

## تأثیر محیط‌های نیتروژن و خلاء و افزودن قلع بر فرایند چگالش پودر پیش آلیاژ Al-Cu-Mg حین تف‌جوشی فراجامد\*

حسین مومنی<sup>(۱)</sup> سید حسین رضوی<sup>(۲)</sup> سعید شبستری<sup>(۳)</sup>

### چکیده

در این تحقیق، تف‌جوشی فراجامد در حضور فاز مایع پودر آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ از نوع پیش آلیاژ بررسی شد. آزمون‌های تحلیل تغییرات حرارتی (DTA) و تعیین تغییرات حرارتی وزن (TGA) در دو محیط خلاء و نیتروژن انجام شدند. محیط نیتروژن به دلیل تشکیل نیتريد آلومینیم، فرایند چگالش را بهبود داد. بیش‌ترین چگالی در دمای ۶۱۰ °C و درون محیط نیتروژن به دست آمد، و این مقدار ۹۸/۸ درصد چگالی نظری بود. با افزودن ۰/۱ درصد قلع، تف‌جوشی بهبود یافت، و چگالی نمونه‌های تف‌جوشی شده در دمای ۶۱۰ °C به ۹۹/۳ درصد میزان نظری افزایش یافت. نتایج نشان دادند که با افزودن ۰/۱ درصد قلع، سختی و استحکام خمشی نمونه‌ها به ترتیب ۵/۲ و ۴/۴ درصد افزایش می‌یابند. واژه‌های کلیدی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴، تف‌جوشی فراجامد در حضور فاز مایع، چگالش، محیط.

## Effects of Nitrogen and Vacuum Atmospheres and Addition of Tin on the Densification of Al-Cu-Mg pre-alloyed Powder During Supersolidus Liquid-Phase Sintering

H. Momeni S.H. Razavi S.G. Shabestari

### Abstract

*In this research, supersolidus liquid-phase sintering of aluminum alloy 2024 in pre-alloyed condition was investigated. Differential thermal analysis (DTA) and thermal gravimetric analysis (TGA) were carried in nitrogen and vacuum atmospheres. The densification process was improved within the nitrogen atmosphere due to the formation of aluminum nitride (AlN). The maximum density was achieved at 610 °C in nitrogen atmosphere. This process led to produce samples with a relative density of 98.8%. The relative densities after sintering increased to the maximum value of 99.3% with the addition of 0.1 wt.% Sn. The results showed 5.2 and 4.4% increase in the hardness and bending strength, respectively, with the addition of 0.1 wt.% Sn.*

**Key Words** Aluminium Alloy 2024, Supersolidus liquid- Phase Sintering, Densification, Atmosphere.

\* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۸۹/۱۱/۱۰ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۹۰/۳/۹ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسؤل: دانشجوی دکترای، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۲) استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۳) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

شبهات‌هایی که بین دو فرایند مختلف تف‌جوشی وجود دارند، تفاوت‌هایی هم با یکدیگر دارند. این دو فرایند به‌طور مختصر در جدول (۱) با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۱ مقایسه فرایندهای تف‌جوشی در حضور فاز مایع و فراجامد در حضور فاز مایع

تف‌جوشی فراجامد در حضور فاز مایع	تف‌جوشی در حضور فاز مایع	
مخلوط پودرهای عنصری	پیش‌آلیاژ شده	نوع پودر
- ذوب یک عنصر - توسط واکنش بین عناصر	ذوب مختصر ذرات	ایجاد مذاب
بین ذرات	درون ذرات چندبلور	موقعیت ذوب
وابسته به ترکیب شیمیایی	وابسته به ترکیب شیمیایی و دما (مطابق قانون اهرم)	کسر حجمی مذاب
ته‌نشینی دانه‌های جامد در آلیاژهای سنگین	ته‌نشینی ذرات جامد به‌میزان مختصر	جدایش جامد- مذاب

محیط کوره در تف‌جوشی سه نقش متفاوت دارد:

- ۱- جلوگیری از وقوع واکنش‌های نامطلوب و اکسایش
- ۲- احیای اکسیدهای واقع بر روی سطح فلزات
- ۳- وقوع واکنش‌های مطلوب و کمک به خروج مواد فرار

احیای لایه‌های اکسیدی بر روی آهن در محیط‌های رایج مانند آمونیاک رخ می‌دهد. لایه‌ی اکسید آلومینیم از نقطه نظر ترمودینامیکی بسیار پایدار است و احیای آن در محیط‌های متداول ناممکن است. بنابراین، محیط در تف‌جوشی آلومینیم باید از اکسایش

### مقدمه

روش پرس‌کاری- تف‌جوشی یکی از روش‌های اقتصادی برای تولید قطعاتی به شکل نهایی و یا نزدیک به نهایی است، و از آن می‌توان برای تولید قطعات بسیار پیچیده در صنایع خودرو و هوا- فضا استفاده کرد. تف‌جوشی آلومینیم به‌دلیل ایجاد یک لایه‌ی اکسیدی بر روی سطح آن، معمولاً کاری مشکل است. برای شکستن این لایه‌ی اکسیدی و ایجاد شرایط مناسب برای نفوذ و تف‌جوشی، لازم است حین تف‌جوشی فاز مایع تشکیل شود. تف‌جوشی در حضور فاز مایع به دو شکل اصلی انجام می‌گیرد:

۱- تف‌جوشی در حضور فاز مایع گذرا: در این حالت، مذابی که حین تف‌جوشی به‌وجود می‌آید با انجام فرایند تف‌جوشی به‌دلیل انحلال در فاز جامد و یا تشکیل یک فاز جامد از بین می‌رود.

۲- فاز مذاب پایدار: در این حالت، مذاب در دماهای بالای فرایند تف‌جوشی و درون مخلوط پودر و یا درون پودر پیش‌آلیاژ شده تشکیل می‌شود. به نوع اول فرایند، تف‌جوشی در حضور فاز مایع (LPS, Liquid Phase Sintering) و به نوع دوم آن تف‌جوشی فراجامد در حضور فاز مایع (SLPS, Supersolidus Liquid Phase Sintering) می‌گویند

[1].

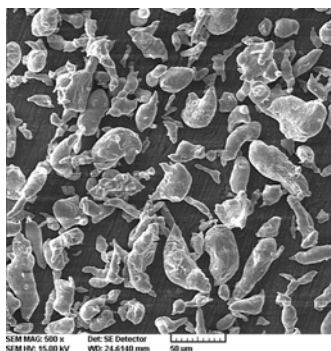
در فرایند تف‌جوشی فراجامد، پودر پیش‌آلیاژ شده در گستره‌ی دمایی نمودارهای جامد و مایع گرم می‌شود، و این منجر به تشکیل فاز مذاب درون ذرات خواهد شد. مذاب تشکیل شده به‌دلیل خاصیت مویبگی در مرزهای دانه پخش شده و در نتیجه‌ی نظم‌دهی مجدد چگالش سریع رخ می‌دهد.

عوامل زیادی بر خواص قطعات تف‌جوشی شده تأثیر دارند. محیط کوره یکی از عوامل کلیدی در تف‌جوشی است. اغلب مطالعات بر روی تف‌جوشی در حضور فاز مایع در مورد پودرهای مخلوط شده به روش عنصری متمرکز شده است. علی‌رغم

پودر مورد استفاده نشان داده شده است. پودر قلع (از نوع مرک آلمان) با اندازه ذرات کم تر از ۷۱ میکرون به میزان ۰/۱ درصد وزنی به عنوان افزودنی به همراه پودر پیش آلیاژ درون یک آسیای ماهواره‌ای با تعداد کم گلوله مخلوط شد. پودرهای با و بدون قلع به روش تحلیل حرارتی (DTA) بررسی شدند. نرخ افزایش دما ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در دقیقه انتخاب شد، و محیط‌های خلاء و نیتروژن برای مطالعه در نظر گرفته شدند.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی پودر پیش آلیاژ ۲۰۲۴ (به درصد وزنی)

Al	Cu	Mg	Si	Fe	Mn
بقیه	3.95	1.23	0.45	0.27	0.36



شکل ۱ تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از پودر پیش آلیاژ ۲۰۲۴ مورد استفاده در این تحقیق

با فشردن مخلوط پودر پیش آلیاژ با و بدون افزودنی قلع با فشار ۳۰۰ MPa درون قالب استوانه‌ای به قطر ۱۲ میلی‌متر، نمونه‌های خام تهیه شدند. از اسید آلپیک به عنوان ماده‌ی روان‌ساز سطوح قالب استفاده شد. نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۳۰۰ °C درون یک کوره‌ی افقی پیش گرم شدند. سرعت حرارت‌دهی نمونه‌ها تا دمای تف‌جوشی، ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بر دقیقه بود. فرایند تف‌جوشی در دمای مورد نظر به مدت

مجدد درون کوره جلوگیری کند. تحقیق‌های اخیر در مورد تف‌جوشی آلومینیم نشان داده‌اند که رطوبت موجود در محیط برای دستیابی به خواص مطلوب مضر است [2]. گزارش شده است که نیتروژن از آمونیاک و خلاء موثرتر است. در بیش‌تر گزارش‌ها تأثیر مفید نیتروژن را مربوط به واکنش آن با آلومینیم و تشکیل نیتريد آلومینیم (AlN) و بهبود چگالش دانسته‌اند [3]. این واکنش به صورت زیر است [2]:

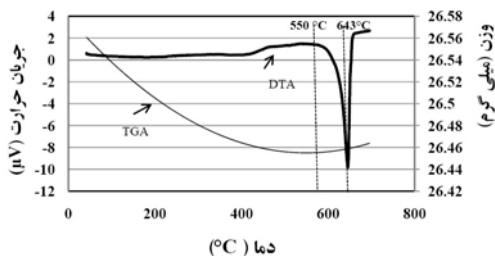


بعضی از محققان تأثیر هیدروژن را ناچیز گزارش کرده‌اند [4]، و گروه دیگری از آن‌ها تأثیر حضور هیدروژن در محیط نیتروژن را بسیار مضر دانسته‌اند [5]. افزون بر این، حضور بخار آب همراه با هیدروژن را موجب پایداری هیدرات آلومینا و مانعی برای انقباض معرفی کرده‌اند [5]. تأثیر افزودن قلع بر بهبود تف‌جوشی مخلوط پودرهای عنصری Al-Cu-Mg [3,5] و یا پیش آلیاژی Al-Si بررسی شده است [6]. با این حال، تحقیق چندانی در مورد تأثیر محیط کوره و افزودن جزئی قلع بر روی فرایند تف‌جوشی فراجامد پودرهای پیش آلیاژ Al-Cu-Mg انجام نشده است. در تحقیق حاضر، تأثیر محیط و افزودن جزئی عنصر قلع بر فرایند تف‌جوشی فراجامد پودر آلایاژ آلومینیم ۲۰۲۴ به شکل پیش آلیاژ و نقش آن بر چگالش بررسی شده است.

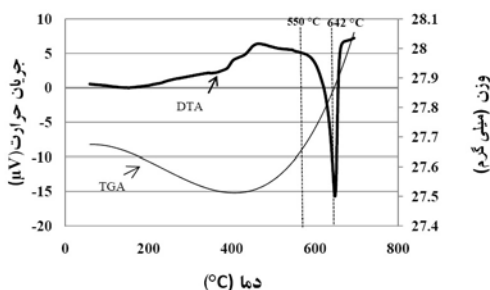
### روش آزمایش

در این تحقیق، از پودر پیش آلیاژ ۲۰۲۴ با ترکیب شیمیایی موجود در جدول (۲) و ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرون (تولید شده به روش افشانش توسط شرکت متالورژی پودر خراسان) استفاده شده است. ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده توسط دستگاه XRF تأیید شد. در شکل (۱)، تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) از مورفولوژی

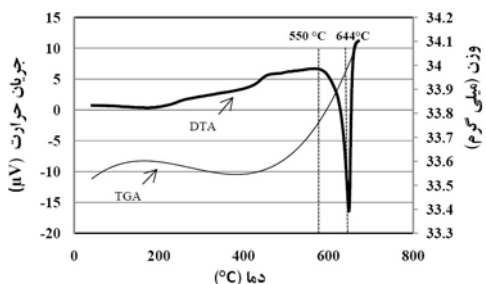
خام و تف‌جوشی شده در دمای  $610^{\circ}\text{C}$  درون محیط خلاء و نیتروژن نشان داده شده‌اند.



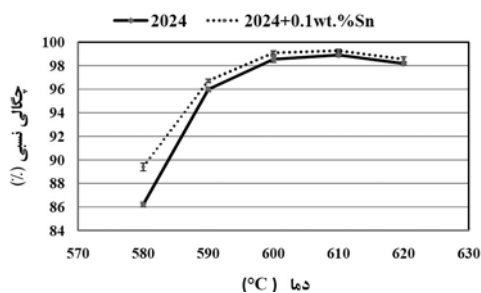
شکل ۲ نمودار TGA و DTA در مورد آلیاژ ۲۰۲۴ با نرخ گرمایش  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  درون محیط خلاء



شکل ۳ نمودار TGA و DTA در مورد آلیاژ ۲۰۲۴ با نرخ گرمایش  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  درون محیط نیتروژن



شکل ۴ نمودار TGA و DTA در مورد آلیاژ ۲۰۲۴ به همراه  $0.1\%$  درصد قلع با نرخ گرمایش  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  درون محیط نیتروژن



شکل ۵ تغییرات چگالی نمونه‌های تف‌جوشی شده از هر دو آلیاژ بدون قلع و حاوی  $0.1\%$  درصد قلع

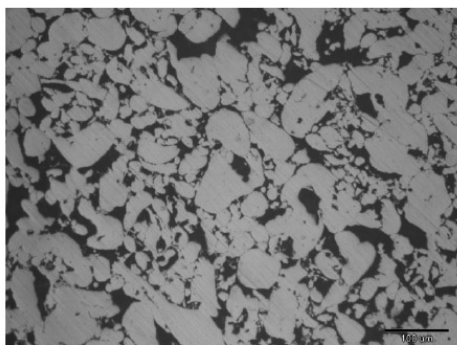
$30$  دقیقه انجام گرفت. تف‌جوشی درون دو محیط نیتروژن و خلاء صورت پذیرفت.

چگالی نمونه‌های تف‌جوشی شده مطابق با استاندارد ASTM B328 [9]، اندازه‌گیری شد. از آزمون خمش سه نقطه‌ای، مطابق با استاندارد ASTM B528 [10]، برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها استفاده شد. برای این منظور، نمونه‌هایی به ابعاد  $6 \times 5 \times 20$  میلی‌متر تهیه شدند. پس از تف‌جوشی در شرایط بهینه دمایی، آزمون خمش انجام شد. مطالعات ریزساختاری و بررسی‌های سطح شکست با استفاده از میکروسکپ‌های نوری و الکترونی انجام گرفت.

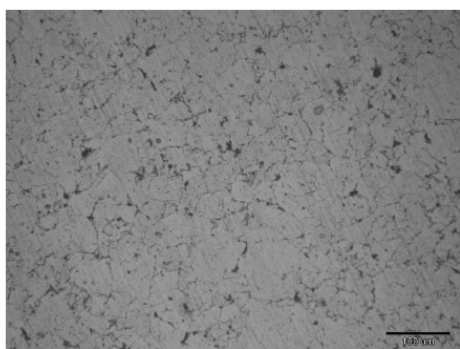
### نتایج و بحث

در شکل‌های (۲) تا (۴)، رفتار پودرهای تهیه شده حین افزایش دما با نرخ  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  درون محیط خلاء و نیتروژن نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، منطقه‌ی دمایی بین نمودارهای جامد و مایع برای آلیاژ ۲۰۲۴ در گستره‌ی  $550-640^{\circ}\text{C}$  می‌باشد، و با افزایش قلع به میزان  $0.1\%$  درصد تغییر محسوسی در آن ایجاد نشده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزودن  $0.1\%$  درصد قلع تأثیر چندانی بر گستره دمایی انجمادی آلیاژ ندارد. افزون بر این، در رفتار ذوب پودر در محیط خلاء و نیتروژن تغییر محسوسی دیده نمی‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ذوب شدن درون یک منطقه‌ی دمایی خاص رخ داده است. این پدیده نشان می‌دهد که فرایند تف‌جوشی فراجامد در این آلیاژ می‌تواند به وقوع بپیوندد. تأثیر دمای تف‌جوشی بر چگالی نسبی نمونه‌ها پس از تف‌جوشی در محیط نیتروژن، در شکل (۵) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دما تا  $610^{\circ}\text{C}$ ، چگالی افزایش یافته است. پس از انجام این فرایند، چگالی نسبی  $98/8$  درصد برای پودر پیش آلیاژ ۲۰۲۴ به دست آمد، و چگالی با افزودن  $0.1\%$  درصد قلع به آن تا  $99/3$  درصد افزایش یافت. در شکل (۶)، چگالی نمونه‌ی

چنین رفتاری را نشان نمی‌دهد. برای تأیید سازوکار ارایه شده برای این رفتار، از سطح شکست نمونه‌های تف‌جوشی شده در دمای  $610^{\circ}\text{C}$  درون محیط نیتروژن به‌روش طیف‌سنجی عنصری (EDS) به‌عمل آمد. در شکل (۸) تصویرهای سطح شکست نمونه‌های با ۰/۱ درصد و بدون قلع، و در جدول (۴) نتایج آزمون طیف‌سنجی عنصری از سطح شکست هر دو نمونه نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که هر دو نمونه دارای سطح شکست ترد هستند. افزون بر این، نتایج طیف‌سنجی عنصری سطح شکست حضور نیتروژن در هر دو نمونه را اثبات می‌کنند. با توجه به شواهد به-دست آمده در این تحقیق و امکان انجام واکنش نیتروژن با آلومینیوم، افزایش وزن دیده شده در نمونه‌های تف‌جوشی شده در حضور نیتروژن به واکنش آلومینیوم با نیتروژن مربوط می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۷ ریزساختار نمونه‌های تف‌جوشی شده‌ی آلیاژ ۲۰۲۴ در محیط‌های نیتروژن و خلاء در دمای  $610^{\circ}\text{C}$ ؛ (الف): محیط خلاء، و (ب): محیط نیتروژن



شکل ۶ نمودار تغییرات چگالی با تغییر محیط برای تف‌جوشی در دمای  $610^{\circ}\text{C}$

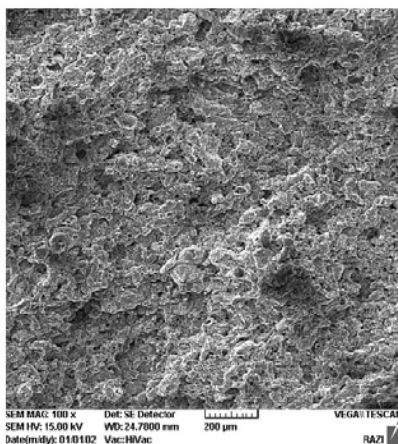
مشاهده می‌شود که چگالی نمونه‌ی تف‌جوشی شده در محیط خلاء کم‌تر از چگالی نمونه‌ی خام است، و چگالی نمونه‌ی تف‌جوشی شده در محیط نیتروژن بیش‌ترین مقدار را داراست. در شکل (۷)، ریزساختار نمونه‌های تف‌جوشی شده در نیتروژن و خلاء به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان تخلخل در نمونه‌ی تف‌جوشی شده در خلاء بسیار بیش‌تر از نمونه‌ی تف‌جوشی شده درون محیط نیتروژن است. نمونه‌های خام آزمون خمش از جنس آلیاژ ۲۰۲۴ با ۰/۱ درصد قلع و بدون قلع درون محیط نیتروژن در دمای  $610^{\circ}\text{C}$  تف‌جوشی شدند. نتایج آزمون‌های انجام شده بر روی آن‌ها در جدول (۳) آمده است. مقادیر سختی و استحکام خمشی آلیاژ حاوی قلع کمی بالاتر از آلیاژ بدون قلع است، و این به بهبود چگالش در نتیجه‌ی حضور ۰/۱ درصد قلع در آن مربوط می‌شود. در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود که حرارت‌دهی در محیط نیتروژن منجر به کاهش وزن در دماهای کم‌تر از  $400^{\circ}\text{C}$  و افزایش وزن در دماهای بالاتر از آن شده است. در تحلیل این رفتار می‌توان گفت که در دماهای پایین‌تر از  $400^{\circ}\text{C}$ ، مواد فرار پودر (از جمله بخار آب) خارج می‌شوند، در حالی که افزایش وزن در دماهای بالاتر از  $400^{\circ}\text{C}$  به واکنش نیتروژن با آلومینیوم نسبت داده شده است. با این حال، نتایج آزمون تعیین تغییرات حرارتی وزن (TGA) مربوط به پودر در محیط خلاء (شکل (۲))

جدول ۳ نتایج آزمون سختی سنجی و خمش نمونه‌های تف‌جوشی شده در دمای ۶۱۰ °C

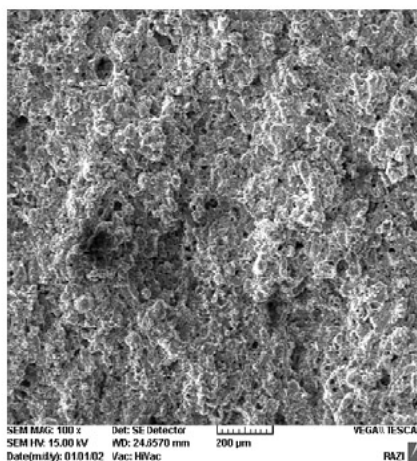
آلیاژ	استحکام خمشی (MPa)	سختی برینل (HB)
۲۰۲۴	۳۲۰ ± ۵/۵	۷۸ ± ۱/۵
۲۰۲۴-0.1wt.%Sn	۳۳۴ ± ۴/۹	۸۲ ± ۱/۶

جدول ۴ نتایج طیف‌سنجی عنصری از سطوح شکست نمونه‌های آزمون خمش (به درصد وزنی)

آلیاژ	Al	Mg	Cu	Fe	N
۲۰۲۴	۹۰/۲۶	۴/۹۴	۳/۵۵	۰/۳۴	۰/۹
۲۰۲۴-0.1wt.%Sn	۸۹/۴۷	۵/۰۴	۴/۱	۰/۵۹	۰/۸

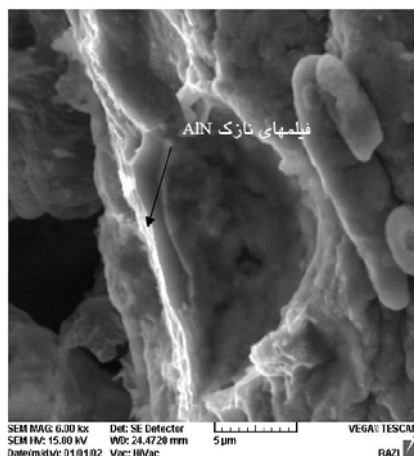


(الف)



(ب)

شکل ۸ سطوح شکست نمونه‌های آزمون خمش؛ نمونه‌های تف‌جوشی شده در دمای ۶۱۰ °C، (الف): آلیاژ ۲۰۲۴، و (ب): آلیاژ ۲۰۲۴ با ۰/۱ درصد قلع



شکل ۹ تصویر سطح شکست از نمونه‌ی حاوی ۰/۱ درصد قلع، تفجوشی شده در دمای  $610^{\circ}\text{C}$

پیرامون تأثیر عنصر منیزیم در آلیاژهای آلومینیم نشان داده‌اند که اتم‌های منیزیم محلول در دماهای بالاتر از  $500^{\circ}\text{C}$  تمایل به مهاجرت از سطح داخلی پودر به سطح خارجی آن را داشته و با اکسید آلومینیم به صورت زیر واکنش می‌دهند [11]:



بنابراین با توجه به حضور منیزیم در آلیاژ  $2024$ ، وقوع این واکنش حین انجام تفجوشی امکان‌پذیر است. با انجام مطالعات طیف‌سنجی فتوالکتریکی اشعه X (XPS, X-Ray Photoelectron Spectroscopy) معلوم شده است که آلومینیم فلزی در سطح ذرات پودر وجود دارد [11]، و حضور آن را به وقوع واکنش فوق‌الذکر نسبت داده‌اند. پیژونکا و همکارانش با انجام مطالعات طیف‌سنجی الکترون آگر (AES, Auger Electron Spectroscopy) بر روی پودرهای آلومینیم حاوی منیزیم نشان داده‌اند که بیشینه‌های مربوط به منیزیم در حالت اکسیدی در سطح ذرات پودر ظاهر می‌شوند [5]. این واکنش باعث شکست لایه‌ی اکسیدی می‌شود و به این ترتیب، تشکیل نیتريد آلومینیم (AlN) آسان‌تر می‌شود. سازوکارهای ممکن

در شکل (۹)، حضور نیتريد آلومینیم به شکل یک لایه‌ی نازک در ساختار مشخص است. نتیجه‌ی طیف‌سنجی عنصری از این لایه در جدول (۵) آورده شده است. با مقایسه‌ی نتایج آزمون تعیین تغییرات حرارتی وزن در شکل‌های (۳) و (۴) مربوط به آلیاژ با ۰/۱ درصد و بدون قلع و محاسبه‌ی میزان افزایش وزن پودر از نقطه‌ی کمینه (پس از خروج مواد فرّار) می‌توان دریافت که میزان افزایش وزن پودر در نمونه‌ی دارای ۰/۱ درصد قلع  $1/57$  درصد و در نمونه‌ی بدون قلع  $1/78$  درصد است. به عبارت دیگر، با افزودن ۰/۱ درصد قلع به آلیاژ، تشکیل نیتريد کاهش یافته است، و این به دلیل ایجاد پوشش قلع بر روی ذرات است که تشکیل نیتريد آلومینیم را به تعویق می‌اندازد [6]. تنش سطحی قلع  $40$  درصد از آلومینیم کم‌تر است. بنابراین، جدایش قلع در فصل مشترک مذاب-بخار رخ داده و به همین دلیل، تنش سطحی کاهش محسوس‌ی یافته، [3] و ترشوندگی بهبود می‌یابد. به این ترتیب، چگالش بهتری به وقوع می‌پیوندد.

نکته‌ی مهم این است که با توجه به حضور لایه‌ی اکسیدی در سطح ذرات پودر، واکنش آلومینیم با نیتروژن چگونه اتفاق می‌افتد. مطالعات انجام شده

شود.

۳- پر شدن حفره‌ها حین تشکیل نیتريد آلومینیم فشار درون فضای حفره‌های بسته را کاهش می‌دهد، نیروی مینسکوز را نامتوازن کرده و پرشدگی حفره‌ها رخ می‌دهد. پر شدن حفره‌ها یکی از سازوکارهای مهم برای چگالش آلومینیم درون محیط نیتروژن است [2].

نتایج مشابهی در مورد پودرهای پیش آلیاژ ۶۰۶۱، [۱۴]، و [15]، Al-Mg، به‌دست آمده است. ابتدا به‌دلیل نظم‌گیری مجدد ذرات حین واکنش در حضور تنش تف‌جوشی که توسط کینگری به‌دست می‌آید، سرعت تف‌جوشی زیاد است [3]:

$$\sigma_s = \frac{2\gamma_{LV}}{r_p} - \Delta P_{gas} \quad (4)$$

در این رابطه،  $\frac{2\gamma_{LV}}{r_p}$  فشار موئینگی،  $\gamma_{LV}$  تنش سطحی مذاب-بخار،  $r_p$  شعاع حفره، و  $\Delta P_{gas}$  اختلاف فشار گاز محبوس شده در حفره‌های بسته و گاز درون محیط کوره هستند. تنش سطحی مذاب ترکننده ذرات را به‌سمت یکدیگر می‌کشاند. پس از این مرحله، سرعت تف‌جوشی به‌صورت یکنواخت کاهش یافته و فرایند نظم‌گیری مجدد ناشی از نفوذ به وقوع می‌پیوندد. در نمونه‌های تف‌جوشی شده در خلاء و در دمای تف‌جوشی، گازهای محبوس شده درون حفره‌ها افزایش حجم داده و در نهایت موجب کاهش چگالی نمونه می‌شوند.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر محیط و افزودن عنصر قلع بر چگالش نمونه‌های تف‌جوشی شده‌ی پودر پیش آلیاژ ۲۰۲۴ بررسی شد، و نتایج زیر به‌دست آمد:

۱- محیط نیتروژن به‌دلیل تشکیل نیتريد آلومینیم، چگالش نمونه‌ها را بهبود بخشید. چگالی نمونه‌های

برای تأثیر تشکیل نیتريد آلومینیم بر فرایند تف‌جوشی عبارتند از:

۱- گسترش فاز مذاب درون شبکه‌ی حفره‌ها حین تف‌جوشی به زاویه‌ی ترشوندگی، مطابق با معادله‌ی یانگ، بستگی دارد:

$$\gamma_{lg} \cos(\theta) = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} \quad (3)$$

که در آن،  $\gamma_{lg}$ ،  $\gamma_{ls}$  و  $\gamma_{sg}$  به‌ترتیب انرژی‌های فصل مشترک مذاب-بخار، مذاب-جامد و جامد-گاز می‌باشند. مطابق با معادله‌ی یانگ، هنگامی مذاب جامد را تر می‌کند که زاویه‌ی ترشوندگی آن کم‌تر از ۹۰ درجه باشد. هر عاملی که کشش سطحی جامد-مذاب را کاهش دهد، زاویه‌ی ترشوندگی را کاهش داده و بنابراین، تف‌جوشی را بهبود می‌دهد. آلومینا یک ترکیب آنیونی-کوالانسی است، و عموماً به وسیله‌ی فلزات مذاب در دمای کم‌تر از ۱۰۰۰ °C تر نمی‌شود [2]، در حالی‌که نیتريد آلومینیم یک ترکیب کوالانسی است و فلزات مذاب آن را تر می‌کنند. گزارش شده است که زاویه‌ی تماس بین آلومینیم و نیتريد آلومینیم در دمای ۱۱۰۰ °C برابر با ۴۱ درجه است [12]، و این نصف زاویه‌ی تماس بین آلومینیم و آلومینا است. بنابراین، ممکن است که نقش نیتروژن افزایش ترشوندگی باشد [2,13].

۲- واکنش تشکیل نیتريد آلومینیم شدیداً گرمازاست (گرمای آزاد شده ۳۱۸ کیلو ژول بر مول است [2])، و این می‌تواند تف‌جوشی را بهبود دهد. با این وجود، افزایش دما به سرعت تشکیل نیتريد آلومینیم بستگی دارد. گزارش شده است که هنگام تشکیل نیتريد آلومینیم با بیش‌ترین سرعت، دما به اندازه‌ی ۰/۱ درجه‌ی سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش می‌یابد [2]. این میزان زمان قابل ملاحظه‌ای نیست و نمی‌تواند منجر به افزایش عمده‌ی میزان مذاب



افزایش یافت و در نتیجه، استحکام خمشی به میزان ۴/۴ درصد و سختی به اندازه‌ی ۵/۲ درصد بهبود یافتند.

۳- در نمونه‌های تفجوشی شده در خلاء و در دمای تفجوشی، گازهای محبوس شده درون حفره‌ها افزایش حجم یافته و در نهایت چگالی نمونه‌ها را کاهش دادند.

تفجوشی شده درون این محیط در دمای بهینه (۶۱۰ °C) برابر با ۹۸/۸ درصد چگالی نظری بود.

۲- با افزودن ۰/۱ درصد قلع به پودر پیش آلیاژ ۲۰۲۴، تشکیل نیتريد آلومینیم به تأخیر افتاد، و عمل چگالش با توجه به ترشوندگی بهتر قلع بهبود یافت. در این شرایط، چگالی نمونه‌های تفجوشی شده در دمای بهینه تا ۹۹/۳ درصد میزان نظری

### مراجع

- German, R.M. "Sintering theory and practice", Wiley, New York, Ny, (1996).
- Schaffer, G.B. , Hall, B.J. , Bonner, S.J., Huo, S.H. and Sercombe, T.B., "The effect of the atmosphere and the role of pore filling on the sintering of aluminum", Acta Materialia, Vol. 54 , pp. 131–138 , (2006).
- Schaffer, G.B., Yao, J.-Y., Bonner, S.J., Crossin, E., Pas, S.J. and Hill, A.J., " The effect of tin and nitrogen on liquid phase sintering of Al–Cu–Mg–Si alloys", Acta Materialia, Vol. 56 , pp. 2615–262, (2008).
- Martin, J. and Castro , F., "Liquid phase sintering of P/M aluminium alloys: effect of processing conditions", J Mater Process Technol, Vol. 814, pp. 143–144, ( 2003).
- Pieczonka , T., Schubert , Th., Baunack , S. and Kiebac, B., "Dimensional behaviour of aluminum sintered in different atmospheres", Mater Sci Eng A , Vol. 478, pp. 251–256, (2008).
- Sercombe, T.B. and Schaffer, G.B., "On the use of trace additions of Sn to enhance sintered 2xxx series Al powder alloys", Mater Sci Eng, vol. A268, pp. 32–39, (1999).
- Schaffer, G. B. , Huo, S. H., Drennan, J. and Auchterlonie, G. J., "The effect of trace elements on the sintering of an Al–Zn–Mg–Cu alloy", Acta mater, vol. 49, pp. 2671–2678, (2001).
- Mosher, W.G.E., Kipouros, G.J., Caley, W.F., Donaldson, I.W. and Bishop, D.P., " On the development of a hypoeutectic aluminium-silicon powder metallurgy alloy", Powder Metall, in press, (2010).
- ASTM B328 – 96 (Reapproved 2003), "Standard test method for density, oil content, and interconnected porosity of sintered metal structural parts and oil-impregnated bearings", (2003).
- ASTM B 528-99, "Standard test method for transverse rupture strength of metal powder specimens"(2003).
- Kondoh, K., Kimura, A. And Watanabe, R. "Effect of Mg on sintering phenomenon of aluminium

- alloy powder particle*", Powder Metall, Vol. 44( 2), pp. 161-164 , (2001)
12. Rosazza Prin, G., Baffie , T., Jeymond, M. and Eustathopoulos , N.," *Contact angles and spreading kinetics of Al And Al–Cu alloys on sintered AlN*", Mater Sci Eng, vol. A298, pp. 34-43, (2001).
13. Laurent, V., Chatain, D., Chatillon, C. and Eustathopoulos, N.,"*Wettability of monocrystalline alumina by aluminium between its melting point and 1273 K* ", Acta Mater, vol. 36, pp. 1797-1803, (1988).
14. Arockiasamy, A., German, R. M. , Wang, P., Horstemeyer, M. F., Morgan, W. And Park,S. J.,"*Sintering behavior of Al-6061 powder produced by rapid solidification process*", Powder Metall, pp.1-6, (2010).
15. Macaskill, I. A., Hexemer, R.L., Donaldson, I.W. and Bishop, D.P.,"*Effect of magnesium, tin and nitrogen on the sintering response of aluminum powder*", J Mater Process Technol, vol. 210, pp. 2252-2260, ( 2010).