

## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

## بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Al 5083 تولید شده به روش انجماد سریع

مریم صالحی<sup>۱\*</sup>، سید پارسا کاشانی ثانی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۲۱-۷۳۲۲۸۸۲۰، تهران، نارمک، صندوق پستی: ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، E-mail: Maryamsalehi@iust.ac.ir

### چکیده:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

ساختار جامدات تحت تأثیر پارامترهای انجماد به‌ویژه سرعت سرد کردن و تحت تبرید قرار دارد. به‌خوبی مشخص شده است که سرعت انجماد نقش مهمی در زمینه اصلاح ساختار فلزات بازی می‌کند و در نتیجه به‌شدت روی خواص مکانیکی تأثیر خواهد گذاشت. در تحقیق حاضر از روش مذاب ریسی جهت ایجاد سرعت بالای سرد کردن مذاب و تولید نمونه‌های نواری شکل در آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ استفاده شد. سپس، خواص و ریزساختار به‌دست‌آمده با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش اشعه X (XRD) و میکروسختی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به خوبی نشان می‌دهد که سرعت بالای سرد کردن در این روش از طریق تشکیل فازهای کروی شکل بین‌فلزی و غنی از آهن، منگنز، منیزیم و سیلیسیم با ابعاد نانو (تا ۵۰ nm) که به طور یکنواخت در ریزساختار توزیع شده‌اند و همچنین استحکام‌بخشی محلول جامد ناشی از افزایش حد حلالیت عناصر در فرآیند انجماد سریع، سبب اصلاح ریزساختار و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی نمونه‌های مذاب ریسی حاصل در مقایسه با فرآیندهای معمول ریخته‌گری می‌شود. به طوری که میزان سختی نوارهای مذاب ریسی نسبت به نمونه حاصل از روش‌های معمول ریخته‌گری به میزان بیش از دو برابر افزایش نشان می‌دهد.

### واژه‌های کلیدی:

انجماد سریع،  
مذاب ریسی،  
نانوساختار،  
آلیاژهای آلومینیم-منیزیم

### ارجاع به این مقاله:

مریم صالحی، سید پارسا کاشانی ثانی، بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Al 5083 تولید شده به روش انجماد سریع، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار ۱۴۰۰، جلد ۵، شماره ۱، صفحات ۱۱-۱۲.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/frj.2021.291894.1136

### ۱- مقدمه

دلیل تشکیل ریزساختارهای درشت نمی‌تواند استحکام‌بخشی مؤثر این آلیاژها را تضمین نماید. همچنین به دلیل تمایل ذرات درشت به شکست، کاهش شکل‌پذیری و مقاومت خستگی نیز در آنها مشاهده می‌شود. در نتیجه تلاش‌های زیادی برای غلبه بر این مشکل و تولید مواد با ساختار بهبود یافته، انجام شده است که منجر به استحکام‌بخشی مؤثر و افزایش شکل‌پذیری محصول می‌شود. راه‌حل جالب در به‌کارگیری فناوری‌های جدید تولید بر اساس فرآیندهای غیرتعادلی مانند (۱) آلیاژسازی مکانیکی<sup>۱</sup> (MA)، (۲) تغییر شکل پلاستیک شدید<sup>۲</sup> (SPD) و (۳) انجماد سریع<sup>۳</sup> (RS) نهفته است. در نتیجه به دلیل تشکیل ریزساختارهای جدید، مواد با ترکیب بهینه‌ای از خواص مورد نظر

آلیاژهای تجاری آلومینیم-منیزیم (سری ۵۰۰۰) به دلیل استحکام ویژه بالا، شکل‌پذیری خوب، قیمت پایین و مقاومت به خوردگی بالا به طور گسترده در صنایع مختلفی مانند خودرو، هوافضا، ساختمانی و دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مستحکم‌ترین آلیاژهای این سیستم، آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ است که دارای مقدار منیزیم تا ۴/۵٪ است. به دلیل عدم وجود مکانیزم افزایش استحکام از طریق رسوب سختی در سیستم‌های آلیاژی Al-Mg، استحکام‌بخشی با محلول جامد و کارسختی تنها گزینه‌های بهبود خواص مکانیکی در آنها هستند [۱-۴]. متأسفانه ریخته‌گری معمول و فرآیندهای متالورژی شمش به

<sup>3</sup> Rapid solidification

<sup>1</sup> Mechanical alloying

<sup>2</sup> Severe plastic deformation

مورفولوژی صفحه‌ای اثر مخربی بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم دارند. حضور منگنز در آلیاژ ۵۰۸۳ Al مورفولوژی این ترکیبات را تغییر داده و همچنین از طریق تشکیل محلول جامد سبب افزایش استحکام این آلیاژها می‌شود. اگرچه مقدار اضافی منگنز با آهن ترکیب شده و تشکیل ترکیبات بین‌فلزی غنی از آهن و منگنز خواهد داد که این ترکیبات نیز سبب کاهش خواص مکانیکی آلیاژهای Al-Mg خواهند شد. بنابراین یافتن روشی برای ریز کردن ترکیبات بین‌فلزی غنی از آهن و منگنز و بهبود ریزساختار ضروری است. به خوبی مشخص شده است که افزایش سرعت سرد کردن سبب اصلاح مورفولوژی ترکیبات بین‌فلزی می‌شود. تاکنون، تحقیقات اندکی روی بررسی اصلاح شکل و اندازه ترکیبات بین‌فلزی با سرعت سرد کردن و اثر آن بر ریزساختار و خواص مکانیکی در آلیاژهای Al-Mg انجام شده است [۱۷ و ۱۸]. لذا در این تحقیق آلیاژ پرکاربرد آلومینیم ۵۰۸۳ انتخاب شد و طی روش مذاب ریسی تحت انجماد سریع قرار گرفت. بررسی اثر سرعت سرد کردن بر بهبود ریزساختار و سختی آلیاژ از جمله محورهای تحقیق حاضر است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- مواد اولیه و مذاب ریسی

دستگاه مذاب ریسی که به صورت طرح‌واره در شکل (۱-الف) نشان داده شده است اساساً از دو بخش سیستم ذوب و دیسک مبرد چرخان تشکیل شده است. سیستم ذوب از یک نازل سیلیکا با قطر ۱۷ mm تشکیل شده است. آلیاژ درون نازل، به روش القایی ذوب می‌شود و مذاب حاصل تحت فشار گاز آرگون از سوراخی در انتهای نازل خارج و روی سطح یک دیسک مسی به قطر ۳۲۰ mm می‌ریزد.

آلیاژ تجاری ۵۰۸۳ Al که ترکیب شیمیایی آن توسط روش اسپکترومتری نشری تعیین و در جدول (۱) آمده است، به منظور بررسی در این تحقیق انتخاب شد. قطعاتی از این آلیاژ جهت قرار گرفتن در نازل به صورت استوانه‌هایی به قطر ۱۵ mm و ارتفاع ۱۵ mm تهیه شدند. سپس به وسیله پمپ روتاری محفظه تا  $10^{-5}$  bar تخلیه شد. در ادامه گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ در آن دمیده تا به فشار ۱ atm برسد. سپس محفظه به وسیله پمپ روتاری تا  $10^{-5}$  bar و با پمپ دیفیوژن تا  $10^{-8}$  bar تخلیه و مجدداً گاز آرگون دمیده شد تا فشار به ۱ atm برسد

توسعه می‌یابند [۲، ۵-۶]. با وجود اثرات مفید روش‌های MA و SPD، کاربرد این روش‌ها در صنایع به علت قیمت بسیار زیاد و زمان زیاد فرآیند معمولاً محدود است. برخلاف این محدودیت‌ها، انجماد سریع مزایای زیادی بر این روش‌ها با ایجاد خواص مکانیکی بهبود یافته دارد. امروزه استفاده از فرآیند انجماد سریع بسیار توسعه یافته است، به طوری که کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف صنعتی دارد. اولین نظریه توسط دیوز<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۰ عنوان شد. بر طبق این نظریه، ترکیب دو فاز حاصل از انجماد تعادلی یک آلیاژ یوتکتیکی در اثر سرعت‌های تبرید خیلی سریع از فاز مذاب به یک فاز جدید بلوری تغییر می‌یابد که در واقع، نوعی محلول جامد فوق اشباع و یا یک فاز جدید آمورف است [۷-۱۰].

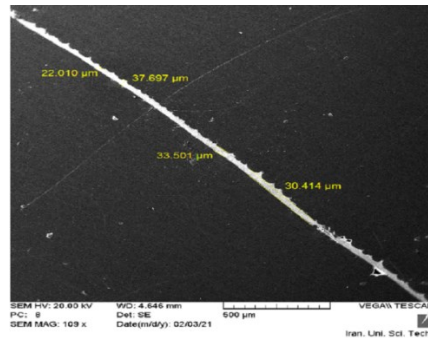
به دلیل تقاضای زیاد برای مواد با دانه‌بندی فوق‌العاده ریز و خواص بهبود یافته، تحقیقات روی روش‌های انجماد سریع متمرکز شده است و در حال حاضر فرایند انجماد سریع در سیستم‌های آلیاژی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های متعددی برای افزایش سرعت سرد کردن توسعه یافته‌اند، به طوری که امروزه توسط برخی روش‌ها سرعت سرد کردن  $10^{10} \text{ Ks}^{-1}$  به راحتی قابل دستیابی است و حتی می‌توان از تبلور به طور کامل جلوگیری کرد. این در حالی است که در فرآیندهای معمول ریخته‌گری سرعت سرد کردن تا حدود  $1 \text{ Ks}^{-1}$  است و در برخی موارد بسیار آهسته‌تر است. فرآیند انجماد سریع به طور گسترده‌ای در مورد آلیاژهای آلومینیم به کار گرفته شده و امکان توسعه آلیاژهای جدید با حد حلالیت‌هایی فراتر از حالت تعادلی و حاوی فازهای میانی نیمه تعادلی وجود دارد. عمده تغییرات ساختاری شامل توزیع یکنواخت ذرات بسیار ریز بین‌فلزی در زمینه آلومینیم است. همچنین اثرات دیگری مانند توسعه حد حلالیت عناصر در آلومینیم، تشکیل فازهای آمورف و شبه‌پایدار و اصلاح مؤثر اندازه دانه سبب بهبود خواص این آلیاژها می‌شود [۱۱-۱۳]. از میان انواع روش‌های تبریدی، روش مذاب ریسی به صورت گسترده‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرد، که علت آن سرعت‌های سرد کردن نسبتاً بالا (بالاتر از  $10^6 \text{ Ks}^{-1}$ ) و قابلیت تولید نوارهای پیوسته آمورف یا نانوبلوری شبه‌پایدار است. همچنین توانایی حجم بالای تولید صنعتی محصول از طریق این فرآیند نیز حائز اهمیت است. در حقیقت این روش عامل پیشرفت سریع فناوری انجماد سریع است [۱۴-۱۶].

آهن یک ناخالصی در آلیاژهای آلومینیم است که به دلیل حد حلالیت خیلی کم در جامد آلومینیم، حین انجماد تشکیل ترکیبات بین‌فلزی غنی از آهن می‌دهد. این فازها به دلیل

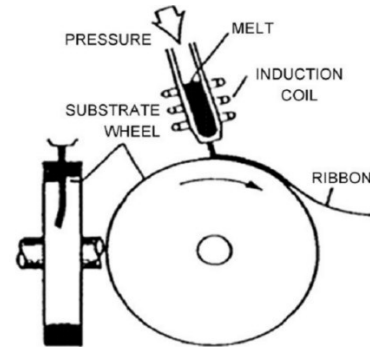
<sup>1</sup> Duwez

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ Al ۵۰۸۳ مورد استفاده در این مطالعه (درصد وزنی)

عنصر	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Cu	Zn	Ti	سایر	Al
آلیاژ ۵۰۸۳	4.36	0.52	0.33	0.16	0.16	0.03	0.01	0.04	0.16	Bal.



(ب)

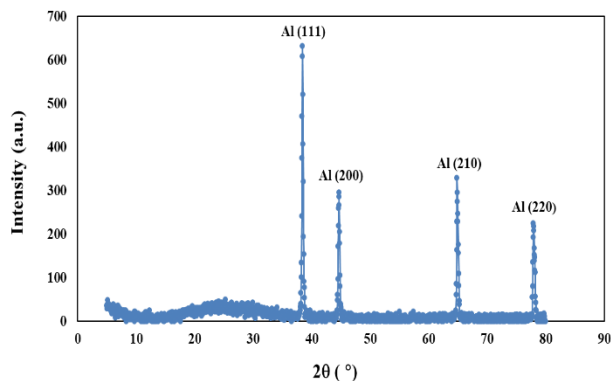


(الف)

شکل ۱- الف) نمایش طرح‌واره روش مذاب ریسی و ب) تصویر میکروسکوپ روبشی (SEM) نشان‌دهنده ضخامت نوارهای مذاب ریسی آلیاژ Al ۵۰۸۳

همچنین خواص نمونه‌های نواری شکل حاصل از انجماد سریع با خواص نمونه به دست آمده از فرآیندهای معمول ریخته‌گری<sup>۱</sup> مقایسه شد. از محلول HF ۰/۵٪ به عنوان محلول اچ استفاده شد. اندازه‌گیری‌های XRD در دیفرکتومتر مدل Philips با استفاده از اشعه Cu K $\alpha$  و در ۳۰ mA و ۴۰ kV انجام شد که 2 $\theta$  در بازه ۱۰ تا ۹۰ تنظیم شد.

بررسی‌های SEM به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی FEI ESEM QUANTA 200 در ۲۵ kV که به دستگاه EDAX Silicon Drift 2017 متصل شده بود، انجام شد. اندازه‌گیری‌های میکروسختی به وسیله دستگاه میکروسختی مدل H21 - MVK، بزرگ‌نمایی X400 و با استفاده از نیروی ۱۰ گرم انجام شد.



شکل ۲- طرح پراش اشعه x آلیاژ Al ۵۰۸۳ تولید شده به روش مذاب ریسی.

آلیاژ تجاری Al ۵۰۸۳ که ترکیب شیمیایی آن توسط روش اسپکترومتری نشری تعیین و در جدول (۱) آمده است، به منظور بررسی در این تحقیق انتخاب شد. قطعاتی از این آلیاژ جهت قرار گرفتن در نازل به صورت استوانه‌هایی به قطر ۱۵mm و ارتفاع ۱۵mm تهیه شدند. سپس به وسیله پمپ روتاری محفظه تا ۱ bar<sup>-۵</sup> تخلیه شد. در ادامه گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ در آن دمیده تا به فشار ۱ atm برسد. سپس محفظه به وسیله پمپ روتاری تا ۱۰<sup>-۵</sup> bar و با پمپ دیفیوژن تا ۱۰<sup>-۸</sup> bar تخلیه و مجدداً گاز آرگون دمیده شد تا فشار به ۱ atm برسد. هدف از چند بار تخلیه و دمیدن گاز، حذف بیشتر ذرات ناخالصی و آلودگی‌ها است. به منظور تولید نوارهای پیوسته پارامترهای دستگاه به این صورت بهینه شد که زاویه نازل ۱۵ درجه، فاصله نازل تا دیسک ۲۵ mm، قطر سوراخ نازل ۰/۶ mm، فشار تزریق ۰/۴ bar و سرعت چرخش دیسک مسی ۴۰ m.s<sup>-۱</sup> باشد.

در شکل (۱-ب) ضخامت نمونه‌ای از نوارهای مذاب ریسی توسط میکروسکوپ روبشی (SEM) نشان داده شده است. این نوارها دارای طول پیوسته بیش از یک‌متر و پهنای ۱-۲ mm و میکروضخامت ۲۰-۳۸ μm هستند.

## ۲-۲- بررسی‌های ریزساختاری

به منظور بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی این نوارها، نمونه‌های حاصل به وسیله میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش اشعه X (XRD) و میکروسختی بررسی شدند.

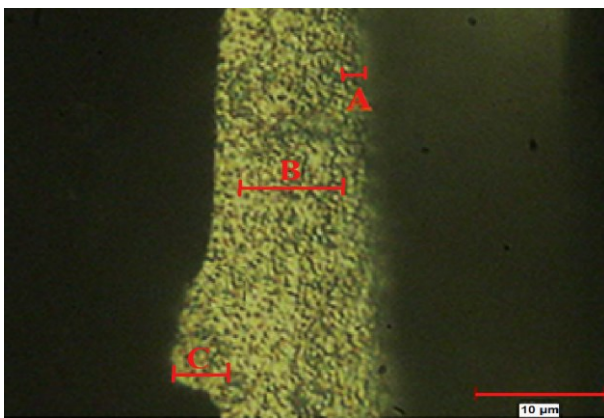
<sup>۱</sup> As cast

R (بر حسب m) که در حال انجماد بر روی یک مبرد فلزی هستند، رابطه زیر برقرار است:

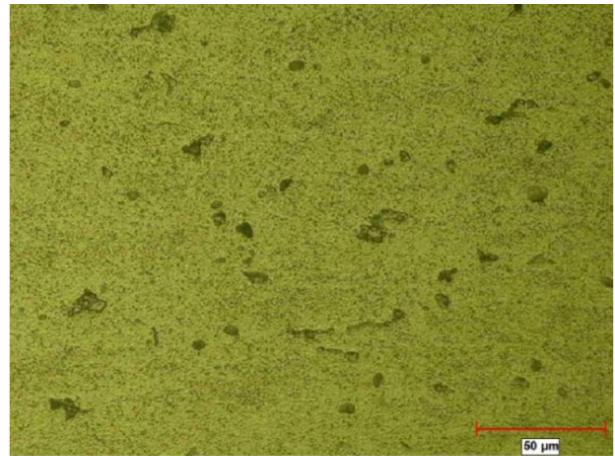
$$\dot{T} = 10^{-3}R^{-2} \quad (1)$$

بنابراین با در نظر گرفتن ضخامت نوارهای حاصل در این تحقیق ( $20-38 \mu\text{m}$ )، سرعت سرد کردن حدود  $10^6 \text{ K.s}^{-1}$  به دست می‌آید.

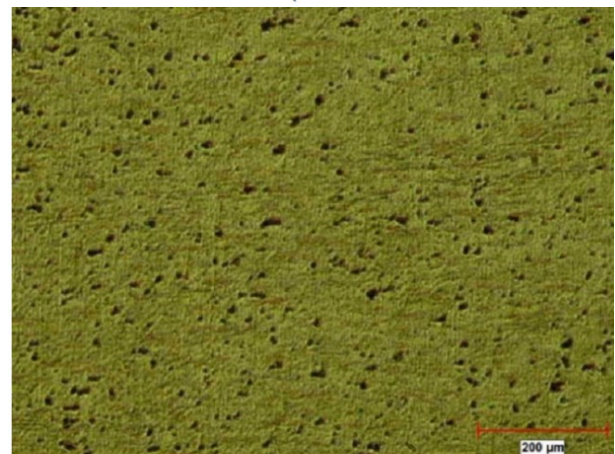
شکل (۲) طرح پراش اشعه X نوارهای مذاب ریسی آلیاژ ۵۰۸۳ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل همه پیک‌ها متعلق به Al است که اندیس گذاری شده‌اند و هیچ فاز بین‌فلزی وجود ندارد. بنابراین می‌توان گفت تقریباً تمام عناصر آلیاژی، در زمینه Al حل شده و محلول جامد Al تشکیل می‌شود. در واقع، غلظت تمام عناصر آلیاژی در محلول جامد بیش از حد حلالیت مربوطه در دمای اتاق است که بیانگر تشکیل محلول جامد فوق اشباع در نتیجه انجماد سریع است. آلیاژ ۵۰۸۳ Al در حالت ذوب شامل تک فاز مایع است. از آنجا که در هنگام مذاب ریسی، سرعت سرد شدن بسیار زیاد است (حدود  $10^6 \text{ K.s}^{-1}$ )، عناصر آلیاژی زمان کافی برای رسوب از زمینه Al را ندارند و در نتیجه، تقریباً تمام عناصر آلیاژی در زمینه Al باقی می‌مانند؛ حتی اگر غلظت عناصر آلیاژی از حد حلالیت بیشتر باشد. افزایش سرعت سرد کردن باعث افزایش حد حلالیت عناصر آلیاژی می‌شود، اما عدم وجود پیک‌های دیگر در الگوی پراش اشعه X نمی‌تواند به تنهایی نشانگر حلالیت کامل دیگر عناصر باشد. زیرا عناصر آلیاژی با مقادیر کم در محدوده آشکارسازی با دستگاه پراش اشعه X (بسته به نوع دستگاه  $\approx 5 \text{ vol.}\%$ ) قرار ندارند و در الگوی پراش ظاهر نمی‌شوند. این موضوع با توجه به آنالیز EDS رسوبات موجود در زمینه مشخص می‌شود.



شکل ۴- نتایج متالوگرافی نمونه نوری شکل حاصل از انجماد سریع آلیاژ ۵۰۸۳ Al (A ناحیه تبریدی، ساختار تشکیل شده در سطح تماس نوار و مبرد، B ناحیه گذار و C ناحیه دندریتی).



(الف)



(ب)

شکل ۳- (الف و ب) نتایج متالوگرافی آلیاژ ۵۰۸۳ Al ماده اولیه؛ رسوبات کروی شکل غنی از منیزیم و سیلیسیم و رسوبات صفحه‌ای شکل غنی از منگنز و آهن در زمینه  $\alpha\text{Al}$

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی‌های فازی و تعیین سرعت سرد کردن

به منظور تولید آلیاژ آلومینیم سری Al-Mg با ریزساختار و سختی بهبودیافته، مذاب آلیاژ ۵۰۸۳ Al طی فرآیند مذاب ریسی با سرعت بسیار زیاد سرد شد. محصول مذاب ریسی با توجه به شکل (۱-ب) به شکل نوارهایی با ضخامت در محدوده  $20-38 \mu\text{m}$  میکرومتر است. ضخامت مهم‌ترین پارامتر فرآیند مذاب ریسی است و مقدار آن تا حد زیادی تعیین کننده سرعت سرد شدن آلیاژ است. افزایش سرعت چرخش دیسک مسی منجر به بهبود ضریب انتقال حرارت در فصل مشترک دیسک-نوار و کاهش ضخامت نوار می‌شود.

به طور معمول برای تخمین سرعت سرد شدن آلیاژهای حاصل از انجماد سریع، از روش پیشنهادی لین و جانسون [۱۹] به دلیل شکل ساده آن استفاده می‌شود. سرعت سرد شدن مذاب،  $\dot{T}$  (با مجذور ضخامت ماده در حال انجماد رابطه معکوس داشته و در شرایط انتقال حرارت ایده‌آل، برای نمونه با ضخامت

جلوی فصل مشترک جامد/ مایع می‌شود. از طرف دیگر عناصری مانند آهن می‌تواند به عنوان مکان‌های جوانه‌زنی ناهمگن طی انجماد سریع آلیاژهای آلومینیم عمل کند. علاوه بر این در صورت انجماد سریع به دلیل عدم زمان کافی برای نفوذ، انباشت عنصر حل شونده بسیار بارزتر می‌شود. در نتیجه، هنگامی که غلظت اتم‌های حل شونده به اندازه کافی بالا می‌رود، آنها می‌توانند به صورت خوشه‌های کوچک جمع شوند و جوانه‌زنی ناهمگن را تقویت کنند.

پس از منجمد شدن مذاب در تماس با مبرد متحرک، تعداد مکان‌های جوانه‌زنی کاهش یافته و شیب دمایی کاهش پیدا خواهد کرد و تنها آن دسته از دانه‌های هم‌محور موجود در منطقه تبریدی که جهت رشد کریستالوگرافی ترجیحی هم‌راستا با جهت انتقال حرارت دارند، به داخل مذاب باقیمانده رشد خواهند کرد. دانه‌هایی که به طور مطلوب جهت‌گیری کرده‌اند، بسیار سریع‌تر رشد کرده و باقی خواهند ماند. هنگام رشد این دانه‌های ستونی، تعدادشان کاهش یافته و سطح مقطع دانه‌های باقیمانده افزایش می‌یابد. این فرایند رشد دانه‌های گزینشی، منجر به جهت‌گیری ترجیحی می‌شود. هنگامی که این دانه‌های ستونی رشد می‌کنند، شیب دمایی کم شده و سرعت پیش‌روی فصل مشترک مذاب- جامد نیز کاهش می‌یابد. به طور کلی، رشد ستونی را می‌توان به دلیل وجود ذرات فاز دوم در مرز دانه‌ها متوقف کرد. با توجه به شکل (۴)، در منطقه ستونی نیز با توجه به سرعت بالای فرایند مذاب ریسی و زمان کم برای رشد دانه‌های ستونی، دانه‌بندی به صورت ریز و هم‌محور (مانند منطقه A) وجود دارد.

در منطقه سوم C، ساختار دندردیتی مکانیزم غالب است. عدم وجود دانه‌های سلولی در این منطقه ممکن است به کمترین نرخ انجماد این منطقه نسبت داده شود. تفاوت در ساختار در مناطق A-C نیز می‌تواند به دلیل نرخ سرد کردن‌های مختلف در این مناطق باشد. حضور یا عدم حضور هر کدام از نواحی نشان داده شده، تا حد زیادی بستگی به سرعت سرد شدن موضعی داشته و وابسته به سرعت موضعی پیش‌روی فصل مشترک جامد- مذاب طی فرایند مذاب‌ریسی است. ترکیب شیمیایی آلیاژ نیز بر ریزساختار انجمادی تأثیرگذار است [۲۱ و ۲۲].

شکل‌های (۵-الف) تا (۵-د)، نتایج SEM/EDS نمونه‌های نواری شکل حاصل از انجماد سریع آلیاژ Al ۵۰۸۳ را نشان می‌دهند. رسوبات تاریک و روشن بسیار زیادی در تصاویر SEM دیده می‌شود که به وسیله EDS آنالیز شده‌اند. با توجه به نتایج EDS، این رسوبات روشن و تاریک، ترکیبات بین‌فلزی غنی از آهن، منگنز، منیزیم و سیلیسیم هستند.

ثابت شده است که می‌توان با کاربرد معادله‌ی تجربی (۲) اندازه‌ی دانه در حد نانو را محاسبه کرد [۱۲]:

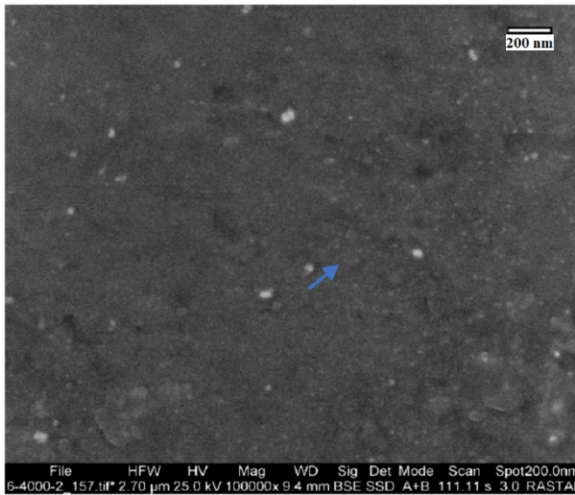
$$\beta = \frac{k \lambda}{D \cos \theta} \quad (2)$$

رابطه‌ی (۲) موسوم به رابطه شرر است. در این رابطه D اندازه دانه (nm)، k فاکتور شکل یا ثابت شرر (0.89)،  $\lambda$  طول موج (nm)،  $\beta$  نصف شدت پیک (رادیان) و  $\theta$  زاویه پراش (رادیان) را نمایش می‌دهند. با توجه به رابطه‌ی (۱) و نتیجه‌ی به دست آمده از XRD اندازه‌ی دانه‌ها ۳۵ nm به دست می‌آید.

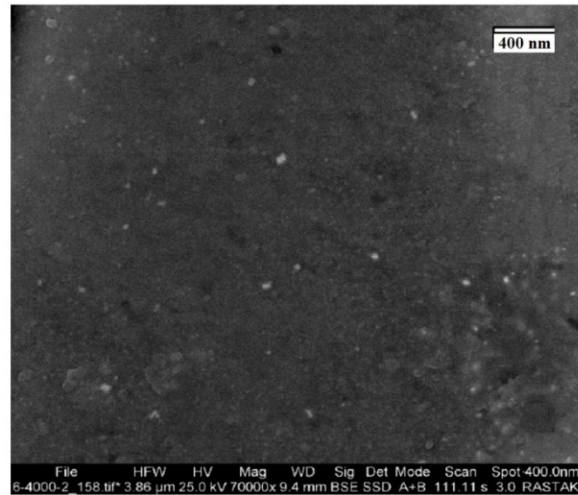
### ۲-۳- بررسی ریزساختار مذاب ریسی آلیاژ Al ۵۰۸۳ و مقایسه با انجماد معمولی

نتایج متالوگرافی آلیاژ Al ۵۰۸۳ در حالت انجماد معمولی و انجماد سریع که در آن نوارهای حاصل از مقطع عمودی قالب‌گیری شده‌اند، در شکل‌های (۳) و (۴) آمده است. با توجه به شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب)، تصاویر متالوگرافی ماده اولیه ریزساختار متداول در آلیاژهای Al-Mg را نشان می‌دهد. رسوب‌های کروی و سیاه رنگ بیانگر فاز  $Mg_2Si$  در این آلیاژها می‌باشند [۲۰]. آهن و سیلیسیم ناخالصی‌های اصلی در آلیاژهای آلومینیم هستند. در حین انجماد، آهن معمولاً با عناصر دیگر برای تشکیل ترکیبات بین‌فلزی غنی از آهن، ترکیب می‌شود. در آلیاژ Al ۵۰۸۳، آهن با منگنز ترکیب شده و تشکیل ترکیب بین‌فلزی  $Al_6(Fe, Mn)$  را می‌دهد. ترکیبات بین‌فلزی غنی از آهن دارای مورفولوژی صفحه‌ای شکل هستند [۱۷]. در تصاویر متالوگرافی آلیاژ Al ۵۰۸۳ مورد استفاده در این تحقیق، این رسوب‌های کروی و صفحه‌ای در زمینه  $\alpha_{Al}$  و در بزرگنمایی‌های مختلف دیده می‌شوند.

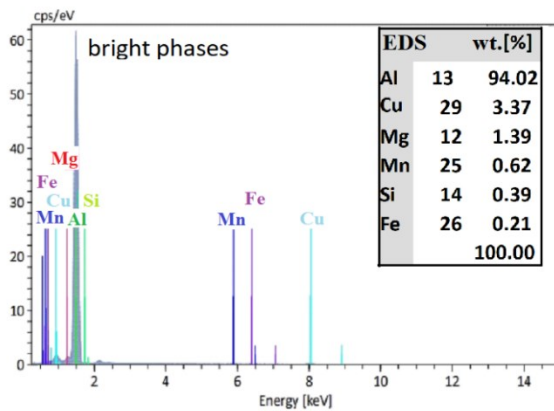
نوارهای مذاب ریسی از مقطع عمودی مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به تصاویر متالوگرافی نوارهای مذاب ریسی (شکل ۴) سه ناحیه قابل تشخیص است: (A) ناحیه تبریدی تشکیل شده در سطح تماس نوار با سطح دیسک مسی (مبرد)، (B) ناحیه گذار با ساختار ستونی و (C) ناحیه شامل دندردیت‌های غنی از Al در سطح تماس نوار با هوا. در فصل مشترک مذاب- مبرد، تحت تبرید زیاد و چگالی فوق‌العاده زیادی از مکان‌های جوانه‌زنی غیرهمگن وجود دارد. از این رو، این منطقه (A) از نوار شامل بلورهای ریز هم‌محور با جهت‌گیری اتفاقی است که نتیجه متعارف برای آلیاژهای سریع سرد شده است و به علت اصلاح دانه به واسطه بیشینه سرعت سرد شدن در سطح مبرد، ظاهر می‌شود. تحت تبرید زیاد منجر به انباشت عنصر حل شونده در



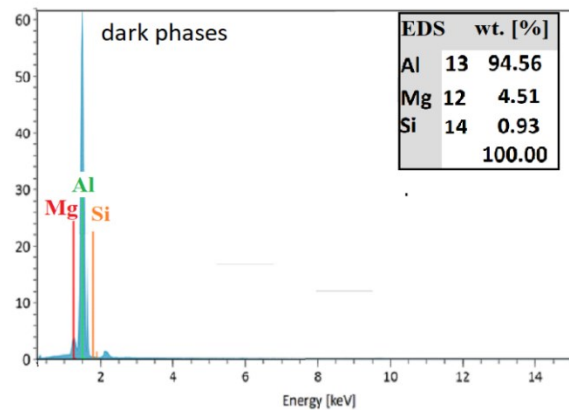
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵- (الف) و (ب) تصاویر SEM/BSE نمونه نواری شکل حاصل از انجماد سریع آلیاژ Al ۵۰۸۳ در بزرگنمایی‌های مختلف، (ج) طیف EDS رسوبات روشن در زمینه و (د) طیف EDS رسوبات تاریک در زمینه

در نتیجه تشکیل ساختار بسیار ریز می‌شود. همچنین افزایش سرعت سرد کردن روی فرایند رشد نیز تأثیر می‌گذارد و باعث می‌شود که جوانه‌های تشکیل شده فرصت لازم برای رشد را نداشته باشند و بنابراین ساختار بسیار ریزی در حد نانو تشکیل خواهد شد.

در شرایط معمول انجماد، ریزساختار جامد بسیار درشت و خشن بوده و مقدار بالایی از جدایش شیمیایی را نشان می‌دهد. با عبور از شرایط معمول ریخته‌گری و در محدوده پایین سرعت‌های سرد کردن فرایندهای انجماد سریع، تغییری در ماهیت اجزای ریزساختار جامد مشاهده نمی‌شود و فقط مقیاس ریزساختار کاهش می‌یابد. به طوری که ظریف‌شدن قابل ملاحظه‌ای در ریزساختار مشاهده می‌شود. علت این است که با افزایش سرعت سرد کردن، زمان کافی جهت رشد اجزای ریزساختار فراهم نمی‌شود. در این شرایط، به دلیل وجود تعادل موضعی در فصل مشترک جامد/مذاب میزان جدایش اجزای ریزساختاری نیز تغییر نکرده و دما و غلظت موضعی از روی دیگرام فازی تعادلی

اگرچه آنالیز EDS در مورد فازهای کوچک نسبتاً غیردقیق و آنالیز رسوبات از زمینه نیز تأثیر می‌پذیرد، فرض می‌شود که فازهای روشن مطابق با آنالیز EDS و منابع [۱] تعدادی از این فازهای ممکن باشند؛  $\alpha\text{Al}_{15}(\text{Fe Mn})_3\text{Si}$ ،  $\beta\text{Al}_5\text{FeSi}$ ،  $\text{Al}_9\text{Mn}_3\text{Si}$  و یا  $\alpha\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$ . با توجه به تصاویر SEM تعداد زیادی از این فازهای روشن با ابعاد نانومتری (زیر ۵۰ nm) قابل تشخیص است. همچنین با توجه به نتایج (شکل ۵-د)، فازهای تیره مربوط به فاز  $\text{Mg}_2\text{Si}$  که ترکیب مورد انتظار در آلیاژهای Al ۵۰۸۳ است. تمامی این فازها دارای ابعاد نانومتری هستند. بنابراین با افزایش سرعت سرد کردن رسوبات فرصت کافی برای رشد کردن نمی‌یابند و به صورت نانورسوبات در زمینه قرار می‌گیرند که در نهایت از طریق ممانعت از حرکت نابجایی‌ها باعث بهبود خواص مکانیکی آلیاژ می‌شوند. به عبارت دیگر با افزایش سرعت سرد کردن و تحت تبرید، میزان شعاع بحرانی جوانه پایدار و سد انرژی جوانه‌زنی کاهش می‌یابد که این امر باعث تسهیل شرایط جوانه‌زنی و ایجاد تعداد بیشتری رسوبات و

که از رشد دانه‌های ستونی با جهات مرجح بلوری جلوگیری می‌کند.

۳- انجماد سریع به علت کاهش زمان نفوذ، منجر به کمینه شدن جدایش عناصر آلیاژی و افزایش یکنواختی ترکیب شیمیایی از طریق افزایش حد حلالیت عناصر آلیاژی می‌شود. انجماد معمول آلیاژ  $Al\ 5083$ ، تولید ساختار بسیار درشتی می‌کند که در آن ترکیبات بین‌فلزی غنی از آهن، منگنز، منیزیم و سیلیسیم تشکیل می‌شود.

۴- آلیاژهای معمول  $Al\ 5083$ ، به علت ساختار درشت ذرات فاز دوم و طبیعت ترد و شکل صفحه‌ای دارای انعطاف‌پذیری پایینی هستند. این در حالی است که با افزایش سرعت سرد کردن رسوبات به دلیل عدم زمان کافی برای رشد به صورت کروی با ابعاد نانومتری (کمتر از  $50\ nm$ ) درمی‌آیند که سبب اصلاح ساختار و بهبود خواص مکانیکی می‌شود.

۵- میزان سختی در حالت انجماد سریع به میزان بیش از دو برابر نسبت به انجماد معمول افزایش می‌یابد. همچنین به واسطه اثر استحکام محلول جامد عناصر آهن، منگنز و سیلیسیم در زمینه آلومینیم ناشی از افزایش حد حلالیت عناصر خواص مکانیکی بهبود می‌یابد.

#### تقدیر و تشکر

نگارندگان مقاله از همکاری خانم دکتر میرزایی و همکاران ایشان در آزمایشگاه‌های بخش مواد جهاد دانشگاهی صنعتی شریف کمال سپاس و امتنان را دارد.

#### مراجع

- [1] Paulin I., Donik C., Cvahte P., Godec M., Bimodal microstructure obtained by rapid solidification to improve the mechanical and corrosion properties of aluminum alloys at elevated temperature, *Metals*, 2021, 11, 230, 1-12.
- [2] Bazamnik P., Lewandowska M., Kurzydowski K.J., Mechanical behavior of ultrafine grained Al-Mg alloys obtained by different processing routes. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2012, 57, 869-876.
- [3] Telkamp V.L., Lavernia E.J., Processing and mechanical properties of nanocrystalline 5083 Al alloy, *Nanostructured Materials*, 1999, 12, 249-252.
- [4] Huskins E.L., Co B., Ramesh K.T., Strengthening mechanisms in an Al-Mg alloy, *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527, 1292-1298.
- [5] Tokarski T., Thermo-mechanical processing of rapidly solidified 5083 aluminum alloy, *Structure and Mechanical Properties*, *Archives of Metallurgy and Materials*, 2015, 60, 177-18.
- [6] Anna K., Ludwig B., Piotr K., Makoto S., Mechanical and structural characterization of rapidly solidified Al-Fe-Mg alloys, *Solid State Phenomena*, 2015, 231, 11-18.
- [7] Lavernia E. J., Srivatsan T.S., The rapid solidification processing of materials: science, principles, technology, Advances, and Applications, *Journal of Materializes Science*, 2010, 45, 287-325.

به دست می‌آید. به بیان دیگر، ظرفیت شدن ریزساختار به دلیل تفاوت در فرایند رشد بوده و تحت تأثیر تحت‌تبرید مذاب قبل از مرحله جوانه‌زنی نیست. با افزایش سرعت سرد کردن مذاب به بیش از  $10^4\ Ks^{-1}$ ، تحت تبرید زیادی در مذاب ایجاد شده و ریزساختارهای جدیدی به صورت افزایش حد حلالیت محلول جامد، ساختارهای میکرو/نانوبلوری، فازهای بلوری نیمه‌پایدار حاصل می‌شوند. تحت این شرایط انحراف زیادی از تعادل موضعی در فصل مشترک جامد/مذاب رخ می‌دهد، به طوری که جامد غلظت‌های اشباع شده‌ای از اتم‌های حل‌شده و ناخالصی‌ها را در خود حبس می‌کند. در شرایطی که سرعت سرد کردن بسیار بالا (بیش از  $10^6\ Ks^{-1}$ ) فراهم شود، جامد تشکیل شده ترکیبی مشابه با ترکیب مذاب اولیه را خواهد داشت و نوع انجماد رخ داده، انجماد بدون جدایش یا انجماد حجمی نامیده می‌شود و مشخصه آن تشکیل ساختار همگن ایده‌آل است [۲۱].

میکروسختی نمونه‌های آلیاژ  $Al\ 5083$  در حالت ریخته‌گری معمول و انجماد سریع (مذاب ریسی) در ۸ نقطه تصادفی اندازه‌گیری شد و میانگین نتایج در جدول (۲) ارائه شده است. مقایسه نتایج سختی حاصل از نمونه‌های نواری شکل و نمونه‌های ماده اولیه نشان می‌دهد که مقدار سختی در حالت انجماد سریع بیش از دو برابر بیش‌تر از مقدار آن در حالت انجماد معمول است. افزایش مقدار سختی مربوط به ریزتر بودن رسوبات بین‌فلزی در حالت انجماد سریع است. زیرا افزایش سرعت سرد کردن مانع از ادامه رشد رسوبات و اصلاح ساختار می‌شود به طوری که به شدت ساختار را ریز کرده و باعث بهبود ساختار خشن اولیه می‌شود. بنابراین رسوبات با ابعاد نانو ممانعت بیشتری را در حرکت نابجایی‌ها ایجاد می‌کنند، که این امر موجب بهبود فراوان سختی نسبت به انجماد معمول می‌شود.

جدول ۲- نتایج سختی ماده اولیه و نوارهای مذاب ریسی آلیاژ  $Al\ 5083$  (ویکرز)

شرایط نمونه	سختی (ویکرز)
نمونه اولیه (As cast)	$78.6 \pm 5.1$
نوارهای مذاب ریسی (Melt spun)	$184.2 \pm 12.4$

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- آلیاژ  $Al\ 5083$  طی انجماد سریع با روش مذاب ریسی و با میکرو ضخامت  $20-38\ \mu m$  به دست آمد.

۲- ریزساختار آلیاژ در حالت انجماد سریع دارای سه ناحیه شامل تبریدی در تماس با مبرد و با دانه‌بندی بسیار ریز، گذار و ناحیه شامل دندریت‌های غنی از آلومینیم است. به طوری که، ضخامت ناحیه گذار با افزایش عناصر آلیاژی کاهش می‌یابد که این امر به دلیل حضور ذرات فاز دوم در مرز دانه‌ها است

- [15] Lin Y., Wu B., et.al. The quantitative relationship between microstructure and mechanical property of a melt spun Al–Mg alloy, *Materials Science and Engineering A*, 2015, 621, 212-217.
- [16] Jones H., In rapid solidification of metals and alloys, the Institution of Metallurgist, London, 1982.
- [17] Liu Y., Sun Y., et.al., Microstructure and mechanical properties of Al-5Mg-0.8Mn alloys with various contents of Fe and Si cast under near-rapid cooling, *Metals*, 2017, 7, 428, 1-12.
- [18] Liu Y., Luo L., et.al. Effect of Fe, Si and cooling rate on the formation of Fe- and Mn-rich intermetallics in Al–5Mg–0.8Mn alloy, *Journal of Materials Science and Technology*, 2016, 32, 4, 305-312.
- [19] Guo S., Liu Y., Estimation of critical cooling rates for formation of amorphous alloys from critical sizes, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, 358, 2753-2758.
- [20] Polmear. I.J., *Light Alloys*, Metallurgy of Metals, Edward Arnold, 2nd Ed, London, 1989.
- [21] Kear B. H., *Rapid Solidification Technology*, The National Academy Press, Cutting Edge Technologies, Washington, D.C., 1984, 86-108.
- [22] Liebermann H. H., Rapidly solidified alloys made by chill block melt-spinning processes, *Journal of Crystal Growth*, 1984, 70, 497-506.
- [8] Tokarski T., The effect of plastic consolidation parameters on the microstructure and mechanical properties of various aluminium powders, *Materials Science Forum*, 2011, 674, 141-146.
- [9] Zhang Z., Bian X., Wang Y., Growth of dendrites in a rapidly solidified Al-23 Sr alloy, *Journal of Crystal Growth*, 2002, 243, 531-538.
- [10] Rivlin Z., *Research opportunities and the elements of materials science and engineering*, Chapter 4, 2001.
- [11] Salehi M., Dehghani K., Structure and properties of nanostructured aluminum A413.1 produced by melt spinning compared with ingot microstructure, *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 457, 357–361.
- [12] Dehghani K., Salehi M.A., Salehi M.I., Aboutalebi H., Comparing the melt-spun nanostructured aluminum 6061 foils with conventional direct chill ingot, *Materials Science and Engineering A*, 2008, 489, 245–252.
- [13] Ozturk U., Sunbul S. E., Icon K., Effects of melt spinning process parameters and wheel surface quality on production of 6060 aluminum alloy powders and ribbons, *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, 2020, 30, 1169–1182.
- [14] Yang B., Peng P., et.al., Nucleation behavior and microstructure of single Al-Si12 powder particles rapidly solidified in a fast scanning calorimeter, *Journal of Materials Science*, 2021, 56, 12881–12897.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

### Research Paper:

### Microstructure and Mechanical Properties of Al 5083 Alloy Produced by Rapid Solidification

Maryam Salehi<sup>1\*</sup>, Sayed Parsa Kashani Sani<sup>2</sup>

1. Assistant Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2. B.Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

\* Corresponding Author: P.O. Box 16846-13114, Tehran, Iran. Tel: +98 21 77240540/ 8820

#### Paper history:

Received: 23 June 2021

Accepted: 01 September 2021

#### Abstract:

The structure of metals strongly depends on solidification parameters such as cooling rate and supercooling. It is obvious that the cooling rate is an important factor in order to refine metal structure, and especially affecting mechanical properties of metals. In this investigation melt spinning method is used to reach rapid solidification and ribbon shaped samples in Aluminum 5083 alloy were produced. The resulting ribbon samples were studied by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), micro hardness tester, X-ray diffractometry, and were compared with their ingot counterparts. The results perfectly shown that the produced ribbons exhibits unique properties such as enhanced solid-solubility level of elements in the Al matrix (solid solution strengthening) and formation of spherically shaped intermetallic phases rich in Fe, Mn and Si and less than 50 nm in size homogeneously dispersed in Al matrix which resulted in mechanical properties improvement and microstructural refinement of Al5083 alloy. As an example microhardness was approximately raised over two times more than conventional casting methods.

#### Keywords:

Rapid solidification,  
Melt spinning,  
Nanostructure,  
Al-Mg alloys.

#### Please cite this article using:

Maryam Salehi, Sayed Parsa Kashani Sani, Microstructure and mechanical properties of Al 5083 alloy produced by rapid solidification, in *Persian, Founding Research Journal*, 2021, 5(1) 1-8.

DOI: 10.22034/frj.2021.291894.1136

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