



## پژوهش نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

### بررسی ریزساختار و ترکیب آلیاژ ریختگی منیزیم-نقره-سریم- زیرکونیم (QE22)

سیدصدرا یوسفی‌بناب<sup>۱</sup>، حسین آقاجانی<sup>۲\*</sup>، سید رضا دامادی<sup>۳</sup>، گلناز ناصری<sup>۴</sup>، امیرسعید صفائی<sup>۵</sup>

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز،

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز،

۳- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز،

۴- کارشناس، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز،

۵- کارشناس ارشد، شرکت مهندسی دقیق فلز ایرانیان، تهران.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: تبریز، دانشگاه تبریز، صندوق پستی: ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱، E-mail: [h\\_aghajani@tabrizu.ac.ir](mailto:h_aghajani@tabrizu.ac.ir)

### چکیده:

دریافت: ۹۸/۰۷/۲۸

پذیرش: ۹۸/۰۸/۲۰

ریزساختار انجمادی آلیاژ ریختگی منیزیم-نقره-سریم- زیرکونیم موسوم به آلیاژ QE22 مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا شبیه‌سازی ترمودینامیکی توسط نرم‌افزار JMatPro انجام شد. سپس برای آزمایش‌های تجربی، عملیات ذوب، آلیاژسازی و ریخته‌گری با استفاده از دستگاه ریخته‌گری کم‌فشار تحت اتمسفر آرگون انجام شد. همچنین برای عملیات حرارتی T6، نمونه‌ها در دمای ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد حرارت دیده و سپس در آب کوئنچ شدند و در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پیرسازی شدند. برای مطالعات ریزساختاری و فازی از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مجهز به آنالیز EDS و دستگاه XRD استفاده شده است. سختی‌سنجی به روش برینل انجام گرفت. آنالیزها نشان داد که آلیاژ حاوی ۲/۲۴ درصد وزنی نقره، ۱/۵۲ درصد وزنی عناصر قلیایی و ۰/۵۵ درصد وزنی زیرکونیم است. بررسی‌های میکروسکوپی و آنالیز تصویر نشان داد که  $1 \pm 93$  درصد ریزساختار شامل زمینه منیزیم اشغال شده و فازهای یوتکتیک در داخل دندریت‌ها پراکنده شده است. نتایج آنالیز EDS نشان داد که برخلاف زیرکونیم، نقره و فلزات قلیایی انحلال قابل توجهی در فاز زمینه دارند. در نهایت با عملیات حرارتی محلول‌سازی و پیرسازی، سختی آلیاژ از ۴۳ تا ۴۸ برینل افزایش یافته است.

### واژه‌های کلیدی:

آلیاژ Mg-Ag-Ce-Zr

(QE22)،

ریخته‌گری،

ترکیب شیمیایی،

ریزساختار،

سختی.

### ارجاع به این مقاله:

سیدصدرا یوسفی‌بناب، حسین آقاجانی، سید رضا دامادی، گلناز ناصری، امیرسعید صفائی، بررسی ریزساختار و ترکیب آلیاژ ریختگی منیزیم-نقره-سریم- زیرکونیم (QE22)، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، زمستان ۱۳۹۸، جلد ۳، شماره ۴، صفحات ۲۳۷-۲۴۵.  
شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2019.152201.1056

### ۱- مقدمه

هستند. خاصیت جذب صدا در آلیاژهای منیزیم بیشتر از آلیاژهای آلومینیم است [۲]. منیزیم مدول الاستیسیته پایینی دارد [۳]. آلیاژسازی با آلومینیم، منگنز، فلزات قلیایی، زیرکونیم و روی، ویژگی استحکام به وزن آلیاژهای منیزیم را بهبود می‌بخشد. منیزیم خاصیت ایزوله‌کردن امواج الکترومغناطیس را دارد [۴]. به دلیل پایین بودن

منیزیم هشتمین فلز گسترده سطح زمین است. چگالی آن ۱/۷۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۳۵٪ سبک‌تر از آلومینیم است [۱]. بیش‌تر آلیاژهای منیزیم قابلیت ماشین‌کاری و ریخته‌گری خوبی دارند و قطعات پیچیده از جنس منیزیم با استفاده از ریخته‌گری فشار بالا به راحتی قابل ریخته‌گری

تصفیه فیزیکی مذاب استفاده می‌شود [۶]. مواد افزودنی بی‌فلوئور آمونیم، بروفلوراید آمونیم ( $\text{NH}_4\text{BF}_4$ ) و فلوراید آمونیم ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) در درجه حرارت ذوب آلیاژ منیزیم تجزیه شده و با تولید گازهای آمونیاکی و فیلم‌های نازک فلوئور از سطح مذاب حفاظت می‌کنند [۱۱]. نیتريد منیزیم یکی از موادی است که به عنوان ناخالصی غیرفلزی در مذاب منیزیم و آلیاژهای آن پراکنده می‌شود و پس از انجماد خواص مکانیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۲،۴]. در روش ذوب بدون فلاکس محافظت سطح مذاب توسط مخلوطی از هواخشک، هگزا فلورید گوگرد با غلظت ۱/۷ تا ۲٪ و دی اکسیدکربن استفاده می‌شود [۱۳،۱]. هیدروژن موجود در مذاب به شکل  $\text{ZrH}_2$  از مذاب خارج می‌شود [۱۴]. امروزه استفاده از  $\text{C}_2\text{Cl}_6$  به عنوان گاززدا و اصلاح‌کننده دانه به علت تولید ماده مضر دی‌اکسین محدود شده است [۱۵]. زیرکونیم به عنوان ریزکننده در تمام آلیاژهای منیزیم بدون آلومینیم با موفقیت به کار می‌رود. در آلیاژهای Mg-Zn به دلیل تشکیل ترکیب ZnZr، قابلیت ریزکنندگی دانه افزایش می‌یابد [۱۶].

هدف این مقاله، بررسی ریزساختار و ترکیب آلیاژ ریختگی منیزیم-نقره-سرم-زیرکونیم (QE22) با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز و آزمایش‌های تجربی است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- شبیه سازی ترمودینامیکی

برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار JMatPro و پایگاه داده SGTE- $\text{V15Calphad}$  و از TCER برای مشخصه‌یابی فازهای همگن و از TCW SCHEIL برای مطالعه فازهای غیرتعادلی استفاده شد.

### ۲-۲- آلیاژسازی و ریخته‌گری

منیزیم خالص تجاری در دمای ۷۴۰ درجه سانتی‌گراد در پاتیل فولادی با پوشش گرافیت و اتمسفر ۹۹/۹۹٪ آرگون ذوب شد. استفاده از پوشش گرافیت برای جلوگیری از انحلال آهن در مذاب بود. انحلال پودر زیرکونیم در منیزیم مذاب به آسانی انجام نمی‌شود، لذا از آمیزان Mg-30Zr (جدول ۱) برای افزودن زیرکونیم به مذاب استفاده شد. سپس نقره و فلزات قلیایی به مذاب اضافه شده و با میله فولادی هم‌زده شد. لازم به ذکر است که آهن در منیزیم جامد و مذاب تا حدود دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد حلالیت ندارد، لذا، باعث آلودگی مذاب نمی‌شود [۱].

مدول الاستیسیته و ضریب انبساط حرارتی منیزیم، مدول تنش حرارتی پایین بوده و خاصیت میرایی ارتعاشات در آلیاژهای منیزیم بهتر از آلیاژهای آلومینیم بوده و حتی خاصیت فوق در منیزیم خالص بیشتر از چدن‌ها است [۵-۱]. امروزه استفاده از آلیاژهای منیزیم-آلومینیم-زیرکونیم بیشتر رایج شده است، ولی این آلیاژها دارای عیب ریز انقباض‌ها در قالب‌های ماسه‌ای بوده و برای استفاده در دمای بیش از ۹۵ درجه سانتی‌گراد مناسب نیستند. آلیاژهای منیزیم-زیرکونیم-روی خواص مکانیکی خوبی دارند ولی دارای عیب ترک گرم هستند و قابلیت جوشکاری ندارند. امروزه آلیاژهای منیزیم-فلزات قلیایی-روی مورد توجه هستند [۷،۶]. در آلیاژ QE22 (نام‌گذاری بر اساس استاندارد ASTM B951-11) مقداری از زیرکونیم جای خود را به نقره می‌دهد و مقدار باقی‌مانده آن در ادامه با جوانه‌زنی، خواص مکانیکی را بهبود می‌دهد. در ریخته‌گری آلیاژهای منیزیم باید توجه داشت که قالب‌های ماسه‌ای نفوذ بسیار بالایی داشته باشند تا بتوانند فشار برگشتی از مذاب ریزی را کاهش دهند. با توجه به واکنش منیزیم با اکسیژن و رطوبت استفاده از ممانعت‌کننده‌ها بسیار ضروری است [۴]. افزودن ۰/۳٪ برلیم به آلیاژهای منیزیم دمای آتش‌گیری را ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر می‌برد [۸،۹]. همچنین گوگرد به گاز  $\text{SO}_2$  تبدیل شده و اتمسفر را از حضور اکسیژن حفظ می‌کند و اسید بوریک نیز طی واکنشی به صورت یک لایه نازک روی منیزیم از تماس اکسیژن جلوگیری می‌کند. بی‌فلوئور آمونیم ( $\text{NH}_4\text{HF}_2$ ) نیز مشابه اسید بوریک عمل می‌کند و استفاده از آنها طبق واکنش (۱) سبب ایجاد مقداری رطوبت می‌شود. می‌توان به این منظور از مقداری اتیلن گلوکول هم استفاده کرد [۴].

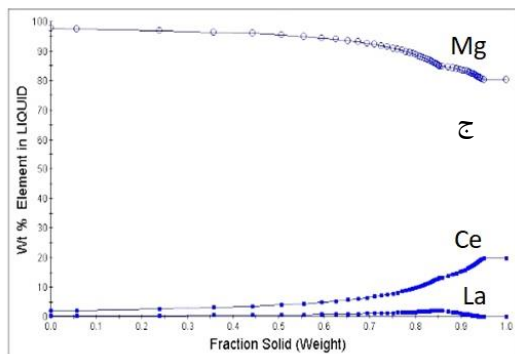
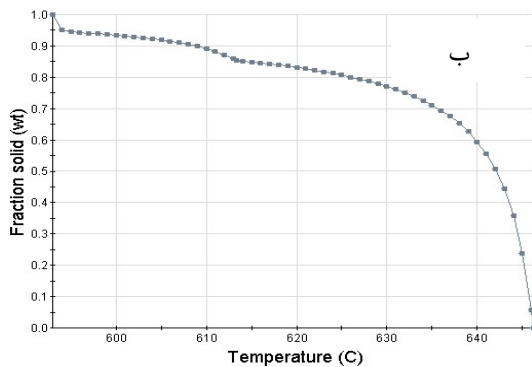
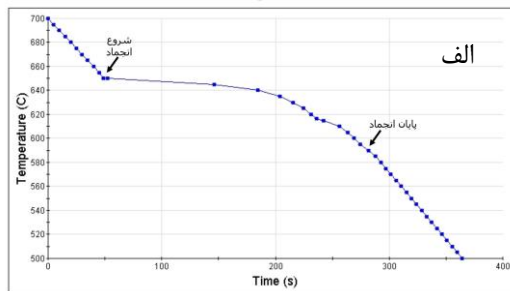


استفاده از دیگ‌های فولادی با پوشش نسوزهای آلومینایی با شعله غیرمستقیم زیر دیگ یکی از بهترین مدل‌های ذوب منیزیم است [۴]. سطح بوت‌ه‌های فولادی را جهت جلوگیری از واکنش اکسیدهای آهن با مذاب Mg با ترکیب ۳/۵٪ اسید بوریک، ۷٪ گرافیت، ۲۵/۵٪ گچ و ۶۴٪ آب شست و شو می‌دهند. بوت‌ه‌های غیرفلزی آلومینایی ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) و یا ۵۷٪ سیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) و ۴۳٪ آلومینایی نیز قابل استفاده هستند [۱۰]. از فلاکس‌های نمکی نرم برای پوشش سطح مذاب و از فلاکس‌های نمکی سخت برای

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- شبیه‌سازی‌های ترمودینامیکی انجماد

در شکل (۱) تصاویر مربوط به منحنی سرد شدن (۱-الف)، کسر وزنی فاز جامد در حین انجماد (۱-ب) و نحوه جدایش عناصر منیزیم، سربیم و لانتانیم در فاز مذاب (۱-ج) ارائه شده است. این نتایج به کمک شبیه‌سازی ترمودینامیکی با نرم‌افزار JMathPro برای آلیاژ  $Mg-1.45Ce-0.45Zr-0.4La$  بدون حضور نقره رسم شده است. مشاهده می‌شود که انجماد از دمای حدود ۶۵۰ درجه سانتیگراد شروع و در دمای ۵۹۰ درجه سانتیگراد پایان می‌یابد. بررسی نرخ تشکیل فازهای جامد در شکل (۱-ب) نشان می‌دهد که در مراحل پایانی سرعت انجماد با تشکیل مقادیر جزئی ترکیبات بین‌فلزی و یوتکتیک کاهش می‌یابد.



شکل ۱- الف) منحنی سرد شدن، ب) تغییرات کسر وزنی جامد نسبت به دما و ج) نحوه جدایش عناصر منیزیم، سربیم و لانتانیم در فاز مذاب در حین انجماد آلیاژ  $Mg-1.45Ce-0.45Zr-0.4La$

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آمیزان  $Mg-30Zr$  به کار رفته

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
Zr	۳۰/۲۱	Fe	۰/۰۰۲۱
Ni	۰/۰۰۰۶۵	Cu	۰/۰۰۵۳
Si	۰/۰۰۴۶	Al	۰/۰۰۲۱
Mn	۰/۰۰۶۴	Mg	باقی‌مانده

مذاب به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۷۴۰ درجه سانتی‌گراد برای تصفیه فیزیکی نگه داشته شده و سپس به وسیله دستگاه ریخته‌گری فشار پایین در قالب ریخته‌گری مکعب مستطیلی شکل با ابعاد  $10 \times 2 \times 2$  سانتی‌متر مکعب به همراه ۲/۵٪ وزنی اسید بوریک و ۲/۵٪ وزنی گوگرد ریخته‌گری شد.

#### ۳-۲- عملیات حرارتی

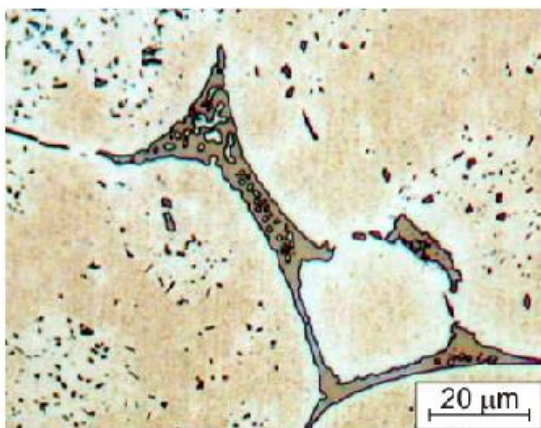
از عملیات حرارتی T6 برای آلیاژ QE22 استفاده شده است. تمامی نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در دمای ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد حرارت دیده و در آب کوئنچ شده و سپس در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت عملیات پیرسازی قرار گرفتند.

#### ۴-۲- ریزساختار و آنالیز شیمیایی

به منظور مطالعات ریزساختاری، نمونه‌هایی مربع شکل با ضلع  $20 \times 20$  میلی‌متر مربع و ارتفاع ۵ میلی‌متر پولیش شده و در نهایت با سوسپانسیون حاوی آلومینا ( $0/1$  میکرومتر) در اتانول پرداخت شده و در محلول نایتال ۴٪ اچ شد. از میکروسکوپ نوری OLYMPUS و میکروسکوپ الکترونی روبشی Vega-TESCAN مجهز به آنالیز EDS برای مطالعات ریزساختاری و از دستگاه XRD SIEMENS مدل D5000 برای آنالیزهای XRD استفاده شد.

#### ۵-۲- سختی‌سنجی

آزمایش‌های سختی‌سنجی با استفاده از روش برینل با نیروی ۱۲۵ kgf و ساچمه ۵ میلی‌متری و دستگاه ESEWAY انجام شد. هر نمونه ۵ بار سختی‌سنجی شده و نتیجه میانگین ارائه شد.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ نوری آلیاژ QE22 در بزرگنمایی ۱۰۰X

شکل (۱-ج) نشان‌دهنده تغییرات درصد وزنی عناصر در فاز مذاب بر حسب کسر وزنی جامد است. مشاهده می‌شود که در مراحل اولیه انجماد، فاز جامد در مقایسه با مذاب، از منیزیم غنی‌تر ولی از سریم و لانتانیم فقیرتر است. این فاز جامد همان فاز زمینه منیزیم است. با پیشرفت انجماد و پس‌زده شدن بیشتر سریم و لانتانیم به مذاب باقیمانده، شرایط برای تشکیل ترکیبات بین‌فلزی و انجماد یوتکتیک چندتایی فراهم می‌شود به همین دلیل نرخ انجماد کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در پایان انجماد، ترکیبات غنی از لانتانیم در کسر وزنی جامد ۰/۸۵ و ترکیب بین‌فلزی غنی از سریم به همراه انجماد یوتکتیک در کسر جامد ۰/۹۵ تشکیل می‌شوند.

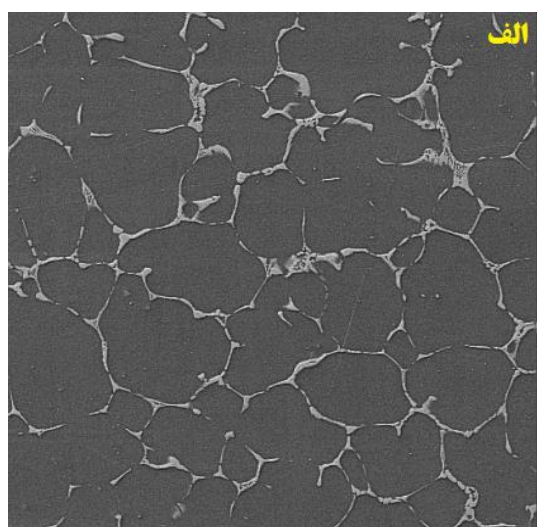
### ۳-۲- بررسی‌های ریزساختاری و خواص ریختگی

ترکیب نهایی آلیاژ که با آنالیز EDS محاسبه شده است، به همراه ترکیب محاسبه شده قبل از ریخته‌گری و درصد تلفات عناصر آلیاژی در حین ریخته‌گری در جدول (۲) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که تلفات عناصر لانتانیم و زیرکونیم از سایر عناصر بیشتر است که می‌تواند به خاطر فشار بخار بالای این عناصر و میل به اکسیداسیون زیاد آنها باشد [۳،۲].

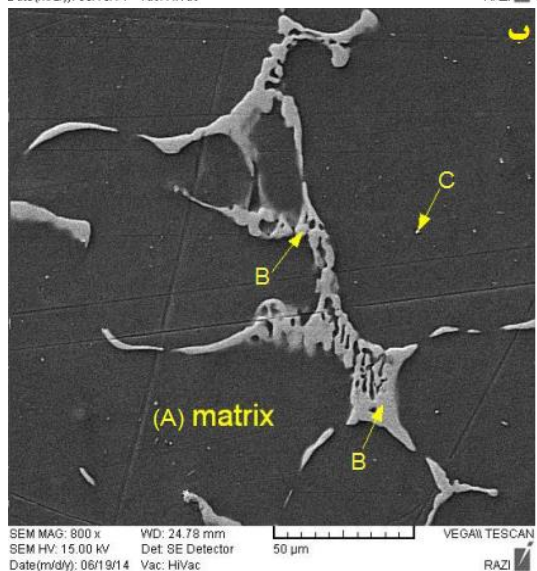
تصاویر ریزساختار ریختگی آلیاژ مورد مطالعه با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. مطابق شکل (۲) و شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود که ریزساختار انجمادی این آلیاژ شامل یک زمینه حاوی سل‌های یوتکتیک در مراحل پایانی انجماد و رسوباتی در داخل دانه هستند که می‌توانند همان ترکیبات بین‌فلزی باشند که در فضای بین دندریتی تشکیل شدند [۲]. برای بررسی بیشتر از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز نقطه‌ای استفاده شده است.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلیاژ QE22 مورد تحقیق (درصد وزنی)

عناصر	ترکیب به دست آمده	ترکیب محاسبه شده	وزن تلف شده (درصد)
Zr	۰/۴۵	۰/۶	۲۵
Ag	۲/۰۷	۲/۳	۱۰
Pr	۰/۲۲	۰/۲۸	۲۰
Ce	۱/۴۵	۱/۸	۲۰
La	۰/۲۸	۰/۴	۳۰
Mg	باقی مانده	باقی مانده	۲



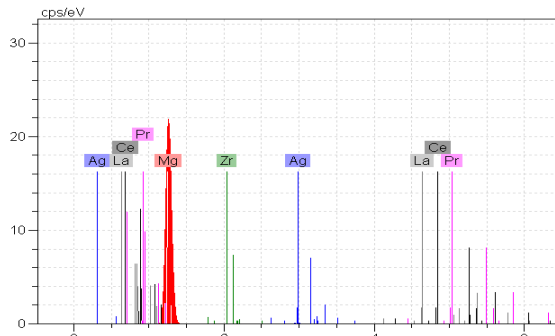
SEM MAG: 250 x WD: 24.63 mm  
SEM HV: 15.00 kV Det: SE Detector  
Date(m/d/y): 06/19/14 Vac: HiVac



SEM MAG: 800 x WD: 24.78 mm  
SEM HV: 15.00 kV Det: SE Detector  
Date(m/d/y): 06/19/14 Vac: HiVac

شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی آلیاژ ریخته شده

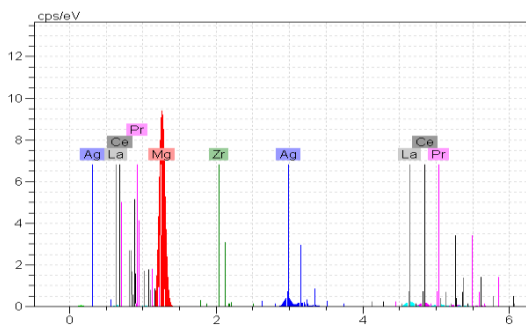
QE22: الف- ۱۰۰ میکرومتر و ب- ۵۰ میکرومتر



ترکیب شیمیایی فاز زمینه (نقطه A)

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
Ag	۱/۴۷	Ce	۰/۳۶
Zr	۰	La	۰/۰۱
Pr	۰/۰۱	Mg	باقی‌مانده

شکل ۴- آنالیز EDS فاز زمینه (نقطه A در شکل ۳-ب)



ترکیب شیمیایی

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
Ag	۱۰/۰۵	Ce	۱۱/۴۸
Zr	۰/۰۰۱۵	La	۱۲/۴۳
Pr	۰/۰۱	Mg	باقی‌مانده

شکل ۵- نتایج آنالیز EDS نقطه B در شکل ۳-ب)

شکل (۵)، نتایج آنالیز EDS نقطه B (مشخص شده در شکل ۳-ب) را نشان می‌دهد. این منطقه غنی از نقره، لانتانیم و سریم است و مقدار کمی زیرکونیم دارد. دو پیک اصلی متعلق به نقره در انرژی‌های حدود ۰/۳ و ۳ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است. پیک مربوط به عنصر لانتانیم است که در ۰/۷ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است و پیک بعدی آن در انرژی ۴/۷ کیلو الکترون‌ولت دیده می‌شود. سومین پیک مربوط به عنصر سریم است که در ۰/۷۵ کیلو الکترون‌ولت و پیک بعدی سریم در انرژی ۴/۸۵ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است. پیک عنصر پراژئودیمیم در انرژی ۰/۹۵ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است.

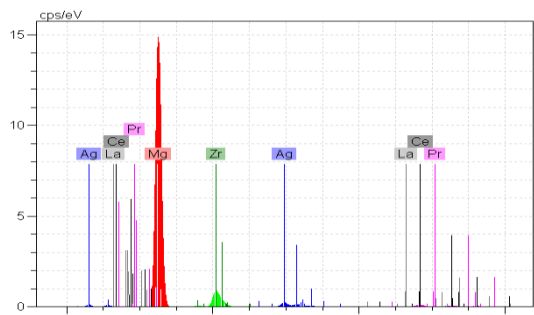
در شکل (۳-ب) فاز زمینه (نقطه A) و ترکیبات بین‌فلزی (نقاط B و C) کاملاً مشهود است. نتیجه آنالیز با نرم‌افزار نشان داد که  $93 \pm 1$  درصد ریزساختار به فاز زمینه اختصاص دارد. آلیاژهای منیزیم-نقره دارای فاز زمینه  $\alpha$  هستند که حاصل ساختار یوتکتیکی منیزیم است [۳].

نتایج EDS از فاز زمینه مشخص شده در شکل (۳-ب) (نقطه A) نشان داده شده است. بلندترین و پهن‌ترین پیک مربوط به منیزیم است. پیک اول در انرژی ۰/۳۵ و پیک دوم در ۳ کیلو الکترون‌ولت مربوط به نقره است. پیک مربوط به عنصر لانتانیم در ۰/۶۵ کیلو الکترون‌ولت و همچنین پیک دوم در انرژی ۴/۷ کیلو الکترون‌ولت دیده می‌شود. پیک مربوط به عنصر سریم در نزدیکی پیک اول لانتانیم در حدود ۰/۷ کیلو الکترون‌ولت و پیک بعدی سریم در انرژی ۴/۸ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است. چهارمین پیک در نمودار طیف EDS مربوط به عنصر پراژئودیمیم است که در انرژی ۰/۹ کیلو الکترون‌ولت و پیک دوم این عنصر در انرژی حدود ۵/۰۵ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است. از پیک تشکیل شده برای عنصر منیزیم در محدوده انرژی ۱/۲ تا ۱/۴ کیلو الکترون‌ولت می‌توان گفت که عنصر منیزیم، عنصر غالب در فاز زمینه است [۱۷]. این فاز شامل مقدار زیادی عنصر منیزیم و مقدار اندکی از هر یک از عناصر نقره و نادر خاکی است.

مطابق این داده‌ها، مشاهده می‌شود که زیرکونیم انحلالی در فاز زمینه نداشته است اما نقره و سریم انحلال قابل توجهی در فاز زمینه دارند.

شکل (۵)، نتایج آنالیز EDS نقطه B (مشخص شده در شکل ۳-ب) را نشان می‌دهد. این منطقه غنی از نقره، لانتانیم و سریم است و مقدار کمی زیرکونیم دارد. دو پیک اصلی متعلق به نقره در انرژی‌های حدود ۰/۳ و ۳ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است. پیک مربوط به عنصر لانتانیم است که در ۰/۷ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است و پیک بعدی آن در انرژی ۴/۷ کیلو الکترون‌ولت دیده می‌شود. سومین پیک مربوط به عنصر سریم است که در ۰/۷۵ کیلو الکترون‌ولت و پیک بعدی سریم در انرژی ۴/۸۵ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است. پیک عنصر پراژئودیمیم در انرژی ۰/۹۵ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است.

$(Mg, Ag)_{12}Nd$  است [۱۸]. نتیجه آنالیز XRD نمونه ریخته‌شده در شکل (۶) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نمونه شامل فازهای منیزیم، زیرکونیم و  $AgZr_2$  است. پیک اول در  $2\theta = 32$  درجه



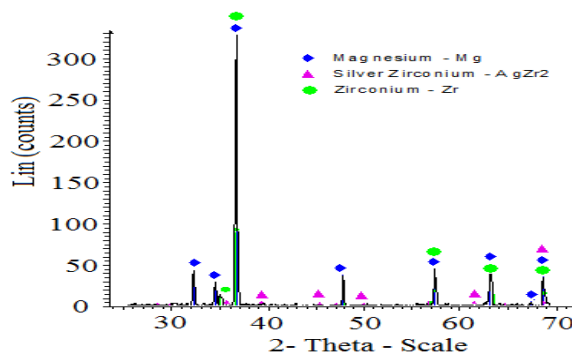
ترکیب شیمیایی نقطه C در شکل ۵

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
Ag	۶/۳۳	Ce	۶/۴۴
Zr	۱۴/۹۵	La	۱/۰۹
Pr	۰/۰۳	Mg	باقی مانده

شکل ۷- نتیجه آنالیز EDS نقطه C در شکل ۳-ب

دیده می‌شود. پیک‌های دیگری نیز مربوط به این عنصر با ارتفاع‌های کم نیز ملاحظه می‌شود. سومین پیک مربوط به عنصر سیریم است که در نزدیکی پیک اول لانتانیم در حدود ۰/۷۵ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است. پیک بعدی سیریم در انرژی ۴/۸ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است. چهارمین پیک در نمودار طیف EDS مربوط به عنصر پراژئودیمیم است که در انرژی ۰/۹۵ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است. پیک دوم این عنصر در انرژی حدود ۵ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است. از پیک تشکیل شده برای عنصر منیزیم در نمودار طیف EDS کاملاً مشخص است که عنصر منیزیم بیشترین مقدار را در نقطه C به خود اختصاص داده است. این پیک در محدوده انرژی ۱/۱ تا ۱/۴ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است که بیشترین ارتفاع و پهنا را نسبت به سایر پیک‌های موجود دارد که نشان دهنده این موضوع است که عنصر منیزیم، عنصر غالب است. آخرین پیک اصلی مشخصه در این نمودار مربوط به عنصر زیرکونیم است که در انرژی حدود ۲ کیلو الکترون‌ولت تشکیل می‌شود.

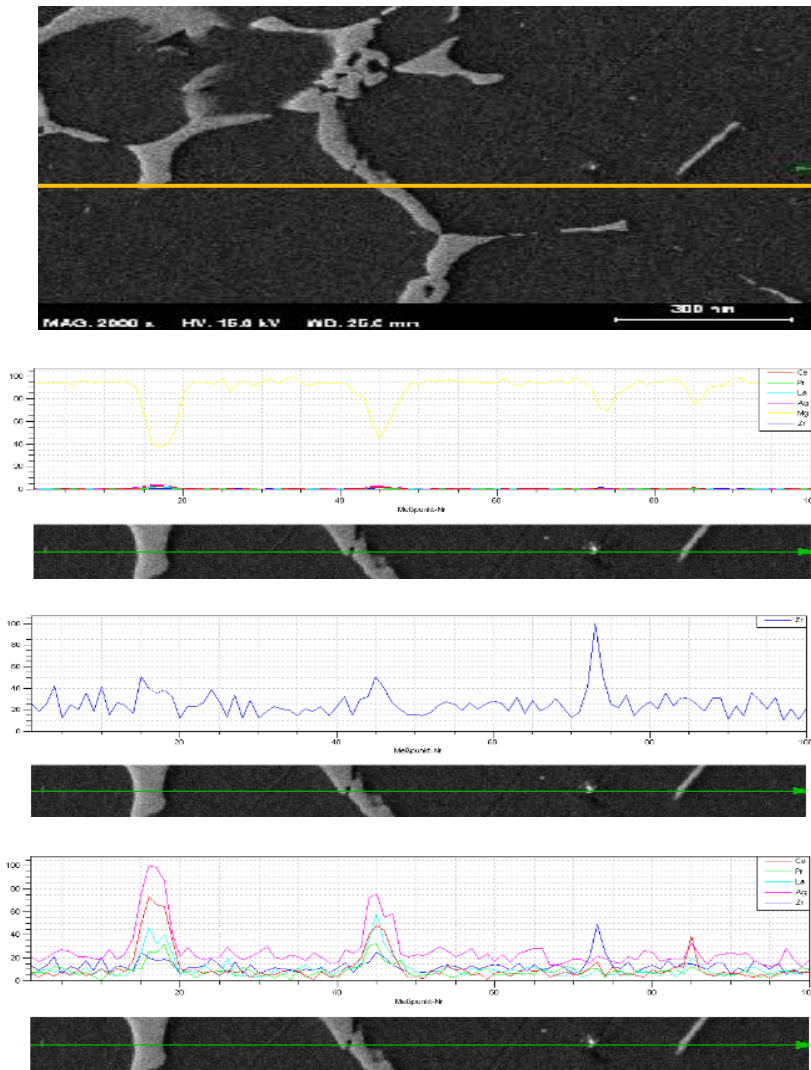
شکل (۸) نتیجه آنالیز خطی عناصر را نشان می‌دهد. در حرکت از چپ به راست اولین منطقه فاز زمینه غنی از منیزیم و حدود ۶۰٪ است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که بیشترین پراکندگی نقره و فلزات قلیایی در ترکیب‌های بین‌فلزی است. البته فلزات قلیایی کمتر از نقره در ترکیب‌های بین‌فلزی حل شده است و در فاز زمینه نیز بسیار کم حضور دارد. با توجه به شکل (۸) اندازه نقاط



شکل ۶- نتایج آنالیز XRD نمونه ریخته شده آلیاژ QE22

مربوط به منیزیم با شدت ۸۵ است. پیک دوم در  $2\theta = 34$  درجه با شدت ۱۲۰ و پیک سوم در  $2\theta = 37$  درجه با شدت ۳۴۰ هم مربوط به منیزیم است. هم‌چنین منیزیم در  $2\theta$  های ۴۸، ۵۷/۵، ۶۳، ۶۹ درجه به ترتیب با شدت‌های ۵۰، ۴۰، ۵۵ و ۴۵ هم پیک دارد. قوی‌ترین پیک زیرکونیم در  $2\theta = 37$  درجه با شدت ۱۰۰ است و پیک‌هایی در  $2\theta$  های ۳۲ و ۳۵ با شدت متوسط و تعدادی پیک ضعیف‌تر نیز دارد. سومین فازی که در طیف اشعه X مشخص شده است مربوط به فاز  $AgZr_2$  است. اولین پیک در زاویه  $2\theta = 15$  درجه تشکیل شده است. دومین پیک آن در زاویه  $2\theta = 28$  دیده می‌شود. پیک سوم در زاویه  $2\theta = 36$  درجه تشکیل شده است. چندین پیک دیگر نیز برای  $AgZr_2$  در طیف اشعه X دیده می‌شود که همگی دارای شدت بسیار پایین و در حدود ۵ هستند. نتایج مشابهی در ریخته‌گری آلیاژهای حاوی عناصر قلیایی به دست آمده است که نشان می‌دهد با ورود عنصر آلیاژی بخشی از آن به‌عنوان ترکیب بین‌فلزی در زمینه آلفا رسوب می‌کند [۱۹].

در شکل (۷) نتیجه آنالیز EDS نقطه C از شکل (۳-ب) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود این ذرات غنی از زیرکونیم بوده و نقره و عناصر نادر خاکی نیز در آن حل شده است. اولین پیک مربوط به عنصر نقره است که در انرژی حدود ۰/۳۵ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است. پیک بعدی مربوط به عنصر نقره در انرژی حدود ۳ کیلو الکترون‌ولت دیده می‌شود. این دو پیک اصلی‌ترین پیک‌های نقره هستند چون دارای حداکثر شدت هستند و از دیگر پیک‌های با جریان پایین صرف‌نظر می‌شود. دومین پیک مربوط به عنصر لانتانیم است که در ۰/۷ کیلو الکترون‌ولت تشکیل شده است و دومین پیک با ارتفاع قابل قبول برای شناسایی عنصر لانتانیم در انرژی ۴/۶ کیلو الکترون‌ولت



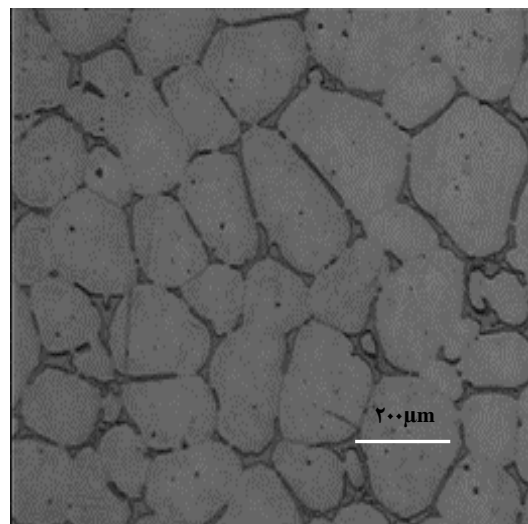
شکل ۸- نتیجه آنالیز خطی زمینه و ترکیب بین فلزی

نتایج سختی‌سنجی به روش برینل نشان داد که سختی نمونه‌های ریخته‌گری در حدود ۴۳ برینل است و با انجام عملیات محلول‌سازی، مقدار آن به ۴۸ برینل افزایش یافته است. این موضوع بیان‌گر انحلال فاز یوتکتیک طی عملیات محلول‌سازی است. دلیل تغییر سختی در این حالت را می‌توان چنین توجیه کرد که اگرچه انحلال فاز یوتکتیک موجود در نمونه ریخته‌گری باعث کاهش سختی آلیاژ می‌شود ولی محلول جامد ایجاد شده باعث افزایش بیش‌تری در سختی شده و در نتیجه سختی آلیاژ افزایش می‌یابد. مواد حل شونده، معمولاً در شبکه اصلی (حلال) تنش ایجاد می‌کنند. این تنش‌ها جلوی حرکت نابجایی‌ها (نابجایی‌های فعال) را گرفته و باعث کمتر شدن تغییر شکل مومسان (تغییر شکل پلاستیک) ماده شده و سختی آن را افزایش می‌دهند [۲۲،۲۱].

شبهه به نقطه C کوچک‌تر از ۱ میکرومتر است و حاصل جدایش زیرکونیم از منیزیم است که نقش جوانه‌زا در فرآیند انجماد را بازی کرده است [۲۰].

۳-۳- بررسی‌های ریزساختاری بعد از عملیات حرارتی شکل (۹)، تصویر میکروسکوپ نوری نمونه عملیات حرارتی شده در ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶ ساعت را نشان می‌دهد. ریزساختار دچار کمی تغییر شده است، ولی تغییر محسوسی در ریزساختار میکروسکوپی ایجاد نشده است. در طی فرایند محلول‌سازی و پیرسازی، بیشترین انحلال ترکیب‌های بین‌فلزی در بازه دمایی ۵۲۰ تا ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد و بازه زمانی ۶ تا ۸ ساعت اتفاق می‌افتد. در کمتر از این بازه دمایی انحلال ترکیبات بین‌فلزی کاهش یافته و در نتیجه زمان فرآیند افزایش می‌یابد [۱۷].

- 626.
4. Emley E.F., Principal of Magnesium Technology, Pergamon Press, 1996.
  5. Kainer K.U., Buch F.V., The current state of technology and potential for further development of magnesium applications, Magnesium Alloy and Technology, 2003, 1-22.
  6. ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloy, ASM Publication, 1999.
  7. Metals Handbook, Casting, ASM International, Vol. 15, 9th Ed, 1988.
  8. Xiaoqin Z., Qudong W., Yizhen L., Influence of beryllium and rare earth additions on ignition - proof magnesium alloys, Journal of Materials Processing Technology, 2001, 112, 17-23
  9. You B.S., Park W.W., The effect of calcium additions on the oxidation behavior in magnesium alloys, Scripta Mater., 2000, 42, 1089-1094.
  10. Strauss K., Applied Science in the Casting of Metals, Pergamon Press, 1970
  11. Alans L., Henry H., Inclusion in molten magnesium and potential assessment technique, Journal of Metals, October, 1996, 47-51.
  12. Pettersen G., Ovrelid E., Characterization of the surface films formed on molten magnesium in different protective atmospheres, Materials Science and Engineering A, 2002, 332, 285-294.
  13. Polmear I.J., Light Alloys: Metallurgy of Light Metals, First Edition, 1981.
  14. Motegi T., Yano E., Tamura Y., Clarification of grain refining mechanisms of super heat-treated Mg-Al-Zn alloy casting, Materials Science Forum, 2000, 350-351, 191-198
  15. Nishino N., Kawahara H., Shimizu Y., Magnesium Alloy and Method of Producing the Same, US Patent, 6395224, 2002.
  16. Tamura Y., Motegi T., Kono N., Sato E., Effect of minor elements on grain size of Mg9%Al alloy, Materials Science Forum, 2000, 350-351, 199-204
  ۱۷. غنی‌آبادی ا.، شبستری س.، اثر فرآیند نیمه جامد محافظه چرخان بر مشخصه‌های انجمادی، کوه‌رنسی دندریت‌ها و ریزساختار آلیاژ منیزیم AZ91، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۷، ۲ (۳) ۱۴۶-۱۳۵.
  18. Metals Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloy and Special Purpose Materials, ASM International, Vol 2, 9th Ed, 1988.
  ۱۹. پریدری ش.، ثقفیان لاریجانی ح. و عیسی‌آبادی ق.، اثر کلسیم بر مقاومت به اکسیداسیون و سیالیت آلیاژ منیزیم AZ91، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۷، ۲ (۳) ۲۰۰-۱۹۳.
  20. Brace A.W., Magnesium Casting Technology, London Chapman & Hal Ltd., 1957
  21. Metals Handbook, Heat Treatment, ASM International, Vol. 4, 9th Ed, 1988
  22. Brooks C. R., Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys, American Society for Metals, 1982.



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه عملیات حرارتی شده با بزرگنمایی ۵۰X

#### ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- ریزساختار انجمادی آلیاژ QE22 شامل حدود ۹۴٪ فاز زمینه پایه منیزیم و حدود ۶ درصد هم‌سل‌های یوتکتیک است.
- ۲- عناصر نقره، زیرکونیم و فلزات نادر خاکی بیش‌تر در ترکیبات بین‌فلزی و فاز یوتکتیک پراکنده شده‌اند و در زمینه انحلال بسیار جزیی دارند. بنابراین فاز یوتکتیک غنی از نقره و زیرکونیم در مرز دانه‌ها و فضای بین شاخه‌های دندریتی فاز زمینه تشکیل می‌شوند.
- ۳- سختی آلیاژ QE22 از ۴۳ برینل در حالت ریختگی به ۴۸ برینل بعد از عملیات حرارتی و رسوب‌سختی افزایش یافت.

#### مراجع

1. Kulekci M. K., Magnesium and its alloys applications in automotive industry, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(9-10), 851-865.
2. Dahle A. K., Lee Y.C., Nave M.D., Schaffer P.L., John D.H.S., Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminum alloys, Journal of Light Metals, 2001, 1, 61-72.
3. Sumida M., Microstructure development of sand-cast AZ- type magnesium alloys modified by simultaneous addition of calcium and neodymium, Journal of Alloys and Compounds, 2008, 460, 619-





IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

### Research Paper

### Investigation of Microstructure and Chemical Composition of Mg-Ag-Ce-Zr Cast Alloy (QE22)

Seyyed Sadra Yousefi Bonab<sup>1</sup>, Hossein Aghajani<sup>2,\*</sup>, Seyyed Reza Damadi<sup>3</sup>,

Golnaz Naseri Azari<sup>4</sup>, Amir Saeed Safaei<sup>5</sup>

1. M.Sc., Materials Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2. Associate Professor, Materials Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3. Assistant Professor, Materials Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran
4. B.S., Materials Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
5. M.Sc., Mohandesi Daghigheh Felez Iranian Co., Tehran, Iran.

\* **Corresponding Author:** E-mail: h\_aghajani@tabrizu.ac.ir

Received: 20 October 2018

Accepted: 11 November 2019

#### Abstract:

The solidification microstructure of Mg-Ag-Ce-Zr cast alloy (QE22) was investigated. First, the thermodynamic simulation was performed using of JMatPro software. Then, for experimental experiments, melting, alloying and casting operations were performed using a low pressure casting machine under argon atmosphere. Also for T6 heat treatment, the samples were heated at 525 °C and then quenched in water and aged at 200 °C. In order to the microstructural and phase investigations, the optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) equipped to EDS analysis and X-Ray diffraction apparatus were used. Hardness measurements carried out using Brinell indenter. The results showed that the solidification microstructure of magnesium alloy with 2.24% by weight of silver, 1.52% by weight of alkaline elements and 0.55% by weight of zirconium including 94 vol.% magnesium base phase (matrix) and 6 vol.% of eutectic cells. The results of EDS analysis showed that unlike zirconium, silver and alkali metals have significant solubility in the matrix, and as a result enriched intermetallics with zirconium and silver appear in the grain boundary or interdendritic area. It has also been observed that hardness of the alloy has increased from 43 to 48 HB by solution and aging heat treatment (T6).

#### Keywords:

QE22 Mg-Ag-Ce-Zr alloy,  
Casting,  
Hardness,  
Chemical composition,  
Microstructure.

#### Please cite this article using:

Seyyed Sadra Yousefi Bonab, Hossein Aghajani, Seyyed Reza Damadi, Golnaz Naseri Azari, Amir Saeed Safaei, Investigation of Microstructure and Chemical Composition of Mg-Ag-Ce-Zr Cast Alloy (QE22), in Persian, Founding Research Journal, 2020, 3(4) 237-245.  
DOI: 10.22034/FRJ.2019.152201.1056

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

