



# Control of microstructure and solidification cracks in laser powder bed fusion additive manufacturing of high-strength aluminum alloys

A. Gandomdoust, M. Sarkari Khorrami\*, S. F. Kashani-Bozorg, H. Ghorbani


Department of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received 11 March 2023 ; Accepted 26 April 2023

## Abstract

As one of the important pillars of the fourth industrial revolution, metal additive manufacturing (AM) technologies provide a disruptive approach to digital manufacturing. Laser powder bed fusion (LPBF), as one of these technologies, has great potential in producing geometrically complex and high-performance parts. In recent years, the manufacturing of aluminum alloy parts using this technology has attracted much attention. However, their manufacturing still faces some challenging issues. One of the most serious issues encountered in the manufacturing of aluminum alloys, especially high-strength grades, is solidification cracking. In the present investigation, the formation mechanisms of solidification cracking, and the associated effective factors were reviewed. Controlling the solidification microstructure and grain refinement, using the addition of small quantities ( $<1$  wt.%) of micro- or nano-sized particles to the initial alloying powder, was suggested as the most effective method for reducing solidification cracking. These particles act as nucleation sites, prevent grain growth, pin grain boundaries, and with the help of factors that provide constitutional supercooling can effectively minimize solidification cracking. Eventually, effects of various additives in grain refinement and their associated mechanism in reduction of solidification cracks of high-strength aluminum alloys by LPBF is presented.

**Keywords:** Additive Manufacturing; Laser Powder Bed Fusion; Aluminum; Solidification Cracks; Grain Refinement.

 \*Corresponding Author: [m.khorrami@ut.ac.ir](mailto:m.khorrami@ut.ac.ir)



## کنترل ریزساختار و ترک‌های انجمادی در فرایند ساخت افزایشی ذوب لیزری بستر پودر آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا

آریا گندم دوست، محمود سرکاری خرمی<sup>\*</sup>، سید فرشید کاشانی بزرگ، حسن قربانی

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1401/12/20؛ پذیرش مقاله: 1402/02/06

### چکیده

فناوری‌های ساخت افزایشی فلزات به عنوان یکی از ارکان مهم انقلاب صنعتی چهارم، رویکردی تحول‌آفرین در ساخت دیجیتال ارائه می‌کنند. ذوب لیزری بستر پودر به عنوان یکی از این فناوری‌ها، توانایی شگرفی در تولید قطعات با هندسه‌های پیچیده و با عملکرد بالا دارد. در سال‌های اخیر، ساخت قطعات آلیاژهای آلومینیوم با استفاده از این فناوری بسیار مورد توجه بوده، لیکن تحقق آن با چالش‌هایی همراه است. ترک انجمادی به عنوان یکی از جدی‌ترین دلایل ناکامی ساخت افزایشی لیزری آلیاژهای آلومینیوم به ویژه انواع استحکام بالا شناخته می‌شود. در پژوهش حاضر، سازوکار تشکیل ترک‌های انجمادی، دلایل تشکیل و عوامل مؤثر بر آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و از میان راه حل‌های ارائه شده، واپایش ریزساختار انجمادی و ریزدانه‌کردن، مؤثرترین روش برای حذف ترک‌های انجمادی آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا در فرایند ذوب لیزری بستر پودر مطرح می‌شود. در همین راستا، یکی از راهکارهای ریزدانه‌سازی و متعاقباً کاهش ترک‌های انجمادی، افزودن مقدار ناچیز (کمتر از 1% وزنی) از ذرات جوانه‌زا به پودر آلیاژی اولیه است. این ذرات با محدود کردن رشد دانه یا مهاجرت مرز دانه و همراه شدن عواملی که به تحت تبرید ترکیبی کمک می‌کنند، می‌توانند در کاهش ترک‌های انجمادی مؤثر باشند. در نهایت، تأثیر افزودنی‌های مختلف در ریزدانه‌سازی و سازوکار آن‌ها در کاهش ترک‌های انجمادی آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا حین فرایند ذوب لیزری بستر پودر ارائه می‌شود.

**کلمات کلیدی:** ساخت افزایشی، ذوب لیزری بستر پودر، آلومینیوم، ترک انجمادی، ریزدانه‌سازی.

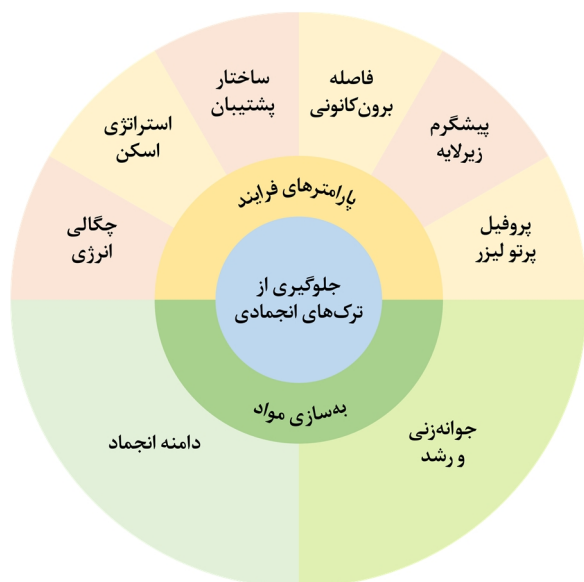
\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: [m.khorrami@ut.ac.ir](mailto:m.khorrami@ut.ac.ir)

### 1- مقدمه

خودروسازی، هوافضا، هوانوردی و پزشکی دارد. با توجه به اهمیت کاهش وزن و ذخیره انرژی در صنایع مذکور در کنار قابلیت‌های ساخت افزایشی در بهینه‌سازی توپولوژی، به کارگیری آلیاژهای سبک و با استحکام بالا انتخاب هوشمندانه‌ای خواهد بود. با توجه به ماهیت ساخت لایه‌ای،

فناوری ساخت افزایشی ذوب لیزری بستر پودر به عنوان یک فرایند پیشرفته ساخت آلیاژهای فلزی شناخته می‌شود که در آن قطعات با الگوی لایه‌به‌لایه شکل می‌گیرند [1]. فرایند LPBF پتانسیل شگرفی برای کاربرد در صنایع مختلفی همچون

دامنه انجمادی باریک، تطبیق پذیری مناسبی با فرایند LPBF دارند [7]. اگرچه ترکیب‌های مشابه آلیاژهای ریختگی Al-Si قابلیت چاپ عالی از خود نشان داده‌اند اما خواص مکانیکی آن‌ها برای کاربردهای استحکام‌بالا کافی نیست [6, 8]. از طرف دیگر، بیشتر آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالا شامل سری‌های 2000، 6000 و 7000 به دلیل دامنه انجمادی گسترده، مستعد به ترک انجمادی هستند [7]. تلاش‌های بسیاری توسط محققان برای پیدا کردن یک راه حل مؤثر و قابل اطمینان برای ساخت آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالا به صورت افزایشی به عمل آمده است. ژانگ و همکاران [6] تحقیقات انجام شده و پیشرفت‌های صورت گرفته اخیر بر حذف ترک‌های انجمادی آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالای ساخته شده با LPBF را بررسی و آن‌ها را در سه روش دسته‌بندی کردند: (1) بهینه‌سازی متغیرهای فرایند، (2) محدودتر کردن دامنه انجمادی و (3) ریزدانه کردن. شکل (1) متغیرهای مؤثر در کنترل این عیب را به صورت خلاصه نشان می‌دهد.



شکل 1- جنبه‌های کلیدی برای جلوگیری از ترک‌های انجمادی آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالا حین ساخت افزایشی با روش LPBF [6].

بخش زیادی از تحقیقات انجام شده روی بهینه‌سازی متغیرهای فرایند متمرکز بوده است [9-18]. اگرچه تنظیم متغیرهای فرایند می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ریزساختار، میزان عیوب و خواص قطعات چاپ شده داشته باشد اما همانطور که در ادامه

درجه بالای آزادی در طراحی و انعطاف پذیری بالای LPBF، امکان تولید قطعات با هندسه بسیار پیچیده، حتی با پیچیدگی داخلی بدون استفاده از قالب و ابزارکاری اضافی، تنها در یک مرحله فرایند وجود دارد [2]. با این حال، جهت بهبود خواص مکانیکی و متالورژیکی، اغلب از فرایندهای عملیات حرارتی به عنوان پس‌پردازش اصلی قطعات آلیاژی ساخته شده توسط LPBF استفاده می‌شود. از طرف دیگر، این فرایند عمدتاً جهت حذف تنش‌های حرارتی ناشی از شیب‌های دمایی بالایی که طی فرایند ساخت به وجود می‌آیند، انجام می‌شود [3]. علاوه بر موارد بالا، توسعه آلیاژهای جدید منطبق بر فرایند ساخت افزایشی به عنوان فرصتی جهت بهبود عملکرد و عمر مفید قطعات صنعتی به شمار می‌رود که در این تحقیق به بررسی این موضوع پرداخته خواهد شد.

از آنجایی که آلیاژهای آلومینیوم پس از فولاد پرکاربردترین ماده مهندسی به حساب می‌آیند [4]، استفاده آن‌ها در LPBF برای کاربردهایی که نسبت استحکام به وزن بالا و پیچیدگی در طراحی ضروری است، بسیار اهمیت می‌یابد. با این وجود، آلیاژهای آلومینیوم، به ویژه آلیاژهای استحکام‌بالا، قابلیت چاپ ضعیف و چالش‌های متعددی در پردازش با لیزر دارند. حضور لایه‌های اکسیدی، حفرات انجمادی، قابلیت پایین جذب پرتو لیزر، هدایت حرارتی بالا، جریان پذیری ضعیف پودر، انقباض انجمادی زیاد و حساسیت به ترک گرم چالش‌هایی هستند که ساخت افزایشی لیزری آلیاژهای آلومینیوم را محدود می‌کند [4 و 5]. علی‌رغم تحقیقات گسترده در مرتفع نمودن بخش اعظمی از این کاستی‌ها، ترک انجمادی همچنان به عنوان چالش قابل ملاحظه ساخت افزایشی لیزری آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالای صنعتی شناخته می‌شود [6] و از این رو، کنترل و کاهش آن‌ها به عنوان یک موضوع تحقیقاتی جذاب همچنان پابرجاست.

تاکنون، اکثر مطالعات مربوط به آلیاژهای آلومینیوم ساخته شده با LPBF بر آلیاژهای یوتکتیکی یا نزدیک یوتکتیک Al-Si (مثل  $AlSi_7$ ،  $AlSi_{10}Mg$  و  $AlSi_{12}$ ) متمرکز بوده است [6-8]. آلیاژهای مبتنی بر سامانه Al-Si به دلیل سیالیت بالای مذاب و

ساخت افزایشی لیزری بدون در نظر گرفتن خواص مورد نیاز راه حل مناسبی نمی باشد (باعث انحراف زیاد از ترکیب شیمیایی اولیه و افت خواص مکانیکی می شود). این راهکار می تواند در زمره طراحی و توسعه آلیاژهای جدید قرار بگیرد تا بهبود فرایندپذیری یک آلیاژ موجود.

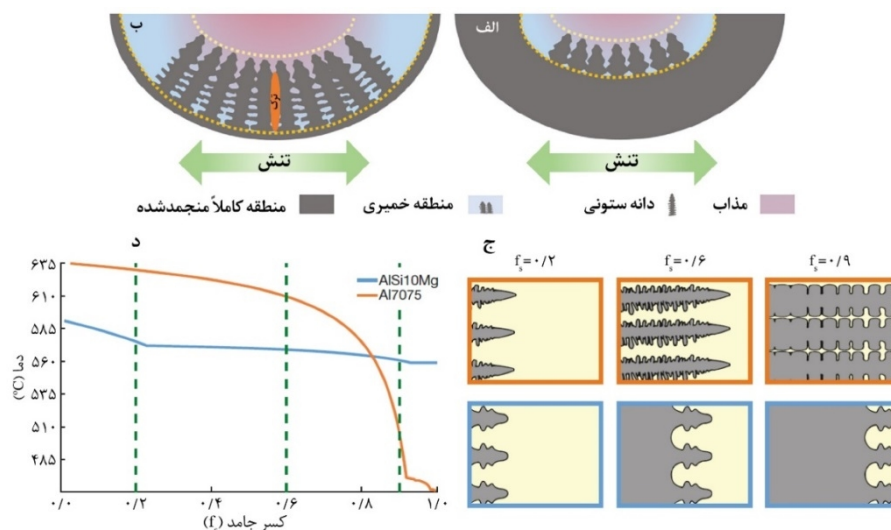
در حال حاضر، علاوه بر بهینه کردن متغیرهای فرایند و محدود کردن دامنه انجمادی، راهکار پیشنهادی دیگری برای حذف ترکهای انجمادی در آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا وجود دارد. هدف تحقیق حاضر، بررسی اصلاح ریزساختار از طریق افزودن درصد ناچیزی از عوامل جوانه زای محدود کردن رشد دانه های ستونی به منظور کاهش یا حذف ترکهای انجمادی در آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا ساخته شده با روش ساخت افزایشی لیزری است. در ادامه، نخست، به بررسی ساز و کار و دلایل تشکیل ترکهای انجمادی در آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا پرداخته می شود و دوم، تأثیر افزودن عوامل جوانه زای محدود کردن رشد دانه مورد بررسی قرار می گیرد.

## 2- ساز و کار تشکیل ترکهای انجمادی

در فرایند ذوب لیزری بستر پودر، پس از لایه نشانی پودر با ضخامت یکنواخت، بخش هایی از بستر پودر به صورت انتخابی توسط انرژی مستقیم لیزر اسکن می شود. در اندرکنش بین پرتو لیزر و بستر پودر، انرژی لیزر توسط پودر جذب شده و منجر به افزایش سریع حرارت تا دمای ذوب آلیاژ و تشکیل حوضچه مذاب می شود. با توجه با ماهیت فرایند، استفاده از انرژی لیزر مستقیم برای ذوب پودرهای آلیاژی به صورت موضعی منجر به نرخ سرمایش بسیار بالا در حوضچه مذاب حتی تا  $10^6$  K/s می شود [20]. این نرخ سرمایش ده ها برابر بزرگتر از نرخ سرمایش در فرایندهای ریخته گری معمولی است و منجر به انحراف زیادی از شرایط انجماد تعادلی می شود. با توجه به این که مسیر اسکن انرژی لیزر برای ذوب لایه های متوالی پودر مشابه فرایندهای جوشکاری است، تعجب آور نیست که آلیاژهای قابل پردازش با این فرایند محدود به آنهایی است که

اشاره خواهد شد، کنترل متغیرهای فرایند الزاماً منجر به حذف کامل ترکهای انجمادی نخواهد شد. به عبارت دیگر در شرایط بهینه متغیرها نیز ممکن است ترکها به طور کامل از بین نروند. علاوه بر این، تعیین بهترین ترکیب متغیرهای فرایند برای یک آلیاژ خاص نیازمند مطالعات بسیار وسیع، پرهزینه و زمانبر است (از طریق سعی و خطا و آزمایش های متعدد، پرهزینه و زمانبر). از آنجایی که ترکهای انجمادی به ترکیب آلیاژ و شرایط انجمادی وابسته اند، احتمال وقوع این ترکها در آلیاژهایی که دامنه انجمادی گسترده تری دارند (مانند آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا) مشهودتر است. مطالعه رفتار ایجاد ترک در آلیاژ آلومینیوم 2024 [15] نشان می دهد که اگرچه تنظیم متغیرهای فرایند می تواند تا حد زیادی در کاهش ترکهای انجمادی مؤثر باشد اما منجر به حذف کامل آنها نمی شود. مطالعات دیگر روی همین آلیاژ [11، 12] نشان می دهند که بهینه سازی متغیرهای فرایند به طور مؤثری در کاهش تخلخلها تا زیر 1% (افزایش تراکم تا بیش از 99%) نقش دارد اما نمی تواند به طور کامل از ترکهای پارگی گرم جلوگیری کند.

به دلیل دامنه انجمادی وسیع، پرشدن مذاب در بین دانه های ستونی درشت دشوارتر می شود. با توجه به سازوکارهای تشکیل ترکهای انجمادی که در ادامه به بررسی آنها پرداخته خواهد شد، دامنه انجمادی وسیع می تواند حساسیت به ترک انجمادی را افزایش دهد. ماریا و همکاران [19] دریافتند که افزودن 4% وزنی سیلیسیم به آلیاژ آلومینیوم 7075 می تواند تراکم نسبی نمونه های چاپ شده را تا 99% افزایش دهد و منجر به کاهش چشمگیر ریزترکها شود. افزودن سیلیسیم در این آلیاژ علاوه بر کاهش فواصل دمایی انجماد (فاصله دمایی سالدوس و لیکوئیدوس)، باعث افزایش سیالیت حوضچه مذاب و کاهش ویسکوزیته آن می شود و از این طریق حساسیت به ترک انجمادی را کاهش می دهد. با این حال، محدود کردن دامنه انجماد که از طریق ایجاد تغییرات قابل توجه در ترکیب شیمیایی آلیاژ امکان پذیر است، منجر به تغییر خواص آلیاژ (و تخریب خواص مکانیکی) می شود. از این رو، تغییر در ترکیب آلیاژ تنها با هدف افزایش قابلیت پردازش با روش های



شکل 2- تصویر مقایسه ریزساختاری و تشکیل ترک انجمادی در آلیاژهای آلومینیوم با الف - دامنه انجماد باریک و ب - دامنه انجماد گسترده [6]؛ رفتار انجمادی آلیاژهای آلومینیوم ساخت افزایشی ج - نمایش شماتیکی انجماد که نشان می‌دهد چگونه انجماد در یک محدوده دمایی بزرگ می‌تواند کانال‌های طولانی از مذاب بین دندریتی ایجاد کند که منشأ ترک انجمادی است (مانند Al7075)، در حالی که یک دامنه انجماد کوچک منجر به مناطق کوتاه بین دندریتی می‌شود که می‌تواند به راحتی توسط مذاب پر شود (مانند AlSi10Mg) و د - منحنی‌های انجماد آلیاژهای پرینت شده Al7075 (نارنجی) و AlSi10Mg (آبی) [21].

مشترک انجماد می‌شود و به طور موضعی دمای لیکوئیدوس تعادلی را تغییر می‌دهد و شرایط ناپایدار و تحت تبریدی ایجاد می‌کند. در نتیجه، فروپاشی فصل مشترک جامد-مذاب منجر به رشد دانه سلولی یا دندریتی با مجاری طولانی از مذاب بین دندریتی که بین مناطق منجمد شده به دام افتاده است، می‌شود [22, 23].

با کاهش دما و کسر حجمی مذاب، به دلیل انقباض حجمی ناشی از انجماد و انقباض حرارتی، این مجاری تحت تنش‌های کششی قرار گرفته و باز می‌شوند و ترک‌های انجمادی را شکل می‌دهند [6, 22]. ترک انجمادی در آلیاژهای آلومینیوم (مخصوصاً آلیاژهای با دامنه انجمادی وسیع) به دلیل ضریب انبساط حرارتی بالا و انقباض انجمادی زیاد جدی‌تر است [22]. این ترک‌ها ممکن است کل طول دانه ستونی مجاور خود را در بر بگیرند و حتی در مناطق بین دانه‌ای اضافی اشاعه پیدا کنند [6, 8].

در مقابل، ریزساختارهای دندریتی هم‌محور ریز با مقدار زیاد مذاب در بین دانه‌ها بسیار راحت‌تر از ساختارهای دندریتی ستونی درشت تغییر شکل می‌دهند [21]. ریزساختار با دانه‌های

جوش‌پذیری بهتری دارند [21]. استفاده از روش LPBF برای آلیاژهای مهندسی استحکام بالا که جوش‌پذیری ضعیفی دارند و با چنین شرایط انجمادی سازگار نیستند (مانند آلیاژهای آلومینیوم سری 2000، 6000 و 700 و سوپرآلیاژهای پایه نیکل با فاز استحکام بالا  $\gamma'$ )، می‌تواند به ایجاد ریزساختارهایی با دانه‌های ستونی بزرگ که ممکن است طول آن‌ها تا ده‌ها لایه به صورت رشد هم‌بافت ادامه یابد، بیانجامد [6, 7, 21].

سازوکارهای تایید شده که به صورت شماتیکی در شکل (2-الف و 2-ب) نشان داده شده‌اند، توزیع ریزساختاری آلیاژهای آلومینیوم با دامنه انجمادی گسترده و باریک درون یک حوضچه مذاب را مورد مقایسه قرار می‌دهد [6]. شکل (2-ج و 2-د) نیز رفتار انجمادی آلیاژهای آلومینیوم Al7075 و AlSi10Mg در طول فرایند ساخت افزایشی ذوب لیزری بستر پودر را نشان می‌دهد [21].

در طول انجماد آلیاژهای با دامنه انجمادی گسترده، فاز تعادلی اولیه (برای مثال  $\alpha$ -Al در آلیاژهای آلومینیوم) ابتدا با ترکیبی متفاوت از ترکیب توده مذاب منجمد می‌شود. این امر سبب افزایش غلظت عناصر محلول در مذاب در نزدیکی فصل

انجماد ترجیحاً از طریق جوانه زنی روی دانه‌های موجود اتفاق می‌افتد که منجر به رشد عمودی آن‌ها در جهت ساخت با دانه‌هایی که در چندین لایه ساخت گسترش می‌یابند می‌شود. با فراهم نمودن چگالی بالایی از مکان‌های جوانه زنی ناهمگن با سد انرژی جوانه زنی کم در جلوی جبهه انجماد، مقدار بحرانی تحت تبرید مورد نیاز برای رشد هم‌محور کاهش می‌یابد. در نتیجه، ساختارهای ریزدانه هم‌محور تشکیل می‌شود که توانایی بیشتری در تحمل کرنش‌های انقباضی دارند و در شرایط انجمادی یکسان، از تشکیل ترک جلوگیری می‌کنند.

### 3- دلایل تشکیل ترک‌های انجمادی و عوامل مؤثر بر آن‌ها

دلایل ممکن برای ترک انجمادی در فلزات ذوب‌شده عبارتند از [3]:

- محدوده دمایی انجماد،
- حجم و توزیع مذاب در انتهای انجماد،
- فاز اولیه انجماد،
- کشش سطحی مذاب باقی‌مانده در مرزدانه،
- مورفولوژی دانه،
- شکل‌پذیری فلز منجمدشده و
- تمایل فلز جوش به انقباض و میزان قید و بند. تمامی این دلایل در نهایت با ترکیب فلز ارتباط دارند. دو دلیل اول از ریز جدایش تأثیر می‌گیرند که با نرخ سرمایش در انجماد کنترل می‌شود مانند تشکیل فاز اولیه.
- همانطور که در بخش قبل گفته شد، به دلیل غلظت بیشتر عناصر محلول در جلوی جبهه انجماد (در شرایطی که ضریب توزیع تعادلی یا ضریب جدایش کوچک‌تر از یک باشد) دمای مذاب در جلوی جبهه انجماد کمتر از دمای انجماد کل حجم مذاب خواهد بود [23، 24]. از این رو، مذاب باقیمانده حین انجماد می‌تواند در بین دانه‌های ستونی شکل گرفته جاری شده و لایه نازکی در مرز دانه‌ها تشکیل دهد. در مرحله نهایی انجماد، انقباض حوضچه مذاب و همچنین انقباض مسیرهای منجمدشده مجاور هنگام سرد شدن منجر به اعمال تنش‌های کششی از دو طرف به لایه‌های ظریف مذاب باقیمانده در بین

هم‌محور به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر در برابر کرنش‌ها، امکان تغذیه مؤثرتر مذاب و ترمیم ترک‌های اولیه، حساسیت کمتری نسبت به ترک گرم دارند [22]. علاوه بر این، دانه‌های ریز به دلیل اینکه مساحت مرز دانه بیشتری در حجم ماده ارائه می‌کنند، امکان تجمع کمتر عناصر مضر (عناصر زودذوب یا تشکیل‌دهنده ترکیبات زودذوب در مرز دانه) را فراهم می‌کنند. تولید این ساختارهای هم‌محور ایده‌آل نیاز به مقادیر تحت تبرید زیادی دارد که تا کنون در فرایندهای ساخت افزایشی لیزری به دلیل شیب‌های حرارتی بسیار زیادی که از مسیر اسکن انرژی لیزر در یک الگوی هندسی دلخواه ناشی می‌شود امری دشوار بوده است. مارتین و همکاران [21] در مطالعه خود که در نشریه Nature منتشر شد، برای اولین بار یک رویکرد امیدوارکننده برای حذف ترک‌های گرم از طریق کنترل ریزساختار انجمادی با افزایش جوانه‌زنی دانه‌های جدید به واسطه افزودن نانوذرات جوانه‌زا ارائه کردند. آن‌ها با افزودن 1% حجمی زیرکونیوم به آلیاژهای Al7075 و Al6061 تحول ریزساختاری قابل توجهی را مشاهده کردند؛ نمونه‌های بدون افزودنی مجموعه‌ای از دانه‌های ستونی بزرگ موازی با جهت ساخت همراه با ترک‌هایی که در نواحی بین ستونی وجود دارند و از میان چندین لایه ساخت گسترش می‌یابند را نشان می‌دهد. شار حرارتی بالا و جهت‌دار در فرایند ساخت افزایشی لیزری که گرادیان‌های حرارتی بالا و تحت تبرید کوچک در طول انجماد فراهم می‌کند عامل رشد دانه‌های ستونی موازی با جهت ساخت است [3].

افزودن نانوذرات جوانه‌زا با تغییر مورفولوژی دانه‌های ستونی بزرگ به دانه‌های هم‌محور کوچک به طور مؤثری در حذف ترک‌های انجمادی کارآمد بود. اگرچه سرعت انجماد در فرایند ذوب لیزری بستر پودر نسبتاً زیاد است، اما به تنهایی برای فراهم نمودن شرایط مناسب برای رشد هم‌محور کافی نیست. به طور خاص، رسانایی حرارتی بالای آلومینیوم و ضریب نفوذ زیاد عناصر آلیاژی در فاز مذاب، دستیابی به تحت تبرید قابل ملاحظه را با محدوده قابل دسترس سرعت‌های انجماد و گرادیان‌های حرارتی، بسیار دشوار می‌کند [21]. به این ترتیب،

معادل باعث تغییر فاز اولیه انجماد از آستنیت به فریت و افزایش فاز فریت می‌شود. به طور کلی در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی حضور 5% تا 10% فریت  $\delta$  مقاومت خوبی در برابر ترک انجمادی ایجاد می‌کند [22].

کشش سطحی کم مذاب می‌تواند منجر به تشکیل لایه پیوسته مذاب در مرز دانه شود. از این رو، در آلیاژهای آلومینیوم، هرچه زاویه تماس مذاب مرز دانه‌ای بیشتر و مورفولوژی آن‌ها کروی‌تر باشد، حساسیت به ترک انجمادی کاهش می‌یابد. در فولادهایی که مقادیر گوگرد قابل توجهی دارند، مذاب FeS به دلیل کشش سطحی کم لایه‌ای پیوسته در مرز دانه‌ها تشکیل می‌دهد. مذاب MnS کشش سطحی بیشتری داشته و مورفولوژی جمع‌تری (کروی‌تری) به خود می‌گیرد. همچنین نقطه ذوب MnS بیشتر از FeS است. از این رو، در فولادهای کربنی و کم‌آلیاژی، نسبت  $\frac{Mn}{S}$  فلز جوش تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ترک انجمادی دارد [22].

مورفولوژی دانه‌ها و ریزساختار انجمادی نیز به نوبه خود در تشکیل یا مهار ترک‌های انجمادی نقش دارند. ریزساختارهایی با دانه‌های هم‌محور و ریز با مقدار زیاد مذاب در بین آن‌ها راحت‌تر از ساختارهای دندریتی یا ستونی درشت تغییر شکل می‌دهند [21]. ریزساختارهای هم‌محور و ریز به دلیل تحمل بیشتر کرنش‌ها، امکان تغذیه مؤثرتر مذاب و ترمیم ترک‌های اولیه حساسیت کمتری به ترک انجمادی دارند [21، 22]. دانه‌های ریز با تعداد زیاد به دلیل افزایش سطح مرز دانه در حجم ماده، غلظت عناصر مضر در مرز دانه را کاهش می‌دهد. در فرایند LPBF به دلیل شیب‌های حرارتی بالای ذاتی فرایند و تحت تبرید کم، شرایط برای رشد دانه‌های ستونی مساعد است. برخورد دانه‌های ستونی همراه با مذاب لایه‌ای و پیوسته به دام افتاده در بین آن‌ها ناشی از جدایش‌های با نقطه ذوب پایین، حساسیت به ترک انجمادی را افزایش می‌دهد.

شرط لازم برای وقوع ترک‌های انجمادی حضور تنش‌های کششی است [22]. در طول انجماد، هنگامی که حوضچه مذاب دچار انقباض حرارتی و انقباض ناشی از انجماد می‌شود، به دلیل اختلاف میزان انقباضی که با لایه منجمد شده مجاور خود

دانه‌های ستونی می‌شود [6، 22]. اگر این مذاب بین دانه‌های ستونی به دام افتاده باشد، از آنجایی که مقدار آن برای پرکردن این فضای به وجود آمده کافی نیست منجر به تشکیل حفره و ترک خواهد شد. البته خاطرنشان می‌شود که در آلیاژهایی که درصد عناصر آلیاژی زیادی دارند، مذاب باقیمانده در انتهای انجماد می‌تواند به قدری زیاد باشد که ترک‌های ایجاد شده در بین دانه‌ها را ترمیم کند؛ در ادامه به این موضوع بیشتر پرداخته خواهد شد. چنانچه ماده تحمل تنش‌های انقباضی را نداشته باشد، این تنش‌ها می‌توانند لایه‌های نازک مذاب موجود در مرز دانه‌ها را باز کنند و سبب ایجاد ترک‌های انجمادی شوند. در آلیاژهایی که محدوده دمایی انجمادی گسترده دارند، مذاب باقیمانده به تدریج از عنصر آلیاژی غنی می‌شود (حتی ممکن است در انتهای انجماد به ترکیب یوتکتیک برسد) که با توجه به تئوری‌های بیان شده در بالا، دمای انجماد پایین‌تری خواهد داشت. حضور لایه‌های نازک مذاب باقیمانده ناکافی بین دانه‌های ستونی برای ترمیم ترک‌های ایجاد شده در مرحله نهایی انجماد با نقطه ذوب کم، یکی از دلیل حساسیت بالای آلیاژهای با دامنه انجمادی وسیع به ترک انجمادی است. در حالی که در آلیاژهایی که محدوده انجمادی محدودتری دارند (مانند ترکیب یوتکتیک Al-Si)، تغییرات قابل توجهی در ترکیب مذاب باقی مانده رخ نمی‌دهد و این آلیاژها تقریباً به صورت هم‌دام مشابه فلزات خالص منجمد می‌شوند. به عبارت دیگر، مذاب باقیمانده در بین دانه‌های تشکیل شده به راحتی جریان یافته و سریعاً منجمد می‌شود.

در آلیاژهای چندفازی، فاز اولیه انجماد نیز در ایجاد ترک‌های انجمادی نقش دارد. چنانچه فاز اولیه تشکیل شده قابلیت حلالیت بیشتر عناصر ناخالصی را داشته باشد، حضور بیشتر این فاز، غلظت ناخالصی‌ها در مرز دانه‌ها و در نتیجه اثرات مخرب آن‌ها بر ترک انجمادی را کاهش می‌دهد. فولادهای دو فازی آستنیت و فریت مثال خوبی در این مورد می‌باشند. فاز آستنیت به دلیل حلالیت کمتر عناصر آلیاژی و انقباض انجمادی بیشتر نسبت به فاز فریت حساسیت بیشتری به ترک انجمادی دارد. در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، افزایش نسبت کروم معادل به نیکل

و زیرلایه دارد، تحت تنش کششی قرار می‌گیرد. ضریب انبساط حرارتی نقش مهمی در میزان تنش‌های انقباضی دارد. آلیاژهای آلومینیوم (به ویژه سری‌های استحکام‌بالا) به دلیل ضریب انبساط حرارتی زیاد و انقباض زیاد ناشی از انجماد، حساسیت بیشتری به ترک انجمادی دارند [3، 7]. در فولادها، آستنیت ضریب انبساط حرارتی بیشتری نسبت به فریت دارد. از این رو فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی مستعد به ترک انجمادی هستند در حالی که فولادهای فریتی در برابر این نوع ترک مقاوم‌اند [22]. مقدار مذاب مرزدانه‌ای و بین دندریتی به درصد عناصر آلیاژی در ترکیب بستگی دارد. نشان داده شده است که حداکثر حساسیت به ترک در ترکیبی بین آلومینیوم خالص و آلومینیوم با عناصر آلیاژی کمتر از 6% وزنی رخ می‌دهد [22]. در آلومینیوم با عناصر آلیاژی زیاد، مذاب یوتکتیک بین دانه‌ها می‌تواند تا حدی زیاد باشد که ترک‌های ایجادشده در بین دانه‌ها را ترمیم کند. در محدوده عنصر آلیاژی 0 تا 6% وزنی، مقدار مذاب تنها می‌تواند لایه نازک و پیوسته‌ای در مرزدانه تشکیل دهد و حساسیت به ترک انجمادی را تشدید کند. شکل و هندسه جوش نیز در شکل‌گیری ترک‌های انجمادی نقش دارد. در صورت استفاده از منبع پر انرژی و متمرکز مانند پرتو الکترونی که حوضچه مذاب تشکیل شده پهنای کم و عمق زیادی دارد، به دلیل زاویه تند بین دانه‌های ستونی و برخورد آن‌ها در خط مرکزی حوضچه مذاب، حساسیت به ترک انجمادی جدی‌تر است [22].

علاوه بر عوامل فوق، متغیرهای فرایند و مشخصات ماده نیز تأثیر قابل توجهی بر نوع و میزان عیوب در قطعات ساخته شده دارند [20] و نقش مهمی در خواص مکانیکی قطعات ساخته شده ایفا می‌کنند. متغیرهای فرایند ذوب لیزری بستر پودر را می‌توان به چهار دسته تقسیم‌بندی کرد [25]:

- متغیرهای لیزر (از جمله توان لیزر، قطر پرتو لیزر، زمان و بسامد ضربان در لیزرهای ضربانی)،

- متغیرهای اسکن (سرعت اسکن، فاصله اسکن و الگوی اسکن)،

- متغیرهای ماده پودری (شامل شکل ذرات، اندازه و توزیع آن‌ها، جریان‌پذیری، چگالی بستر پودر، ضخامت لایه و خواص ماده)

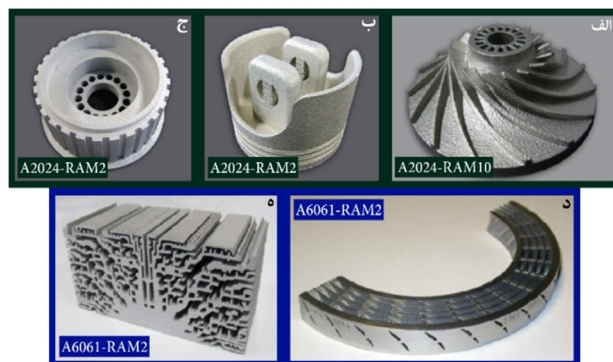
متغیرهای دما (دمای بستر پودر، پیش‌گرم، دمای تغذیه‌گر پودر و چگونگی توزیع دما)، اکثر این متغیرها به یکدیگر وابسته بوده و با هم در تعامل‌اند. ساز و کارها و چگونگی تأثیر این عوامل بسیار پیچیده بوده و درک آن‌ها نیازمند بررسی‌های عمیق و همه‌جانبه‌ای است. مطالعات بسیاری بر بررسی تأثیر هر کدام از متغیرهای فرایند بر کیفیت ساخت قطعات چاپ‌شده برای آلیاژهای مختلف انجام شده است [26-29]. اما حقیقت محض این است که عوامل دخیل در کیفیت نهایی قطعات بسیار بیشتر از متغیرهای فرایند و ترکیب آلیاژ و موارد دیگر می‌باشد. حتی نوع دستگاه و شرایط آزمایش نیز در تنوع و تکرارپذیری بودن نتایج به دست آمده نقش دارند. همین مورد یکی از موانع تدوین و توسعه استانداردهای تکرارپذیر برای ساخت موفقیت‌آمیز آلیاژهای مختلف با روش‌های افزایشی می‌باشد. معمولاً شرکت‌های سازنده دستگاه‌های ساخت افزایشی، استانداردها و پنجره‌های فرایندی توسعه داده‌شده خود برای آلیاژهای موجود را در اختیار خریدار و مصرف‌کننده قرار می‌دهند. عموماً استاندارد محصول هر شرکت با دیگری تفاوت‌هایی دارد و متناسب با دستگاه ساخته شده آن شرکت طراحی شده است. با این حال، این استانداردها تنها برای تعداد محدودی از آلیاژهای قابل پرینت (مانند بعضی از آلیاژهای نیکل، تیتانیوم و فولاد) توسعه داده شده‌اند. اغلب گفته می‌شود که آلیاژهایی فرایندپذیری مطلوبی با ساخت افزایشی لیزری دارند که جوش‌پذیری خوبی داشته باشند. اما بسیاری از آلیاژها از جمله آلیاژهای آلومینیوم به دلایل مطرح‌شده در بخش‌های قبل فرایندپذیری خوبی ندارند. از این رو، بهبود فرایندپذیری این دسته از آلیاژها یا توسعه آلیاژهای جدید به زمینه تحقیقاتی پرترفداری در بین محققان دانشگاه‌ها و بخش‌های تحقیق و توسعه شرکت‌های پیشرو در این زمینه تبدیل شده است. به عبارت دیگر، تمرکز تحقیقات از بهینه‌سازی متغیرهای فرایند به سمت بهینه‌سازی ترکیب آلیاژهای موجود [30] یا توسعه آلیاژهای جدید سازگار با فرایند ساخت افزایشی لیزری معطوف شده است [31-40]. به تازگی شرکت Elementum 3D (متخصص در مواد ساخت افزایشی) آلیاژهای مختلف آلومینیوم



اکسیدها ( $\text{TiO}_2$  [64])، کاربیدها ( $\text{TiC}$  [44, 65])، بوراید ها ( $\text{CaB}_6$  [66]،  $\text{TiB}_2$  [45, 67])، آلوتروپ های مولکولی کربن مانند گرافن، نانولوله های کربنی [68] بر اصلاح ریزساختار، حذف ترک های انجمادی و خواص مکانیکی در آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا پرداختند. اساس کار در همه این تحقیقات یا افزایش جوانه زنی ناهمگن با به کارگیری جوانه زها (درجا یا غیر درجا) یا جلوگیری از رشد دانه ها با افزودن ذراتی که قابلیت بالایی در محدود کردن رشد دانه ها دارند می باشد تا به سرعت، تحت تبرید ترکیبی کافی برای جوانه زنی در جلوی جبهه انجماد (فصل مشترک جامد-مذاب) ایجاد کند و در نتیجه با ایجاد ریزساختارهای هم محور از ترک انجمادی جلوگیری کند.

تان و همکاران [8] دریافتند که افزودن 0/7% وزنی نانوذرات تیتانیوم به آلیاژ آلومینیوم 2024 از ترک های انجمادی و ریزساختار ستونی جلوگیری کرده و ریزساختار ظریف و هم محور ایجاد می کند. آن ها برای اطمینان از همگن بودن ترکیب و ریزساختار از نانوذرات تیتانیوم استفاده کردند و گزارش کردند که تشکیل ترکیب بین فلزی  $\text{Al}_3\text{Ti}$  با ابعاد نانو به صورت درجا با ساختار نظم یافته  $\text{L1}_2$  که فصل مشترک همسایه با زمینه آلومینیوم دارد، جوانه زنی ناهمگن  $\alpha\text{-Al}$  را ترغیب می کند و عامل ریزشدن قابل توجه دانه هاست. ترکیب بین فلزی  $\text{Al}_3\text{Ti}$  دو آلوتروپ با ساختارهای بلوری تراگونال ( $\text{D0}_{22}\text{-Al}_3\text{Ti}$ ) و مکعبی وجوه پر ( $\text{FCC}$ ) ( $\text{L1}_2\text{-Al}_3\text{Ti}$ ) دارد که مورد اول یک فاز تعادلی است که عموماً در روش های ریخته گری معمولی با سرعت های سرمایش نسبتاً آهسته تشکیل می شود و مورد دوم یک فاز شبه پایدار است که تحت شرایط انجماد غیرتعادلی و سرعت های سرمایش سریع در آلیاژهای آلومینیوم دارای تیتانیوم تشکیل می شود. با توجه به نرخ سرمایش بسیار بالا و انجماد غیرتعادلی در فرایند LPBF، غالباً فاز  $\text{L1}_2\text{-Al}_3\text{Ti}$  تشکیل می شود. با استفاده از محاسبات کریستالوگرافی بر اساس مدل لبه به لبه نشان داده شد که از دیدگاه کریستالوگرافی، فاز  $\text{L1}_2$  نسبت به فاز  $\text{D0}_{22}$  به دلیل ساختمان بلوری یکسان با آلومینیوم و ثابت شبکه نزدیک به آن

از جمله ترکیبات معروف آلیاژهای کار شده  $\text{Al6061}$ ،  $\text{Al2024}$  و  $\text{Al7075}$  را معرفی کرده اند که فرایندپذیری و قابلیت پردازش عالی با لیزر دارند که پیش از این ساخت افزایشی لیزری آن ها با مشکلات عدیده ای از جمله ترک های انجمادی همراه بود [41]. هم اکنون محصولات فرموله و تست شده آن ها با پسوند RAM روانه بازار شده است (مانند  $\text{A7075-RAM2}$ ). شکل (3) تصویر قطعات ذوب لیزری بستر پودر با پودرهای بهینه شده این شرکت را نشان می دهد. خواص شیمیایی و فیزیکی هر کدام از این آلیاژها در برگه های اطلاعات هر محصول آورده شده است. طبق ادعای شرکت، آن ها با مخلوط کردن پودر افشانش گازی آلیاژ آلومینیوم با ذرات سرامیکی، فرایندپذیری با روش های ساخت افزایشی لیزری و همچنین کارایی این آلیاژها را از نظر خواص مکانیکی و خوردگی و همچنین خواص دما بالا ارتقاء داده اند [41].



شکل 3- قطعات ساخت افزایشی لیزری بستر پودر آلیاژ آلومینیوم با پودرهای

آلیاژی شرکت Elementum 3D

الف- پروانه توربو ( $\text{A2024 w/10\% ceramic}$ )،

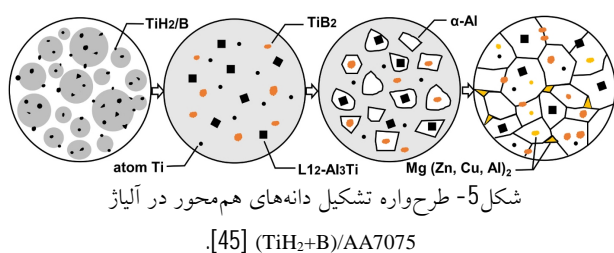
ب- سر پیستون ( $\text{A2024 w/2\% ceramic}$ )، ج- چرخ زمان بندی (آلیاژ ب)،

د- پره استاتور ( $\text{A6061 w/2\% ceramic}$ ) و ه- گرماگیر (آلیاژ د).

#### 4- بررسی تاثیر افزودنی های مختلف برای مهار یا کاهش ترک های انجمادی

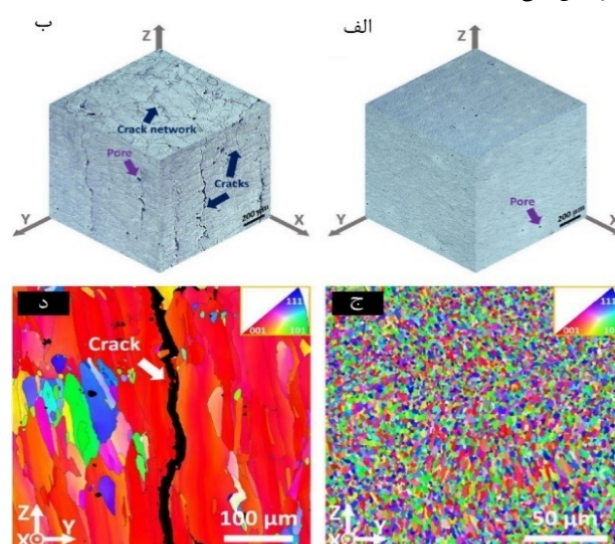
بعد از رویکرد پیشنهاد شده توسط مارتین [21]، بسیاری از محققان دیگر نیز به بررسی اثر افزودن عناصر و ترکیب های مختلف (از جمله عناصری مانند تیتانیوم [8, 10, 42-46]، زیرکونیوم [40, 47-59]، اسکاندیوم [49, 50, 53, 60]، اربیوم [48, 54, 61, 62]، سیلیسیم [19, 63]، ترکیب هایی چون

ذرات  $\text{TiH}_2$  و 0/16% وزنی از ذرات آمورف بور با اندازه 500 nm با پودر آلیاژ آلومینیوم 7075 از جمله نتایج کار هوانگ و همکاران وی بود [45]. تشکیل نانوذرات  $\text{L}_{12}\text{-Al}_3\text{Ti}$  و  $\text{TiB}_2$  به صورت درجا، عامل تقویت جوانه‌زنی ناهمگن و کاهش قابل ملاحظه اندازه دانه‌ها گزارش شد. مطالعات میکروسکوپ الکترونی عبوری، انطباق کریستالوگرافی خوب در فصل مشترک بین  $\alpha\text{-Al}$  و  $\text{L}_{12}\text{-Al}_3\text{Ti}$  را تأیید کرد؛ همچنین هیچگونه ترک یا اعوجاج شبکه‌ای در فصل مشترک مشاهده نشد. علاوه بر فاز  $\text{L}_{12}\text{-Al}_3\text{Ti}$ ، ذرات  $\text{TiB}_2$  با اندازه 100 nm هم در داخل و هم در بین دانه‌ها مشاهده شد. برخی از نانوذرات  $\text{TiB}_2$  درون دانه‌ها می‌توانند جوانه‌زنی ناهمگن را تقویت کنند و برخی دیگر از آن‌ها به مرزدانه‌ها رانده شده و همانند ذرات قفل‌شده زبر عمل می‌کنند که از مهاجرت مرزدانه‌ها برای مهار بیشتر رشد دانه‌های  $\alpha\text{-Al}$  جلوگیری می‌کند. ترکیب  $\text{Al}_3\text{Ti}$  از نظر تئوری به دلیل صفحات کریستالوگرافی تئوریک بیشتر برای رشد هم‌پافته  $\alpha\text{-Al}$  و عدم تطابق شبکه‌ای کمتر با آن، هسته جوانه‌زنی قوی‌تری نسبت به  $\text{TiB}_2$  است [45]. شکل (5) طرح‌واره‌ای از تشکیل دانه‌های هم‌محور در آلیاژ  $(\text{TiH}_2+\text{B})/\text{AA7075}$  را نشان می‌دهد. بعد از عملیات حرارتی T6، خواص مکانیکی عالی از جمله استحکام کششی 582 MPa و ازدیاد طول 12/8% حاصل شد؛ این در حالی است که نمونه‌های بدون افزودنی به دلیل حضور ترک‌های انجمادی، رفتار شکست کاملاً ترد از خود نشان دادند و حداکثر استحکام کششی 58 MPa و ازدیاد طول کمتر از 1% را ثبت کردند.



لیو و همکاران [44] نیز با افزودن نانوذرات  $\text{TiC}$  و  $\text{TiH}_2$  به آلیاژ آلومینیوم 2024 به نتایج مشابهی دست یافتند. به دلیل اثر ترکیبی دو ذره به کار رفته‌شده در تقویت جوانه‌زنی  $\alpha\text{-Al}$ ، ریزساختار از دانه‌های ستونی با میانگین سطح  $729 \mu\text{m}^2$  به

(4/05 A و 4/04 A به ترتیب برای آلومینیوم و  $\text{L}_{12}\text{-Al}_3\text{Ti}$ )، انطباق اتمی خوبی در فصل مشترک میان آن‌ها وجود دارد و جوانه‌زای بهتری برای آلومینیوم می‌باشد. علاوه بر این، در مقایسه با فاز ترد  $\text{D}_{022}$  (با ساختار تتراگونال)، فاز  $\text{L}_{12}$  با ساختار FCC به دلیل سامانه‌های لغزشی مستقل بیشتر، شکل‌پذیری بیشتری دارد. از این رو، افزودن درصد ناچیزی از تیتانیوم در فرایند LPBF آلیاژهای آلومینیوم می‌تواند منجر به ریزدانه‌گی قابل توجه همراه با بهبود عملکرد مکانیکی شود [8]. در مقایسه با ریزساختار ستونی درشت (دانه‌هایی با عرض 10 الی  $80 \mu\text{m}$  و طول صدها میکرومتر) در آلیاژ بدون افزودنی، ریزساختار ظریف هم‌محور (با متوسط اندازه دانه  $2 \mu\text{m}$ ) در آلیاژ دارای افزودنی، مقاومت بسیار بالایی در برابر ترک‌های انجمادی حین سردشدن دارد. علاوه بر این، تشکیل ریزساختار ظریف هم‌محور به نحو مؤثری از ناهمسانگردی خواص جلوگیری کرده و به طور همزمان، استحکام و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد [8].



شکل 4- تصاویر ایزومتریک میکروسکوپ نوری نمونه‌های LPBF

الف - آلیاژ آلومینیوم با 0/7% وزنی نانوذرات تیتانیوم،

ب - آلیاژ آلومینیوم 2024، نگاشت‌های جهت‌گیری به دست آمده از پراش

الکترون‌های بازگشتی از مقاطع موازی با جهت ساخت نمونه‌های LPBF

ج - آلیاژ الف، د - آلیاژ ب [8].

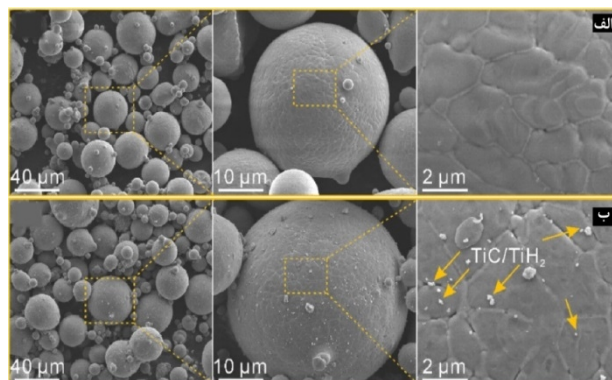
تبدیل دانه‌های ستونی درشت به دانه‌های هم‌محور همگن، کاهش میانگین اندازه دانه‌ها از  $29/1 \mu\text{m}$  به  $2/3 \mu\text{m}$  و متعاقباً حذف ترک‌های انجمادی از طریق مخلوط کردن 0/8% وزنی از

ژانگ و همکاران [59] به جای استفاده از ذرات جوانه‌زای نانومتری، از پودرهای میکرومتری زیرکونیوم با متوسط اندازه ذرات  $8/8 \mu\text{m}$  و شکل غیرکروی در پودر آلیاژی افزایش گازی Al-Cu-Mg با ترکیب اسمی 4/24% مس، 1/97% منیزیم، 0/56% منگنز و آلومینیوم (به درصد وزنی) و متوسط اندازه ذرات  $36 \mu\text{m}$  استفاده کردند. مخلوط پودر 2% وزنی زیرکونیوم و 98% وزنی Al-Cu-Mg از طریق اختلاط مکانیکی به مدت 4 ساعت در اتمسفر گاز آرگون به دست آمد. همانند ترکیب بین فلزی  $\text{Al}_3\text{Ti}$ ، تشکیل  $\text{Al}_3\text{Zr}$  به صورت درجا در طول انجماد، جوانه‌زنی ناهگمن  $\alpha\text{-Al}$  را ترغیب می‌کند و سبب ریزدانه‌گی و مهار رشد دانه‌های ستونی درشت می‌شود. به نظر می‌رسد که عناصر تیتانیوم، زیرکونیوم، هافنیوم و اسکاندیوم رفتار شیمیایی مشابهی با آلومینیوم داشته باشند و به دلیل قابلیت تشکیل ترکیب بین فلزی  $\text{Al}_3\text{M}$  ( $\text{M}=\text{Zr}, \text{Ti}, \text{Hf}, \text{Sc}$ ) با ساختار  $\text{L}_{12}$  که عدم تطابق پارامتر شبکه‌ای بسیار کمی با  $\alpha\text{-Al}$  دارد، جوانه‌زای مؤثری برای آلومینیوم باشند. نتایج EBSD نشان داد که افزودن زیرکونیوم ضمن کاهش اندازه دانه‌ها سبب افزایش جهت‌گیری تصادفی آن‌ها و در نتیجه کاهش ناهمسانگردی در خواص می‌شود. استحکام کششی نهایی از 393 MPa به 451 MPa افزایش یافت اما ازدیاد طول از 6% به 2/67 کاهش یافت. با استفاده از نتایج XRD، FESEM و EBSD تأثیر افزودنی زیرکونیوم بر حساسیت به ترک مورد مطالعه قرار گرفت. افزودن زیرکونیوم به دلیل تشکیل فاز با نقطه ذوب بسیار پایین که توانایی ترمیم ترک‌های ایجادشده در ناحیه خمیری در مرحله نهایی انجماد را دارد، حساسیت به ترک انجمادی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این اثر، حضور زیرکونیوم سبب تشکیل دانه‌های بسیار ریز و هم‌محور می‌شود. این دانه‌های ریز، مساحت کلی مرزدانه‌ها در یک حجم مشخص را افزایش می‌دهند که می‌تواند سبب تقویت زمینه و جلوگیری از ترک‌های بین دانه‌ای شود.

اثر افزودن مقادیر ناچیز اسکاندیوم و زیرکونیوم و همچنین متغیرهای فرایند بر ریزساختار و رفتار مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 7075 توسط بی و همکاران [53] مورد مطالعه قرار گرفت.

دانه‌های هم‌محور با میانگین سطح  $3/4 \mu\text{m}^2$  تبدیل شد. همچنین ترک‌ها به دلیل ریزشدن دانه‌ها از بین رفتند. همچنین به دلیل اثر هم‌افزایی استحکام‌بخشی ناشی از ریزدانه‌گی و اثر اوروان، کامپوزیت TiC-TiH<sub>2</sub>/AA2024 خواص مکانیکی بسیار خوبی اعم از استحکام کششی 390 MPa و ازدیاد طول 12% از خود نشان داد. این در حالی است که نمونه بدون افزودنی، استحکام کششی و ازدیاد طول به ترتیب 240 MPa و 0/3% را ثبت کرد. عملیات حرارتی T6 منجر به افزایش بیشتر استحکام کششی و ازدیاد طول تا 490 MPa و 16% شد. این خواص با خواص آلیاژ آلومینیوم 2024 کارشده قابل مقایسه است.

شکل (6) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودرهای استفاده شده در کار لئو را نشان می‌دهد. پودر کامپوزیتی با افزودن نانوذرات ( $\text{TiC}$  و  $\text{TiH}_2$  <500 nm) به پودرهای میکرومتری ( $D_{50}=28/3 \mu\text{m}$ ) آلیاژ آلومینیوم 2024 و مخلوط کردن آن‌ها از طریق آسیابکاری گلوله‌ای کم‌انرژی در اتمسفر آرگون به دست آمد. گفتنی است که دلیل پایدار کردن عناصری چون تیتانیوم و زیرکونیوم با هیدروژن ( $\text{ZrH}$ ,  $\text{TiH}_2$ ) در کارهای ذکرشده، جلوگیری از اکسیداسیون آن‌ها در اتمسفر هوا و فراهم کردن اتم‌های تازه تیتانیوم و زیرکونیوم در فرایند LPBF است چرا که هیدرید این عناصر پس از برخورد لیزر و افزایش دما به سرعت تجزیه‌شده و عناصر مطلوب را فراهم می‌کند. در صورتی که مقدار این هیدریدها زیاد باشد، گاز هیدروژن آزادشده می‌تواند منجر به تخلخل‌های گازی در ساختار و کاهش تراکم نسبی نمونه‌ها شود.



شکل 6- تصاویر SEM پودرهای الف - آلیاژ آلومینیوم 2024 و

ب - کامپوزیت آلیاژ آلومینیوم 2024/TiC-TiH<sub>2</sub> [44].

نانوذرات سرامیکی  $\text{CaB}_6$  و زمینه  $\alpha\text{-Al}$  نشان‌دهنده بهره‌وری بالای  $\text{CaB}_6$  به عنوان جوانه‌زای آلومینیوم است. کاهش قابل توجه اندازه دانه‌های  $\alpha\text{-Al}$  تا  $0.91\text{ }\mu\text{m}$  گزارش شد. فراهم کردن مکان ترجیحی برای جوانه‌زنی ناهمگن و اعمال نیروهای قفل‌کننده روی مرزدهانه‌ها توسط نانوذرات  $\text{CaB}_6$ ، از رشد بیشتر دانه‌ها جلوگیری می‌کند. استحکام تسلیم، استحکام کششی، ازدیاد طول و سختی نمونه‌های بهبودیافته به ترتیب  $348\text{ MPa}$ ،  $391\text{ MPa}$ ،  $12/6$  و  $132\text{ HV}_{0.5}$  گزارش شد. شکل (7) تصاویر میکروسکوپ پرتو ایکس (XRM) نمونه‌های LPBF مربوط به آلیاژ آلومینیوم قبل و پس از افزودن نانوذرات  $\text{CaB}_6$  می‌باشد که نشان‌دهنده تأثیر چشمگیر نانوذرات در حذف ترک‌های انجمادی است.

أتانی و همکاران [63] تأثیر مقدار سیلیسیم بر فرایندپذیری و خواص نمونه‌های LPBF آلیاژ 7075 را مطالعه کردند. نشان داده شد که تراکم نمونه‌ها با افزایش مقدار سیلیسیم افزایش می‌یابد. حداکثر چگالی نسبی  $100/2\%$  (چگالی ارشمیدس) در آلیاژ آلومینیوم 7075 حاوی  $5\%$  وزنی سیلیسیم در شرایط بهینه‌شده لیزر (توان  $195\text{ W}$  و سرعت اسکن  $1000\text{ mm/s}$ ) به دست آمد. افزودن سیلیسیم همچنین در جلوگیری از تشکیل عیوبی مانند حفرات و ترک‌ها مؤثر بود. با افزایش مقدار سیلیسیم سرعت انجماد و نرخ سرمایش کاهش می‌یابد چرا که حین انجماد، سیلیسیم چهار برابر گرمای نهان بیشتری نسبت به آلومینیوم آزاد می‌کند. این اتفاق زمان بیشتری برای فرار حباب‌های گازی محبوس در مذاب فلزی پیش از انجماد فراهم می‌کند. از این رو، یکی از ساز و کارهای افزایش تراکم نسبی و کاهش تخلخل‌های گازی با افزایش مقدار سیلیسیم ناشی از همین امر می‌باشد. یکی از دلایل ممکن برای جلوگیری از ترک‌ها با افزایش مقدار سیلیسیم، کاهش انبساط حرارتی عنوان شد. سیلیسیم ضریب انبساط حرارتی بسیار کمتری از آلومینیوم دارد بنابراین افزودن آن می‌تواند منجر به کاهش تغییرات حجم حین تغییر دما باشد. این کاهش سبب افت نیروی محرکه تشکیل ترک می‌شود. در یک کار مشابه ماریا و همکاران [19] ضمن تایید کاهش ضریب انبساط حرارتی با افزودن سیلیسیم،

آن‌ها برای تهیه مخلوط پودری از آسیاکاری گلوله‌ای سیاره‌ای با سرعت چرخش 200 دور بر دقیقه، مدت زمان 4 ساعت و نسبت گلوله به پودر 1:1 استفاده کردند. نسبت آلیاژ آلومینیوم، پودر خالص اسکاندیوم و زیرکونیوم به ترتیب  $99/35\%$ ،  $0/4\%$  و  $0/25\%$  (درصد وزنی) انتخاب شد. همچنین متوسط اندازه ذرات آلیاژ آلومینیوم، اسکاندیوم و زیرکونیوم به ترتیب  $41/37\text{ }\mu\text{m}$ ،  $74\text{ }\mu\text{m}$  و  $37\text{ }\mu\text{m}$  گزارش شد. از آن جایی که چگالی انرژی لیزر نقش مهمی در تعیین دمای حوضچه مذاب، انتقال حرارت و جریان سیال دارد، توزیع و نفوذ ذرات اسکاندیوم و زیرکونیوم با تغییر چگالی انرژی لیزر تغییر می‌کند. توزیع یکنواخت اسکاندیوم و زیرکونیوم در زمینه آلومینیوم در چگالی‌های انرژی بالاتر ( $375\text{ J/mm}^3$ ) به دست آمد. در اثر واکنش عناصر زیرکونیوم و اسکاندیوم با زمینه آلومینیوم در فاز مذاب، رسوبات  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$  تشکیل می‌شوند. این رسوبات به عنوان مکان‌های مرجع برای جوانه‌زنی ناهمگن آلومینیوم عمل می‌کنند و به همین واسطه به طور همزمان سبب ریزدانه‌گی، مهار ترک‌های انجمادی و افزایش خواص مکانیکی می‌شوند.

اریوم نیز با تشکیل فاز  $\text{Al}_3\text{Er}$  با فصل مشترک همسایه با زمینه آلومینیوم سبب ریزدانه‌گی و کاهش طول دانه‌های ستونی از  $106\text{ }\mu\text{m}$  به  $84\text{ }\mu\text{m}$  و در نتیجه حذف ترک‌های انجمادی در آلیاژ آلومینیوم 7075 شد [62]. فاز  $\text{Al}_3\text{Er}$  همچنین باعث کاهش شدت بافت ریزساختار و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های حرارتی شد. استحکام کششی و ازدیاد طول نمونه‌های با افزودنی اریوم به ترتیب  $338\text{ MPa}$  و  $15/9\%$  گزارش شد که این مقادیر به ترتیب  $32\%$  و  $74/7\%$  بیشتر از نمونه‌های بدون افزودنی اریوم است.

افزودن  $2\%$  وزنی از نانوذرات  $\text{CaB}_6$  فرایندپذیری و عملکرد آلیاژ آلومینیوم 2024 را به نحو چشمگیری افزایش داد [66]. نمونه‌های با تراکم بالا ( $>99/5\%$ ) و بدون ترک با ریزساختار هم‌محور و همگن و بدون جهت‌گیری ترجیحی دانه‌ها به دست آمدند. به دلیل ثوابت شبکه یکسان آلومینیوم و  $\text{CaB}_6$ ، آلومینیوم به راحتی روی نانوذرات  $\text{CaB}_6$  جوانه‌زنی می‌کند و فصل مشترک بسیار همسایه به وجود می‌آید. این فصل مشترک بین

در طول فرایند LPBF تأمین شود چرا که حذف کامل اکسیژن از اتمسفر محافظ غیرممکن است. برای بررسی بیشتر ساز و کار ریزدانه شدن و جلوگیری از ترک در آلیاژ آلومینیوم 2219/نانوذرات  $\text{TiO}_2$  ساخته شده به روش LPBF، مسیرهای انجمادی (دما بر حسب کسر مولی جامد و جذر کسر مولی جامد) برای هر دو آلیاژ بدون و با افزودنی  $\text{TiO}_2$  با استفاده از نرم افزار ترموکلک محاسبه شد (شکل 8). همانطور که در شکل (8) نشان داده شده است، آلیاژ آلومینیوم 2219 دارای محدوده دمایی انجماد نسبتاً بزرگی ( $\sim 120^\circ\text{C}$ ) است که منجر به حساسیت به ترک بالای این آلیاژ می شود. ترک های انجمادی عموماً زمانی که انجماد آلیاژ در حال تکمیل شدن است ( $f_s > 0.9$ ) اتفاق می افتد. در آلیاژهای آلومینیوم مقدار بیشینه  $|dT/(f_s)^{1/2}|$  در  $1 \approx (f_s)^{1/2}$  یک معیار بحرانی برای حساسیت به ترک است. مقادیر بالای  $|dT/(f_s)^{1/2}|$  نشان دهنده سرعت کم رشد جانبی دانه های ستونی (که مقاومت در برابر ترک را افزایش می دهد) و کانال مذاب طولانی تر است، به طوری که ترمیم ترک ها توسط مذاب دشوارتر می شود. مقدار بیشینه  $|dT/(f_s)^{1/2}|$  برای آلیاژ آلومینیوم 2219 و به طور مشابه برای آلیاژ آلومینیوم 2219/نانوذرات  $\text{TiO}_2$  بسیار زیاد است که نشان دهنده حساسیت بالای هر دو آلیاژ به ترک گرم می باشد. از این رو، نویسندگان به این نتیجه رسیدند که ریزدانه شدن و جلوگیری از ترک در نمونه های چاپ شده آلیاژ آلومینیوم 2219/نانوذرات  $\text{TiO}_2$  نمی تواند توسط احیای  $\text{TiO}_2$  در محدوده دمایی انجماد فعال شده باشد.

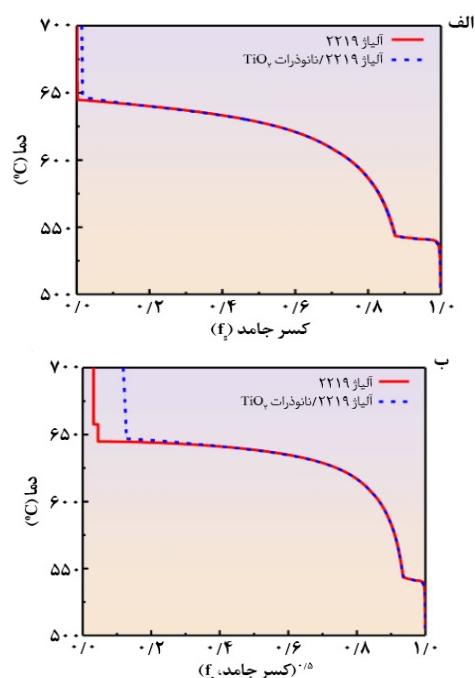
بر خلاف کار تان [8] و ژانگ [42] که تشکیل رسوبات  $\text{Al}_3\text{Ti}$  به صورت درجا عامل جوانه زنی ناهمگن آلومینیوم و ریزدانه شدن آن گزارش شد، هیچگونه شواهدی از رسوبات  $\text{Al}_3\text{Ti}$  در کار لی مشاهده نشد. در عوض، ذرات تیتانیوم با نفوذ سریع در حوضچه مذاب تحت همرفت مارانگونی به طور یکنواخت در سرتاسر زمینه آلومینیوم پراکنده شدند. نگاشت های عنصری EDS از نمونه های ساخته شده حاوی نانوذرات  $\text{TiO}_2$  این موضوع را تأیید کرد. بنابراین، عناصر محلول تیتانیوم به عنوان کمک کننده اصلی در ریزدانه شدن آلیاژ

بهبود سیالیت مذاب و کاهش دامنه انجماد را به عنوان دلایل حذف ترک های انجمادی عنوان کردند. همچنین گزارش شد اگرچه افزودن سیلیسیم می تواند تراکم نسبی را افزایش و ترک های انجمادی را حذف کند اما این اصلاح می تواند به قیمت کاهش شکل پذیری تمام شود. در کار ماریا مقدار 4% وزنی به عنوان مقدار بهینه سیلیسیم در آلیاژ آلومینیوم 7075 گزارش شد.

لی و همکاران [64] یک افزودنی اکسیدی مقرون به صرفه برای جلوگیری از ترک های انجمادی در آلیاژهای آلومینیوم معرفی کردند. نشان داده شد که افزودن 1% وزنی از نانوذرات  $\text{TiO}_2$  به آلیاژ آلومینیوم 2219 می تواند از طریق ریزدانه کردن از تشکیل ترک های گرم در فرایند LPBF جلوگیری کند.

همچنین تراکم نسبی نمونه ها به مقدار بسیار بالای 99/97% رسید. لازم به ذکر است که در نمونه های ساخته شده، افزودنی های نانومتری  $\text{TiO}_2$  شناسایی نشدند و در نظر گرفته شد که این ذرات از طریق واکنش احیای آلومینوترمیک تجزیه می شوند ( $4\text{Al} + 3\text{TiO}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Ti}$ ). گفته شد که در فرایند LPBF آلیاژهای آلومینیوم، دمای حوضچه مذاب می تواند تا  $2000^\circ\text{C}$  برسد که این دما بیشتر از نقطه ذوب  $\text{TiO}_2$  ( $\sim 1840^\circ\text{C}$ ) است. علاوه بر این، با محاسبات ترمودینامیکی نشان داده شد که انرژی آزاد گیبس استاندارد واکنش فوق یک مقدار منفی بزرگ است؛ نتیجه گیری شد که این واکنش می تواند به راحتی انجام شود و روند بزرگی داشته باشد. طبق واکنش، ذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و اتم های تیتانیوم در فصل مشترک ذرات  $\text{TiO}_2$  و مذاب آلومینیوم تولید می شوند در حالی که دمای مذاب به دلیل آزاد شدن گرمای زیاد ناشی از واکنش آلومینیوم و  $\text{TiO}_2$  افزایش می یابد. این افزایش دما به همراه همرفت مارانگونی شدید در حوضچه مذاب می تواند منجر به نفوذ سریع اتم های تیتانیوم در داخل حوضچه مذاب شود. علاوه بر این، اکسیژن حاصل از تجزیه  $\text{TiO}_2$  می تواند منجر به تشکیل اکسیدهایی مانند  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و شاید  $\text{AlCuO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{CuO}_4$  در مرز دانه شود. به علاوه، منبع اکسیژن در اکسیدها می تواند از لایه اکسیدی موجود بر روی پودرهای اولیه آلومینیوم و اکسیژن باقیمانده در محفظه ساخت

آلومینیوم 2219/نانوذرات  $\text{TiO}_2$  با مقدار Q بزرگتر (245/6) نسبت به آلیاژ آلومینیوم 2219 (18) ناشی از مقدار بالای  $m(k-1)$  تیتانیوم، تحت تبرید بزرگتری در جلوی جبهه انجماد تجربه می‌کند که شرایط برای جوانه‌زنی همگن را مهیا می‌سازد و منجر به ریزدانه‌گی می‌شود. پس از اصلاح ریزساختار، دانه‌های ستونی درشت با عرض  $10 - 60 \mu\text{m}$  و طول صدها میکرومتر که معرف رشد همبافت دانه‌ها است، جای خود را به دانه‌های هم‌محور با قطر  $3/0 - 0/5 \mu\text{m}$  و دانه‌های ستونی با طول کمتر از  $50 \mu\text{m}$  دادند. کامپوزیت آلیاژ آلومینیوم 2219/نانوذرات  $\text{TiO}_2$  ترکیب عالی‌ای از استحکام کششی و ازدیاد طول هم در دمای محیط و هم در دماهای متوسط ( $\sim 315^\circ\text{C}$ ) از خود نشان داد که این خواص قابل مقایسه با همتایان کار شده خود و بالاتر از آلیاژهای آلومینیوم 2219 ساخته‌شده با سایر روش‌های ساخت افزایشی می‌باشد.

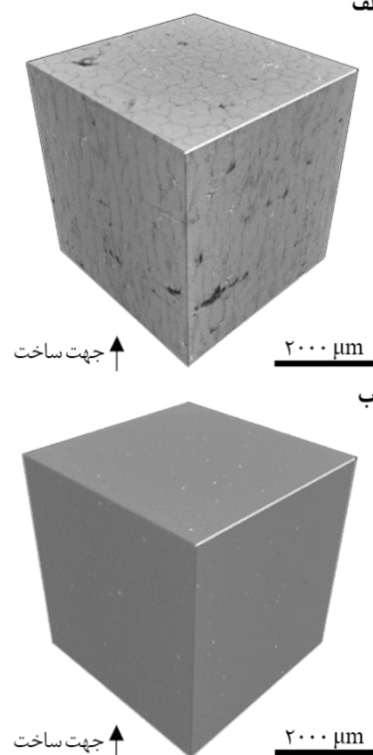


شکل 8- مسیرهای انجمادی محاسبه‌شده برای دو آلیاژ با و بدون افزودنی نانوذرات  $\text{TiO}_2$  الف - دما بر حسب کسر جامد و ب- دما بر حسب جذر کسر جامد [64].

## 5- نتیجه‌گیری و آینده پژوهش

ذوب لیزری بستر پودر به عنوان یکی از روش‌های اصلی ساخت افزایشی فلزات، توانایی منحصر به فردی در ساخت

حاوی  $\text{TiO}_2$  معرفی شدند. به عبارت دیگر، عناصر محلول تیتانیوم به تحت تبرید ترکیبی در فاز مذاب در جلوی جبهه انجماد کمک می‌کنند به طوری که تحت تبرید کلی از تحت تبرید بحرانی برای جوانه‌زنی همگن فراتر می‌رود. در نتیجه، رشد دانه در آلیاژ بهینه‌شده با نانوذرات  $\text{TiO}_2$  محدود شده و منجر به ریزدانه‌گی می‌شود. بهره‌وری یک عنصر محلول در افزایش تحت تبرید ترکیبی با بزرگی ضریب محدودیت رشد (Q) متناسب است که مقدار آن را می‌توان با محاسبه رابطه  $Q = m(k-1)C_0$  به دست آورد. در این رابطه  $k$  و  $C_0$  به ترتیب شیب خط لیکوئیدوس، ضریب تفکیک و غلظت عنصر محلول می‌باشد.



شکل 7- تصاویر XRM نمونه‌های LPBF الف - آلومینیوم 2024، ب - آلومینیوم 2024/نانوذرات  $\text{CaB}_6$  [66].

اندازه دانه یک آلیاژ (d) طبق رابطه  $d = a + \frac{b}{Q}$  با معکوس Q ارتباط دارد. در این رابطه a و b به ترتیب ثوابت مربوط به چگالی ذرات جوانه‌زا و پتانسیل آن‌ها است. این رابطه نشان می‌دهد که یک عنصر محلول با مقدار Q بزرگ می‌تواند به سرعت تحت تبرید ترکیبی را در جلوی فصل مشترک جامد-مذاب افزایش داده و منجر به ریزدانه‌گی قابل توجه شود. آلیاژ



آلیاژ، پیشنهاد تحقیق برای یافتن یک راهکار کارآمد و ارائه یک محصول بی عیب و نقص است.

از میان راه حل‌های ارائه‌شده، کنترل ریزساختار انجمادی و ریزدانه‌کردن مؤثرترین روش جلوگیری از ترک‌های انجمادی در آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالا است. در این تحقیق، نخست به بررسی ساز و کارهای تشکیل ترک‌های انجمادی در آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالا، سپس به بررسی تأثیر افزودنی‌های مختلف برای مهار یا کاهش ترک‌های انجمادی از طریق کنترل ریزساختار و ریزدانه‌کردن پرداخته شد. خلاصه‌ای از نتایج تحقیق حاضر به شرح زیر است:

در طول انجماد آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالا در فرایند ذوب لیزری بستر پودر، دانه‌های ستونی در جهت شیب حرارتی رشد می‌کنند و مذاب بین دندریتی در فصل مشترک باقی می‌گذارند که در صورت توانان شدن با تنش‌های انقباضی منجر به تشکیل ترک می‌شوند. ساختارهای هم‌محور و ریزدانه به دلیل تطبیق‌پذیری بیشتر با کرنش نسبت به ساختارهای ستونی یا دندریتی درشت و همچنین تغذیه مؤثرتر مذاب برای ترمیم ترک‌های ایجادشده، مقاومت بیشتری در برابر ترک‌های انجمادی دارند.

با افزودن درصد ناچیزی از عناصر یا ترکیب‌های مختلف به آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالا می‌توان با ایجاد ریزساختار ظریف و هم‌محور به جای دانه‌های ستونی و درشت، از ترک‌های انجمادی جلوگیری کرد. به طور کلی، افزودنی که بتواند یکی از این سه قابلیت را داشته باشد می‌تواند در کنترل ترک‌های انجمادی مؤثر واقع شود:

- جوانه‌زنی ناهمگن را ترغیب کند (یا خود جوانه‌زا باشد یا از طریق واکنش‌های درجا محصول جوانه‌زا تولید کند)،

- با تجزیه و نفوذ یا نفوذ مستقیم در مذاب، ضریب محدودیت رشد (Q) بالا ایجاد کند،

- با قفل کردن مرزدانه‌ها از رشد دانه‌ها و مهاجرت مرزدانه جلوگیری کند. با توجه به ساز و کار و میزان اثربخشی مختلف هرکدام از این روش‌ها، ممکن است یک روش (به ویژه روش‌های 2 و 3) به تنهایی مؤثر نباشد و نیاز به استفاده از

قطعات صنعتی پیچیده و با عملکرد بالا دارد به طوری که در دهه اخیر جایگاه ویژه‌ای در صنایع پیشرفته مختلف از جمله هوافضا، خودرو و پزشکی پیدا کرده است. ماهیت افزودن لایه به لایه مواد در فرایندهای ساخت افزایشی، آزادی در طراحی را فراهم می‌کند به نحوی که بتوان از این قابلیت برای ساخت قطعات با وزن بسیار سبک‌تر و عملکرد مکانیکی مشابه یا حتی بهتر نسبت به سایر روش‌های مرسوم بهره گرفت. در حال حاضر، علی‌رغم توسعه آلیاژهای جدید یا بهبود فرایندپذیری آلیاژهای موجود، تعداد آلیاژهای قابل پردازش با این فرایند محدود است. امروزه با توجه به پیشرفت‌های روزافزون در صنایع گوناگون، استفاده از حداکثر پتانسیل فرایند ذوب لیزری بستر پودر برای آلیاژهای مهندسی مختلف یک ضرورت به حساب می‌آید و زمینه‌های تحقیقاتی زیادی ایجاد کرده است. چگالی کم و استحکام ویژه بالای آلیاژهای آلومینیوم در کنار قابلیت‌های این فرایند در بهینه‌سازی توپولوژی، اهمیت استفاده از این آلیاژها را دوچندان می‌کند.

در حال حاضر، آلیاژهای آلومینیوم قابل پردازش با این فرایند تنها محدود به ترکیبات مبتنی بر سامانه یوتکتیکی آلومینیوم-سیلیسیم است. اگرچه این آلیاژها قابلیت چاپ عالی از خود نشان داده‌اند اما از نظر خواص مکانیکی نمی‌توانند با آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا مانند سری 2xxx و 7xxx رقابت کنند و نیازهای صنعتی را برآورده سازند. آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالا به دلیل دامنه انجمادی وسیع و حساسیت بالا به ترک، فرایندپذیری ضعیفی دارند. عیوب متالورژیکی مانند حفرات گازی، عدم ذوب و ترک‌های گرم منجر به محدودیت استفاده از این آلیاژها در فرایند ذوب لیزری بستر پودر شده است. تحقیقات زیادی برای مرتفع کردن مشکلات مربوط به ساخت افزایشی لیزری آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالا صورت گرفته است و موفقیت‌هایی نیز حاصل شده است.

با این حال، ترک‌های انجمادی همچنان به عنوان جدی‌ترین مشکل ساخت آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالا با فرایند ذوب لیزری بستر پودر، یک موضع تحقیقاتی جذاب باقی‌مانده است. فهم عمیق‌تر ساز و کار تشکیل عیوب و ارتباط آن با ترکیب

تنزل خواص مکانیکی یا شیمیایی، جریان پذیری و قابلیت توزیع همگن می‌توانند به عنوان معیارهای انتخاب افزودنی مناسب در نظر گرفته شوند. محاسبات کریستالوگرافی (برای مثال بر اساس مدل لبه به لبه) و شبیه‌سازی‌های ترمودینامیکی و سینتیکی می‌توانند در طراحی یا بهبود افزودنی‌های مؤثرتر مفید باشند. برخی از مواد مانند اکسیدها، نیتrideها، بورایدها، کاربیدها و برخی آلوتروپ‌های پایه کربن از جمله گرافن و نانولوله‌های کربنی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و ممکن است افزودن آن‌ها خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم را بهبود بخشد. از این رو، مطالعه تأثیر آن‌ها می‌تواند زمینه‌ساز تحقیقات آینده باشد.

### منابع

- 1- E. Toyserkani, D. Sarker, O. O. Ibadode, F. Liravi, P. Russo, and K. Taherkhani, "Basics of Metal Additive Manufacturing," in *Metal Additive Manufacturing*, Wiley, 2021, pp. 31–90.  
doi: 10.1002/9781119210801.ch2.
- 2- T. M. Wischeropp, "Fundamentals," in *Advancement of Selective Laser Melting by Laser Beam Shaping*, T. M. Wischeropp, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, pp. 7–41.  
doi: 10.1007/978-3-662-64585-7\_2.
- 3- "Material Design and Considerations for Metal Additive Manufacturing," in *Metal Additive Manufacturing*, Wiley, 2021, pp. 297–382.  
doi: 10.1002/9781119210801.ch8.
- 4- T. B. Sercombe and X. Li, "Selective laser melting of aluminium and aluminium metal matrix composites: review," *Materials Technology*, vol. 31, no. 2, pp. 1–9, Mar. 2016.  
doi: 10.1179/1753555715Y.00000000078.
- 5- J. L. Leirimo and I. Baturynska, "Challenges and proposed solutions for aluminium in laser powder bed fusion," *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 114–119, Jan. 2020.  
doi: 10.1016/J.PROCIR.2020.03.090.
- 6- X. Zhang, H. Zheng, and W. Yu, "A review on solidification cracks in high-strength aluminum alloys via laser powder bed fusion," *Mater Today Proc*, Sep. 2022.  
doi: 10.1016/J.MATPR.2022.09.366.
- 7- N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, and R. Hague, "3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting," *Prog Mater Sci*, vol. 106, p. 100578, Dec. 2019.  
doi: 10.1016/J.PMATSCI.2019.100578.
- 8- Q. Tan et al., "Inoculation treatment of an additively manufactured 2024 aluminium alloy with titanium nanoparticles," *Acta Mater*, vol. 196, pp. 1–16, Sep. 2020.

چندین افزودنی با ساز و کار متفاوت باشد (مانند کارلیو و همکاران [44] که استفاده همزمان از  $\text{TiC}$  و  $\text{TiH}_2$  نسبت به استفاده از هرکدام از آن‌ها به تنهایی نتیجه بهتری به دست می‌دهد).

در صورتی که هدف، بهبود فرایندپذیری یک آلیاژ باشد، عدم ایجاد تغییرات عمده در ترکیب آلیاژ و متعاقباً خواص مورد نظر اهمیت پیدا می‌کند. از این رو، روش‌هایی که نیازمند مقادیر بیشتر از 1% وزنی افزودنی دارد توجیه‌ناپذیر است. مانند عنصر سیلیسیم که حداقل 4% وزنی از آن برای حذف ترک‌های آلیاژ آلومینیوم 7075 مورد نیاز است.

با توجه به حجم کوچک مذاب و عمر کوتاه آن در فرایند ذوب لیزری بستر پودر، توزیع یکنواخت و همگن افزودنی‌ها در پودر آلیاژ مخلوط شده اهمیت دارد. همچنین در مواردی که جوانه‌زا از طریق واکنش درجا تولید می‌شود، فراهم کردن سطح بیشتر برای واکنش همگن و سریع‌تر ضروری است. از این رو، استفاده از افزودنی‌های کوچک‌تر از 1 میکرومتر یا حتی نانومتری با ایجاد توزیع همگن‌تر و سطح بیشتر، مؤثرتر هستند. با کاهش اندازه ذرات پودر عناصری مانند تیتانیوم و زیرکونیوم که میل زیادی به واکنش با اکسیژن دارند، فعالیت شیمیایی آن‌ها افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین محافظت از آن‌ها در برابر اتمسفر هوا ضروری بوده و نیازمند رعایت الزامات ویژه‌ای در نگهداری و حمل و نقل می‌باشند تا احتمال آلودگی آن‌ها به حداقل برسد.

ریزدانه‌سازی آلیاژهای آلومینیوم استحکام‌بالا با افزودنی‌های مناسب، علاوه بر حذف ترک‌های انجمادی و بهبود فرایندپذیری، منجر به همسانگردی خواص و افزایش عملکرد مکانیکی قطعات می‌شود. این رویکرد حتی برای آلیاژهای دیگری که فرایندپذیری ضعیف آن‌ها ناشی از حساسیت بالا به ترک‌های انجمادی است کاربرد دارد. با توجه به کارآمدی این روش، تحقیق در خصوص یافتن افزودنی‌های جدید یا بهبود عملکرد افزودنی‌های موجود در آینده مهم خواهد بود.

بیشترین اثربخشی با کمترین مقدار افزودن، ایجاد فصل مشترک تمیز و هم‌سایم با زمینه، قیمت پایین، در دسترس بودن، عدم



- p. 100976, Mar. 2021.  
doi: 10.1016/J.MTLA.2020.100976.
- 19-M. L. Montero Sistiaga *et al.*, "Changing the alloy composition of Al7075 for better processability by selective laser melting," *J Mater Process Technol*, vol. 238, pp. 437–445, Dec. 2016.  
doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2016.08.003.
- 20-T. DebRoy *et al.*, "Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties," *Prog Mater Sci*, vol. 92, pp. 112–224, Mar. 2018.  
doi: 10.1016/J.PMATSCI.2017.10.001.
- 21-J. H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley, J. A. Mayer, T. A. Schaedler, and T. M. Pollock, "3D printing of high-strength aluminium alloys," *Nature*, vol. 549, no. 7672, pp. 365–369, 2017.  
doi: 10.1038/nature23894.
- 22-S. Kou, *Welding metallurgy third edition*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2020.
- 23-W. Kurz and D. J. Fisher, *Fundamentals of Solidification*, vol. 35. Trans Tech Publications, 1998.  
doi: 10.4028/www.scientific.net/RC.35.
- 24-D. M. Stefanescu and R. Ruxanda, "Fundamentals of Solidification," *Metallography and Microstructures*, pp. 71–92, Dec. 2004.  
doi: 10.31399/ASM.HB.V09.A0003724.
- 25-I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, and M. Khorasani, "Powder Bed Fusion," in *Additive Manufacturing Technologies*, I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, and M. Khorasani, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 125–170.  
doi: 10.1007/978-3-030-56127-7\_5.
- 26-L. Ladani and M. Sadeghilaridjani, "Review of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing for Metals," *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 9, p. 1391, Sep. 2021.  
doi: 10.3390/met11091391.
- 27-G. M. Volpato, U. Tetzlaff, and M. C. Fredel, "A comprehensive literature review on laser powder bed fusion of Inconel superalloys," *Addit Manuf*, vol. 55, p. 102871, Jul. 2022.  
doi: 10.1016/j.addma.2022.102871.
- 28-B. S. Rao and T. B. Rao, "Effect of Process Parameters on Powder Bed Fusion Maraging Steel 300: A Review," *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, vol. 9, no. 3, pp. 338–375, Sep. 2022.  
doi: 10.1007/s40516-022-00182-6.
- 29-S. R. Narasimharaju *et al.*, "A comprehensive review on laser powder bed fusion of steels: Processing, microstructure, defects and control methods, mechanical properties, current challenges and future trends," *J Manuf Process*, vol. 75, pp. 375–414, Mar. 2022.  
doi: 10.1016/J.JMAPRO.2021.12.033.
- 30-R. Bidulsky, F. S. Gobber, J. Bidulska, M. Ceroni, T. Kvackaj, and M. A. Grande, "Coated Metal Powders for Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) Processing: A Review," *Metals 2021, Vol. 11, Page 1831*, vol. 11, no. 11, p. 1831, Nov. 2021.  
doi: 10.3390/MET11111831.
- 31-S. Thapliyal *et al.*, "Design of heterogeneous  
doi: 10.1016/j.actamat.2020.06.026.
- 9-A. Sonawane, G. Roux, J. J. Blandin, A. Despres, and G. Martin, "Cracking mechanism and its sensitivity to processing conditions during laser powder bed fusion of a structural aluminum alloy," *Materialia (Oxf)*, vol. 15, p. 100976, Mar. 2021.  
doi: 10.1016/J.MTLA.2020.100976.
- 10-J. Elambasseril *et al.*, "Effect of process parameters and grain refinement on hot tearing susceptibility of high strength aluminum alloy 2139 in laser powder bed fusion," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 7, no. 5, pp. 887–901, Oct. 2022. doi: 10.1007/S40964-021-00259-2/FIGURES/13.
- 11-M. A. Pekok, R. Setchi, M. Ryan, Q. Han, and D. Gu, "Effect of process parameters on the microstructure and mechanical properties of AA2024 fabricated using selective laser melting," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, no. 1–2, pp. 175–192, Jan. 2021.  
doi: 10.1007/S00170-020-06346-Y/TABLES/3.
- 12-Q. Tan, Y. Liu, Z. Fan, J. Zhang, Y. Yin, and M. X. Zhang, "Effect of processing parameters on the densification of an additively manufactured 2024 Al alloy," *J Mater Sci Technol*, vol. 58, pp. 34–45, Dec. 2020.  
doi: 10.1016/J.JMST.2020.03.070.
- 13-L. Tonelli, E. Liverani, G. Valli, A. Fortunato, and L. Ceschini, "Effects of powders and process parameters on density and hardness of A357 aluminum alloy fabricated by selective laser melting," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 1–2, pp. 371–383, Jan. 2020.  
doi: 10.1007/S00170-019-04641-X/METRICS.
- 14-K. Riener, T. Pfalz, F. Funcke, and G. Leichtfried, "Processability of high-strength aluminum 6182 series alloy via laser powder bed fusion (LPBF)," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, no. 7–8, pp. 4963–4977, Apr. 2022.  
doi: 10.1007/S00170-022-08673-8/FIGURES/17.
- 15-G. Del Guercio *et al.*, "Cracking behaviour of high-strength AA2024 aluminium alloy produced by Laser Powder Bed Fusion," *Addit Manuf*, vol. 54, p. 102776, Jun. 2022.  
doi: 10.1016/J.ADDMA.2022.102776.
- 16-W. Stopyra, K. Gruber, I. Smolina, T. Kurzynowski, and B. Kuźnicka, "Laser powder bed fusion of AA7075 alloy: Influence of process parameters on porosity and hot cracking," *Addit Manuf*, vol. 35, p. 101270, Oct. 2020.  
doi: 10.1016/J.ADDMA.2020.101270.
- 17-W. Stopyra, K. Gruber, I. Smolina, T. Kurzynowski, and B. Kuźnicka, "Laser powder bed fusion of AA7075 alloy: Influence of process parameters on porosity and hot cracking," *Addit Manuf*, vol. 35, p. 101270, Oct. 2020.  
doi: 10.1016/J.ADDMA.2020.101270.
- 18-A. Sonawane, G. Roux, J. J. Blandin, A. Despres, and G. Martin, "Cracking mechanism and its sensitivity to processing conditions during laser powder bed fusion of a structural aluminum alloy," *Materialia (Oxf)*, vol. 15,

- Addit Manuf*, vol. 38, p. 101829, Feb. 2021.  
doi: 10.1016/j.addma.2020.101829.
- 43-G. Li *et al.*, "Facile and cost-effective approach to additively manufacture crack-free 7075 aluminum alloy by laser powder bed fusion," *J Alloys Compd*, vol. 928, p. 167097, Dec. 2022.  
doi: 10.1016/J.JALLCOM.2022.167097.
- 44-X. Liu, Y. Liu, Z. Zhou, K. Wang, Q. Zhan, and X. Xiao, "Grain refinement and crack inhibition of selective laser melted AA2024 aluminum alloy via inoculation with TiC-TiH<sub>2</sub>," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 813, p. 141171, May 2021.  
doi: 10.1016/J.MSEA.2021.141171.
- 45-B. Huang, Y. Liu, Z. Zhou, W. Cheng, and X. Liu, "Selective laser melting of 7075 aluminum alloy inoculated by Al-Ti-B: Grain refinement and superior mechanical properties," *Vacuum*, vol. 200, p. 111030, Jun. 2022.  
doi: 10.1016/J.VACUUM.2022.111030.
- 46-Q. Tan *et al.*, "A novel strategy to additively manufacture 7075 aluminium alloy with selective laser melting," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 821, p. 141638, Jul. 2021.  
doi: 10.1016/J.MSEA.2021.141638.
- 47-A. Mehta *et al.*, "Additive manufacturing and mechanical properties of the dense and crack free Zr-modified aluminum alloy 6061 fabricated by the laser-powder bed fusion," *Addit Manuf*, vol. 41, p. 101966, May 2021.  
doi: 10.1016/J.ADDMA.2021.101966.
- 48-Y. Guo *et al.*, "Effect of Er and Zr additions and aging treatment on grain refinement of aluminum alloy fabricated by laser powder bed fusion," *J Alloys Compd*, vol. 912, p. 165237, Aug. 2022.  
doi: 10.1016/J.JALLCOM.2022.165237.
- 49-H. Hyer *et al.*, "Elimination of extraordinarily high cracking susceptibility of aluminum alloy fabricated by laser powder bed fusion," *J Mater Sci Technol*, vol. 103, pp. 50–58, Mar. 2022.  
doi: 10.1016/J.JMST.2021.06.023.
- 50-X. Li, Y. Liu, and Z. Zhou, "Grain refinement and performance enhancement of laser powder bed fusion in-situ processed Al-Mg alloy modified by ScH<sub>3</sub> and ZrH<sub>2</sub>," *Mater Charact*, vol. 190, p. 112068, Aug. 2022.  
doi: 10.1016/J.MATCHAR.2022.112068.
- 51-A. Martin *et al.*, "Influence of the Zr content on the processability of a high strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy by laser powder bed fusion," *Mater Charact*, vol. 183, p. 111650, Jan. 2022.  
doi: 10.1016/J.MATCHAR.2021.111650.
- 52-Y. Wang *et al.*, "Laser powder bed fusion of Zr-modified Al-Cu-Mg alloy: Crack-inhibiting, grain refinement, and mechanical properties," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 838, p. 142618, Mar. 2022.  
doi: 10.1016/J.MSEA.2022.142618.
- 53-J. Bi *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of a novel Sc and Zr modified 7075 aluminum alloy prepared by selective laser melting," *Materials* structured Al alloys with wide processing window for laser-powder bed fusion additive manufacturing," *Addit Manuf*, vol. 42, p. 102002, Jun. 2021.  
doi: 10.1016/J.ADDMA.2021.102002.
- 32-Q. Li *et al.*, "Development of a high strength Zr/Sc/Hf-modified Al-Mn-Mg alloy using Laser Powder Bed Fusion: Design of a heterogeneous microstructure incorporating synergistic multiple strengthening mechanisms," *Addit Manuf*, vol. 57, p. 102967, Sep. 2022.  
doi: 10.1016/J.ADDMA.2022.102967.
- 33-N. Qbau, N. D. Nam, N. T. Hien, and N. X. Ca, "Development of light weight high strength aluminum alloy for selective laser melting," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 14075–14081, Nov. 2020.  
doi: 10.1016/J.JMRT.2020.09.088.
- 34-R. Li, M. Wang, Z. Li, P. Cao, T. Yuan, and H. Zhu, "Developing a high-strength Al-Mg-Si-Sc-Zr alloy for selective laser melting: Crack-inhibiting and multiple strengthening mechanisms," *Acta Mater*, vol. 193, pp. 83–98, Jul. 2020.  
doi: 10.1016/J.ACTAMAT.2020.03.060.
- 35-Q. Z. Wang, N. Kang, X. Lin, M. EL Mansori, and W. D. Huang, "High strength Al-Cu-Mg based alloy with synchronous improved tensile properties and hot-cracking resistance suitable for laser powder bed fusion," *J Mater Sci Technol*, vol. 141, pp. 155–170, Apr. 2023.  
doi: 10.1016/J.JMST.2022.09.027.
- 36-H. Hyer *et al.*, "High strength aluminum-cerium alloy processed by laser powder bed fusion," *Addit Manuf*, vol. 52, p. 102657, Apr. 2022.  
doi: 10.1016/J.ADDMA.2022.102657.
- 37-M. Buttard *et al.*, "Multi-scale microstructural investigation of a new Al-Mn-Ni-Cu-Zr aluminium alloy processed by laser powder bed fusion," *Materialia (Oxf)*, vol. 18, p. 101160, Aug. 2021.  
doi: 10.1016/J.MTLA.2021.101160.
- 38-A. Aversa *et al.*, "New Aluminum Alloys Specifically Designed for Laser Powder Bed Fusion: A Review," *Materials 2019, Vol. 12, Page 1007*, vol. 12, no. 7, p. 1007, Mar. 2019.  
doi: 10.3390/MA12071007.
- 39-X. Zhang, L. Li, Z. Wang, H. Peng, J. Gao, and Z. Peng, "A novel high-strength Al-La-Mg-Mn alloy for selective laser melting," *J Mater Sci Technol*, vol. 137, pp. 205–214, Feb. 2023.05.22.  
doi: 10.1016/J.JMST.2022.07.046.
- 40-P. Mair, I. Letofsky-Papst, and G. Leichtfried, "Microstructural features and mechanical properties of a novel Ti- and Zr-modified Al-Mn alloy processed by laser powder bed fusion," *J Alloys Compd*, vol. 897, p. 163156, Mar. 2022.  
doi: 10.1016/J.JALLCOM.2021.163156.
- 41-"3D Printed Aluminum, AM Powder Solution - Elementum 3D." <https://www.elementum3d.com/aluminum/> (accessed Jan. 07, 2023).
- 42-J. Zhang *et al.*, "A novel crack-free Ti-modified Al-Cu-Mg alloy designed for selective laser melting",

- alloy," *Virtual Phys Prototyp*, vol. 17, no. 2, pp. 406–418, 2022.  
doi:10.1080/17452759.2021.1990358/SUPPL\_FILE/NVPP\_A\_1990358\_SM0566.TIF.
- 62-M. Li *et al.*, "Role of Er on the densification, microstructure and mechanical properties of 7075 aluminium alloys manufactured by laser powder bed fusion," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 2021–2033, Sep. 2022.  
doi: 10.1016/J.JMRT.2022.08.004.
- 63-Y. Otani and S. Sasaki, "Effects of the addition of silicon to 7075 aluminum alloy on microstructure, mechanical properties, and selective laser melting processability," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 777, p. 139079, Mar. 2020.  
doi: 10.1016/J.MSEA.2020.139079.
- 64-G. Li, Y. Huang, X. Li, C. Guo, Q. Zhu, and J. Lu, "Laser powder bed fusion of nano-titania modified 2219 aluminium alloy with superior mechanical properties at both room and elevated temperatures: The significant impact of solute," *Addit Manuf*, vol. 60, p. 103296, Dec. 2022.  
doi: 10.1016/J.ADDMA.2022.103296.
- 65-Z. Fan, C. Li, H. Yang, and Z. Liu, "Effects of TiC nanoparticle inoculation on the hot-tearing cracks and grain refinement of additively-manufactured AA2024 Al alloys," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 19, pp. 194–207, Jul. 2022.  
doi: 10.1016/J.JMRT.2022.05.039.
- 66- P. Mair *et al.*, "Laser powder bed fusion of nano-CaB<sub>6</sub> decorated 2024 aluminum alloy," *J Alloys Compd*, vol. 863, p. 158714, May 2021.  
doi: 10.1016/J.JALLCOM.2021.158714.
- 67-Y. Li, D. Gu, H. Zhang, and L. Xi, "Effect of Trace Addition of Ceramic on Microstructure Development and Mechanical Properties of Selective Laser Melted AlSi10Mg Alloy," *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 33, no. 1, pp. 1–13, Dec. 2020.  
doi: 10.1186/S10033-020-00448-0/FIGURES/12.
- 68- L. Xi, K. Ding, H. Zhang, and D. Gu, "In-situ synthesis of aluminum matrix nanocomposites by selective laser melting of carbon nanotubes modified Al-Mg-Sc-Zr alloys," *J Alloys Compd*, vol. 891, p. 162047, Jan. 2022.  
doi: 10.1016/J.JALLCOM.2021.162047.
- Science and Engineering: A*, vol. 768, p. 138478, Dec. 2019.  
doi: 10.1016/J.MSEA.2019.138478.
- 54-Y. Guo *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Mn-Er-Zr alloys fabricated by laser powder bed fusion," *Mater Des*, vol. 222, p. 111064, Oct. 2022.  
doi: 10.1016/J.MATDES.2022.111064.
- 55-L. Zhou *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of Zr-modified aluminum alloy 5083 manufactured by laser powder bed fusion," *Addit Manuf*, vol. 28, pp. 485–496, Aug. 2019.  
doi: 10.1016/J.ADDMA.2019.05.027.
- 56-M. Schuster, A. De Luca, R. Widmer, X. Maeder, and C. Leinenbach, "Processability, microstructure and precipitation of a Zr-modified 2618 aluminium alloy fabricated by laser powder bed fusion," *J Alloys Compd*, vol. 913, p. 165346, Aug. 2022.  
doi: 10.1016/J.JALLCOM.2022.165346.
- 57-M. Opprecht, J. P. Garandet, G. Roux, C. Flament, and M. Soulier, "A solution to the hot cracking problem for aluminium alloys manufactured by laser beam melting," *Acta Mater*, vol. 197, pp. 40–53, Sep. 2020.  
doi: 10.1016/J.ACTAMAT.2020.07.015.
- 58-H. Zhang, H. Zhu, X. Nie, J. Yin, Z. Hu, and X. Zeng, "Effect of Zirconium addition on crack, microstructure and mechanical behavior of selective laser melted Al-Cu-Mg alloy," *Scr Mater*, vol. 134, pp. 6–10, Jun. 2017.  
doi: 10.1016/J.SCRIPTAMAT.2017.02.036.
- 59-H. Zhang, H. Zhu, X. Nie, J. Yin, Z. Hu, and X. Zeng, "Effect of Zirconium addition on crack, microstructure and mechanical behavior of selective laser melted Al-Cu-Mg alloy," *Scr Mater*, vol. 134, pp. 6–10, Jun. 2017.  
doi: 10.1016/J.SCRIPTAMAT.2017.02.036.
- 60-J. Lu *et al.*, "On the Sc induced solidification-heterogeneous microstructure in selective laser melted Al-5Mn alloys," *J Mater Process Technol*, vol. 304, p. 117562, Jun. 2022.  
doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2022.117562.
- 61-X. Zhang *et al.*, "Influence of erbium addition on the defects of selective laser-melted 7075 aluminium