

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

وحید عمرانی دیزج یکان<sup>\*</sup>، رحمت الله عمامدی و حمیدرضا سلیمانی جزی  
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

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

-چکیده-

$\alpha$ -Al

: واژگان کلیدی

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

V. Omrani Dizajyekan<sup>\*</sup>, 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  $\alpha$ -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

## ۱- مقدمه

پالسی بر روی ساختار انجام‌دادی آلومینیم خالص نشان می‌دهد که فرایند اصلاح ریز ساختار انجام‌دادی 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 انجام‌دادی به وجود نمی‌آورد. در نتیجه می‌توان بیان کرد که اعمال جریان الکتریکی پالسی بر روی آلومینیم خالص نمی‌تواند موجب ذوب و یا از بین رفتار رشد کریستال‌ها گردد. ولی با این وجود، ماکرو ساختارهای بسیار ریز به وسیله اعمال این جریان الکتریکی در هنگام انجام مذاب قابل مشاهده است [۲۴ و ۶].

گائو و همکاران<sup>۳</sup> 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 دندربیت‌ها 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<sup>۵</sup> نیز مورد ارزیابی‌های گسترشده قرار گرفته است. این روش به عنوان یک تکنیک مهم در زمینه‌های فرایند مواد که در گیر با کترل شکل، جریان محرك، 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<sup>۶</sup> و میدان مغناطیسی گرادیانی<sup>۷</sup> به ترتیب توسط نیروی لورنتز و نیروی مغناطیسی بر روی ساختار انجام‌دادی-تاثیرگذار است [۷]. سیلیسیم اولیه در آلیاژ هایپر یوتکنیک آلومینیم-سیلیسیم، تحت میدان مغناطیسی یکنواخت دارای توزیع یکنواخت در زمینه بوده در حالی که با اعمال میدان مغناطیسی گرادیانی به سبب اندرکش نیروهای بویانسی و مغناطیسی، ذرات سیلیسیم اولیه در قسمت‌های بالا و پایین نمونه‌ها تشکیل می‌شوند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که اعمال میدان‌های مغناطیسی

اگر با نگاهی کنجدکاوانه 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 یوتکنیک می‌گردد، بلکه موجب افت خواص مکانیکی می‌شود. روش‌های متنوعی برای اصلاح مورفوژوئی تیغه‌های سیلیسیم به کار گرفته شده است که مهم‌ترین آن‌ها اصلاح شیمیایی با استفاده از نمک سدیم می‌باشد، اما حضور فسفر در این نمک‌ها سبب آلدگی محیط زیست، تخریب ریز ساختار اصلاح شده در شرایط استفاده از مقادیر بالای نمک و ایجاد خطا در کترنل 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 گستره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است به گونه‌ای که یافته‌های ارزشمندی در مورد اعمال عملیات جریان الکتریکی پالسی<sup>۸</sup> بر روی منطقه خمیری<sup>۹</sup> آلیاژها به دست آمده است. نقش اعمال میدان الکتریکی بر انجام‌داد 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<sup>۱۰</sup> استدلال کرد که انجام‌داد 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 اشعه می‌دهد. تحقیقات لیاو و همکارانش در زمینه مکانیزم اصلاح توسط جریان الکتریکی

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	<۰/۰۲۵۴۰	<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
<۰/۰۰۳۰	<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 یوتکنیک دارد [۱۰-۲۶].

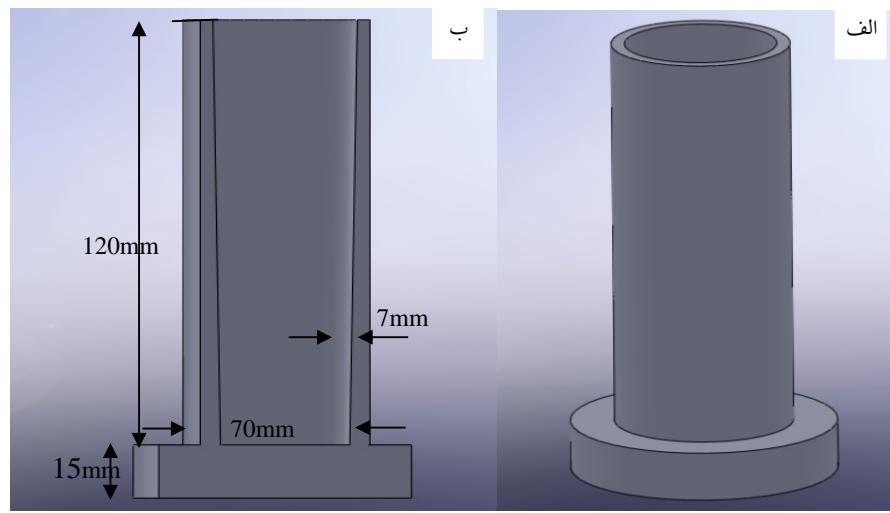
با در نظر گرفتن خاصیت ذرهای الکترون در کنار خاصیت موجی، به نظر می‌رسد که با اعمال جریان الکتریکی به مذاب در زمان ریختگی، در اثر برخورد الکترون‌های در حال شارش با دندانهای در حال رشد، یک اصلاح ریز ساختاری در هنگام رشد این دندانهای صورت پذیرد، به گونه‌ای که با هم جهت گرفتن و غیر هم جهت گرفتن الکترون‌های در حال شارش با جهت رشد دندانهای دندانهای در حال رشد، بتوان سرعت رشد این دندانهای 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 ریختگی در قالب و انجماد و سپس نقش جریان در بهبود مقاومت سایشی بررسی خواهد شد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

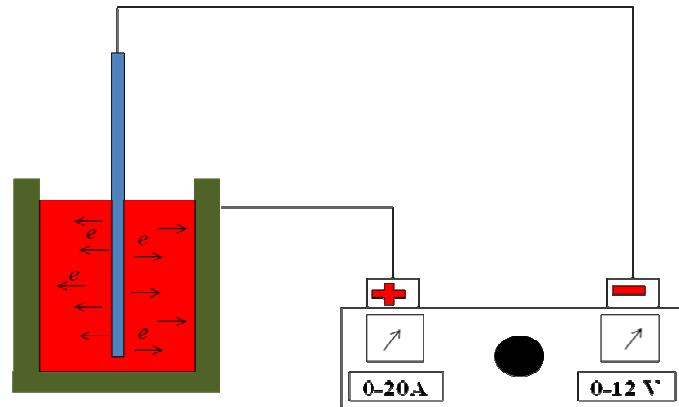
### ۱-۱- مواد مصرفی اولیه

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 یوتکنیکی 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 یوتکنیکی به کمترین مقدار رسیده، افزایش بیشتر شدت میدان مغناطیسی از این حد موجب افزایش مجدد لایه‌های یوتکنیکی می‌شود. علاوه بر آن، انرژی مغناطیسی قابلیت تاثیرگذاری بر تعادل ترمودینامیکی سیستم انجامدادی را داشته و غلظت آلومینیم یوتکنیک را در ساختار یوتکنیک آلیاژ آلومینیم- سیلیسیم افزایش می‌دهد. عیب اصلی اعمال میدان مغناطیسی، حبس شدن حباب‌های گازی به هم پیوسته در قسمت‌های مرکزی نمونه است. در حالی که در شرایط معمول، حباب‌های گازی در قسمت‌های فوقانی نمونه ریختگی ظاهر می‌شوند [۱۰-۲۶]. مشابه با حالت فوق، در روش جریان الکتریکی پالسی نیز یک کاهش در اندازه بازوهای اولیه دندانهای در فاز  $\alpha\text{-Al}$  ایجاد می‌شود. علاوه بر آن سبب بهبود و اصلاح در شکل و توزیع ترکیبات بین فلزی نیز می‌شود. در این میان، ترکیبات بین فلزی  $\text{Mg}_2\text{Si}$  با اعمال جریان الکتریکی پالسی ریزتر می‌شود. ترکیب  $\text{CuAl}_2$  از حالت دندانهایی به حالت کروی تبدیل می‌شود و ترکیب بین فلزی  $\text{Al}_3\text{Ni}$  بر روی سیلیسیم یوتکنیک رشد می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که اعمال جریان الکتریکی پالسی تاثیر مشابهی از نظر تشکیل دانه‌های  $\alpha\text{-Al}$  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 حداقل ظرفیت دستگاه استفاده شد. برای جریان متناوب نیز از یک ترانسفورماتور کاهنده (دستگاه جوش‌کاری) استفاده شد که محدوده کاری این ترانسفورماتور اختلاف پتانسیل  $220-230$  ولت و شدت جریان  $5-20$  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 یکسو کننده‌ی جریان (رکتیفایر) استفاده شد که اختلاف پتانسیل  $0$  تا  $12$  ولت و شدت جریان عبوری  $0$  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 300 Epiphot و برای بررسی سطوح سایش در سطح نمونه‌های ریختگی از میکروسکوپ الکترونی رویشی 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  $19/03$  آمپر و  $3/75$  ولت است. در مرحله‌ی دوم جریان متناوب با دو شدت جریان، به ترتیب  $125$  آمپر و  $275$  آمپر و اختلاف پتانسیل  $9/2$  و  $11/5$  ولت بین قالب فلزی و مذاب اعمال شد. سپس برای بررسی نقش نوع الکترود، محل الکترودها تغییر نموده و خواص سایشی اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی مقاومت سایشی نمونه‌ها از آزمون سایش پیش روی رینگ تحت شرایط بار  $8/5$  نیوتون و سرعت دوران  $50$  دور بر دقیقه درجهت ساعت‌گرد با پین فولادی استفاده و در نهایت میزان کاهش وزن نمونه‌ها نسبت به نمونه بدون جریان الکتریکی مطابق معادله (۱) محاسبه شد.

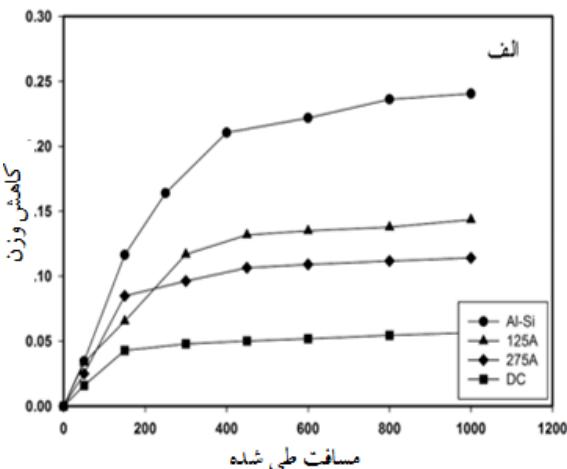
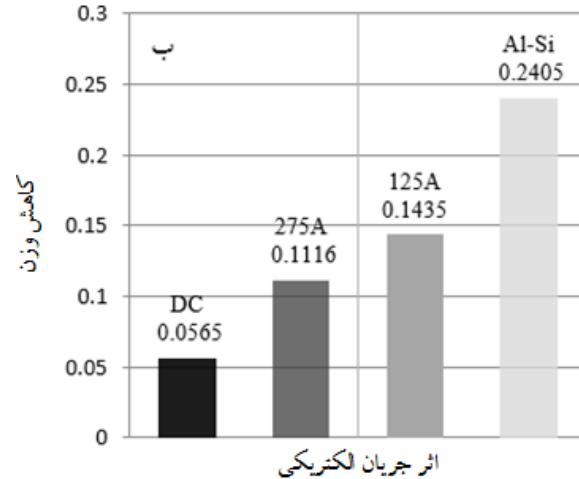
$$\frac{W_{\text{همراه با جریان}} - W_{\text{(بدون جریان)}}}{W_{\text{(بدون جریان)}}} \quad (1)$$

در معادله (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 ریخته شده آلیاژ آلومینیم-



شکل (۳-الف) روند تغییر کاهش وزن نمونه ریختگی آلیاژ آلومینیم  $11/2$ % سیلیسیم نسبت به مسافت پیموده شده و (ب) مجموع کاهش وزن بعد از مسافت  $1000$  متر

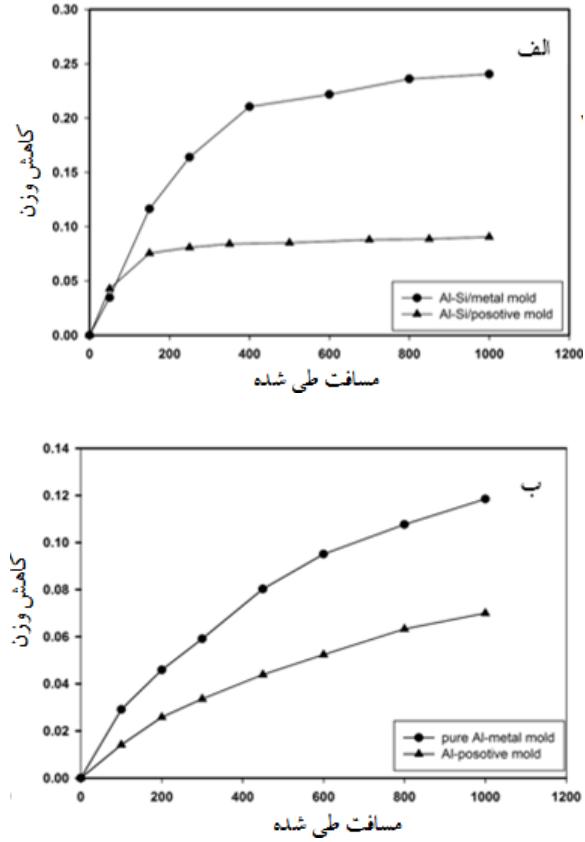
و ولتاژ  $40-50$  ولت و شدت جریان  $75-500$  آمپر در قسمت خروجی است که از این محدوده، شدت جریان  $125$  و  $275$  آمپر انتخاب شد.

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 آلیاز آلمینیم - 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.

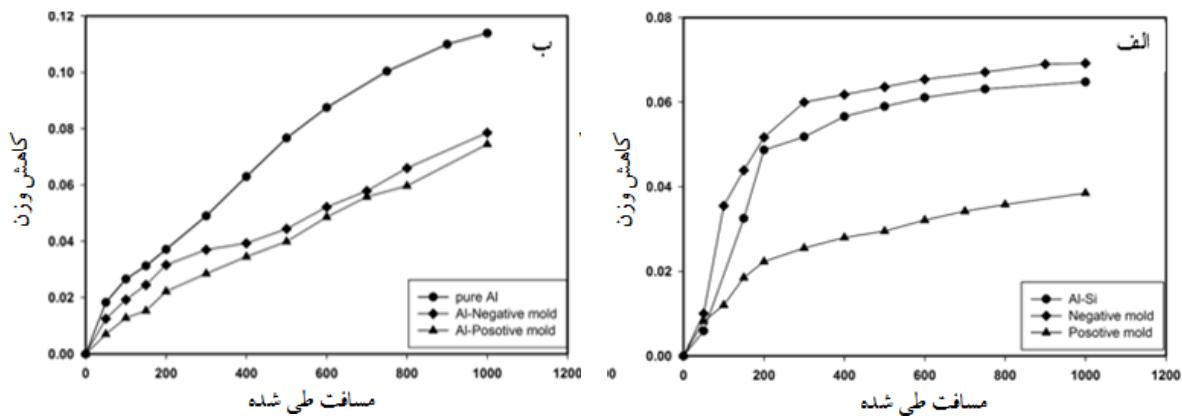
شکل (۴) روند تغییر کاهش وزن نمونه‌های ریختگی آلیاز آلمینیم - ۱۱/۲٪ سیلیسیم و آلمینیم خالص را نسبت به مسافت طی شده در شرایط اعمال جریان الکتریکی مستقیم با اعمال جریان الکتریکی، مقاومت سایشی نمونه‌های ریختگی بهبود یافته است، به طوری که درصد کاهش وزن در نمونه آلمینیم خالص پس از طی ۱۰۰۰ متر نسبت به نمونه،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

در مرحله بعد برای ارزیابی اثر نوع الکترود (مثبت یا منفی بودن هر یک از الکترودها) محل الکترود تغییر کرده و بر عکس حالت قبل این بار مذاب آلمینیم 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 الکترود منفی مقاومت سایشی آلیاز ریختگی آلمینیم - ۱۱/۲٪ سیلیسیم کاهش یافته و حتی نسبت به نمونه‌ی ریختگی این آلیاز نیز در شرایط بدون اعمال جریان

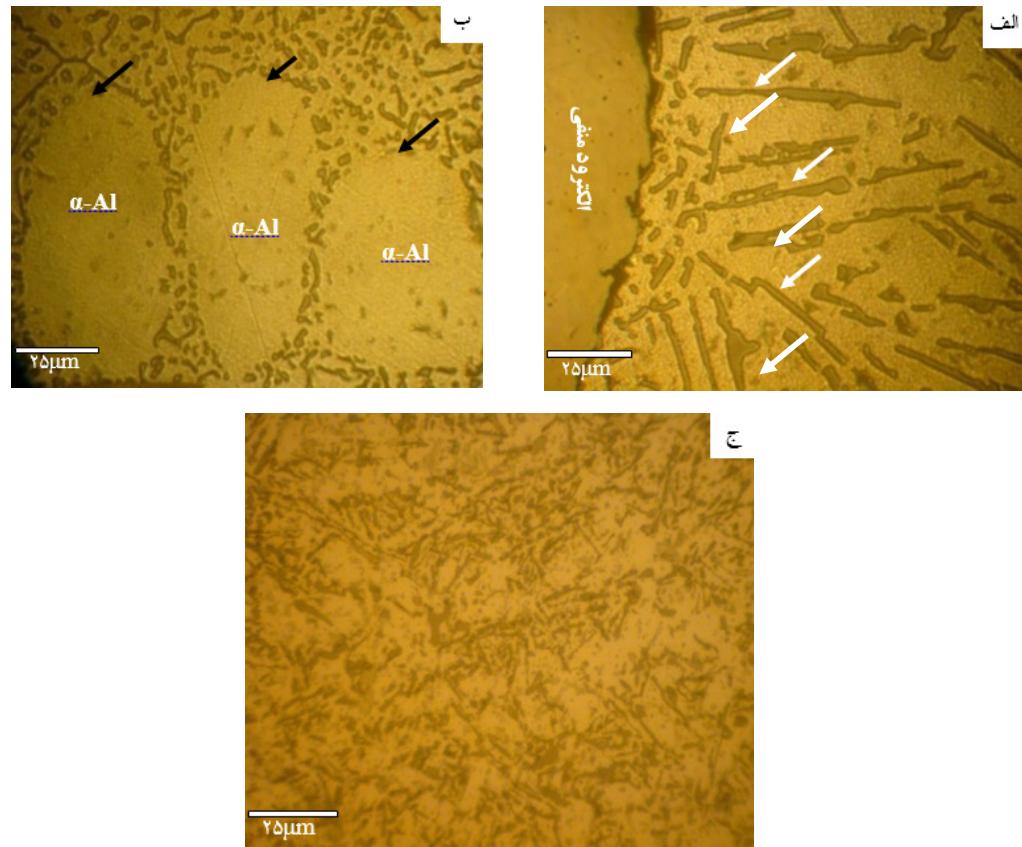


شکل ۴- روند تغییر کاهش وزن نمونه‌ی ریختگی نسبت به مسافت پیموده شده در حالت اعمال جریان الکتریکی مستقیم در قالب فلزی، (الف) آلیاز آلمینیم - ۱۱/۲٪ سیلیسیم و (ب) آلمینیم خالص

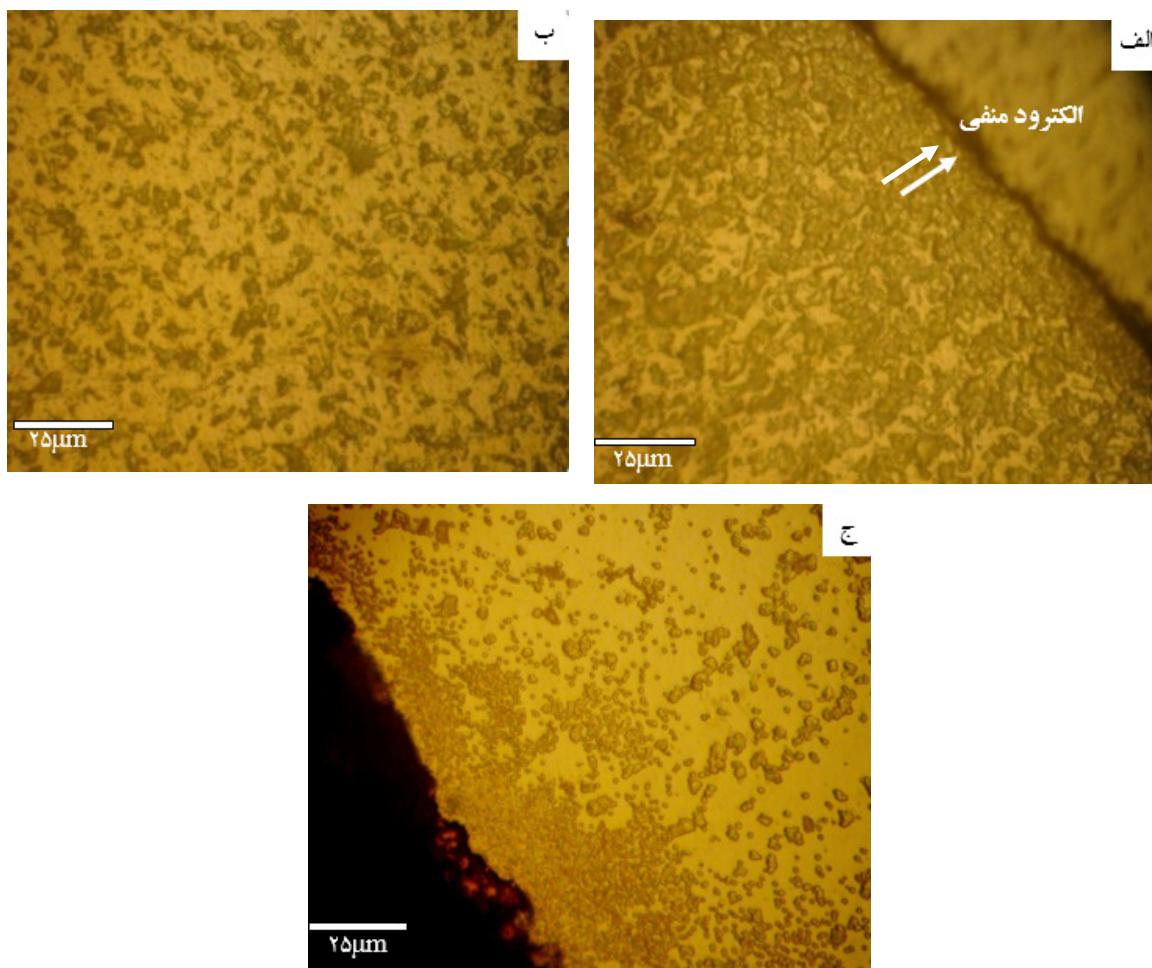
۱۱/۲٪ سیلیسیم در سه شرایط عدم اعمال جریان الکتریکی، تحت اعمال جریان الکتریکی مستقیم با شدت ۱۹/۵۳ آمپر و اختلاف پتانسیل ۳/۷۵ ولت و جریان متناوب با شدت جریان‌های ۱۲۵ و ۲۷۵ آمپر که اختلاف پتانسیل در آن‌ها به ترتیب ۹/۵ و ۱۱/۵ ولت است نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بالاترین مقاومت سایشی زمانی است که جریان 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 آلمینیم ۱۱/۲٪ سیلیسیم و (ب) آلمینیم خالص



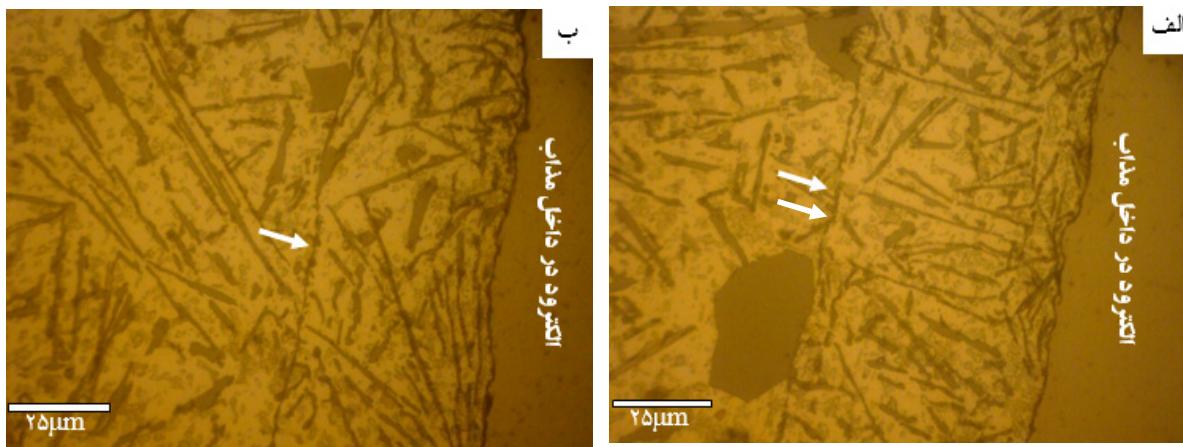
شکل ۶- مورفولوژی به وجود آمده در ریز ساختار نمونه ریختگی آلیاژ آلمینیم ۱۱/۲٪ سیلیسیم در اطراف الکترود مثبت و مناطق میانی و الکترود منفی، (الف) اطراف الکترود منفی ، (ب) مناطق میانی دو الکترود و (ج) اطراف الکترود مثبت



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



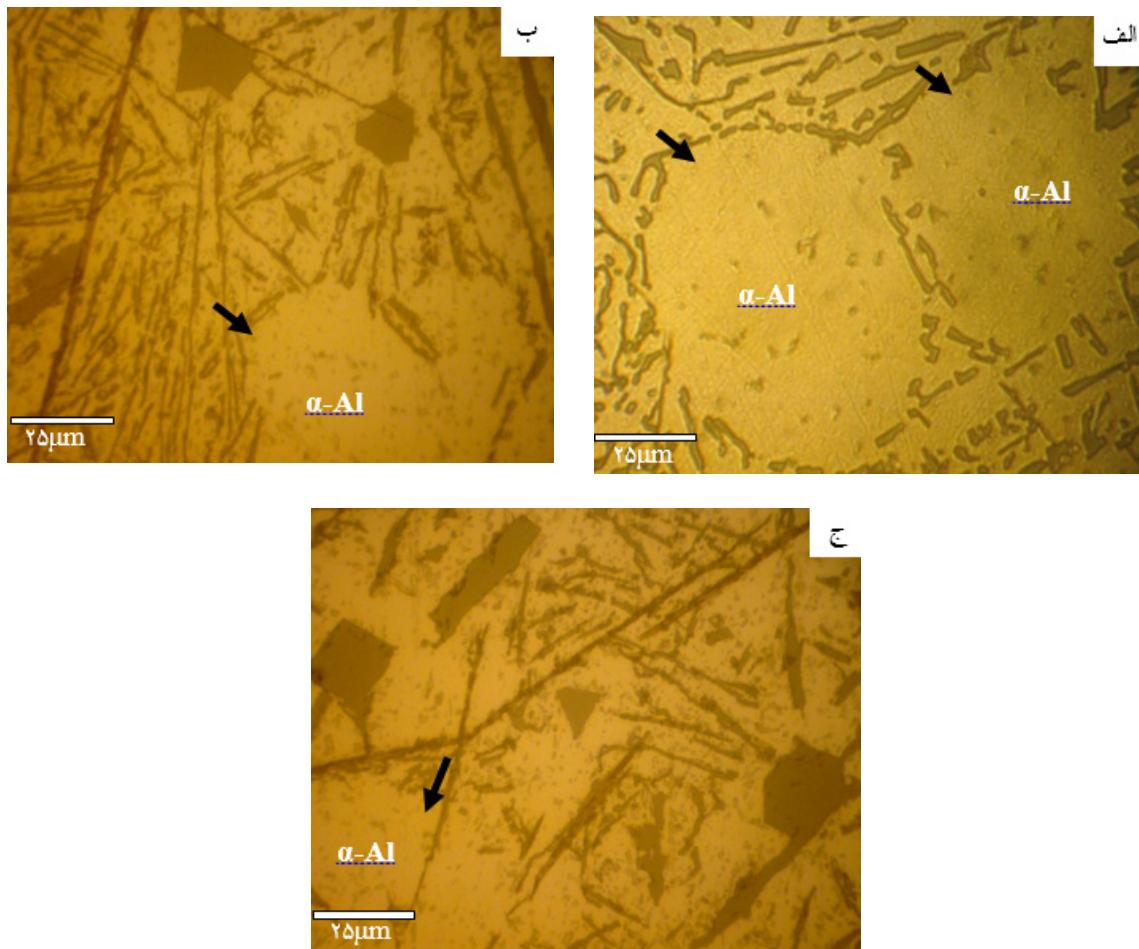
شکل ۸- تشکیل مرز مشخص در آلیاژ آلمینیم- ۱۱/۲٪ سیلسیم اطراف الکترود منفی در حالت اعمال جریان متناوب،  
 (الف) شدت جریان ۲۷۵ آمپر و (ب) شدت جریان ۱۲۵ آمپر

ناحیه میان دو الکترود مثبت و منفی دانه‌های بسیار ظریف سیلسیم اطراف دانه‌های تقریباً کروی  $\alpha$ -Al (پیکان‌های سیاه) را احاطه کرده‌اند. برای آلمینیم خالص نیز روند کشیدگی و ریزشیدگی دانه‌ها در نزدیکی دو الکترود منفی و مثبت دیده شده ولی در مناطق میانی الکتروودها ساختار متفاوتی مشاهده نمی‌شود. شکل (۸) نشان می‌دهند که اعمال جریان الکتریکی متناوب در زمان ریخته گری موجب تشکیل شدن مرزی مشخص در اطراف الکترود منفی می‌شود که در داخل این مرز مشخص دانه‌های سیلسیم تقریباً ریز و در خارج از آن بزرگ هستند. در اکثر موارد نیز مشاهده می‌گردد که سیلسیم اولیه بزرگی بر روی این مرز مشخص وجود دارد. شکل (۹) نشان می‌دهد که دانه‌های سیلسیم اولیه با اعمال جریان الکتریکی اصلاح می‌شوند. بر خلاف جریان الکتریکی مستقیم که در آن دانه‌های سیلسیم اولیه درشتی ملاحظه نشده بلکه به صورت ظریف و کشیده‌اند (تیغه‌های نشان داده شده با پیکان سفید در شکل (۶)، در جریان متناوب سیلسیم‌های 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  $\alpha$ -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 آلمینیم- ۱۱/۲٪ سیلسیم که در آن دو فاز آلمینیم (نرم و رساناتر) و فاز سیلسیم (سخت و کم رساناتر) توزیع شده‌اند، در آلمینیم خالص تنها یک فاز وجود داشته، تغییر قطبیت قالب تاثیری در نحوه توزیع آن ندارد. ولی در مجموع اندرکنش میان شارش الکترون‌ها و دندربیت‌های آلمینیم در زمان اعمال جریان الکتریکی و دانه‌های آلمینیم در زمان اعمال جریان الکتریکی افزایش مقاومت سایشی نمونه ریختگی نسبت به نمونه بدون اعمال جریان الکتریکی می‌شود.

### ۲-۳- بررسی ریزساختاری

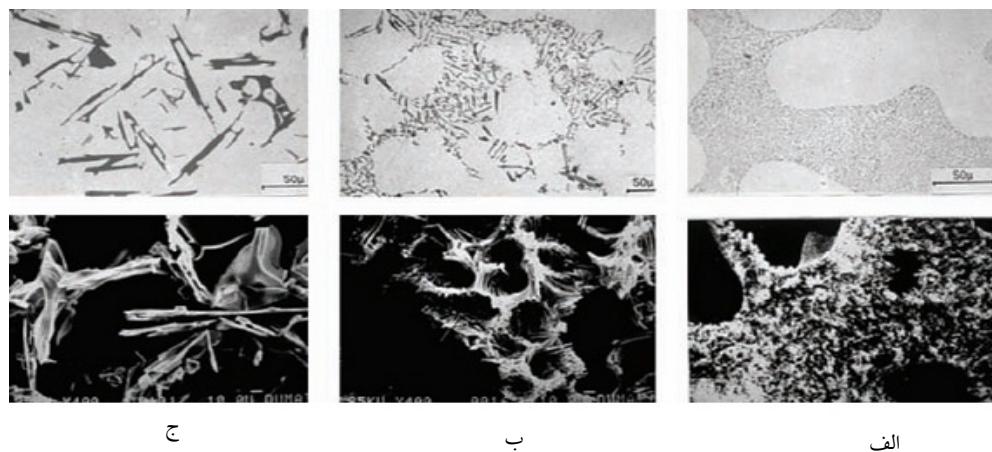
شکل‌های (۶) و (۷) ریزساختار تشکیل شده در سه ناحیه نزدیک الکترود منفی (مذاب)، مابین دو الکترود مثبت و منفی و نزدیک الکترود مثبت (قالب فلزی) را در آلمینیم خالص و آلياژ آلمینیم- ۱۱/۲٪ سیلسیم نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در آلياژ آلمینیم- ۱۱/۲٪ سیلسیم، در نزدیکی قطب منفی دانه‌های سیلسیم در امتداد شار الکترون کشیده شده (پیکان‌های سفید) و در نزدیکی قطب مثبت دانه‌های سیلسیم 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 الکترود داخلی (که به قطب منفی متصل شده است)، خاصیت ذره‌ای الکترون است که دندربیت‌های 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 کشیده سیلیسیم با ضخامت کم‌تر نسبت به نمونه‌ی بدون جریان الکتریکی ایجاد می‌شود، زیرا بخش قابل توجهی از جریان الکترون‌ها از

شکلی متقاضی 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  $\alpha\text{-Al}$  ظرفیت 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

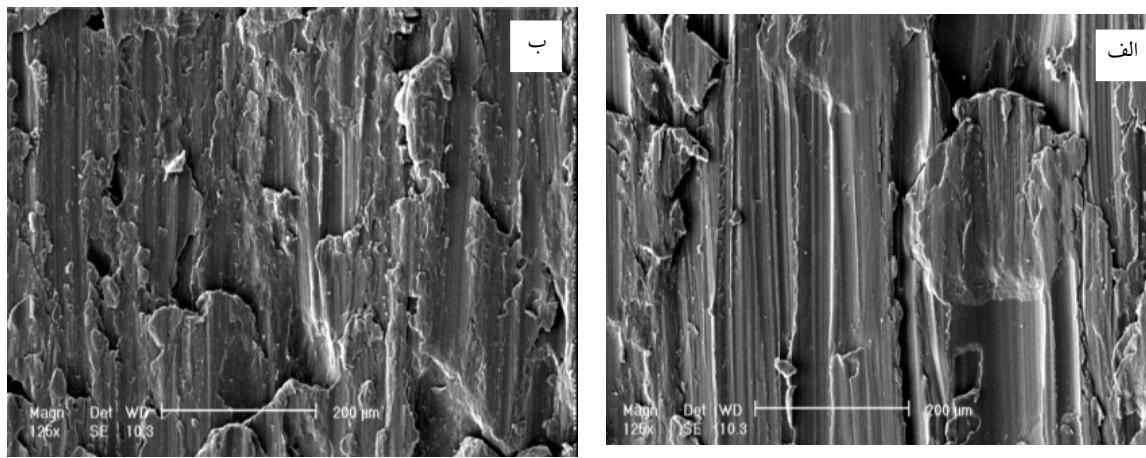


شکل ۱۰- اثر اصلاح شیمیایی بر ریزساختار تیغه‌های سیلیسیم در آلیاژ آلمینیم-سیلیسیم یوتکنیک. میکروسکوپ نوری (بالا)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (پایین). (الف) غلظت زیاد اصلاح کننده، (ب) غلظت مناسب اصلاح کننده و (ج) بدون اصلاح کننده شیمیایی [۱۱]

مشاهده می‌شود و خارج از آن این مناطق وجود ندارند.

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

زمینه‌ی آلمینیم 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 (اندرکشن) به دندربیت‌های در حال رشد از دیواره قالب اعمال شده و سبب شکسته شدن و ریزشدن دانه‌های سیلیسیم در نواحی قطب مثبت می‌شود. بدیهی است که حضور این بازوی‌های 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 الکترود داخلی و الکترود خارجی) به وجود آمده است که موید دانه‌های آلمینیم 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 دانه‌ی سیلیسیمی وجود ندارد و نکته مهم‌تر اینکه اندازه‌ی تیغه‌های سیلیسیم در اطراف این مناطق فقر از سیلیسیم، بسیار ریز و ظرف است. جالب توجه است که این مناطق تنها در قسمت میانی نمونه‌ی ریختگی آلیاژ آلمینیم ۱۱/۲٪ سیلیسیم و در حد واسط الکترود داخلی (قطب منفی) و قالب (قطب مثبت)

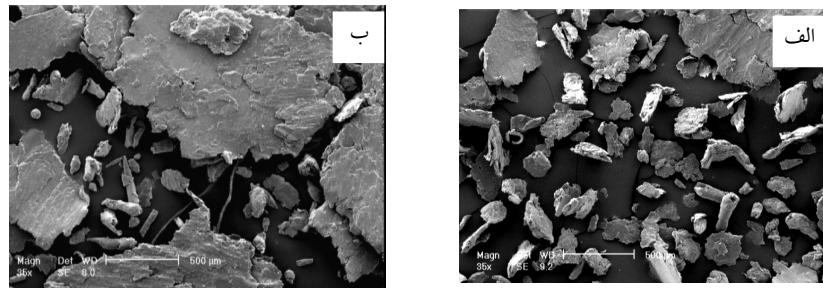


شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپی الکترونی از سطوح سایشی نمونه‌های ریختگی Al خالص، (الف) قالب فلزی بدون جریان الکتریکی و (ب) قالب فلزی متصل شده به قطب مثبت جریان الکتریکی مستقیم

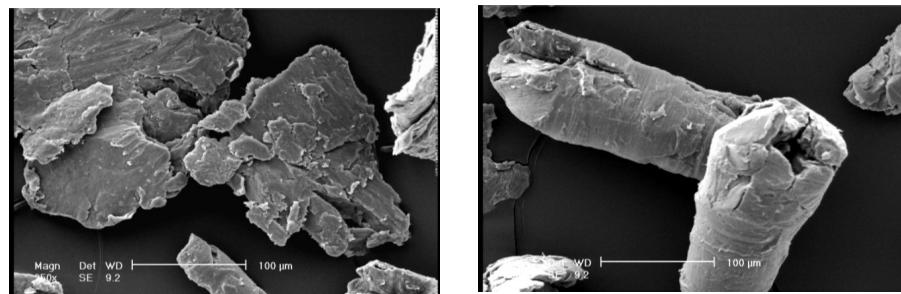
بیضی گون دانه‌های آلومنینیم آلفا که تیغه‌های ریز سیلسیم احاطه شده‌اند در مناطق میانی دو الکترود به صورت بیضی گون‌های منظم دیده می‌شوند. در حالی که در جریان الکتریکی متناوب که در آن هر یک از قطب‌های الکتریکی با فرکانس ۵۰ هرتز به طور سینوسی مثبت و منفی می‌شوند، مناطق بیضی گون دانه‌های آلومنینیم آلفا که توسط تیغه‌های سیلسیم احاطه شده‌اند دارای شکل منظمی همانند ساختاری که در جریان مستقیم دارند، نیست. به نظر می‌رسد که تغییر متناوبی 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 آلومنینیم 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 انجامدادی دیواره الکترود داخلی، شارش الکترون هم جهت با پیش‌روی فاز جامد و پس زده شدن سیلسیم است. در اثر این اندرکنش میان پیش‌روی جبهه‌ی انجامدادی از دو سو و شارش الکترون‌ها، یک تحدب و تقرع 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 مرچح (شاخه‌های شکسته شده دندربیت‌ها، آخال‌ها و ...) در این مناطق، جوانه زنی در گستره وسیعی شکل گرفته، در نهایت دانه‌های ریز و ظرفی 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 نمونه ریختگی آلومینیم خالص در (الف) قالب فلزی بدون جریان الکتریکی و (ب) قالب فلزی متصل شده به قطب مثبت جریان الکتریکی مثبت



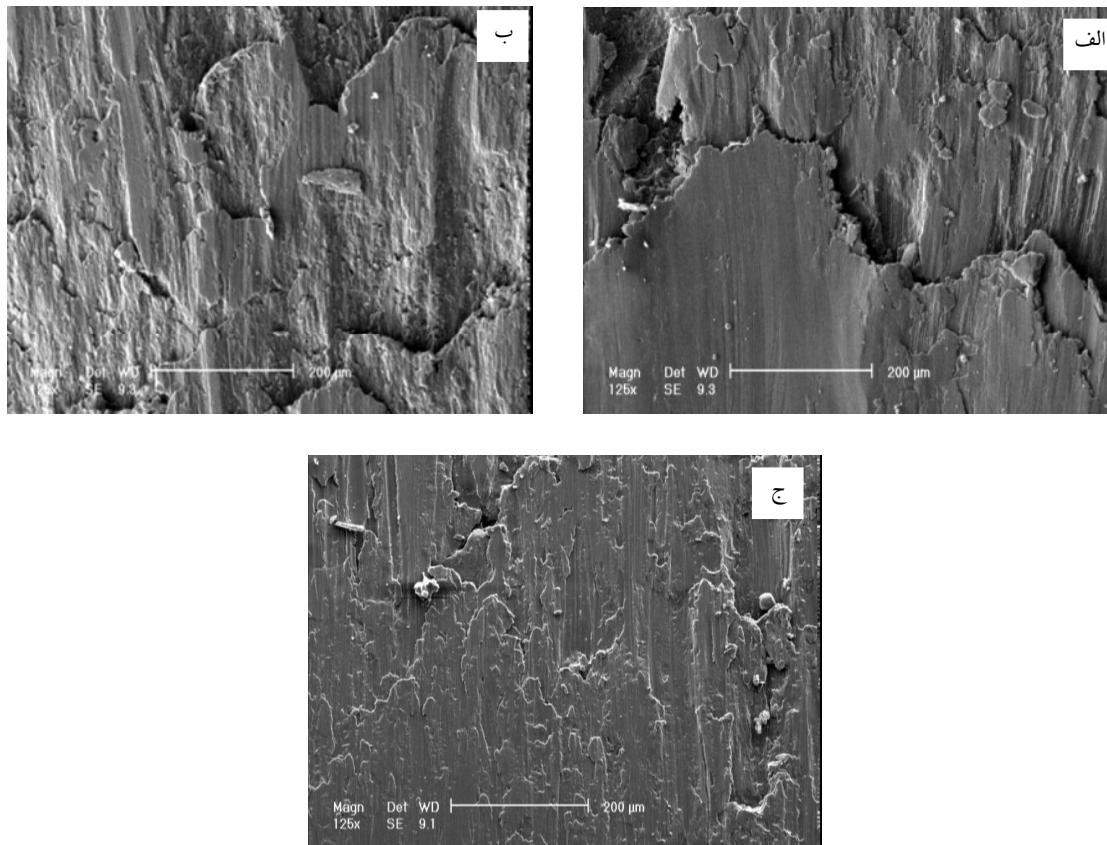
شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی با بزرگ نمایی بالاتر از ذرات سایشی نمونه ریختگی آلومینیم خالص در قالب فلزی متصل شده به قطب مثبت جریان الکتریکی شده. (الف) ذره سایشی حاصل از مکانیزم چسبان و (ب) ذره رل شده حاصل از مکانیزم خراشان

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 به وجود 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<sup>۹</sup>) 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 نمونه 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

سیلیسیم‌های پس زده شده در زمان انجماد با سرعت بیشتری جایه‌جا شده، در نتیجه فرصت کمتری برای پراکنده شدن آنها در اطراف دانه‌های بیضی گون آلومینیم آلفا ایجاد می‌گردد. لذا تیغه‌های سیلیسیم 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 رویشی 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 سطح سایشی دیده می‌شود که مشابه خیش زدن زمین‌اند. حجم شیارهای به وجود آمده



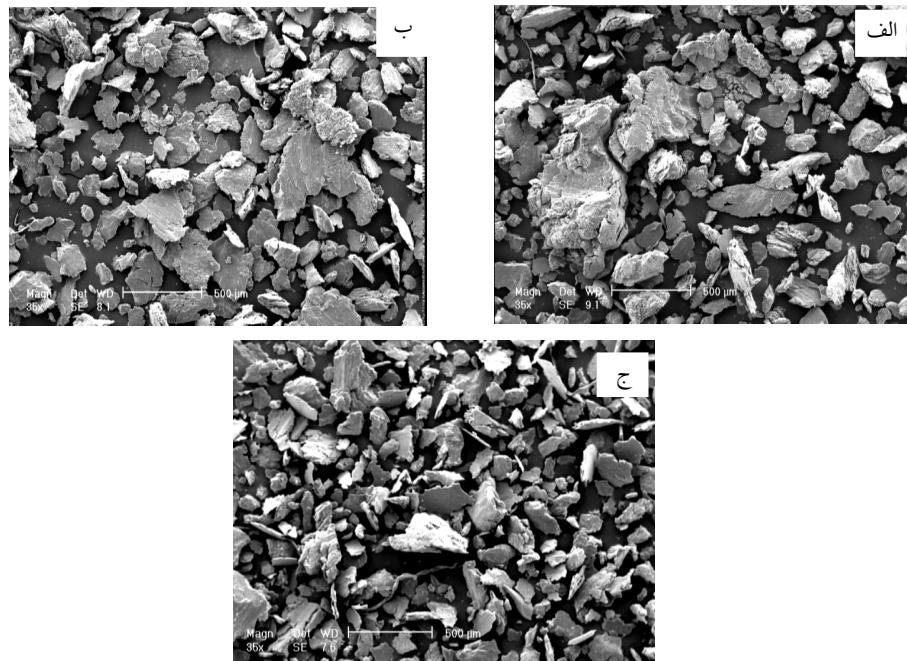
شکل ۱۴- تصویر میکروسکوپی الکترونی از سطح سایشی نمونه‌ی ریختگی آیاژ آلومنینم- ۱۱/۲٪ سیلسیم.

(الف) قالب فلزی، فاقد جریان الکتریکی، (ب) قالب فلزی متصل شده به جریان الکتریکی متناوب و

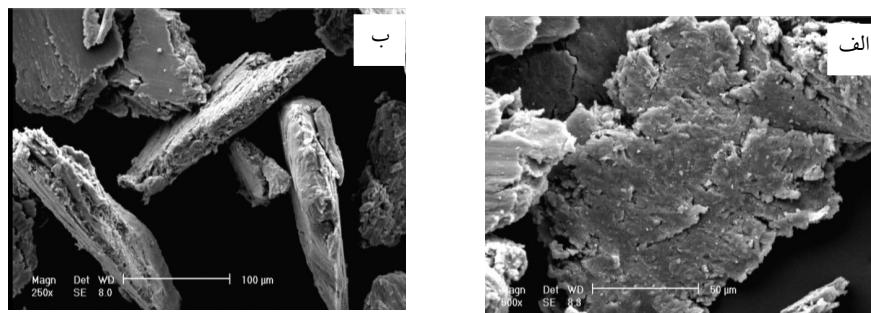
(ج) قالب فلزی متصل شده به قطب مثبت جریان الکتریکی مستقیم

به حالت جریان الکتریکی متناوب و نیز حالت بدون جریان الکتریکی کاهش می‌یابد، ولی برخلاف آلومنینم 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 آیاژ آلومنینم- ۱۱/۲٪ سیلسیم موجب ریز شدن ذرات سایشی می‌شود. همان‌گونه که از منحنی سایشی به دست آمده است، اثر جریان الکتریکی مستقیم در اصلاح تیغه‌های سیلسیم بیشتر از جریان متناوبی است. همین تاثیر در اندازه 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 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 آلومنینم خالص شدت شیارها و پستی بلندی‌های به وجود آمده نسبت



شکل ۱۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی از توزیع ذرات سایشی آلیاژ ریختگی آلمینیم-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 آلمینیم-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 آلمینیم-۱۱/۲٪ سیلیسیم است.

#### ۴-نتیجه گیری

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. غالباً 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 نمی‌کند، 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 اینمی 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 به طور 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 Denderit Arm Spacing |
| 2. Mushy Zone                      | 6. Uniform magnetic field                  | 9. Micropluoging                |
| 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., Hewear, 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 132<sup>nd</sup> TMS Annual Meeting and Exhibition San Diego Convention Center, San Diego, NASA/Marshall Space Flight Center(MSFC), 2003.