

ارزیابی تاثیر جریان الکتریکی بر ریزساختار و رفتار سایشی آلیاژ پایه آلومینیم ریختگی

وحید عمرانی دیزجیکان*، رحمت الله عمادی و حمیدرضا سلیمی جزی
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۷/۱۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۰۵/۲۲)

چکیده-

α -Al

واژگان کلیدی:

Evaluation of Electric Current Effect on the Microstructure and Wear Behavior of Cast Al Base Alloys

V. Omrani Dizajyekan*, R. Emadi and H. Salami Jazi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract: Employing direct and alternative electric currents at the time of casting and solidification modified grains of Al and Si. The highest wear resistance was obtained in the direct current, and for alternative current the wear resistance corresponded to the electric current. The change of polarity in the pure Al did not influence the wear resistance, but for the Al-Si alloy the highest wear resistance was obtained when the mold was connected to the positive and the molten metal to the negative pole. Direct current used in the Al-Si alloy brought about three different microstructures including the stretched clusters of Si in the electrons' direction near the negative pole, fine clusters of Si in the intermediate zones that surrounded the oval shape of α -Al, and broken Si clusters near the positive pole.

Keywords: Surface composite, Wear resistance, Electric current, Modification of micro structure

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: v.omranidizajyekan@ma.iut.ac.ir

اگر با نگاهی کنجکاوانه به طبیعت بنگریم می‌توان نتایج تحقیقات محققان نشان داده است که در آلیاژهای آلومینیم-سیلیسیم، با افزایش غلظت سیلیسیم به یک حد بالا مقاومت سایشی و کارایی دما بالای این آلیاژ بهبود می‌یابد. ولیکن، افزایش غلظت سیلیسیم منجر به توزیع غیر یکنواخت فاز سیلیسیم نه تنها در ساختار یوتکتیک می‌گردد، بلکه موجب افت خواص مکانیکی می‌شود. روش‌های متنوعی برای اصلاح مورفولوژی تیغه‌های سیلیسیم به‌کار گرفته شده است که مهم‌ترین آن‌ها اصلاح شیمیایی با استفاده از نمک سدیم می‌باشد، اما حضور فسفر در این نمک‌ها سبب آلودگی محیط زیست، تخریب ریز ساختار اصلاح شده در شرایط استفاده از مقادیر بالای نمک و ایجاد خطا در کنترل ترکیب می‌شود. لذا استفاده از عملیات میدانی خارجی به خصوص روش جریان الکتریکی پالسی جایگزین مناسبی برای روش اصلاح شیمیایی است [۱]. استفاده از میدان الکتریکی پالسی برای اصلاح ساختار دانه‌ای بسیاری از مواد فلزی به طور گسترده‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است به گونه‌ای که یافته‌های ارزشمندی در مورد اعمال عملیات جریان الکتریکی پالسی^۱ بر روی منطقه خمیری^۲ آلیاژها به دست آمده است. نقش اعمال میدان الکتریکی بر انجماد آلیاژها هنوز کاملاً مشخص نشده است. عده‌ای بر این باورند که اعمال جریان الکتریکی به مذاب، رشد کریستال‌ها را در منطقه خمیری متوقف کرده یا از بین می‌برد [۱-۴]. لیاو^۳ [۲] استدلال کرد که انجماد ریز ساختارهای آلومینیم خالص تنها به وسیله اعمال جریان الکتریکی پالسی در طول جوانه زنی قبل از مرحله رشد کریستال صورت می‌پذیرد. دلیل این امر آن است که جریان الکتریکی پالسی جوانه کریستال تشکیل شده در قسمت انتهایی دیواره قالب را ایجاد می‌کند و سپس آن‌ها را به قسمت‌های بالایی مذاب کشیده، جوانه کریستال‌های تکثیر شده را در کل مذاب اشاعه می‌دهد. تحقیقات لیاو و همکارانش در زمینه مکانیزم اصلاح توسط جریان الکتریکی

پالسی بر روی ساختار انجمادی آلومینیم خالص نشان می‌دهد که فرایند اصلاح ریزساختار انجمادی با اعمال جریان الکتریکی پالسی در دمای بالای فاز مذاب نمی‌تواند انجام شود، به طوری که این فرایند هیچ تاثیری بر جوانه زنی در فاز مذاب ندارد. علاوه بر آن، زمانی که این روش در هنگام رشد کریستال‌ها اعمال می‌شود تاثیر قابل ملاحظه‌ای در ساختار انجمادی به وجود نمی‌آورد. در نتیجه می‌توان بیان کرد که اعمال جریان الکتریکی پالسی بر روی آلومینیم خالص نمی‌تواند موجب ذوب و یا از بین رفتن رشد کریستال‌ها گردد. ولی با این وجود، ماکرو ساختارهای بسیار ریز به وسیله اعمال این جریان الکتریکی در هنگام انجماد مذاب قابل مشاهده است [۲و۴و۶].

گائو و همکاران^۴ تاثیر جریان الکتریکی پالسی را بر روی استحکام کششی و افزایش طول آلیاژ ریختگی ZA27 (آلیاژ روی-آلومینیم) ارزیابی نمودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که جریان الکتریکی پالسی توانسته است از رشد دندریت‌ها در آلیاژ جلوگیری کرده و استحکام کششی و افزایش طول را بهبود دهد [۴].

در کنار استفاده از روش جریان الکتریکی پالسی، فرایند میدان مغناطیسی بالای مواد^۵ نیز مورد ارزیابی‌های گسترده قرار گرفته است. این روش به عنوان یک تکنیک مهم در زمینه‌های فرایند مواد که درگیر با کنترل شکل، جریان محرک، تعیین و ارزیابی در خط تولید، ایجاد حرارت، حذف آخال، شناوری مغناطیسی و بسیاری موارد دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. در هر حال وجود میدان مغناطیسی یکنواخت^۶ و میدان مغناطیسی گرادیانی^۷ به ترتیب توسط نیروی لورنتز و نیروی مغناطیسی بر روی ساختار انجمادی تاثیرگذار است [۷]. سیلیسیم اولیه در آلیاژ هاپر یوتکتیک آلومینیم-سیلیسیم، تحت میدان مغناطیسی یکنواخت دارای توزیع یکنواخت در زمینه بوده در حالی که با اعمال میدان مغناطیسی گرادیانی به سبب اندرکنش نیروهای بویانسی و مغناطیسی، ذرات سیلیسیم اولیه در قسمت‌های بالا و پایین نمونه‌ها تشکیل می‌شوند. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهند که اعمال میدان‌های مغناطیسی

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلومینیم خالص

Zr	V	Ni	Cr	Mg	Mn	Zn	Cu	Fe	Si	Al
<۰/۰۰۴۵	<۰/۰۱۲	<۰/۰۲۰	<۰/۰۱۵	<۰/۰۰۵	<۰/۰۲۰	<۰/۲۵۴۰	<۰/۰۰۵	۰/۱۳۶	<۰/۰۰۵	پایه

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلیاژ ریختگی (آلیاژ آلومینیم- سیلیسیم)

Zr	V	Ni	Cr	Mg	Mn	Zn	Cu	Fe	Si	Al
<۰/۰۳۰	<۰/۰۱۰	۰/۱۵۲	۰/۰۷۵۷	۰/۰۸۸۲	<۰/۰۲۰	۰/۰۳۰۲	۰/۰۶۵۵	۱/۳۲	۱۱/۲	پایه

روش اصلاح شیمیایی و تاثیر اندکی بر روی اصلاح سیلیسیم یوتکتیک دارد [۱ و ۲ و ۴-۶].

با در نظر گرفتن خاصیت ذره‌ای الکترون در کنار خاصیت موجی، به نظر می‌رسد که با اعمال جریان الکتریکی به مذاب در زمان ریخته‌گری، در اثر برخورد الکترون‌های در حال شارش با دندریت‌های در حال رشد، یک اصلاح ریز ساختاری در هنگام رشد این دندریت‌ها صورت پذیرد، به گونه‌ای که با هم جهت گرفتن و غیر هم جهت گرفتن الکترون‌های در حال شارش با جهت رشد دندریت‌های در حال رشد، بتوان سرعت رشد این دندریت‌ها را افزایش یا کاهش داد. در این پژوهش اثر جریان الکتریکی مستقیم و متناوب بر ریزساختار نمونه‌های ریختگی آلومینیم و آلیاژ آلومینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم با اعمال جریان الکتریکی به مذاب در هنگام ریخته‌گری در قالب و انجماد و سپس نقش جریان در بهبود مقاومت سایشی بررسی خواهد شد.

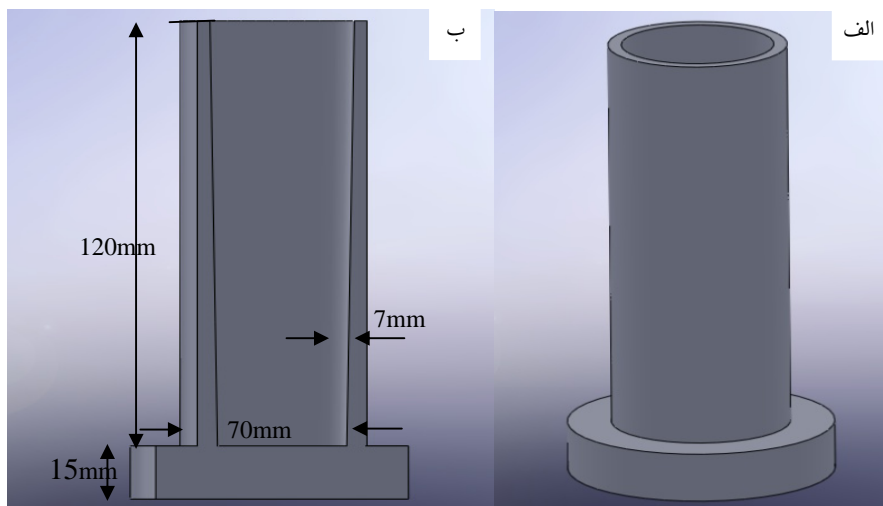
۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد مصرفی اولیه

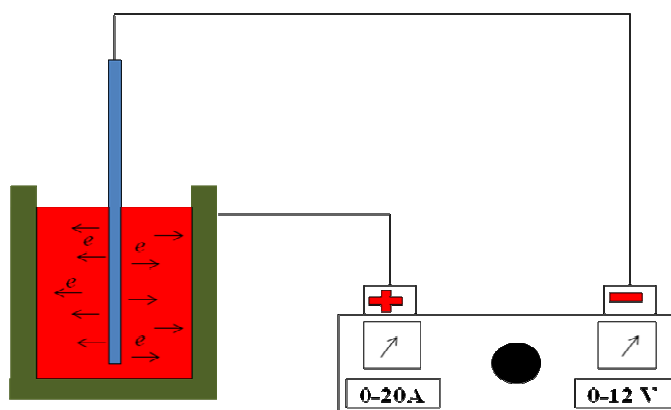
در این تحقیق از دو گروه مختلف آلومینیم، یعنی آلومینیم خالص (خلوص ۹۹/۴۶٪) و آلیاژ آلومینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم استفاده گشته است. شیمیایی هر دو گروه آلیاژی در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

بالا، فاصله بین لایه‌ای ساختار یوتکتیکی را کاهش می‌دهد. این امر در حالی است که در یک مقدار بهینه‌ای از شدت میدان مغناطیسی فاصله این لایه‌ها به حداقل مقدار خود می‌رسند. به بیان دیگر، در یک حد بالایی از شدت میدان مغناطیسی فاصله بین لایه‌های یوتکتیکی به کم‌ترین مقدار رسیده، افزایش بیشتر شدت میدان مغناطیسی از این حد موجب افزایش مجدد لایه‌های یوتکتیکی می‌شود. علاوه بر آن، انرژی مغناطیسی قابلیت تاثیرگذاری بر تعادل ترمودینامیکی سیستم انجمادی را داشته و غلظت آلومینیم یوتکتیک را در ساختار یوتکتیک آلیاژ آلومینیم-سیلیسیم افزایش می‌دهد. عیب اصلی اعمال میدان مغناطیسی، حبس شدن حباب‌های گازی به هم پیوسته در قسمت‌های مرکزی نمونه است. درحالی‌که در شرایط معمول، حباب‌های گازی در قسمت‌های فوقانی نمونه ریختگی ظاهر می‌شوند [۶-۱۰].

مشابه با حالت فوق، در روش جریان الکتریکی پالسی نیز یک کاهش در اندازه بازوهای اولیه دندریتی^۱ در فاز α -Al ایجاد می‌شود. علاوه بر آن سبب بهبود و اصلاح در شکل و توزیع ترکیبات بین فلزی نیز می‌شود. در این میان، ترکیبات بین فلزی Mg_2Si با اعمال جریان الکتریکی پالسی ریزتر می‌شود. ترکیب $CuAl_2$ از حالت دندریتی به حالت کروی تبدیل می‌شود و ترکیب بین فلزی Al_3Ni بر روی سیلیسیم یوتکتیک رشد می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که اعمال جریان الکتریکی پالسی تاثیر مشابهی از نظر تشکیل دانه‌های α -Al با



شکل ۱- قالب فلزی مورد استفاده برای اعمال جریان الکتریکی در زمان ریخته‌گری، (الف) نمای کامل و (ب) نمای برش یافته



شکل ۲- شماتیک اتصال قالب فلزی و میله فولادی به عنوان الکترود انتقال جریان الکتریکی به قطب مثبت و منفی جریان الکتریکی مستقیم

اعمال می‌کند. در هنگام ریخته‌گری از حداکثر ظرفیت دستگاه استفاده شد. برای جریان متناوب نیز از یک ترانسفورماتور کاهنده (دستگاه جوش کاری) استفاده شد که محدوده کاری این ترانسفورماتور اختلاف پتانسیل 23° – 22° ولت و شدت جریان 2° – 5 آمپر در قسمت ورودی

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

جهت اعمال جریان الکتریکی از دو منبع الکتریکی جریان مستقیم و جریان متناوب استفاده شد. برای جریان مستقیم، از یک سو کننده‌ی جریان (رکتیفایر) استفاده شد که اختلاف پتانسیل $^{\circ}$ تا 12 ولت و شدت جریان عبوری $^{\circ}$ تا 20 آمپر

الکترودهای انتقال دهنده جریان استفاده شد. شکل (۲) به طور شماتیک طرز اتصال جریان به الکترودها را نشان می‌دهد. برای ارزیابی ریزساختار تشکیل شده در آلیاژهای ریختگی از میکروسکوپ نوری Nikon مدل Epiphoto 300 و برای بررسی سطوح سایش در سطح نمونه‌های ریختگی از میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips مدل XL300 استفاده شد.

برای ارزیابی اثر جریان الکتریکی بر عملکرد رفتار سایشی، ابتدا مذاب آلومینیم خالص و آلیاژ آلومینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم در قالب فلزی ریخته‌گری شد. در هنگام اعمال جریان الکتریکی مستقیم، مذاب به قطب منفی و قالب به قطب مثبت وصل شد. شدت جریان و اختلاف پتانسیل بین دو قطب در هنگام ریخته‌گری برای جریان مستقیم به ترتیب برابر با ۱۹/۵۳ آمپر و ۳/۷۵ ولت است. در مرحله‌ی دوم جریان متناوب با دو شدت جریان، به ترتیب ۱۲۵ آمپر و ۲۷۵ آمپر و اختلاف پتانسیل ۹/۲ و ۱۱/۵ ولت بین قالب فلزی و مذاب اعمال شد. سپس برای بررسی نقش نوع الکتروود، محل الکترودها تغییر نموده و خواص سایشی اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی مقاومت سایشی نمونه‌ها از آزمون سایش پین روی رینگ تحت شرایط بار ۸/۵ نیوتن و سرعت دوران ۵۰ دور بر دقیقه در جهت ساعت‌گرد با پین فولادی استفاده و در نهایت میزان کاهش وزن نمونه‌ها نسبت به نمونه بدون جریان الکتریکی مطابق معادله (۱) محاسبه شد.

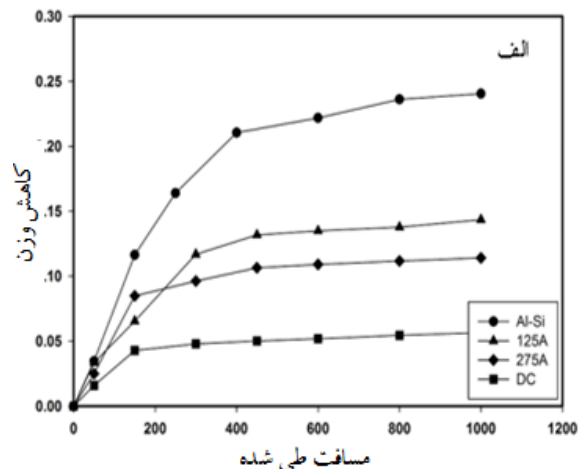
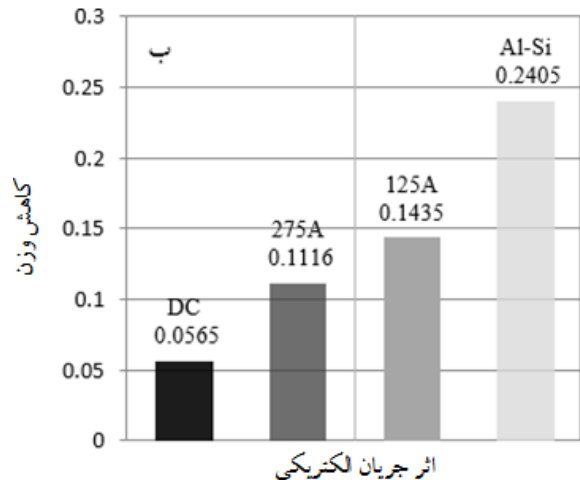
$$(1) \quad \frac{W - W_0}{W_0} \quad (\text{همراه با جریان}) - \frac{W - W_0}{W_0} \quad (\text{بدون جریان})$$

در معادله‌ی (۱) W وزن نمونه پس از انجام آزمون سایش در زمان اعمال جریان و بدون اعمال جریان الکتریکی است.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- رفتار سایشی

شکل (۳-الف) منحنی تغییرات وزن نسبت به مسافت پیموده شده را برای نمونه‌های ریخته‌شده‌ی آلیاژ آلومینیم-



شکل (۳-الف) روند تغییر وزن نمونه ریختگی آلیاژ آلومینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم نسبت به مسافت پیموده شده و (ب) مجموع کاهش وزن بعد از مسافت ۱۰۰۰ متر

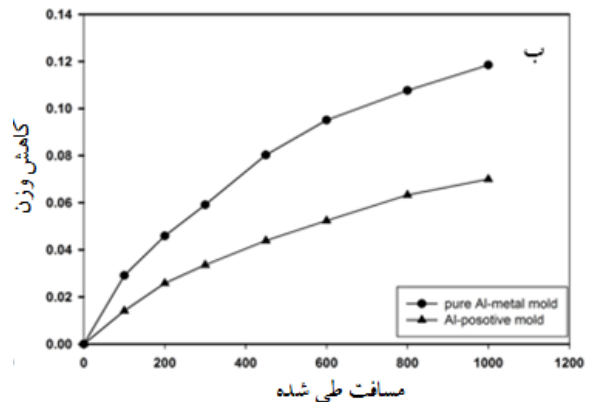
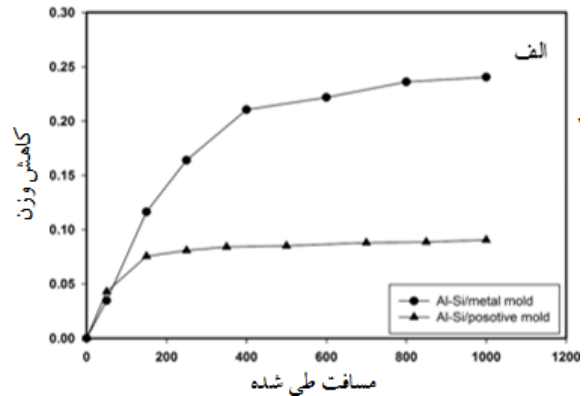
و ولتاژ ۴۰-۵۰ ولت و شدت جریان ۷۵-۵۰۰ آمپر در قسمت خروجی است که از این محدوده، شدت جریان ۱۲۵ و ۲۷۵ آمپر انتخاب شد.

قالب فلزی مورد استفاده در این تحقیق از جنس چدن خاکستری است که در شکل (۱) ابعاد آن نشان داده شده است. برای اعمال جریان الکتریکی یک میله‌ی فولادی در وسط قالب قرار داده شده و از این میله و قالب به عنوان

با افزایش شدت جریان الکتریکی مقاومت سایشی بیش‌تر می‌شود. شکل (۳-ب) نیز اثر نوع جریان الکتریکی بر کاهش وزن را پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اعمال جریان الکتریکی مستقیم بهبود قابل ملاحظه‌ای در مقاومت سایشی نمونه ریختگی آلیاژ آلومینیم - ۱۱/۲٪ سیلیسیم ایجاد می‌کند. هم‌چنین برای جریان متناوب نیز، شدت جریان ۲۷۵ آمپر نسبت به ۱۲۵ آمپر رفتار سایشی بهتری را ایجاد می‌کند. در نتیجه می‌توان گفت که با افزایش شدت جریان در حالت متناوب مقاومت سایشی بهبود می‌یابد. با در نظر گرفتن رابطه (۱) مقدار کاهش وزن نمونه‌ها با اعمال جریان الکتریکی جریان مستقیم نسبت به نمونه، بدون اعمال جریان الکتریکی در حدود ۷۶/۵ درصد و برای جریان متناوب تحت شدت جریان ۱۲۵ و ۲۷۵ آمپر به میزان ۴۰/۳۳ و ۵۳/۶ درصد کم‌تر می‌شود.

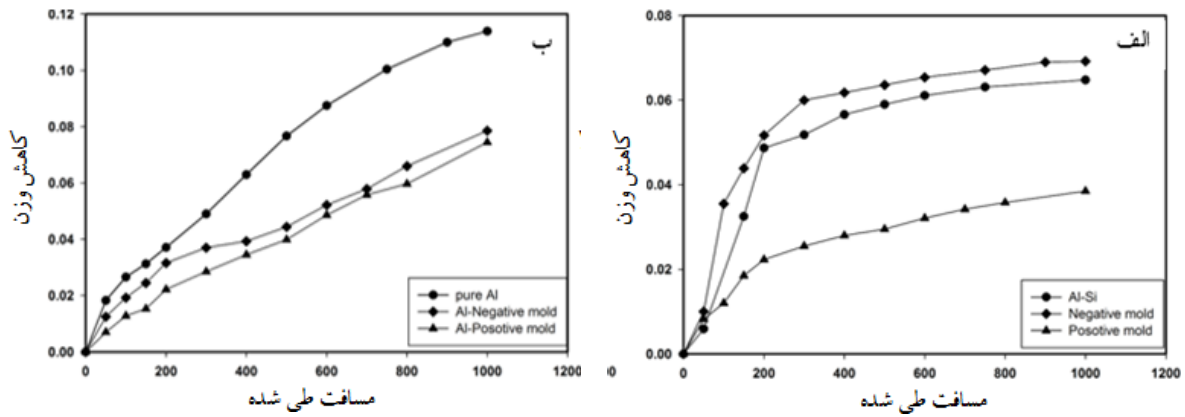
شکل (۴) روند تغییر کاهش وزن نمونه‌های ریختگی آلیاژ آلومینیم - ۱۱/۲٪ سیلیسیم و آلومینیم خالص را نسبت به مسافت طی شده در شرایط اعمال جریان الکتریکی مستقیم نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در هر دو حالت با اعمال جریان الکتریکی، مقاومت سایشی نمونه‌های ریختگی بهبود یافته است، به طوری که درصد کاهش وزن در نمونه‌ی آلومینیم خالص پس از طی ۱۰۰۰ متر نسبت به نمونه، بدون اعمال جریان الکتریکی مطابق با رابطه (۱) ۴۲٪ و در نمونه‌ی آلومینیم - ۱۱/۲٪ سیلیسیم ۷۶/۵٪ کم‌تر شده است.

در مرحله بعد برای ارزیابی اثر نوع الکتروود (مثبت یا منفی بودن هر یک از الکتروودها) محل الکتروود تغییر کرده و برعکس حالت قبل این بار مذاب آلومینیم به قطب مثبت و قالب به قطب منفی وصل شد. شکل (۵) تغییرات کاهش وزن نمونه‌ها را در دو حالت قالب متصل شده به قطب مثبت و منفی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت اتصال قالب به الکتروود منفی مقاومت سایشی آلیاژ ریختگی آلومینیم - ۱۱/۲٪ سیلیسیم کاهش یافته و حتی نسبت به نمونه‌ی ریختگی این آلیاژ نیز در شرایط بدون اعمال جریان

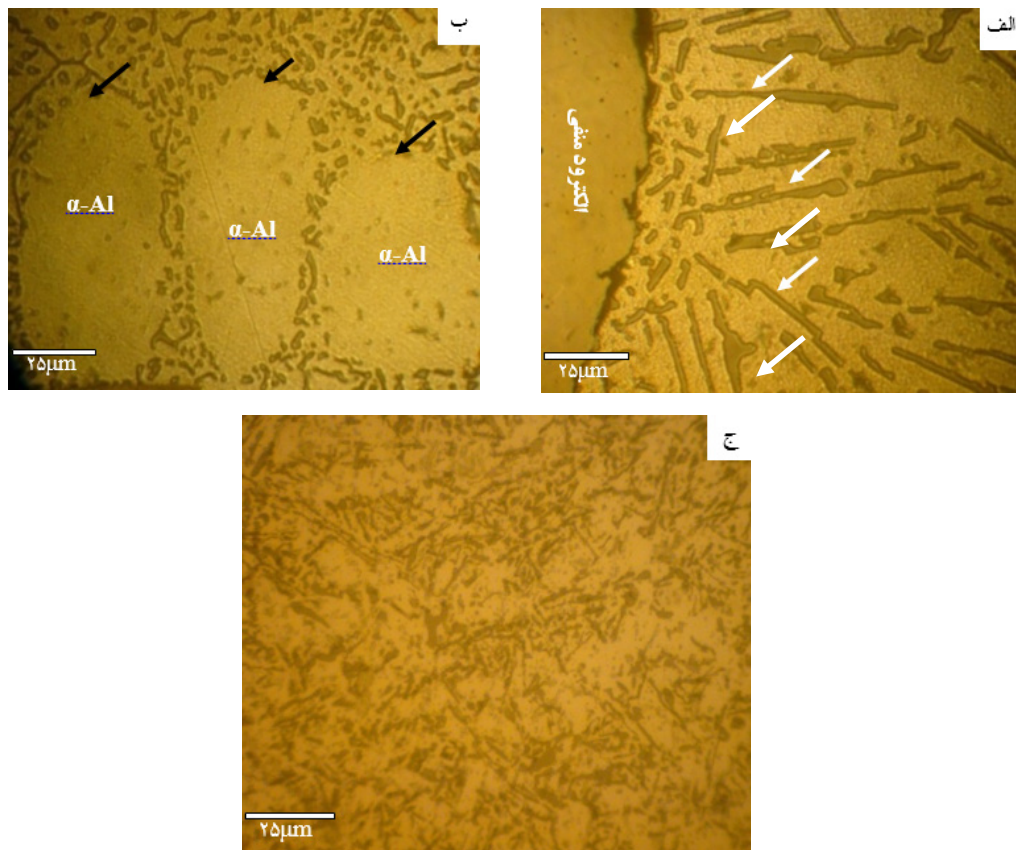


شکل ۴- روند تغییر کاهش وزن نمونه‌ی ریختگی نسبت به مسافت پیموده شده در حالت اعمال جریان الکتریکی مستقیم در قالب فلزی، (الف) آلیاژ آلومینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم و (ب) آلومینیم خالص

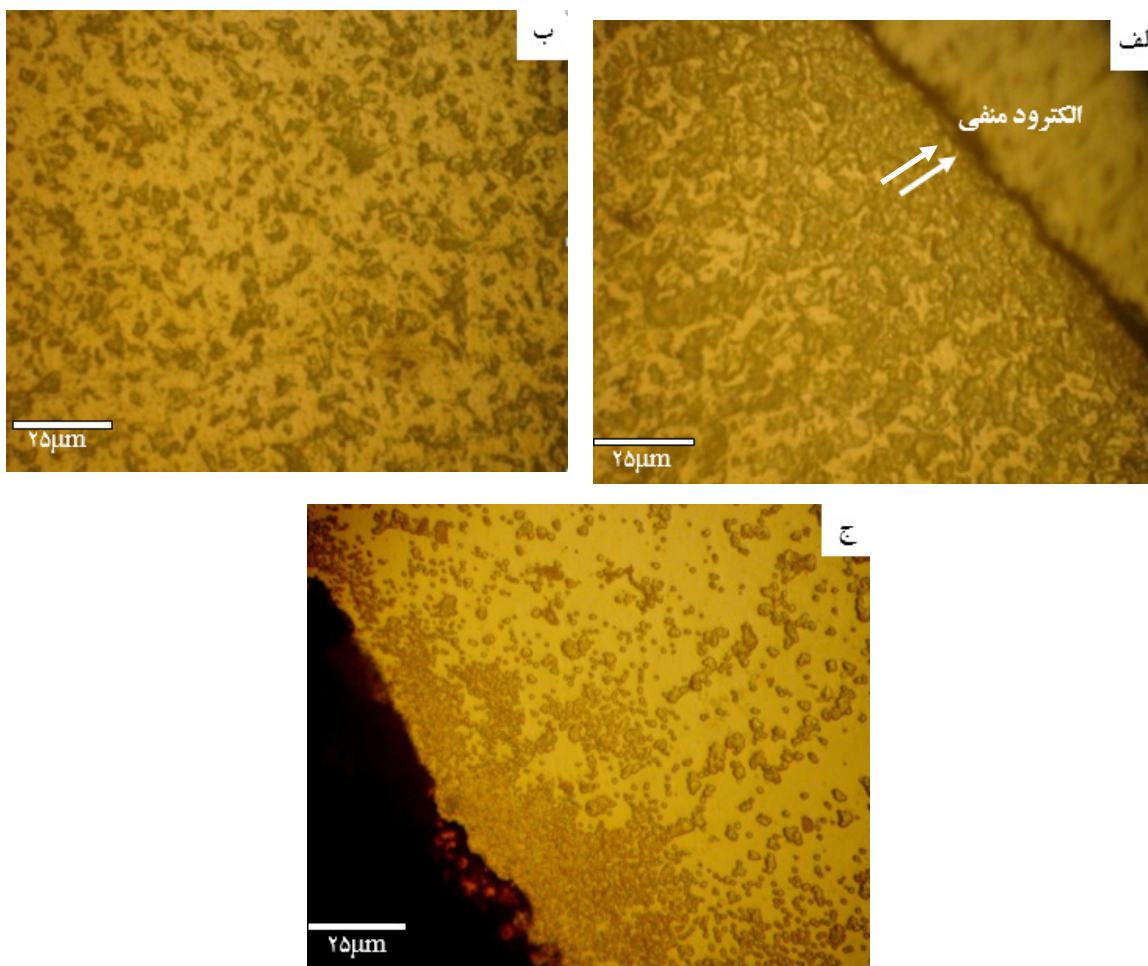
۱۱/۲٪ سیلیسیم در سه شرایط عدم اعمال جریان الکتریکی، تحت اعمال جریان الکتریکی مستقیم با شدت ۱۹/۵۳ آمپر و اختلاف پتانسیل ۳/۷۵ ولت و جریان متناوب با شدت جریان‌های ۱۲۵ و ۲۷۵ آمپر که اختلاف پتانسیل در آن‌ها به ترتیب ۹/۲ و ۱۱/۵ ولت است نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بالاترین مقاومت سایشی زمانی است که جریان الکتریکی مستقیم اعمال شده است. در این حالت قالب به قطب مثبت و میله فولادی داخل مذاب به قطب منفی متصل شده است. در شرایط اعمال جریان الکتریکی متناوب نیز مشاهده می‌شود که



شکل ۵- روند تغییر کاهش وزن نمونه ریختگی نسبت به مسافت پیموده شده در حالت اعمال جریان الکتریکی مستقیم. (الف) آلیاژ آلومینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم و (ب) آلومینیم خالص



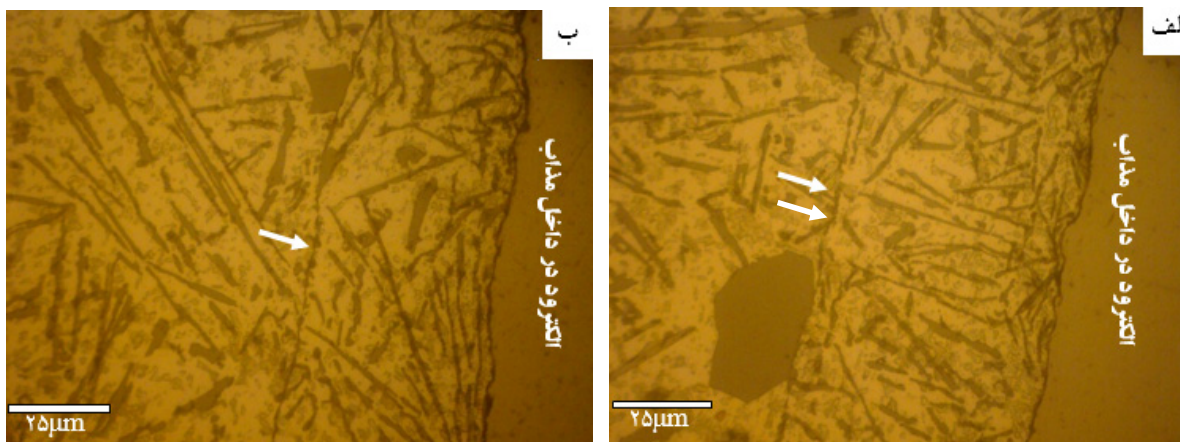
شکل ۶- مورفولوژی به وجود آمده در ریز ساختار نمونه‌ی ریختگی آلیاژ آلومینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم در اطراف الکترود مثبت و مناطق میانی و الکترود منفی، (الف) اطراف الکترود منفی، (ب) مناطق میانی دو الکترود و (ج) اطراف الکترود مثبت



شکل ۷- مورفولوژی به وجود آمده در ریز ساختار نمونه‌ی ریختگی آلومینیم خالص در اطراف الکتروود مثبت و مناطق میانی و الکتروود منفی، (الف) اطراف الکتروود منفی، (ب) مناطق میانی دو الکتروود و (ج) اطراف الکتروود مثبت

سایشی گشته که در شکل (۴) مشاهده می‌شود. با اتصال قالب به قطب منفی، کشیده شدن تیغه‌های سیلیسیم در این ناحیه ایجاد می‌شود (شکل (۶-الف)). در اثر تنش برشی اعمال شده در زمان سایش برخی از این تیغه‌های کشیده سیلیسیم شکسته شده که به صورت ذره سایشی عمل کرده، موجب کاهش مقاومت سایشی آلیاژ ریختگی می‌شوند که در شکل (۵-الف) روند این تغییرات مقاومت سایشی مشاهده می‌گردد. برخلاف

الکتریکی، نیز مقاومت سایشی کم‌تری از خود نشان می‌دهد، ولی در آلومینیم خالص تغییر قطبیت قالب تأثیر زیادی بر رفتار سایشی ندارد. برای تحلیل این روند تغییرات، بررسی‌های ریزساختاری به عمل آمد (شکل‌های (۶) و (۷)). با اتصال قالب به قطب مثبت تیغه‌های سیلیسیم در این ناحیه ظریف می‌شوند (شکل (۶-ج)). توزیع ذرات سخت (تیغه‌های سیلیسیم) در درون زمینه‌ای نرم (آلیاژ آلومینیم)، موجب ارتقای خواص مکانیکی می‌شود لذا این ریزشدگی تیغه‌های سیلیسیم در نزدیکی سطح بیرونی قطعه موجب افزایش مقاومت



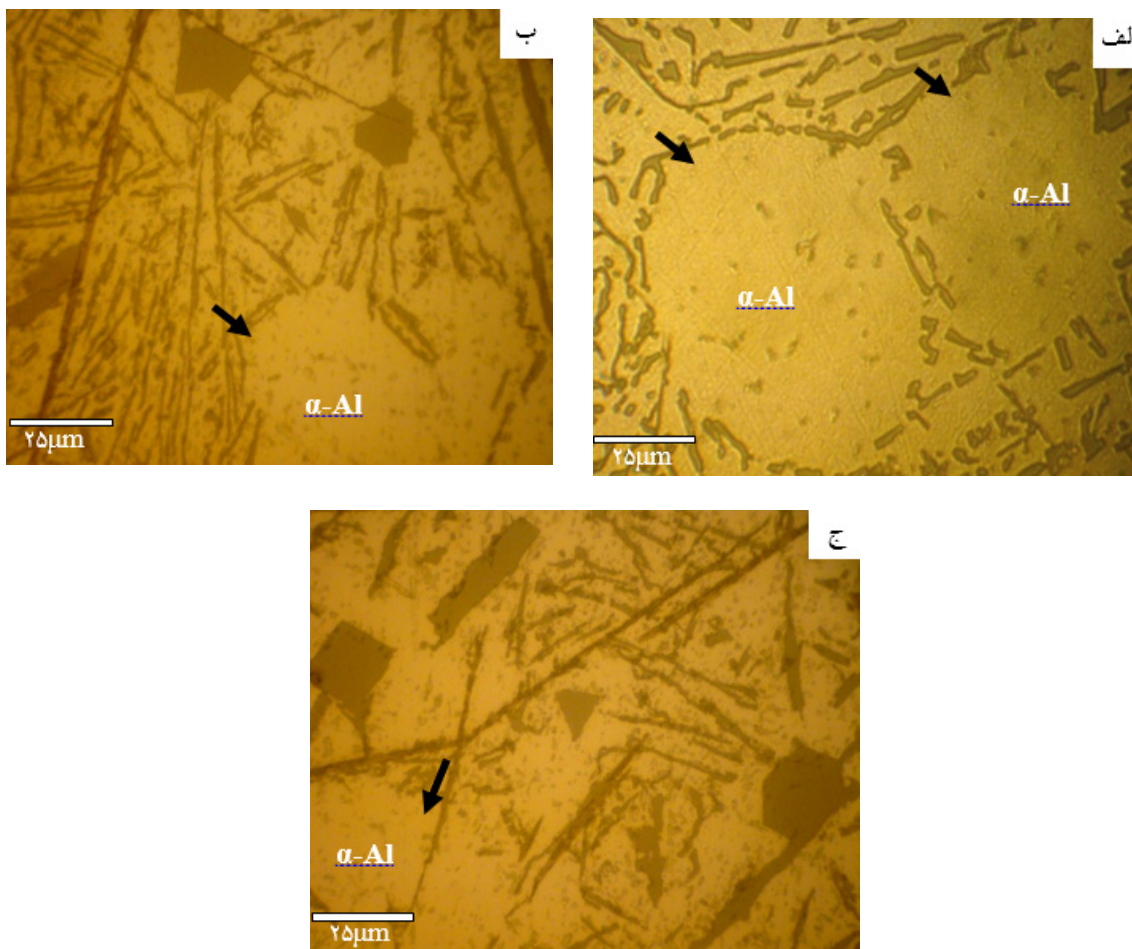
شکل ۸- تشکیل مرز مشخص در آلیاژ آلومینیم- ۱۱/۲٪ سیلیسیم اطراف الکترود منفی در حالت اعمال جریان متناوب، (الف) شدت جریان ۲۷۵ آمپر و (ب) شدت جریان ۱۲۵ آمپر

ناحیه میان دو الکترود مثبت و منفی دانه‌های بسیار ظریف سیلیسیم اطراف دانه‌های تقریباً کروی α -Al (پیکان‌های سیاه) را احاطه کرده‌اند. برای آلومینیم خالص نیز روند کشیدگی و ریزش‌دگی دانه‌ها در نزدیکی دو الکترود منفی و مثبت دیده شده ولی در مناطق میانی الکترودها ساختار متفاوتی مشاهده نمی‌شود. شکل (۸) نشان می‌دهند که اعمال جریان الکتریکی متناوب در زمان ریخته‌گری موجب تشکیل شدن مرزی مشخص در اطراف الکترود منفی می‌شود که در داخل این مرز مشخص دانه‌های سیلیسیم تقریباً ریز و در خارج از آن بزرگ هستند. در اکثر موارد نیز مشاهده می‌گردد که سیلیسیم اولیه بزرگی بر روی این مرز مشخص وجود دارد. شکل (۹) نشان می‌دهد که دانه‌های سیلیسیم اولیه با اعمال جریان الکتریکی اصلاح می‌شوند. بر خلاف جریان الکتریکی مستقیم که در آن دانه‌های سیلیسیم اولیه درشتی ملاحظه نشده بلکه به صورت ظریف و کشیده‌اند (تیغه‌های نشان داده شده با پیکان سفید در شکل (۶))، در جریان متناوب سیلیسیم‌های اولیه درشتی دیده می‌شود، با این تفاوت که با افزایش شدت جریان عبوری اندازه‌ی این دانه‌ها کاهش می‌یابد. علاوه بر آن در جریان مستقیم دانه‌های کروی α -Al (مناطق نشان داده شده با پیکان سیاه) در ناحیه مشخصی بین دو الکترود مثبت و منفی دیده می‌شوند، ولی در جریان متناوب ناحیه مشخصی برای تشکیل

آلیاژ آلومینیم- ۱۱/۲٪ سیلیسیم که در آن دو فاز آلومینیم (نرم و رساناتر) و فاز سیلیسیم (سخت و کم رساناتر) توزیع شده‌اند، در آلومینیم خالص تنها یک فاز وجود داشته، تغییر قطبیت قالب تاثیری در نحوه‌ی توزیع آن ندارد. ولی در مجموع اندرکنش میان شارش الکترون‌ها و دندریت‌های در حال رشد موجب اصلاح ریزساختاری دانه‌های آلومینیم در زمان اعمال جریان الکتریکی و افزایش مقاومت سایشی نمونه ریخته‌گی نسبت به نمونه بدون اعمال جریان الکتریکی می‌شود.

۲-۳- بررسی ریزساختاری

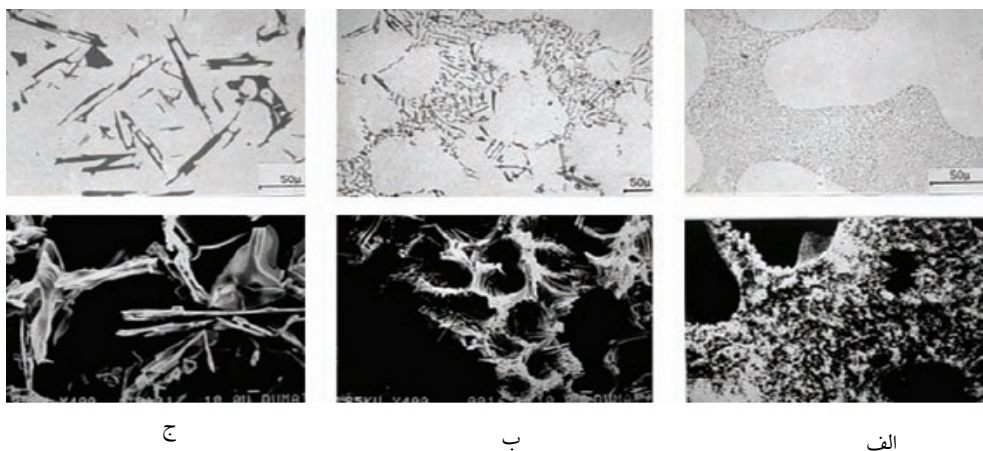
شکل‌های (۶) و (۷) ریزساختار تشکیل شده در سه ناحیه نزدیک الکترود منفی (مذاب)، مابین دو الکترود مثبت و منفی و نزدیک الکترود مثبت (قالب فلزی) را در آلومینیم خالص و آلیاژ آلومینیم- ۱۱/۲٪ سیلیسیم نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در آلیاژ آلومینیم- ۱۱/۲٪ سیلیسیم، در نزدیکی قطب منفی دانه‌های سیلیسیم در امتداد شار الکترون کشیده شده (پیکان‌های سفید) و در نزدیکی قطب مثبت دانه‌های سیلیسیم شکسته شده و توزیع ریزتری دارند. در نهایت در



شکل ۹- مورفولوژی دانه‌های سیلیسیم در حالت اعمال جریان الکتریکی. (الف) جریان الکتریکی مستقیم، (ب) جریان متناوب با شدت جریان ۲۷۵ آمپر و (ج) جریان متناوب با شدت جریان ۱۲۵ آمپر

دانه‌های آلومینیم آلفا به هم متصل شده، باعث ایجاد دانه‌های بزرگ نامستحکم‌تر و در نتیجه افت خواص مکانیکی می‌شود. در آلیاژ آلومینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم دلیل کشیده شدن دانه‌های سیلیسیم به نزدیکی الکتروود داخلی (که به قطب منفی متصل شده است)، خاصیت ذره‌ای الکترون است که دندریت‌های در حال رشد سیلیسیم را در امتداد شارش الکترون‌ها از قطب منفی به سمت قطب مثبت هدایت می‌کند. به دلیل رسانایی بالاتر آلومینیم نسبت به سیلیسیم، دانه‌های کشیده‌ی سیلیسیم با ضخامت کم‌تر نسبت به نمونه‌ی بدون جریان الکتریکی ایجاد می‌شود، زیرا بخش قابل توجهی از جریان الکترون‌ها از

شکلی متقارن مانند جریان مستقیم نداشته و توسط سیلیسیم‌های ریز احاطه نشده‌اند. شکل (۱۰) اثر اصلاح شیمیایی را بر ریزساختار تیغه‌های سیلیسیم نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که اعمال جریان الکتریکی مستقیم اثر مشابهی با اصلاح شیمیایی بر تیغه‌های سیلیسیم داشته، حتی بهتر از اصلاح شیمیایی توانسته است تیغه‌های سیلیسیم را در اطراف دانه‌های بیضی گون α -Al ظریف کند. زیرا در اصلاح شیمیایی کنترل غلظت ترکیب مورد استفاده برای اصلاح ریزساختار بسیار مهم بوده، با افزایش غلظت ترکیب حالت فرا اصلاح یا اصلاح بیش از اندازه به وجود می‌آید که در آن

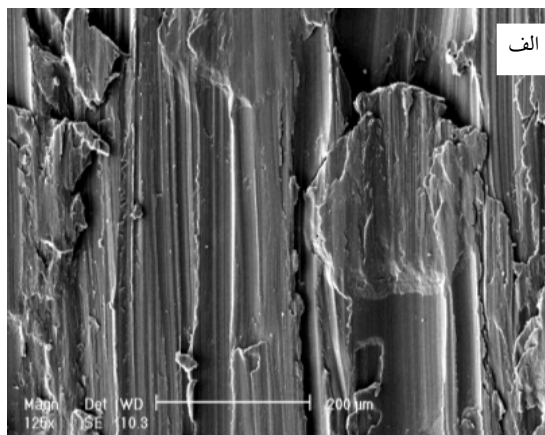
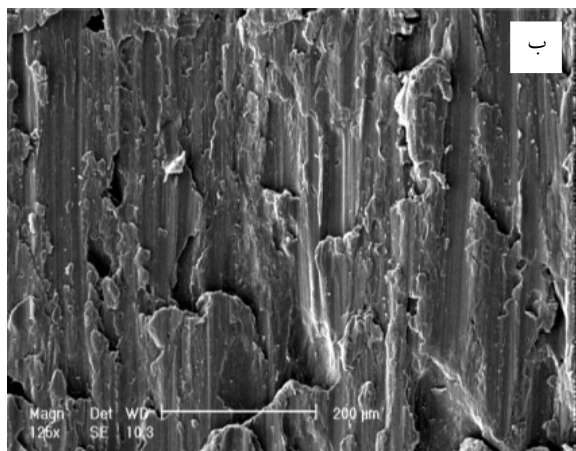


شکل ۱۰- اثر اصلاح شیمیایی بر ریزساختار تیغه‌های سیلیسیم در آلیاژ آلومینیم-سیلیسیم یوتکتیک. میکروسکوپ نوری (بالا)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (پایین). (الف) غلظت زیاد اصلاح کننده، (ب) غلظت مناسب اصلاح کننده و (ج) بدون اصلاح کننده شیمیایی [۱۱]

مشاهده می‌شود و خارج از آن این مناطق وجود ندارند.

برای تحلیل این پدیده بایستی دو رویداد را در نظر گرفت. اول: رشد فاز جامد از جداری دیواره‌ی قالب (پیش‌روی جبهه‌ی انجماد) که در خلاف جهت شارش الکترون‌هاست. جبهه‌ی انجماد به سمت الکتروود داخلی (قسمت مرکزی مذاب) و حرکت الکترون‌ها به سمت الکتروود بیرونی (قسمت بیرونی لایه‌ی جامد) است. دوم: رشد دندریت‌ها در جداری الکتروود داخلی در امتداد شارش الکترون است که سبب کشیده شدن آن‌ها می‌شود. با پیش‌روی این دو جبهه‌ی انجماد که در خلاف جهت یک‌دیگرند، عنصر آلیاژی یعنی سیلیسیم نیز هم‌زمان پس زده می‌شود، به طوری که در ناحیه میانی این دو الکتروود غلظت بالایی از سیلیسیم پس زده شده وجود داشته که در مذاب آلومینیم توزیع شده‌اند. سرعت پیش‌روی جبهه‌ی انجمادی از جداره دیواره‌ی قالب به دلیل بالا بودن نرخ انتقال گرما نسبت به جبهه انجمادی از دیواره الکتروود داخلی، بیش‌تر است، ولی حرکت الکترون‌های در حال شارش در خلاف جهت پس زده شدن سیلیسیم از جبهه‌ی انجمادی

زمینه‌ی آلومینیم عبور کرده، مانع ضخیم شدن تیغه‌های سیلیسیم می‌شود. در مقابل در قطب مثبت در هنگام برخورد الکترون‌های در حال شارش با قطب مثبت یک نیروی مخالف (اندراکنش) به دندریت‌های در حال رشد از دیواره قالب اعمال شده و سبب شکسته شدن و ریز شدن دانه‌های سیلیسیم در نواحی قطب مثبت می‌شود. بدیهی است که حضور این بازوهای شکسته با زاویه ترشوندگی پایین، مکان‌های ترجیحی مناسبی برای جوانه زنی فاز سیلیسیم است. با اعمال جریان الکتریکی، مناطقی به شکل بیضی گون در قسمت‌های میانی (محدوده‌ی بین الکتروود داخلی و الکتروود خارجی) به وجود آمده است که موید دانه‌های آلومینیم آلفا می‌باشند. مناطق به وجود آمده شکلی نزدیک به بیضی داشته که کشیدگی آن (قطر بزرگ بیضی) در راستای عبور جریان الکتریکی است. در داخل این مناطق بیضی گون دانه سیلیسمی وجود ندارد و نکته مهم‌تر اینکه اندازه‌ی تیغه‌های سیلیسیم در اطراف این مناطق فقیر از سیلیسیم، بسیار ریز و ظریف‌است. جالب توجه است که این مناطق تنها در قسمت میانی نمونه‌ی ریختگی آلیاژ آلومینیم- ۱۱/۲٪ سیلیسیم و در حد واسط الکتروود داخلی (قطب منفی) و قالب (قطب مثبت)

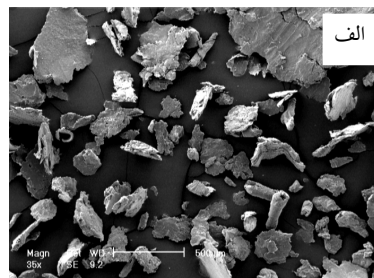
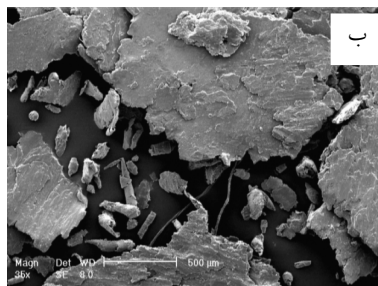


شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپی الکترونی از سطوح سایشی نمونه‌های ریختگی Al خالص، (الف) قالب فلزی بدون جریان الکتریکی و (ب) قالب فلزی متصل شده به قطب مثبت جریان الکتریکی مستقیم

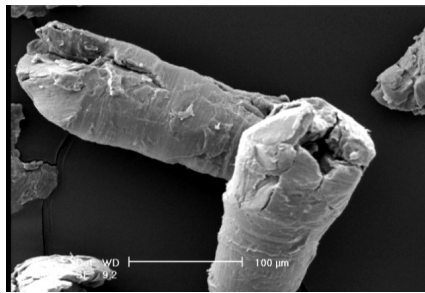
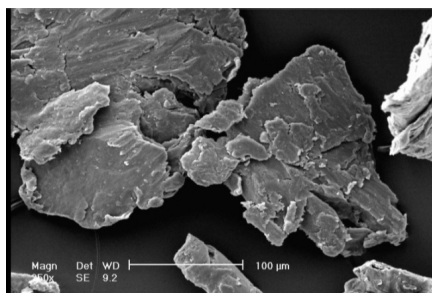
بیضی گون دانه‌های آلومینیم آلفا که تیغه‌های ریز سیلسیم احاطه شده‌اند در مناطق میانی دو الکتروود به صورت بیضی گون‌های منظم دیده می‌شوند. در حالی که در جریان الکتریکی متناوب که در آن هر یک از قطب‌های الکتریکی با فرکانس ۵۰ هرتز به طور سینوسی مثبت و منفی می‌شوند، مناطق بیضی گون دانه‌های آلومینیم آلفا که توسط تیغه‌های سیلسیم احاطه شده‌اند دارای شکل منظمی همانند ساختاری که در جریان مستقیم دارند، نیست. به نظر می‌رسد که تغییر تناوبی قطب‌های مثبت و منفی در جریان الکتریکی متناوب موجب از هم دور شدن تیغه‌های ریز سیلسیم در اطراف مناطق بیضی گون گشته، همین امر موجب می‌شود که دانه‌های بیضی گون آلومینیم آلفا در جریان الکتریکی متناوب برخلاف جریان الکتریکی مستقیم با تیغه‌های ریز سیلسیم احاطه نشود. هم‌چنین در اطراف این مناطق بیضی گون، تیغه‌های سیلسیم پراکنده شده به هم پیوسته و تیغه‌های درشت سیلسیم را تشکیل می‌دهند. البته در این حالت با افزایش شدت جریان عبوری از ۱۲۵ آمپر به ۲۷۵ آمپر مناطق بیضی گون منظم‌تر تشکیل می‌گردند که توسط تیغه‌های ریزتری از سیلسیم احاطه شده‌اند. با افزایش شدت جریان الکتریکی چگالی الکترون‌های شارش یافته نیز بیش‌تر می‌شود و همین امر موجب می‌گردد که

دیواره قالب است. در صورتی که برای جبهه‌ی انجمادی دیواره الکتروود داخلی، شارش الکترون هم جهت با پیش‌روی فاز جامد و پس زده شدن سیلسیم است. در اثر این اندرکنش میان پیش‌روی جبهه‌ی انجمادی از دو سو و شارش الکترون‌ها، یک تحذب و تقعر در فضای توزیع سیلسیم‌های پس‌زده شده به وجود می‌آید، به نحوی که در درون این ناحیه هیچ گونه سیلسیمی وجود ندارد. با توجه به شکل این نواحی از روی تصاویر میکروسکوپی، مشاهده می‌شود که کشیدگی این نواحی در جهت شارش الکترون‌هاست. در اثر پس زده شدن سیلسیم، نقطه ذوب در این ناحیه پایین آمده و در نتیجه یک فوق تبرید بالا در ناحیه میانی به وجود می‌آید. در اثر حضور مکان‌های جوانه زنی مرجح (شاخه‌های شکسته شده دندریت‌ها، آخال‌ها و ...) در این مناطق، جوانه زنی در گستره وسیعی شکل گرفته، در نهایت دانه‌های ریز و ظریفی از سیلسیم در این مناطق رشد می‌کنند.

لازم به ذکر است با توجه به اینکه در جریان الکتریکی مستقیم یک قطب همواره مثبت و قطب دیگر همواره منفی بوده و جای این دو قطب عوض نمی‌شود، تشکیل ناحیه‌های



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی از توزیع ذرات سایشی برای نمونه‌ی ریختگی آلومینیم خالص در الف) قالب فلزی بدون جریان الکتریکی و ب) قالب فلزی متصل شده به قطب مثبت جریان الکتریکی مثبت



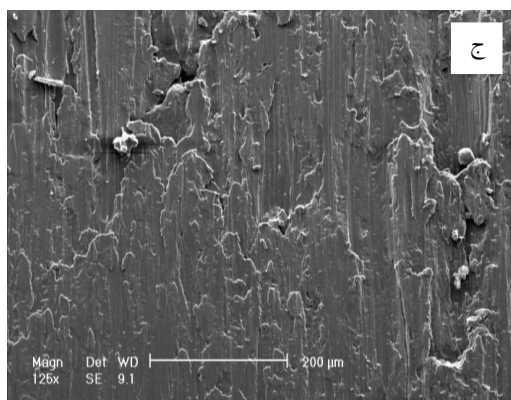
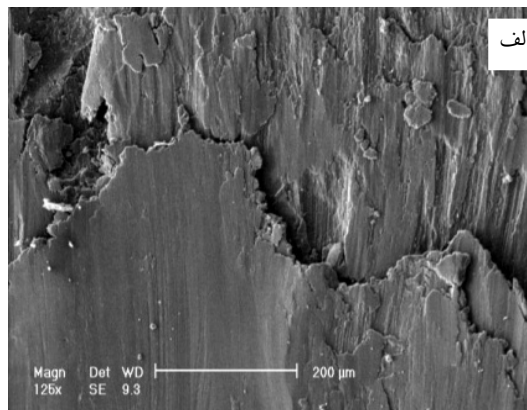
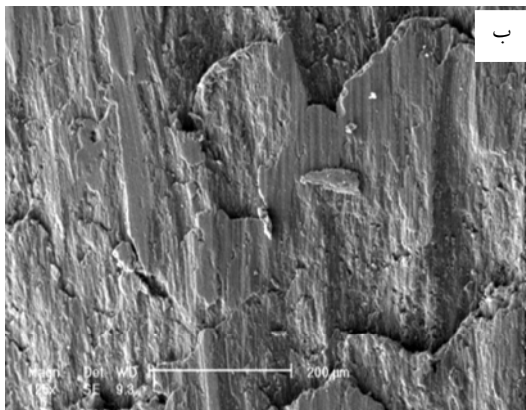
شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی با بزرگ‌نمایی بالاتر از ذرات سایشی نمونه ریختگی آلومینیم خالص در قالب فلزی متصل شده به قطب مثبت جریان الکتریکی شده. الف) ذره سایشی حاصل از مکانیزم چسبان و ب) ذره رل شده حاصل از مکانیزم خراشان

در این حالت برابر با ذره سایشی بوده، این سایش از نوع سایش خراشان می‌باشد. با اعمال جریان الکتریکی از طریق اتصال قالب به قطب مثبت و مذاب به قطب منفی، حجم شیارهای به‌وجود آمده در نمونه ریختگی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بر روی سطح سایش علاوه بر شیار، حالت‌هایی از ورقه‌ای شدن نیز مشاهده می‌شود. می‌توان گفت که در این حالت ترکیبی از دو مکانیزم سایش خراشان (خیش‌ریز) و سایش ورقه‌ای شدن وجود دارند. شکل (۱۲) توزیع ذرات سایشی را برای دو سطح سایشی در شکل (۱۱) نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اندازه ذرات سایشی نمونه‌ی ریختگی در قالب فلزی که در آن قالب به قطب مثبت جریان الکتریکی مستقیم متصل شده است نسبت به نمونه‌ی ریختگی در قالب فلزی بدون اعمال جریان الکتریکی از توزیع ریزتری برخوردارند. شکل (۱۳) دو نوع

سیلسیم‌های پس زده شده در زمان انجماد با سرعت بیشتر جابه‌جا شده، در نتیجه فرصت کمتری برای پراکنده شدن آنها در اطراف دانه‌های بیضی گون آلومینیم آلفا ایجاد می‌گردد. لذا تیغه‌های سیلسیم کوچک‌تری با افزایش شدت جریان الکتریکی از ۱۲۵ آمپر به ۲۷۵ آمپر در اطراف دانه‌های آلومینیم آلفا تشکیل می‌شوند.

۳-۳- ارزیابی سطوح و ذرات سایشی

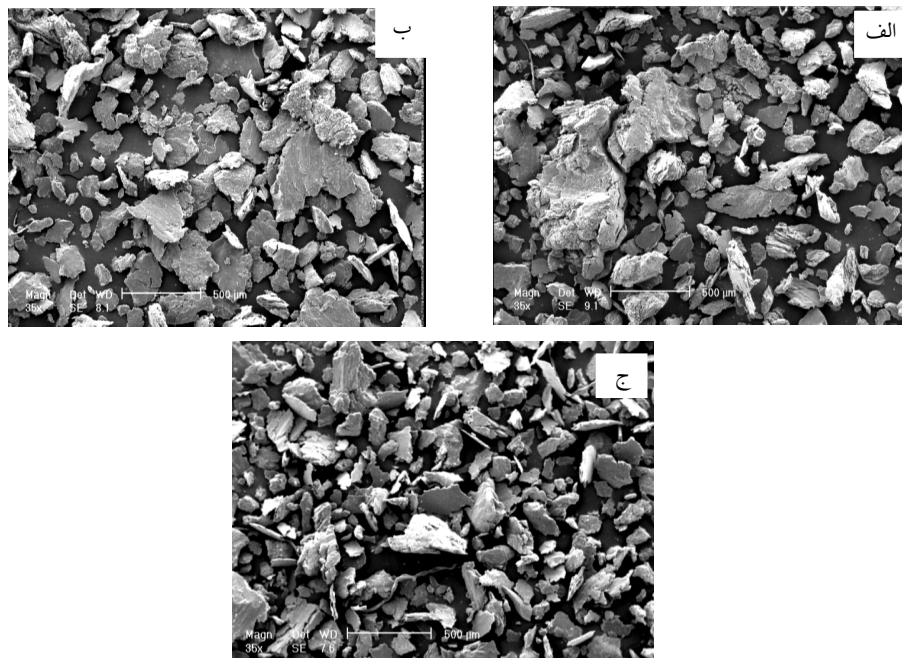
شکل‌های (۱۱) و (۱۲) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطوح و ذرات سایشی آلومینیم خالص را در دو حالت اعمال جریان الکتریکی و بدون اعمال جریان نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود برای نمونه آلومینیم خالص در قالب فلزی بدون اعمال جریان الکتریکی، شیارهای عمیقی در سطوح سایشی دیده می‌شود که مشابه خیش زدن زمین‌اند. حجم شیارهای به وجود آمده



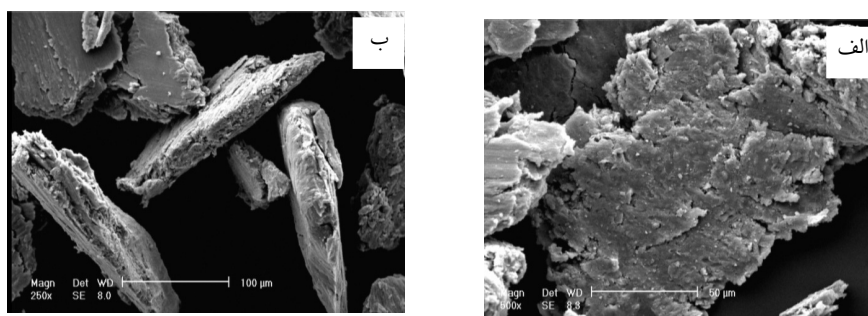
شکل ۱۴- تصویر میکروسکوپی الکترونی از سطوح سایشی نمونه‌ی ریختگی آلیاژ آلومینیم- ۱۱/۲٪ سیلیسیم،
 (الف) قالب فلزی، فاقد جریان الکتریکی، (ب) قالب فلزی متصل شده به جریان الکتریکی متناوب و
 (ج) قالب فلزی متصل شده به قطب مثبت جریان الکتریکی مستقیم

به حالت جریان الکتریکی متناوب و نیز حالت بدون جریان الکتریکی کاهش می‌یابد، ولی برخلاف آلومینیم خالص مکانیزم جدیدی در رفتار سایشی مشاهده نمی‌گردد شکل (۱۴-ج). شکل (۱۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی ذرات سایشی حاصل از سطوح سایشی در شکل (۱۴) را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود اعمال جریان الکتریکی به مذاب آلیاژ آلومینیم- ۱۱/۲٪ سیلیسیم موجب ریز شدن ذرات سایشی می‌شود. همان‌گونه که از منحنی سایشی به دست آمده است، اثر جریان الکتریکی مستقیم در اصلاح تیغه‌های سیلیسیم بیش‌تر از جریان متناوبی است. همین تأثیر در اندازه‌ی ذرات سایشی نیز مشاهده می‌شود که با اعمال جریان

ذره جدا شده از سطح سایشی نمونه ریختگی در شکل (۱۱-ب) را نشان می‌دهد. ذرات کنده شده شکل (۱۳-الف) حاصل از مکانیزم سایش چسبان و ذرات حلقوی شده شکل (۱۳-ب) حاصل از مکانیزم سایش خراشان می‌باشد. برای آلیاژ آلومینیم- ۱۱/۲٪ سیلیسیم ریخته‌گری شده در قالب فلزی بدون اعمال جریان الکتریکی، یک سایش ورقه‌ای شدن شدید در سطوح سایشی مشاهده می‌شود (شکل (۱۴-الف)). با اعمال جریان الکتریکی متناوب شدت پستی و بلندی‌ها و نیز عمق شیارهای به وجود آمده در سطح سایش کم‌تر می‌شود، در حالت اتصال جریان الکتریکی مستقیم مشابه با آلومینیم خالص شدت شیارها و پستی بلندی‌های به وجود آمده نسبت



شکل ۱۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی از توزیع ذرات سایشی آلیاژ آلومینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم، در قالب فلزی، (الف) بدون اعمال جریان الکتریکی، (ب) جریان الکتریکی متناوب و (ج) جریان الکتریکی مستقیم (قالب قطب مثبت)



شکل ۱۶- تصویر میکروسکوپی الکترونی از ذرات سایشی نمونه‌ی ریختگی آلیاژ آلومینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم، ریخته‌گری شده در قالب فلزی اعمال جریان الکتریکی شده، (الف) ذرات ورقه‌ای و (ب) حفره‌ها و ترک‌های ریز در سطح ذرات

ریزی در سطح خود بوده که معرف بروز مکانیزم سایش ورقه‌ای در سطح نمونه‌ی ریختگی آلیاژ آلومینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم است.

۴- نتیجه‌گیری

۱) اعمال جریان الکتریکی سبب بهبود مقاومت سایشی می‌شود به گونه‌ای که جریان الکتریکی مستقیم نسبت به جریان الکتریکی متناوب موثرتر است.

الکتریکی مستقیم اندازه ذرات سایشی ریزترین حالت را در بین سایر ذرات سایشی در شرایط بدون اعمال جریان الکتریکی و جریان متناوب دارا هستند. غالب این ذرات به شکل ورقه‌ای بوده که بزرگ‌نمایی بالاتر این ذرات سایشی، در شکل (۱۶) نشان داده شده است ملاحظه می‌شود که ذرات سایشی دارای حفره‌ها و ترک‌های

(۴) برخلاف روش اعمال جریان الکتریکی پالسی و همچنین روش اعمال میدان مغناطیسی بالا که بهبودی در اصلاح ریز ساختار دانه‌های آلومینیم ایجاد نمی‌کنند، روش استفاده از جریان الکتریکی مستقیم علاوه بر دانه‌های سیلیسیم، دانه‌های آلومینیم را نیز اصلاح می‌کند.

(۵) با توجه به ولتاژهای اعمالی در روش جریان الکتریکی مستقیم و متناوب (کمتر از ۶۰ ولت)، شرایط ایمنی این روش نسبت به روش‌های پالسی و مغناطیسی که با ولتاژهای بالا (بیشتر از ۲۰۰۰ ولت) کار می‌کنند به مراتب بالاتر می‌باشد.

(۲) بالاترین مقاومت سایشی در آلیاژ آلومینیم - ۱۱/۲٪ سیلیسیم با اعمال جریان مستقیم، زمانی به دست آید که قالب به قطب مثبت و مذاب به قطب منفی متصل شود.

برای آلومینیم خالص تغییر قطبیت قالب تاثیر چندانی در مقاومت سایشی نداشته و در هر دو حالت مقاومت سایشی نسبت به نمونه‌ی شاهد به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

(۳) اعمال جریان الکتریکی در حین ریخته‌گری موجب اصلاح دانه‌های سیلیسیم و آلومینیم می‌شود. در نزدیکی قطب منفی، دانه‌های سیلیسیم در راستای عبور جریان کشیده شده و توزیع منظم و هم‌راستا و در نزدیکی قطب مثبت توزیعی غیر منظم و اندازه‌ی ریزتری دارند.

واژه‌نامه

- | | | |
|------------------------------------|--|---------------------------------|
| 1. Puls Electric Current Treatment | 5. Electromagnetic Processing of Materials | 8. Primary Dendrite Arm Spacing |
| 2. Mushy Zone | 6. Uniform magnetic field | 9. Microploughing |
| 3. Liao | 7. Gradient magnetic field | |
| 4. Gao et al | | |

مراجع

- Hongsheng, D., Yong, Zh., Sanyong, J., Ruirun, Ch., Zhilong, Zh., Jingjie, G., Daming, X., Hengzhi, F., "Influences of Pulse Electric Current treatment on Solidification Microstructures and Mechanical Properties of Al-Si Piston Alloys", *China Foundry*, Vol. 6, pp. 24-31, 2009.
- Liao, X., Zhaia, Q., Luo, J., Chen, W., Gong, Y., "Refining mechanism of the Electric Current Pulse on the Solidification Structure of Pure Aluminum", *Acta Materialia*, Vol. 55, pp. 3103-3109, 2007.
- Liao, X., Gong, Y., Li, R.X., chen, W.J., Zhai, Q.J., "Effect of Pulse Magnetic Field on Solidification Structure and Properties of Pure Copper", *China Foundry*, Vol. 4, pp. 116-119, 2007.
- Gao, M., Hea, G. H., Yang, F., Guo, J.D., Yuan, Z.X., Zhou, B.L., "Effect of Electric Current Pulse on tensile Strength and Elongation of Casting ZA27 alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 337, pp. 110-114, 2002.
- Zhang, F., Zhang, M., Bo, L., Li, J., "Effect of High-Energy-Density Pulse Current on Solidification", *Materials science*, Vol. 13, pp. 120-122, 2007.
- Ma, J., Li, J., Gao, Y., Zhai, Q., "Grain Refinement of Pure Al with Different Electric Current Pulse Modes", *Materials Letters*, Vol. 63, pp. 142-144, 2009.
- Wang, Q., Wang, Ch., Liu, T., Wang, K., Hewer, J., "Control of Solidified Structures in Aluminum-silicon alloys by high magnetic fields", *Journal of Materials science*, Vol. 42, pp. 10000-10006, 2007.
- Qiang, W., En-gang, W., Ji-cheng, H., Ke, H., "Effects of Strong Magnetic Fields on Solidified Structures of Metals with Different Susceptibilities", *Proceeding of the Electromagnetic Processing of Materials International Conference*, pp. 1-5, 2003.
- Shu-xian, H., Jun, W., Bao-de, S., Yao-he, Zh., "Effect of High Density Pulse Electric Current on Solidification Structure of Low Temperature Melt of A356 alloy", *Trans Nonferrous Metal Society China*, Vol. 12, pp. 414-418, 2002.
- Yun-bo, Zh., Zhong-ming, R., Qiu-xia, S., Zhi-wen, J., Kang, D., Kuang, X., "Behavior of Particles in Front of Metallic Solid/liquid Interface in Electromagnetic Field", *Trans Nonferrous Metal Society China*, Vol. 13, pp. 755-763, 2003.
- Lee, J. A., "Cast Aluminum Alloy for High Temperature Application", The 132nd TMS Annual Meeting and Exhibition San Diego Convention Center, San Diego, NASA/Marshal Space Flight Center(MSFC), 2003.