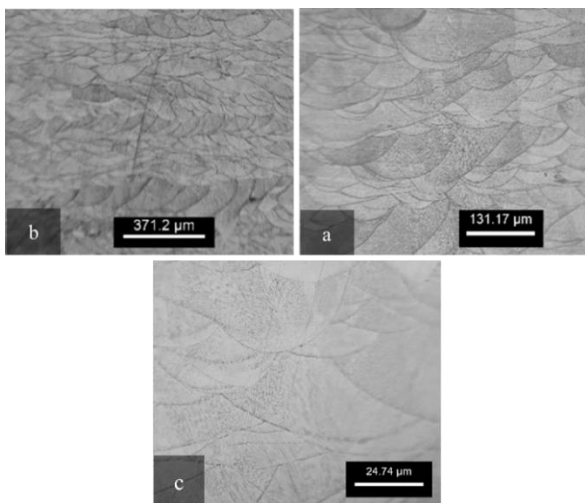
شکل ۲. نمودار درصد چگالی در مقایسه با سرعت اسکن



شکل ۳. نمودار درصد چگالی در مقایسه با چگالی انرژی

تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه D-1 و D-2 در شکل ۴ نشان داده شده است. برای ساخت نمونه D-1 از بیشترین چگالی انرژی در بین نمونه‌ها، که برابر با 198 J/mm^3 است، استفاده شده است.

حفره‌هایی مشاهده می‌شود. به دلیل کروی بودن حفره‌ها، این حفره‌ها احتمالاً حفره‌های گازی هستند. این عیوب معمولاً در حد ۵ تا ۲۰ میکرون هستند. این عیوب از طریق به دام افتادن گاز، اشباع بیش از حد گازهای محلول و واکنش‌های شیمیایی، که باعث تولید گاز درون حوضچه مذاب می‌شوند، تشکیل می‌شوند. هنگامی که فشار تعادلی گاز از فشار ترکیبی هیدرواستاتیک و مویرگی فراتر رود، احتمال ایجاد حفره‌های گازی محصور شده بیشتر است. سرعت خنک‌سازی و انجماد کندتر باعث می‌شود این حفره‌ها رشد کنند و گاهی با منافذ همسایه ترکیب شوند. وقتی حفره‌ها به اندازه بحرانی رسیدند، از مرز انجماد جدا شده و در سطح حوضچه شناور می‌شوند. تحقیقات قبلی نشان داد که سرعت بالای انجماد و مقدار زیاد گاز باعث افزایش تعداد حفره‌ها در آلیاژهای فلزی می‌شود (Liu et al., 2020).

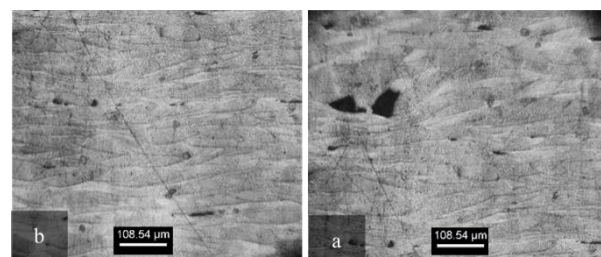


شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی نوری از نمونه D-5 در جهت عمود بر پرینت

با بررسی ریزساختار سه نمونه D-1، D-2، D-5 و D-9 که هر یک با چگالی انرژی متفاوتی ساخته شده بودند، مشاهده شد که در نمونه‌های D-1 و D-9، که با بیشترین و کمترین چگالی انرژی ساخته شده بودند، تعداد حفره‌ها بیشتر از نمونه D-5 است. در نمونه D-5، حفره‌های گازی ریزی روی مرزهای حوضچه‌های مذاب مشاهده شد که احتمالاً دلیل آن تبخیر مذاب در انتهای حوضچه مذاب است. اما حفره‌های بزرگ و بی‌شکل در آن‌ها بسیار کمتر از نمونه‌های دیگر است که دلیل آن هم‌پوشانی مناسب حوضچه‌های مذاب و گرانیوی کمتر مذاب است (Zhong et al., 2016; Mashhuriazar et al., 2020).

مذاب منجر می‌شود. سپس، این حفره‌ها به دام می‌افتند و در زیر سطح جامد می‌شوند (Lu et al., 2021; Deng et al., 2020; King et al., 2014).

تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه D-9 در شکل ۵ نشان داده شده است. برای ساخت نمونه D-9 از کمترین چگالی انرژی در بین نمونه‌ها، که برابر با 66 J/mm^3 است، استفاده شده است. در این شکل‌ها، حفره‌هایی مشاهده می‌شود. ابعاد و ریخت‌شناسی اکثر این حفره‌ها و همچنین موقعیت قرارگیری آن‌ها در گوشه‌های حوضچه‌های مذاب نشان می‌دهد که این حفره‌ها بر اثر نفوذ ناقص یا پدیده تویی شدن به وجود آمده‌اند که احتمالاً به دلیل چگالی انرژی پایین نفوذ ناقص رخ داده است و همچنین پایین بودن چگالی انرژی موجب بالا بودن گرانیوی مذاب و رخ دادن پدیده تویی شدن شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، نفوذ ناقص عیوبی را در بر می‌گیرد که دارای اشکال نامنظم و کشیده‌اند و اندازه آن‌ها شامل ۵۰ میکرون تا چندین میلی‌متر است. در بعضی موارد، در ذرات پودر ذوب‌نشده در منطقه عدم هم‌جوشی وجود دارند. حفره ذوب ناقص در نتیجه کم بودن چگالی انرژی و عدم هم‌پوشانی کافی بین خطوط اسکن لیزر به وجود می‌آید. چگالی انرژی بهینه و همچنین انتخاب فاصله بین خطوط اسکن مناسب باعث افزایش هم‌پوشانی و در نتیجه احتمال بیشتر در نفوذ کافی می‌شود. از آنجاکه این نمونه‌ها در محیط گاز آرگون ساخته شده‌اند و گاز آرگون تمایل به ایجاد تخلخل در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی دارد، در ریزساختار نمونه‌ها حفره‌های گازی بسیار کوچک، که ناشی از حبس گاز آرگون است، مشاهده می‌شود (Zhang et al., 2019; Ziętala et al., 2016; Röttger et al., 2020).



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه D-9 در جهت عمود بر پرینت

تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه D-5 در شکل ۶ نشان داده شده است. نمونه D-5 بالاترین چگالی نسبی را بین نمونه‌ها دارد. در ریزساختار، نمونه کمترین تخلخل را دارد، اما در آن هم

سختی می‌شود و بعد از آن باعث کاهش سختی می‌شود. واكشوم تکو^۱ و همکاران (Tucho et al., 2018) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و دلیل آن را تأثیر چگالی انرژی بر چگالی قطعه دانستند، به نحوی که با بالا رفتن چگالی نمونه میزان سختی نیز افزایش می‌یابد. همچنین، آن‌ها مشاهده کردند تأثیر چگالی انرژی بر سختی در چگالی انرژی‌های پایین بسیار بیشتر است که در نتایج سختی نشان داده شده در جدول ۴ هم دیده می‌شود.

جدول ۴. نتایج چگالی نمونه‌های پرینت شده

شماره نمونه	سرعت (mm/s)	چگالی انرژی (j/mm ^۳)	سختی ویکرز
D-1	۸۰۰	۱۹۸	۲۰۰
D-2	۱۰۰۰	۱۵۸	۲۰۱
D-3	۱۲۰۰	۱۳۲	۲۱۳
D-4	۱۴۰۰	۱۱۳	۲۱۰
D-5	۱۶۰۰	۹۹	۲۱۹
D-6	۱۸۰۰	۸۸	۲۰۹
D-7	۲۰۰۰	۷۹	۱۹۵
D-8	۲۲۰۰	۷۲	۱۹۲
D-9	۲۴۰۰	۶۶	۱۸۵

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، قطعات فولاد زنگ‌نزن AISI 316L با استفاده از فناوری ذوب انتخابی توسط لیزر ساخته شد و تأثیر چگالی انرژی بر ریزساختار و چگالی قطعات بررسی شد. با بررسی نتایج چگالی سنجی و ریزساختار نمونه‌های ساخته شده، مشاهده شد چگالی انرژی دارای میزان بهینه‌ای است، به طوری که کمتر از آن نمونه دارای حفره‌های ناشی از ذوب ناقص و پدیده توپی شدن است و بیشتر از آن دارای حفره‌های سوراخ کلید و گازی در نهایت، میزان سختی با میزان چگالی نمونه‌ها رابطه مستقیم دارد.

سپاسگزاری

این کار با حمایت مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی (CISSC)، به شماره ۴۰۱۰۳۷۹، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ایران انجام شده است.

در نمونه D-9 که کمترین چگالی انرژی را داشت، حفره‌های بسیار بزرگ و بی‌شکلی مشاهده شد که ناشی از پدیده توپی شدن و نفوذ ناقص است؛ زیرا چگالی انرژی کافی نبوده است. با این حال، در این نمونه تعداد خیلی کمتری از حفره‌های بسیار ریز گازی روی مرزهای حوضچه‌های مذاب مشاهده می‌شود. لایه‌ها در فرایند ذوب انتخابی توسط لیزر با نشان دادن یک لایه ۳۰ میکرومتری پودر روی لایه قبلی ایجاد می‌شوند. بنابراین، فرض بر این است که هر لایه باید ضخامت ۳۰ میکرومتر داشته باشد. در حالت ایدئال، لیزر لایه‌های قبلی را دوباره ذوب نمی‌کند، به طوری که هر لایه جدید باید حدود ۳۰ میکرومتر ارتفاع داشته باشد. برای تعیین اینکه آیا این فرض درباره ارتفاع لایه درست است یا خیر، ریزساختار نمونه D-5 ساخته شده تجزیه و تحلیل شد. در شکل ۷، ریزساختار قطعه ساخته شده نشان داده شده است. مرزهای حوضچه‌های مذاب در شکل قابل مشاهده است. عمق و عرض حوضچه منجمد شده، همان‌طور که با خطوط در شکل نشان داده شده است، اندازه‌گیری شد. از این اندازه‌گیری‌ها واضح است که عمق و عرض هر حوضچه منجمد شده متفاوت است. در این تصویر، عرض حوضچه منجمد شده از ۴۷ تا ۲۷۱ میکرون و عمق حوضچه منجمد شده بین ۴۲ تا ۱۱۵ میکرون متغیر بود. با فرض عدم تغییر عرض حوضچه منجمد شده و حداکثر طول ۵ میلی‌متر، تغییر عرض در مقاطع عرضی ناشی از چرخش الگوی اسکن است (Hawk, 2019).



شکل ۷. تصویر میکروسکوپی نوری از نمونه D-5 در جهت عمود بر پرینت

تأثیر چگالی انرژی بر سختی نمونه‌ها بررسی شد که نتیجه آن در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش چگالی انرژی تا میزان ۹۹ j/mm^۳ باعث افزایش

مراجع

15. Miranda, G., Faria, S., Bartolomeu, F., Pinto, E., Alves, N., & Silva, F. S. (2022). The influence of laser power and scan speed on the dimensional accuracy of Ti6Al4V thin-walled parts manufactured by selective laser melting. *Metals (Basel)*, 12(7), 1226. <https://doi.org/10.3390/met12071226>
16. Pilehrood, A. E., Mashhuriazar, A., Baghdadi, A. H., Sajuri, Z., & Omidvar, H. (2021). Effect of Laser Metal Deposition Parameters on the Characteristics of Stellite 6 Deposited Layers on Precipitation-Hardened Stainless Steel. *Materials (Basel)*, 14(19), 5662. <https://doi.org/10.3390/ma14195662>
17. Röttger, A., Boes, J., Theisen, W., Thiele, M., Esen, C., Edelmann, A., & Hellmann, R. (2020). Microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel processed by different SLM devices. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 769–83. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05371-1>
18. Spierings, A. B., Schneider, M. U., & Eggenberger, R. (2011). Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 17(5), 380–386. <https://doi.org/10.1108/13552541111156504>
19. Than, L., & Percent, T. (2012). Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle 1. vol. i, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05429-x>
20. 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>
21. Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Starr, T., & Stucker, B. (2014). Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*, 1, 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.002>
22. Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., Du Plessis, A., & MacDonald, E. (2021). *Fundamentals of laser powder bed fusion of metals*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01200-4>
23. Yang, T., Mazumder, S., Jin, Y., Squires, B., Sofield, M., Pantawane, M. V., ... & Neogi, A. (2021). A Review of Diagnostics Methodologies for Metal Additive Manufacturing Processes and Products. *Materials (Basel)*, 14(17), 4929. <https://doi.org/10.3390/ma14174929>
24. Zhang, B., Dembinski, L., & Coddet, C. (2013). The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder. *Materials Science and Engineering: A*, 584, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.06.055>
25. Zhang, X., Yocom, C. J., Mao, B., & Liao, Y. (2019). Microstructure evolution during selective laser melting of metallic materials: A review. *Journal of Laser Applications*, 31(3), 31201. <https://doi.org/10.2351/1.5085206>
26. Zhong, Y., Liu, L., Wikman, S., Cui, D., & Shen, Z. (2016). Intragranular cellular segregation network structure strengthening 316L stainless steel prepared by selective laser melting. *Journal of Nuclear Materials*, 470, 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.12.034>
27. Ziętała, M., Durejko, T., Polański, M., Kunce, I., Płociński, T., Zieliński, W., ... & Bojar, Z. (2016). The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping. *Materials Science and Engineering: A*, 677, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.028>
28. 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>
1. Bakhtiarian, M., Omidvar, H., Mashhuriazar, A., Sajuri, Z., & Gur, C. H. (2024). The effects of SLM process parameters on the relative density and hardness of austenitic stainless steel 316L. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 1616–29. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.237>
2. Bang, G. B., Kim, W. R., Kim, H. K., Park, H. K., Kim, G. H., Hyun, S. K., ... & Kim, H. G. (2021). Effect of process parameters for selective laser melting with SUS316L on mechanical and microstructural properties with variation in chemical composition. *Materials & Design*, 197, 109221. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109221>
3. Deng, Y., Mao, Z., Yang, N., Niu, X., & Lu, X. (2020). Collaborative optimization of density and surface roughness of 316L stainless steel in selective laser melting. *Materials (Basel)*, 13(7), 1601. <https://doi.org/10.3390/ma13071601>
4. Dutt, A. K., Bansal, G. K., Tripathy, S., Gopala Krishna, K., Srivastava, V. C., & Ghosh Chowdhury, S. (2023). Optimization of Selective Laser Melting (SLM) Additive Manufacturing Process Parameters of 316L Austenitic Stainless Steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(2), 335–345. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02687-2>
5. Gajera, H., Shah, D., & Pancholi, N. (2022). Effect of SLM process parameters on hardness and microstructure of stainless steel 316 material. *Materials Today Proceedings*, 50, 1653–1659. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.144>
6. García-Domínguez, A., Claver, J., Camacho, A. M., & Sebastián, M. A. (2020). Analysis of general and specific standardization developments in additive manufacturing from a materials and technological approach. *IEEE Access*, 8, 125056–125075. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3005021>
7. Gatões, D., Alves, R., Alves, B., & Vieira, M. T. (2022). Selective Laser Melting and Mechanical Properties of Stainless Steels. *Materials (Basel)*, 15(21), 7575. <https://doi.org/10.3390/ma15217575>
8. Hawk, C. (2019). *Laser welding behavior of laser powder bed fusion additive manufactured 304L stainless steel*. Colorado School of Mines. <https://search.proquest.com/openview/b2827d1c5f49fc1f720d059ff4fd577/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
9. Huang, M., Zhang, Z., & Chen, P. (2019). Effect of selective laser melting process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel helical micro-diameter spring. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 2117–2131. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03928-3>
10. King, W. E., Barth, H. D., Castillo, V. M., Gallegos, G. F., Gibbs, J. W., Hahn, D. E., ... & Rubenchik, A. M. (2014). Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 2915–2925. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.005>
11. Larimian, T., AlMangour, B., Grzesiak, D., Walunj, G., & Borkar, T. (2021). Effect of laser spot size, scanning strategy, scanning speed, and laser power on microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated via selective laser melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06387-8>
12. Liu, J., Song, Y., Chen, C., Wang, X., Li, H., Wang, J., ... & Sun, J. (2020). Effect of scanning speed on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, 186, 108355. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.237>
13. Lu, J., Lin, X., Kang, N., Cao, Y., Wang, Q., & Huang, W. (2021). Keyhole mode induced simultaneous improvement in strength and ductility of Sc modified Al–Mn alloy manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 811, 141089. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141089>
14. Mashhuriazar, A., Omidvar, H., Sajuri, Z., Gur, C. H., & Baghdadi, A. H. (2020). Effects of Pre-Weld Heat Treatment and Heat Input on Metallurgical and Mechanical Behaviour in HAZ of Multi-Pass Welded IN-939 Superalloy. *Metals (Basel)*, 10(11), 1453. <https://doi.org/10.3390/met10111453>