

تأثیر عملیات حرارتی و مس بر خواص کششی و اندیس کیفیت آلیاژهای Al-7Si-0.35Mg-xFe

رضا تقی آبادی^{۱*}، محمد تلافی نوغانی^۱، یلدا کریمی^۲، مهسا ایرانشاهی^۲، مریم نظری^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی مواد و سرامیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- کارشناس مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد و سرامیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد و سرامیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

*taghiabadi@ikiu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۲۲)

چکیده

در این تحقیق تأثیر افزودن مس (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) و عملیات حرارتی (T_۶) بر خواص کششی و اندیس کیفیت آلیاژ A۳۵۶ حاوی آهن (۰/۵ تا ۱/۵ درصد وزنی) بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصله، در شرایط ریختگی، افزودن مس به آلیاژهای حاوی آهن موجب افزایش نسبی استحکام کششی (تا حدود ۲۵ درصد) و افت قابل توجه درصد ازدیاد طول (تا حدود ۸۰ درصد) می شود اما در صورت انجام عملیات حرارتی، استحکام کششی و اندیس کیفیت آلیاژ حاوی ۱ درصد مس و ۱/۵ درصد آهن نسبت به آلیاژ پایه، به ترتیب رشد ۱۰۰ و ۳۵ درصدی را تجربه می نماید. بر اساس بررسیهای انجام شده، بهبود اندیس کیفیت آلیاژ را می توان ناشی از تأثیر مشترک استحکام دهی رسوبی زمینه توسط ذرات Al₂Cu و Mg₂Si و بهسازی حرارتی ذرات سیلیسیم یوتکتیک و ترکیبات بین فلزی صفحه ای شکل غنی از آهن دانست که ضمن افزایش قابل توجه استحکام کششی، موجب بهبود انعطاف پذیری آلیاژ می شوند.

واژه های کلیدی:

آلیاژ A356، عملیات حرارتی، مس، خواص کششی، اندیس کیفیت.

۱- مقدمه

رسوبات Al₂Cu، به میزان قابل توجهی بهبود می یابد [۵-۶]. یکی از ناخالصی های مهم در آلیاژهای ریختگی Al-Si، آهن است. با توجه به افت قابل ملاحظه حلالیت این عنصر در هنگام انجماد و ترغیب تشکیل رسوبات بین فلزی ترد و شکننده در زمینه، مقدار این عنصر معمولاً در کمترین حد ممکن به لحاظ اقتصادی کنترل می شود [۷-۹]. مهمترین رسوبات غنی از آهن در آلیاژهای هیپویوتکتیک Al-Si فاز بتا (β-Al₃FeSi) با

آلیاژهای Al-Si-Mg به واسطه قابلیت عملیات حرارتی و استحکام ویژه بالا، جزء مهمترین آلیاژهای ریختگی آلومینیم به شمار می آیند [۱-۴]. قابلیت عملیات حرارتی این آلیاژها ناشی از حضور منیزیم و شکل گیری رسوبات Mg₂Si طی عملیات حرارتی است اما تحقیقات نشان می دهد که در صورت افزودن مقادیر مناسب از عنصر مس به این آلیاژها، پتانسیل رسوب سختی و متعاقباً خواص کششی و سختی آنها به دلیل شکل گیری

بتا توسط آهن، عملیات حرارتی قادر به انحلال کامل این ذرات در زمینه نبوده و صرفاً از طریق خرد شدن، کاهش ابعاد، کاهش کسر حجمی و تغییر مورفولوژی ترکیبات از حالت صفحه‌ای شکل به حالت کروی، موجب بهبود نسبی خواص می‌شود [۱۸-۱۹]. بر این اساس هدف از انجام این تحقیق بررسی تاثیر هم‌زمان بهسازی حرارتی و توسعه استحکام دهی رسوبی از طریق افزودن مس بر خواص مکانیکی آلیاژ غنی از آهن ۳۵۶، به عنوان یکی از مهمترین آلیاژهای Al-Si-Mg می‌باشد.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

ترکیب شیمیایی آلیاژ پایه مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. عملیات ذوب آلیاژ در دمای 750°C تحت فلاکس پوششی و در یک بوته گرافیتی/کوره مقاومتی انجام شد. پس از ذوب شارژ و سرباره گیری، مقدار آهن مذاب از طریق افزودن قرص‌های غنی از آهن (۸۰ درصد) در محدوده ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی تنظیم گردید. به منظور بررسی تاثیر مس، مقادیر معین از این عنصر به صورت ورق‌های نازک مس با خلوص تجاری به مذاب افزوده گردید به گونه‌ای که مقدار نهایی آن در ترکیب آلیاژ به ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۱ درصد وزنی رسانده شد. در ادامه مذاب به آرامی هم زده شد و پس از حصول اطمینان از همگن شدن ترکیب، عملیات گاززدایی با استفاده از قرص‌های گاززدای پایه نیتروژن صورت پذیرفت و بعد از سرباره گیری، بارریزی نمونه‌ها در یک قالب فولادی نمونه کشش (ASTM B108-03a) پیش گرم شده تا دمای 200°C انجام شد. اندازه نمونه کششی حاصله بر اساس استاندارد ASTM B 557M-02a است (شکل ۱).

مورفولوژی صفحه‌ای و فاز آلفا ($\alpha\text{-Al}_{15}\text{Fe}_3\text{Si}_2$) با مورفولوژی حروف چینی هستند. مورفولوژی این فازها اثر تعیین کننده ای بر خواص مکانیکی آلیاژ داشته و در صورت شکل گیری فاز بتا با مورفولوژی صفحه‌ای، خواص مکانیکی آلیاژ به ویژه انعطاف-پذیری و چقرمگی آن به میزان قابل توجهی افت می‌نماید [۱۰-۱۱].

نظر به اهمیت صنعتی این آلیاژها، تاثیر منفی ناخالصی آهن بر خواص کششی این آلیاژها توسط محققین متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۹-۱۳]. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیقات، با افزایش میزان آهن تا یک حد بحرانی (که غالباً به ترکیب شیمیایی و شرایط انجمادی آلیاژ وابسته است) به دلیل شکل-گیری ترکیبات بین فلزی و سخت غنی از آهن در نواحی بین دندریتی، سختی و خواص کششی آلیاژ بهبود می‌یابد اما اگر غلظت آهن از غلظت بحرانی فراتر رود، علی‌رغم افزایش سختی زمینه، به دلیل افزایش ابعاد و کسر حجمی ترکیبات صفحه‌ای شکل بتا، استحکام و به‌ویژه انعطاف‌پذیری آلیاژ شدیداً کاهش می‌یابد. بر این اساس، روش‌های مختلفی جهت بهینه‌سازی و کاهش تبعات منفی حاصل از حضور این عنصر در آلیاژهای Al-Si توسعه یافته‌اند که از جمله می‌توان به بهسازی شیمیایی آلیاژ توسط عناصر بهساز مانند منگنز، برلیم، استرانسیم و غیره، بهسازی تهریدی از طریق افزایش سرعت انجماد، فرآوری حرارتی مذاب (اعمال فوق‌گداز) و بهسازی حرارتی اشاره نمود [۷-۹ و ۱۲-۱۷].

از میان روش‌های فوق، بهسازی حرارتی از طریق عملیات حرارتی، روشی بسیار مناسب جهت کاهش اثرات منفی حضور ترکیبات غنی از آهن بتا و هم‌زمان استحکام‌دهی رسوبی آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر آلومینیم است. در این پدیده، آهن و سیلیسیم موجود در ترکیبات بتا پس از کسب انرژی لازم، از داخل ترکیبات به درون زمینه نفوذ کرده و این مهاجرت اتمی موجب انحلال تدریجی و خرد شدن صفحات مخرب می‌شود [۱۸-۱۹]. با این حال نظر به حلالیت بسیار کم آهن در آلومینیم (۰/۰۵ درصد در دمای 540°C) و اشباع سریع زمینه اطراف ذرات

در این رابطه m جرم نمونه، m_w جرم نمونه در آب، ρ_r چگالی واقعی نمونه و ρ_w چگالی آب مقطر است. همچنین برای تعیین درصد تخلخل نمونه‌ها از رابطه (۲) استفاده شد:

$$\%P = \frac{\rho_{th} - \rho_r}{\rho_{th}} \quad (2)$$

که در آن ρ_r چگالی واقعی و ρ_{th} چگالی تئوری نمونه‌ها است که با بهره‌گیری از آنالیز شیمیایی آلیاژ و چگالی دقیق عناصر مختلف تعیین گردید.

به منظور تسهیل معرفی و بررسی نمونه‌های مورد آزمایش، در این مقاله معرفی آلیاژها توسط کدهای اختصاری شامل درصد وزنی مس و آهن و وضعیت عملیات حرارتی آلیاژ صورت می‌پذیرد. به عنوان مثال کد 1Cu1Fe-HT به معنی آلیاژ A۳۵۶ حاوی ۱ درصد مس و ۱ درصد آهن در شرایط عملیات حرارتی شده و کد 0.5Cu1.5Fe-AC به معنی آلیاژ A۳۵۶ حاوی ۰/۵ درصد مس و ۱/۵ درصد آهن در شرایط ریختگی است.

۳- نتایج و بحث

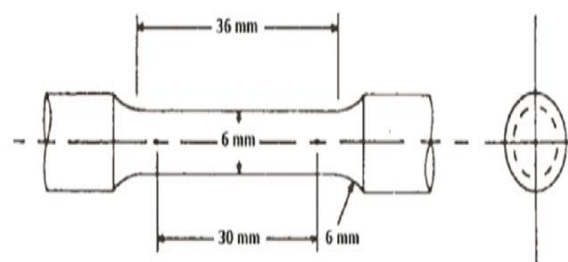
۳-۱- تأثیر مس بر خواص کششی آلیاژهای Al-7Si-0.35Mg-xFe در شرایط ریختگی

تأثیر افزودن مقادیر مختلف مس بر استحکام کششی و درصد ازدیاد طول آلیاژ A۳۵۶ حاوی مقادیر مختلف آهن در دو شکل (۲-الف) و (۳-الف) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود (شکل ۲-الف) در یک غلظت آهن مشخص، افزودن مس تا حدود ۰/۵ درصد وزنی موجب بهبود استحکام کششی می‌شود اما پس از آن، روند افزایش استحکام کند شده و بسته به غلظت آهن، حداکثر استحکام کششی در محدوده ۰/۷ الی ۱ درصد مس مشاهده می‌شود. همچنین با توجه به شکل (۳-الف) افزایش غلظت مس موجب افت پیوسته و قابل توجه درصد ازدیاد طول آلیاژهای حاوی مقادیر مختلف آهن می‌شود. این نتایج در توافق با نتایج حاصل از تحقیقات شبستری و همکاران بر روی آلیاژ A۳۵۶ حاوی حدود ۰/۳ درصد آهن است [۵].

جدول (۱): ترکیب شیمیایی (wt%) آلیاژ ۳۵۶ آلومینیم

عنصر	درصد وزنی
Si	۷/۰۱
Mg	۰/۳۵
Cu	۰/۰۱
Fe	۰/۱۸
Zn, Mn, Ni	هر کدام حداکثر ۰/۰۱
Ti	۰/۱۳
Other	حداکثر ۰/۰۳
Al	باقیمانده

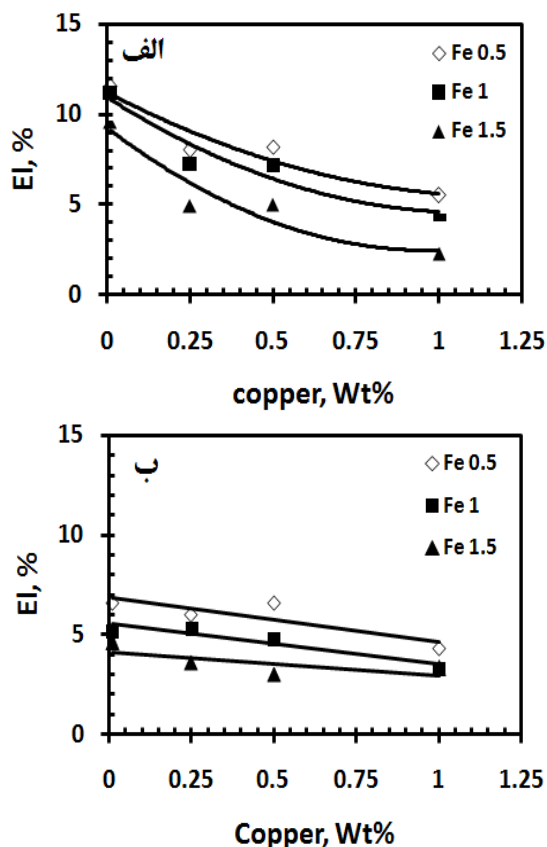
پس از انجام عملیات حرارتی T۶ شامل محلول‌سازی در دمای 540°C به مدت ۸ ساعت، سرد کردن سریع در آب دمای محیط و پیرسازی در دمای 150°C به مدت ۶ ساعت، آزمون کشش تحت نرخ کرنش 1 mm/min توسط یک دستگاه کشش یونیورسال Zwickroell صورت پذیرفت. همچنین به منظور بررسی ساختار نمونه‌ها، پس از عملیات آماده‌سازی سطحی به روش‌های استاندارد، حکاکی نمونه‌ها با استفاده از محلول HF ۰/۵ درصد انجام شد.



شکل (۱): مشخصات ابعادی نمونه کشش

چگالی واقعی نمونه‌ها به روش غوطه‌وری در سیال ارشمیدس محاسبه شد. در این روش پس از تعیین جرم نمونه در هوا و آب مقطر توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت 10^{-4} gr، با بهره‌گیری از رابطه (۱) چگالی واقعی نمونه تعیین گردید:

$$\rho_r = \frac{m}{m - m_w} \times \rho_w \quad (1)$$

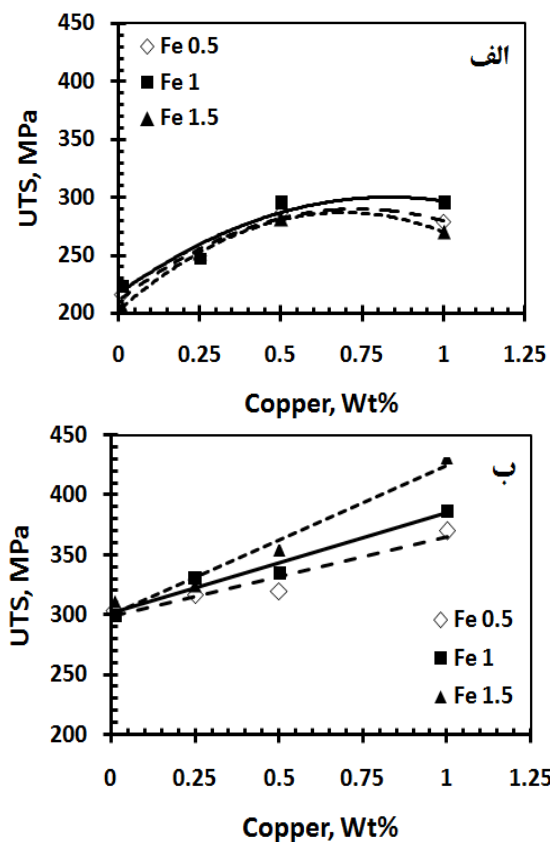


شکل (۳): تغییرات درصد ازدیاد طول با غلظت مس و آهن: (الف): قبل از عملیات حرارتی و (ب): بعد از عملیات حرارتی

حضور مس میزان تخلخل آلیاژ را نیز افزایش می‌دهد. پیدایش تخلخل در قطعات حاوی مس را می‌توان ناشی از تاثیر چند پدیده دانست. افزایش دامنه انجماد و ترغیب انجماد خمیری در حضور مس، وقوع واکنش یوتکتیک سه تایی در دمای 525°C ، (با افزایش غلظت مس در فاز یوتکتیک، میزان انقباضات حجمی در طول انجماد و به تبع آن میزان تخلخل‌های نمونه افزایش می‌یابد) و کاهش حد حلالیت و تسهیل رسوب هیدروژن محلول در مذاب با افزایش غلظت مس [۲-۵ و ۲۰].

بررسی تغییرات چگالی و کسر حجمی تخلخل‌ها آلیاژهای مختلف با تغییر غلظت مس (شکل ۴) موید این مطلب است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش مس و آهن علی‌رغم افزایش حداکثر چگالی نمونه‌ها، میزان تخلخل افزایش می‌یابد. بر این اساس روند کاهشی افزایش استحکام با افزایش غلظت

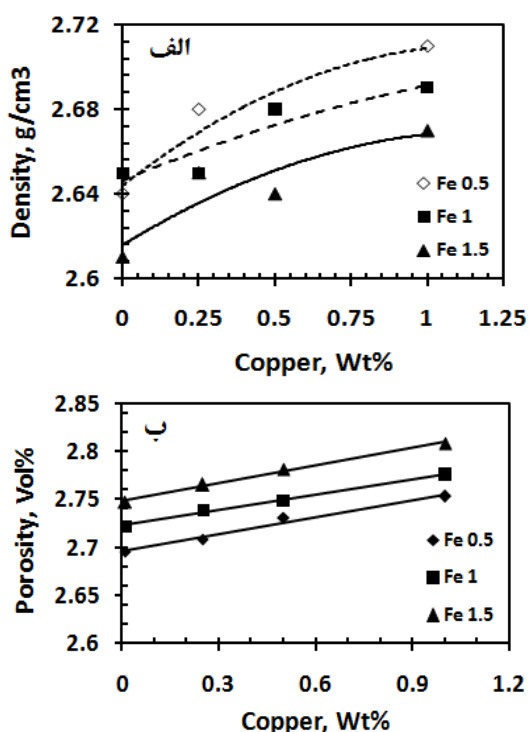
حضور مس در آلیاژهای Al-Si ریختگی چه به صورت محلول جامد (استحکام دهی محلول جامد) و چه به صورت ترکیبات بین فلزی غنی از مس (استحکام دهی با رسوبات پراکنده و سخت Al_2Cu) موجب افزایش سختی و استحکام کششی می‌شود [۵ و ۶ و ۸].



شکل (۴): تغییرات استحکام کششی آلیاژ A۳۵۶ با غلظت مس و آهن: (الف): قبل از عملیات حرارتی و (ب): بعد از عملیات حرارتی

با این حال این افزایش تا زمانی است که کسر حجمی رسوبات غنی از مس از حد معینی فراتر نرود و این به صورت پیوسته در مرزهای دانه رسوب نماید.

فصل مشترک بین دو فاز بسیار مستعد به ایجاد ترک‌های میکروسکوپی است [۲۳]. علاوه بر این نشان داده شده است که پس از گسستن پیوند ذرات بتا با زمینه، این ذرات به صورت یک نقص دو بعدی در زمینه عمل می‌نمایند [۲۴].



شکل (۴): (الف): تغییرات میزان دانسیته و (ب): درصد تخلخل با غلظت مس و آهن

بر این اساس انتظار می‌رود که در صورت تجاوز غلظت آهن از یک حد بحرانی و در پی آن افزایش کسر حجمی ترکیبات غنی از آهن، خواص کششی به ویژه نرمی و درصد ازدیاد طول آلیاژ افت نماید. این مطلب در توافق با نتایج به دست آمده است. با توجه به شکل‌های (۲) و (۳)، می‌توان دریافت که افزایش آهن تا حدود یک درصد وزنی موجب بهبود استحکام کششی آلیاژ شده است اما افزودن مقادیر بیشتر این عنصر موجب افت حدوداً ۹ درصدی استحکام می‌شود ضمن آنکه شکل‌گیری ترکیبات بین فلزی غنی از آهن، انعطاف پذیری را نیز تحت تاثیر منفی قرار می‌دهد به گونه‌ای که در غلظتهای مختلف مس، درصد ازدیاد طول آلیاژهای حاوی ۱/۵

مس (پس از ۰/۵ درصد وزنی مس) را می‌توان ناشی از تاثیر منفی افزایش میزان تخلخل‌های بین دندریتی در نمونه‌های مورد بررسی و افزایش کسر حجمی رسوبات سخت و شکننده غنی از مس در مرزهای دانه دانست.

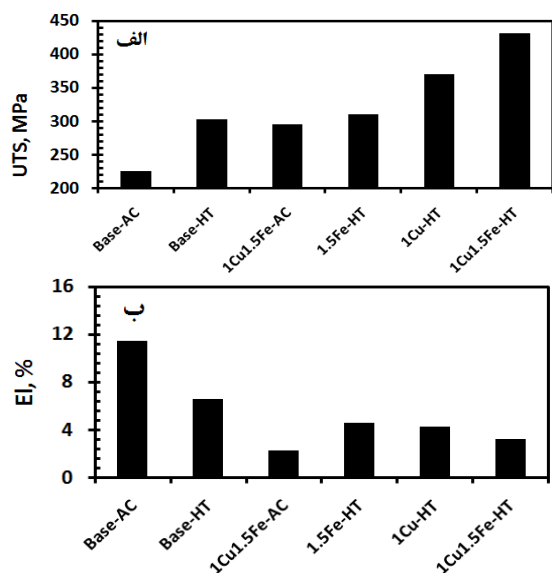
نوع و میزان اثر گذاری آهن به مورفولوژی، ابعاد و نحوه توزیع رسوبات غنی از آهن در زمینه بستگی دارد. به منظور بررسی چگونگی تاثیر ترکیبات β -Al₅FeSi بر خواص کششی آلیاژ A۳۵۶، واکنشهای انجمادی به وقوع پیوسته طی انجماد این آلیاژ ۳۵۶ در حضور مس، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مهمترین واکنش‌هایی که طی انجماد به وقوع می‌پیوندند را می‌توان به شرح ذیل خلاصه نمود [۲۱-۲۲]:

T: T _L -T _E	Development of α -Al dendritic network
"	Liq. = Al + Al ₅ FeSi
T~T _E	Liq. = Al + Si
"	Liq. = Al + Si + Al ₅ FeSi
T < T _E	Liq. = Al + Si + Mg ₂ Si
"	Liq. + Al ₅ FeSi = Al + Si + Al ₈ Mg ₃ FeSi ₆
"	Liq. = Al + Si + Mg ₂ Si + Al ₈ Mg ₃ FeSi ₆
"	Liq. + Mg ₂ Si + Si = Al + Al ₅ Mg ₈ Si ₆ Cu ₂
"	Liq. = Al + Al ₂ Cu + Al ₅ FeSi + Si
"	Liq. = Al + Si + Al ₅ Mg ₈ Si ₆ Cu ₂

همانگونه که مشاهده می‌شود در حضور آهن، ترکیبات β -Al₅FeSi پس از توسعه ساختار دندریتی، در فواصل بین دندریتی آلیاژهای Al-Si رسوب می‌نمایند. تحقیقات نشان داده است که در صورت شکل‌گیری ذرات سخت بتا در نواحی بین دندریتی، این ذرات صفحه ای شکل می‌توانند به صورت مانعی در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل نموده و با افزایش مراکز انباشتگی نابجایی‌ها و سخت شدن لغزش، موجب افزایش سختی و خواص کششی شوند [۲۳-۲۴]. با این حال نقش استحکام‌دهی ذرات فاز دوم در شرایطی حاصل می‌شود که استحکام فصل مشترک این ذرات با زمینه نیز جهت مقابله با تمرکز تنش ایجاد شده، به اندازه کافی بالا باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ذرات β -Al₅FeSi ذاتا دارای پیوند ضعیفی با زمینه بوده و

در شرایط عملیات حرارتی، در حضور هم زمان مس و آهن (حتی ۱/۵ درصد وزنی) استحکام کششی افزایش می‌یابد (شکل ۲-ب). میزان بهبود استحکام کششی آلیاژ ۳۵۶ به واسطه افزودن ۱ درصد مس، ۱/۵ درصد آهن و عملیات حرارتی در مقایسه یا شرایط مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده نمود که استحکام کششی آلیاژ 1Cu1.5Fe-HT نسبت به چهار آلیاژ 1Cu-HT، 1Cu1.5Fe-AC، 1.5Fe-HT و آلیاژ پایه به ترتیب حدود ۱۵، ۴۵، ۴۰ و ۱۰۰ درصد بهبود یافته است. در واقع افزودن ۱ درصد مس موجب بهبود ۷۰ درصدی و افزودن هم زمان ۱ درصد مس و ۱/۵ درصد آهن موجب بهبود ۱۰۰ درصدی استحکام کششی آلیاژ پایه در شرایط عملیات حرارتی، شده است.

بررسی و مقایسه سطوح شکست نمونه‌های کشش (شکل ۷) نیز کمک شایانی به توجیه رفتار مکانیکی نمونه‌ها می‌نماید. حضور دیمپل‌های متعدد بر روی سطح شکست آلیاژ 1Cu1.5Fe-HT (شکل ۷-الف) حاکی از بروز شکست نرم با جذب انرژی بالا در این نمونه است در حالیکه سطح شکست نمونه Base-AC و به‌ویژه نمونه 1Cu-1.5Fe-AC بیانگر وقوع شکست ترد یا کلیوژی در این نمونه‌ها است (شکل ۷-ب).

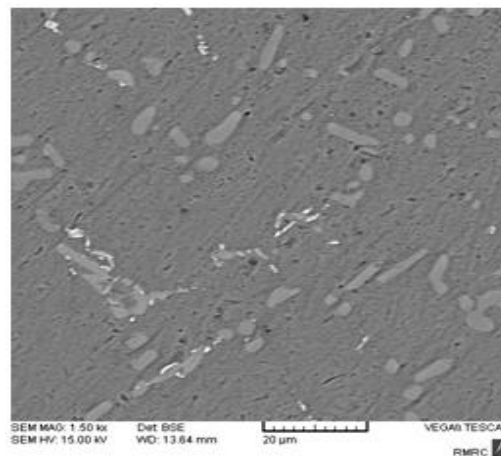


شکل (۶): تاثیر عملیات حرارتی، افزودن مس و آهن بر: (الف): استحکام کششی و (ب): درصد ازدیاد طول آلیاژ ۳۵۶

درصد آهن به طور متوسط بین ۱۵ الی ۶۰ درصد کمتر از آلیاژهای حاوی ۰/۵ درصد آهن است. تاثیر مثبت آهن بر خواص کششی آلیاژهای ریختگی Al-Si و وجود غلظت بحرانی آهن، قبلا توسط محققین دیگر به اثبات رسیده است [۲۵].

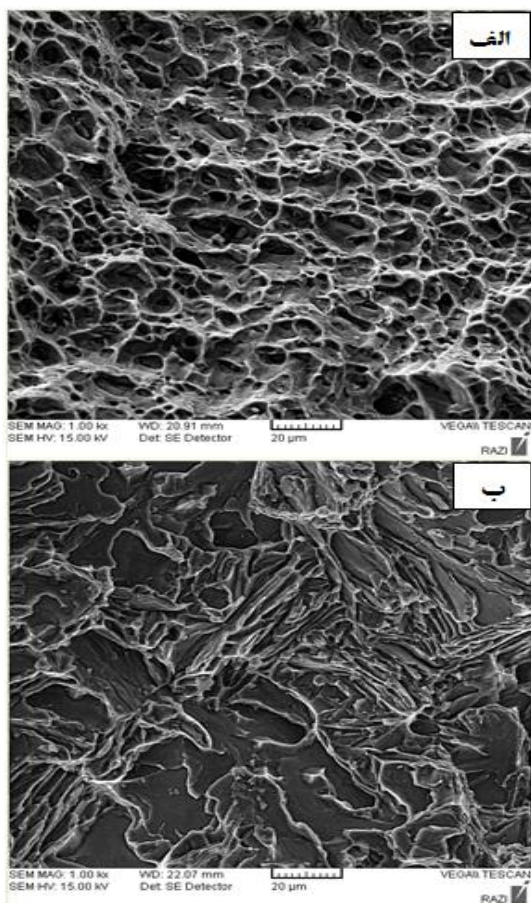
۳-۲- تاثیر مس و عملیات حرارتی بر خواص کششی آلیاژهای Al-7Si-0.35Mg-xFe

بررسی خواص کششی آلیاژهای عملیات حرارتی شده (شکل ۲-ب) حاکی از آن است که پس از اعمال سیکل حرارتی T₆، به سبب استحکام دهی زمینه توسط رسوبات Mg₂Si و بهسازی حرارتی ذرات سیلیسیم یوتکتیک (شکل ۵)، استحکام کششی آلیاژ پایه حدود ۴۰ درصد نسبت به شرایط ریختگی بهبود می‌یابد. تاثیر عملیات حرارتی در بهبود خواص، با افزایش غلظت مس بیش از پیش نمایان می‌شود. با توجه به شکل (۲-ب) استحکام کششی کلیه آلیاژها با افزایش غلظت مس، به صورت خطی افزایش می‌یابد. رشد ۲۲ و ۷۰ درصدی استحکام کششی آلیاژ پایه حاوی ۱ درصد مس به ترتیب در مقایسه با آلیاژهای مشابه حاوی ۰/۰۱ درصد مس در شرایط عملیات حرارتی شده و ریختگی، موید این مطلب است. مهمترین علت این مطلب را می‌توان تقویت استحکام دهی زمینه از طریق رسوبات Al₂Cu کنار رسوبات Mg₂Si عنوان نمود.



شکل (۵): تصویر میکروسکوپی آلیاژ ۳۵۶، نشان دهنده چگونگی بهسازی حرارتی ذرات سیلیسیم یوتکتیک

اندیس کیفیت معیاری است که به منظور بررسی کیفیت متالورژیکی آلیاژهای ریختگی Al-Si-Mg مورد استفاده قرار گرفته و به صورت $Q=UTS+150\log(EI)$ تعریف می‌شود [۲۶-۲۷].



شکل (۷): تأثیر عملیات حرارتی بر مورفولوژی سطح شکست: (الف): آلیاژ 1Cu-1.5Fe-AC و (ب): آلیاژ 1Cu-1.5Fe-HT.

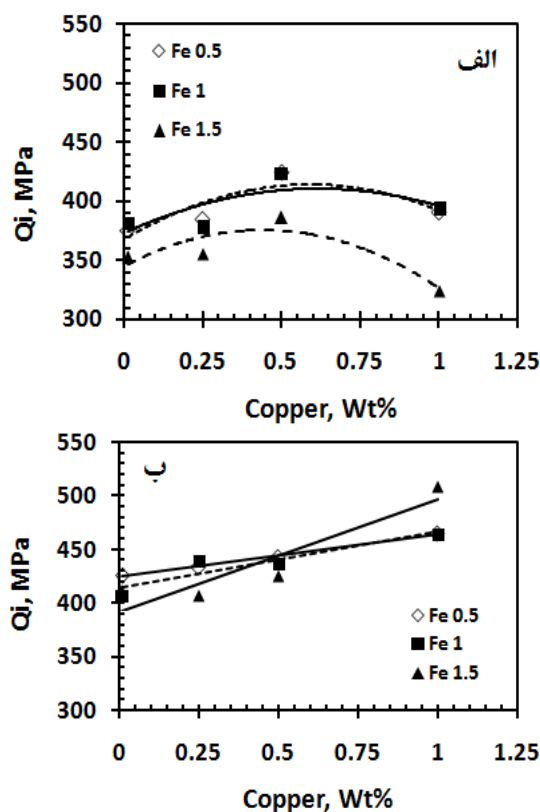
بر این اساس، اندیس کیفیت هم زمان در برگیرنده استحکام کششی (UTS) و درصد ازدیاد طول (EI) ماده است. این اندیس متأثر از پارامترهای متالورژیکی و فرایندی مانند اندازه دانه، فاصله بین بازوهای دندردیتی، میزان تخلخل، میزان آخال، غلظت آهن، سرعت انجماد، عملیات حرارتی و غیره بوده و ابزار بسیار مناسبی جهت بررسی تأثیر عملیات حرارتی و/یا ترکیب

تأثیر مثبت عملیات حرارتی بر ترکیبات بین فلزی غنی از آهن از دو جنبه قابل بررسی است. نخست آنکه با توجه به بالا بودن سرعت انتقال جرم و نرخ نفوذ عناصر در لبه های تیز و نقایص سطحی واقع در سطوح جانبی صفحات بتا (که جزء مناطق با انرژی سطحی بالا به شمار می آیند) در صورت عملیات حرارتی، این ذرات با مکانیزم گلولی شدن به تدریج خرد شده، طول متوسط آنها کاهش یافته و لبه های تیز آنها گرد می‌شود [۱۷-۱۹]. بر این اساس پس از عملیات حرارتی، توزیع ظریف و پراکنده‌ای از صفحات بتا در زمینه ایجاد می‌شود (شکل ۸) که ضمن بهبود سختی و استحکام، تأثیر منفی به مراتب کمتری بر انعطاف‌پذیری آلیاژ دارد. علاوه بر این نفوذ عناصر تشکیل دهنده صفحات بتا طی عملیات حرارتی، علاوه بر کاهش ابعاد و تیزی لبه‌های صفحات بتا، با ایجاد پیوند نفوذی قوی بین ذرات و زمینه، ضمن افزایش استحکام فصل مشترک، نقش بسیار مهمی در بهبود خواص نهایی آلیاژ ایفا می‌کند. وجود میدان‌های کرنشی در فصل مشترک ذرات بتا با زمینه که با بهره‌گیری از TEM توسط گروزلسکی و همکاران وی به اثبات رسیده است، تاییدی بر نقش ذرات بتا در ممانعت از حرکت نابجایی‌ها است [۲۳]. علاوه بر این با توجه به انحلال و کاهش کسر حجمی ترکیبات بین فلزی طی عملیات حرارتی، سهم این رسوبات در اشاعه ترکهای ایجاد شده بسیار کم بوده و رشد ترک عمدتاً مستلزم عبور از فاز نرم زمینه و مناطق بین دندردیتی است.

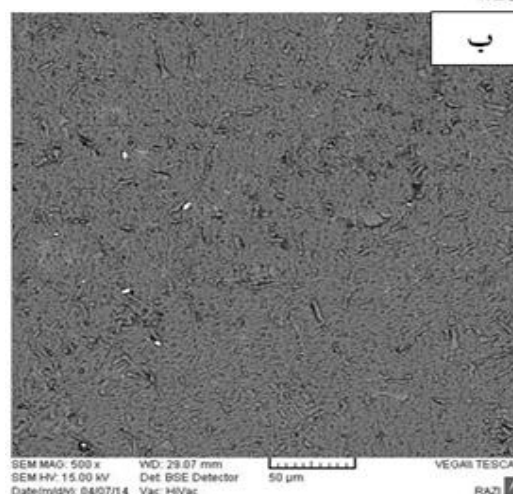
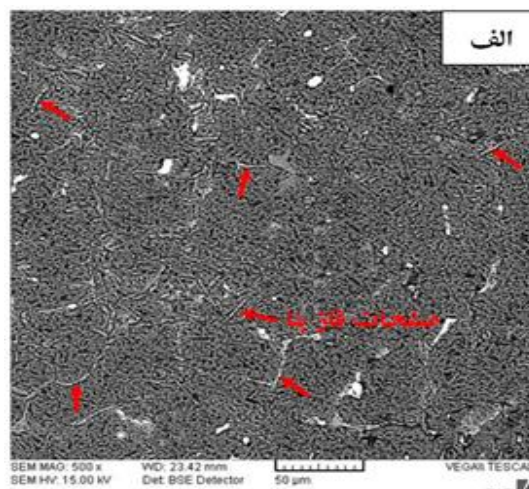
۳-۳- بررسی تغییرات اندیس کیفیت با غلظت مس و آهن و عملیات حرارتی

با توجه به بررسی‌های انجام شده (شکل‌های ۲ و ۳) به طور کلی با افزایش غلظت مس و آهن، استحکام کششی آلیاژ A۳۵۶ افزایش یافته و درصد ازدیاد طول کاهش می‌یابد. با این حال روند و میزان تغییر خواص بسته به انجام یا عدم انجام عملیات حرارتی، متفاوت است. به منظور بررسی تأثیر خالص افزودنی‌های آلیاژی و عملیات حرارتی بر خواص و کیفیت نهایی آلیاژ، می‌توان از پارامتری موسوم به اندیس کیفیت بهره گرفت.

شیمیایی بر بهبود کیفیت متالورژیکی آلیاژهای ریختگی Al-Si-Mg به شمار می آید.



شکل (۹): تغییرات اندیس کیفیت آلیاژ A۳۵۶: (الف): قبل از عملیات حرارتی و (ب): بعد از عملیات حرارتی



شکل (۸): تصویر میکروسکوپی آلیاژ A۳۵۶: (الف): قبل از عملیات حرارتی (برخی از صفحات بتا توسط فلش بر روی شکل مشخص شده‌اند) و (ب): خردایش ترکیبات غنی از آهن بتا در اثر بهسازی حرارتی

در شرایط ریختگی (شکل ۹-الف) با افزایش غلظت مس تا حدود ۰/۵ درصد و صرف نظر از غلظت آهن، اندیس کیفیت افزایش نسبی را تجربه نموده اما پس از آن کاهش می‌یابد. همانگونه که قبلاً نیز عنوان گردید، افزایش غلظت مس از یک سو سختی و استحکام آلیاژ را از طریق استحکام دهی محلول جامد و افزایش کسر حجمی ترکیبات بین فلزی غنی از مس افزایش داده و از سوی دیگر موجب افزایش میزان تخلخل‌های انقباضی/گازی در ساختار می‌گردد. بر این اساس می‌توان گفت تا حدود ۰/۵ درصد وزنی، تاثیر مثبت مس در استحکام دهی زمینه بر تاثیر منفی آن در افزایش کسر حجمی تخلخل‌های ساختاری، غلبه نموده و اندیس کیفیت اندکی بهبود می‌یابد اما در غلظت‌های بالاتر این عنصر، احتمالاً در اثر افزایش کسر حجمی تخلخل‌های گازی/انقباضی و/یا شکل‌گیری تدریجی

تغییرات اندیس کیفیت آلیاژ A۳۵۶ با تغییر غلظت مس و آهن قبل و بعد از عملیات حرارتی در شکل ۹ نشان داده شده است. در شرایط ریختگی (شکل ۹-الف) با افزایش غلظت مس تا حدود ۰/۵ درصد و صرف نظر از غلظت آهن، اندیس کیفیت افزایش نسبی را تجربه نموده اما پس از آن کاهش می‌یابد. تغییرات اندیس کیفیت آلیاژ A۳۵۶ با تغییر غلظت مس و آهن قبل و بعد از عملیات حرارتی در شکل ۹ نشان داده شده است.

حرارتی میزان افت انعطاف پذیری با افزایش مس و آهن کمتر است.

۳- تأثیر مشترک افزودن مس و آهن و عملیات حرارتی بهبود اندیس کیفیت است. بهترین اندیس کیفیت مربوط به نمونه حاوی یک درصد مس و ۱/۵ درصد آهن در شرایط عملیات حرارتی شده است که نسبت به آلیاژ پایه در شرایط ریختگی و عملیات حرارتی شده به ترتیب ۳۵ و ۲۰ درصد بیشتر است.

۵- مراجع

[1] J. R. Davis, ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, OH, 1993.

[۲] ع. نعمتی، ا. حلوی، ا. مباشرپور و ا. ر. عباسیان، "تأثیر پارامترهای ریخته گری و سلامت قطعات هوا فضایی از آلیاژ ۳۵۶ به روش ریخته گری دقیق"، فصلنامه علمی-پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۲، شماره ۱، ۱۷ تا ۲۴، ۱۳۸۷.

[۳] ن - ال. عرب، ص. حبیبی، م. سودمند و ا. شریفی، "بررسی تأثیر نوع جوانه‌زا بر ریزدانه‌گی و پارامترهای انجماد آلیاژ ۳۵۶ به کمک آنالیز حرارتی منحنی‌های سرد شدن"، فصلنامه علمی-پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۲، شماره ۳، ۴۳ تا ۵۲، ۱۳۸۷.

[4] H. Ye, "An Overview of the Development of Al-Si-Alloy Based Material for Engine Applications", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 12, pp. 288-297, 2003.

[5] S. G. Shabestari & H. Moemeni, "Effect of Copper and Solidification Condition on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 193-198, 2004.

[6] M. S. Prabhudev, T. M. Chandra shekharaiah & S. A. Kori, "Effects of Copper Addition on the Microstructure, Mechanical and High Temperature Wear Behavior of A356 Alloy", International Journal of Advanced Engineering Applications, Vol. 2, Issue 2, pp. 17-23, 2009.

شبکه پیوسته Al_2Cu در مرزهای دانه و افت قابل ملاحظه درصد ازدیاد طول (شکل ۳-ب)، اندیس کیفیت افت می نماید.

پس از عملیات حرارتی، اندیس کیفیت کلیه نمونه‌ها با افزایش غلظت مس افزایش می‌یابد به گونه‌ای که اندیس کیفیت آلیاژ Base-AC 1Cu-1.5Fe-HT بیش از ۳۰ درصد در مقایسه با آلیاژ Base-AC افزایش یافته است (شکل ۹-ب). بهبود اندیس کیفیت در آلیاژهای عملیات حرارتی شده نشان می‌دهد که افزایش استحکام کششی در اثر استحکام‌دهی رسوبی ذرات Al_2Cu و Mg_2Si ، بهسازی حرارتی ذرات سیلیسیم یوتکتیک و بهسازی حرارتی ترکیبات بین فلزی غنی از آهن، بر افت انعطاف پذیری آلیاژ پس از عملیات حرارتی، غلبه نموده است.

علی‌رغم وجود برخی تفاوت‌ها در مکانیزم‌های حاکم، بهبود مشاهده شده در اندیس کیفیت آلیاژهای حاوی آهن پس از عملیات حرارتی، در توافق با نتایج سایر محققین است [۳۲-۲۸]. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیقات، افزایش غلظت آهن موجب کاهش اندیس کیفیت در آلیاژهای ریخته‌گی Al-Si می‌شود اما در صورت افزودن مقادیر مناسب از عناصر تصحیح کننده اثر آهن مانند منیزیم، کرم، استرانسیم و برلیم و/یا اعمال سیکل عملیات حرارتی مناسب، می‌توان اندیس کیفیت آلیاژ را بهبود بخشید. این در حالی است که در تحقیق حاضر، بهبود اندیس کیفیت بدون استفاده از عناصر بهساز و از طریق افزودن مس و توسعه استحکام‌دهی رسوبی، حاصل شده است.

۴- نتیجه گیری

۱- با افزایش غلظت مس، استحکام نهایی افزایش می‌یابد به طوری که پیش از انجام عملیات حرارتی نمونه حاوی یک درصد آهن و یک درصد مس بهترین استحکام کششی را دارا است. بعد از عملیات حرارتی به دلیل انحلال صفحات فاز بتا، نمونه حاوی ۱/۵ درصد آهن به ویژه در درصدهای بالاتر از ۰/۲ درصد مس استحکام کششی بهتری نشان می‌دهد.

۲- درصد ازدیاد طول نمونه‌ها با افزایش غلظت مس (و آهن) به طور پیوسته کاهش می‌یابد با این حال در صورت انجام عملیات

- [17] L. Y. Pio, "Effect of T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Gravity Die Cast A356 Aluminum Alloy", *Journal of Applied Science*, Vol. 11, pp. 2048-2052, 2011.
- [18] C. Villeneuve & F. H. Samuel, "Fragmentation and Dissolution of Al₃FeSi Phase using Solution Heat Treatment of Al-13wt%Si-Fe Alloys", *International Journal of Cast Metals Researches.*, Vol. 12, pp. 145-160, 1999.
- [۱۹] ا. اسحاقی، ج. رائی زاده غنی، ح. ر. قاسمی و ر. ض. تقی آبادی، "بررسی اثر عملیات حرارتی محلول سازی بر ریزساختار و خواص سایشی آلیاژ آلومینیم ۳۳۲"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، دوره ۴۳، شماره ۲، ۱۳۹ تا ۱۴۸، ۱۳۸۸.
- [20] C. H. Caceres, I. L. Svensson & J. A. Taylor, "Strength-Ductility Behavior of Al-Si-Cu-Mg Casting Alloys in T6 Temper", *International Journal of Cast Metals Researches*, Vol. 15, pp. 531-543, 2003.
- [21] L. Backerud, G. Chai & J. Tamminen, "Solidification Characteristics of Aluminium Alloys: Foundry Alloys", AFS Skan Aluminium, USA, 1990.
- [22] T. Bogdanoff, "The Influence of Copper on an Al-Si-Mg Alloy (A356)-Microstructure and Mechanical Properties", B.Sc. Thesis, Jonkoping University, 2009.
- [23] M. H. Mulazimoglu, A. Zaluska, J. E. Gruzleski & F. Paray, "Electron Microscope Study of Al-Fe-Si Intermetallics in 6201 Aluminum Alloy", *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 27A, pp. 929-936, 1996.
- [24] O. Vorren, J. E. Evensen & T. B. Pedersen, "Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si (Mg) Casting Alloys", *AFS Transaction*, Vol. 92, pp. 459-466, 1984.
- [25] R. Taghiabadi, H. M. Ghasemi & S. G. Shabestari, "Effect of iron-rich intermetallics on the sliding wear behavior of Al-Si alloys", *Materials Science and Engineering*, Vol. 490A, pp. 162-170, 2008.
- [26] S. Jacob, "Quality index in predicting of properties of aluminum castings-a review", *AFS Transaction*, Vol. 108, pp. 811-818, 2000.
- [7] J. A. Taylor, "Iron-containing intermetallic phases in Al-Si based casting alloys", *Procedia Materials Science*, Vol. 1, pp. 19-33, 2012.
- [8] R. S. Rana, R. Purohit & S. Das, "Reviews on the Influences of Alloying elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys and Aluminum Alloy Composites", *International JOURNAL OF Science Res. Pub*, Vol. 2, No. 6, pp. 1-7, 2012.
- [9] T. O. Mbuya, B. O. Odera & S. P. Ng'ang'a, "Influence of Iron on Castability and Properties of Aluminium Silicon Alloys: Literature Review", *International Journal of Cast Metal Researches*, Vol. 16, pp. 451-462, 2003.
- [10] N. A. Belov, A. A. Aksenov & Dmitry G. Eskin, "Iron in Aluminium Alloys: Impurity and Alloying Element", Taylor and Fransis, New York, 2002.
- [11] C. M. Dinnis, J. A. Taylor & K. Arne, "As-cast Morphology of Iron-Intermetallics in Al-Si Foundry Alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 53, pp. 955-958, 2005.
- [12] P. S. Wang, S. L. Lee, C. Y. Yang & J. C. Lin, "Effect of Beryllium and Non-equilibriums Heat Treatment on Mechanical Properties of B319 Alloy with 1.0% Fe", *Materials Science and Technology*, Vol. 20, pp. 539-545, 2004.
- [13] S. S. Sreeja Kumari, R. M. Pillai, T. P. D. Rajan & B. C. Pai, "Effects of Individual and Combined Additions of Be, Mn, Ca and Sr on the Solidification Behaviour, Structure and Mechanical Properties of Al-7Si-0.3Mg-0.8Fe Alloy", *Materials Science and Engineering*, Vol. 460-461A, pp. 561-573, 2007.
- [14] S. Seifeddine & I. L. Svensson, "The Influence of Fe and Mn Content and Cooling Rate on the Microstructure and Mechanical Properties of A380-Die Casting Alloys", *Materials Science and Technology*, pp. 27-1, 2009.
- [15] K. Liu, X. Cao & X. G. Chen, "Effect of Cooling Rate on Iron-rich Intermetallic Phases in 206 Cast Alloys", *Light Metals*, pp. 311-317, 2013.
- [16] S. G. Shabestari, "The Effect of Iron and Manganese on the Formation of Intermetallic Compounds in Al-Si Alloys", *Materials Science and Engineering*, Vol. 383A, pp. 289-298, 2004.

- [30] P. Moldovan, G. Popescu & M. Butu, "Heat Treatment of Al-7Si-0.3Mg alloy previously inoculated with a new type of quaternary master alloy", U.P.B. Science Bulletin Series, Vol. 69B, No. 2, pp. 91-98, 2007.
- [31] Z. MA, A. M. Samuel, F. H. Samuel, H. W. Doty & S. Valtierra, "Effect of Fe content and cooling rate on the impact toughness of cast 319 and 356 aluminum alloy", AFS Transaction, Vol. 101, pp. 255-265, 2003.
- [32] C. H. Caceres, "Microstructure design and heat treatment selection for casting alloys using the Quality Index", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 92, pp. 215-221, 2000.
- [27] K. A. Ragab, M. Bournane, A. M. Samuel, A. Al-Ahmari, F. H. Samuel & H.W. Doty, "Mechanical characterisation and quality index of A356-type aluminium castings heat treated using fluidised bed quenching", Materials Science and Technology, Vol. 29, No. 4, pp. 412-425, 2003.
- [28] M. F. Ibrahima, S. A. Alkahtani, Kh. A. Abuhasel & F. H. Samuel, "Effect of intermetallics on the microstructure and tensile properties of aluminum based alloys: Role of Sr, Mg and Be addition", Materials and Design, Vol. 86, pp. 30-40, 2015.
- [29] E. Samuel, A. M. Samuel, H. W. Doty, S. Valtierra & F. H. Samuel, "Intermetallic phases in Al-Si based cast alloys: new perspective", International Journal of Cast Metals Research, Vol. 27, No. 2, pp. 107-114, 2014.