بررسی اثر عملیات حرارتی و کار گرم بر خواص مکانیکی و ارتعاشی آلیاژ منیزیمAZ91

رضا آذرافزا *[۱] ، امیرحسین رضائی[۲] ، محمد رضا منتجبی ها[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۲۹، ش.ص ۹۲-۷۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۳۱)

چکیده

منیزیم و آلیاژهای آن به‌دلیل خواص منحصر به فردشان، بسیار مورد توجه طراحان صنایع هوا فضا و خودرو سازی قرار گرفته‌اند. از خواص مهم این آلیاژ می‌توان به چگالی پایین منیزیم که دو سوم آلومینیم است و همچنین نسبت استحکام به وزن بالا و جذب ارتعاش مناسب اشاره نمود. در این تحقیق اثر عملیات حرارتی و کارگرم بر خواص ارتعاشی، مکانیکی و ریز ساختار آلیاژ منیزیم AZ91 مطالعه گردید. ابتدا نمونه‌های یکسانی از لحاظ وزن و شکل از آلیاژ منیزیم AZ91 ساخته شدند. سپس عملیات‌های: ۱-حل‌سازی، ۲-حل‌سازی-پیرسازی، ۳-اعمال فرآیند اکسترود و سپس عملیات تنش زدایی، ۴-اعمال فرآیند نورد و سپس عملیات تنش زدایی انجام گردید. خواص مکانیکی و ارتعاشی نمونه‌های عملیات حرارتی شده و کار گرم شده به همراه نمونه ریختگی اندازه‌گیری شد. همچنین ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری تحلیل گردید. نتایج نشان داد که عملیات حرارتی حل‌سازی و پیرسازی، موجب رسوب فاز دوم در مرزها شده و با افزایش نفوذ رسوب به مرز، قدرت قفل شوندگی در مرزها افزایش می‌یابد. در نتیجه این فرآیند، سبب افزایش خواص مکانیکی و کاهش خواص ارتعاشی می‌گردد. نمونه نورد شده دارای بهترین پاسخ فرکانسی و بیش‌ترین نسبت میرایی بود. افزایش خواص مکانیکی نمونه پیرسازی نسبت میرایی را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ منیزیم، عملیات حرارتی، کارگرم، میرایی، آنالیز مودال.

[۱]- استادیار، گروه مکانیک، مجتمع دانشگاهی مواد و فناورهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
[۲]- کارشناس ارشد، مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران
[۳]- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی – واحد سنندج
*-نویسنده مسئول مقاله: azarmut@mut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

پیشگفتار

منیزیم، یکی از سبک‌ترین فلزات می‌باشد و در کاربردهای مهندسی به ندرت بدون آلیاژ شدن با عناصر دیگر قابل استفاده می‌باشد. آلیاژهای منیزیم به دلیل داشتن ویژگی‌هایی از قبیل چگالی کم، استحکام ویژه بالا، قابلیت ریخته‌گری و ماشین‌کاری خوب و جذب ارتعاش مناسب از اهمیت ویژه‌ای در صنایع هوا فضا، خودرو سازی، وسایل حمل و نقل و سازه‌ای برخوردار هستند. اکثر قطعاتی که در صنایع خودروسازی و هوا فضا به کار می‌روند، از آلیاژهای منیزیم ریختگی سری AZ می‌باشند. خواص مکانیکی آلیاژ ریختگیAZ91 به‌دلیل حضور فاز $Mg_{17}Al_{12}$ در امتداد و مرز دانه‌ها و بعضا در داخل دانه‌ها به دلیل اثرات مخرب این فاز تحت الشعاع می‌باشد. خواص ارتعاشی مناسب این آلیاژ، موجب توجه محققین بسیاری به سمت بهبود خواص مکانیکی با حفظ پارامترهای دیگر نظیر خواص دما بالا، مقاومت به خوردگی، قابلیت ریختگی و خواص ارتعاشی شده است. درگذشته تحقیقات زیادی به منظور بهبود خواص مکانیکی این آلیاژ با استفاده از فرآیندهای ترمومکانیکی و عملیات حرارتی انجام شده است. رأفتی و همکاران[۱] ، با انجام تحقیقاتی خواص مکانیکی آلیاژهای منیزیم را با اضافه نمودن عناصری نظیر عناصر نادر خاکی ایتریم، عملیات حرارتی حل‌سازی، حل‌سازی-پیرسازی، کارسختی (کار سرد و یا کار گرم) بهبود بخشیدند. جینگ یوان و همکاران[۲] نشان دادند که عملیات همگن سازی می‌تواند توزیع غیر یکنواخت عناصر آلیاژی در اثر جدایش میکروسکوپی را کاهش داده و با انحلال ترکیبات یوتکتیک γ، منجر به بهبود کارپذیری گردد. ژانگ و همکاران[۳] در تحقیقات خود نشان دادند که اضافه کردن عنصر ایتریم به آلیاژAZ91، سبب بهبود استحکام کششی و مقاومت خوردگی آلیاژ می‌شود. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که ایتریم اضافه شده، باعث بهبود و اصلاح ریز ساختار فاز اولیه $\alpha-Mg$ و یوتکتیک β-$Mg_{17}Al_{12}$ در آلیاژ AZ91 می‌شود و نرخ خزش آلیاژ حاوی ایتریم در دمای $150\ ^{oC}$، از آلیاژ خالص کم‌تر و با افزایش درصد ایتریم، اندازه دانه‌ها کوچک‌تر شده و استحکام کششی افزایش می‌یابد[۳]. نتایج تحقیق مینگ‌تان و همکاران [۴] در زمینه اثر عملیات حرارتی پیرسازی T6 بر روی آلیاژ AZ91 نشان داد که رسوب کامل فاز γ، در مرز دانه‌های زمینه منیزیم و قفل شدن نابجایی‌ها، باعث افزایش استحکام مکانیکی آلیاژ می‌گردد. همچنین نشان دادند که اثر کارگرم و عملیات حرارتی، باعث بهبود خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ91 گردیده است. چن وهمکاران[۵] اثر پارامترهایی نظیر ناخالصی بر روی خواص مکانیکی و ظرفیت میرایی آلیاژ منیزیم را بررسی کردند و نشان دادند که خالص سازی آلیاژ، اثر مطلوبی بر خواص مکانیکی آلیاژ دارد. وانگ چینگ و همکاران[۶] تاثیر عنصر ایتریم بر خواص مکانیکی و ظرفیت میرایی آلیاژ منیزیم را بررسی نمودند و نشان دادند که با اضافه کردن درصدهای مختلف عنصر ایتریم به میزان ۰/۰۱ الی ۱/۵ درصد، اندازه دانه به میزان ۲/۵ تا ۴ درصد کوچک‌تر شده و استحکام این آلیاژ افزایش یافته است. از طرفی رسوب گذاری این عناصر در مرز دانه‌ها، سبب ترد شدن و کاهش خاصیت میراکنندگی این آلیاژ شده است. دوبرزانسکی و همکاران[۷]، اثر عملیات حرارتی آلیاژ منیزیم با ۸/۵ درصد آلومینیم را در شرایط سرد کردن مختلف بررسی نمودند. نتایج تست‌های آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد، نمونه‌ای که در آب سرد شده است دارای بیش‌ترین استحکام کششی و نمونه ریختگی دارای بیش‌ترین سختی می‌باشد. ژانگ و همکاران[۸] اثر افزایش مس و منگنز را بر خواص مکانیکی و ظرفیت دمپینگ آلیاژ مس، منگنز و منیزیم بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اضافه کردن مس و منگنز باعث کاهش اندازه دانه‌ها می‌شود. همچنین نشان دادند که آلیاژ منیزیم با ۲/۵ درصد مس و ۰/۸درصد منگنز دارای بهترین خواص مکانیکی (فشاری) است و مقدار دمپینگ را به اندازه کافی افزایش می‌دهد. ژنیان و همکاران[۹] اثرات عملیات حرارتی را بر پاسخ دمپینگ آلیاژ منیزیم AZ91D بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که ظرفیت دمپینگ در دمای $100\ ^{o}C$، بیش‌تر از دمای اتاق است؛ زیرا گرما باعث افزایش نقایص نقطه‌ای و نقایص خطی می‌گردد. هو و همکاران [۱۰] اثر تغییر شکل کششی کوچک بر ظرفیت میرایی منیزیم با ۱٪ آلومینیم را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که آلیاژ منیزیم با 1% آلومینیم، باعث میرایی زیاد در کرنش بالا می‌گردد. از طرفی، تغییر طول نسبی کششی بیش‌تر از 3% می‌شود و مقدار دمپینگ این آلیاژ در منطقه کرنش بالا در دمای اتاق به شدت کاهش

Archive of SID

www.SID.ir

می‌یابد. بیات و همکاران [۱۱] در فرآیند اکستروژن برشی ساده (SSE)، قابلیت تغییر شکل منیزیم AZ91 را به منظور دستیابی به ساختاری با اندازه دانه ریز بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که اعمال کرنش تدریجی در روش اکستروژن برشی ساده کارپذیری نمونه‌های تولید شده با این روش را در دمای پایین به گونه قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین در نمونه‌های ریختگی، وجود فاز ترد و پیوسته Mg17Al12 منجر به تخریب کامل نمونه در فرآیند SSE گردید. حسنی و محمودی[۱۲] پارامترهای مؤثر بر تغییر شکل گرم ورق منیزیمی TX41 نورد شده را بررسی کردند. در این پژوهش آزمون‌های کشش تک محوری در دماهای مختلف در محدده ºC 25-350 و نرخ کرنش‌های متفاوت در محدوده S^{-1} 10^{-2}-10^{-4} انجام گردید. نتایج نشان داد که استحکام آلیاژ منیزیمی نورد داغ و آنیل شده از حدود 220MPa در دمای اتاق به حدود 30MPa در دمای ºC 350 کاهش و انعطاف‌پذیری این آلیاژ از حدود 21% در دمای اتاق به بیش از 55% در دمای ºC 350 می‌رسد. در تحقیقات گذشته، اثر عملیات حرارتی یا اثر عملیات‌های ترمومکانیکی بعد از همگن‌سازی بر روی خواص مکانیکی آلیاژ AZ91 بررسی شده است و اثر چنین فرآیندهایی بر روی خواص ارتعاشی آلیاژ AZ91 کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور در این تحقیق اثر عملیات حرارتی و ترمومکانیکی مختلف بر خواص مکانیکی و ارتعاشی آلیاژ منیزیم AZ91 بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات نمونه

در این تحقیق شمش آلیاژ ریختگی منیزیم با عنوان تجاری AZ91 و ترکیب شیمیایی مطابق جدول شماره ۱، با ابعاد $600\times120\times70mm^3$ تهیه گردید.

سپس به منظور انجام آزمایش‌های متالوگرافی و مکانیکی (تست کشش، سختی سنجی و آنالیز مودال) و نیز فرآیندهای مورد نظر از قبیل فرآیند اکستروژن و نورد گرم و عملیات حل‌سازی و پیرسازی روی آلیاژ انجام گرفت.

عملیات حرارتی

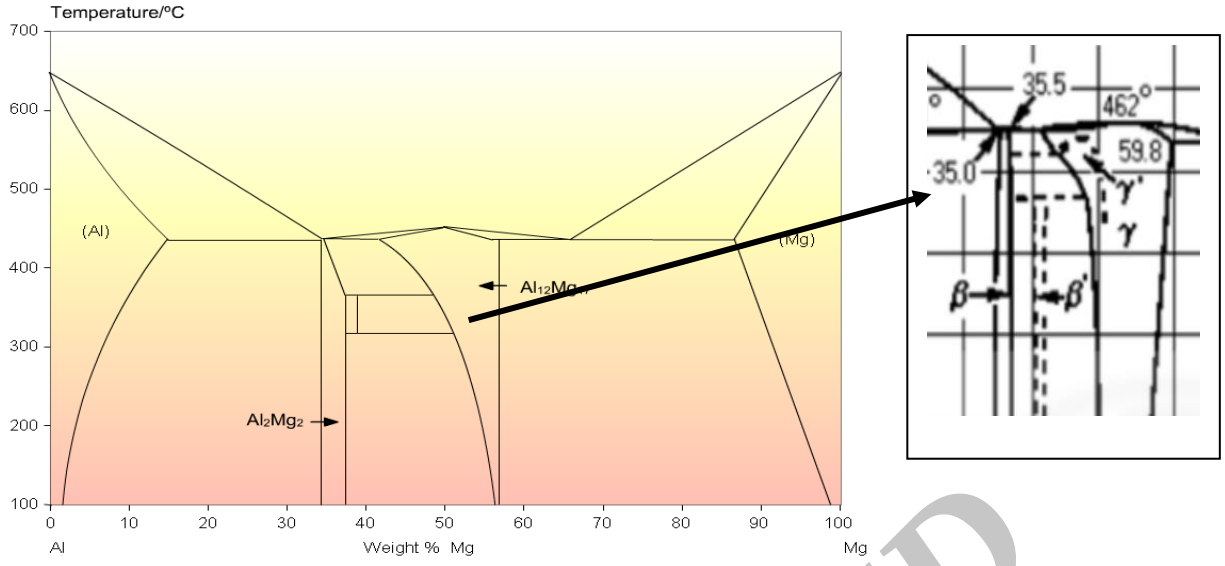
یکی از فرآیندهای مورد نظر برای بهبود خواص مکانیکی و استحکام بخشی آلیاژ منیزیم، فرآیند عملیات حرارتی می‌باشد. برای انجام این مرحله نمونه‌های منیزیمی به ابعاد مورد نظر بر اساس استاندارد ASTM-E8 برای آزمایش کشش، تهیه گردیدند. مطابق شکل ۱، به منظور انحلال فاز $Mg_{17}Al_{12}$ در مرز دانه‌ها، عملیات حل‌سازی در دمای ^{oC} 413 انتخاب شد تا نمونه‌ها به مدت 16h در آن دما نگه‌داری شوند. بدین منظور از کوره با گاز محافظ آرگون استفاده گردید. برای انجام عملیات پیرسازی، نمونه‌های حل‌سازی شده در داخل کوره با دمای 168^{oC} به مدت 16h نگه‌داری شده تا رسوب کامل فاز γ آلیاژ و به اصطلاح پیرشدن نمونه‌ها انجام گردد. پس از پایان عملیات، نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه سرد شدند. فرآیند مذکور مطابق جدول ۲، بر روی نمونه‌ها انجام گردید.

جدول۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ ریختگی منیزیم AZ91

نوع آلیاژ	عناصر آلیاژی						
	Bal.	Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni
AZ91	Mg	8.3-9.7	0.13(min)	0.35-1.0	0.50(max)	0.10(max)	0.03 (max)

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱- سیستم آلیاژی دوتایی منیزیم-آلومینیم[۴]

جدول۲- فرآیندهای عملیات حرارتی بر روی آلیاژ منیزیم AZ91

شماره قطعه	نام قطعه	عملیات اولیه	عملیات ثانویه	تعداد
۱	ریختگی	-----	-----	2
۲	حل‌سازی	413^{oC} -16Hr	-----	2
۳	حل‌سازی- پیرسازی	413^{oC} -16Hr	168^{oC} -16Hr	2

فرآیند کارگرم (اکستروژن)

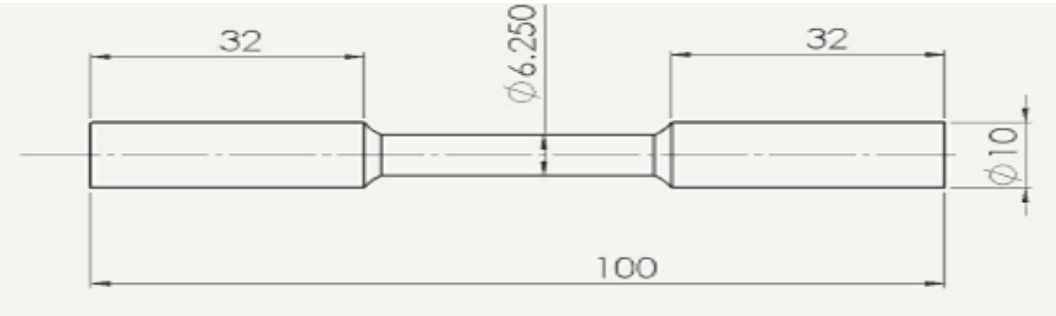
بدلیل ساختار HCP و فرم پذیری از طریق صفحه لغزش اصلی و تشکیل دوقلویی، داکتیلیتی آلیاژ AZ91 در دمای محیط با مشکلات زیادی رو به رو می‌باشد. در دمای بالای300^{o}C سیستم‌های لغزش [1120](1011) و [1120](1010) نیز فعال می‌گردند[۱۳]. بنابراین برای بهبود خواص مکانیکی و استحکام‌دهی از طریق کرنش سختی باید فرآیندها در دمای بالا انجام شود. از این رو دمای 350^{o}C برای کار گرم آلیاژ منیزیم در نظر گرفته شد. از آنجائیکه نیاز بود بعد از فرآیندهای اکستروژن و نورد، آزمایش کشش (مطابق ابعاد شکل۲) بر روی قطعات انجام شود، به همین منظور ابعاد خروجی نمونه‌ها بر همین اساس تعیین گشت. به‌گونه‌ای که نمونه تهیه شده در دمای 350^{o}C در داخل سیلندر دستگاه در قالبی به ابعاد 11×11mm^2 با مقطع مربعی اکسترود گردید و درصد کارگرم آلیاژ فوق 90% محاسبه شد. با توجه به تنش‌های باقیمانده برای نمونه پس از عملیات اکسترود، می‌بایست عملیات حرارتی تنش زدایی در نظر گرفته شود. بنابراین نمونه اکسترود شده در دمای 168 ^{o}C به مدت 16h حرارت داده شد و در دمای محیط سرد گردید.

فرآیند کارگرم (نورد)

با توجه به ابعاد دستگاه کشش نمونه با ضخامت 13mm در دستگاه نورد ۴ محوره مدل 4RHS20-250 شاهیلنر در دانشگاه در دمای350^{o}C پس از ۱۵ پاس نورد (کاهش ضخامت 0.1mm در هر پاس) به ضخامت مورد نظر 11.5mm رسید. مشابه فرآیند اکستروژن، عملیات تنش-زدایی بر روی نمونه مزبور انجام شد. مطابق جدول ۳، فرآیندهای کارگرم اکستروژن و نورد بر روی نمونه‌ها انجام گردید.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲- ابعاد نمونه آزمون کشش

جدول۳- فرآیندهای کارگرم بر روی آلیاژ منیزیم AZ91

شماره قطعه	نام قطعه	عملیات اولیه	عملیات ثانویه	تعداد
۱	نورد	350^{oC} -٪12	168^{oC} -16Hr	2
۲	اکسترود	350^{oC} -٪90	168^{oC} -16Hr	2

آزمون ها

آزمون خواص مکانیکی

با توجه به تغییر خواص مکانیکی آلیاژ بر اثر عملیات حرارتی، تغییرات سختی نمونه‌ها و خواص کشسان آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور پس از انجام فرآیندهای عملیات حرارتی از کلیه قطعات، نمونه‌های آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM B557M(2010) تهیه و توسط دستگاه Zwick Zc50 با نرخ کرنش 1mm/min در دمای محیط آزمون کشش به‌عمل آمد و نتایج به‌دست آمده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. همچنین آزمون سختی بر اساس استاندارد ASTM E10 با استفاده از دستگاه سختی سنج برینل Every Denison با نیروی 10kg و قطر ساچمه 2.5 mm انجام شد و میانگین اعداد به‌دست آمده ثبت گردید.

آزمون ارتعاش

برای به‌دست آوردن مقدار دامنه، فرکانس طبیعی و میرایی قطعات از دستگاه آنالیز مودال استفاده گردید. بدین منظور نمونه‌هایی به ابعاد $60\times10\times10mm^3$ تهیه شدند. در این آزمون قطعات به‌صورت یکسرگیردار آزمایش شدند (شرایط مرزی). در چند نقطه از قطعه سنسور اندازه‌گیری نصب گردید و در بازه فرکانسی 1-400Hz توسط لرزاننده[4]، مرتعش گردید و دامنه قطعات در این بازه فرکانسی ثبت گردید.

آزمون متالوگرافی

به منظور مقایسه و بررسی ریزساختار، براساس استاندارد ASTM E3 نمونه‌هایی به ابعاد $10\times10\times15mm^3$ تهیه شدند و بعد از عملیات پولیش با استفاده از محلول نایتال 2% نمونه‌های مورد آزمایش،

[4] -Shaker

Archive of SID

www.SID.ir

اچ شدند. سپس به منظور مشاهده ریز ساختار از میکروسکوپ نوری Olympus DP22 با بزرگنمایی X100 استفاده شد.

نتایج و بحث

در جدول ۴، نتایج خواص مکانیکی، ارتعاشی و اندازه دانه برای نمونه‌های ریختگی، عملیات حرارتی شده در حالت‌های حل‌سازی، حل‌سازی-پیرسازی، کارگرم نورد و اکستروژن نشان داده شده است.

بررسی ریزساختار نمونه‌ها

اندازه دانه‌ها یا متوسط قطر دانه‌ها در یک فلز چند بلوری بر خواص مکانیکی تاثیرگذار است. برای مشاهده دانه بندی نمونه‌ها از محلول اچ کلر تغییر یافته[5] منطبق بر استاندارد ASTM E3-01(2007) استفاده گردید. عملیات اچ نمودن منطبق براستاندارد ASTM E407-07 انجام شد. سپس تصاویر میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ نوری منطبق بر استاندارد ASTM E 883-02(2007) ثبت شد. در انتها نیز با استفاده از این تصاویر اندازه‌های دانه‌ها به‌دست آمد که این عملیات نیز منطبق بر استاندارد ASTM E112-96(2004) انجام گردید. شکل۳، اندازه دانه را برای کلیه نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه حل‌سازی شده به‌دلیل رشد دانه، دارای بیش‌ترین اندازه دانه و نمونه‌های عملیات ترمومکانیکی دارای ریزترین اندازه دانه می‌باشد که این عامل را می‌توان به تبلور دینامیکی دانه‌ها ربط داد. با توجه به اینکه درصد کارگرم عملیات اکسترود بیش‌تر از عملیات نورد می‌باشد، دانه‌های ریزتری در نمونه اکسترود حاصل شده است.

با توجه به نمودار فازی Mg-Al (شکل۱) و مطالعات منابع گذشته[۴و۱۳]، حضور یک ترکیب بین فلزی در آلیاژMg-Al مشاهده می‌شود که این ترکیب با نام فاز γ- $Mg_{17}Al_{12}$ به عنوان یک ترکیب یوتکتیک بسیار ترد شناخته می‌شود و در فاز α-Mg زمینه حضور دارد[۴]. مورفولوژی، سایز، تعداد و توزیع آن اثر بسیار زیادی بر روی خواص آلیاژ منیزیم-آلومینیم دارد. متالوگرافی نمونه ریختگی نیز مؤید این مطلب می‌باشد.

همان‌گونه که در شکل۴ الف، با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر قابل مشاهده است، یک ترکیب دندریتی در زمینه و پراکنده در داخل دانه‌ها وجود دارد که اندازه دانه آن برابر با 560µm می‌باشد. در عملیات حل‌سازی فاز γ- $Mg_{17}Al_{12}$ ناپدید شده و به صورت ناپیوسته در مرزدانه زمینه α-Mg حل می‌شود. همان‌طور که در شکل۴ ب، مشاهده می‌شود، نقاط تیره رنگ کوچکی باقی مانده‌اند که همان فاز ثانویه γ- $Mg_{17}Al_{12}$ می‌باشد که به طور کامل حل نشده است و اندازه دانه‌ها نسبت به نمونه ریختگی پس از عملیات حل سازی بزرگ‌تر شده است. در نمونه بعدی مطابق شکل۴ج، که عملیات حل‌سازی و پیرسازی مصنوعی صورت گرفته بود فاز γ- $Mg_{17}Al_{12}$ کاملا رسوب می‌کند و این رسوبات به دو صورت پیوسته در داخل دانه و ناپیوسته در مرز دانه‌ها قرار می‌گیرند. به‌گونه‌ای که اندازه دانه ساختار نمونه حل سازی-پیرسازی شده برابر با 204µm و کم‌تر از اندازه دانه نمونه حل‌سازی-پیرسازی و نمونه ریختگی می‌باشد. شکل۴د، میکروساختار نمونه اکسترود شده را نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که دانه‌ریز شدن به سبب انجام عملیات ترمومکانیکی با کار گرم 90% قابل پیش بینی بود. همان‌طور که مشخص است، نمونه‌ها به‌واسطه تبلور دینامیکی (تشکیل یک سری دانه‌های هم محور و عاری از کرنش که دارای چگالی نابجایی کمتری هستند) ناشی از کارگرم و تنش زدایی ریز دانه‌تر شده‌اند که باعث افزایش سختی و استحکام نمونه شده است. به‌گونه‌ای که کم‌ترین اندازه دانه مربوط به ساختار نمونه اکسترود شده با 97µm می‌باشد. انجام عملیات اکسترود در دمای بالا، باعث افزایش فعالیت و چگالی نابجایی‌ها شده است. علاوه بر این تغییر شکل گرم آلیاژ AZ91 با رسوب گذاری دینامیکی همراه است و دما نقش مهمی بر مورفولوژی و اندازه ذرات رسوب دارد. رسوبات ریز γ- $Mg_{17}Al_{12}$ باعث قفل شدن مرزدانه‌های تبلور مجدد یافته می‌شوند[۱۳].در درصدهای کارگرم بالا تبلور دینامیکی برای اکثر دانه‌ها چه در مغز قطعه و چه در سطح قطعه اتفاق می‌افتد. در فازγ-$Mg_{17}Al_{12}$ به‌دلیل انجام عملیات تنش‌زدایی بخشی از انرژی کرنش ذخیره شده داخلی به‌وسیله حرکت نابجایی‌ها آزاد می‌شود و در

[5]- modified Keller

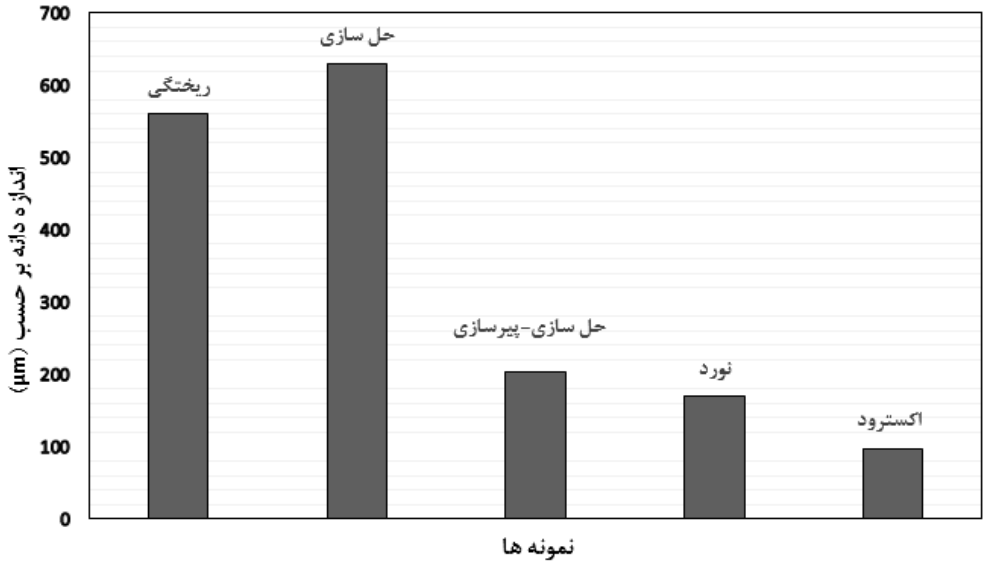
Archive of SID

www.SID.ir

ادامه، دانه‌ها هنور دارای انرژی کرنش زیادی هستند. در عملیات نورد نیز ریز شدن دانه‌ها به واسطه تبلور دینامیکی قابل مشاهده است؛ اما به‌دلیل درصد کارگرم کم‌تر نسبت به حالت اکسترود شده اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر می‌باشد [۴]. از طرفی به‌علت اعمال فشار در یک جهت در فرآیند نورد و عدم برابری کرنش در جهات مختلف میکروساختار نمونه نورد شده در دو جهت مماس بر نورد و سطح مقطع عمود بر نورد بررسی شد. اندازه دانه در حالت عمود بر نورد در حدود 122µm و در جهت مماس با سطح نورد در حدود 169µm محاسبه گردید. در شکل ۴ر، میکروساختار در حالت عمود بر نورد و در شکل ۴ز، میکروساختار در حالت مماس بر نورد نشان داده شده است.

جدول۴- نتایج خواص مکانیکی، ارتعاشی و اندازه دانه نمونه‌های مورد آزمایش

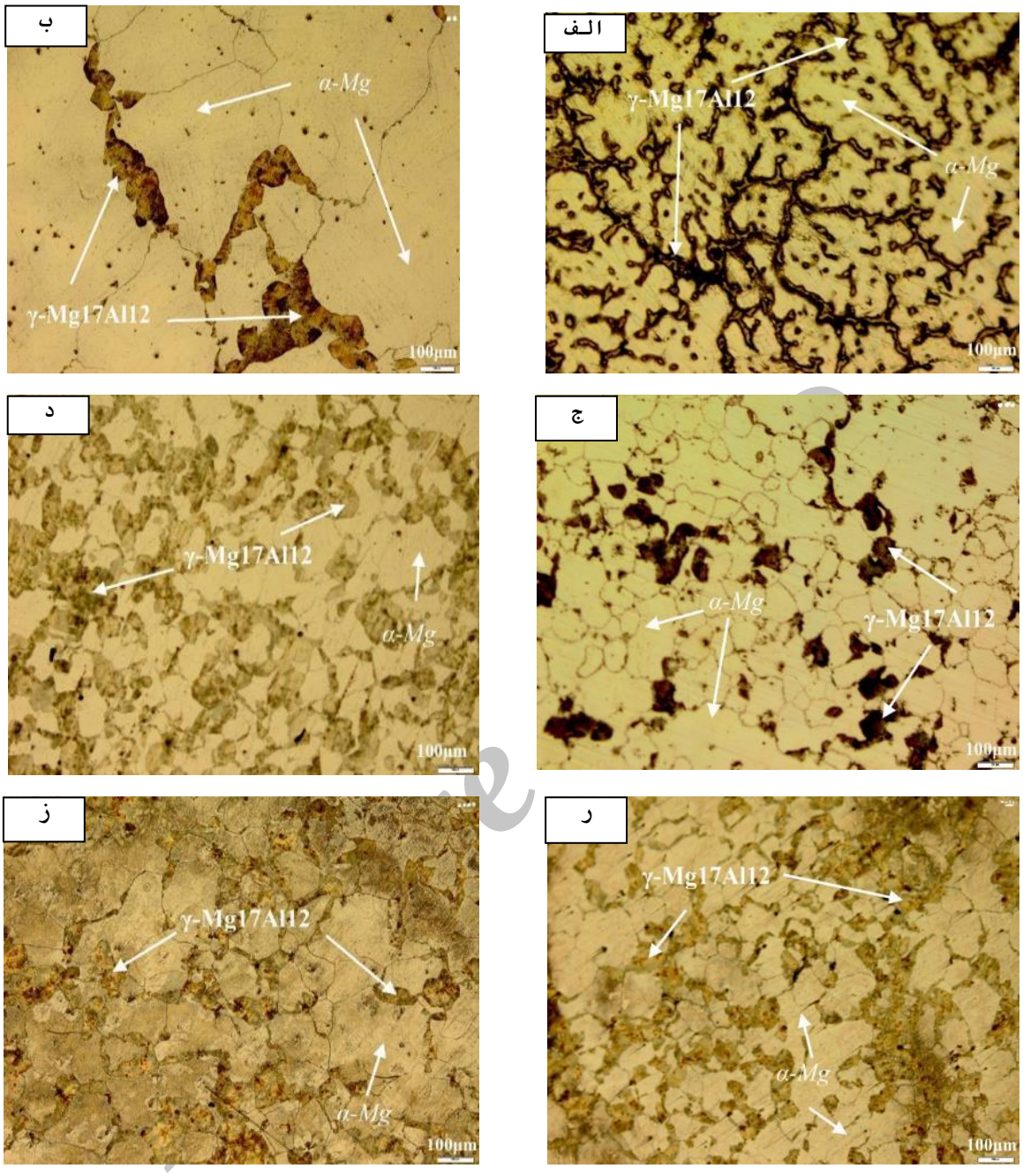
مشخصات	ریختگی	حل‌سازی	حل سازی- پیرسازی	نورد	اکسترود
استحکام تسلیم(MPa)	90	104	105	114	189
مدول یانگ(MPa)	19985	21874	23513	39841	35244
درصد کرنش	1.17	11.611	11.522	6.78	5.305
استحکام نهایی(MPa)	122	204	223.1	231	262.5
سختی(HB)	52.6	60	65	68.2	81.76
دامنه شتاب سنجها(*g*)	1.86	2.09	2.69	1.45	2.41
نسبت میرایی	0.26	0.23	0.18	0.35	0.20
اندازه دانه (µm)	560	630	204	169	97



شکل ۳- مقایسه نمودار ستونی مربوط به میزان اندازه دانه نمونه ها

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴- الف) ریز ساختار ریختگی ، ب) ریز ساختار حل‌سازی ، ج) ریز ساختار حل‌سازی- پیرسازی ، د) ریز ساختار اکسترود ، ر) ریز ساختار نورد (عمود بر جهت نورد)، ز) ریز ساختار نورد (مماس بر جهت نورد) آلیاژ AZ91 با بزرگنمایی ۱۰۰X

خواص مکانیکی

آزمون سختی

مطابق نتایج سختی (جدول۴)، در شکل ۵ نمودار ستونی مربوط به نتایج سختی نمونه‌ها با هم مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سختی نمونه اکسترود شده در بالاترین سطح یعنی 81HB قرار دارد که

www.SID.ir

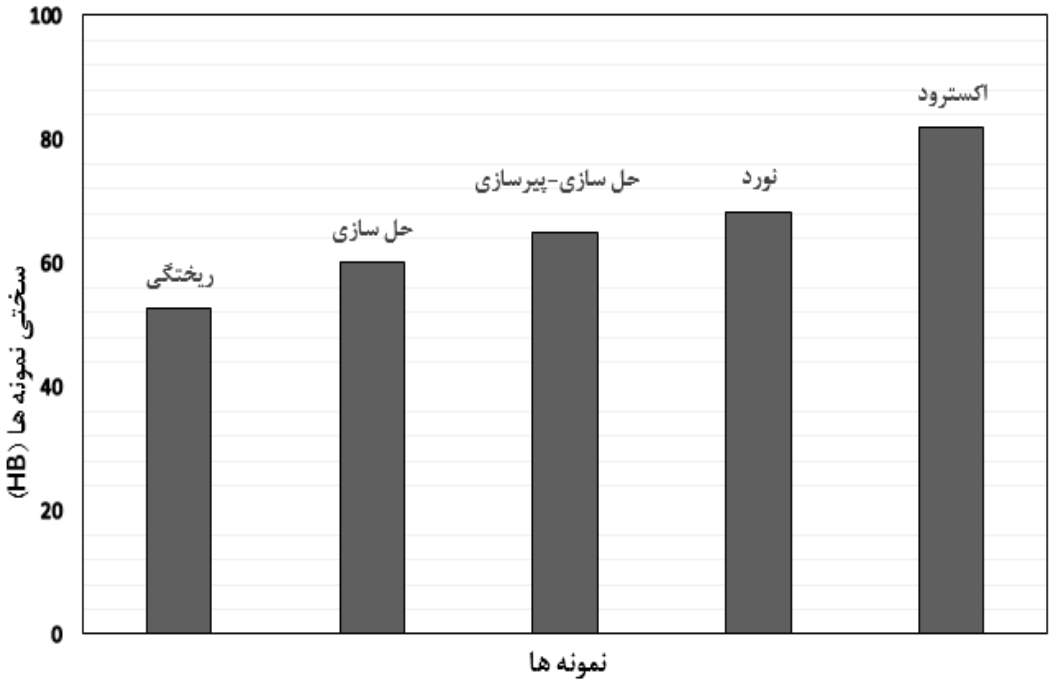
این امر به‌واسطه انجام فرآیند کارگرم و متعاقب آن کاهش اندازه دانه قابل پیش‌بینی بود. در میان نمونه‌های ریختگی، حل‌سازی و حل‌سازی-پیرسازی، نمونه حل-سازی- پیرسازی با 65HB بیش‌ترین سختی را دارد که این مهم به دلیل رسوب فاز γ و ریز دانه شدن ساختار آلیاژ می باشد.

آزمون کشش

آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM-E8 و برای هر آزمایش ۲ نمونه آماده سازی شدند. سپس نمونه‌ها توسط دستگاه Zwick Zc50 با ظرفیت ۵۰ تن که به اکستنسومیتر دقیق مجهز بود، با نرخ کرنش 1mm/min آزمایش شدند. در ادامه نمودارهای تنش –کرنش مهندسی نمونه‌ها رسم گردید. مطابق جدول ۴ نتایج استحکام تسلیم، استحکام نهایی، درصد کرنش و مدول الاستیک به‌دست آمد. در شکل ۶، مقدار استحکام نهایی برای ۵ نمونه مقایسه شده است.

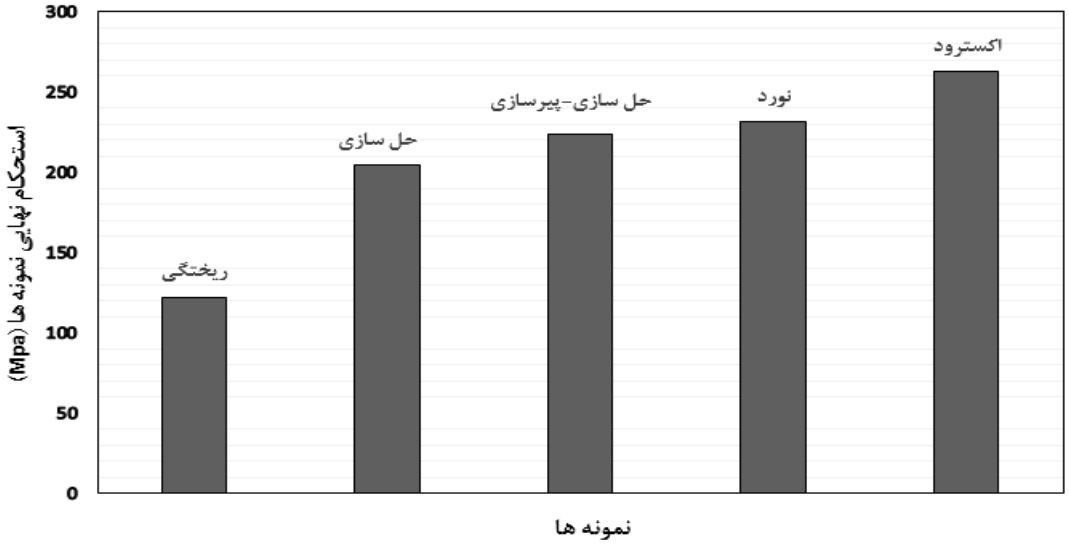
بررسی آزمون ارتعاش

میرایی، یکی از خواص فیزیکی و مکانیکی مواد محسوب می‌شود و هر چه میرایی بیش‌تر باشد، می‌توان آن ماده را به عنوان ماده‌ای با خواص ارتعاشی مناسب معرفی نمود و میزان جذب ارتعاشات آن نیز بیش‌تر خواهد بود، به‌طوری که هر چه میزان دامنه نوسان (در حوزه زمان یا در حوزه فرکانس) کم‌تر باشد، ماده از خاصیت ارتعاشی بهتری برخوردار است. پس از آزمایش آنالیز مودال، مقدار دامنه برای نمونه‌ها ثبت گردید. در این آزمایش به‌دلیل شناسایی فرکانس رزونانس و دامنه مربوطه و خروجی دستگاه آنالیزور، از دامنه بی بُعد استفاده شده است. مقدار دامنه برای نمونه مورد آزمایش در شکل ۷، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کلیه قطعات در بازه فرکانسی 228-236Hz دارای بیش‌ترین دامنه می‌باشند. فرکانس‌های طبیعی نمونه‌ها در جدول ۵، نشان داده شده است. با توجه به اختلاف مدول الاستیک نمونه‌ها، فرکانس‌ها و مقدار دامنه آن‌ها نیز با یکدیگر متفاوت می‌باشند.

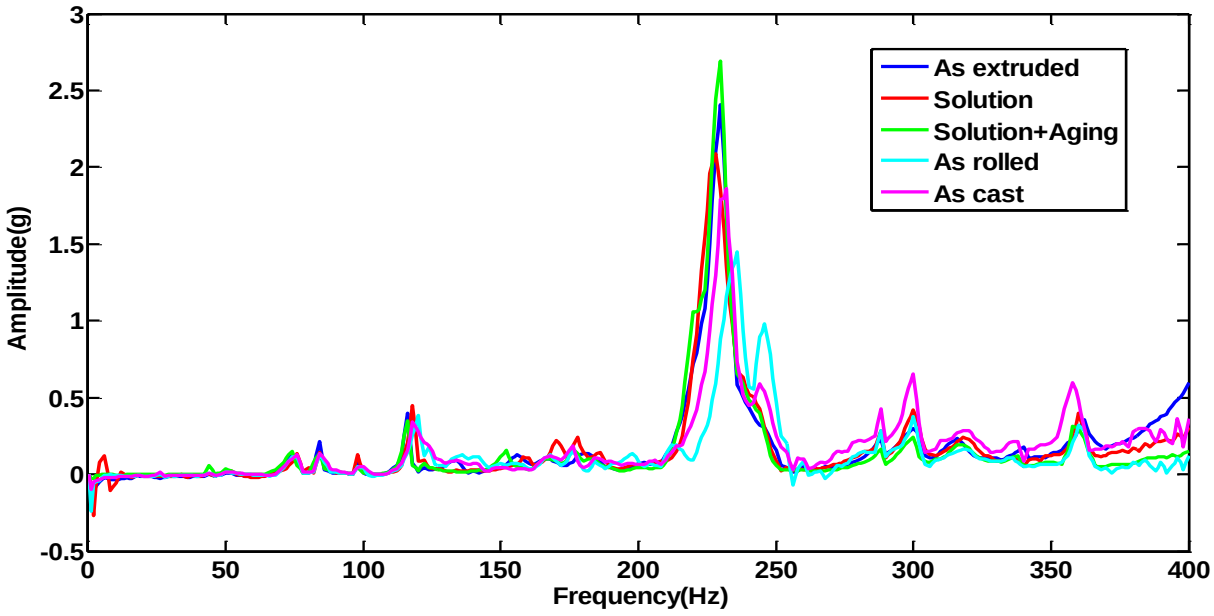


شکل ۵- مقایسه نمودار ستونی سختی نمونه‌ها

www.SID.ir



شکل ۶- مقایسه نمودار ستونی استحکام نهایی نمونه‌ها



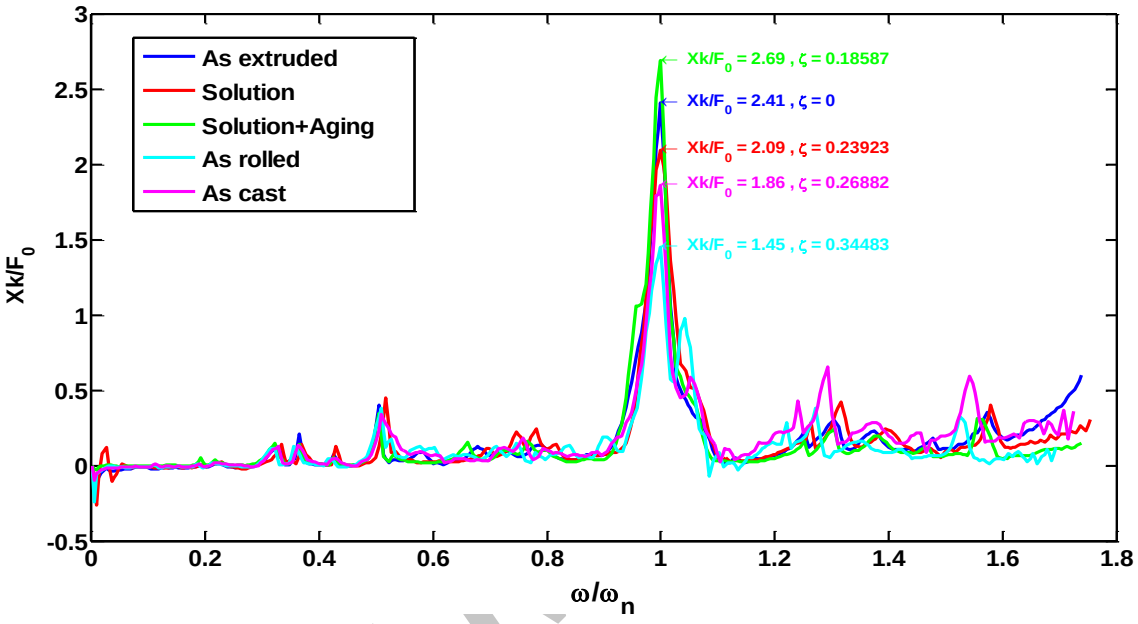
شکل ۷- نمودار فرکانسی نمونه‌ها

دامنه و زاویه فاز نمونه‌ها بر حسب فرکانس طبیعی، در حالت بدون بعد به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹، رسم شده‌اند. نمونه نورد شده بهترین پاسخ فرکانسی را در فرکانس اعمالی داده است. نمونه ریختگی به دلیل حرکت آسان نابجایی‌ها بعد از نمونه نورد بهترین دامنه را دارد و بعد از آن‌ها نمونه حل‌سازی، اکسترود و حل‌سازی-پیرسازی دارای دامنه‌های ثبت شده بالاتری می‌باشند.

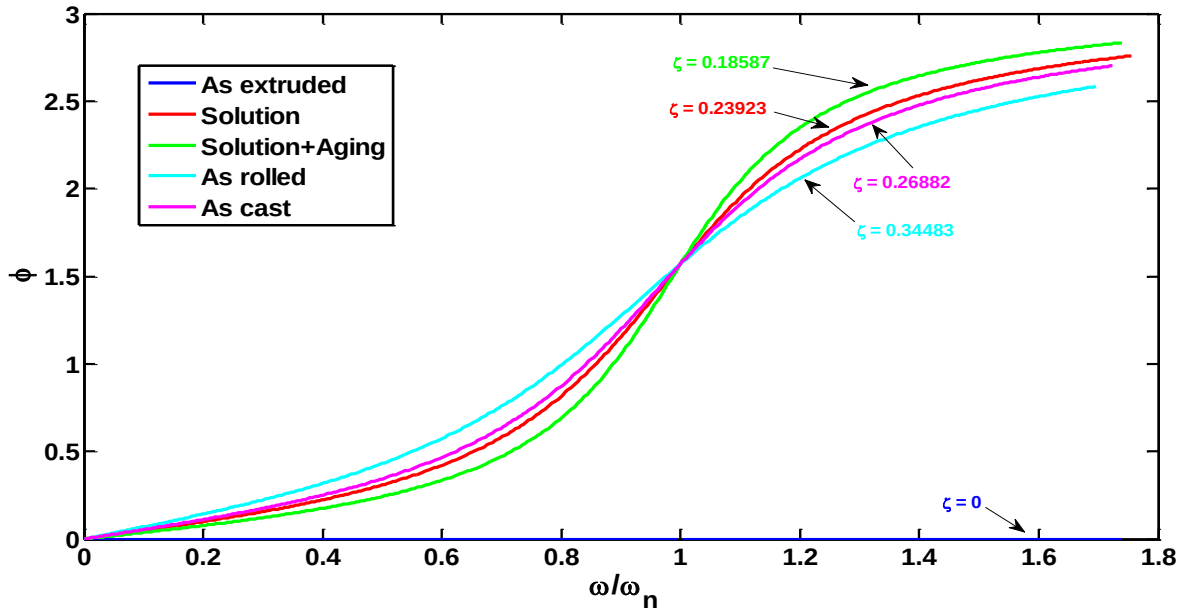
مطابق شکل ۱۰ و همان‌گونه که قبلا اشاره شد، احتمالا به دلیل رسوب فاز γ در ریزساختار نمونه حل-سازی-پیرسازی و قفل شدن نابجایی‌ها، توانایی میرایی ارتعاشات اعمالی به خوبی نمونه ریختگی نمی‌باشد. در

www.SID.ir

نمونه اکسترود نیز احتمالا به‌دلیل ریز دانه‌شدن و تکثیر نابجایی‌ها، ساختاری با نابجایی‌های در هم پیچیده ایجاد شده که میرایی ارتعاشات برای این نمونه به خوبی نمونه ریختگی امکان پذیر نیست. با توجه به انتخاب دمای 350°C به‌عنوان دمای کار گرم بحرانی، بنابراین در نمونه اکسترود شده درصد کارگرم از درصد کارگرم بحرانی (۲ الی ۲۰ درصد کارگرم) تجاوز نموده است؛ اما نمونه نورد شده به دلیل اینکه از درصد کار گرم بحرانی تجاوز نکرده احتمالا نابجایی‌ها شروع به تکثیر نکرده‌اند و صرفا دانه‌ها ریزتر شدند که منجر به افزایش خواص مکانیکی شده است و به‌دلیل اینکه بعد از عملیات نورد تبلور مجدد صورت گرفته، انرژی کرنش به‌وسیله حرکت نابجایی‌ها گرفته شده است. در این نمونه به‌دلیل حرکت آسان نابجایی‌ها بهترین پاسخ میرایی دریافت شده است.

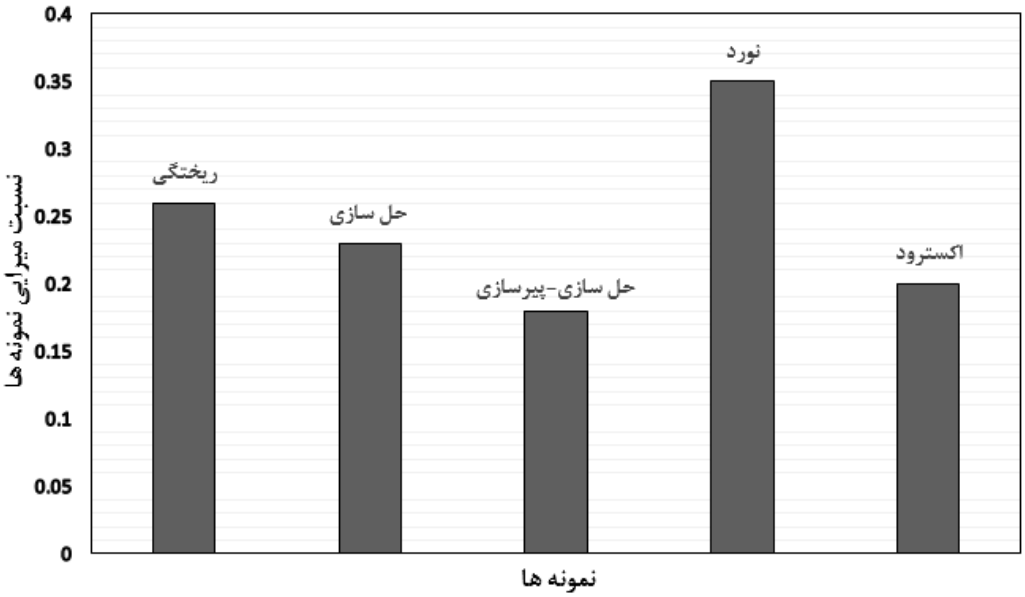


شکل ۸- نمودار دامنه‌های بی بعد بر حسب نسبت فرکانس‌ها



شکل ۹- نمودار زاویه فاز نمونه‌ها بر حسب نسبت فرکانس‌ها

www.SID.ir



شکل ۱۰- مقایسه نمودار ستونی مربوط به مقادیر نسبت میرایی نمونه‌ها

نتیجه گیری

۱- فاز γ- $Mg_{17}Al_{12}$ در آلیاژ ریختگی AZ91 یک فاز دندریتی ترد می‌باشد که اثرات مخربی بر روی خواص مکانیکی آلیاژ می‌گذارد. بررسی‌های متالوگرافی و مکانیکی نیز حضور چنین فازی را نشان می‌دهد.

۲-حل شدن فاز مخرب γ- $Mg_{17}Al_{12}$ در مرزدانه‌های زمینه α-Mg باعث تبدیل این فاز به یک محلول جامد فوق اشباع در دمای محیط می‌شود. بنابراین رشد دانه و همگن شدن فازα-Mg منجر به افزایش انعطاف پذیری نمونه گردید.

۳-عملیات اکسترود و نورد، باعث ریزدانه شدن آلیاژ به‌واسطه کارگرم و تبلور دینامیکی شد که این امر منجر به افزیش خواص مکانیکی گردید. ولیکن در فرآیند اکستروژن به‌دلیل درصد کارگرم بیش‌تر و تکثیر نابجائی‌ها و درهم پیچیدگی آن‌ها، نمونه توانایی میرایی فرکانس اعمالی را نداشت؛ اما آلیاژ ریختگیAZ91 نورد شده بهترین پاسخ از آزمون‌های مکانیکی و ارتعاشی را داده است و می‌توان از آن به عنوان یک آلیاژ بهینه شده از خواص مکانیکی و ارتعاشی بهره جست.

۴- آلیاژ ریختگی AZ91 به‌دلیل حرکت آسان نابجایی‌ها توانایی بالایی در میرایی ارتعاشات دارد. آنالیز مودال نیز این امر را به‌وضوح پوشش می‌دهد؛ زیرا در این حالت نسبت میرایی ۰/۲۶ بوده و از نمونه نورد شده پایین‌تر می‌باشد.

۵- رشد دانه و همگن شدن فاز α-Mg در نمونه حل‌سازی منجر به افزایش انعطاف پذیری نمونه شد. پاسخ میرایی آلیاژ در حدود ۰/۲۳ و بالاتر از نمونه پیرسازی شده به‌دست آمد.

۶-افزایش زمان پیرسازی منجر به قفل شدن نابجایی‌ها و افزایش خواص مکانیکی نمونه گردید. استحکام کششی و سختی به ترتیب 223MPa و 68HB محاسبه شد. افزایش خواص مکانیکی این نمونه نسبت به دو نمونه ریختگی و حل‌سازی شده با کاهش میرایی این نمونه همراه بود به‌گونه‌ای که کم‌ترین مقدار ثبت شده (۰/۱۸) متعلق به آلیاژ پیرسازی شده می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

References:

۱-رأفتی، ج.، خوشخویی، ش.، خمامی‌زاده، ف.،حنایی، ک.، " تاثیر عملیات حرارتی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ AZ91"، فصلنامه علمی پژوهشی شریف. ۳۲، ۴۱،-۴۸، (۱۳۸۴).

2-LI Jing-yuan , XIE Jian-xin , JIN Jun-bing , WANG Zhi-xiang , " Microstructural Evolution of AZ91 Magnesium Alloy During Extrusion and Heat Treatment" , Trans. Nonferrous Met. Soc. China , Vol. 22 , pp.1028-1034, 2012 .

3-Jinghuai,Zhang,XiaodongNiua,XinQiua, KeLiua,ChangmingNanc,DingxiangTanga, JianMenga. " Effect of yttrium-rich MischMetal on the Microstructures, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Die cast AZ91 Alloy", Shanxi WenxiYinguang Magnesium Group, Shanxi.

4-Ming Tan , Zhaoming Liu , GaofengQuan ," Effects of Hot Extrusion and Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructures of AZ91 Magnesium Alloy " ,Energy Procedia, Vol. 16, pp.457-460, 2012.

5-CHEN Xian-hua, MAO Jian-jun, PAN Fu-sheng,PENGJian, WANG Jing-feng , "Influence of Impurities on Damping Properties of ZK60 Magnesium Alloy", Trans. Nonferrous Met. Soc. China , Vol. 20, pp.1305-1310, 2011.

6-WANG Jing-feng, GAO Shan, ZHAO Liang, LIANG Hao,HU Yao-bo, PAN Fu-sheng, "Effects of Y on Mechanical Properties and Damping Capacity of ZK60 Magnesium Alloys" , Physics, Mianyang 621900, China .

7-L.A. Dobrzanski , T. Tanski , L. Cizek , Z. Brytana , "Structure and Properties of Magnesium cast Alloys", Journal of Materials Processing Technology , Vol. 192, pp. 567–574, 2007.

8-ZHANG Zhen-yan, PENG Li-ming, ZENG Xiao-qin, DING Wen-jiang, "Effects of Cu and Mn on mechanical properties and damping capacity of Mg-Cu-Mn alloy" Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 18, pp.55-58, 2008.

9-Zhenyan Zhang, Xiaoqin Zeng∗, Wenjiang Ding, "The influence of heat treatment on damping response of AZ91D magnesium alloy", Materials Science and Engineering A, Vol. 392, pp. 150-155, 2005.

10-HU Xiao-shi, HE Xiao-dong, ZHENG Ming-yi, WU Kun, "Effect of small tensile deformation on damping capacities of Mg-1%Al alloy", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 20, pp. 444-447, 2010.

۱۱-بیات ترک، ن.، پردیس، ن.، ابراهیمی، ر.، " بررسی قابلیت تغییر شکل منیزیم خالص و آلیاژ AZ91، در دمای پایین با کاربرد فرآیند اکستروژن برشی ساده "، مجله علمی پژوهشی مواد نوین. جلد ۱. شماره ۲. (۱۳۸۹).

۱۲-حیدر حسنی، غ.، محمودی، ر.، "معادله بنیادی تغییر شکل گرم ورق منیزیمی Mg-4Sn-1Ca"، مجله علمی پژوهشی مواد نوین. جلد ۵. شماره ۲. (۱۳۹۳).

۱۳- ح. ر. عابدی، ع. زارعی هنزکی، ع. و س. م. سید محمود فاطمی ورزنه، " اثر عملیات همگن سازی بر رسوبات Mg17Al12 در آلیاژ Mg-3Al-Zn"، نهمین سمینار مهندسی سطح و عملیات حرارتی ایران، (۱۳۷۸).

Archive of SID

www.SID.ir