



## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

# بررسی تأثیر جوانه‌زایی بر سیالیت و حساسیت به پارگی گرم آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم بهسازی شده توسط سریم

حسین محمدی<sup>۱</sup>، رضا تقی‌آبادی<sup>۲\*</sup>، مهدی ملکان<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مواد، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین.

۲- دانشیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

\* نویسنده مکاتبه کننده: Email: taghiabadi@ikiu.ac.ir

### چکیده:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۶

در تحقیق حاضر تأثیر فرایند جوانه‌زایی بر رفتار پارگی گرم آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم بهسازی شده توسط ۳ درصد وزنی سریم مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور سه مقدار مختلف تیتانیم (۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ درصد وزنی) از طریق جوانه‌زایی Al-5Ti-1B به ترکیب آلیاژ اضافه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، افزودن تیتانیم موجب بهبود جزئی سیالیت، کاهش نسبی کسر حجمی و توزیع تخلخل‌ها، کاهش اندازه دانه‌ها و کاهش شاخص حساسیت به پارگی گرم (HTS) آلیاژ مورد تحقیق می‌شود. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده افزودن ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ درصد وزنی تیتانیم به ترتیب موجب کاهش حدود ۵، ۲۰ و ۳۱ درصدی، ۲۰، ۷۵ و ۸۰ درصدی و ۹، ۲۴ و ۳۴ درصدی میزان تخلخل، اندازه دانه و HTS آلیاژ می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از بررسی‌های ساختاری و سطح مقطع شکست پارگی گرم، بهبود نسبی مشاهده شده در رفتار پارگی گرم را می‌توان به کاهش اندازه دانه‌ها و تبعات مثبت ناشی از این تغییرات شامل کاهش میزان تخلخل و افزایش استحکام، کاهش ضخامت لایه مذاب بین دانه‌ها و در نتیجه افزایش نیروی موئینگی و ارتقای شرایط تغذیه بین دانه‌ای، کاهش انقباض خطی حین انجماد و کاهش شدت تنش وارده به مرزهای دانه به‌عنوان مراکز اشاعه آسان ترک گرم در ساختار نسبت داد.

### واژه‌های کلیدی:

پارگی گرم،

آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم،

سریم،

جوانه‌زایی،

تیتانیم.

### ارجاع به این مقاله:

حسین محمدی، رضا تقی‌آبادی، مهدی ملکان، بررسی تأثیر جوانه‌زایی بر سیالیت و حساسیت به پارگی گرم آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم بهسازی شده توسط سریم، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، زمستان ۱۴۰۱، جلد ۶، شماره ۳، صفحات ۱۹۵-۲۰۲.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2023.410726.1182

### ۱- مقدمه

با این حال، سیالیت و قابلیت ریخته‌گری کم، تخلخل زیاد و استعداد قابل توجه به پارگی گرم، تولید این آلیاژها به روش ریخته‌گری به ویژه ریخته‌گری در قالب‌های دائمی را با چالش‌های جدی مواجه ساخته است [۳]. شکل‌گیری ترک‌های ناشی از پارگی گرم غالباً موجب از کار افتادگی قطعات و یا افزایش قابل ملاحظه هزینه‌های تعمیر آن‌ها می‌شود. بر این اساس تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه شناخت مکانیزم‌ها و ارائه راهکارهای مناسب برای بهبود مقاومت به پارگی گرم این آلیاژها

آلیاژهای کارپذیر بر پایه سیستم دوتایی آلومینیم-مس به دلیل چگالی کم، قابلیت عملیات حرارتی و تحمل نقص<sup>۱</sup> خوب از اهمیت صنعتی بسیار بالایی دارند و عمدتاً در کاربردهای نیازمند نسبت استحکام به وزن بالا مانند صنایع خودرو و صنایع هوا فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله کاربردهای نوعی این آلیاژ می‌توان به ساخت بدنه و اجزای مورد استفاده در سازه هواپیما، پیچ و پرچ و چرخ تریلی‌ها اشاره نمود [۱ و ۲].

<sup>1</sup> Damage tolerance

به‌دست آمده، مطلوب‌ترین عملکرد مربوط به جوانه‌زایی توسط Ti، Zr و Ti+B و ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به عنصر Cu بود [۹]. متز<sup>۷</sup> و فلمینگز<sup>۸</sup> تاثیر اندازه دانه ریز و درشت را بر پارگی گرم آلیاژ Al-4Cu مورد بررسی قرار دادند. بر اساس گزارش ایشان، در آلیاژهای ریزدانه، دانه‌ها برای مدت زمانی طولانی‌تر از هم جدا هستند لذا انتظار می‌رود که آلیاژ بدون شکل‌گیری ترک گرم، برای مدت زمانی طولانی‌تر قادر به جذب و دفع تنش‌های انقباضی ایجاد شده طی فرایند انجماد باشد [۱۰]. تحقیقات انجام شده روی آلیاژ ۲۱۳۹ تولید شده به روش ساخت افزایشی نیز حاکی از تاثیر مثبت جوانه‌زایی و کاهش اندازه دانه‌ها در بهبود رفتار پارگی گرم است. در این تحقیقات، تاثیر مثبت جوانه‌زایی بر پارگی گرم عمدتاً به تغییر مورفولوژی دانه‌ها از ستونی به هم محور، تغییر مکانیزم تغذیه بین دندریتی/بین دانه‌ای و تغییر فشار موئینگی نسبت داده شده است [۱۱].

در حالی که اغلب محققان بر تاثیر مثبت جوانه‌زایی در کاهش حساسیت به پارگی گرم<sup>۹</sup> تاکید دارند، برخی محققان معتقدند که تاثیر جوانه‌زایی به شرایط سیستم آلیاژی بستگی دارد و ریزدانه‌سازی لزوماً و به تنهایی قادر به ممانعت از پارگی گرم نیست [۱۲]. بر اساس برخی گزارش‌ها کاهش اندازه دانه‌ها به واسطه کاهش رخنه‌پذیری مذاب<sup>۱۰</sup> در ناحیه خمیری، موجب افزایش حساسیت به پارگی گرم می‌شود [۱۳]. تحقیقات سابائو<sup>۱۱</sup> نیز حاکی از آن است که تاثیر ریزدانه‌سازی بر مقاومت به پارگی گرم آلیاژ AlCuMnZr حاوی ۴/۸۲ تا ۸/۰۱ درصد وزنی مس به غلظت مس آلیاژ وابسته است و بهترین شرایط در غلظت‌های مس بیش از ۷/۳ درصد وزنی (و کمینه غلظت آهن و سیلیسیم) حاصل می‌شود. نتایج یک تحقیق روی یک آلیاژ آلومینیم-مس (آلیاژ ۲۰۶ حاوی ۰/۱۲ درصد وزنی آهن و ۰/۰۶ درصد وزنی سیلیسیم) نیز نشان می‌دهد که ریزدانه‌سازی قادر به بهبود رفتار پارگی گرم نبوده است. این در حالی است که پس از ریزدانه‌سازی آلیاژ ۲۰۶ حاوی ۰/۰۵ درصد وزنی آهن و ۰/۰۵ درصد وزنی سیلیسیم، کاهش در پارگی گرم آن مشاهده شد [۱۴]. این تفاوت می‌تواند به دلیل غلظت کمتر ناخالصی آهن یا تغییر دمای قالب هنگام بارریزی باشد. بنابراین با توجه به اهمیت صنعتی آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم، در تحقیق حاضر سعی شده است تاثیر مقادیر مختلف جوانه‌زای تیتانیم (در محدوده مجاز) بر حساسیت به پارگی گرم آلیاژ ۲۰۲۴ بهسازی شده توسط ۳ درصد وزنی

صورت پذیرفته است. پارگی گرم که تحت عنوان ترک حرارتی<sup>۱</sup>، شکنندگی حرارتی<sup>۲</sup>، ترک گرم خط سالیدوس<sup>۳</sup> و شکنندگی انقباضی<sup>۴</sup> نیز شناخته می‌شود، در حین انجماد و در محدوده دمایی بین لیکوئیدوس و سالیدوس رخ می‌دهد [۴]. این نوع پارگی، غالباً در اثر اعمال کرنش‌های ناشی از انقباض به بخش‌هایی از قطعه که در مرحله انجماد خمیری هستند (یا بخش‌هایی که در دمای انجماد به استحکام کافی برای مقابله با کرنش‌های وارده دست نیافته‌اند) رخ می‌دهد. از جمله مهمترین عوامل موثر بر شکل‌گیری این نوع ترک‌ها می‌توان به تغذیه غیر موثر، کمبود مذاب در نواحی بین‌دندریتی برای جبران انقباضات حجمی و نیز تنش‌های حرارتی ناشی از انقباضات حین انجماد اشاره نمود [۶-۴]. بنابراین پارامترهای موثر بر سیالیت و قابلیت تغذیه بین دندریتی مذاب نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری ترک‌های ناشی از پارگی گرم دارند.

یکی از مهمترین عوامل موثر بر سیالیت و قابلیت تغذیه بین دندریتی مذاب در آلیاژهای صنعتی، شکل و اندازه دانه‌ها است. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه تاثیر تغییر مورفولوژی و/یا کاهش اندازه دانه از طریق تغییر سرعت انجماد، اعمال ارتعاشات مکانیکی، افزودن مواد جوانه‌زا و... بر رفتار پارگی گرم آلیاژهای مهندسی دارای دامنه انجماد زیاد انجام شده است. نتایج این تحقیقات غالباً حاکی از بهبود مقاومت به پارگی گرم پس از جوانه‌زایی است. ایستون<sup>۵</sup>، تاثیر مقادیر مختلف تیتانیم (۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد وزنی) را بر شکل‌گیری ترک‌های ناشی از پارگی گرم در آلیاژ ۶۰۶۱ بررسی نمود. بر اساس نتایج تحقیقات وی، جوانه‌زنی موجب تاخیر در انجماد، بهبود شرایط تغذیه بین دندریتی و بهبود مقاومت به پارگی گرم می‌شود [۷]. وارینگتون<sup>۱</sup> و همکاران در بررسی تاثیر جوانه‌زایی بر مقاومت به پارگی گرم آلیاژهای ۷۰۱۰ و ۷۰۵۰ نشان دادند که افزودن ماده جوانه‌زا به این آلیاژها موجب جایگزین شدن دانه‌های ستونی توسط دانه‌های هم محور شده و مقاومت‌شان به پارگی گرم بهبود می‌یابد هر چند افزایش بیش از حد مقدار ماده جوانه‌زا، تاثیر منفی بر مقاومت به ترک حرارتی دارد [۸]. ماتسودا<sup>۶</sup> و همکاران تاثیر عناصر مختلف شامل Cr، Ni، Be، Si، B، Mn، Fe، Zr، Ti+B و Cu را بر مقاومت به پارگی گرم آلیاژهای Al-Zn-Mg مورد مطالعه قرار دادند. مقدار عنصر اضافه شده حدود ۰/۵ درصد (و در مورد B+Ti حدود ۰/۰۶ درصد) بود. بر اساس نتایج

<sup>8</sup> Flemings

<sup>9</sup> Hot tearing susceptibility, HTS

<sup>10</sup> Permeability

<sup>11</sup> Sabau

<sup>1</sup> Hot cracking

<sup>2</sup> Hot shortness

<sup>3</sup> Super Solidus Cracking

<sup>4</sup> Shrinkage Brittleness

<sup>5</sup> Shrinkage Brittleness

<sup>6</sup> Matsuda

<sup>7</sup> Metz

گیری، مقدار مورد نظر از عنصر سربیم (۳ درصد وزنی) با بهره‌گیری از آمیزان Al-30Ce، به مذاب اضافه شد. برای اطمینان از توزیع یکنواخت عناصر، مذاب به آرامی توسط یک میله فولادی پوشش داده شده توسط ملات سبز<sup>۱</sup> هم زده شد. در ادامه مقادیر مورد نظر از جوانه‌زای Al-5Ti-1B برای دستیابی به مقادیر مورد نظر تیتانیوم (۰/۰۱، ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ درصد وزنی) به مذاب افزوده شد و مذاب به آرامی هم زده شد. پس از گذشت حدود ۵ دقیقه، دوباره شکل گرفته از روی سطح مذاب حذف شد و برای بررسی مقاومت به پارگی گرم، عملیات ذوب‌ریزی در دمای ۷۲۰ درجه سانتیگراد در یک قالب ریخته‌گری میله محدود<sup>۲</sup> [۱۷] (شکل ۱) انجام شد. لازم به ذکر است به منظور تسهیل معرفی، کلیه آلیاژها توسط یک کد حرفی به شرح ارائه شده در جدول ۱ معرفی شده‌اند.

سربیم (غلظت بهینه برای بهبود مقاومت به پارگی گرم آلیاژ) به صورت کمی مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. لازم به ذکر است که اخیراً و به دلیل اثبات اثرات مثبت بر قابلیت و عملکرد ریخته‌گری، سربیم (Ce) به عنوان یک افزودنی آلیاژی مورد توجه محققان و ریخته‌گران صنعت آلومینیم قرار گرفته است [۱۵و۱۶].

## ۲- مواد و روش تحقیق

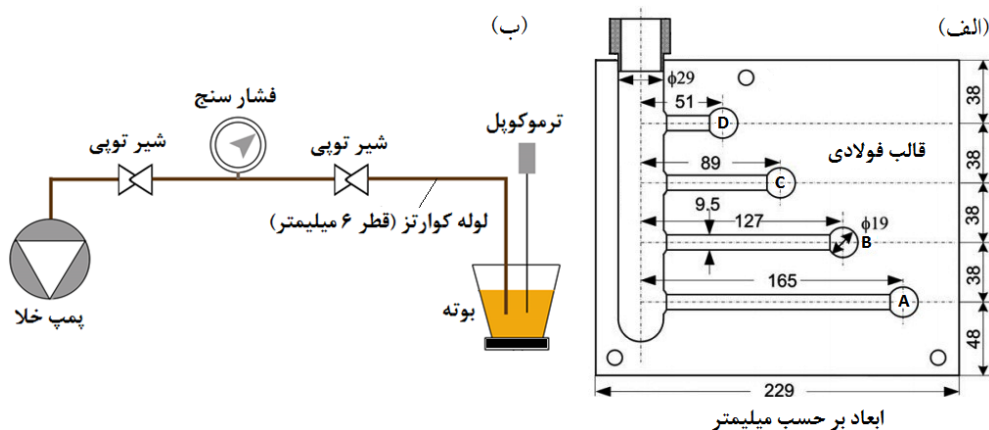
ترکیب شیمیایی آلیاژ ۲۰۲۴ مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. عملیات ذوب نمونه‌ها در یک بوتله رسی-گرافیتی توسط یک کوره مقاومتی VM2L-1200 ساخت شرکت آذر کوره انجام شد. پس از تکمیل عملیات ذوب و سرپاره

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ ۲۰۲۴ (بر حسب درصد وزنی) و معرفی کد نمونه‌ها

عنصر	مس	منیزیم	سیلیسیم	آهن	تیتانیوم	منگنز	باقیمانده
غلظت	۴/۳۸	۱/۵۴	۰/۱۳	۰/۱۴	--	۰/۴۴	آلومینیم

معرفی کد آلیاژهای مورد بررسی							
کد آلیاژ	۲۰۲۴	2024-Ce	Ce-0.01Ti	Ce-0.02Ti	Ce-0.05Ti		
غلظت سربیم	--	--	۳/۰۷ درصد وزنی				
مقدار تیتانیوم	--	--	۰/۰۱	۰/۰۲۵	۰/۰۵		



شکل ۱- تصویر نمادین (الف) قالب فولادی آزمایش پارگی گرم و (ب) تجهیزات آزمایش تعیین سیالیت [۱۷].

جدول ۲- توصیف انواع ترک [۱۷]

توصیف	$f_{Crack}$	نوع ترک
نمونه بدون ترک	۰	بدون ترک
ترک مویی تقریباً تا نیمی از محیط میله اشاعه یافته‌باشد.	۱	ترک مویی
ترک مویی که کل محیط میله را احاطه کرده باشد.	۲	ترک خفیف
ترکی بزرگ که در کل محیط میله اشاعه یافته است.	۳	ترک شدید
جدایش تقریباً کامل میله	۴	ترک کامل

پس از تکمیل انجماد، تجزیه و تحلیل رفتار پارگی گرم آلیاژها با محاسبه HTS از طریق بررسی شدت ترک‌های ایجاد شده روی میله‌های قالب به صورت چشمی و به شرح زیر انجام شد: (الف) بررسی چشمی ترک‌های سطحی و تعیین مقدار عددی  $f_{Crack}$  با استفاده از جدول ۲؛ (ب) تعیین مقدار عددی  $f_{Length}$  هر میله با توجه به جدول ۳؛ (ج) محل وقوع ترک ( $f_{Location}$ ): سمت راهگاه (ضریب ۱)، سمت بخش کروی (ضریب ۲) و وسط میله (ضریب ۳)

<sup>2</sup> Constrained rod casting

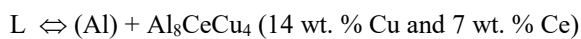
1 Green mortar

## ۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر مواد جوانه زا بر ریزساختار و ابعاد و مورفولوژی دانه‌ها در آلیاژ ۲۰۲۴ بهسازی شده توسط سریم

ریزساختار آلیاژ ۲۰۲۴-Ce در دو بزرگنمایی مختلف و ریزساختار آلیاژهای جوانه‌زایی شده  $Ce-0.01Ti$  و  $Ce-0.05Ti$  به ترتیب در شکل‌های (۲-الف و ۲-ب) و (۲-ج و ۲-د) نشان داده شده است. همچنین به منظور بررسی بهتر توزیع عناصر به ویژه عنصر سریم در ریزساختار آلیاژ، نقشه توزیع برخی از مهمترین عناصر تشکیل دهنده فازها در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج آنالیز EDS فازهای بین فلزی مهم قابل مشاهده در ریزساختار آلیاژ ۲۰۲۴-Ce نیز در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل‌های ۲-الف و ۲-ب و نتایج آنالیز عنصری ارائه شده در جدول ۴، ریزساختار آلیاژ پایه متشکل از زمینه روشن  $\alpha-Al$  و ترکیبات بین فلزی مختلف غنی از مس و سریم شامل  $Al_2CuMg$ ،  $AlCuSiCe$ ،  $Al_7Cu_2Mn$ ،  $Al_8CeCu_4$  و  $Al_{11}Ce_3$  است که روی تصویر میکروسکوپی مشخص شده‌اند.

با توجه به تصاویر ریزساختاری و نمودار سه‌تایی  $Al-Cu-Ce$  [۱۹]، می‌توان مشاهده نمود که افزودن سریم به آلیاژ ۲۰۲۴ موجب شکل‌گیری ترکیبات بین فلزی غنی از سریم شامل فاز اولیه  $Al_{11}Ce_3$  با نقطه ذوب ۱۲۳۵ درجه سانتیگراد، فاز  $AlCuSiCe$  و ترکیب بین فلزی  $Al_8CeCu_4$  طی واکنش یوتکتیک سه تایی در دمای حدود ۶۱۰ درجه سانتیگراد می‌شود:



لازم به ذکر است که در توافق با نتایج تحقیقات قبلی شکل‌گیری ترکیبات نقطه ذوب بالای غنی از سریم، به واسطه افزایش استحکام دما بالای آلیاژ موجب کاهش حساسیت به پارگی گرم می‌شود [۲۰]. صرف‌نظر از تاثیر سریم، مقایسه دقیق ریزساختار آلیاژ بهسازی شده توسط سریم قبل و بعد از جوانه‌زایی حاکی از آن است که جوانه‌زایی تاثیر خاصی روی ریزساختار و ترکیبات فازي موجود در ریزساختار نداشته است.

تاثیر فرایند جوانه‌زایی بر ساختار دانه‌ای (مورفولوژی دندريت‌های) آلیاژ ۲۰۲۴ حاوی سریم در شکل ۴ ارائه شده است. همانگونه که مشخص است قبل از افزودن مواد جوانه‌زا و در توافق با نتایج تحقیقات پیشین [۲۱] آلیاژ ۲۰۲۴ بهسازی شده توسط سریم متشکل از دانه‌های هم محور است. با توجه به ترکیب شیمیایی نسبتاً پیچیده و حضور عناصر آلیاژی متعدد در ترکیب

جدول ۳: ارتباط نوع میله و ضریب عددی مربوطه [۱۷]

A	B	C	D	نوع میله
۴	۸	۱۶	۳۲	مقدار عددی $f_{Length}$

(د) محاسبه HTS با استفاده از رابطه زیر:

$$HTS = \sum_{i=A}^D (f_{crack} \times f_{Length} \times f_{Location})$$

برای بررسی ساختار، پس از آماده‌سازی سطحی نمونه‌ها بر اساس روش‌های استاندارد متالوگرافی، عملیات حکاکی سطحی برای بررسی‌های ریزساختاری توسط محلول HF ۵٪ درصد و برای بررسی مورفولوژی دانه‌ها توسط محلول  $30HNO_3+60HCl+5HF+5H_2O$  انجام شد. بررسی ریزساختار نمونه‌ها توسط یک میکروسکپ نوری Olympus BX60M انجام شد. اندازه دانه‌ها به روش خطوط متقاطع، بر اساس استاندارد ASTM E112 و توسط نرم‌افزار Clemex Vision انجام شد. سیالیت آلیاژها به روش لوله مکند<sup>۱</sup> (آزمایش خلا) (شکل ۱-ب) تعیین شد. به این منظور پس از رسیدن دمای مذاب به حدود  $750^\circ C$  بوته مذاب به زیر لوله مکند دستگاه (لوله کوارتز با قطر خارجی ۸ میلی‌متر، قطر داخلی ۶ میلی‌متر و طول ۹۰۰ میلی‌متر) هدایت شد به گونه‌ای که طولی معادل ۵۰ میلی‌متر از لوله درون مذاب واقع شود. در ادامه شیر خلاء باز شد تا در اثر خلاء موجود در لوله (معادل ۲۰۰ میلی‌متر جیوه پایین‌تر از فشار اتمسفری) مذاب به درون آن مکیده شود. پس از تکمیل انجماد، مسافت طی شده توسط مذاب درون لوله اندازه‌گیری و ثبت شد.

درصد تخلخل نمونه‌ها به روش ارشمیدس تعیین شد. ابتدا چگالی واقعی نمونه‌ها از طریق تعیین جرم نمونه در هوا و آب مقطر توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت  $10^{-4}$  گرم با بهره‌گیری از رابطه ۱ تعیین شد:

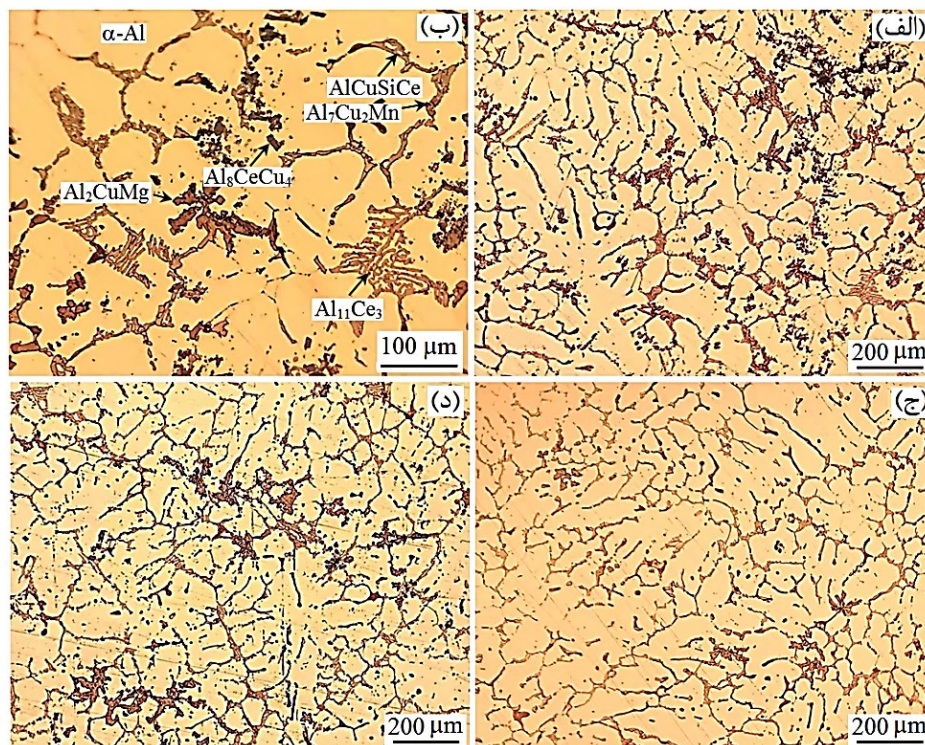
$$\rho_r = \frac{m}{m-m_w} \times \rho_w \quad (1)$$

در این رابطه  $m$  جرم نمونه در هوا،  $m_w$  جرم نمونه در آب مقطر،  $\rho_r$  چگالی واقعی نمونه و  $\rho_w$  چگالی آب مقطر است. برای تعیین درصد تخلخل نمونه‌ها از رابطه ۳ استفاده شد:

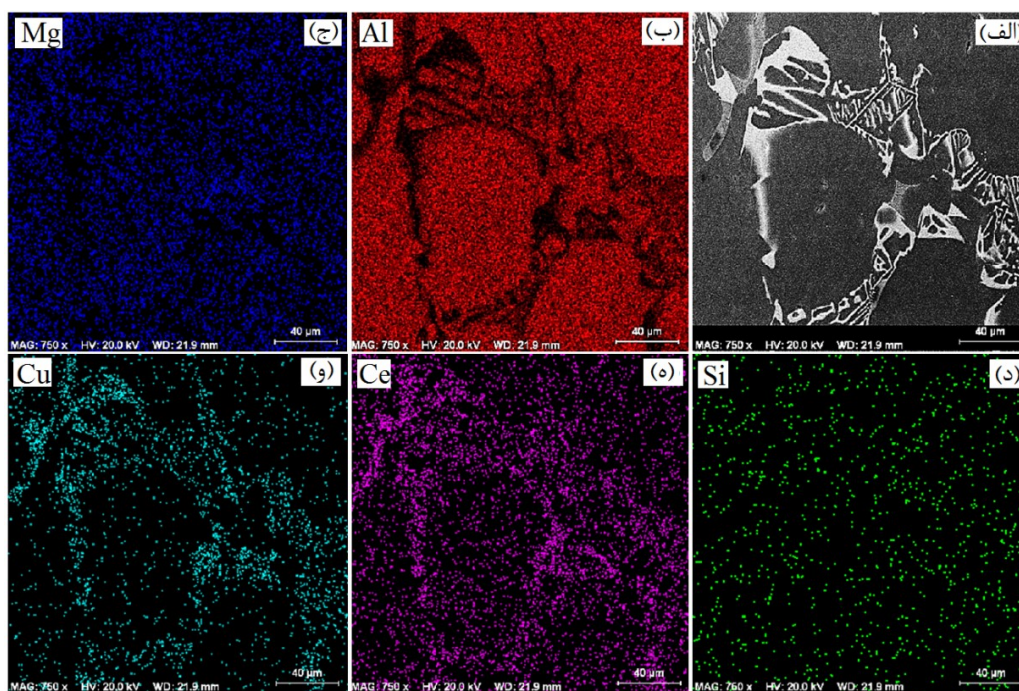
$$\%P = \frac{\rho_{th} - \rho_r}{\rho_{th}} \quad (2)$$

در این رابطه  $\rho_r$  چگالی واقعی و  $\rho_{th}$  چگالی تئوری نمونه‌ها است که با استفاده از آنالیز شیمیایی آلیاژ و چگالی دقیق عناصر تعیین شد [۱۸].

<sup>1</sup> Suction tube fluidity test



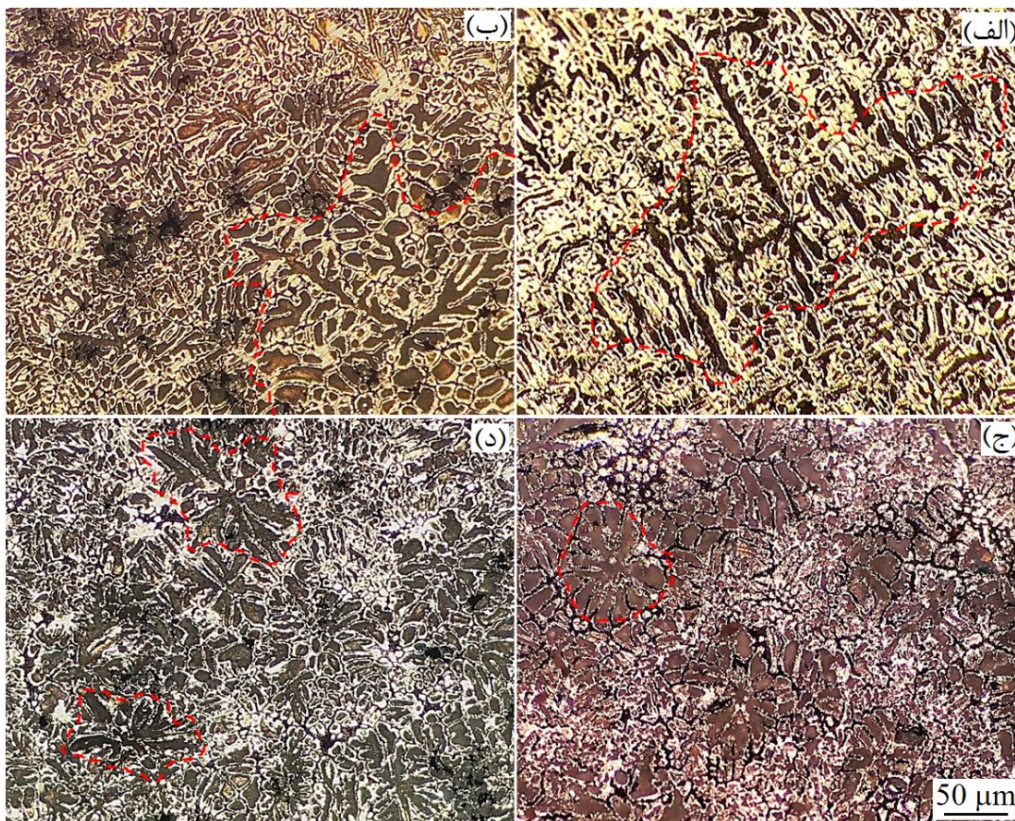
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی نوری نشان‌دهنده ریزساختار (الف و ب) آلیاژ پایه بهسازی شده توسط سریم (Ce-2024) (مهمترین اجزای ریزساختاری روی تصویر ب مشخص شده‌اند)، (ج) آلیاژ Ce-0.01Ti و (د) آلیاژ Ce-0.05Ti.



شکل ۳- (الف) تصاویر میکروسکوپ الکترونی آلیاژ 2024-Ce و نقشه توزیع عناصر شامل (ب) آلومینیوم، (ج) منیزیم، (د) سیلیسیم، (ه) سریم و (و) مس.

جدول ۴- آنالیز عنصری EDS فازهای مشخص شده در شکل ۲-ب

ترکیب شیمیایی، درصد اتمی					فاز		
آلومینیوم	سیلیسیم	منیزیم	سریم	منگنز	مس	موقعیت فاز روی شکل الف-۲	
۷۲/۱۱	—	۱۴/۳۰	—	—	۱۳/۵۹		Al <sub>2</sub> CuMg
۵۶/۸۱	۹/۸۵	—	۱۲/۴۷	—	۲۰/۸۷		AlCuSiCe
۷۶/۳۴	—	—	—	۱۱/۳۱	۱۲/۳۵		Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Mn
۶۶/۱۳	—	—	۹/۴۳	—	۲۴/۴۴		Al <sub>8</sub> CeCu <sub>4</sub>
۸۱/۷۴	—	۱/۰۳	۱۶/۵۳	۰/۰۶	۰/۶۵	Al <sub>11</sub> Ce <sub>3</sub>	



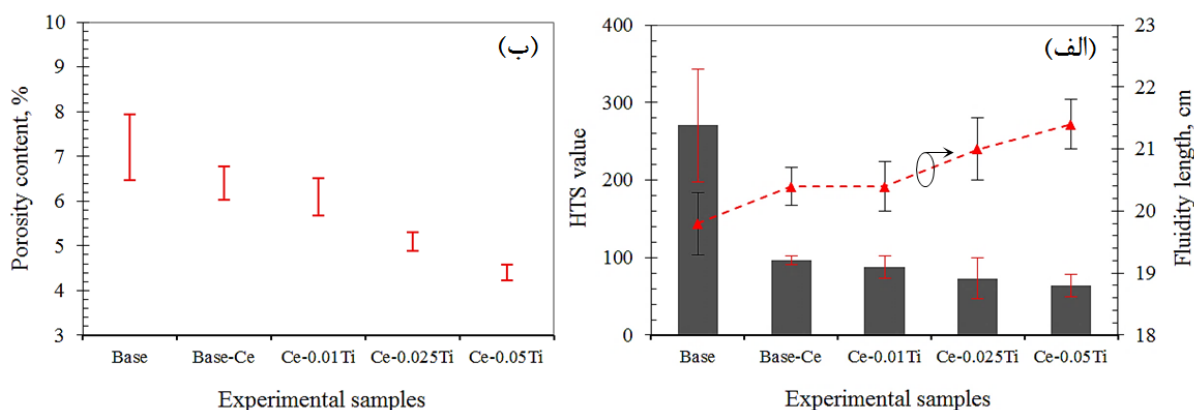
شکل ۴- تاثیر جوانه‌زایی بر مورفولوژی دانه‌ها (الف) آلیاژ 2024-Ce، (ب) آلیاژ Ce-0.01Ti، (ج) آلیاژ Ce-0.025Ti، (د) آلیاژ Ce-0.05Ti.

### ۲-۳- تاثیر جوانه‌زایی بر سیالیت، درصد تخلخل و رفتار پارگی گرم آلیاژ 2024-Ce

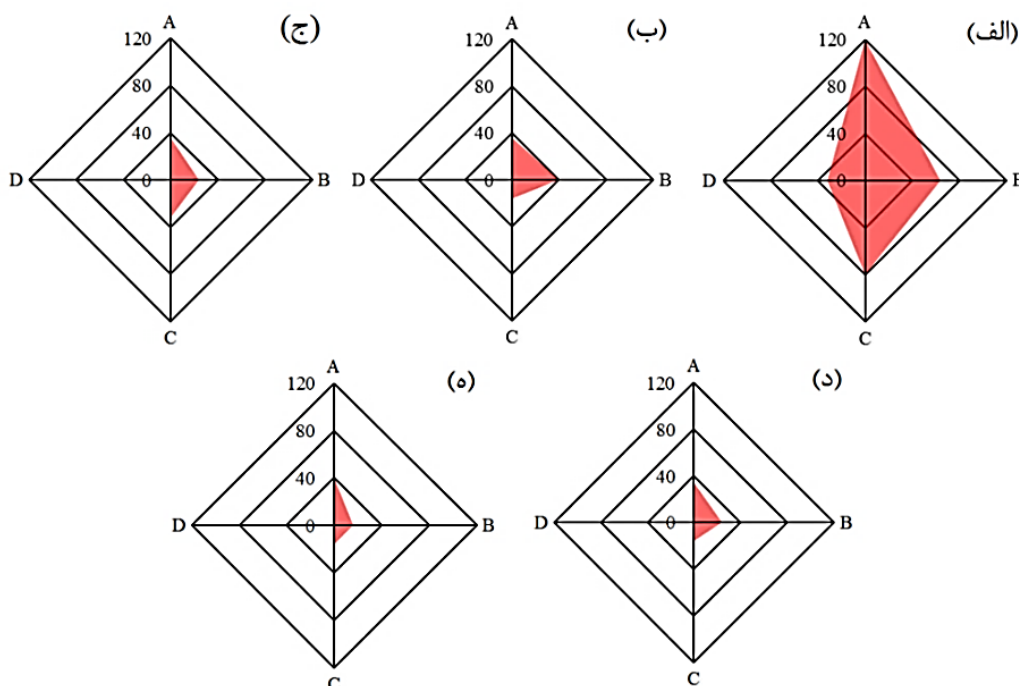
نمودار تغییرات سیالیت، شاخص HTS و درصد تخلخل آلیاژ ۲۰۲۴ بهسازی شده توسط سریم بر حسب مقدار تیتانیوم باقیمانده به ترتیب در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از بررسی شاخص HTS در قالب نمودار رد پا<sup>۱</sup> در شکل ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است که نمودار رد پا [۵] توصیف گرافیکی از مقاومت به پارگی گرم بوده و افزایش مساحت نمودار معادل کاهش مقاومت به پارگی گرم است. ضمن آنکه با استفاده از این نمودار، وقوع یا عدم وقوع پارگی گرم در هر یک از میله‌های آزمایش قابل بررسی است. برای رسم این نمودار مقدار  $(f_{Crack} \times f_{Length} \times f_{Location})$  مربوط به هر میله به صورت جداگانه و با استفاده از اطلاعات جداول ۲ و ۳ محاسبه شده و روی محورهای چهارگانه نمودار درج می‌شود. همچنین برای مقایسه بهتر و نشان دادن نقش عنصر سریم بر مقاومت به پارگی گرم آلیاژ ۲۰۲۴، مقدار HTS آلیاژ ۲۰۲۴ بهسازی نشده نیز در تصاویر نشان داده شده است.

آلیاژ ۲۰۲۴ (جدول ۱)، شکل‌گیری این دانه‌ها را می‌توان به افزایش میزان تحت تبرید غلظتی در آغاز فرایند انجماد نسبت داد. ضریب توزیع عناصر آلیاژی مهم موجود در ترکیب شیمیایی آلیاژ شامل مس، سریم، منیزیم، سیلیسیم و منگنز به ترتیب حدود ۰/۱۷، ۰/۰۰۳، ۰/۴۳، ۰/۱۳ و ۰/۹ است [۱۹ و ۲۲]. همانگونه که مشاهده می‌شود صرف‌نظر از منگنز و منیزیم، ضریب توزیع سریم، سیلیسیم و مس به میزان قابل توجهی کمتر از ۱ است. این بدان معنی است که هنگام انجماد بخش قابل توجهی از اتم‌های این عناصر به توده مذاب مقابل جبهه انجماد پس زده می‌شود. تحت این شرایط، غلظت مذاب و متعاقباً میزان تحت تبرید غلظتی تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و می‌تواند موجب ترغیب رشد هم محور (مستقل) شود [۲۳]. با این حال، افزودن مواد جوانه‌زا به دلیل افزایش مکان‌های جوانه‌زنی غیرهمگن موجب کاهش ابعاد و افزایش کسر دانه‌های هم محور شده است. بر اساس نتایج آنالیز تصویری، اندازه متوسط دانه‌ها از حدود  $724 \pm 46$  میکرومتر مربع در آلیاژ پایه به ترتیب به حدود  $581 \pm 39$ ،  $183 \pm 26$  و  $140 \pm 17$  میکرومتر مربع در نمونه‌های جوانه‌زایی شده توسط ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ درصد وزنی تیتانیوم باقیمانده شده است.

<sup>۱</sup> Foot print



شکل ۵- تاثیر مقدار تیتانیوم باقیمانده بر (الف) طول سیالیت و شاخص HTS آلیاژ 2024-Ce (برای مقایسه، اعداد مربوط به آلیاژ بهسازی نشده روی نمودارها مشخص شده‌اند) و (ب) درصد تخلخل آلیاژ 2024-Ce.



شکل ۶- نمودار رد پا شاخص HTS (الف) آلیاژ 2024، (ب) آلیاژ 2024-Ce، (ج) Ce-0.01Ti، (د) Ce-0.02Ti و (ه) Ce-0.05Ti.

را افزایش می‌دهد. این در حالی است که پایین بودن مقدار فاز یوتکتیک مذاب نیز امکان خود ترمیم شونده<sup>۲</sup> یا ترمیم ترک های تشکیل شده در اثر پارگی گرم را کاهش می‌دهد [۲۰]. افزودن سریم موجب بهبود مقاومت به پارگی گرم آلیاژ ۲۰۲۴ می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش پارگی گرم (شکل ۵- الف)، شاخص حساسیت به پارگی گرم آلیاژ 2024-Ce حدود ۶۴ درصد کمتر از شاخص مذکور در آلیاژ ۲۰۲۴ است. این نتیجه در توافق با نتایج تحقیقات پیشین در زمینه تاثیر سریم بر قابلیت ریخته‌گری آلومینیم و آلیاژهای آن است. لو<sup>۳</sup> و همکاران در تحقیقات خود روی پارگی گرم آلومینیم خالص تجاری نشان دادند که افزودن ۰/۲-۰/۳ درصد وزنی سریم به دلیل کاهش

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های ۵-الف و ۶، شاخص HTS دو آلیاژ Base (۲۰۲۴ بهسازی نشده) و 2024-Ce به ترتیب حدود ۲۷۰ و ۹۷ است. بالا بودن حساسیت آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم به پارگی گرم، غالباً به وسعت زیاد دامنه انجماد و مقدار کم فاز یوتکتیک در ساختار آن نسبت داده می‌شود [۲۴]. با این حال، بررسی‌های اسکین<sup>۱</sup> حاکی از آن است که بالا بودن میزان انقباض خطی هنگام انجماد از عوامل بسیار مهم در بروز پارگی گرم در آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم است [۲۵]. افزایش دامنه انجماد به دلیل ترغیب انجماد خمیری، کاهش سیالیت و تشکیل تخلخل‌های انقباضی تاثیر منفی بر عملکرد تغذیه بین دندریتی [۲۶] دارد و زمان واقع شدن آلیاژ در ناحیه آسیب‌پذیر (ناحیه خمیری) [۲۷]

<sup>3</sup> Lu

<sup>1</sup> Eskin

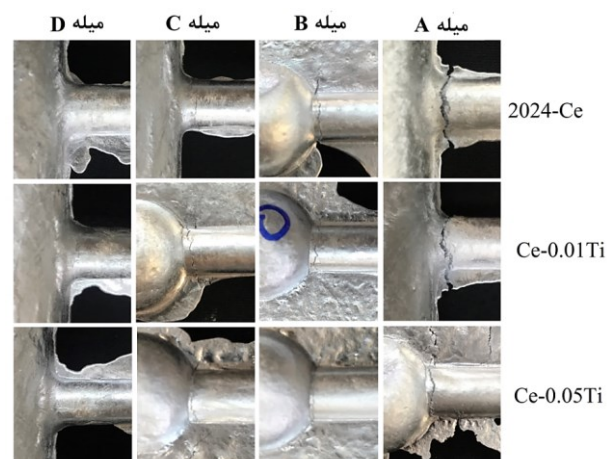
<sup>2</sup> Self-healing

بر اساس تئوری فلمینگز در آلیاژهای با انجماد هم محور، افزودن مواد جوانه‌زا به واسطه تعویق برخورد دندریته‌ها<sup>۱</sup> و افزایش کسر جامد بحرانی قبل از برخورد دندریته‌های در حال رشد، موجب ارتقای طول سیالیت می‌شود. با این حال در توافق با نتیجه تحقیقات دال و همکاران روی آلیاژهای Al-4Cu [۳۳]، افزایش مشاهده شده در سیالیت آلیاژهای ریزدانه شده اندک و در محدوده انحراف معیار اندازه‌گیری است (شکل ۵-الف). تاثیر جوانه‌زایی بر سیالیت آلیاژهای آلومینیم قبلا نیز توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است اما نتایج به‌دست آمده ضد و نقیض هستند. در حالی که برخی محققان مانند تیریکی اوقلو [۳۴]، کاون [۳۵] و دال [۳۶] معتقدند جوانه‌زایی تاثیری بر سیالیت ندارد، برخی دیگر [۳۷ و ۳۸] تاثیر مثبت جوانه‌زایی را بر سیالیت آلیاژهای آلومینیم گزارش نموده‌اند. همچنین گزارش‌هایی نیز مبنی بر بهبود مشروط سیالیت در اثر افزودن مواد جوانه‌زا ارائه شده است [۳۹ و ۴۰]. این تناقض‌ها احتمالا ناشی از پیچیدگی و تعدد پارامترهای موثر بر تاثیر جوانه‌زایی روی سیالیت آلیاژهای آلومینیم شامل ترکیب شیمیایی آلیاژ، نوع انجماد، نوع و مقدار ماده جوانه‌زا، زمان نگهداری مذاب پس از جوانه‌زایی، دمای مذاب و ... است.

آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم طی فرایند انجماد انقباض خطی قابل توجهی (حدود ۰/۲ درصد) را تجربه می‌نماید که باعث افزایش حساسیت آن به پارگی گرم می‌شود [۴۱]. با این حال تحقیقات قبلی نشان داده است که فرایند ریزدانه‌سازی با افزایش کسر جامد بحرانی (برای آغاز پارگی گرم) و کاهش مقدار انقباض خطی هنگام انجماد تاثیری مثبت بر مقاومت به پارگی گرم دارد [۲۴ و ۴۲]. در واقع به نظر می‌رسد که کاهش ابعاد و افزایش قابل ملاحظه چگالی جوانه‌ها در مذاب آلیاژهای ریزدانه شده موجب تعویق فرایند پل زدن دانه‌ها<sup>۲</sup> و کاهش دمای آغاز انقباض خطی می‌شود. تحت این شرایط، اولاً مقدار انقباض خطی کاهش می‌یابد و ثانياً قبل از آغاز انقباض، زمان بیشتری برای وقوع انقباض پیش از انقباض (و جبران بخشی از انقباض) در دسترس خواهد بود. پدیده انقباض قبل از انقباض در اثر رسوب گاز محلول در مذاب رخ داده و با انقباض حجمی مذاب مقابله می‌کند [۴۳ و ۴۴]. در واقع جوانه‌زایی و پیرو آن تشکیل تعداد زیادی از جوانه‌های جامد درون مذاب موجب افزایش قابل توجه سطح تماس جوانه‌ها و مذاب شده و در نتیجه حجم قابل توجهی از گاز (هیدروژن) رسوب می‌نماید که موجب بروز انقباض در مذاب می‌شود. صرفنظر از تاثیر جزئی جوانه‌زایی در بهبود سیالیت آلیاژ (شکل ۵-الف)، از دیگر دلایل بهبود نسبی مقاومت به پارگی گرم در

اندازه دانه‌ها و بهبود سیالیت موجب بهبود مقاومت به پارگی گرم می‌شود [۲۸]. همچنین نتایج تحقیقات لیائو و همکاران حاکی از آن است که افزودن ۰/۲ درصد وزنی سریم موجب افزایش قابلیت ریخته‌گری آلیاژ Al-0.3Si-0.2Mg شده و به سبب ریزدانه‌سازی تاثیر مثبت بر حساسیت به پارگی گرم آن دارد [۲۹]. در تحقیقی دیگر، محمود و همکاران نشان دادند که افزودن ۱ درصد وزنی سریم موجب کاهش ۲۵ درصدی اندازه دانه‌ها در آلیاژ ۶۰۶۳ آلومینیم می‌شود [۳۰]. تاثیر مثبت سریم در کاهش اندازه دانه‌ها در تحقیقات دیگر نیز اثبات شده است [۳۰-۳۲].

با توجه به شکل ۵-الف، ریزدانه‌سازی آلیاژ 2024-Ce توسط تیتانیم، تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی طول سیالیت آلیاژ ندارد (تنها حدود ۶ درصد افزایش مشاهده می‌شود) اما موجب کاهش نسبی حساسیت آن به پارگی گرم می‌شود (شکل‌های ۵-الف و ۶). بر اساس محاسبات صورت پذیرفته (شکل ۵-الف) مقدار HTS آلیاژهای حاوی ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ درصد وزنی تیتانیم به ترتیب حدود ۹، ۲۴ و ۳۴ درصد کمتر از مقدار مربوط به آلیاژ 2024-Ce (با شاخص HTS ۹۷) است. تاثیر افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی تیتانیم بر وقوع پارگی گرم در میله‌های A تا D قالب ریخته‌گری میله محدود در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در مقایسه با نمونه جوانه‌زایی نشده (2024-Ce)، آلیاژ جوانه‌زایی شده مقاومت بهتری در برابر پارگی گرم از خود نشان داده است. بررسی نمونه پارگی گرم تهیه شده از این آلیاژ مویید شکل‌گیری محدود ترک‌های بسیار خفیف روی سطح میله‌ها است.

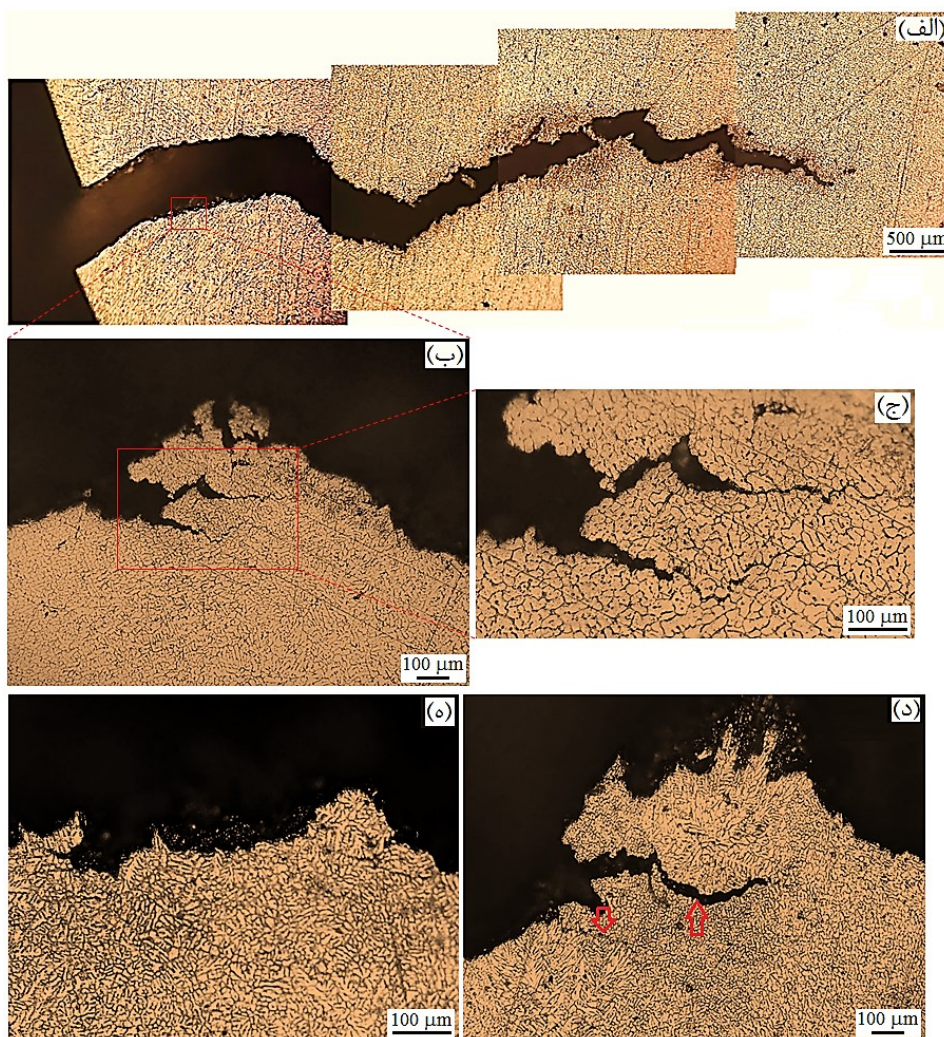


شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی ترک‌های پارگی گرم در دو آلیاژ 2024-Ce و Ce-0.05Ti (قطر میله ۹/۵ میلیمتر).

نواحی بین دندریتی اشاعه یافته‌اند. هم چنین چگونگی اشاعه ترک گرم از طریق مرز دانه‌های هم محور درشت در سطح مقطع نمونه 2024-Ce توسط دو فلش در شکل ۸-د نشان داده شده است. همانگونه که عنوان شد، افزودن تیتانیوم احتمالاً به علت بهبود استحکام آلیاژ، کاهش میزان تخلخل‌ها (شکل ۵-ب)، ترغیب تشکیل دانه‌های ریز و هم‌محور (شکل ۸) و تسهیل حرکت مذاب در نواحی بین‌دندریتی (توسعه تغذیه بین‌دندریتی) از طریق افزایش سیالیت (شکل ۵-الف) و افزایش فشار موینگی مذاب در مرزهای دانه موجب کاهش نسبی حساسیت آلیاژ به پارگی گرم می‌شود. تصویر میکروسکپ نوری تهیه شده از سطح مقطع یک ترک مویی (با ضریب ۱ مطابق جدول ۲) روی سطح میله B در شکل ۸-ا ارائه شده است. شکل‌گیری ترک‌های بسیار ظریف در مجاورت مسیر اشاعه ریز ترک اصلی بیانگر افزایش مقاومت این نمونه در برابر پارگی گرم ناشی از کرنش‌های انقباضی طی فرایند انجماد است.

آلیاژهای جوانه‌زایی شده می‌توان به بهبود شرایط تغذیه بین دندریتی، افزایش استحکام و توانایی ساختار در جذب کرنش‌های انقباضی ایجاد شده طی فرایند انجماد در نواحی خمیری [۴۵]، کاهش ضخامت لایه مذاب بین‌دندریتی (و بین‌دانه‌ای) [۴۵]، افزایش نیروی موینگی برای تغذیه ترک‌های شکل گرفته [۴۵ و ۴۶]، کاهش کسر و اندازه دانه‌های ستونی/دانه‌های هم محور درشت و در نتیجه کاهش تمرکز تنش ایجاد شده در مرزهای دانه به عنوان مراکز اشاعه آسان ترک در ساختار [۴۷] اشاره نمود.

تصاویر میکروسکپی تهیه شده از سطح مقطع پارگی گرم رخ داده در میله B نمونه‌های 2024-Ce و Ce-0.05Ti به ترتیب در شکل های ۸-الف-د و ۸-ه ارائه شده است. تصاویر ۸-الف تا ۸-ج مربوط به یک ترک شدید (با ضریب ۳ مطابق جدول ۲) است. همان‌گونه که در تصاویر با بزرگنمایی زیاد قابل مشاهده است، ترک ناشی از پارگی گرم از طریق نواحی یوتکتیک در



شکل ۸- تصاویر میکروسکپ نوری نشان دهنده ریزساختار سطح مقطع میله‌های آزمایش پارگی گرم، (الف) اشاعه ترک در سطح میله آلیاژ 2024-Ce، (ب و ج) بزرگنمایی بالاتر تصویر الف، (د) چگونگی اشاعه ترک از مرز دانه‌های هم محور درشت در نمونه 2024-Ce و (ه) تصویر سطح مقطع شکست نشان دهنده مسیر اشاعه یک ترک مویی در آلیاژ Ce-0.05Ti

## ۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تاثیر جوانه‌زایی توسط آمیزان Al-5Ti-1B بر رفتار پارگی گرم آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم بهسازی شده با ۳ درصد وزنی سریم مورد بررسی قرار گرفته است. مهمترین نتایج به دست آمده به شرح زیر هستند:

۱- افزودن سریم به آلیاژ ۲۰۲۴ موجب شکل‌گیری ترکیبات بین‌فلزی غنی از سریم نقطه ذوب بالا شامل فاز اولیه  $Al_{11}Ce_3$  و فازهای  $AlCuSiCe$  و  $Al_8CeCu_4$  در ساختار آلیاژ ۲۰۲۴ می‌شود. مقایسه ریزساختار آلیاژ بهسازی شده توسط سریم قبل و بعد از جوانه‌زایی حاکی از آن است که جوانه‌زایی تاثیر خاصی روی ریزساختار و ترکیبات فازی موجود در ریزساختار نداشته است.

۲- افزودن تیتانیوم به ترکیب شیمیایی آلیاژ ۲۰۲۴ ضمن ترغیب شکل‌گیری ساختار ریز و هم‌محور، موجب بهبود جزئی سیالیت آلیاژ می‌شود. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده افزودن ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ درصد وزنی تیتانیوم به ترتیب موجب کاهش حدود ۵، ۲۰ و ۳۱ درصدی و ۷۵، ۲۰ و ۸۰ درصدی میزان تخلخل و اندازه متوسط دانه‌ها می‌شود.

۳- شاخص HTS آلیاژ ۲۰۲۴ بهسازی نشده و ۲۰۲۴ بهسازی شده توسط ۳ درصد وزنی سریم به ترتیب حدود ۲۷۰ و ۹۷ است. مقدار HTS آلیاژهای حاوی ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ درصد وزنی تیتانیوم به ترتیب حدود ۹، ۲۴ و ۳۴ درصد کمتر از مقدار مربوط به آلیاژ ۲۰۲۴ بهسازی شده توسط سریم است.

۴- بهبود نسبی مشاهده شده در رفتار پارگی گرم را می‌توان به کاهش اندازه دانه‌ها و تبعات مثبت ناشی از این تغییرات شامل کاهش میزان تخلخل و افزایش استحکام، کاهش ضخامت لایه مذاب بین دانه‌ها و در نتیجه افزایش نیروی موئینگی و ارتقای شرایط تغذیه بین‌دانه‌ای، کاهش انقباض خطی حین انجماد و کاهش شدت تنش وارده به مرزهای دانه به‌عنوان مراکز اشاعه آسان ترک گرم در ساختار نسبت داد.

## منابع

- Cast Metals Research. 2013. 26(5) 308–317.  
<https://doi.org/10.1179/1743133613y.0000000068>
- [4] Pumphrey W.I., Jennings P.H., A consideration of the nature of brittleness at temperatures above the solidus in castings and welds in aluminum alloys. *Journal of Institute of Metals*. 1948. 75. 235.
- [5] Li Y., Li. H., Katgerman L., Du Q., Zhang J., Zhuang L., Recent advances in hot tearing during casting of aluminium alloys. *Progress in Materials Science*. 2021. 117. 100741.  
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100741>
- [6] Li S., Apelian. D., Hot tearing of aluminum alloys. *International Journal of Metalcasting*. 2011. 5(1) 23–40.  
<https://doi.org/10.1007/bf03355505>
- [7] Easton M., Grandfield J., StJohn D., Rinderer M., The effect of grain refinement and cooling rate on the hot tearing of wrought aluminum alloys. *Materials Science Forum*. 2006. 30. 1675-1680.
- [8] Warrington D., McCartney D.G., Hot-cracking in aluminum alloys 7050 and 7010 – a comparative study. *Cast Metals*. 1991. 3. 202-208.
- [9] Matsuda F., Nakata K., Shimokusu Y., Effect of additional element on weld solidification crack susceptibility of Al-Zn-Mg. *Transactions of JWRI*. 1983. 12. 81-87.
- [10] Metz S.A., Flemings M.C., A fundamental study of hot tearing. *AFS Transactions*. 1970. 78. 453-460.
- [11] Elambasseril J., Benoit M.J., Zhu S., Easton M.A., 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*. 2022. 7(5) 887–901.  
<https://doi.org/10.1007/s40964-021-00259-2>
- [12] Birru A.K., Karunakar D.B., Effects of grain refinement and residual elements on hot tearing of A713 aluminium cast alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. 26(7) 1783–1790.  
[https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(16\)64291-7](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(16)64291-7)
- [13] Easton M., Grandfield J.F., StJohn D.H., Rinderer B., The effect of grain refinement and cooling rate on the hot tearing of wrought aluminium alloys. *Materials Science Forum*. 2006. (519–521) 1675–1680.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.519-521.1675>
- [14] Sabau A.S., Milligan B.K., Mirmiran S., et al., Grain refinement effect on the hot-tearing resistance of higher-temperature Al–Cu–Mn–Zr alloys. *Metals*. 2020. 10(4) 430. <https://doi.org/10.3390/met10040430>
- [15] Sun Y., Hung C., Hebert R.J., et al., Eutectic microstructures in dilute Al-Ce and Al-Co alloys. *Materials Characterization*. 2019. 154. 269–276.
- [16] Belov N.A., Khvan A.V., The ternary Al–Ce–Cu phase diagram in the aluminum-rich corner, *Acta Materialia*. 2007. 55(16) 5473–5482.
- [17] Cao G., Kou S., Hot tearing of ternary Mg–Al–Ca alloy castings. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2006. 37(12) 3647–3663.  
<https://doi.org/10.1007/s11661-006-1059-x>
- [18] Taylor R.P., McClain S.T., Berry J.T., Uncertainty analysis of metal-casting porosity measurements using Archimedes' principle. *International Journal of Cast Metals Research*. 1999. 11(4) 247–257.  
<https://doi.org/10.1080/13640461.1999.11819281>
- [19] Czerwinski F., Cerium in aluminum alloys. *Journal of Materials Science*. 2019 55(1) 24–72.  
<https://doi.org/10.1007/s10853-019-03892-z>
- [1] Ghoncheh M.H., Shabestari S.G., Asgari, A., Karimzadeh M., Nonmechanical criteria proposed for prediction of hot tearing sensitivity in 2024 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2018. 28(5) 848–857.  
[https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(18\)64718-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(18)64718-1)
- [2] Immanuel R.J., Panigrahi. S.K., Malas. J.C., Materials development for sustainable manufacturing. *Sustainable Manufacturing Processes*. 2023. (Chapter 5) 155–194.  
<https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99990-8.00011-4>
- [3] Nabawy AM., Samuel A.M., Samuel F.H., Doty H.W., Effects of grain refiner additions (Zr, Ti–B) and of mould variables on hot tearing susceptibility of recently developed Al–2 wt-%Cu alloy. *International Journal of*

- Al—Mg alloys. *International Journal of Cast Metals Research*. 1996. 9(2) 103–112. <https://doi.org/10.1080/13640461.1996.11819649>
- [34] Tiryakioglu M., Askeland D.R., Ramsay C.W., The fluidity of 319 and A356: An experimental design approach. *AFS Transactions*. 1994. 102. 17–25.
- [35] Kwon Y-D., Lee Z.-H., The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of Al–4.5Cu–0.6Mn and A356 alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2003. 360(1–2) 372–376. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(03\)00504-5](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(03)00504-5)
- [36] Dahle A.K., Tøndel P.A., Paradies C.J., Arnberg L., Effect of grain refinement on the fluidity of two commercial Al-Si foundry alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1996. 27(8) 2305–2313. <https://doi.org/10.1007/bf02651885>
- [37] Lang G., Casting properties and surface tension of aluminum and binary aluminum alloys, Part I: Fluidity. *Aluminum*. 1972. 48(10) 664–672.
- [38] Ravi K.R., Pillai R.M., Amaranathan K.R., Pai B.C., Chakraborty M., Fluidity of aluminum alloys and composites: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. 456(1–2) 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.02.038>
- [39] Dahle A.K., Tondal P.A., Paradies J.J., Arnberg L., The effect of AlTi5B1 on A356 alloy fluidity, *Metal Materials Transplantation Proceedings*. 1996. A27. 2305–2313.
- [40] Di Sabatino M., Arnberg L., Effect of grain refinement and dissolved hydrogen on the fluidity of A356 alloy. *International Journal of Cast Metals Research*. 2009. 18(3) 181–186. <https://doi.org/10.1179/136404605225022982>
- [41] Li Y., Li H., Katgerman L., et al., Recent advances in hot tearing during casting of aluminium alloys. *Progress in Materials Science*. 2021. 117. 100741. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100741>
- [42] Stangeland A., Mo A., Eskin D., Thermal strain in the mushy zone for aluminum alloys. In *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2006. 37(7) 2219–2229. <https://doi.org/10.1007/bf02586141>
- [43] Stangeland A., Mo A., Nielsen Ø., M'Hamdi M., Eskin D., Development of thermal strain in the coherent mushy zone during solidification of aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2004. 35(9) 2903–2915 <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0238-x>
- [44] Eskin D.G., Katgerman L., Mooney J.F., Contraction of aluminum alloys during and after solidification. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2004. 35(4) 1325–1335. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0307-1>
- [45] Li S., Sadayappan K., Apelian D., Role of grain refinement in the hot tearing of cast Al-Cu alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2013. 44(3) 614–623. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9801-4>
- [46] Easton M., Grandfield J.F., StJohn D.H., Rinderer B., The effect of grain refinement and cooling rate on the hot tearing of wrought aluminium alloys. *Materials Science Forum*. 2006. 519–521. 1675–1680. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.519-521.1675>
- [47] Easton M., Wang H., Grandfield J., St John D.H., Sweet E., An analysis of the effect of grain refinement on the hot tearing of aluminium alloys. *Materials Forum*. 2004. 28. 224–229.
- [۲۰] یوسفی ف.، تقی آبادی ر.، باغشاهی س.، بررسی تاثیر منگنز بر قابلیت ریخته‌گری آلیاژهای هیپوئوتکتیک Al-2Ni-xMn، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۶، (۲) ۶۹–۷۸.
- [21] Wang R., Zhu Q., Zuo Y., Cheng L., Wang J., The control of as-cast structure of 2024 aluminum alloy with intensive melt shearing and its effect on microstructure and mechanical properties after T4 treatment. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. 24. 3179–3193. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.225>
- [22] Mou D., Zuo Y., Zhu Q., Li L., Cui J., Study on the macrosegregation behaviour of 2524 alloy flat ingot solidified under the influence of electromagnetic field. 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials, Oct 2015, Cannes, France.
- [23] StJohn D.H., Prasad A., Easton M.A., Qian M., The contribution of constitutional supercooling to nucleation and grain formation. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015, 46(11) 4868–4885. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2960-y>
- [24] Su M., Zheng W., Fu D., et al., Design and application of a multichannel “cross” hot tearing tendency device: A study on hot tearing tendency of Al alloys. *China Foundry*. 2022. 19(4) 327–334. <https://doi.org/10.1007/s41230-022-1184-5>
- [25] Eskine D., Zuidema J., Jr. Katgerman L., Linear solidification contraction of binary and commercial aluminium alloys. *International Journal of Cast Metals Research*. 2002. 14(4) 217–223. <https://doi.org/10.1080/13640461.2002.11819440>
- [26] Benny Karunakar D., Naresh Rai R., Patra S., Datta G.L., Effects of grain refinement and residual elements on hot tearing in aluminum castings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. 45(9–10) 851–858. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2037-4>
- [27] Upadhya G., Cheng S., Chandra U., A mathematical model for prediction of hot tears in castings. *Light Metals*. 1995. 1101–1106.
- [28] Chang-lue Lü, Heng-cheng Liao, Ye Liu., Effect of Ce on castability, mechanical properties and electric conductivity of commercial purity aluminum. *China Foundry*. 2015. 12(4) 277 – 284.
- [29] Liao H.C., Liu Y., Lü C.L., Wang Q.G. Effect of Ce addition on castability, mechanical properties and electric conductivity of Al–0.3Si–0.2Mg alloy. *International Journal of Cast Metals Research*. 2015. 28(4) 213–220. <https://doi.org/10.1179/1743133615y.0000000002>
- [30] Mahmoud M.G., Mosleh A.O., Mohamed M.S., The impact of Ce-containing precipitates on the solidification behavior, microstructure, and mechanical properties of Al-6063. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. 948. 169805 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169805>
- [31] Jin H., Sui Y., Yang Y., Jiang Y., Wang Q., Effect of Ce content on the microstructure and mechanical properties of squeeze-cast Al–5Mg–2.2Si–0.6Mn alloys. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. 19. 1798–1804. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.126>
- [32] Zhang X., Sui Y., Jiang Y., Wang Q., Effect of Ce on the Microstructure and Corrosion Resistance of Al-5Mg-3Zn-1Cu Alloy. *Metals*. 2022. 12(3) 371. <https://doi.org/10.3390/met12030371>
- [33] Dahle A.K., Karlsen S., Arnberg L., Effect of grain refinement on the fluidity of some binary Al—Cu and

IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

# Founding Research Journal

## Research Paper:

### An Investigation on the Effect of Grain Refinement on the Fluidity and Hot Tearing Susceptibility of Ce-Modified 2024 Al Alloy

Hosein Mohammadi<sup>1</sup>, Reza Taghiabadi<sup>2\*</sup>, Mehdi Malekan<sup>3</sup>

1. Ph.D. student, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, IRAN

2. Associate Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, IRAN

3. Associate Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, IRAN

\* Corresponding author: taghiabadi@ikiu.ac.ir

#### Paper history:

Received: 10 August 2023

Accepted: 28 September 2023

#### Abstract:

In this study, the effect of grain refinement was studied on the hot tearing behavior of 3 wt. % Ce-modified 2024 Al alloy. Towards this end, different amounts of Ti (0.01, 0.02, and 0.05 wt. %) were added to the molten alloy through Al-5Ti-1B master alloy. According to the results, adding Ti marginally improved the fluidity length, relatively reduced the size shrinkage micropores, dispersed the micropores, reduced the grains size, and decreased the alloy hot tearing susceptibility (HTS). The addition of 0.01, 0.02, and 0.05 wt. % Ti decreased the alloy porosity content, grain size, and HTS by 5, 20, 31%, 20, 75, 80%, and 9, 24, 34%, respectively. Based on the microstructural characterization and hot tear subsurfaces examination results, the relative improvement of hot tearing behavior can be explained by the refinement of grains and its positive consequences such as decreasing the liquid film thickness between the grains (which increases the capillary force and improving inter-grain feeding), increasing the alloy strength, decreasing the linear contraction, and decreasing the stress applied on grain boundaries as easy growth locations for the hot tear cracks.

#### Keywords:

Hot tearing,  
2024 Al alloy,  
Cerium,  
Grain refinement,  
Titanium.

#### Please cite this article using:

Hosein Mohammadi, Reza Taghiabadi, Mehdi Malekan, An Investigation on the Effect of Grain Refinement on the Fluidity and Hot Tearing Susceptibility of Ce-Modified 2024 Al Alloy, in Persian, Founding Research Journal, 2022, 6(3) 195-202.

DOI: 10.22034/FRJ.2023.410726.1182

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)