



آلیاژسازی درجای آلیاژ آلومینیوم-مس به روش ذوب بستر پودر با لیزر: بررسی اثر عملیات حرارتی

علی مقاره عابد، محسن بدرسمای، علی مالکی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: maleki110@iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۴
پذیرش: ۳۱ مرداد ۱۴۰۴

چکیده

کلیدواژگان:

ذوب بستر پودر با لیزر
آلیاژسازی درجا
عملیات حرارتی
خواص مکانیکی

در سال‌های اخیر روش ذوب لیزری گزینشی که یکی از روش‌های جدید ساخت قطعات است، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. یکی از مشکلات عمده در استفاده از این فرایند نیاز به استفاده از پودرهای از پیش آلیاژ شده با ویژگی‌های مشخص است. استفاده از روش آلیاژسازی درجا این امکان را فراهم می‌کند که آلیاژهایی فراتر از آلیاژهای تجاری موجود نیز در این روش فرآوری شوند. بنابراین، توسعه روش‌هایی مانند آلیاژسازی درجا ضروری است. در این پژوهش، مخلوطی از پودر آلومینیوم و مس برای تهیه نمونه‌هایی از آلیاژ آلومینیوم-مس با استفاده از روش آلیاژسازی درجا از طریق ذوب بستر پودر با لیزر استفاده شده است. پس از دستیابی به پارامترهای بهینه برای تولید نمونه‌های آلیاژی متراکم، با توجه به اینکه این آلیاژ قابلیت عملیات حرارتی دارد، عملیات حرارتی در دماهای یکسان انجام شد تا زمان پیرسازی مناسب برای بهبود خواص مکانیکی مشخص شود. نتایج نشان داد که با افزایش زمان پیرسازی، ریزسختی افزایش می‌یابد. از طرفی، با کاهش زمان انحلال، ریزسختی کاهش پیدا می‌کند. در نهایت، افزایش میزان ریز سختی تا دو برابر نسبت به آلومینیوم خالص نشان داد که این آلیاژ نسبت به آلومینیوم خالص و آلیاژهای مشابه، ظرفیت قابل توجهی برای دستیابی به خواص مکانیکی بهبودیافته دارد. این نتایج با توجه به کاربری آلیاژهای آلومینیوم-مس در تولید قطعات پیشرفته‌های درون‌سوز خودروها بسیار حائز اهمیت بوده و چشم‌انداز خوبی را جهت استفاده از قطعات تولید شده با این آلیاژ به روش مذکور در صنعت خودروسازی نشان می‌دهد.

In-situ alloying of Al-Cu via LPBF: Effect of heat treatment

Ali Mogharehabed, Mohsen Badrossamay, Ali Maleki*

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* Corresponding Author's Email: maleki110@iut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 18 May 2025
Accepted: 22 August 2025

Keywords:

Laser Powder Bed Fusion
In-situ Alloying
Heat Treatment
Mechanical Properties

Abstract

The use of the laser powder bed fusion (LPBF) method, which is one of the novel production techniques, has received widespread attention. One of the significant issues using this process is the need to use pre-alloyed powders with specific properties. Using in-situ alloying enables the processing of alloys beyond those commercially available. Therefore, the development of methods such as in-situ alloying is necessary. This study used a mixture of aluminum and copper powder to prepare samples of in-situ Al-5Cu alloy through LPBF. After achieving optimum process parameters for producing dense alloy samples, considering that this alloy is heat treatable, a series of heat treatments were performed at similar temperatures to evaluate the effect of annealing as well as aging time on mechanical properties. According to the results, with increasing aging time, micro-hardness increased. On the other hand, as the solution time decreased, a micro-hardness lower than the as-built samples was achieved. Finally, the increase of microhardness up to twice that of pure aluminum showed a promising prospect of achieving improved mechanical properties in this alloy compared to pure aluminum and similar alloys. These results are highly significant considering the use of Al-Cu alloys in the production of internal combustion engine components for automobiles, and they highlight a promising outlook for the application of parts produced through this method in the automotive industry.

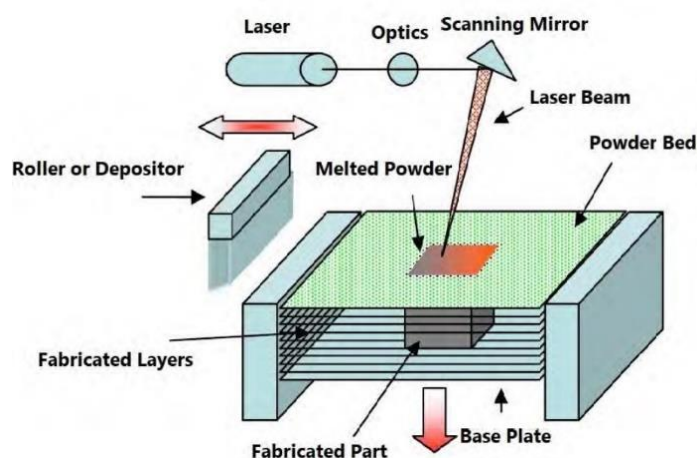
Please cite this article using:

Mogharehabad A, Badrossamay M, Maleki A. In-situ alloying of Al-Cu via LPBF: Effect of heat treatment. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Jul 23;12(5):29-36. doi: 10.22034/ijme.2025.522809.2082 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر ساخت افزایشی^۱، به عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های انقلاب صنعتی چهارم^۲، مورد توجه قرار گرفته است. از عوامل مؤثر و ویژگی‌های این روش‌ها، تولید قطعات با کیفیت بالا و همچنین غلبه بر پیچیدگی‌های هندسی در طراحی قطعات متفاوت است. در میان روش‌های مختلف ساخت افزایشی موجود، ذوب بستر پودر^۳ و رسوب‌دهی مستقیم انرژی^۴ از اصلی‌ترین روش‌های تولید و فرآوری قطعات فلزی محسوب می‌شوند. از بین روش‌های متنوع ذوب بستر پودر، مانند ذوب با لیزر و ذوب با پرتو الکترونی^۵، روش ذوب بستر پودر با لیزر^۶ از سوی محافل علمی و صنعتی مورد توجه ویژه‌ای قرار دارد [۱]. این روش متکی بر استفاده از یک منبع لیزر برای ذوب پودرهای فلزی بوده و پارامترهای متعددی از فرایند باید به دقت تعیین شوند تا قطعه‌ای با خواص مکانیکی مطلوب و حداقل عیوب تولید گردد [۲]. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ذوب گزینشی با لیزر^۷ فرایندی است که در آن قطعه به صورت لایه به لایه ساخته می‌شود. در این فرایند، ابتدا یک لایه نازک از پودر فلزی توسط یک تیغه یا سیستم رسوب‌دهی^۸ پودر روی بستر ساخت پخش شده و سپس پرتوی لیزر پراثری^۹، لایه پخش شده را مطابق نقشه تعیین شده در نرم‌افزار روبش^۹ می‌کند [۳].



شکل ۱ طرح نمادین فرایند ذوب گزینشی با لیزر [۳]

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، آلیاژسازی درجا^{۱۰} شامل گستراندن ترکیب دقیقی از عناصر آلیاژی به صورت پودر روی بستر ساخت است که پس از تابش لیزر، مخلوط پودر ذوب و منجمد شده تا آلیاژ مورد نظر تشکیل گردد. به این ترتیب فرایند آلیاژسازی هم‌زمان با فرایند ساخت افزایشی انجام شده و قطعه نهایی از آلیاژی مورد انتظار به دست می‌آید. مهم‌ترین مزیت آلیاژسازی درجا در ساخت افزایشی، قابلیت ساخت از آلیاژهای متناسب با نیازهای صنعتی است. علاوه بر این، با بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی، همچون توان لیزر و سرعت اسکن، می‌توان به توزیع یکنواخت عناصر آلیاژی دست یافت که منجر به ریزساختاری همگن‌تر و عیوب کمتر می‌گردد. در نقطه مقابل، یکی از چالش‌های موجود در آلیاژسازی درجا از طریق ذوب بستر پودر با لیزر آماده‌سازی پودر مناسب برای این فرایند است. همچنین کنترل دقیق پارامترهای فرایند به منظور دستیابی به ترکیب شیمیایی مطلوب و خواص مکانیکی بهینه از دیگر موارد حائز اهمیت است. در برخی از مخلوط‌های پودری، مانند ترکیب آلومینیوم و مس، ضریب جذب پایین پرتوی لیزر همراه با اختلاف قابل توجه در دمای ذوب این عناصر، چالش‌های عمده‌ای را در تولید نمونه‌های متراکم و بدون عیب طی فرایند ذوب بستر پودر با لیزر ایجاد می‌کند. علاوه بر این، یکنواختی مخلوط پودر و حفظ ترکیب همگن بستر پودر در طول فرایند ذوب و روبش لایه‌ها از

¹ Additive Manufacturing

² Industry4

³ Powder Bed Fusion (PBF)

⁴ Direct Energy Deposition (DED)

⁵ Electron Beam

⁶ Laser Powder Bed Fusion (LPBF)

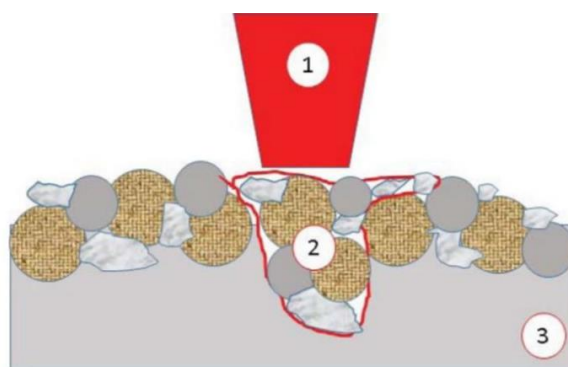
⁷ Selective Laser Melting (SLM)

⁸ Powder Depositor

⁹ Scan

¹⁰ In-Situ Alloying

عوامل کلیدی در موفقیت آلیاژسازی درجا محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر آلیاژهای آلومینیوم پر استحکام سری ۲۰۰۰ که در روش‌های تولید مرسوم دارای خواص خوبی هستند، توجه زیادی را جهت کاربرد در روش ذوب بستر پودر با لیزر به خود جلب کرده‌اند. همچنین عملیات حرارتی^۱ مناسب می‌تواند به‌طور قابل توجهی خواص مکانیکی این سری از آلیاژهای آلومینیوم را بهبود دهد [۴]. خانواده آلیاژهای سری ۲۰۰۰ که حاوی عنصر اصلی آلیاژی مس می‌باشند، قابلیت رسوب‌سختی حین عملیات حرارتی داشته و از استحکام و سختی بالایی در دمای محیط و دماهای بالا برخوردارند. افزودن مس به آلومینیوم نه تنها از طریق مکانیسم استحکام‌دهی محلول جامد^۲، بلکه با تشکیل فاز Al_2Cu در طی عملیات حرارتی، موجب بهبود خواص مکانیکی آلیاژ می‌گردد [۵]. جایگزینی قطعات ساخته شده به وسیله این سری از آلیاژها با قطعات فولادی در سامانه‌های انتقال قدرت خودروها (مانند سرسیلندر و بلوک موتور)، مزایای قابل توجهی مثل کاهش وزن محصول نهایی را به همراه داشته است [۶].



شکل ۲ آلیاژسازی درجا در فرایند ذوب گزینشی لیزری (۱ پرتوی لیزر، ۲ حوضچه مذاب و ۳ قطعه کار [۷])

همان‌طور که اشاره شد، از مزیت‌های اصلی این سری از آلیاژهای آلومینیوم امکان انجام عملیات حرارتی و دستیابی به خواص مکانیکی بهبود یافته است. با توجه به ساختار منحصربه‌فرد قطعات ساخته شده به روش ذوب بستر پودر با لیزر، استفاده از روش‌ها و دستورالعمل‌های مرسوم ارائه شده در استانداردهای مرتبط برای آلیاژهای مشابه امکان‌پذیر نیست و نیاز به دستیابی به فرایند عملیات حرارتی بهینه مجزا برای قطعات ساخته شده به این روش وجود دارد. از آنجایی که دمای پایین یا زمان ناکافی در عملیات انحلال^۳، منجر به انحلال کامل فازها و یکنواختی توزیع اتم‌های مس در زمینه آلومینیوم نشده و از سوی دیگر، دمای بالای انحلال منجر به ذوب اولیه ناقص فازها و اتلاف انرژی می‌گردد، این مسئله اهمیت بسیاری دارد [۸]. هدف اصلی این پژوهش، تعیین محدوده دمایی و زمان بهینه جهت انجام عملیات حرارتی با طی مراحل انحلال و پیرسازی مصنوعی^۴ در آلیاژ $Al-5Cu$ تولید شده به روش ذوب بستر پودر با لیزر با استفاده از روش آلیاژسازی درجا است.

۲- مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش، پودرهای تجاری آلومینیوم خالص و مس بوده که در یک آسیاب گلوله‌ای^۵ با انرژی پایین مخلوط شدند. ترکیب شیمیایی مخلوط حاصل در جدول ۱ ارائه شده است. مورفولوژی^۶ پودر، توزیع اندازه ذرات، پارامترهای بهینه‌شده فرایند و سایر جزئیات مربوطه در پژوهش قبلی همین گروه [۹] ارائه گردیده است. نمونه‌های مکعبی شکل با ابعاد mm^3 $10 \times 10 \times 3$ برای آزمون ریزسختی تهیه شدند. کلیه نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ذوب گزینشی با لیزر NOURA M100P مجهز به لیزر با حداکثر توان ۳۰۰ وات، ساخته شدند. در ادامه نمونه‌ها در راستای جهت ساخت برش داده شده، سپس با روش‌های استاندارد متالوگرافی^۷ آماده شدند.

¹ Heat Treatment

² Solid Solution Strengthening

³ Solution

⁴ Artificial Aging

⁵ Ball Mill

⁶ Morphology

⁷ Metallography

جدول ۱ ترکیب شیمیایی مخلوط پودر مورد استفاده

Al	Cu	Si	Fe	Ga	V
اکیمنده	۵	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۱

ارزیابی ریزسختی ویکرز با استفاده از دستگاه ریزسختی انجام شد. پارامترهای مورد استفاده برای هر نمونه در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین تصاویر برخی از آزمون‌های انجام شده و داده‌های به دست آمده را می‌توان در پیوست مشاهده کرد. در ادامه نمونه‌های آلومینیوم-مس ساخته شده به روش ذوب بستر پودر با لیزر با دو مدت زمان انحلال و پنج زمان مختلف تحت پیرسازی مصنوعی قرار گرفته و بررسی شدند. چرخه‌های عملیات حرارتی انتخاب شده زیرمجموعه‌ای از مجموعه عملیات حرارتی T6 بوده که شامل کوئنچ در آب و پیرسازی مصنوعی می‌شود. تمام نمونه‌ها بلافاصله پس از انحلال، در آب کوئنچ^۱ شدند. همچنین کلیه مراحل عملیات حرارتی در کوره الکتریکی مقاومتی انجام شدند. جزئیات مراحل و بازه‌های زمانی عملیات حرارتی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲ متغیرهای آزمون ریزسختی سنجی

مؤلفه	مقدار (واحد)
بارگذاری	۰/۱ (kg)
زمان نشست	۱۰ (sec)
تعداد اندازه‌گیری در هر نمونه	۱۰

جدول ۳ جزئیات متغیرهای عملیات حرارتی انجام شده

پیرسازی	محیط کوئنچ	انحلال	
مدت زمان (h)	دما (°C)	مدت زمان (h)	دما (°C)
۲/۵			
۵			
۷/۵	۱۹۰	۱	۵۱۰
۱۰		۳	
۱۲/۵			

۳- نتایج و بحث

همان‌طور که در پژوهش قبلی انجام شده توسط این گروه گزارش شد [۹]، ریزسختی ویکرز^۲ نمونه‌های ساخته شده به روش ذوب بستر پودر با لیزر از جنس آلومینیوم-مس، در مقایسه با نمونه‌های آلومینیوم خالص تولید شده به روش مشابه رشد چشمگیری یافته و تا دو برابر افزایش پیدا کرده است. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی پارامترهای مناسب فرایند عملیات حرارتی به گونه‌ای بوده که بتواند منجر به بهبود خواص مکانیکی و افزایش خواص آلیاژ جهت کاربردهای متفاوت گردد. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده، در گام نخست پنج نمونه انتخاب و ریزسختی ویکرز اولیه آن‌ها، هر نمونه ۱۰ بار اندازه‌گیری شد. سپس هر نمونه به مدت یک ساعت در دمای ۵۱۰ درجه سانتی‌گراد تحت فرایند انحلال قرار گرفته و بلافاصله در آب کوئنچ شد. پس از آن ریزسختی ویکرز نمونه‌ها در حالت کوئنچ شده اندازه‌گیری شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، سختی نمونه‌ها پس از فرایند انحلال کاهش یافت. در ادامه، نمونه‌ها در کوره الکتریکی در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۲/۵ تا ۱۲/۵ ساعت با فاصله زمانی ۲/۵ ساعت تحت عملیات پیرسختی قرار گرفتند. ریزسختی نمونه‌های پیر شده مجدداً اندازه‌گیری شده و درصد تغییرات متوسط ریزسختی برای هر نمونه نسبت به حالت اولیه محاسبه شد. همان‌طور که در جدول ۴ ارائه شده، میانگین ریزسختی تمامی نمونه‌ها به جز نمونه شماره ۲ در مقایسه با حالت اولیه کاهش یافته است.

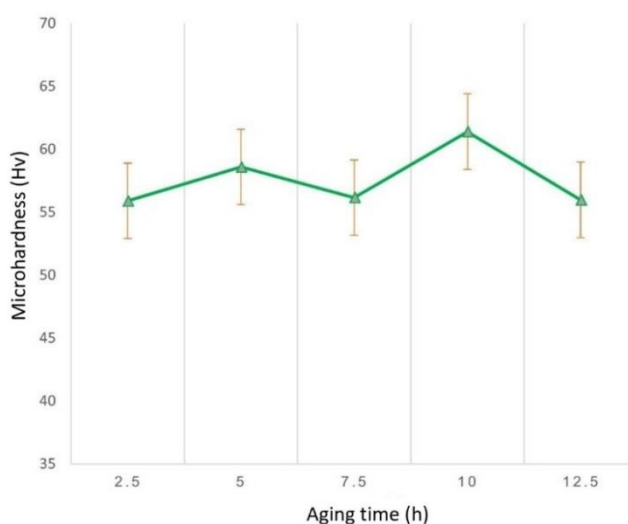
¹ Quench

² Vickers Micro-hardness

جدول ۴ نتایج اندازه‌گیری ریزسختی ویکرز پس از سه ساعت انحلال

شماره نمونه	سختی اولیه (HV)	سختی بعد از انحلال (HV)	زمان پیرسازی (h)	سختی بعد از پیرسازی (HV)	درصد تغییرات
۱	۵۷,۲±۳,۵	۵۱,۲±۷,۱	۲,۵	۵۵,۹±۴,۴	-۲,۳%
۲	۵۶,۵±۱۱,۶	۵۱,۸±۶,۳	۵	۵۸,۶±۵,۱	+۳,۷%
۳	۵۸,۴±۴,۸	۵۸,۵±۴,۹	۷,۵	۵۶,۲±۲,۸	-۳,۸%
۴	۶۵,۹±۴,۲	۵۴,۳±۴,۷	۱۰	۶۱,۴±۵,۵	-۶,۸%
۵	۶۶,۵±۷,۹	۵۳,۹±۲,۴	۱۲,۵	۵۵,۹±۲,۴	-۱۵,۹%

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش زمان پیرسازی، ریزسختی به وضوح افزایش یافته و تا رسیدن به زمان ۱۰ ساعت که بیشینه سختی حاصل می‌شود، این افزایش سختی ادامه دارد. سپس روند تغییرات سختی کاهشی می‌شود. با توجه به روند مشاهده شده در این نمودار، می‌توان بیان کرد که پس از عملیات آنیل انحلالی به مدت یک ساعت، مدت ۱۰ ساعت زمان بهینه برای فرایند پیرسازی مصنوعی جهت دستیابی به حداکثر ریزسختی ویکرز است. این نقطه را اصطلاحاً نقطه اوج فرایند پیرسختی (بیشینه سختی) می‌گویند.



شکل ۳ تغییرات سختی برحسب زمان پیرسازی نمونه‌ها پس از یک ساعت آنیل انحلالی

در ادامه، تعداد دیگری از نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی با زمان انحلال طولانی‌تر قرار گرفتند. به‌طور مشابه، فرایند پیرسازی در دمای ثابت ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد از ۲/۵ تا ۱۲/۵ ساعت در بازه‌های زمانی ۲/۵ ساعت انجام شد. اندازه‌گیری ریزسختی ویکرز برای هر نمونه در وضعیت‌های پس از ساخت^۱، پس از کوئنچ^۲ و پس از پیرسختی^۳ انجام پذیرفت. همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، نتایج آزمون‌های ریزسختی ویکرز برای این سری از نمونه‌ها در مقایسه با حالت اولیه افزایش چشمگیری داشته که چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای را جهت دستیابی به خواص مورد انتظار در این آلیاژ ارائه می‌دهد.

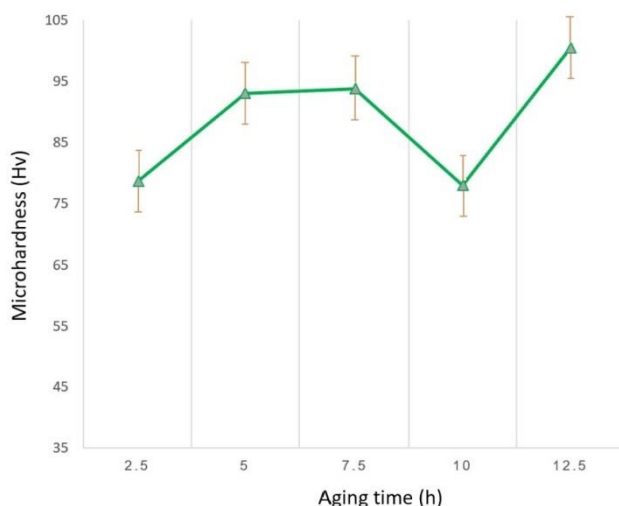
همان‌گونه که انتظار می‌رفت، ریزسختی ویکرز اکثر نمونه‌ها پس از فرایند انحلال، کاهش جزئی یافته است (شکل ۴). در ادامه و با مشاهده روند کلی نمودار، ریزسختی ویکرز بعد از پیرسازی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای یافته است. همچنین نمودار ریزسختی ویکرز رابطه مستقیمی با زمان پیرسازی نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که بالاترین مقدار ریزسختی پس از ۱۲/۵ ساعت حاصل شد. بنابراین، مدت زمان ۱۲/۵ ساعت را می‌توان به عنوان زمان اوج پیرسازی برای این فرایند در نظر گرفت. نکته قابل‌توجه در این نمودار، کاهش ناگهانی میانگین ریزسختی پس از ۱۰ ساعت پیرسازی است، جایی که مقدار ریزسختی تقریباً به نمونه‌ای که ۲/۵ ساعت پیر شده، نزدیک می‌شود.

¹ As-Built

² As-Quenched

جدول ۵ نتایج اندازه‌گیری ریزسختی و بکرز پس از سه ساعت انحلال

شماره نمونه	سختی اولیه (HV)	سختی بعد از انحلال (HV)	زمان پیرسازی (h)	بعد از پیرسازی (HV)	درصد تغییرات
۶	۵۷,۶±۷,۱	۵۴,۸±۸,۵	۲,۵	۷۸,۶±۱۱,۸	+۳۶,۵%
۷	۵۶,۸±۳,۶	۵۹,۱±۲,۶	۵	۹۳,۱±۸,۵	+۶۳,۹%
۸	۵۱,۵±۸,۹	۵۲,۷±۶,۸	۷,۵	۹۳,۸±۴,۹	+۸۲,۱%
۹	۶۴,۴±۹,۱	۵۵,۸±۳,۹	۱۰	۷۷,۹±۴,۸	+۲۰,۹%
۱۰	۶۰,۶±۶,۵	۶۷,۱±۴,۹	۱۲,۵	۱۰۰,۵±۹,۸	+۶۵,۸%



شکل ۴ تغییرات سختی برحسب زمان پیرسازی نمونه‌ها پس از سه ساعت آنیل انحلالی

نکته کلیدی در مقایسه نمودار شکل‌های ۳ و ۴ این است که در نمونه‌های عملیات حرارتی شده با سه ساعت انحلال و سپس پیرسازی، ریزسختی به طور قابل توجهی در مقایسه با حالت اولیه افزایش یافته است. این افزایش ریزسختی با خروجی مورد انتظار برای این آلیاژ، به دلیل عملیات حرارتی پذیر بودن آن، همخوانی دارد. این نتایج در واقع نشان می‌دهد که عملیات رسوب سختی به درستی انجام شده و فاز Al_2Cu به طور مطلوب در فاز زمینه حل شده است. در واقع می‌توان این‌گونه بیان کرد که زمان سه ساعت عملیات انحلال منجر به حل شدن فاز β در فاز زمینه α شده است [۱۰]. علاوه بر این، با مقایسه مقادیر ریزسختی به دست آمده با نتایج ریزسختی آلیاژ تولیدشده به روش‌های دیگر نیز، بهبود نسبی در نتایج این مطالعه مشاهده می‌شود [۱۱]. شایان ذکر است که در نمونه‌هایی با میانگین ریزسختی کاهش یافته، احتمال افزایش درصد ازدیاد طول وجود دارد، چرا که این دو مؤلفه رابطه وارونه‌ای با یکدیگر دارند. این موضوع باید از طریق ساخت نمونه‌های جدید و استخراج داده‌های آزمایش کشش مورد بررسی بیشتر قرار گیرد [۱۲]. در نهایت، لازم به ذکر است که میانگین ریزسختی به دست آمده پس از عملیات حرارتی در این تحقیق، به مقادیر مربوط به آلیاژهای پر کاربرد، نظیر $AlSi_{10}Mg$ نزدیک بوده که این امر برای کاربردهای صنعتی گسترده و جایگزینی آلیاژهای قدیمی در این زمینه بسیار امیدوارکننده است [۱۳].

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار مکانیکی آلیاژ $Al-5Cu$ ساخته شده به روش ذوب بستر پودر با لیزر با استفاده از روش آلیاژسازی درجا به صورت سازمان یافته مورد بررسی قرار گرفت. خواص مکانیکی آلیاژ $Al-5Cu$ ساخته شده با روش ذوب گزینشی با لیزر را می‌توان به طور جامع و بر اساس شرایط عملیات حرارتی مناسب، متناسب با نیازهای خاص کاربر تنظیم کرد.

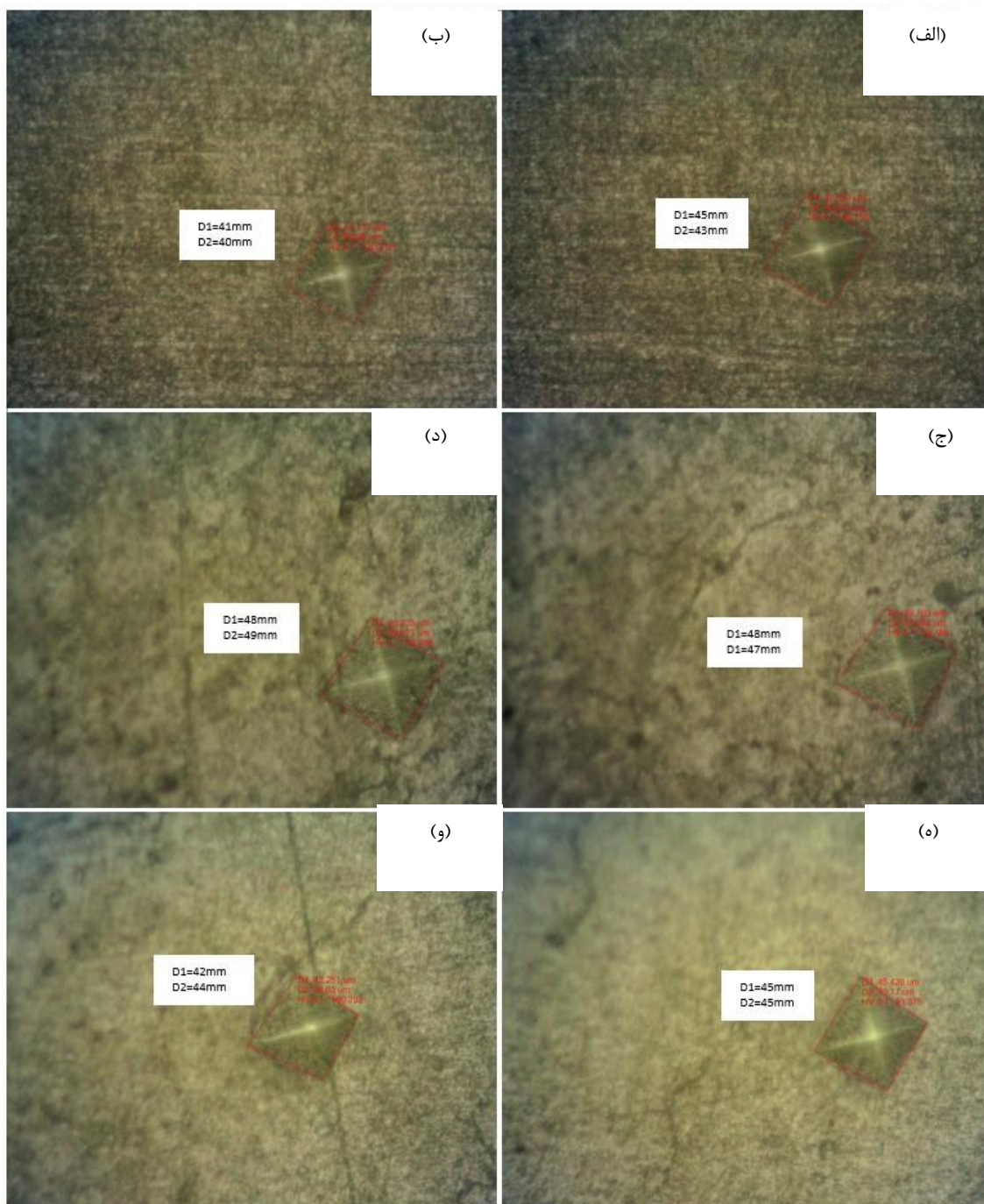
این نتایج به وضوح نشان داد که زمان انحلال عاملی حیاتی در فرایند عملیات حرارتی نمونه‌های $Al-5Cu$ تولیدشده با روش ذوب گزینشی با لیزر است. به طور مشخص، با افزایش زمان انحلال از یک ساعت به سه ساعت، درحالی که سایر متغیرهای فرایند پیرسازی

ثابت باقی ماندند، ریزسختی نمونه‌ها به‌طور قابل توجهی، تا دو برابر، نسبت به ریزسختی نمونه‌های آلومینیوم خالص افزایش یافته و به مقادیر نزدیک به آلیاژهای عملیات حرارتی شده $AlSi_{10}Mg$ در حالت T6 رسیدند.

در نهایت، برای ارزیابی هم‌زمان سایر خواص مکانیکی مرتبط مانند استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی، نیاز به ساخت نمونه‌های آزمایش کشش و انجام آزمایش‌های هم‌زمان به‌منظور تعیین رابطه بین ریزسختی و چقرمگی آلیاژ وجود دارد.

پیوست

در شکل ۵ تصویر اثر انجام آزمون ریزسختی سنجی و ویکرز روی نمونه‌های ساخته شده نمایش داده شده است.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی نوری (الف) و (ب) نمونه شماره ۱۰، (ج) و (د) نمونه شماره ۹، (ه) و (و) نمونه شماره ۸ بعد از آزمون ریزسختی ویکرز

References

- [1] Esfandiari Ghollezu S, Farshidianfar MH, Nejati Eghteda S. Three-Dimensional geometry profile extraction of deposits using linear laser scanning in the directed energy deposition additive manufacturing method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Sep 23;10(7):17-25. doi: [10.22034/ijme.2024.435811.1919](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.435811.1919) [In Persian]
- [2] Manshouri Yeganeh A, Khodaygan S, Movahedi MR. Optimization of Thermal Gradient by Adjusting Temperature Parameters in the Laser-Based Additive Manufacturing Process of Polyamide-12 Powder Using a Numerical Model. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2018;5(4):26-36. [In Persian]
- [3] Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. Additive manufacturing technologies. Cham, Switzerland: Springer; 2021.
- [4] Qi Y, Zhang H, Zhu J, Nie X, Hu Z, Zhu H, Zeng X. Mechanical behavior and microstructure evolution of Al-Cu-Mg alloy produced by laser powder bed fusion: Effect of heat treatment. *Materials Characterization*. 2020 Jul 1;165:110364. doi: [10.1016/j.matchar.2020.110364](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110364)
- [5] Zamani M, Toschi S, Morri A, Ceschini L, Seifeddine S. Optimisation of heat treatment of Al-Cu-(Mg-Ag) cast alloys. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;139(6):3427-40. doi: [10.1007/s10973-019-08702-x](https://doi.org/10.1007/s10973-019-08702-x)
- [6] Kobayashi T. Strength and Toughness of Materials. Springer Science & Business Media; 2012 Dec 6.
- [7] Xu R, Li R, Yuan T, Niu P, Wang M, Lin Z. Microstructure, metallurgical defects and hardness of Al-Cu-Mg-Li-Zr alloy additively manufactured by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020 Sep 15;835:155372. doi: [10.1016/j.jallcom.2020.155372](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155372)
- [8] Sjölander E, Seifeddine S. Optimisation of solution treatment of cast Al-Si-Cu alloys. *Materials & design*. 2010 Jun 1;31:S44-9. doi: [10.1016/j.matdes.2009.10.035](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.035)
- [9] Mogharehabet A, Maleki A, Badrossamay M, Akoochakian MJ. In-Situ Alloying of Al-Cu Processed through Laser Powder Bed Fusion (LPBF). In: *Proceedings of the 13th International Conference on Materials Engineering and Metallurgy*; 2024.
- [10] Iswanto PT, Pambekti A. Heat treatment T4 and T6 effects on mechanical properties in Al-Cu alloy after remelt with different pouring temperatures. *Metalurgija*. 2020 Apr 1;59(2):171-4.
- [11] Saklakoglu N, Gencalp S. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Cold-deformed Al-5Cu Alloy Samples After Isothermal Heat Treatments. In: *AIP Conference Proceedings 2011 Jan 17 (Vol. 1315, No. 1, pp. 92-97)*. American Institute of Physics. doi: [10.1063/1.3552572](https://doi.org/10.1063/1.3552572)
- [12] Chen Y, Xiao C, Zhu S, Li Z, Yang W, Zhao F, Yu S, Shi Y. Microstructure characterization and mechanical properties of crack-free Al-Cu-Mg-Y alloy fabricated by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*. 2022 Oct 1;58:103006. doi: [10.1016/j.addma.2022.103006](https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103006)
- [13] Li W, Li S, Liu J, Zhang A, Zhou Y, Wei Q, Yan C, Shi Y. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Materials Science and Engineering: A*. 2016 Apr 29;663:116-25. doi: [10.1016/j.msea.2016.03.088](https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.088)