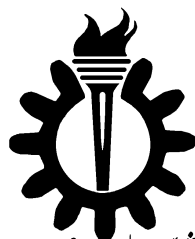


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

بررسی خواص مکانیکی و هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت  $\text{Cu} - \text{Al}_2\text{O}_3$

ساخته شده به روش اکسیداسیون داخلی

حسین صداقتی

اساتید راهنما:

دکتر حسن ثقفیان

دکتر مسعود گودرزی

پایان نامه جهت دریافت مدرک کارشناسی ارشد

گرایش شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

کلیه حقوق مادی و معنوی این پایان نامه متعلق به دانشگاه علم و صنعت ایران است.

زمستان ۸۶

## تشکر و قدردانی

اساتید راهنمای این پروژه آقایان دکتر ثقفیان و دکتر گودرزی به حق شایسته‌ی این نام بودند، و در تمام مراحل انجام این کار ضمن چشمپوشی بر کاستی‌ها، توجه و راهنمایی آن‌ها همواره شامل حال من بود، که قدردان زحمات ایشان هستم.

در مسیر انجام این پروژه، عزیزانی صادفانه همکاری کردند که با ذکر نامشان از زحماتشان قدردانی می‌کنم.

- آقای مهندس مهرجو مسئول آزمایشگاه هیدرومتالورژی.
- خانم دکتر نعیم‌پور مسئول آزمایشگاه بیوتکنولوژی در دانشکده شیمی.
- آقای مهندس نورحسینی مسئول کارگاه مهندسی برق.
- آقای مهندس یوسف شفیعی اپراتور میکروسکوپ الکترونی در صنایع شهید محلاتی.
- سرکار خانم امیرشکاری اپراتور میکروسکوپ الکترونی در دانشکده.
- آقای مهندس بابک خلاق از دانشجویان کارشناسی ارشد دانشکده.
- آقای مهندس کریمی در مرکز تحقیقات آلومینیم.
- سرکار خانم مهندس نقی‌زاده مسئول آزمایشگاه عملیات حرارتی دانشکده.
- آقای مهندس حیدری از دانشجویان کارشناسی ارشد دانشکده.
- سرکار خانم مهندس عادل‌ی مسئول آزمایشگاه اشعه‌ی ایکس دانشکده.
- آقای مهندس مسیحیان پور مسئول آزمایشگاه فرآیند ساخت سرامیک‌ها.
- آقای مهندس سعادت مسئول آزمایشگاه خواص مکانیکی.
- آقای هروس نظری سازنده‌ی محفظه‌ی آسیاکاری در کارگاه صنعتی ورژ.
- آقای کلانتری در آموزش دانشکده.
- سرکار خانم ابراهیمی در آموزش دانشکده.
- آقای مهندس کریمی مسئول سایت کامپیوتر دانشکده.

## چکیده

تحقیقات علمی جهت ساخت کامپوزیت مس - اکسید آلومینیم کمتر از ده سال است که در دنیا آغاز شده و هر روز مشکلات دستیابی به این هدف کاهش می‌یابد. در این پروژه سعی شده است، ضمن ارائه نتایج فعالیت‌های انجام شده در این زمینه، شرایط عملی ساخت کامپوزیت  $Cu - Al_2O_3$  به روش متالورژی پودر و اکسیداسیون داخلی مورد بررسی قرار گیرد. در تحقیق حاضر فرآیند ساخت نانو کامپوزیت  $Cu - Al_2O_3$  با استفاده از پودرهای مس، آلومینیم و اکسید مس به روش آلیاژسازی - فعال‌سازی مکانیکی و اکسیداسیون داخلی به همراه بررسی سختی و هدایت الکتریکی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا شرایط ساخت برنز مناسب با استفاده از فرآیند آسیاکاری با تغییر مقادیر اولیه پودر آلومینیم و زمان‌های آسیا، بهینه‌سازی گردید. آسیاکاری مخلوط پودر مس و آلومینیم با درصدهای آلومینیم اولیه یک، دو و سه و در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ساعت انجام شد. با اندازه‌گیری میزان انحلال آلومینیم در مس در همه‌ی نمونه‌ها، برنز با میزان سه درصد وزنی آلومینیم اولیه و ۲/۱۴۵ درصد وزنی به صورت محلول و ۲۰ ساعت آسیاکاری به عنوان برنز بهینه شناخته شد. سپس در مرحله‌ی بعد، مقدار وزنی اکسید مس با توجه به موازنه‌ی واکنش اکسیداسیون و احیا محاسبه و به برنز اضافه شد و مخلوط پودر، تحت آسیاکاری ثانویه قرار گرفت. این مرحله در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ ساعت انجام شده و دو نمونه‌ی آسیا شده به مدت ۱۰ و ۲۵ ساعت، به منظور ساخت کامپوزیت انتخاب گردید. نمونه‌ی خام با استفاده از پرس هیدرولیک یک جهته با فشار ۱۶۰ MPa ساخته شد و در دماهای ۸۰۰، ۸۵۰، ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و زمان‌های ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه تحت فرآیند تف جوشی و اکسیداسیون داخلی قرار گرفت. در نهایت پس از اندازه‌گیری خواصی مانند سختی و هدایت الکتریکی نمونه‌های ساخته شده، نانو کامپوزیت با مقدار سه درصد آلومینیم اولیه که به مدت ۱۰ ساعت تحت آسیاکاری ثانویه قرار گرفته و سپس در دمای ۹۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه تف جوشی گردید به عنوان نمونه‌ی بهینه شناخته شد. هدایت الکتریکی این کامپوزیت ۵۸٪ هدایت الکتریکی مس خالص و سختی آن ۷۵ برینل اندازه‌گیری شد.

## فهرست مطالب

فصل اول	۱
۱- مقدمه	۲
۱-۱- الکترودهای جوشکاری مقاومتی	۲
۱-۲- خواص مورد انتظار از یک الکتروود جوشکاری مقاومتی	۲
۱-۳- بررسی گروه‌های مختلف الکترودهای جوشکاری مقاومتی	۳
۱-۳-۱- الکترودهای آلیاژی	۳
۱-۳-۲- الکترودهای پراکنده سخت شده	۴
۱-۳-۳- الکترودهای پوشش داده شده	۴
۱-۴- بررسی جنس الکترودها مطابق با کلاس بندی RWMA	۵
۱-۴-۱- گروه الف : آلیاژهای پایه‌ی مس	۵
۱-۴-۲- گروه ب : ترکیبات فلزات دیر گداز	۷
فصل دوم	۹
۲- مروری بر منابع	۱۰
۲-۱- تعریف کامپوزیت	۱۰
۲-۲- انواع کامپوزیت‌ها	۱۰
۲-۲-۱- کامپوزیت‌های با مقاوم‌ساز ذره‌ای	۱۱
۲-۳- مکانیسم‌های استحکام بخشی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی با مقاوم‌ساز ذره‌ای	۱۱
۲-۴- فصل مشترک	۱۲
۲-۴-۱- اتصال در فصل مشترک	۱۳
۲-۱- اتصال مکانیکی	۱۳
۲-۲- اتصال شیمیایی	۱۳
۲-۳- اتصال الکترواستاتیک	۱۳

- ۴- اتصال دیفیوژنی..... ۱۳
- ۵-۲- کامپوزیت‌های زمینه فلزی..... ۱۴
- ۵-۲-۱- روش ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی در حالت جامد..... ۱۵
- ۵-۲-۲- تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی به روش درجا..... ۱۷
- ۵-۲-۳- مشکلات روش سنتی ساخت کامپوزیت زمینه فلزی..... ۱۷
- ۱- عدم آغشته پذیری مناسب..... ۱۷
- ۲- وجود ترکیبات مضر در فصل مشترک..... ۱۷
- ۵-۲-۴- مزایای روش درجا..... ۱۷
- ۵-۲-۵- معایب روش درجا..... ۱۸
- ۶-۲- مواد اولیه‌ی ساخت کامپوزیت  $Cu - Al_2O_3$  به روش درجا..... ۱۸
- ۶-۲-۱- مس..... ۱۸
- ۶-۲-۲- آلومینا..... ۲۰
- ۶-۲-۳- اکسیدهای مس..... ۲۱
- ۱- تنوریت Tenorite..... ۲۱
- ۲- کوپریت Cuprite..... ۲۱
- ۷-۲- ترمودینامیک و سینتیک واکنش اکسیداسیون و احیا..... ۲۲
- ۷-۲-۱- ترمودینامیک واکنش اکسیداسیون داخلی در کامپوزیت  $Cu - Al_2O_3$ ..... ۲۲
- ۷-۲-۲- سینتیک واکنش احیای اکسید مس و اکسیداسیون  $Al$ ..... ۲۳
- ۸-۲- روش‌های ساخت کامپوزیت  $Cu - Al_2O_3$ ..... ۲۵
- ۸-۲-۱- روش شیمیایی و اکسیداسیون داخلی..... ۲۵
- ۸-۲-۲- روش فلز خورانی در یک ساختار پیش ساخته..... ۲۷
- ۸-۲-۳- روش متالورژی پودر..... ۲۷
- ۸-۲-۴- روش ترموشیمی..... ۲۸
- ۸-۲-۵- آلیاژسازی مکانیکی..... ۲۹

۳۱	۱- مرحله‌ی مقدماتی.....
۳۱	۲- مرحله‌ی رخ دادن جوش سرد.....
۳۱	۳- تشکیل ذرات هم محور.....
۳۱	۴- مرحله‌ی جوش در جهت تصادفی.....
۳۲	۵- مرحله‌ی پایانی.....
۳۲	۲-۸-۶- ریخته‌گری چرخشی.....
۳۳	۲-۸-۷- ریخته‌گری نیمه جامد.....
۳۳	۲-۹-۹- اثر مقدار Al بر خواص کامپوزیت Cu - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....
۳۴	۲-۹-۱- اثر مقدار Al بر ریز ساختار و خواص کامپوزیت Cu - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....
۳۶	۲-۹-۲- تاثیر واکنش گرمازا بر دمای اکسیداسیون داخلی.....
۴۰	۲-۱۰-۱- اثر زمان آسیاکاری بر خواص کامپوزیت Cu - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....
۴۱	۲-۱۰-۱- اثر زمان آسیاکاری بر مورفولوژی پودر برنز Al-۰.۸ Cu.....
۴۲	۲-۱۰-۲- اثر زمان آسیاکاری بر خواص اکسیداسیون پودرها.....
۴۵	فصل سوم.....
۴۶	۳- روش آزمایش.....
۴۶	۳-۱- تجهیزات.....
۴۶	۳-۱-۱- دستگاه آسیا.....
۴۸	۳-۱-۲- محفظه‌ی آسیاکاری.....
۴۹	۳-۱-۳- سامانه‌ی اکسیژن‌گیری از آرگون.....
۴۹	۳-۱-۴- دستگاه سانتریفیوژ جهت جداسازی اکسید آلومینیم باقیمانده در محلول سه اسید.....
۵۰	۳-۱-۵- دستگاه XRD.....
۵۰	۳-۱-۶- میکروسکوپ الکترونی.....
۵۰	۳-۱-۷- پرس متراکم سازی و قالب.....

- ۵۱-۱-۳-۸- کوره‌ی عملیات تف جوشی.....
- ۵۱-۱-۳-۹- دستگاه اندازه‌گیری هدایت الکتریکی.....
- ۵۳-۱-۳-۱۰- دستگاه سختی سنجی برینل.....
- ۵۳-۲-۳- مواد اولیه.....
- ۵۳-۳-۳- شرح مراحل آزمایش.....
- ۵۳-۱-۳-۳- ساخت برنز.....
- ۲-۳-۳- بررسی پودرهای حاصل از فرآیند آسیا به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش اشعه‌ی ایکس.....
- ۵۴-۳-۳-۳- اندازه‌گیری میزان انحلال آلومینیم در مس به روش شیمیایی.....
- ۵۵-۴-۳-۳- محاسبه‌ی مقدار اکسید مس برای اکسید کردن آلومینیم برنز.....
- ۵۶-۵-۳-۳- آسیاکاری ثانویه‌ی مخلوط برنز انتخاب شده به همراه اکسید مس در زمان‌های مختلف.....
- ۶-۳-۳- تهیه‌ی حلال مناسب جهت جداسازی اکسید آلومینیم تشکیل شده در فرآیند آسیاکاری ثانویه و انجام جداسازی.....
- ۵۶-۷-۳-۳- شناسایی خواص پودر حاصل از عملیات جداسازی.....
- ۵۷-۴-۳- تهیه‌ی قطعه برای تعیین خصوصیات محصول نهایی.....
- ۵۷-۱-۴-۳- عملیات متراکم سازی.....
- ۵۸-۲-۴-۳- عملیات تف‌جوشی.....
- ۵۸-۵-۳- تعیین خصوصیات محصول نهایی.....
- ۵۸-۱-۵-۳- آماده سازی نمونه‌ها جهت تعیین خواص.....
- ۵۹-۲-۵-۳- اندازه‌گیری چگالی.....
- ۵۹-۳-۵-۳- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی.....
- ۵۹-۴-۵-۳- اندازه‌گیری سختی برینل.....
- ۵۹-۵-۵-۳- بررسی ریزساختار نمونه‌ها به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی.....
- ۶۰- فصل چهارم.....



۶۱	۴- نتایج
۶۱	۴-۱- بررسی مواد اولیه
۶۴	۴-۲- ساخت برنز
۷۰	۴-۳- استفاده از روش کوهن برای نشان دادن تغییرات پارامتر شبکه‌ی مس
۷۱	۴-۴- نتایج حاصل از بررسی پودر جداسازی شده در عملیات محلول سازی
۷۲	۴-۵- نتایج حاصل از ساخت کامپوزیت نهایی
۷۵	۴-۵-۱- چگالی ظاهری کامپوزیت
۷۵	۴-۵-۲- مقاومت الکتریکی کامپوزیت
۷۶	۴-۵-۳- هدایت الکتریکی کامپوزیت
۷۶	۴-۵-۴- سختی کامپوزیت
۷۷	فصل پنجم
۷۸	۵- تحلیل نتایج
۷۸	۵-۱- بررسی مواد اولیه‌ی تهیه شده
۷۹	۵-۲- بررسی برزهای ساخته شده
۸۵	۵-۳- بررسی ترمودینامیک واکنش اکسیداسیون داخلی در فرآیند آسیاکاری ثانویه
۸۷	۵-۴- بررسی ترمودینامیک فرآیند اکسیداسیون داخلی همزمان با عملیات تفجوشی
۸۸	۵-۵- بررسی سینتیکی فرآیند اکسیداسیون داخلی
۹۰	۵-۶- بررسی خواص مختلف کامپوزیت‌های ساخته شده
۹۴	۵-۷- بررسی درستی فرمول شرودر در مورد کامپوزیت‌های ساخته شده
۹۶	۵-۸- بحث در خصوص هدایت الکتریکی و استحکام فشاری نمونه‌ها
۹۷	نتیجه گیری
۹۸	پیشنهادات
۹۹	منابع و ماخذ
۱۰۲	پیوست

## فهرست اشکال

- شکل ۲-۱- مقایسه‌ی تغییرات تنش تسلیم با دمای آنیل در آلیاژهای مس و ODS..... ۲۰
- شکل ۲-۲- تصویر متالوگرافی SEM (a) پودر آماده شده‌ی اولیه (b) پودر پس از عملیات حرارتی نمک زدایی..... ۲۸
- شکل ۲-۳- تصویر SEM از نمونه در شرایط مختلف (a)  $Cu-1.1\%Al_2O_3, ۸۵۰\text{ C}$  (b)  $Cu-1.1\%Al_2O_3, ۱۱۰۰\text{ C}$ ..... ۳۰
- شکل ۲-۴- (c)  $Cu-2.7\%Al_2O_3, ۸۵۰\text{ C}$  (d)  $Cu-2.7\%Al_2O_3, ۱۱۰۰\text{ C}$ ..... ۲۹
- شکل ۲-۴- اثر مقدار Al بر سختی و هدایت الکتریکی..... ۳۴
- شکل ۲-۵- مورفولوژی کامپوزیت با زمینه‌ی مس حاوی ۰/۲ درصد Al..... ۳۵
- شکل ۲-۶- مورفولوژی کامپوزیت با زمینه‌ی مس حاوی ۰/۸ درصد Al..... ۳۵
- شکل ۲-۷- مورفولوژی کامپوزیت با زمینه‌ی مس حاوی ۱/۲ درصد Al..... ۳۵
- شکل ۲-۸- مورفولوژی کامپوزیت با زمینه‌ی مس حاوی ۳ درصد Al..... ۳۶
- شکل ۲-۹- مسیر انجام واکنش اکسیداسیون داخلی..... ۳۷
- شکل ۲-۱۰- تغییرات دمای اکسیداسیون با مقدار Al..... ۴۰
- شکل ۲-۱۱- تصویر SEM از پودرها بعد از ۲۴ ساعت آسیاکاری..... ۴۱
- شکل ۲-۱۲- تصویر SEM از پودرها بعد از ۷۲ ساعت آسیاکاری..... ۴۱
- شکل ۲-۱۳- تصویر SEM از پودرها بعد از ۹۶ ساعت آسیاکاری..... ۴۲
- شکل ۲-۱۴- فاز دیاگرام Cu-Al..... ۴۳
- شکل ۲-۱۵- تصویر SEM از کامپوزیت بعد از ۲۴ ساعت آسیاکاری..... ۴۴
- شکل ۲-۱۶- تصویر SEM از کامپوزیت بعد از ۷۲ ساعت آسیاکاری..... ۴۴
- شکل ۲-۱۷- تصویر SEM از کامپوزیت بعد از ۹۶ ساعت آسیاکاری..... ۴۴
- شکل ۳-۱- فلوجارت انجام مراحل آزمایشگاهی..... ۴۷
- شکل ۳-۲- دستگاه آسیا..... ۴۸
- شکل ۳-۳- تصویر ظرف آسیا به همراه گلوله‌های ساینده..... ۴۸
- شکل ۳-۴- تصویر شماتیک سامانه‌ی حذف اکسیژن، رطوبت و دی‌اکسید کربن از گاز آرگون..... ۴۹
- شکل ۳-۵- تصویر دستگاه سانتی‌فیوژ مورد استفاده و چهار استند قرارگیری نمونه‌ها..... ۵۰

شکل ۳-۶- تصویر دستگاه پرس.....	۵۱
شکل ۳-۷- تصویر قالب در حالت باز و بسته.....	۵۲
شکل ۳-۸- دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی.....	۵۲
شکل ۳-۹- تصویر شماتیک نحوه ی سنجش مقاومت الکتریکی و مقطع عبور جریان.....	۵۲
شکل ۳-۱۰- نمونه ی خام ساخته شده.....	۵۸
شکل ۳-۱۱- نمونه کامپوزیت ساخته شده پس از خروج از کوره.....	۵۸
شکل ۴-۱- XRD نمونه ی پودر مس تهیه شده.....	۶۱
شکل ۴-۲- تصویر SEM از مجموعه ای از ذرات مس تهیه شده به عنوان ماده ی اولیه.....	۶۲
شکل ۴-۳- XRD نمونه ی پودر آلومینیم تهیه شده.....	۶۲
شکل ۴-۴- تصویر SEM از مجموعه ی ذرات آلومینیم تهیه شده به عنوان ماده ی اولیه.....	۶۳
شکل ۴-۵- تصویر SEM از یک ذره ی آلومینیم تهیه شده به عنوان ماده ی اولیه.....	۶۳
شکل ۴-۶- XRD نمونه ی پودر اکسید مس تهیه شده.....	۶۳
شکل ۴-۷- تصویر SEM از مجموعه ی ذرات اکسید مس تهیه شده به عنوان ماده ی اولیه.....	۶۴
شکل ۴-۸- تصویر SEM از ذرات پودر مس و آلومینیم با حضور ۳ درصد آلومینیم اولیه ی آسیاکاری شده به مدت ۵ ساعت.....	۶۵
شکل ۴-۹- تصویر SEM از ذرات پودر مس و آلومینیم با حضور ۳ درصد آلومینیم اولیه ی آسیاکاری شده به مدت ۱۰ ساعت.....	۶۵
شکل ۴-۱۰- تصویر SEM از ذرات پودر مس و آلومینیم با حضور ۳ درصد آلومینیم اولیه ی آسیاکاری شده به مدت ۱۵ ساعت.....	۶۶
شکل ۴-۱۱- تصویر SEM از ذرات پودر مس و آلومینیم با حضور ۳ درصد آلومینیم اولیه ی آسیاکاری شده به مدت ۲۰ ساعت.....	۶۶
شکل ۴-۱۲- تصویر SEM از یک ذره ی پودر آگلومره مس و آلومینیم با حضور ۳ درصد آلومینیم اولیه ی آسیاکاری شده به مدت ۵ ساعت.....	۶۶

- شکل ۴-۱۳- تصویر SEM از یک ذره‌ی پودر آگلومره مس و آلومینیم با حضور ۳ درصد آلومینیم اولیه‌ی آسیاکاری شده به مدت ۱۰ ساعت. ۶۶
- شکل ۴-۱۴- تصویر SEM از یک ذره‌ی پودر آگلومره مس و آلومینیم با حضور ۳ درصد آلومینیم اولیه‌ی آسیاکاری شده به مدت ۱۵ ساعت. ۶۷
- شکل ۴-۱۵- تصویر SEM از یک ذره‌ی پودر آگلومره مس و آلومینیم با حضور ۳ درصد آلومینیم اولیه‌ی آسیاکاری شده به مدت ۲۰ ساعت. ۶۷
- شکل ۴-۱۶- نمودار EDS گرفته شده از یک ذره‌ی پودر آسیا شده‌ی مس و آلومینیم با ۳ درصد آلومینیم اولیه به مدت ۲۰ ساعت. ۶۷
- شکل ۴-۱۷- الگوی پراش اشعه‌ی ایکس برای نمونه‌های برنز یک درصد آلومینیم. ۶۸
- شکل ۴-۱۸- الگوی پراش اشعه‌ی ایکس برای نمونه‌های برنز سه درصد آلومینیم (۲/۱۴۵ درصد وزنی محلول). ۶۹
- شکل ۴-۱۹- XRD نمونه‌ی برنز ۳٪ که با اکسید مس به مدت ۱۰ ساعت تحت آسیاکاری ثانویه قرار گرفته است. ۷۱
- شکل ۴-۲۰- XRD نمونه‌ی برنز ۳٪ که با اکسید مس به مدت ۲۵ ساعت تحت آسیاکاری ثانویه قرار گرفته است. ۷۱
- شکل ۴-۲۱- نمودار XRD پودر حاصل از عملیات جداسازی از محلول سه اسید. ۷۲
- شکل ۴-۲۲- تصاویر SEM پودر حاصل از عملیات جداسازی از محلول سه اسید. ۷۲
- شکل ۴-۲۳- تصویر SEM از نمونه‌ی کامپوزیت که ۱۰ ساعت آسیاکاری ثانویه شده و در دمای ۸۰۰ درجه به مدت ۱۵ دقیقه تفجوشی شده است. ۷۳
- شکل ۴-۲۴- تصویر SEM از نمونه‌ی کامپوزیت که ۱۰ ساعت آسیاکاری ثانویه شده و در دمای ۹۵۰ درجه به مدت ۶۰ دقیقه تفجوشی شده است. ۷۳
- شکل ۴-۲۵- تصویر SEM از نمونه‌ی کامپوزیت که ۲۵ ساعت آسیاکاری ثانویه شده و در دمای ۸۰۰ درجه به مدت ۱۵ دقیقه تفجوشی شده است. ۷۴
- شکل ۴-۲۶- تصویر SEM از نمونه‌ی کامپوزیت که ۲۵ ساعت آسیاکاری ثانویه شده و در دمای ۹۰۰ درجه به مدت ۹۰ دقیقه تفجوشی شده است. ۷۴
- شکل ۵-۱- در صد وزنی آلومینیم حل شده در برنز تحت زمان‌های آسیاکاری مختلف. ۷۹
- شکل ۵-۲- برازش خط بر منحنی انحلال آلومینیم در برنز. ۸۱

- شکل ۵-۳- برآزش منحنی لگاریتمی بر نمودار انحلال آلومینیم در برنز..... ۸۱
- شکل ۵-۴- تغییرات پارامتر شبکه‌ی مس در اثر فرآیند آسیا..... ۸۳
- شکل ۵-۵- تصویر شماتیک دیاگرام الینگهام..... ۸۹
- شکل ۵-۶- نمایش شماتیک مراحل تشکیل ذرات اکسید آلومینیم در کامپوزیت..... ۸۹
- شکل ۵-۷- تغییرات هدایت الکتریکی با دما و زمان زینترینگ در کامپوزیت ۱۰ ساعت..... ۹۲
- شکل ۵-۸- تغییرات هدایت الکتریکی با دما و زمان زینترینگ در کامپوزیت ۲۵ ساعت آسیاکاری شده..... ۹۳
- شکل ۵-۹- تغییرات سختی با دما و زمان زینترینگ در کامپوزیت ۱۰ ساعت آسیاکاری شده..... ۹۳
- شکل ۵-۱۰- تغییرات سختی با دما و زمان زینترینگ در کامپوزیت ۲۵ ساعت آسیاکاری شده..... ۹۴

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲- خواص مقاوم‌سازهای مهم سرامیکی..... ۱۱
- جدول ۲-۲- خواص عمومی اکسید مس II..... ۲۲
- جدول ۳-۲- مقایسه‌ی خواص اکسیدهای مس..... ۲۲
- جدول ۲-۴- خواص کامپوزیت بعد از زمان‌های مختلف آسیاکاری..... ۴۳
- جدول ۴-۱- میزان انحلال آلومینیم در مس در فرآیند آسیاکاری اولیه..... ۶۴
- جدول ۴-۲- نسبت در صد آلومینیم حل شده به آلومینیم اولیه در ساخت برنز..... ۶۵
- جدول ۴-۳- تغییرات پارامتر شبکه‌ی مس با افزایش زمان آسیاکاری..... ۷۰
- جدول ۴-۴- چگالی کامپوزیت‌های ساخته شده (گرم بر سانتی متر مکعب)..... ۷۵
- جدول ۴-۵- مقاومت الکتریکی (میلی اهم)..... ۷۵
- جدول ۴-۶- هدایت الکتریکی ویژه (اهم متر / ۱)..... ۷۶
- جدول ۴-۷- نتایج سختی سنجی (HRB)..... ۷۶
- جدول ۵-۱- مقدار انحراف معیار در برازش خطی و لگاریتمی..... ۸۱
- جدول ۵-۲- فشار تعادلی اکسیژن در مقادیر مختلف آلومینیم در محفظه‌ی آسیا..... ۸۶
- جدول ۵-۳- مقدار فشار تعادلی اکسیژن در واکنش اکسیداسیون مس در شرایط تف جوشی..... ۸۸
- جدول ۵-۴- مقدار فشار تعادلی اکسیژن در واکنش اکسیداسیون آلومینیم محلول در مس در شرایط تف جوشی..... ۸۸

# فصل اول

## مقدمه

استفاده از کامپوزیت‌ها، به منظور همراه کردن خواص مطلوب اجزاء تشکیل دهنده‌ی آن‌ها، مورد توجه بوده است. در این بین کامپوزیت‌های پایه فلزی نقش ویژه‌ای به خصوص در مصارف الکتریکی ایفا می‌کنند. از میان انواع روش‌های ساخت کامپوزیت‌های پایه فلزی، روش درجا با مزایای ویژه‌ای همراه است. چند سالی است که استفاده از کامپوزیت‌های پایه‌ی مس با کاربردهای مختلف صنعتی به ویژه به عنوان جایگزین آلیاژهای سازنده‌ی الکترودهای جوشکاری مقاومتی مطرح است. تحقیقات علمی جهت ساخت کامپوزیت مس-اکسید آلومینیم اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. تاکنون روش‌های گوناگون ساخت این کامپوزیت، مورد آزمایش قرار گرفته که نتایج آن به صورت مقالات علمی به چاپ رسیده است [۱].

در منابع، کاربردهای مختلفی برای نانو کامپوزیت  $Cu - Al_2O_3$  ذکر شده است، اما شاید بتوان گفت که مهمترین کاربرد کامپوزیت مذکور ساخت الکترودهای جوشکاری مقاومتی است. به علت قابلیت ترشوندگی اندک ذرات آلومینا با مذاب مس، ساخت کامپوزیت  $Cu - Al_2O_3$  از طریق روش‌های ذوبی بسیار مشکل است. روش اکسیداسیون داخلی که از سال ۱۹۶۰ شناخته شده است، باعث حذف مشکلات روش ذوبی خواهد بود [۱]. از آنجا که عمده‌ترین کاربرد این کامپوزیت ساخت الکترودهای جوشکاری مقاومتی است، مناسب است در ابتدا توضیحاتی در خصوص این محصول ارائه گردد.

### ۱-۱- الکترودهای جوشکاری مقاومتی

به طور کلی الکترودهای جوشکاری، یک جزء حیاتی سیستم‌های جوشکاری مقاومتی را تشکیل می‌دهند. این الکترودها سه وظیفه‌ی مهم و اساسی را بر عهده دارند، انتقال فشار به ورق‌ها، حمل جریان الکتریکی مورد نیاز و خنک کاری موضعی جوش [۲].



### ۲-۱- خواص مورد انتظار از یک الکتروود جوشکاری مقاومتی

الکتروودهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای که به منظور اتصال فلزات سبک یا ورق‌های فولادی عملیات سطحی شده بکار می‌روند، بایستی دارای برخی خواص شامل استحکام مکانیکی، هدایت الکتریکی، هدایت حرارتی و مقاومت سایشی متناسب با کاربردها باشند. علاوه بر آن لازم است که ماده‌ی الکتروود دارای ساختار همگن با قابلیت ماشینکاری و فرم دهی باشد [۳].

در حالت کلی می‌توان گفت که الکتروود جوشکاری مقاومتی به عنوان یک هادی جریان اعمالی به ماده‌ی جوشکاری عمل می‌کند. بنابراین الکتروود مورد استفاده برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، بایستی با توجه به شرایط جوشکاری و ماده‌ای که جوش داده می‌شود، از خواص مناسبی برخوردار باشد. در اغلب فرآیندهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، الکتروودها بایستی خصوصاً استحکام حرارتی و هدایت الکتریکی در دمای بالا داشته باشند. زیرا این الکتروودها به طور پیوسته تحت شرایط دما و فشار بالا قرار دارند [۳].

تغییر در ترکیب شیمیایی الکتروود می‌تواند در کارکرد نهایی آن موثر باشد. به عنوان مثال، ممکن است از طریق آلیاژسازی، مقاومت سایشی بهتری بدست آید، اما با افزایش مقدار عنصر آلیاژی و در نتیجه افزایش استحکام ماده، معمولاً هدایت الکتریکی محصول کاهش می‌یابد. لذا یک ماده‌ی الکتروود مناسب بایستی علاوه بر استحکام مکانیکی و سختی کافی در دمای عملیات، ترکیب هدایت الکتریکی و هدایت حرارتی خوبی نیز داشته باشد که البته معمولاً هدایت الکتریکی و هدایت حرارتی با یکدیگر رابطه‌ی مستقیم دارند [۳].

### ۳-۱- بررسی گروه‌های مختلف الکتروودهای جوشکاری مقاومتی

عنصر اصلی مورد استفاده در الکتروودهای جوشکاری مقاومتی مس است، چرا که هدایت الکتریکی بالایی دارد. اما مس خالص استحکام مکانیکی پایینی دارد. به همین دلیل به صورت های آلیاژ،

پراکنده سخت شده و یا پوشش داده شده مورد استفاده قرار می‌گیرد تا علاوه بر هدایت خوب، از استحکام بالایی نیز برخوردار باشد.

### ۱-۳-۱- الکترودهای آلیاژی

معمولاً فلزاتی از قبیل کروم، زیرکونیوم، بریلیم، سیلیسیم یا نیکل را در مقادیر بسیار اندک، به فلز پایه‌ی مس اضافه می‌کنند تا آلیاژی تولید شود که به عنوان ماده‌ی الکتروود، مورد مصرف قرار گیرد. هر چند هنگامی که چنین آلیاژی به عنوان الکتروود مصرف می‌شود، ممکن است که تمام خواص مورد نظر مانند مقاومت حرارتی، هدایت الکتریکی، هدایت حرارتی و مقاومت سایشی در حد مطلوب نباشد. به عنوان مثال در آلیاژ مس - کروم که به طور گسترده‌ای به عنوان الکتروود جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به کار می‌رود و توسط یک روش ریخته‌گری معمولی تولید می‌شود، از مس به عنوان فلز پایه به همراه ۰/۸ - ۰/۲ درصد وزنی کروم استفاده می‌شود و این آلیاژ به دلیل وجود ذرات کروم ریز پراکنده شده در زمینه‌ی مسی، خواص مکانیکی بهبود یافته‌ای دارد، ولی هنگامی که الکتروود ساخته شده از این آلیاژ تحت شرایط جوشکاری قرار می‌گیرد، پایداری حرارتی و مقاومت سایشی آن تضعیف می‌شود. علت این موضوع افزایش اندازه‌ی ذرات کروم رسوب کرده به دلیل گرم شدن الکتروود حین جوشکاری می‌باشد و به همین دلیل سعی بر استفاده از الکترودهای کامپوزیتی متشکل از مس و اکسید فلز می‌باشد [۴]. الکترودهای Cu-Cr و Cu-Cr-Zr ساختار کار سرد شده‌ی با دانه‌های شدیداً کشیده شده و ممتد دارند و در داخل آن‌ها فاز رسوب کرده و پراکنده شده به صورت ریز و ظریف موجود است.

در بین الکترودهای آلیاژی، الکتروود مس - کادمیم دارای بیشترین هدایت الکتریکی (IACS<sup>۱</sup> ۸۰٪) مقدار هدایت الکتریکی استاندارد بین المللی برای مس آنیل شده و کمترین سختی (حداکثر HRB

---

۱- International Annealed Copper Standard.

۶۵) می‌باشد. هدایت الکتروود مس-کروم اندکی کمتر است (۷۵ IACS) ولی سختی بالاتری دارد. با این الکتروودها جوش‌های طولانی‌تری را می‌توان انجام داد زیرا سختی بالاتری دارند [۴].

### ۱-۳-۲- الکتروودهای پراکنده سخت شده

این الکتروودها معمولاً شامل مس و اکسید فلز می‌باشند. برخی از این آلیاژها عبارتند از:  $Cu - Al_2O_3$ ،  $Cu - SiO_2$ ،  $Cu - ZrO_2$  و  $Cu - BeO_2$ . گفته می‌شود که کامپوزیت  $Cu - Al_2O_3$  خواص مطلوب‌تری در مقایسه با کامپوزیت‌های دیگر دارد. این کامپوزیت توسط ترکیبی از روش متالورژی پودر و روش اکسیداسیون داخلی تولید می‌شود. مقاومت خزشی، هدایت الکتریکی و پایداری حرارتی (در دمای اتاق و دماهای بالا) این کامپوزیت نسبت به انواع دیگر برتر است و به همین دلیل به عنوان سازنده‌ی الکتروود مناسب می‌باشد [۴].

### ۱-۳-۳- الکتروودهای پوشش داده شده

این دسته از الکتروودها مشابه گروه‌های قبلی ساخته می‌شوند با این تفاوت که در جهت بالا بردن خاصیت مقاومت سایشی آن‌ها، پوششی سخت مانند پوشش کاربید تیتانیم روی آن‌ها ایجاد می‌شود. این الکتروودها عمر طولانی‌تری دارند، کمتر به قطعه کار می‌چسبند و محدوده‌ی جوشکاری وسیع‌تری دارند. همچنین در مورد این الکتروودها نیازی به تمیزکاری سطحی نیست. این نوع الکتروود بیشتر برای فولادهای پوشش داده شده استفاده می‌شود [۵].

### ۱-۴- بررسی جنس الکتروودها مطابق با کلاس بندی RWMA<sup>۲</sup>

با گذشت سالیان بسیار از کلاس بندی RWMA که برای اولین بار به منظور بهبود کیفیت الکتروودهای پایه‌ی مس انجام شده، هنوز تغییرات عمده‌ای در جنس الکتروودها صورت نگرفته است. این گروه بندی به صورت زیر است [۴].

---

<sup>۲</sup>- Resistance Welding Manufacturing Alliance.

#### ۱-۴-۱- گروه الف : آلیاژهای پایه‌ی مس

**کلاس ۱:** این گروه، آلیاژهای مس-کادمیم (Cu-Cd) هستند که دارای ۱٪ کادمیم و بقیه مس می‌باشند. از این گروه به طور عمومی در مواردی که نیاز به انتقال حرارت و یا انتقال جریان بالایی است استفاده می‌شود. از الکترودهای این کلاس برای جوشکاری نقطه‌ای و نواری فلزاتی مانند آلومینیم، منیزیم و فولادهای گالوانیزه استفاده می‌شود. از آنجا که مواد این دسته، دارای هدایت الکتریکی و حرارتی بالایی هستند باید توسط سیستم‌های خنک‌کننده‌ی مناسب، دمای آن‌ها همواره زیر دمای بحرانی نگهداشته شود. مواد کلاس ۱ قابلیت عملیات حرارتی را نداشته و باید خواص خود را از طریق عملیات کار سرد مانند کشش سرد، نورد سرد و فورج سرد بدست آورند. این کلاس مزیت خاصی نسبت به مس معمولی ریخته شده نداشته و کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴].

**کلاس ۲:** این گروه آلیاژهای مس-کروم (Cu-Cr) هستند که ترکیب ۰/۸ - ۰/۲ درصد وزنی کروم و مابقی مس می‌باشد. مواد این کلاس دارای خواص مکانیکی بهتری نسبت به گروه کلاس ۱ بوده ولی هدایت حرارتی و هدایت الکتریکی آن‌ها نسبت به کلاس ۱ کمتر است. این گروه خواص فیزیکی خوبی داشته و مقاومت آن‌ها در برابر تغییر شکل تحت فشارهای نسبتاً بالا، آن‌ها را به بهترین کلاس این نوع مواد تبدیل کرده است. اگر جوشکاری انواع مختلفی از مواد در حالت‌های گوناگون تنها با یک نوع الکتروود خاص مد نظر باشد، الکترودهای کلاس ۲ انتخاب ایده آلی به حساب می‌آیند. این گروه، کاربرد وسیعی در جوشکاری‌های نقطه‌ای و نواری در فولادهای کم آلیاژی، برنج و برنز دارند که شامل قسمت عمده‌ای از کاربرد جوشکاری مقاومتی می‌شود. این گروه همچنین برای میله‌ها، پیچ‌ها، نگهدارنده‌ها، صفحه‌ها، گیره‌ها و انواع گوناگون اجزاء سیستم انتقال جریان در تجهیزات جوش مقاومتی مناسب هستند. آلیاژهای این کلاس قابلیت عملیات حرارتی را داشته، لذا برای