

مطالعه‌ی کمی و کیفی ریزساختار آلیاژ ریختگی A۳۵۶ آلومینیم و تأثیر آن بر خواص مکانیکی

فرزاد خمایی زاده (استادیار)

علیرضا قاسمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

در این تحقیق تأثیر کمی و کیفی مهم‌ترین اجزای ریزساختاری آلیاژ ریختگی A۳۵۶ آلومینیم بر خواص مکانیکی آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور اندیس کیفی^۱ به‌عنوان معیاری از استحکام و انعطاف‌پذیری آلیاژ در شرایط مختلف ریزساختاری اندازه‌گیری شد و تأثیر تغییرات فواصل بین بازوهای دندریتی، میزان کرووی بودن ذرات سیلیسیم یوتکتیکی و سطح دوبعدی ریزحفره‌ها بر روند تغییرات این شاخص به‌صورت روابط ریاضی پیشنهاد شده است.

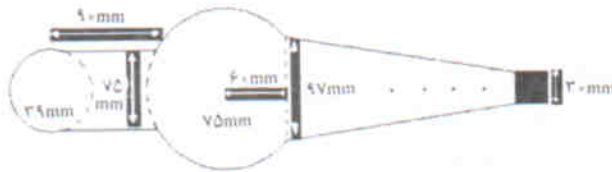
مقدمه

یکی از مهم‌ترین اهداف مهندسان طراح، کاهش وزن سازه‌ها با در نظر گرفتن نیازهای کیفی و ایمنی ضروری در قطعات است. با این وجود تضمین استحکام کافی بادر نظر گرفتن ضرایب ایمنی غالباً منجر به افزایش بیش از حد انتظار وزن قطعات می‌شود. پیش‌بینی دقیق این نیازها از یک طرف بستگی به نحوه‌ی طراحی و اجرا، و از طرف دیگر به قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار قطعه در شرایط عملی، با توجه به ساختار داخلی و خارجی آن دارد. همچنین برآورد استحکام و خواص مکانیکی قطعات مختلف به کمک روابط ریاضی که منتج از بررسی‌های ریزساختاری و حتی الامکان غیر مخرب باشند از دیرباز مورد توجه محققان مختلف بوده است. طبیعی است که وجود تنوع و تفاوت خواص اجزا تشکیل‌دهنده‌ی ساختار ماده منجر به پیچیدگی این نوع روابط می‌شود. موفقیت در ارائه و پیشرفت چنین روش‌هایی به طراحان و سازندگان امکانات وسیع‌تری برای طراحی سازه‌های سبک‌تر و پیچیده‌تر می‌بخشد.

آلیاژهای ریختگی آلومینیم - سیلیسیم، به‌ویژه آلیاژ A۳۵۶، با دارا بودن خواص مکانیکی و ریخته‌گری مطلوب کاربرد وسیعی در صنایع مختلف، از جمله صنایع خودروسازی و صنایع هوافضا دارند و همواره مورد توجه محققان و طراحان بوده‌اند. برای برآورد خواص مکانیکی این آلیاژها به روش‌های مختلف از جمله محاسبات عددی یا اندازه‌گیری کمی و کیفی عوامل تشکیل‌دهنده‌ی ریزساختار تلاش شده است، اما با توجه به این که ساختار آلیاژهای ریختگی آلومینیم - سیلیسیم دربرگیرنده‌ی مجموعه‌ی متعددی از عوامل ریزساختاری

(شکل و توزیع یوتکتیکی سیلیسیم، شکل و ترکیب فازهای بین فلزی آهن و ترکیبات مختلف آن، ترکیبات حاوی مس، ترکیبات رسوبی منیزیم و ترکیبات اکسیدی سطحی و غیره) است که هر یک تأثیری تعیین‌کننده بر خواص مکانیکی نهایی آلیاژ دارند، ارائه‌ی روابط رضایتبخش و فراگیری که در برگیرنده‌ی تمامی این عوامل باشد خیلی ساده نیست. همچنین تأثیر اجزای متعدد ریزساختاری بر خواص مکانیکی آلیاژ همواره یکسان و یکنواخت نیست و علاوه بر آن تغییرات کمی و کیفی هر یک از آن‌ها نیز اغلب بر دیگر اجزا تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، تغییر اندازه‌ی بازوهای بین دندریتی بر اثر سرعت سرد شدن آلیاژ، بر میزان کرویت فاز سیلیسیم یوتکتیکی و همچنین میزان ریزحفره‌ها تأثیرگذار است. محققان با در نظر گرفتن یک زیر مجموعه‌ی ریزساختاری، روابط متعددی برای تخمین خواص مکانیکی نهایی آلیاژ ارائه دادند،^[۱-۴] اما یافتن رابطه‌ی برای تخمین تأثیر مجموعه‌ی این عوامل بر خواص مکانیکی حاصل به دلیل همین تأثیرات متقابل کار چندان ساده‌ی نیست. برخی از محققان بر اندازه‌ی فاصله‌ی بازوهای بین دندریتی به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر مشخصات مکانیکی آلیاژهای ریختگی آلومینیم - سیلیسیم تأکید دارند و با ارائه‌ی روابطی که تنها در برگیرنده‌ی این متغیر هستند سعی در پیش‌بینی خواص نهایی آلیاژ دارند.^[۵،۶] مطابق این مطالعات فاصله‌ی بازوهای بین دندریتی اغلب رابطه‌ی بسیار نزدیکی با سرعت سرد شدن و خواص مکانیکی آلیاژ دارد.^[۴ و ۵]

اما برخی دیگر از مطالعات تأثیر شکل فاز یوتکتیکی اولیه‌ی



شکل ۱. نمای مدل قالب گوهی مورد استفاده در این تحقیق.

عدم ایجاد حفره‌ی انقباضی متمرکز در قطعات را تضمین کرده است (شکل ۱).

نمونه‌های آزمایشی در قالب‌های ماسه‌ی سیلیسی به روش چسب سیلیکات سدیم CO_2 تهیه شده و ترموکوپل‌های نوع K در نقاط مختلف محور طولی محفظه‌ی قالب تعبیه شده‌اند. گاززدایی توسط دستگاه روتور و به کمک گاز آرگون به مدت ۱۵ دقیقه انجام شده است.^[۱۳] اصلاح دانه‌های سیلیسیم یوتکتیکی توسط حدود ۱۵٪ استرانسیم مذاب با استفاده از آمیزان $Al-10\%Sr$ در سیزدهمین دقیقه‌ی فرایند گاززدایی انجام شده است تا از میرایی آن در حین فرایند گاززدایی جلوگیری شود. همچنین به منظور ظرفیت‌سازی دانه‌های آلومینیم «در ریزساختار نهایی آلیاژ به ذوب حدود ۲٪ تیتانیم از طریق آمیزان $Al-5\%/Ti-1\%/B$ افزوده شده است. در عملیات ریخته‌گری سعی شده تا حد امکان از جذب مجدد گاز و ایجاد ناخالصی‌های اکسیدی در اثر اختشاش در مذاب اجتناب شود. از بلوک‌های تهیه شده نمونه‌هایی از مقاطع با ضخامت‌های مختلف (سرعت‌های انجماد متفاوت) تهیه شده است. زیرساختار تمامی نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. محاسبات کمی و کیفی اجزای ریزساختار به کمک نرم‌افزار آنالیز تصویری SIS analysis imaging C انجام شده است. همچنین نمونه‌های آزمایشات کشش گرد، مطابق استاندارد ASTM-۱۳۵۷M نیز از مقاطع ذکر شده تهیه شده و نتایج حاصله از بررسی‌های ریزساختاری با نتایج حاصل از آزمایشات مکانیکی مقایسه شدند.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی ذوب ریخته شده.

نام عنصر	درصد وزنی
Si	۶/۶۳
Sr	۰/۱۴
Fe	۰/۲۳
Cu	۰/۱۸
Mn	۰/۰۲
Mg	۰/۲۳
Zn	۰/۰۰۸
Ti	۰/۱۸
Al	بقیه

سیلیسیم^[۱۷] و برخی دیگر حجم، اندازه و شکل ریز حفره‌های موجود در ریزساختار را عوامل تعیین کننده‌ی به شمار می‌آورند که محاسبه‌ی خواص مکانیکی حاصل بدون در نظر گرفتن این متغیرها دچار خطای غیر قابل اغماضی خواهد شد.^[۸،۱۰-۱۳] لازم به ذکر است که تفاوت‌های جزئی ترکیب شیمیایی آلیاژ در محدوده‌ی مجاز استاندارد شیمیایی نیز بر خواص نهایی آلیاژ تأثیرگذار است، اما این تأثیر در مقایسه با دیگر عوامل مؤثر از جمله سرعت انجماد، جوانه زنی و بهسازی معمولاً کمتر قابل مشاهده است.^[۵]

شکل فاز سیلیسیم یوتکتیکی تأثیر بسیار مهمی بر خواص مکانیکی نهایی آلیاژ دارد. این تأثیر توسط محققان مختلفی گزارش شده است.^[۱۷،۱۸] تغییر شکل فاز سیلیسیم از تیغه‌ی به سلولی با کاهش تمرکز تنش در رأس تیغه‌های فاز یوتکتیکی، موجب افزایش تنش لازم برای جوانه‌زنی و رشد ترک می‌شود. اصلاح ساختار سیلیسیم یوتکتیک به کمک عوامل اصلاح کننده‌ی نظیر سدیم یا استرانسیم بسیار متداول است. گرچه سرعت سرد شدن نیز تأثیر تعیین کننده‌ی بر شکل فاز سیلیسیم دارد و استفاده از این عامل در بسیاری از موارد بر استفاده از اصلاح کننده‌ها ترجیح داده می‌شود.

در این تحقیق از بین عوامل مختلف تشکیل دهنده‌ی ریزساختار آلیاژ ۸۳۵۶ آلومینیم، تأثیر مهم‌ترین متغیرهای ریزساختار یعنی طول بازوهای دندریتی، شکل و توزیع فاز یوتکتیکی سیلیسیم و میزان پراکندگی ریز حفره‌ها بر خواص مکانیکی نهایی آلیاژ ۸۳۵۶ آلومینیم مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین از طریق تحلیل عددی نتایج حاصل، رابطه‌های ریاضی که در برگزیده‌ی متغیرهای اشاره شده باشند نیز جست‌وجو خواهند شد.

با توجه به تنوع شرایط انجمادی و ریزساختاری در نقاط مختلف قطعات ریختگی و به منظور تعریف کلی از مجموع خواص مکانیکی حاصل در نمونه‌ها از مؤلفه‌ی به نام شاخص کیفی استفاده شده است که معرف رابطه‌ی نرخ رشد استحکام کششی آلیاژ با میزان افزایش طول نسبی آن است. شاخص مذکور به صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:^[۱۲،۱۱]

$$Q = UTS + K \cdot \log(\text{درصد افزایش طول}) \quad (۱)$$

در این رابطه ثابت K برای آلیاژ ۸۳۵۶ معادل ۱۵۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

روش تحقیق

در این تحقیق دو سری نمونه از آلیاژ ۸۳۵۶ آلومینیم، با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۱، در قالب‌های گوهی شکل‌دارای میرد مسی و به قطر دو سانتی متر ریخته شده است. حجم مناسبی از تغذیه،

نتایج و بحث

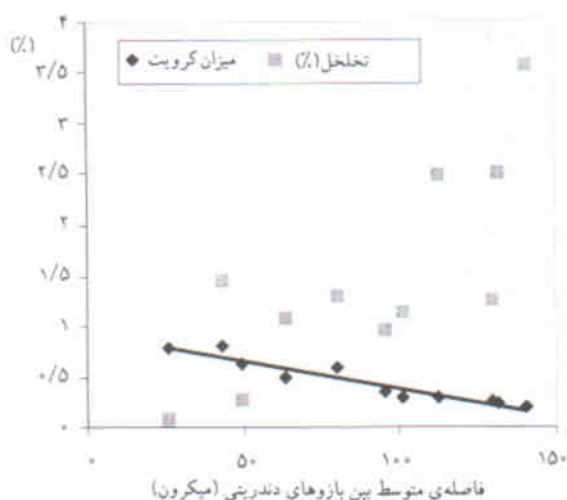
بازوهای بین دندریتی که در شرایط یکسان جوانه‌زنی معیاری از سرعت سرد شدن آلیاژ است تأثیر تعیین‌کننده‌ی بر شکل فاز سیلیسیم دارد. طبق این نتایج، کاهش فاصله‌ی بازوهای بین دندریتی موجب افزایش میزان کرویت ذرات سیلیسیم یوتکتیکی و همچنین مقدار ریزحفره‌ها شده است. همچنین افزایش اندازه‌ی فاصله‌ی بازوهای بین دندریتی با جلوگیری از جریان مذاب در فضای محصور بین دندریت‌ها و ممانعت از تغذیه‌ی مناسب حین انجماد در این نواحی موجب افزایش میزان حفره‌ها شده است. لازم به ذکر است که در صورتی که آنالیز کمی از نظر آماری در یک محدوده‌ی سطحی به اندازه‌ی کافی بزرگ انجام شود، اندازه‌ی مجموع سطحی ریز حفره‌ها تقریب خوبی از حجم آن است. [۱۰]

نتایج اندازه‌گیری کمی و کیفی اجزاء ریزساختاری و خواص مکانیکی نمونه‌های آزمایشی برای هر دو گروه نمونه‌های تهیه شده در جدول ۲ ملاحظه می‌شوند. با استفاده از نتایج این جدول تغییرات استحکام تسلیم و استحکام کششی نسبت به تغییر فواصل بین بازوهای دندریتی نمونه‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود این نتایج به‌طور کلی به حالت خطی تمایل دارند که با نتایج دیگر محققان مطابقت دارد. [۴ و ۱۱]

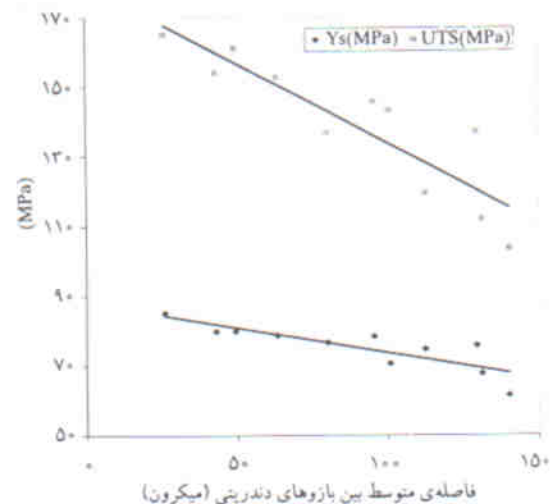
تغییرات میزان کرویت ذرات سیلیسیم و همچنین میزان حفره‌های سطحی نسبت به تغییرات فواصل بین دندریتی در شکل ۳ ملاحظه می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود اندازه‌ی فاصله‌ی

جدول ۲. خواص مکانیکی و ریزساختاری نمونه‌های آزمایشی شده.

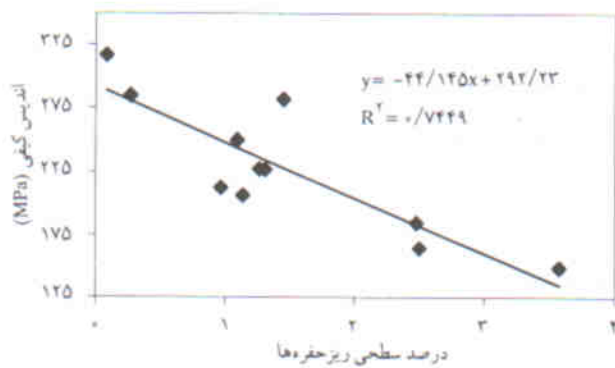
ردیف	فاصله از مبرد (mm)	زمان انجماد (ثانیه)	استحکام تسلیم (Mpa)	استحکام کششی (Mpa)	از دیاد طول نسبی (%)	اندیس کیفی (Mpa)	مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی اجزای ریزساختار			
							فاصله‌ی بازوهای دندریتی (μm)	طول/عرض ذرات سیلیسیم	کرویت ذرات سیلیسیم	سطح ریزحفره‌ها (%)
A1	۱۵	۹۲	۷۹/۷۵	۱۵۳/۹۷	۷/۰۹	۲۸۱/۵۶	۴۳	۱/۴۷	۰/۸۱	۱/۴۵
A2	۴۵	۳۹۵	۷۶/۵۳	۱۳۶/۶۳	۴	۲۲۶/۹۴	۸۰	۳/۰۰	۰/۵۹	۱/۳۱
A3	۱۴۰	۹۸۶	۷۴/۴۷	۱۱۹/۴۱	۲/۷۲	۱۸۴/۵۲	۱۱۲/۵	۸/۲۸	۰/۳۰	۲/۴۸
A4	۲۱۰	۱۴۶۵	۶۷/۴۷	۱۱۲/۰۴	۲/۲۲	۱۶۴/۰۰	۱۳۱/۳۴	۱۱/۳۰	۰/۲۳	۲/۵۰
A5	۲۴۰	۱۸۴۲	۶۱/۲۳	۱۰۳/۷۳	۱/۹۹	۱۴۸/۵۵	۱۴۰/۳۰	۱۳/۳۸	۰/۲۰۳	۳/۷۶
C1	۱۵	۲۱	۸۵/۱۶	۱۶۵/۰۳	۱۰/۱۹	۲۱۶/۲۳	۲۵/۹۲	۱/۴۴	۰/۷۸۳	۰/۰۸۴
C2	۴۵	۱۱۰	۷۹/۸۶	۱۶۱/۱۰	۶/۳۰	۲۸۴/۳۲	۴۹/۴	۲/۶۵	۰/۶۲۸	۰/۲۷۱
C3	۷۵	۲۴۴	۷۸/۵۷	۱۵۲/۵۳	۴/۵۸	۲۴۹/۸۸	۶۳/۴۰	۴/۱۵	۰/۴۹۱	۱/۰۹۳
C4	۱۰۵	۶۹۵	۷۸/۲۳	۱۴۵/۴۷	۲/۸۰	۲۱۲/۵۴	۹۵/۵	۶/۷۸	۰/۳۵۲	۰/۹۶۹
C5	۱۳۵	۷۷۵	۷۰/۴۱	۱۴۲/۹۵	۲/۶۵	۲۰۶/۱۰	۱۰۰/۸۴	۸/۴۸	۰/۲۹۶	۱/۱۳۸
C6	۱۶۵	۱۳۲۰	۷۵/۵۳	۱۳۶/۷۵	۳/۷۴	۲۲۷/۵۸	۱۲۹/۴۸	۱۰/۲۸	۰/۲۵۴	۱/۲۶۶



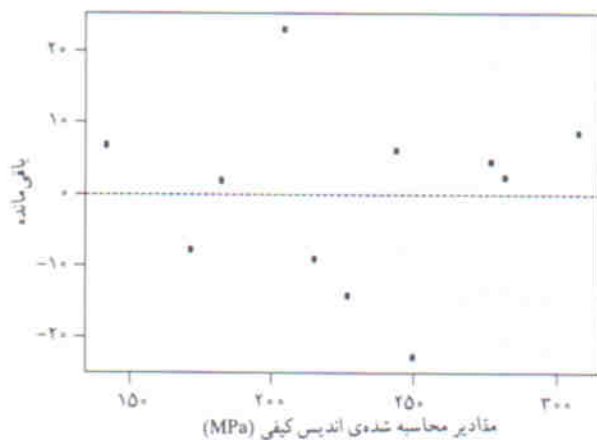
شکل ۳. نمودار تغییرات میزان کرویت ذرات سیلیسیم و همچنین میزان حفره‌های سطحی نسبت به تغییرات فواصل بین دندریتی.



شکل ۴. نمودار تغییرات استحکام تسلیم و استحکام کششی با تغییرات فواصل بین دندریتی.



شکل ۶. نمودار تغییرات اندیس کیفی نسبت به میزان ریز حفره‌های سطحی آلیاژ.



شکل ۷. نمودار توزیع خطای معادله‌ی ۵.

ریزحفره‌ها در سطح دوبعدی به صورت رابطه‌ی ۴ به دست آمده است. (شکل ۶)

$$Q_1 = -44/15(M_p) + 292 \quad (4)$$

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، تعیین خواص مکانیکی آلیاژ به کمک آنالیز کمی و کیفی ریزساختار آن با پیچیدگی‌هایی مواجه است، زیرا تأثیر اجزاء متعدد ریزساختاری بر خواص مکانیکی آلیاژ یکسان و همواره یکنواخت نیست و علاوه بر آن تغییرات کمی و کیفی هر یک از آن‌ها نیز اغلب بر دیگر اجزاء تأثیر می‌گذارد. تاکنون در هر یک از روابط ارائه شده، تنها تغییرات یکی از عوامل ریزساختاری در نظر گرفته شده و نقش دیگر اجزای ریزساختاری در آن‌ها وارد نشده است. طبیعی است که هر یک از این روابط به تنهایی قادر به پیش‌بینی دقیق مشخصات مکانیکی آلیاژ نخواهد بود و خطای حاصل از نقش دیگر عوامل ریزساختاری را به همراه خواهند داشت. به همین دلیل، با استفاده از نتایج حاصل از متغیرهای سه‌گانه‌ی تجربی (فواصل بازوهای دندردیتی، کرویت ذرات سیلیسیم یوتکتیکی و سطح ریزحفره‌ها) و به کمک روش مشتقات جزئی چندتایی [۱۴]

با توجه به نتایج حاصل، رابطه‌ی تغییرات اندیس کیفی با فاصله‌های متوسط بین دندردیتی آلیاژ مطابق با شکل ۴ به صورت رابطه‌ی ۲ ارائه شده است.

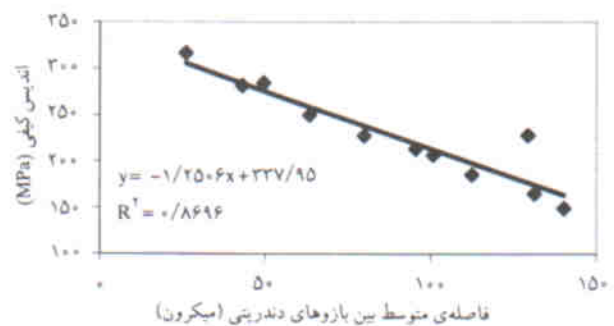
$$Q_1 = -1/25 (DAS) + 328 \quad (2)$$

در این رابطه Q_1 اندیس کیفی (مگا پاسکال) و DAS فاصله متوسط بین دندردیتی (میکرومتر) است.

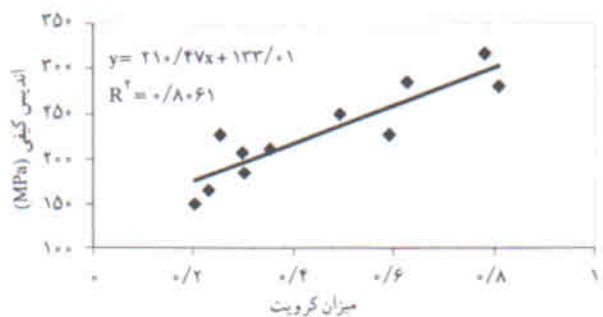
در این تحقیق گرچه عمل بهینه‌سازی فاز سیلیسیم یوتکتیکی با استفاده از اصلاح‌کننده‌ی حاوی استرانسیم انجام شده، با کاهش سرعت سرد شدن به سمت مناطقی ضخیم‌تر، میزان اصلاح نیز تغییر می‌کند که این پدیده در خواص مکانیکی نهایی تأثیرگذار است. رابطه‌ی تغییرات اندیس کیفی با میزان کرویت ذرات فاز یوتکتیکی سیلیسیم نیز به صورت رابطه‌ی ۳ به دست آمده است. (شکل ۵).

$$Q_1 = 210/47 (S_p) + 133 \quad (3)$$

که در آن S_p میزان کرویت ذرات فاز یوتکتیکی سیلیسیم است. تغییرات اندیس کیفی آلیاژ نسبت به تغییر مجموع سطح ریزحفره‌ها در سطح دوبعدی در شکل ۶ ملاحظه می‌شوند. رابطه‌ی تغییرات اندیس کیفی نسبت به تغییر مجموع درصد سطحی



شکل ۴. نمودار تغییرات اندیس کیفی نسبت به تغییرات فاصله متوسط بین دندردیتی.



شکل ۵. نمودار تغییرات اندیس کیفی نسبت به تغییرات میزان کرویت فاز سیلیسیم یوتکتیکی.

موضوع ادامه این تحقیق باشد. همچنین نقش عملیات حرارتی پیرسختی که معمولاً بر آلیاژ A356 انجام می‌پذیرد، از دیگر موارد قابل بررسی است. انجام مطالعات دقیق‌تر در این زمینه راه‌گشای انجام تلاش‌های آتی در زمینه‌ی پیش‌بینی دیگر خواص مکانیکی مهم این خانواده از آلیاژها، به‌ویژه خستگی در پُرسیکل^۳ و خستگی حرارتی^۴ خواهند بود.

نتیجه‌گیری

تغییرات اندیس کیفی آلیاژ A356 نسبت به تغییر فواصل بین بازوهای دندریتی، میزان کرویت ذرات سیلیسیم و همچنین سطح ریزخف‌ها به‌صورت روابطی خطی با تقریب مناسب به دست آمده‌اند. با وجود این، از آنجا که خواص مکانیکی آلیاژ متأثر از تأثیر همزمان مجموعه‌ی از متغیرهای ریزساختاری تشکیل‌دهنده‌ی آلیاژ هستند، با استفاده از روش مشتقات جزئی چندتایی رابطه‌ی شامل سه متغیر از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر رفتار مکانیکی آلیاژ ارائه شده است که با تقریب مناسبی نتایج به دست آمده‌ی تجربی را پوشش می‌دهد. حداکثر اختلاف به دست آمده توسط این رابطه نسبت به روابط تجربی کمتر از 25 Mpa بوده است.

معادله‌ی جدیدی به دست می‌آید (معادله‌ی ۵). در این روش از مدل مشتق‌گیری چندگانه به فرم $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \epsilon$ استفاده شده که در آن X_1 ، X_2 و X_3 متغیرهای اندازه‌گیری (predictors) و β_1 ، β_2 و β_3 ضرایب مشتق‌گیری هستند. ضریب ϵ نیز خطای توزیع بین مقادیر صفر تا انحراف معیار σ است.^[۱۴]

$$\text{Quality index} = 213 - 0.081 \text{ DAS} + 126 (S_p) - 24 / (M_p) \quad (5)$$

$$R - \text{Sq} = 94 / 2$$

خطای حاصل از رابطه‌ی ۵ که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، بیانگر انطباق مناسب این رابطه است. حداکثر خطای به دست آمده توسط این رابطه، در مقایسه با نتایج عملی کمتر از 25 Mpa بوده است.

علی‌رغم تطابق مناسب نتایج حاصل از روابط پیشنهاد شده با نتایج عملی، و در نظر گرفتن مهم‌ترین اجزای ریزساختاری در این روابط که گام مهمی نسبت به تحقیقات دیگر محققان برای تخمین خواص مکانیکی آلیاژ از طریق آنالیز کمی و کیفی آن است، هنوز هم این روابط نقش تمامی عوامل مؤثر را در نظر نمی‌گیرند. به‌عنوان مثال، نقش فازهای بین‌فلزی حاوی آهن، منگنز و دیگر عناصر آلیاژی، فازهای اکسیدی و دیگر عواملی که در نمونه‌های تهیه شده در این آزمایشات در حداقل ممکن نگاه داشته شده‌اند می‌تواند

پانویس

1. Quality Index

2. Multiple Regression Method

3. High Cycle Fatigue

4. Thermal Fatigue

منابع

- Oswalt, K. J. Misra, M. S., "Dendrite arm spacing: A non destructive Test to evaluate tensile properties of premium quality aluminum alloy (Al-Si-Mg) castings", AFS Transactions, 80-51, pp 845-861, (1980).
- Radhakrishna K. and Seshan, S., "Dendrite arm spacing and mechanical properties of aluminum cast alloys" *Cast Metals*. 2 (1), pp 34-38, (1989).
- Pan, D.E. N. Hsieh, M. W. Jang, S.S. Loper, C.R. Jr., "Study of influence of processing parameters on the microstructure and properties of A356 aluminum alloy", AFS Transactions, 89-73, pp 397-414, (1989).
- Radhakrishna, K. Seshan, S. Seshadri, M. R., "Dendrite arm spacing in aluminum alloy castings", AFS Transactions, 80-87, pp 695-702, (1980).
- Flemings, M. C. Kattamis, T. Z. Bardes, B. P., "Dendrite arm spacing in aluminum alloys", AFS Transactions, 90-176, pp 501-506, (1991).
- Hetke, A. Gundlach, R. B., "Aluminum casting quality in alloy

356 engine components" AFS Transactions, 94-137, pp 367-380, (1994).

- Voigt, R.C. Bye, D.R., "Microstructural aspects of fracture in A356", AFS Transactions, 91-125, pp 33-50 (1991).
- Harada, M. Suzuki, T. Fukui, I., "Effects of microporosity and microstructure on mechanical properties of aluminum casting alloys", *Transactions of Japan foundrymen's society*, 5, pp 47-50, (1985).
- Fang, Q.T. Granger, D. A., "Porosity formation in modified and unmodified A356 alloy castings", AFS Transactions, 89-209, pp 989-1000, (1989).
- Anson, J. P. Grozleski, J. E., "Effect of hydrogen content on relative shrinkage and gas microporosity in Al-7% Si casting", AFS transactions 107, 99-26, pp 135-142, (1999).
- Caceres, H. Wang, L. Apelian, D. Makhlof, M. M., "Alloy selection for die castings using the quality index", AFS transactions, 107, 99-147, pp 239-247, (1999).
- Caceres, C. H., "Microstructural effects on the strength-ductility relationship of Al-7Si-Mg casting alloys", *Materials science forum*, 331-337, pp 223-228, (2000).
- Erard, J. P., "Degazage et lavage des bains d'aluminum par l'insufflation d'azote a'aid d'un rotor", *Hommes et fonderie*, pp 23-29, (Nov, 1990).
- Montgomery, D.C. and Peck, E.A., "Introduction to linear regression analysis", John Wiley & Sons, (1982).