

بررسی خواص سایشی آلیاژهای Al-(5-13)Si-Fe

رضا تقی‌آبادی و سامان پولادوند

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین

سعید قدرت‌نما شبستری

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت مقاله : ۹۳/۰۶/۲۳ - پذیرش مقاله : ۹۳/۱۱/۱۲)

چکیده

در این تحقیق تاثیر آهن (۰/۲-۲wt%) بر خواص سایشی آلیاژهای Al-(5-13)Si مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های سایش در دمای محیط، بار ۴۵N، سرعت ۰/۱۳m/s و مسافت ۱۰۰۰m به روش پین روی دیسک انجام شدند. بر اساس نتایج به دست آمده، در غلظت‌های آهن کمتر از غلظت بحرانی (۱/۲wt% در این تحقیق)، افزایش سیلیسیم موجب شکل‌گیری صفحات ظریف AlFeSi در نواحی بین دندریتی شده و بواسطه افزایش سختی زمینه و کاهش سیلان پلاستیک لایه‌های زیر سطحی و پیرو آن افزایش پایداری لایه تریبولوژیکی و کاهش چسبندگی بین سطوح، مقاومت سایشی بهبود می‌یابد بگونه‌ای که نرخ سایش آلیاژ Al-13Si-0.8Fe حدود ۵۰ درصد کمتر از نرخ سایش آلیاژ Al-5Si-0.8Fe است. تحت این شرایط مکانیزم سایش عمدتاً برداشت کنترل شده ماده از لایه تریبولوژیکی با مکانیزم ورقه‌ای شدن و سایش خراشی است. در غلظت‌های آهن بیش از مقدار بحرانی، با وجود افزایش سختی زمینه با افزایش غلظت سیلیسیم، به دلیل افزایش ابعاد و کسر حجمی ترکیبات صفحه‌ای شکل AlFeSi و شکل‌گیری رسوبات درشت اولیه در زمینه، شکل‌گیری و اشاعه ترک‌های زیر سطحی تسهیل گردیده و با افزایش ناپایداری لایه تریبولوژیکی، برداشت ماده از سطح با مکانیزم سایش ورقه‌ای و خراشی لایه تریبولوژیکی تشدید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: Al-Si، خواص سایشی، لایه تریبولوژیکی، هیپوئوتکتیک، ترکیب بین فلزی.

An Investigation on the wear behavior of Al-(5-13)Si-Fe Alloys

S. Pouladvand and R. Taghiabadi

Department of Materials Science and Engineering, Imam Khomeini International University

S. G. Shabestari

Faculty of Materials Science, Iran University of Science and Technology

(Received 14 September 2014, accepted 1 February 2015)

Abstract

The Effect of Fe addition (0.2-2wt%) on the wear behavior of Al-(5-13)Si alloys was investigated. The pin-on-disk wear tests were conducted at room temperature, under normal load of 45N, sliding speed of 0.13 m/s for sliding distance of 1000m. The results showed that below a critical Fe content (1.2wt% in this research), Si addition improved the wear resistance. In this regard, the wear rate of Al-13Si-0.8Fe alloy was observed to be less than 50% of Al-5Si-0.8Fe. This could be attributed to the fine distribution of hard AlFeSi platelets in interdendritic regions that increased the hardness and decreased the subsurface deformation and asperities adhesion. So, controlled delamination within tribolayer as well as abrasive wear could be proposed as the main wear mechanisms. Formation of large primary AlFeSi platelets at the iron content of more than critical value, however, facilitates the initiation and propagation of subsurface cracks and instability of tribolayer. This led to the higher delamination and abrasive wear with higher Si containing alloys.

Keywords: Al-Si, wear properties, Tribological layer, hypoeutectic, intermetallics

Email of corresponding author: taghiabadi@ikiu.ac.ir

مقدمه

در صورت تجاوز غلظت آهن از غلظت بحرانی و شکل‌گیری رسوبات درشت اولیه در ریزساختار، باوجود افزایش سختی زمینه، خواص سایشی شدیداً افت می‌نماید. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که افت خواص سایشی به دلیل بروز شکست در صفحات درشت غنی از آهن در لایه‌های زیرسطحی است که ضمن تسهیل شکل‌گیری و اشاعه ترک‌های میکروسکوپی، موجب کاهش توانایی زمینه در حمایت از لایه تریبولوژیکی شده و نرخ سایش با تشکیل ذرات سایشی نسبتاً درشت ورقه‌ای شکل از لایه تریبولوژیکی، افزایش می‌یابد.

نظر به اهمیت صنعتی آلیاژهای Al-Si و تاثیر قابل‌توجه غلظت آهن و سیلیسیم بر استوکیومتری، مشخصات ابعادی، مورفولوژی و کسر حجمی رسوبات غنی از آهن، در این پژوهش سعی شده است که طی یک مطالعه سیستماتیک خواص تریبولوژیکی آلیاژهای Al-Si در مقادیر مختلف آهن و سیلیسیم مورد بررسی قرار گیرد.

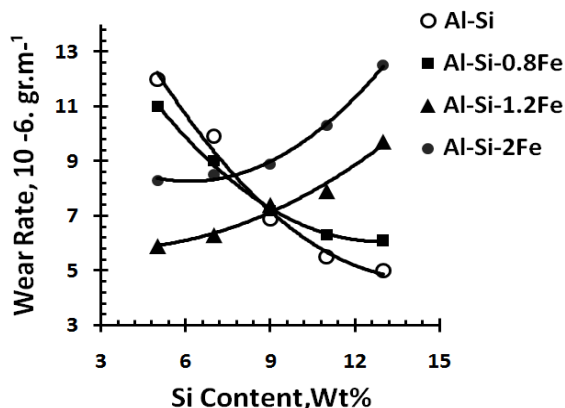
مواد و روش آزمایش

نمودار درختی آلیاژهای مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۱) ارائه شده است. عملیات ذوب آلیاژها تحت پوشش فلاکس محافظ کاورال ۱۱ فوسیکو، در یک بوتله گرافیتی/کوره مقاومتی انجام شد و پس از تثبیت دمای مذاب در حدود 750°C ، مقادیر مورد نظر سیلیسیم و آهن به ترتیب از طریق آمیزان‌های حاوی ۰.۸٪ سیلیسیم و ۰.۷۵٪ آهن به مذاب افزوده شد. پس از گاززدایی مذاب توسط قرص‌های گاززدای پایه نیتروژن و سرباره‌گیری، عملیات بارریزی در دمای $720 \pm 5^{\circ}\text{C}$ در یک قالب چدنی نمونه کشش (ASTM B 557M-02a) پیشگرم شده تا 250°C (سرعت انجماد متوسط حدود 3°C/s) انجام شد [۵]. آزمون کشش با استفاده از یک دستگاه کشش تک محوری تحت سرعت 0.5mm/min و آزمون سختی به روش برینل با فرورونده ساچمه‌ای با قطر 2.5mm تحت نیروی $30/6\text{kgf}$ انجام شد. آزمون سایش به روش پین روی

نظر به اهمیت صنعتی آلیاژهای ریختگی Al-Si به تازگی تحقیقاتی در زمینه تاثیر پارامترهای مختلف ماده و فرآیند تولید بر خواص تریبولوژیکی این آلیاژها صورت پذیرفته است. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیقات، یکی از مهمترین عوامل موثر بر خواص تریبولوژیکی آلیاژهای Al-Si ، ترکیب شیمیایی (نوع و میزان عناصر آلیاژی و ناخالصی‌ها) است که با توجه به متغیرهای فرآیند تولید (سرعت انجماد، عملیات حرارتی و غیره) ساختار متالورژیکی نهایی آلیاژ (شکل، ابعاد و نحوه توزیع ذرات فاز ثانوی و ترکیبات بین‌فلزی و عیوب ساختاری) را تعیین می‌کند [۱-۳].

آهن یکی از رایج‌ترین ناخالصی موجود در آلیاژهای آلومینیم است که با توجه به افت شدید حلالیت طی انجماد، اغلب به صورت رسوبات بین فلزی غنی از آهن، در زمینه آلیاژ پدیدار می‌شود. از جمله مهمترین رسوبات غنی از آهن در آلیاژهای Al-Si می‌توان به Al_5FeSi (فاز α) یا بتا یا β) با مورفولوژی صفحه‌ای و $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ (فاز آلفا یا α) با مورفولوژی حروف چینی اشاره نمود [۴]. مشخصات ابعادی، مورفولوژی و کسر حجمی رسوبات غنی از آهن اثر تعیین‌کننده‌ای بر خواص مکانیکی به ویژه خواص کششی آلیاژهای Al-Si دارند [۱]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این ترکیبات سخت باوجود افزایش سختی، می‌توانند اثرات نامطلوب و منفی بر انعطاف‌پذیری آلیاژ داشته باشند. بر این اساس خواص تریبولوژیکی بهینه در یک غلظت آهن بحرانی که متاثر از ترکیب شیمیایی آلیاژ (به ویژه غلظت سیلیسیم) و سرعت انجماد است، حاصل می‌شود [۱-۳]. در غلظت‌های کمتر از غلظت بحرانی، سختی زمینه به واسطه شکل‌گیری ترکیبات غنی از آهن در نواحی بین دندرتی افزایش می‌یابد، اما با توجه به پایین بودن کسر حجمی و ابعاد ظریف رسوبات صفحه‌ای شکل، تاثیر این رسوبات بر افت انعطاف‌پذیری زمینه قابل‌توجه نبوده و نتیجه حضور این ترکیبات بهبود خواص سایشی است [۱-۳].

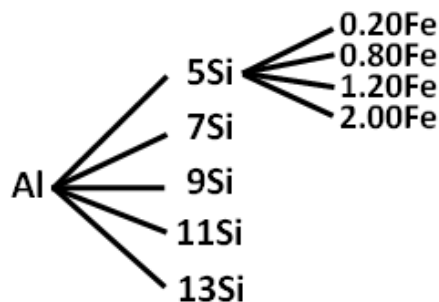
اگر نرخ تشکیل لایه تریبولوژیکی از نرخ برداشت آن بیشتر باشد، این لایه در نقش یک لایه محافظ می‌تواند موجب کنترل نرخ سایش شود اما هر عاملی که موجب تضعیف لایه و افزایش نرخ برداشت آن از روی سطح گردد، نرخ سایش آلیاژ را افزایش می‌دهد.



شکل ۲. تغییرات نرخ سایش بر حسب میزان سیلیسیم برای آلیاژهای دوتایی Al-Si حاوی مقادیر مختلف آهن.

در آلیاژهای حاوی مقادیر بسیار کم آهن، با افزایش غلظت سیلیسیم خواص سایشی بهبود می‌یابد. تاثیر مثبت سیلیسیم بر خواص سایشی را می‌توان از دو جنبه مورد بررسی قرار داد: با افزایش غلظت سیلیسیم، کسر حجمی و پیوستگی فاز یوتکتیک افزایش می‌یابد (۳۰٪ بازای ۵٪ سیلیسیم تا حدود ۱۰۰٪ در آلیاژ یوتکتیک). یوتکتیک Al-Si شبکه‌ای متشکل از ذرات سخت، شکننده و تیغه‌ای شکل سیلیسیم در زمینه نرم آلومینیم است و با افزایش کسر حجمی این فاز، سختی و استحکام آلیاژ افزایش می‌یابد (شکل‌های ۳ و ۴-الف). از دیدگاه تریبولوژی، افزایش سختی و استحکام از یک سو چسبندگی و تغییر شکل دندانه‌ها^۱ را کاهش داده و از سوی دیگر با کاستن از سیلان لایه‌های زیر سطحی، توانایی زیرلایه در حفظ لایه تریبولوژیکی بر روی سطح پین را افزایش می‌دهد، لذا انتظار می‌رود که مقاومت سایشی آلیاژ افزایش یابد.

دیسک با بهره‌گیری از پین‌های آلومینیومی با قطر ۹mm در مقابل دیسکی از جنس فولاد SPK با سختی HRC 60 ± 2 در دمای محیط، تحت بار ۴۵N، سرعت ۰/۱۳m/s و مسافت ۱۰۰۰m انجام شد.



شکل ۱. نمودار درختی آلیاژهای مورد استفاده در تحقیق.

نتایج و بحث

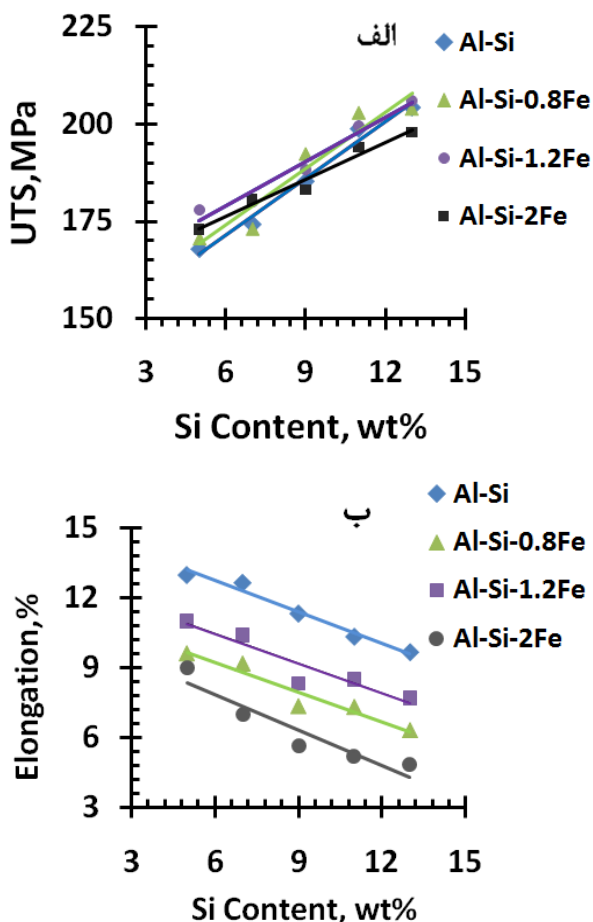
تاثیر سیلیسیم بر خواص سایشی

تاثیر میزان سیلیسیم بر خواص سایشی آلیاژهای Al-Si حاوی مقادیر مختلف آهن در شکل ۲ ارایه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود آلیاژهای Al-Si حاوی مقادیر مختلف آهن در غلظت‌های مختلف سیلیسیم، رفتار سایشی متفاوتی از خود ارایه می‌کنند.

به منظور تجزیه و تحلیل تاثیر متقابل غلظت سیلیسیم و آهن بر خواص سایشی آلیاژهای Al-Si ، تاثیر این عوامل بر پایداری لایه تریبولوژیکی بعنوان عاملی مهم در تعیین خواص سایشی و مکانیزم سایش، مورد بررسی قرار می‌گیرد. «لایه تریبولوژیکی» لایه‌ای است نسبتاً متراکم که به تدریج و بواسطه اختلاط مکانیکی-شیمیایی ذرات سایشی شکل گرفته طی تماس لغزشی پین با دیسک فولادی، بر روی سطح آلیاژ شکل می‌گیرد. در حضور این لایه، تماس مستقیم بین زمینه آلومینیومی و دیسک فولادی محلود شده و احتمال بروز چسبندگی به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد ضمن آن‌که استحکام برشی لایه مذکور معمولاً کمتر از زمینه بوده و حضور آن می‌تواند موجب کاهش ضریب اصطکاک شود [۶ و ۷]. تحت شرایط سایش لغزشی

¹ Asperities

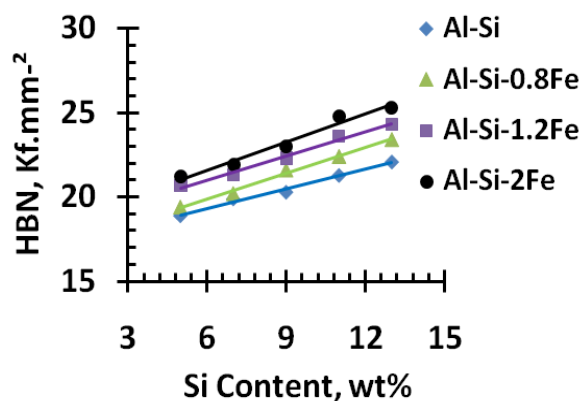
(شکل ۳) اما با وجود افزایش سختی، رفتار سایشی آلیاژهای Al-Si در حضور این ترکیبات متفاوت است (شکل ۲).



شکل ۴. تاثیر غلظت سیلیسیم بر (الف) استحکام کششی و (ب) درصد ازدیاد طول آلیاژهای دوتایی Al-Si حاوی مقادیر مختلف آهن.

در مقادیر کم، حضور آهن موجب بهبود خواص سایشی آلیاژهای Al-Si می‌شود اما در صورت تجاوز آهن از یک غلظت بحرانی (حدود ۱/۲ درصد وزنی در این تحقیق)، با افزایش درصد سیلیسیم نرخ سایش افزایش می‌یابد. با وجود روند افزایشی نرخ سایش آلیاژهای حاوی بیش از ۱/۲ درصد آهن با درصد سیلیسیم، نرخ سایش این آلیاژها در نمونه‌های حاوی کمتر از حدود ۹ درصد سیلیسیم (مثلاً دو آلیاژ Al-5Si-1.2Fe و Al-7Si-1.2Fe)، کمتر از نرخ

با وجود بهبود سختی و استحکام کششی، افزایش غلظت سیلیسیم تاثیر منفی بر انعطاف‌پذیری آلیاژ دارد (شکل ۴-ب). کاهش درصد ازدیاد طول با افزایش غلظت سیلیسیم را می‌توان به مورفولوژی تیغه‌ای، ماهیت شکننده و فصل‌مشترک بسیار ضعیف ذرات سیلیسیم با زمینه نسبت داد که در صورت اعمال بار، در نقش مراکز جوانه‌زنی و اشاعه ترک‌های زیر سطحی عمل نموده و ترک‌های میکروسکوپی حاصله می‌توانند به آسانی از طریق شبکه یوتکتیک (که کسر حجمی و پیوستگی آن با افزایش غلظت سیلیسیم افزایش می‌یابد) اشاعه یابند [۹-۱۲].



شکل ۳. تاثیر غلظت سیلیسیم بر سختی آلیاژهای دوتایی Al-Si حاوی مقادیر مختلف آهن.

تسهیل جوانه‌زنی و اشاعه ترک، تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای در تضعیف و کاهش توانایی زیرلایه در حمایت از لایه تریبولوژیکی و کاهش مقاومت به سایش داشته [۶] و انتظار می‌رود که با افزایش غلظت سیلیسیم، مقاومت سایشی آلیاژهای Al-Si افت نماید. با این حال بررسی نتایج حاصله (در محدوده غلظت سیلیسیم مورد بررسی) حاکی از آن است که برآیند اثرات مثبت و منفی افزایش غلظت سیلیسیم، بهبود خواص سایشی است.

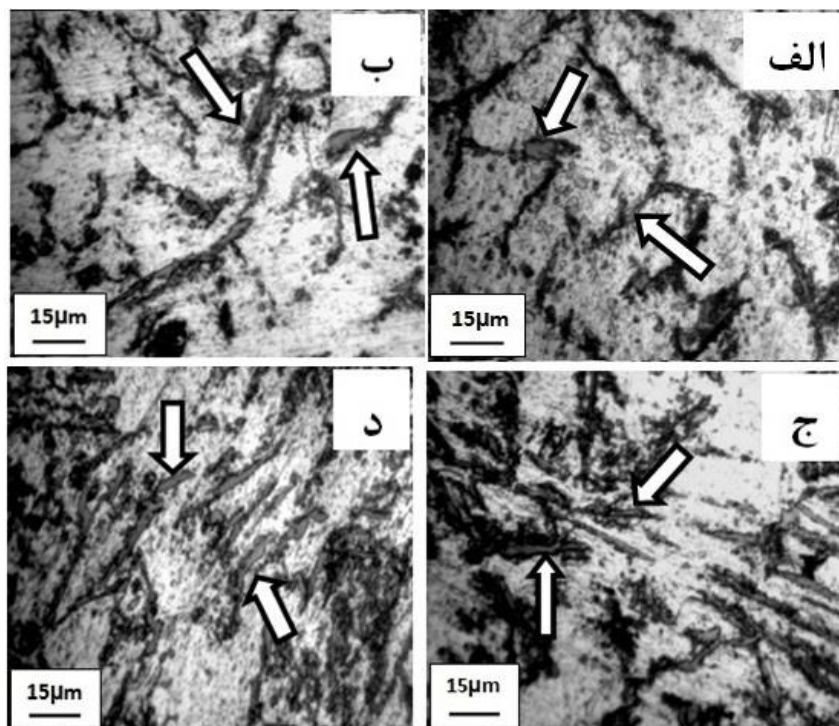
تاثیر متقابل آهن و سیلیسیم بر خواص سایشی با افزایش غلظت آهن به دلیل افزایش کسر حجمی ترکیبات بین‌فلزی و سخت AlFeSi، سختی آلیاژ افزایش می‌یابد

شکل‌گیری و توزیع رسوبات غنی از آهن با تغییر غلظت آهن و سیلیسیم، با در نظر گرفتن گوشه غنی از آلومینیم دیاگرام Al-Si-Fe (شکل ۶) و رسم خطوط جدایش شیل [۴] در آلیاژهای حاوی مقادیر مختلف سیلیسیم و آهن قابل بررسی است. در غلظت‌های کم سیلیسیم (تا حدود ۷ درصد) و صرف‌نظر از مقدار آهن، انجماد با شکل‌گیری دندریتهای $\alpha\text{-Al}$ آغاز و با رسوب ترکیبات غنی از آهن $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ و $\alpha\text{-Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ (یوتکتیک دو تایی با $\alpha\text{-Al}$) و یوتکتیک Al-Si (یوتکتیک سه تایی)، در نواحی بین‌دندریتی ادامه می‌یابد.

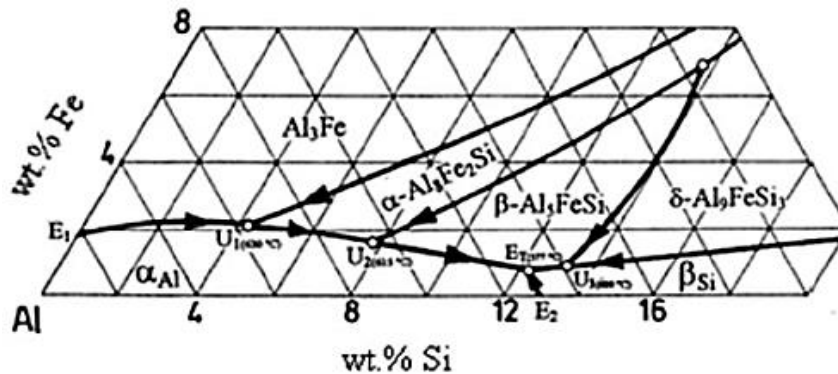
فرآیند انجماد در آلیاژهای حاوی ۹ درصد سیلیسیم بسته به غلظت آهن، متفاوت است. اگر غلظت آهن کمتر از حدود ۱/۵ درصد باشد، انجماد با شکل‌گیری دندریتهای $\alpha\text{-Al}$ آغاز شده و با رسوب دو فاز $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ (یوتکتیک دو تایی با $\alpha\text{-Al}$) و یوتکتیک Al-Si (یوتکتیک سه تایی) در نواحی بین‌دندریتی ادامه می‌یابد.

سایش آلیاژ پایه و آلیاژهای حاوی ۰/۸ درصد آهن است. این نتیجه‌گیری در آلیاژهای حاوی ۲ درصد آهن نیز صادق است منتها در مورد این آلیاژها غلظت بحرانی سیلیسیم حدود ۷ درصد است (شکل ۲).

تاثیر غلظت آهن بر ریزساختار دو آلیاژ Al-5Si و Al-13Si در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزودن آهن، رسوباتی صفحه‌ای شکل در زمینه آلیاژ شکل گرفته است که بر اساس نتایج آنالیز نقطه‌ای به طور میانگین حاوی ۱۶/۸۸ درصد اتمی آهن، ۱۵/۴۸ درصد اتمی سیلیسیم و ۶۷/۰۴ درصد اتمی آلومینیم (مطابق با ترکیب متوسط رسوبات $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ [۱۴-۱۲]) هستند. با افزایش غلظت آهن به خصوص در آلیاژ یوتکتیک غنی از سیلیسیم، کسر حجمی و طول متوسط صفحات بتا افزایش یافته و این صفحات علاوه بر نواحی بین‌دندریتی، به صورت ذرات بتای اولیه در زمینه (دندریتهای $\alpha\text{-Al}$) نیز مشاهده می‌شوند.



شکل ۵. ریزساختار آلیاژهای دو تایی Al-Si حاوی مقادیر مختلف سیلیسیم و آهن (الف) Al-5Si-1.2Fe ، (ب) Al-5Si-2Fe ، (ج) Al-13Si-0.8Fe و (د) Al-13Si-2Fe .



شکل ۶. گوشه غنی از آلومینیم دیگرام فازی سه تایی Al-Si-Fe [۱۶].

بسیار ضعیفی با زمینه دارد [۱۲]. بنابراین در صورت اعمال بار، احتمال جوانه‌زنی ترک از ذرات بتا و/یا فصل مشترک ضعیف این ذرات با زمینه، بسیار زیاد است و این احتمال با افزایش ابعاد و کسر حجمی ذرات، افزایش می‌یابد. از سوی دیگر تحقیقات نشان می‌دهد که فاز بتا از طریق جوانه‌زنی بر روی سطوح ترشونده فیلم‌های اکسیدی دوگانه محبوس، انرژی خود را کاهش می‌دهد [۱۵]. این فرآیند باعث نازک و کشیده شدن فیلم‌های اکسیدی دو لایه شده و اگر رشد صفحات در دو وجه فیلم‌های اکسیدی دوگانه صورت پذیرد، بلوری با یک ترک مرکزی پدید می‌آید (شکل ۷) که اثرات نامطلوبی بر خواص مکانیکی و سایشی آلیاژها خواهد داشت. با این وجود، تاثیر بتا بر خواص آلیاژهای Al-Si قویا متاثر از شرایط انجمادی است که مورفولوژی، ابعاد، نحوه توزیع و کسر حجمی ذرات را تعیین می‌نماید [۱۵]. رسوبات ریز و بین‌دندریتی بتا (آلیاژهای حاوی ۰/۸ و ۱/۲ درصد آهن) به عنوان مانعی در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل نموده و با افزایش مراکز انباشت نابجایی، می‌توانند موجب افزایش استحکام آلیاژ شوند. با توجه به کم بودن کسر حجمی و سهم این رسوبات در جوانه‌زنی و اشاعه ترک، رشد ترک مستلزم عبور از فاز نرم زمینه و مناطق بین‌دندریتی است اما در صورت شکل‌گیری صفحات درشت بتای اولیه در ریز ساختار، خواص کششی آلیاژ به خصوص در مقادیر بالاتر سیلیسیم، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (شکل ۴). با توجه به

اما اگر غلظت آهن بیش از حدود ۱/۵ درصد وزنی باشد، انجماد با رسوب فاز بتای اولیه آغاز شده و با شکل‌گیری α -Al، β -Al₅FeSi (یوتکتیک دوتایی) و یوتکتیک Al-Si (یوتکتیک سه‌تایی) در نواحی بین‌دندریتی ادامه می‌یابد. انجماد آلیاژهای Al-11Si و Al-13Si از روندی تقریباً مشابه با Al-9Si تبعیت می‌کند به جز آن‌که غلظت بحرانی آهن در این آلیاژها به ترتیب حدود ۱/۲ و ۱ درصد وزنی است. اگر غلظت آهن کمتر از ۱ باشد انجماد با شکل‌گیری فاز یوتکتیک آغاز شده و با تشکیل رسوبات بتا طی دو واکنش یوتکتیک دوتایی و سه‌تایی، ادامه می‌یابد. اگر غلظت آهن بیش از ۱ درصد باشد ابتدا بتای اولیه و در ادامه یوتکتیک (دوتایی و سه‌تایی) متشکل از α -Al، β -Al₅FeSi و یوتکتیک Al-Si متبلور می‌شوند. بنابراین در یک سرعت انجماد معین، با تغییر غلظت سیلیسیم، علاوه بر تغییر کسر حجمی و پیوستگی فاز یوتکتیک، نوع، ابعاد، کسر حجمی و نحوه توزیع رسوبات غنی از آهن شکل گرفته در زمینه آلیاژ نیز تغییر می‌کند.

تاثیر ترکیبات بین‌فلزی صفحه‌ای شکل بتا بر خواص آلیاژهای Al-Si قبلا توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲-۱۴]. مورفولوژی صفحه‌ای و بالا بودن نسبت طول به عرض در ذرات بتا (به خصوص ذرات بتای اولیه)، احتمال بروز تمرکز تنش شدید بر روی این ذرات را افزایش می‌دهد. این در شرایطی است که بتا فازی سخت و شکننده بوده و فصل مشترک غیر نفوذی آن، پیوند

لایه بر روی سطح افزایش می‌یابد (شکل ۸-ب). تحت این شرایط، مکانیزم سایش را همچنان می‌توان تلفیقی از چسبندگی، ورقه‌ای شدن لایه تریبولوژیکی و سایش خراشی در نظر گرفت با این حال به سبب افزایش پایداری لایه تریبولوژیکی از یک سو و کاهش نرخ سایش (سایش خفیف) از سوی دیگر (شکل ۲)، انتظار می‌رود که شدت چسبندگی و اندرکنش بین سطوح به میزان قابل توجهی کاهش یابد. مورفولوژی هم‌محور و کاهش قطر متوسط ذرات ناشی از سایش در آلیاژ Al-13Si (شکل ۹-ب) در مقایسه با آلیاژ Al-5Si (شکل ۹-الف) این مطلب را تایید می‌کند.

با افزودن آهن به آلیاژ و شکل‌گیری ترکیبات بین‌فلزی غنی از آهن در زمینه، نرخ و مکانیزم سایش متاثر از مورفولوژی، ابعاد، کسر حجمی و نحوه توزیع این ترکیبات در زمینه تغییر می‌کند. بهترین خواص سایشی در نمونه‌های حاوی آهن مربوط به آلیاژ Al-5Si-1.2Fe است (شکل ۲). بررسی هم‌زمان سطح سایش و نواحی زیرسطح سایش این آلیاژ حاکی از تاثیر مثبت توزیع ظریف ترکیبات بین‌فلزی سخت در نواحی بین‌دندرتی، بر استحکام بخشی زیرلایه، افزایش پایداری لایه تریبولوژیکی و شکل‌گیری یک لایه تقریباً فشرده بر روی سطح است. با توجه به شکل ۱۰-الف و در تطابق با تصاویر تهیه شده از ذرات سایشی این نمونه (شکل ۹-ج)، سایش و برداشت ماده از لایه تریبولوژیکی شکل گرفته بر روی سطح این آلیاژ از طریق شکل‌گیری ذرات سایشی ریز و هم‌محور شاید در اثر تلفیقی از سه مکانیزم اصلی چسبندگی، سایش ورقه‌ای و سایش خراشی در محدوده سایش خفیف است. در صورت تجاوز غلظت آهن از حد بحرانی، ذرات بتای اولیه به صورت صفحاتی درشت در زمینه پدیدار می‌شوند. کسر حجمی و ابعاد این صفحات به مراتب بیش از صفحات بین‌دندرتی بوده و با افزایش غلظت آهن و سیلیسیم افزایش می‌یابد (شکل ۵ ج و د).

شکل ۴-الف، استحکام کششی دو آلیاژ حاوی $1/2$ و 2 درصد آهن در غلظت‌های کم سیلیسیم بهتر از آلیاژ پایه و آلیاژ حاوی $0/8$ درصد آهن است اما افت روند کاهشی استحکام این دو آلیاژ (به خصوص آلیاژ حاوی 2 درصد آهن) و انعطاف‌پذیری کلیه آلیاژها با افزایش غلظت سیلیسیم، نشان دهنده تاثیر منفی فاز بتای اولیه و افزایش کسر حجمی و پیوستگی فاز یوتکتیک است که موجب می‌شود مسیرهای اشاعه آسان ترک به میزان قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یابند.

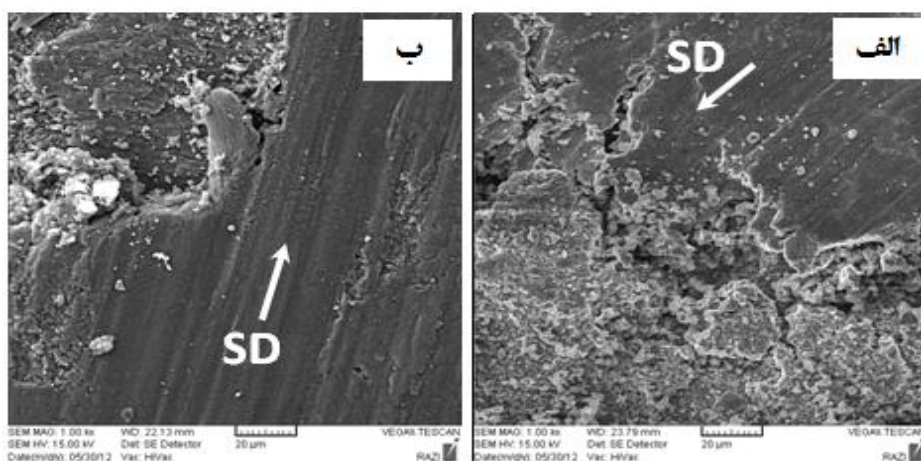


شکل ۷. چگونگی جوانه زنی و اشاعه ترک از فصل مشترک فاز بتا با زمینه در آلیاژ Al-5Si-1.2Fe .

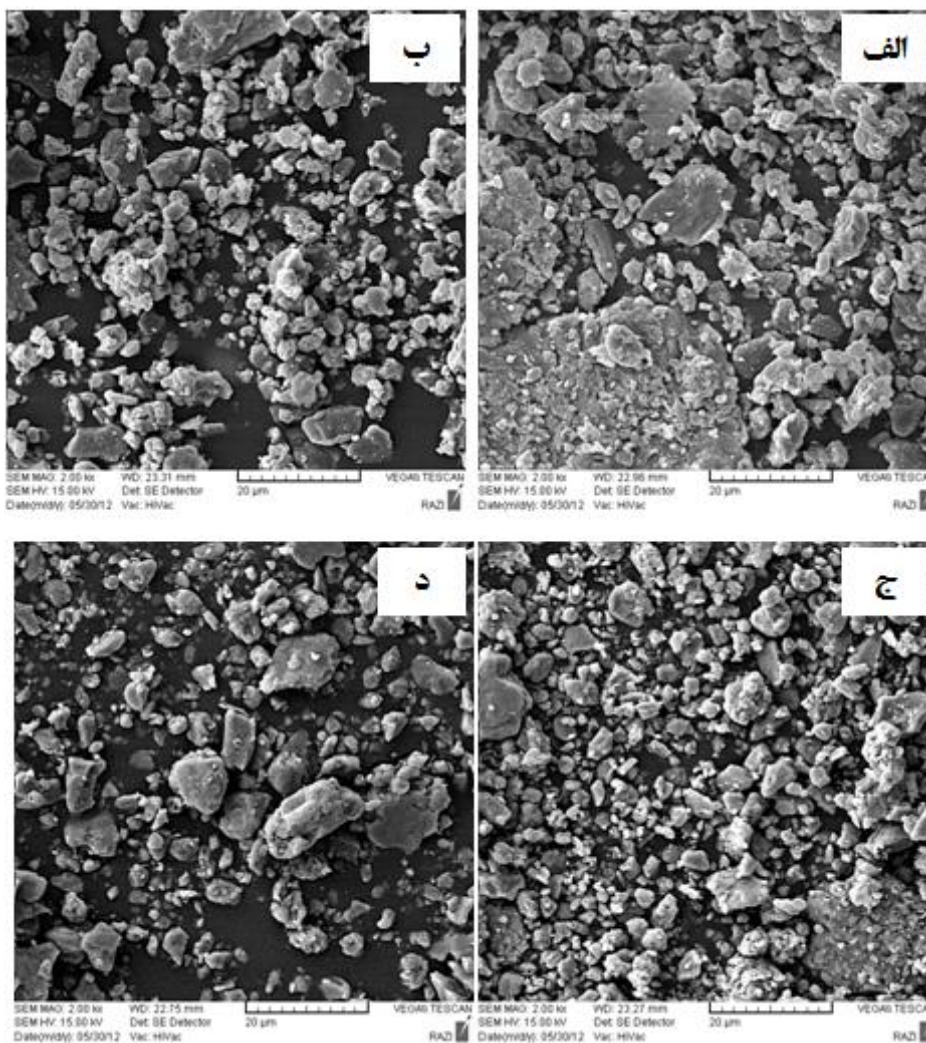
تاثیر متقابل آهن و سیلیسیم بر مکانیزم سایش

خواص سایشی آلیاژهای Al-Si بدون آهن با افزایش غلظت سیلیسیم تا حدود 13 درصد وزنی، بهبود می‌یابد (شکل ۲). تصویر سطح سایش دو آلیاژ حاوی 5 و 13 درصد سیلیسیم در شکل ۸ نشان داده شده است. سطح سایش Al-5Si (شکل ۸-الف) شامل کندگی‌های نسبتاً وسیع و خراش‌هایی میکروسکوپی در جهت لغزش است. در این شرایط مکانیزم سایش شاید تلفیقی از چسبندگی، ورقه‌ای شدن لایه تریبولوژیکی و سایش خراشی بواسطه اندرکنش سطح با ذرات سایشی است. با افزایش غلظت سیلیسیم و به تبع آن افزایش سختی و توانایی زیر لایه در حمایت از لایه تریبولوژیکی (آلیاژ Al-13Si)، پایداری

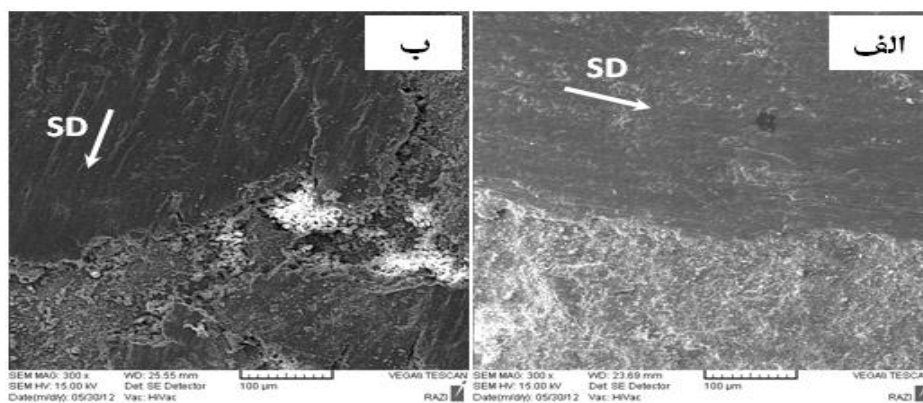
تقی‌آبادی و همکاران، بررسی خواص سایشی آلیاژهای Al-(5-13)Si-Fe ، علوم و مهندسی سطح ۲۴ (۱۳۹۴)



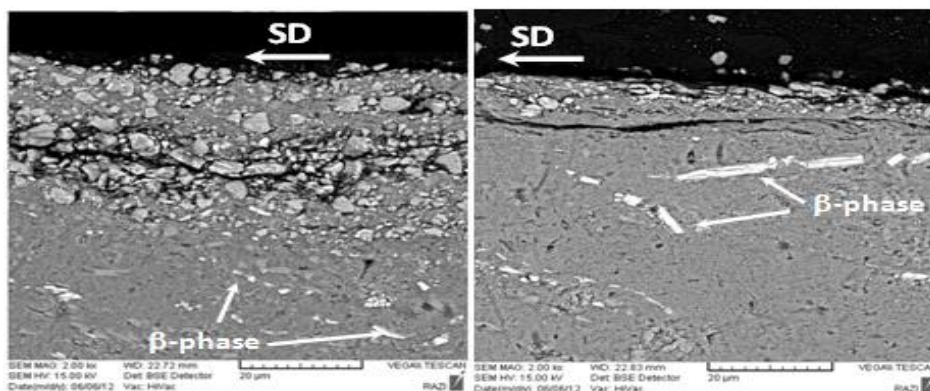
شکل ۸. تصویر میکروسکوپی الکترونی از سطح سایش (SD: جهت لغزش) آلیاژ Al-5Si (الف) و آلیاژ Al-13Si (ب)



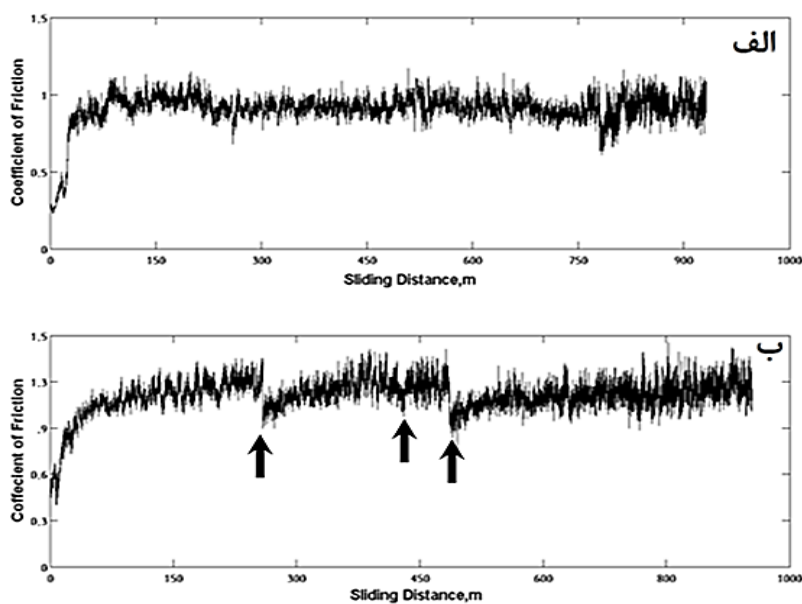
شکل ۹. تصویر میکروسکوپی ذرات ناشی از سایش آلیاژ Al-5Si-1.2Fe (الف)، آلیاژ Al-13Si (ب)، آلیاژ Al-13Si-2Fe (ج) و آلیاژ Al-13Si-2Fe (د)



شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپی الکترونی از سطح سایش (SD: جهت لغزش) آلیاژ Al-5Si-1.2Fe (الف) و آلیاژ Al-13Si-2Fe (ب)



شکل ۱۱. تصویر میکروسکوپی زیر سطح سایش (الف) آلیاژ Al-5Si-1.2Fe و (ب) آلیاژ Al-13Si-2Fe ذرات بتا و جهت لغزش با فلش بر روی شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش آلیاژ Al-5Si-1.2Fe (الف) و آلیاژ Al-13Si-2Fe (ب)

نتیجه گیری

- ۱- خواص سایشی آلیاژهای Al-Si-Fe متأثر از ابعاد، کسر حجمی و نحوه توزیع ترکیبات بین‌فلزی و غنی از آهن AlFeSi در زمینه آلیاژ است.
- ۲- توزیع ظریف ترکیبات غنی از آهن در نواحی بین‌دندریتی با افزایش سختی و توانایی لایه‌های زیر سطحی در حمایت از لایه تریبولوژیکی، موجب بهبود خواص سایشی می‌شود.
- ۳- با افزایش غلظت آهن (بیش از غلظت بحرانی) و سیلیسیم، بواسطه شکل‌گیری صفحات درشت AlFeSi، باوجود افزایش سختی زمینه، جوانه‌زنی و اشاعه ترک‌های میکروسکوپی در نواحی زیرسطحی تسهیل شده و مقاومت سایشی افت می‌نماید.
- ۴- بهترین و بدترین خواص سایشی در آلیاژهای مورد بررسی به ترتیب مربوط به دو آلیاژ Al-5Si-1.2Fe و Al-13Si-2Fe است.

مراجع

1. R. Taghiabadi, H. M. Ghasemi and S. G. Shabestari, *Effect of iron-rich intermetallics on the sliding wear behavior of Al-Si alloys*, Mat. Sci. Eng. A 490(2008)162-170.
2. V. Abouei, H. Saghafian, S. G. Shabestari and M. Zarghami, *Effect of Fe-rich intermetallics on the wear behavior of eutectic Al-Si piston alloy (LM13)*, Materials and Design, 31 (2010) 3518-3524.
3. V. Abouei, S. G. Shabestari and H. Saghafian, *Dry sliding wear behavior of hypereutectic Al-Si piston alloys containing iron-rich intermetallics*, Materials Characterization, 61(2010)1089-1096.
4. J. A. Taylor, *The effect of iron in Al-Si casting alloys*, Cooperative Research Centre For Cast Metals Manufacturing (CAST), The University of Queensland, Brisbane, Australia.
5. ASTM B557M-02a, *Standard Test Methods of Tension Testing Wrought*

این ذرات بین‌فلزی به سبب ابعاد بزرگ، طبیعت شکننده و در برداشتن ترک‌های درونی، در اثر کرنش‌های زیر سطحی به سهولت خرد شده و ضمن افت قابل توجه اثر بخشی‌شان در افزایش استحکام زیرلایه، در راستای لغزش جهت‌گیری نموده، همراه با ذرات سیلیسیم به صورت ذراتی مجزا به تدریج وارد لایه تریبولوژیکی شده و از انسجام آن می‌کاهند. تصویر میکروسکوپی نواحی زیر سطح سایش دو آلیاژ Al-13Si-2Fe و Al-5Si-1.2Fe (شکل ۱۱) موید چگونگی خردایش و ورود تدریجی ذرات غنی از آهن به درون لایه تریبولوژیکی و تسهیل جوانه‌زنی و اشاعه ترک‌های میکروسکوپی در لایه تریبولوژیکی از فصل مشترک ذرات است. بر این اساس به نظر می‌رسد که دو مکانیزم اصلی سایش پس از شکل‌گیری لایه تریبولوژیکی بر روی سطح نمونه‌های غنی از آهن و سیلیسیم عبارتند از ورقه‌ای شدن گسترده لایه تریبولوژیکی و خراش سه‌جسمه لایه در اثر اندرکنش با ذرات سایشی و ترکیبات بین‌فلزی.

بررسی تغییرات ضریب اصطکاک دو نمونه Al-13Si-2Fe و Al-5Si-1.2Fe طی لغزش در شکل ۱۲ ارایه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود میانگین ضریب اصطکاک آلیاژ Al-5Si-1.2Fe حدود ۳۰ درصد کمتر از آلیاژ Al-13Si-2Fe است. اصطکاک مشتمل بر دو جزء اصلی چسبندگی و خراشی است [۶] لذا بالا بودن ضریب اصطکاک و دامنه نوسان تغییرات آن را می‌توان به بالا بودن شدت فرآیندهای چسبندگی و سایش خراشی طی سایش نمونه Al-13Si-2Fe نسبت داد. علاوه بر این در نمودار Al-13Si-2Fe نوسانات مقطعی در ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود (با فلش بر روی نمودار نشان داده شده است) که در توافق با مکانیزم‌های پیشنهادی و افزایش اندازه متوسط ذرات سایشی (شکل ۹-د)، ناشی از شکل‌گیری و برداشت متناوب لایه تریبولوژیکی از روی سطح این آلیاژ است.

- and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products, Metric, Pennsylvania, ASTM Int., 2003, 1-15.
6. I. M. Hutching, *Tribology: friction and wear of engineering materials*, Edward Arnold, UK, 1992.
 7. H. Ye, *An overview of the development of Al-Si alloy based material for engine applications*, JMEPEG, 12(2003)288-297.
 8. M. D. Dighe and A. M. Gokhale, *Relationship between microstructural and fracture path in a cast Al-Si-Mg alloy*, Scripta Materiala, 37, 9(1997)1435-1440.
 9. B. K. Prasad, K. Venkateswarlu, O. P. Modi, A. K. Jha, S. Das, R. Dasgupta and A. H. Yegneswaran, *Sliding wear behavior of some Al-Si alloys: role of shape and size of Si particles and test conditions*, Met. Mat. Trans, 29A(1998)2747-2752.
 10. N. Fatahalla, M. Hafiz And M. Abdulkhalek, *Effect of microstructure on the mechanical properties and fracture of commercial hypoeutectic Al-Si alloy 265 modified with Na, Sb and Sr*, J. Mat. Sci., 34, No. 14 (1999)3555-3564.
 11. R. C. Voigt and D. R. Bye, *Microstructural aspect of fracture in A356*, AFS Trans., 99(1991)33-50.
 12. M. H. Mulazimoglu, A. Zaluska, J. E. Gruzleski and F. Paray, *Electron microscope study of Al-Fe-Si intermetallics in 6201 aluminum alloy*, Met. Mat. Trans., 27A (1996) 929-936.
 13. T. Maitra and S. P. Gupta, *Intermetallic compound formation in Fe-Al-Si ternary system: Part II*, Mater Characterization, 49(2002) 293-311.
 14. M. Tash, F. H. Samuel, F. Mucciardi and H. W. Doty, *Effect of metallurgical parameters on the hardness and microstructural characterization of as-cast and heat-treated 356 and 319 aluminum alloys*, Mat. Sci. Eng. A 443(2007)185-201.
 15. X. Cao. and J. Campbell, *The nucleation of Fe-rich phases on oxide films in Al-11.5Si 0.4Mg cast alloys*, Metallurgical and Materials Transactions A, 34(2003)1420-1409.