

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی و مهندسی  
بخش مهندسی مواد و متالورژی

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد  
گرایش شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

---

بررسی ریز ساختار، مورفولوژی و میکرو سختی آلیاژ نانو ساختار  
Cu-Al تولید شده بوسیله فرآیند آلیاژسازی مکانیکی

---

مؤلف :

ولی سنجری پور بنستانی

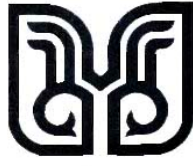
استاد راهنما :

دکتر غلامحسین اکبری

استاد مشاور :

مهندس اطهره دادگری نژاد

شهریورماه ۱۳۹۱



دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

**بخش مهندسی مواد و متالورژی**

**دانشکده فنی و مهندسی**

**دانشگاه شهید باهنر کرمان**

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: ولی سنجری پور

استاد راهنما: آقای دکتر غلامحسین اکبری

استاد مشاور: خانم مهندس اطهره دادگری نژاد

داور ۱: آقای دکتر محمدرضا ایزدپناه

داور ۲: آقای دکتر حمید دوست محمدی

نماینده تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: آقای دکتر شهریار شرفی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: خانم دکتر مریم احتشام زاده

**حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.**

تقدیم به :

مادر و پدر مهربان و خواهر دلسوزم

و تقدیم به:

زیباترین اتفاق زندگییم، همسر و همراهیم، مهدیه

## تشکر و قدردانی :

بر خود لازم می‌دانم که تشکر و سپاس فراوانی از زحمات همه اساتید بخش که موفقیت این پایان نامه مرهون همکاری‌ها، مشاوره‌ها و زحمات ایشان بوده است، نمایم. از جمله:

جناب آقای دکتر غلامحسین اکبری، استاد راهنما و خانم مهندس اطهره دادگری نژاد، استاد مشاور

یاد و خاطره همکلاسی‌های عزیزم، دانشجویان کارشناسی ارشد ورودی ۱۳۸۸ همواره در ذهنم باقی خواهد ماند.

در نهایت سپاس فراوان خود را نثار می‌کنم به همسرم، به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در سردترین روزگاران زندگی بهترین پشتیبان من بوده است و به پاس محبت بی‌در یغشان که هرگز رنگ خاموشی بخود نمی‌گیرد.

ولی سنجری پور

## چکیده

در پروژه حاضر، رفتار مخلوط پودری Cu-Al در طول آلیاژسازی مکانیکی مطالعه شد. از مخلوط پودری با ۳ و ۱ درصد وزنی آلومینیوم در مس استفاده شد. این پودرها با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه و نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰ به ۱ تحت اتمسفر آرگون آسیاب شدند. از اتانول به عنوان عامل کنترل فرایند استفاده شد و زمان های آسیاب ۱۰، ۲۲، ۳۶ و ۶۴ ساعت انتخاب گردیدند. برای جلوگیری از افزایش دمای محفظه بعد از هر نیم ساعت، ربع ساعت توقف منظور شد. نمونه ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی و دستگاه XRD مورد مطالعه قرار گرفتند. اندازه کریستال ها با روش ویلیامسون-هال و پارامتر شبکه با روش تابع برون یاب اندازه گیری شدند. نتایج نشانگر کاهش یکنواخت اندازه کریستال ها تا حد نانومتری و افزایش پارامتر شبکه با زمان آسیاکاری است.

سپس پودرها فشرده شده و در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد زینتر شدند. نمونه های بعد از عملیات زینترینگ توسط دستگاه ریز سختی سنج مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج، نشانگر افزایش سختی و یکنواختی بیشتر با افزایش زمان آسیاب است. تغییرات سختی و میکروسختی با افزایش زمان نیز به گونه ای است که تغییرات اندازه کریستال و پارامتر شبکه حاصل از طیف اشعه X را تایید می کند.

**کلمات کلیدی:** آلیاژسازی مکانیکی، میکروسختی، مس-آلومینیوم

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول
۱	(مقدمه).....
	فصل دوم
۶	(تئوری و مروری بر منابع و تحقیقات گذشته).....
۷	۱-۲-تئوری.....
۷	۱-۱-۲- مواد نانو ساختار.....
۷	۲-۱-۲- فناوری نانو.....
۸	۱-۲-۳-آلیاژ سازی مکانیکی.....
۹	۱-۳-۱-۲- عوامل مؤثر بر فرایند آلیاژسازی مکانیکی.....
۱۰	۱-۲-۳-۱-۱-۳-انواع آسیا.....
۱۲	۱-۲-۳-۲- ترمودینامیک آلیاژسازی مکانیکی.....
۱۳	۱-۲-۳-۳- مکانیزم آلیاژسازی.....
۱۵	۱-۲-۳-۱-۲- مروری بر خواص میکروساختاری آلیاژ مس-آلومینیوم.....
۱۸	۲-۲- آلیاژ سازی مکانیکی مس و آلیاژهای آن.....
۱۸	۱-۲-۲- آلیاژسازی مکانیکی.....
۱۹	۲-۲-۲- آلیاژ سازی سیستم مس - آلومینیوم.....

## فصل سوم

- ۲۹ .....(مواد و روش تحقیق)
- ۳۰ ..... ۱-۳- مواد اولیه آلیاژ .....
- ۳۰ ..... ۲-۳- پارامترها و مراحل تهیه پودر آسیاب شده .....
- ۳۲ ..... ۳-۳- نمونه برداری .....
- ۳۲ ..... ۴-۳- بررسی های مورفولوژیکی .....
- ۳۲ ..... ۵-۳- آنالیز فازی .....
- ۳۳ ..... ۶-۳- تعیین پارامترهای ساختاری .....
- ۳۵ ..... ۷-۳- پرس سرد و عملیات تف جوشی .....
- ۳۵ ..... ۸-۳- ریز سختی سنجی .....

## فصل چهارم

- ۳۶ ..... (نتایج)
- ۳۷ ..... ۱-۴- آنالیز XRD مخلوط پودرهای Cu-Al در آسیاکاری .....
- ۳۷ ..... ۱-۴-۱- الگوی XRD .....
- ۴۱ ..... ۲-۴-۱- پارامتر شبکه .....
- ۴۳ ..... ۳-۴-۱- اندازه متوسط کریستال و کرنش داخلی .....
- ۴۴ ..... ۲-۴- مورفولوژی و اندازه ذرات پودر .....
- ۵۵ ..... ۳-۴- عملیات تف جوشی و ریز سختی سنجی .....



## فصل پنجم

۵۹ ..... (بحث نتایج)

۶۰ ..... ۱-۵- تغییرات مورفولوژیکی ذرات پودری.....

۶۱ ..... ۲-۵- آزمایشات پراش اشعه ایکس.....

۶۲ ..... ۱-۲-۵- تغییرات اندازه کریستالی.....

۶۲ ..... ۲-۲-۵- تغییرات کرنش درونی.....

۶۳ ..... ۲-۲-۵- تغییرات پارامتر شبکه.....

۶۴ ..... ۳-۵- تغییرات ریز سختی.....

۶۴ ..... ۴-۵- علل درشت شدن ذرات پودر و اشکالات حاصل از آن.....

## فصل ششم

۶۶ ..... (نتیجه گیری و پیشنهادات)

۶۷ ..... ۱-۶- نتیجه گیری.....

۶۸ ..... ۲-۶- پیشنهادات.....

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۲	شکل ۱-۱: مفهوم اصلی از تبادل انرژی در جهت ساخت مواد غیر تعادلی.....
۱۱	شکل ۱-۲: انواع آسیاب مورد استفاده در آلیاژسازی مکانیکی.....
۱۴	شکل ۲-۲: ایجاد تعادل بین جوش خوردن و شکستن ذرات.....
۱۵	شکل ۲-۳: دیاگرام تعادلی مس- آلومینیوم.....
۲۰	شکل ۲-۴: الگوی XRD حاصل از (A): $Cu_{67}Al_{33}$ آسیاکاری شده، (B): شیبه سازی با استفاده از مختصات اتمی مرجع [۲۱] و گروه فضایی I-43M، (C): شیبه سازی با استفاده از مختصات اتمی مرجع [۲۱] و گروه فضایی P-43M.....
۲۱	شکل ۲-۵: الگوی XRD از (A): مخلوط پودری آنیل شده، (B): شیبه سازی با استفاده از مختصات اتمی مرجع [۲۱] و گروه فضایی P-43M.....
۲۳	شکل ۲-۶: الگوی XRD محصولات پودری بعد از آسیاکاری مخلوط پودری مس-آلومینیوم با ۱۴ درصد اتمی آلومینیوم در زمان های مختلف.....
۲۴	شکل ۲-۷: الگوی XRD محصول پودری بعد از ۲ ساعت آسیاکاری مخلوط پودری با ۱۴ درصد آلومینیوم که در دو دمای مختلف گرم شده اند.....
۲۵	شکل ۲-۸: الگوی XRD محصولات پودری بعد از آسیاکاری مخلوط پودری مس-آلومینیوم با ۳۵ درصد اتمی آلومینیوم در زمان های مختلف.....
۲۶	شکل ۲-۹: الگوی XRD محصول پودری بعد از ۲ ساعت آسیاکاری مخلوط پودری با ۳۵ درصد آلومینیوم که در دو دمای مختلف گرم شده اند.....
۳۱	شکل ۳-۱: نمایی از محفظه آسیا.....

- شکل ۳-۲: نمایی از گلوله های مورد استفاده ..... ۳۱
- شکل ۴-۱-الف: الگوی XRD حاصل از زمانهای مختلف آسیاکاری در مخلوط پودر-Cu  
1%wtAl ..... ۳۷
- شکل ۴-۱-ب: الگوی XRD حاصل از مخلوط پودر Cu-3%wtAl قبل از آسیاکاری ..... ۳۸
- شکل ۴-۱-ج: الگوی XRD حاصل از مخلوط پودر Cu-3%wtAl با ۱۰ ساعت آسیاکاری ..... ۳۸
- شکل ۴-۱-د: الگوی XRD حاصل از مخلوط پودر Cu-3%wtAl با ۲۲ ساعت آسیاکاری ..... ۳۹
- شکل ۴-۱-ه: الگوی XRD حاصل از مخلوط پودر Cu-3%wtAl با 36 ساعت آسیاکاری ..... ۳۹
- شکل ۴-۱-و: الگوی XRD حاصل از مخلوط پودر Cu-3%wtAl با ۶۴ ساعت آسیاکاری ..... ۴۰
- شکل ۴-۱-ز: الگوی XRD حاصل از زمانهای مختلف آسیاکاری در مخلوط پودر Cu-  
3%wtAl ..... ۴۰
- شکل ۴-۱-ط: الگوی XRD حاصل از زمانهای مختلف آسیاکاری در مخلوط پودر Cu-  
6%wtAl ..... ۴۱
- شکل ۴-۲: تغییر پارامتر شبکه مس بر حسب زمان (hr) آسیاکاری در سه مخلوط پودر Cu-  
1,3,6%wtAl ..... ۴۲
- شکل ۴-۳: مقایسه پارامتر شبکه در مخلوط پودر Cu-3%wtAl در زمانهای ۳۶ و ۶۴ ساعت  
در حالتی که بهم چسبیده اند و آزمایش تکرار شده است ..... ۴۲
- شکل ۴-۴-الف: تغییر اندازه کریستال (nm) بر حسب زمان (hr) آسیاکاری در سه مخلوط پودر ...  
۴۳
- شکل ۴-۴-ب: تغییر کرنش داخلی بر حسب زمان آسیاکاری ..... ۴۴
- شکل ۴-۵-الف: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-1%wtAl با ۱۰ ساعت آسیاکاری  
..... ۴۵

شکل ۴-۵-ب: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-1%wtAl با ۲۲ ساعت آسیاکاری

۴۵ .....

شکل ۴-۵-ج: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-1%wtAl با ۳۶ ساعت آسیاکاری ...

۴۶ .....

شکل ۴-۵-د: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-1%wtAl با ۶۴ ساعت آسیاکاری.....

۴۶ .....

شکل ۴-۶-الف: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-3%wtAl بدون آسیاکاری .....

شکل ۴-۶-ب: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-3%wtAl با ۱۰ ساعت آسیاکاری..

۴۷ .....

شکل ۴-۶-ج: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-3%wtAl با ۲۲ ساعت آسیاکاری....

۴۸ .....

شکل ۴-۶-د: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-3%wtAl با ۳۶ ساعت آسیاکاری.....

۴۸ .....

شکل ۴-۶-ه: روند تغییر مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-3%wtAl طی ۶۴ ساعت

آسیاکاری.....

شکل ۴-۷-الف: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-3%wtAl با ۳۶ ساعت آسیاکاری..

۵۰ .....

شکل ۴-۷-ب: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-3%wtAl با ۳۶ ساعت آسیاکاری

با تغییر زمان آسیاکاری.....

شکل ۴-۷-ج: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-3%wtAl با ۶۴ ساعت آسیاکاری....

۵۱ .....

شکل ۴-۷-د: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-3%wtAl با ۶۴ ساعت آسیاکاری با

تغییر زمان آسیاکاری.....

شکل ۴-۸-الف: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-6%wtAl با 10 ساعت

آسیاکاری.....

شکل ۴-۸-ب: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-6%wtAl با ۲۲ ساعت آسیاکاری....

۵۲ .....

شکل ۴-۸-ج: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-6%wtAl با ۳۶ ساعت آسیاکاری....

۵۳ .....

شکل ۴-۸-د: مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب Cu-6%wtAl با ۶۴ ساعت آسیاکاری.....

۵۳ .....

شکل ۴-۹: نمودار کاهش اندازه ذرات ( $\mu\text{m}$ ) در مخلوط پودر Cu-1,3,6%wt Al در زمانهای (hr)

مختلف آسیاکاری .....

۵۴ .....

شکل ۴-۱۰-الف: نمودار ریز سختی مخلوط پودر Cu-Al قبل و بعد از زینتر در مخلوط پودری

Cu-1%wtAl.....

۵۵ .....

شکل ۴-۱۰-ب: نمودار ریز سختی مخلوط پودر Cu-Al قبل و بعد از زینتر در مخلوط پودری

Cu-3%wtAl.....

۵۵ .....

شکل ۴-۱۰-ج: نمودار ریز سختی مخلوط پودر Cu-Al قبل و بعد از زینتر در مخلوط پودری Cu-

6%wtAl.....

۵۶ .....

شکل ۴-۱۱-الف: نمودار ریز سختی نمونه های مخلوط پودر Cu-Al قبل از عملیات حرارتی ..... ۵۶

شکل ۴-۱۱-ب: نمودار ریز سختی نمونه های مخلوط پودر Cu-Al بعد از عملیات حرارتی ..... ۵۷

شکل ۴-۱۲-الف: نمودار تغییرات میکرو سختی بر حسب زمان برای پودر های بهم چسبیده قبل از  
زیتر ..... ۵۷

شکل ۴-۱۲-ب: نمودار تغییرات ریز سختی بر حسب زمان برای پودر های بهم چسبیده بعد از  
زیتر

..... ۵۷

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۳۱.....	جدول ۱-۳: شرایط آسیاکاری مورد استفاده.....

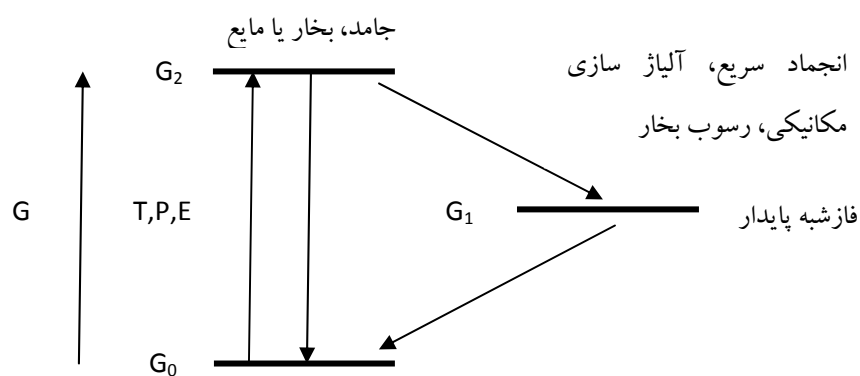
## فصل اول

# مقدمه



تحقیقات علمی در علوم مواد به طور مداوم منجر به بهبود خواص و کارایی آنها شده است. پیشرفتهای اساسی در خواص مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی با تغییرات شیمیایی و روش های اجرای فرایندهای مرسوم حرارتی، مکانیکی و ترمو مکانیکی به دست آمده است. به هر حال هر تقاضای فزاینده برای داشتن خواص بهتر در مواد، مثل تحمل دمای بالاتر، استحکام، سختی و سبک تر بودن نسبت به مواد حاضر منجر به طراحی و گسترش مواد پیشرفته می شود. صنایع با تکنولوژی بالا نیز موجب نتیجه بخش تر شدن این تلاشها شده اند [۱]. همواره مواد پیشرفته بصورت موادی که توجه اولیه به روش تولید و کنترل ساختار آنها به منظور تامین خواص دقیق، اساسی و کاربردهای مورد تقاضا دارد، تعریف می شوند [۲]. اکنون پذیرفته شده است که ساختار و اجزای مواد پیشرفته با فرایندهایی که تحت شرایط غیر تعادلی (دور از تعادل) قرار دارند بهتر کنترل می شود [۳].

در میان فرایندهای زیادی که به صورت تجاری برای ساخت مواد نانو استفاده می شود فرایندهایی چون انجماد سریع از حالت مایع [۴ و ۵]، آلیاژ سازی مکانیکی، فرایند پلاسمایی [۶ و ۳] و رسوب بخار [۳ و ۷] به طور جدی از طرف محققان مورد توجه قرار گرفته است. موضوع اصلی مورد بحث در مورد همه این فرایندها ترکیب و ساخت مواد، در یک حالت غیر تعادلی با دادن و گرفتن انرژی است<sup>1</sup>.



شکل ۱-۱: مفهوم اصلی از تبادل انرژی در جهت ساخت مواد غیر تعادلی

<sup>1</sup> Energizing and quenching

انرژی دادن به مفهوم افزایش سطح انرژی ماده با قرار گرفتن در یک وضعیت غیر تعادلی (شبه تعادلی) است که مستلزم اعمال نیروهای دینامیکی خارجی مثل ذوب، تبخیر، پرتو دهی، اعمال فشار یا انباشت انرژی مکانیکی با تغییر شکل پلاستیک است [۸]. اینگونه مواد توسط مارتین و بلون<sup>۱</sup> به عنوان مواد تحریک شده معرفی گردیدند [۹].

همچنین این امکان وجود دارد که دادن انرژی به صورت تغییر حالت از جامد به مایع یا گاز باشد. سپس این ماده با انجماد سریع به یک آرایش منجمد شده تبدیل می گردد، که برای بدست آوردن فاز شیمیایی و یا ریز ساختار مطلوب می تواند تحت عملیات یا فرایند حرارتی بعدی قرار گیرد. موادی که تحت این نوع عملیات قرار می گیرند دارای خواص فیزیکی و مکانیکی بهتری نسبت به شمش های متداول که از طریق انجماد معمولی به دست می آیند، هستند و این مطلب اثبات شده است [۱].

در حین آلیاژ سازی مکانیکی علاوه بر ایجاد محلول جامد، امکان به وجود آوردن ساختاری در حد نانو متری وجود دارد. در مواد نانو ساختار به دلیل اندازه فوق العاده ریز دانه ها، کسر زیادی از اتم ها در مرز دانه قرار گرفته اند و بنابراین چنین موادی، ترکیبی از خواص فیزیکی، مکانیکی و مغناطیسی ویژه را به وجود می آورند. علاوه بر این مواد با ساختار نانو، سرعت دیفوزیون بالا و بنابراین کاهش زمان دیفوزیون و در نتیجه کاهش زمان زینترینگ را برای پودرهای فشرده از خود نشان می دهند.

با گسترش روز افزون صنایع الکتریکی و حرارتی، نیاز به مواد پیشرفته با رسانایی الکتریکی - حرارتی و استحکام بالا ایجاد شده است. آلیاژ هایی که در دمای بالا بتوانند استحکام خود را حفظ کنند و هدایت الکتریکی مناسبی داشته باشند، بسیار مورد توجه هستند. فلز مس با قابلیت رسانایی بالا و در دسترس بودن، مناسب ترین انتخاب برای قطعات الکتریکی و حرارتی است ولی مشکل استحکام پایین آن باعث شده است محققین تلاش های فراوانی در راستای ساخت آلیاژ پر

---

<sup>1</sup> Martin and Bellon

استحکام مس انجام دهند. در تمام این تحقیقات سعی شده است ترکیب مناسبی از رسانایی و استحکام مکانیکی بالا حاصل گردد.

به طور کلی وارد شدن یک اتم بیگانه در شبکه مس باعث بالا رفتن خواص مکانیکی و کم شدن هدایت الکتریکی می گردد. این تغییرات خواص به حجم و تعداد اتم بیگانه بستگی دارد. هر قدر اختلاف حجم یا تعداد بیشتر باشد اثر اتم بیگانه بیشتر نمودار می شود. مس و آلیاژهای آن به دلیل مقاومت نسبت به زنگ زدگی در بسیاری از صنایع ساختمانی، هواپیمایی و صنایع دریایی مصرف می شود.

آلیاژهای مس با حداقل ۷۸ درصد مس و یکی از عناصر  $Be, Si, Ni, Pb, Al$  را برنز می نامند و تحت عنوان عنصر آلیاژی نامیده می شود مانند برنز آلومینیوم، برنز سرب.

با توجه به اینکه آلومینیوم برنزها نسبت به برنزهای قلع دار ارزانهتر هستند، موارد مصرف بیشتری نسبت به این گروه را دارا می باشند. آلیاژهای مس و آلومینیوم تحت عنوان آلومینیوم برنز اغلب حاوی ۷ تا ۱۱ درصد آلومینیوم بوده و عناصر دیگری نظیر نیکل، آهن، سیلیسیم و در سال های اخیر کرم نیز به مقادیر ۱ تا ۴ درصد به آن ها افزوده شده که این آلیاژها را می توان به دو طریق نورد گرم و ریخته گری بدست آورد.

در پژوهش حاضر، با استفاده از فرایند آلیاژ سازی مکانیکی، محلول جامد مس- آلومینیوم در ترکیبات مختلفی از مخلوط پودر تهیه و توسط تکنیک های XRD و میکروسکوپ الکترونی روبشی، تشکیل محلول جامد و روند تغییر مشخصه های ذرات پودر و کریستال های آن در زمانهای مختلف آسیاکاری بررسی شدند. در ادامه عملیات حرارتی تف جوشی در آلیاژ حاصل از آسیاکاری انجام گرفت. تغییرات سختی آلیاژ با میکرو سختی سنج ویکرز مورد مطالعه قرار گرفت.

لازم به ذکر است که در تمامی مطالعات پیشین انجام شده بر روی آلیاژ نانو ساختار مس- آلومینیوم، مقدار عنصر آلومینیوم بیش از حد حلالیت در مس در نظر گرفته شده است زیرا در مقادیر در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر یعنی زیر ۷ درصد آلومینیوم، محلول جامد حتی بدون

استفاده از روش آلیاژ سازی مکانیکی و با روش های رایج ریخته گری حاصل می شود. اما باید در نظر داشت که این پژوهش مقدمه ای از سلسله پژوهش ها برای ساخت نانو کامپوزیت مس-آلومینا با استفاده از مخلوط پودری مس و آلومینیوم و اضافه کردن پودر اکسید مس برای ایجاد نانو کامپوزیت مورد نظر است.