

تأثیر پارامترهای ریخته‌گری بر خواص مکانیکی و سلامت قطعات هوافضایی از آلیاژ A356 به‌روش ریخته‌گری دقیق

علی نعمتی^۱، ایوب حلوائی^۲، ایمان مباشرپور^۳ و احمدرضا عباسیان^۴

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۲- استادیار، دانشگاه تهران، دانشکده متالورژی و مواد

۳- کارشناسی ارشد، پژوهشگاه مواد و انرژی

۴- کارشناسی ارشد، پژوهشگاه مواد و انرژی

Ahmadabbasian@gmail.com

چکیده

در این پژوهش تأثیر سه متغیر گاززدایی مؤثر در ریخته‌گری دقیق بر خواص مکانیکی و سلامت قطعات، مورد بررسی قرار گرفته است. قطعه مورد بررسی یکی از قطعات هوایی موسوم به لولا می‌باشد که از نظر کلاس‌بندی قطعات هوایی درجه A₁ را به‌خود اختصاص داده و به‌دلیل پیچیدگی شکل ظاهری و کیفیت بالای مورد نیاز به‌روش ریخته‌گری دقیق و از جنس آلیاژ آلومینیوم A356 تولید می‌گردد. متغیرهای در نظر گرفته شده شامل مدت زمان دمش گاز آرگون، دمای مذاب در حین گاززدایی و دبی گاز آرگون بوده است. پس از انجام عملیات آماده‌سازی قالب و تهیه مدل مومی، قطعات ریخته‌گری شده و مورد عملیات حرارتی قرار گرفتند. در نهایت قطعات به‌دست آمده مطابق با استانداردهای هوایی و با توجه به کلاس قطعات، مورد آزمایش‌های کنترل کیفی مانند رادیوگرافی، بررسی ابعادی، آزمایش کشش، سختی‌سنجی، بازرسی با مایع نافذ و همچنین آنالیز شیمیایی قرار گرفته و در نهایت بهترین حالت از متغیرهای گاززدایی به‌منظور رسیدن به بهترین کیفیت تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی

ریخته‌گری دقیق، آلیاژ آلومینیوم A356، متغیرهای ریخته‌گری، خواص مکانیکی

۱- مقدمه

استحکام بالا بسیار مناسب است [۱]. این آلیاژ به‌طور گسترده‌ای برای قطعات مختلف خودرو به کار گرفته می‌شود [۲]. اخیراً آلیاژ A356 به دلیل وزن سبک، قابلیت

آلیاژ آلومینیوم A356 حاوی حدود ۷ درصد سیلیسیم به‌دلیل سیالیت عالی مذاب و نیز قابلیت کسب استحکام بسیار بالا، ناشی از اثر پیر سخت‌شوندگی فاز، جهت ریخته‌گری آلیاژهای

جدول (۱): زمان بندی عملیات موم زدایی قالب سرامیکی

حالت	دبی گاز آرگون (L/h)	مدت زمان دمش گاز آرگون (min)	درجه حرارت مذاب حین گاز زدایی (°C)
۴	۸۰	۶	۷۲۵
۵	۸۰	۸	۷۲۵
۶	۸۰	۱۰	۷۲۵
۷	۴۰	۶	۷۵۰
۸	۴۰	۸	۷۵۰
۹	۴۰	۱۰	۷۵۰

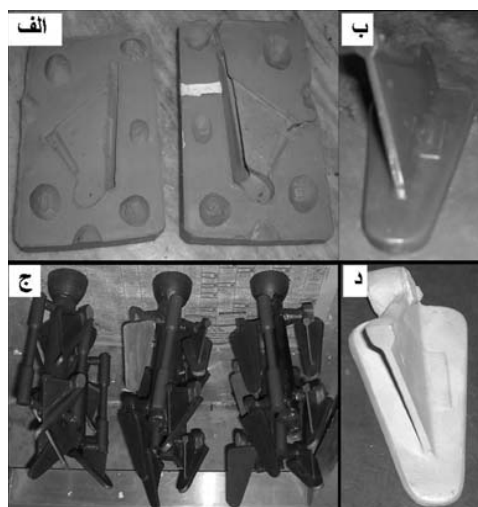
دما (°C)	۶۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۳۰
زمان (hr)	۲	۱/۳۰	۱	۱

جدول (۲): زمان بندی عملیات پخت قالب سرامیکی

دما (°C)	۳۰۰	۳۸۰	۴۶۰	۵۶۰	۶۶۰	۷۳۰
زمان (h)	۱	۱/۱۵	۱	۱/۳۰	۱	۲

۲- روش تحقیق

جهت انجام تحقیق، قالب قطعه لولا (Hinge) از سیلیکن نسوز و مدل مومی از موم زنبوری با نقطه ذوب 75°C ساخته شد. سپس عملیات خوشه کردن مدل های مومی انجام پذیرفت. در این مرحله با طراحی سیستم راه گاهی مناسب، نمونه های مومی توسط راه گاه فرعی به راه گاه اصلی وصل شدند، خوشه های به کار رفته در این تحقیق شامل ۴ قطعه لولا و ۲ نمونه کششی می باشند. شکل (۱). برای تهیه قالب سرامیکی از گچ پاریس (CaSO_4) با نسبت گچ به آب ۶۵ به ۳۵ استفاده گردید. عملیات موم زدایی و پخت مطابق با برنامه ذکر شده در جدول های (۱) و (۲) انجام شد. در مرحله ریخته گری به منظور بررسی تأثیر مدت زمان دمش گاز آرگون بر خواص مکانیکی قطعات ریخته گری، سه حالت در نظر گرفته شد که مشخصات این حالات در جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل (۱): الف) قالب سیلیکنی قطعه لولا ب) مدل مومی قطعه لولا

ج) خوشه های قطعه لولا و نمونه آزمایش کششی

د) نمونه فلزی لولا

جوش کاری و مقاومت به خوردگی بسیار عالی، جهت ساخت قطعات هوایی مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. آلیاژهای آلومینیوم که برای قطعات هوایی به کار می روند باید ساختار متالورژیکی عالی و مقاومت به شکست مناسب و همچنین وزن و قیمت کم داشته باشند [۴ و ۵]. با استفاده از فرآیند ریخته گری دقیق می توان قطعات پیچیده را تولید کرد. بیشترین کاربرد این روش در هواپیما سازی و صنایع هوافضا می باشد و برای تولید پره های توربین و ریخته گری سوپر آلیاژهای پایه نیکل و کبالت نیز به کار می رود [۶].

با توجه به حساسیت بالای قطعات هوایی، به خصوص قطعات کلاس A_1 ، به منظور یاری رسانی به صنعت هوایی کشور با ساخت قطعه لولا (Hinge) از جنس آلیاژ آلومینیوم A356 در کلاس A_1 به روش ریخته گری دقیق، به بررسی اثر برخی عوامل موثر در ریخته گری دقیق بر روی کیفیت نهایی قطعه تولید شده پرداخته شد.

جدول (۳): مشخصات حالات ریختگی انجام شده به منظور

بررسی تأثیر عنصر منیزیم

حالت	مدت زمان دمش گاز آرگون (min)	درجه حرارت مذاب حین گاززدایی (°C)
۱	۶	۷۲۵
۲	۸	۷۲۵
۳	۱۰	۷۲۵

جدول (۴): حالات ریخته‌گری به منظور بررسی تأثیر متغیرهای

گاززدایی بر خواص مکانیکی و سلامت قطعات

حالت	دبی گاز آرگون (L/h)	مدت زمان دمش گاز آرگون (min)	درجه حرارت مذاب حین گاززدایی (°C)
۴	۸۰	۶	۷۲۵
۵	۸۰	۸	۷۲۵
۶	۸۰	۱۰	۷۲۵
۷	۴۰	۶	۷۵۰
۸	۴۰	۸	۷۵۰
۹	۴۰	۱۰	۷۵۰

به منظور بررسی تأثیر دبی گاز آرگون و درجه حرارت مذاب حین گاززدایی بر خواص مکانیکی و سلامت قطعات، شش حالت مختلف در نظر گرفته شد که مشخصات این حالات در جدول (۴) ذکر گردیده است. در حین ورود مذاب به قالب پمپ خلاء روشن شده و اختلاف فشاری حدود ۲۰ kpa تا ۲۵ kpa تا پایان ریخته‌گری اعمال گردید. بعد از جدا کردن قطعات از راه‌گاه و عملیات ماسه پاشی (Sand blast) طبق استاندارد BPS 4139 عملیات حرارتی T6 روی نمونه‌ها انجام گردید. ترتیب آزمایش‌های متالورژیکی بر روی قطعه لولا (Hinge) به صورت ذیل بوده است:

۴- آزمایش سختی سنجی: قطعات پس از عملیات حرارتی T6، مطابق با استاندارد ASTM E10 و توسط دستگاه سختی‌سنج برینل با قطر ساچمه ۲/۵ mm و مقدار نیروی ۶۲/۵ kg مورد آزمایش قرار گرفتند.

۵- آزمایش با مایع نافذ: قطعات پس از سختی‌سنجی طبق استاندارد B PS FW 4089 مورد بازرسی با مایع نافذ قرار گرفتند.

۶- آزمایش کشش: نمونه‌های کششی با توجه به استاندارد ASTM E8 تهیه شده و توسط دستگاه INSTRON300KN 4486 مورد آزمایش کشش قرار گرفتند.

۷- بررسی ساختار میکروسکوپی: به منظور بررسی ساختار میکروسکوپی قطعات ریختگی، قسمتی از یک قطعه لولا را بریده و پس از سنباده‌زنی نرم و پرداخت کاری سطح نمونه توسط محلول کلر حکاکی شد. در نهایت ساختار نمونه توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و مباحث

آنالیز قطعات سه حالت اولیه مربوط به بررسی مدت زمان دمش گاز آرگون به ترتیب در جدول‌های (۷)، (۸) و (۹) نشان داده است.

۱- آنالیز شیمیایی: طبق دستورالعمل تولید (PWO) قطعه لولا، از هر ذوب یک نمونه انتخاب شده و توسط کوانتومتر آنالیز گردید.

۲- بررسی ابعادی: قسمت‌های مختلف قطعات ریختگی مانند، گوشه‌ها، پخ‌ها و زاویه‌ها با توجه به نقشه مربوطه و به کمک لوازم اندازه‌گیری مانند کولیس، شعاع سنج و غیره مورد بررسی قرار گرفت.

۳- آزمایش رادیوگرافی (X-Ray): آزمایش رادیوگرافی با توجه به جدول (۵) که تعداد عیوب مجاز در درجه‌های (Grades) مختلف را نشان می‌دهد و جدول (۶) که محدوده ناپیوستگی‌های غیرخطی از قبیل حفره‌های گازی، تخلخل و حفره‌های ماسه‌ای را نشان می‌دهد و برطبق استاندارد BPS FW 4309 و توسط دستگاه Philips 450kv انجام گردید.

جدول (۵): حداکثر تعداد مجاز عیوب ناپیوستگی در رادیوگرافی قطعه ریخته‌گری آلومینیم [۷].

ناپیوستگی‌ها	GradA (Inch)		GradB (Inch)		GradC (Inch)		GradD (Inch)	
	1/4	3/4	1/4	3/4	1/4	3/4	1/4	3/4
حفره‌های گازی	هیچ		۱	۱	۲	۲	۵	۵
تخلخل گازی (گرد)	هیچ		۱	۱	۳	۳	۷	۷
تخلخل گازی (باریک)	هیچ		۱	۲	۳	۴	۵	۵
حفره‌های انقباضی	هیچ		۱	۲	۲	۲	۳	۲
انقباض اسفنجی	هیچ		۱	۱	۲	۲	۴	۳
مواد خارجی (با چگالی کمتر)	هیچ		۱	۱	۲	۲	۴	۴
مواد خارجی (با چگالی بیشتر)	هیچ		۱	۱	۲	۱	۴	۳
ترک‌ها	هیچ		هیچ		هیچ		هیچ	
بسته‌شدن سرد	هیچ		هیچ		هیچ		هیچ	
ناهمواری سطحی	از تلورانس طراحی تجاوز نمی‌کند							
جابه‌جایی ماهیچه‌ها	از تلورانس طراحی تجاوز نمی‌کند							

جدول (۶): محدوده مجاز ناپیوستگی‌های غیر خطی [۸].

Area	Major Diameter	Depth Maximum	Maximum Number
Critical	020InchMax	020Inch	4/1Inch sq
	021-060Inch	020Inch	1/1 Inch sq
Non-critical	030InchMax	030Inch	8/1 Inch sq
	031-125Inch	030Inch	1/1 Inch sq

قرار گرفته و نتایج آن در جدول (۱۰) نشان داده شده‌است. همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌شود با افزایش مدت زمان دمش گاز آرگون، استحکام تسلیم و نهایی قطعات کاهش یافته‌است. به نظر می‌رسد که این کاهش استحکام به دلیل سوختن عنصر منیزیم در دمای فوق‌گداز می‌باشد. با توجه به اینکه فاز رسوبی در عملیات حرارتی T_6 ، فاز Mg_2Si است و عنصر منیزیم یکی از عناصر اصلی این فاز می‌باشد، بنابراین کاهش منیزیم، تأثیر قابل توجهی در خواص مکانیکی قطعات داشته و کاهش در استحکام تسلیم و نهایی را باعث می‌شود.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از آنالیز قطعات سه حالت اولیه، می‌توان دریافت که افزایش مدت زمان دمش گاز آرگون به علت ماندن طولانی مذاب در دمای بالا باعث سوختن بیشتر عنصر منیزیم شده و کاهش این عنصر افت خواص مکانیکی را در پی خواهد داشت. دلیل تأثیر این عنصر بر خواص مکانیکی، تشکیل فاز رسوبی Mg_2Si بعد از عملیات حرارتی می‌باشد که موجب افزایش سختی و خواص مکانیکی آلیاژ می‌گردد.

الف- تأثیر مدت زمان دمش گاز آرگون بر خواص مکانیکی قطعات ریختگی

به‌منظور بررسی تأثیر مدت زمان دمش گاز آرگون بر خواص مکانیکی قطعات ریختگی حالت‌های (۴)، (۵) و (۶) مورد بررسی

جدول (۹): نتیجه آزمایش کوانتومتری قطعه لولا در حالت ۳ (درصد وزنی)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg
۶/۷۰	۰/۳۴	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۱۵
Cr	Ti	Al		
۰/۰۱	۰/۰۶	Base		

همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود با افزایش مدت دمش گاز آرگون، استحکام قطعات ریختگی مانند سه حالت قبل کاهش یافته است که به نظر می‌رسد این کاهش استحکام نیز به دلیل سوختن منیزیم می‌باشد. در این مرحله نیز علی‌رغم روند کاهشی استحکام، عدد استحکام قطعات در محدوده استاندارد بوده و نمونه‌ها مورد تایید می‌باشند. نمودار شکل (۷) سختی قطعات ریختگی حالت‌های (۷)، (۸) و (۹) را نشان می‌دهد که اعداد سختی در محدوده استاندارد می‌باشند.

ب- تأثیر مدت زمان دمش گاز آرگون بر سلامت قطعات ریختگی

مجموع شکل‌های (۸) سلامت قطعات در حالات مختلف را نشان می‌دهد. در جدول‌های (۱۰) و (۱۱) تعداد مک موجود در قطعات در حالت‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با ۸ دقیقه گاززدایی قطعات سالم و بدون مک می‌باشند ولی با ۶ دقیقه دمش گاز آرگون، مدت زمان گاززدایی کافی نبوده و قطعه دارای یک مک بوده است و با ۱۰ دقیقه گاززدایی نیز از مدت زمان بهینه فاصله گرفته و زمان اضافی صرف انحلال دوباره گاز هیدروژن در مذاب شده است و قطعات حاوی ۳ و ۲ مک بوده‌اند.

شکل‌های (۱-۸)، (۲-۸)، (۳-۸) و (۴-۸) تصویر رادیوگرافی قطعات ریختگی معیوب حالت‌های (۴)، (۶)، (۷) و (۹) را به ترتیب نشان می‌دهد.

جدول (۷): نتیجه آزمایش کوانتومتری قطعه لولا در حالت ۱ (درصد وزنی)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg
۷/۲۷	۰/۲۵	۰/۰۰۳	۰/۰۳	۰/۴۵
Cr	Ti	Al		
۰/۰۰۸	۰/۰۴	Base		

جدول (۸): نتیجه آزمایش کوانتومتری قطعه لولا در حالت ۲ (درصد وزنی)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg
۷/۲۰	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۲۶	۰/۳۰
Cr	Ti	Al		
۰/۰۱	۰/۰۳	Base		

با توجه به استاندارد QQ-A-601F که حداقل استحکام تسلیم قطعات را ۲۰/۰۰۰ psi و حداقل استحکام نهایی قطعات را ۳۰/۰۰۰ psi در نظر گرفته است، حالت‌های (۴) و (۵) از نظر استحکام مورد تایید ولی حالت (۶) از نظر استحکام نهایی کمتر از حد استاندارد می‌باشد.

نمودار شکل (۴) سختی قطعات ریختگی در این سه حالت را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید با افزایش مدت زمان گاززدایی، سختی قطعات تغییر محسوسی نداشته و با توجه به جدول (۷) در استاندارد QQ-A-601F که حداقل سختی قطعات را ۷۵ برینل تعیین کرده است، عدد سختی در محدوده استاندارد بوده و قطعات مورد تایید می‌باشند.

با توجه به نتایج به دست آمده از حالت‌های (۴)، (۵) و (۶) و به منظور بررسی بیشتر تأثیر مدت زمان گاززدایی بر خواص مکانیکی سه حالت (۷)، (۸) و (۹) در نظر گرفته شد که نتایج آن در جدول (۱۱) آورده شده است.

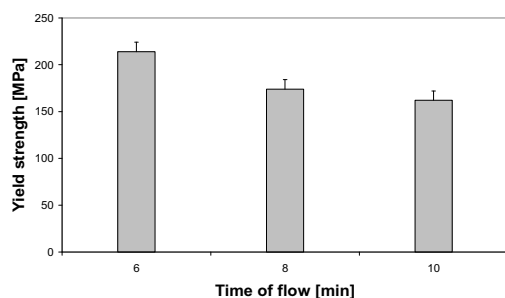
در این مرحله با تغییر دبی گاز آرگون و درجه حرارت مذاب هنگام گاززدایی نسبت به حالت‌های (۴)، (۵) و (۶)، تأثیر مدت زمان گاززدایی بر خواص مکانیکی قطعات ریختگی مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول (۱۰): نتایج به دست آمده از تأثیر پارامترهای مؤثر بر گاززدایی در حالت‌های (۴)، (۵) و (۶)

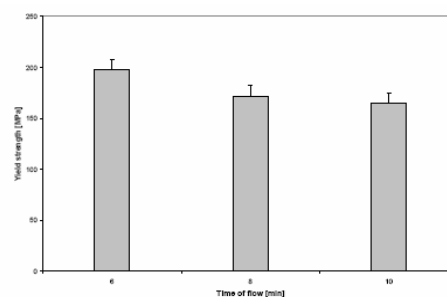
تعداد مک	عدد سختی (HB)	استحکام نهائی (Psi)	استحکام تسلیم (Psi)	حالت
۱	۱۰۳	۳۱۸۰۰ (۲۲۰)	۲۸۶۲۰ (۱۹۸)	۴
۰	۱۰۱	۳۰۴۸۰ (۲۱۱)	۲۴۸۵۰ (۱۷۲)	۵
۲	۱۰۶	۲۹۳۴۰ (۲۰۳)	۲۳۹۰۰ (۱۶۵)	۶

جدول (۱۱): نتایج به دست آمده از تأثیر پارامترهای مؤثر بر گاززدایی در حالت‌های (۷)، (۸) و (۹)

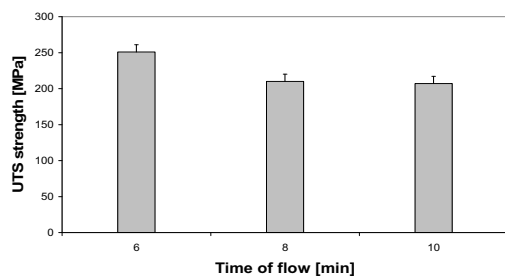
تعداد مک	عدد سختی (HB)	استحکام نهائی (Psi)	استحکام تسلیم (Psi)	حالت
۱	۹۵	۳۶۳۸۰ (۲۵۱)	۳۱۰۰۰ (۲۱۴)	۷
۰	۱۰۱۹۸	۳۰۳۵۰ (۲۱۰)	۲۵۱۵۰ (۱۷۴)	۸
۳	۱۰۶۱۰۱	۳۰۰۰۰ (۲۰۷)	۱۳۶۰۰ (۱۶۲)	۹



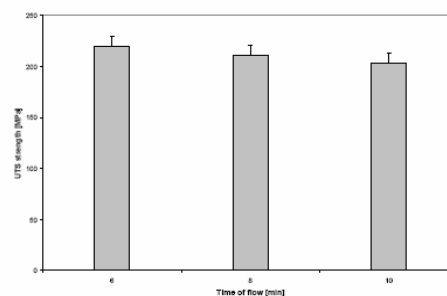
شکل (۵): نمودار استحکام تسلیم قطعات ریخته‌گری حالت‌های ۷، ۸ و ۹



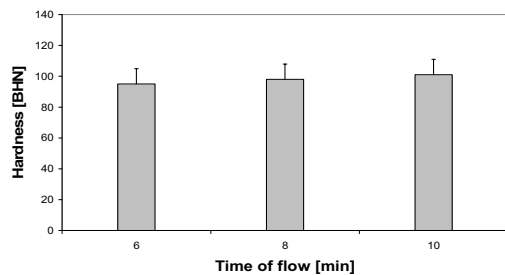
شکل ۲: نتایج استحکام تسلیم ریخته‌گری حالت‌های ۴ و ۵ و ۶



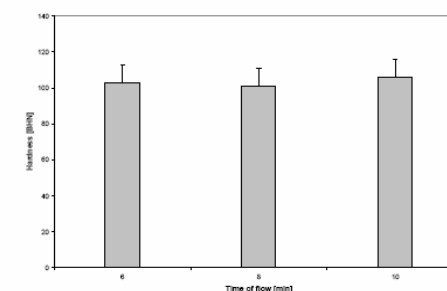
شکل (۶): نمودار استحکام نهایی قطعات ریخته‌گری حالت‌های ۷، ۸ و ۹



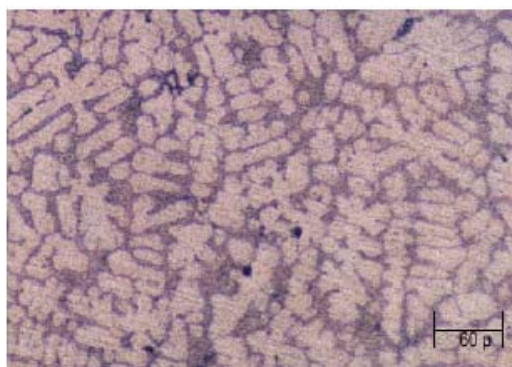
شکل ۳: نتایج استحکام نهایی ریخته‌گری حالت‌های ۴ و ۵ و ۶



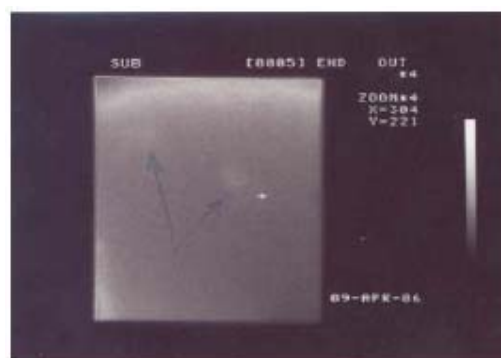
شکل (۷): نمودار سختی قطعات ریخته‌گری حالت‌های ۷، ۸ و ۹



شکل ۴: نتایج تست سختی قطعات ریخته‌گری حالت‌های ۴ و ۵ و ۶



شکل (۹): تصویر میکروسکوپی نمونه Hinge با بزرگنمایی ۵۰



شکل (۸-۳): تصویر رادیوگرافی قطعه حالت (۷) ریخته‌گری



شکل (۱۰): تصویر میکروسکوپی نمونه Hinge با بزرگنمایی ۵۰۰



شکل (۸-۴): تصویر رادیوگرافی قطعه حالت (۹) ریخته‌گری

بررسی ساختار میکروسکوپی:

در مرحله نهایی به منظور بررسی ساختار تشکیل شده در قطعات ریختگی، بعد از عملیات حرارتی نمونه‌ها مورد آزمایش متالوگرافی و بررسی ساختاری قرار گرفتند.

همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود، بعد از انجام عملیات حرارتی، فاز ناشی از تحول یوتکتیک تشکیل شده است. می‌توان گفت در ساختار مشاهده شده، ذرات میله‌ای شکل روشن و تیره که در کنار هم قرار گرفتند مربوط به تحول یوتکتیک است و این ساختار به حالت سوزنی نزدیک می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به پارامترهای موجود و نتایج به دست آمده می‌توان گفت باید توجه داشت پارامترهای گاززدایی را باید به نحوی کنترل

تأثیر دبی گاز آرگون بر خواص مکانیکی قطعات ریختگی:

با توجه به اینکه تغییرات دمای مذاب در حین گاززدایی در مراحل در نظر گرفته شده ناچیز است. می‌توان تأثیر دبی گاز آرگون بر خواص مکانیکی قطعات را مورد بررسی قرار داد. نتایج حاکی بر این است که استحکام قطعات حالت‌های (۴)، (۵) و (۶) کمتر از حالت‌های (۷)، (۸) و (۹) می‌باشد، که این می‌تواند به دلیل اعمال دبی ۸۰ لیتر بر ساعت در این مرحله باشد که در واقع دبی ۲ برابر شده است. دبی زیاد باعث تلاطم در ذوب شده، که این تلاطم انحلال گاز هیدروژن در مذاب را افزایش می‌دهد و در نتیجه گاززدایی به خوبی انجام نشده و به دلیل احتمال وجود مک، استحکام قطعات کاهش می‌یابد.

- [3] I.J. Pomear, Light Alloys, Edward Arnold, London, p. 144, 1988.
- [4] S. Kennerknecht, X. Dumant, R. Tombari, P. Van Biljon, "The Effect of Processing Parameters on the Fatigue Properties of D357 Investment Castings" J.Metals 49 22, 1997.
- [5] P.E. Magnusen, R.J. Bucci, A.J. Hinkle, J.R. Brockenbrough, H.J. Konish, "Analysis and prediction of microstructural effects on long-term fatigue performance of an aluminum aerospace alloy" International Journal of Fatigue 19 275-283, 1997.
- [6] P. Solomon, "Composition for Making Same and Method of Investment Casting", U.S Patent, PP.3, 754, 943. 1973.
- [7] ASTM / E155, Standard, USA, 1984.
- [8] Bell Process Specification, BPS FW 4163, Bell Helicopter Company, USA, 1972.

نمود که کمترین اثر حذف عنصر منیزیم را داشته باشیم. همچنین مشخص شد که متغیر دمای مذاب در حین گاززدایی تأثیر چندان زیادی بر روی سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهایی قطعات ساخته شده نداشته است.

در مورد مدت زمان دمش گاز آرگون هم می توان گفت تغییر این عامل تأثیر زیادی بر روی سختی قطعات نهایی ندارد ولی از تأثیر آن بر روی استحکام نمی توان صرف نظر کرد به طوری که با افزایش میزان زمان دمش گاز آرگون به دلیل بهتر انجام شدن عملیات گاززدایی و خروج گازهای مضر چون هیدروژن و کاهش احتمال به وجود آمدن مک، خواص مکانیکی افزایش یافته است. در نهایت با توجه به میزان حضور عنصر منیزیم و پارامترهای گاززدایی باید شرایط بهینه را انتخاب نمود.

۵- مراجع

- [1] Min Ha Lee, Jae Joong Kim, Kyung Hoon Kim, Nack J. Kim, Sunghak Lee, Eui W. Lee "Effects of HIPping on high-cycle fatigue properties of investment cast A356 aluminum alloys" Materials Science and Engineering A340 123-129, 2003.
- [2] J.Z. Yi, P.D. Lee, T.C. Lindley, T. Fukui "Statistical modeling of microstructure and defect population effects on the fatigue performance of cast A356-T6 automotive components" Materials Science and Engineering A 432 59-68, 2006.