

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده ی مهندسی

پایان نامه ی کارشناسی ارشد در رشته ی مهندسی مواد (شناسایی و انتخاب مواد)

ایجاد ساختار دو گانه با استفاده از تراشه نانو ساختار و پودر  
آلومینیوم به روش اکستروژن گرم

به کوشش  
زهرا شرافت

اساتید راهنما:  
دکتر محمد حسین پایدار  
دکتر رامین ابراهیمی

۱۳۸۸ / ۳ / ۳۱

توزیع و تصدیق در کتابخانه مرکزی  
کتابخانه مرکزی

شهریور ۱۳۸۷

۱۱۳۵۸۱

به نام خدا

## اظهارنامه

اینجانب حجرت سرائی ( ۸۵۰۹۷۱ ) دانشجوی رشته‌ی  
مهندسی برار گرایش سازه‌های فلزی دانشکده‌ی مهندسی

اظهارمی‌کنم که این پایان‌نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهارمی‌کنم که تحقیق و موضوع پایان‌نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین‌نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی حجرت سرائی

تاریخ و امضا:

۸۸/۲/۱۲

به نام خدا

ایجاد ساختار دو گانه با استفاده از تراشه نانو ساختار و پودر آلومینیوم  
به روش اکستروژن گرم

به کوشش  
زهرا شرافت

پایان نامه  
ارائه شده به معاونت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی از فعالیت های تحصیلی برای  
اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته ی  
مهندسی مواد-شناسایی و انتخاب مواد

از دانشگاه شیراز  
شیراز  
جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه ی : عالی

دکتر محمد حسین پایدار، دانشیار بخش مهندسی مواد (رئیس کمیته)

دکتر رامین ابراهیمی، دانشیار بخش مهندسی مواد (رئیس کمیته)

دکتر شهید احمد جنابعلی جهرمی، استاد بخش مهندسی مواد

دکتر حبیب دانش منش، استادیار بخش مهندسی مواد

شهریور ۱۳۸۷

تقدیم به:

پدر و مادر بزرگوار و مهربانم

و خواهر عزیزم

## سپاسگزاری

بعد از شکر گزاری به درگاه خداوند بر خود لازم می دانم از اساتید راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر پایدار و جناب آقای دکتر ابراهیمی به خاطر راهنماییهای ارزنده شان تشکر نمایم. از اساتید مشاور بزرگوار خود، جناب آقای دکتر جنابعلی جهرمی و جناب آقای دکتر دانش منش بسیار سپاسگزارم. از آقای سهرابی که مرا در انجام این پروژه یاری دادند کمال تشکر را دارم. از تمامی کارکنان بخش مهندسی مواد، آقایان دهقانپان و سمتی و خانم ها پایدار، منصف، کاوه، شریعتی، آقای، دوکلام، محزون و معین و تمام دوستانی که از راهنمایی های آنها در انجام این پروژه بهره برده ام بسیار سپاسگزارم.

## چکیده

# ایجاد ساختار دو گانه با استفاده از تراشه نانو ساختار و پودر آلومینیوم به روش اکستروژن گرم

به وسیله

زهرا شرافت

ایجاد ساختار های دو گانه یکی از روش های بهبود شکل پذیری مواد نانو کریستالی است. ساختار های دو گانه ترکیبی از دانه های ریز و درشت می باشند و در نتیجه ترکیبی از استحکام بالا و شکل پذیری خوب را از خود نشان می دهند. خواص ساختار های دو گانه به درصد نسبی دانه های ریز و درشت، اندازه آنها و چگونگی توزیع آنها بستگی دارد. بهترین روش تولید ساختار های دو گانه، مخلوط کردن پودر نانو کریستالی با پودر میکرونی با نسبت مشخص و متراکم کردن مخلوط پودر ها به روش های مرسوم چون اکستروژن گرم می باشد. در تحقیق حاضر، قطعات آلومینیومی با ساختار دو گانه تولید شده و خواص آنها مورد بررسی قرار گرفته است. پودر میکرونی آلومینیوم خالص تجاری با درصد های وزنی مختلفی از تراشه های نانو ساختار آلومینیوم مخلوط و به صورت سرد متراکم شد و قطعه نهایی به روش اکسترون گرم پودر تولید گردید. فرآیند اکستروژن در محدوده دمایی  $300-500^{\circ}\text{C}$  و با سرعت  $0.16-0.12\text{ mm/s}$  انجام گردید. برای ارزیابی کیفیت نمونه های تولیدی، دانسیته نمونه ها بر اساس روش ارشمیدس اندازه گیری شد و ریز ساختار آنها با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی خواص مکانیکی، آزمایش کشش، فشار و ریزسختی سنجی بر روی نمونه ها انجام گردید. به منظور بررسی سطح شکست نمونه های آزمایش کشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش دمای فرآیند اکستروژن و کاهش درصد وزنی براده، کیفیت ظاهری قطعات تولیدی و همچنین دانسیته نسبی آنها افزایش می یابد. بررسی ریز ساختار نمونه ها نشان داد که با افزایش دمای انجام فرآیند اکستروژن، اتصال بهتری بین زمینه پودری و تراشه ها ایجاد می شود. در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  اتصال نفوذی مطلوبی بین زمینه پودری و تراشه ها ایجاد شده در صورتیکه در دماهای پایین تر از آن حفره هایی در امتداد فصل مشترک زمینه پودری و تراشه مشاهده گردید. نتایج حاصل از آزمایش کشش و فشار نشان داد که با افزایش درصد وزنی براده در یک دمای ثابت، استحکام افزایش و شکل پذیری کاهش می یابد و در یک درصد ثابت از تراشه ها، با افزایش دمای اکستروژن، استحکام و شکل پذیری افزایش می یابد. محاسبه توان کارسختی نمونه های تولیدی با استفاده از نتایج آزمایش فشار نشان داد که توان کارسختی این ساختار های دو گانه ثابت نمی باشد و تابع کرنش اعمالی است.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱- مقدمه
۵	فصل دوم: تئوری و مروری بر کار های انجام شده
۶	۲- تئوری و مروری بر کار های انجام شده
۶	۲-۱- مواد نانو کریستالی
۶	۲-۱-۱- تاریخچه
۸	۲-۱-۲- روش های تولید فلزات و آلیاژهای نانو ساختار
۹	۲-۱-۲-۱- روش چگاش گازی
۱۰	۲-۲-۱-۲- آلیاژسازی مکانیکی
۱۱	۲-۲-۱-۲- رسوب دهی الکتریکی
۱۲	۲-۲-۱-۲- تغییر فرم پلاستیک شدید
۱۴	۲-۲-۱-۲- تولید تراشه های نانو ساختار
۱۶	۲-۳-۱-۲- خواص مکانیکی مواد نانو کریستالی
۱۷	۲-۳-۱-۲- قابل قبول نبودن رابطه Hall-Petch در محدوده نانومتری
۱۸	۲-۳-۱-۲- داکتیلیتی مواد نانو کریستالی
۱۹	۲-۳-۱-۲- روش های پیشنهاد شده برای بهبود داکتیلیتی مواد نانو کریستالی
۱۹	۲-۳-۱-۲-۱- ایجاد ساختار دو گانه
۱۹	۲-۳-۱-۲-۲- تغییر فرم در دماهای پایین و یا نرخ کرنش های بالا
۲۰	۲-۳-۱-۲-۳-۱-۲- ایجاد حساسیت به نرخ کرنش بالا در دمای محیط
۲۰	۲-۲- ساختارهای دو گانه
۲۱	۲-۲-۱- پیشینه تحقیق
۲۲	۲-۲-۲- روش های ساخت ساختارهای دو گانه
۲۳	۲-۲-۳- بررسی خواص ساختار های دو گانه
۴۰	۲-۳- فرآیند چگالش



۴۰	۲-۳-۱-اکستروژن گرم پودر
۴۲	۲-۳-۱-۱-مزیت ها و کاربردهای اکستروژن پودر
۴۲	۲-۳-۱-۲-روش های مختلف اکستروژن پودر
۴۴	۲-۳-۱-۳-مکانیزم اکستروژن پودر
۴۵	۲-۳-۲-اکستروژن گرم براده
۴۸	فصل سوم: روش تحقیق
۴۹	۳-روش تحقیق
۴۹	۳-۱-مواد اولیه و ابزار مورد استفاده
۴۹	۳-۱-۱-پودر آلومینیوم
۵۰	۳-۱-۲-تراشه آلومینیوم
۵۱	۳-۱-۳-مجموعه قالب مورد استفاده جهت انجام فرآیند فشرده سازی
۵۲	۳-۱-۴-مجموعه قالب مورد استفاده جهت انجام فرآیند اکستروژن گرم پودر
۵۴	۳-۱-۵-کوره
۵۵	۳-۲-مراحل ساخت نمونه ها به روش اکستروژن گرم
۵۶	۳-۳-بررسی خواص نمونه های تولید شده
۵۶	۳-۳-۱-مطالعات ریز ساختاری
۵۷	۳-۳-۲-اندازه گیری دانسیته به روش ارشمیدس
۵۸	۳-۳-۳-آزمایش کشش
۵۹	۳-۳-۴-بررسی سطح شکست
۶۰	۳-۳-۵-آزمایش فشار
۶۰	۳-۳-۶-ریز سختی سنجی
۶۱	فصل چهارم: نتایج و بحث
۶۲	۴-نتایج و بحث
۶۲	۴-۱-دانسیته خام لقمه های اولیه فرآیند اکستروژن
۶۳	۴-۲-بررسی کیفیت سطحی نمونه های اکستروژن شده
۶۵	۴-۳-فشار اکستروژن
۶۸	۴-۴-دانسیته و تخلخل نمونه ها
۷۱	۴-۵-بررسی ریز ساختار نمونه های تولید شده
۷۹	۴-۶-ریزسختی سنجی ویکرز
۸۰	۴-۷-بررسی خواص کششی و سطوح شکست نمونه های تولیدی
۸۰	۴-۷-۱-استحکام و انعطاف پذیری
۸۴	۴-۷-۲-بررسی سطوح شکست نمونه های کششی

۸۸	۴-۸- بررسی نتایج آزمایش فشار
۹۲	۴-۹- توان کار سختی (n)
۹۷	فصل پنجم: نتیجه گیری
۹۸	۵- نتیجه گیری
۹۹	منابع و مراجع

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۶	جدول ۱-۲- تاثیر زاویه ی $\alpha$ بر میزان کرنش برشی ایجاد شده و ریز ساختار تراشه مس.
۲۷	جدول ۲-۲- خواص کششی آلیاژ Al-7.5Mg.
۳۰	جدول ۳-۲- خواص نمونه های تولید شده با دماهای مختلف عملیات فشرده سازی.
۴۶	جدول ۴-۲- استحکام نهایی مواد اکسترود شده.
۴۷	جدول ۵-۲- خواص فیزیکی و مکانیکی آلومینیوم و آلیاژ های آن.
۵۰	جدول ۱-۳- شرایط تولید براده های مورد استفاده.

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۷	شکل ۱-۲- تنش سیلان Fe-C برحسب اندازه دانه.
۷	شکل ۲-۲- ویسکر آهن که می توان آن را به عنوان اولین ماده نانو کریستالی در نظر گرفت.
۹	شکل ۳-۲- طرح شماتیک روش چگالش گاز خنثی برای تولید پودر نانو کریستالی.
۱۱	شکل ۴-۲- طرح شماتیک روش رسوب دهی الکتریکی ضربانی برای تولید مواد نانو کریستالی.
۱۲	شکل ۵-۲- طرح شماتیک قالب ECAP.
۱۳	شکل ۶-۲- تصویر TEM مس نانو کریستالی تولید شده با انجام ۸ مرحله فرآیند ECAP.
۱۳	شکل ۷-۲- طرح شماتیک روش پیچش تحت فشار بالا.
۱۴	شکل ۸-۲- ماشینکاری در شرایط کرنش صفحه ای.
۱۷	شکل ۹-۲- طرح شماتیک نشان دهنده تاثیر اندازه دانه بر روی خواص مکانیکی مواد.
۲۰	شکل ۱۰-۲- منحنی تنش-کرنش مهندس: A : ECAP-Cu، B : مس دانه درشت، C : مس با ساختار دوگانه، D : ECAP-Cu نورد شده در دمای نیتروژن مایع.
۲۲	شکل ۱۱-۲- الف- ایجاد دانه های درشت برای بهبود داکتیلیتی مواد نانو کریستالی با آنیل کردن ماده نانو کریستالی.
۲۳	شکل ۱۱-۲- ب- ایجاد دانه های درشت برای بهبود داکتیلیتی مواد نانو کریستالی با فشرده سازی مخلوط پودر های ریز و درشت با انجام فرآیند اکستروژن.
۲۴	شکل ۱۲-۲- طرح شماتیک تئوری ارائه شده توسط تلکمپ و همکارانش برای بهبود داکتیلیتی مواد نانو کریستالی در حضور دانه های درشت.

- شکل ۲-۱۳- سطح شکست مس نانوکریستالی مورد بررسی قرار گرفته توسط لگرس و همکارانش. ۲۵
- شکل ۲-۱۴- تصویر میکروسکوپ نوری سطح مقطع طولی و عرضی ساختار های دو گانه Al-7.5Mg با درصد های وزنی متفاوت دانه های درشت. ۲۶
- شکل ۲-۱۵- نمودار تنش- کرنش آلیاژ Al5083 و آلیاژ Al-7.5Mg زمینه دانه ریز با ۰٪، ۱۵٪ و ۳۰٪ دانه درشت. ۲۷
- شکل ۲-۱۶- اثر فرورونده سختی سنج ویکرز در ناحیه دانه ریز و دانه درشت (F=10gf). ۲۸
- شکل ۲-۱۷- سختی ویکرز اندازه گیری شده برای دانه های ریز و درشت ساختار های دو گانه Al-7.5Mg. ۲۸
- شکل ۲-۱۸- ناحیه تغییر فرم یافته زیر فرورونده سختی سنج برینل (F=60kg). ۲۹
- شکل ۲-۱۹- تنش سیلان در  $\epsilon = 2$  بر حسب نرخ کرنش برای اندازه دانه های مختلف زمینه. ۳۰
- شکل ۲-۲۰- نمودار حساسیت به نرخ کرنش بر حسب اندازه دانه ی زمینه. ۳۰
- شکل ۲-۲۱- طرح شماتیک روش BP-ECAP ۳۲
- شکل ۲-۲۲- منحنی تنش-کرنش فشاری در دمای محیط برای نمونه های با درصد وزنی مختلف دانه های نانومتری. ۳۳
- شکل ۲-۲۳- نمودار استحکام تسلیم و سختی ویکرز بر حسب درصد وزنی ذرات میکرونی آلومینیوم. ۳۳
- شکل ۲-۲۴- نمودار تنش-کرنش فشاری ساختار های دو گانه تولیدی در جهت طولی. ۳۵
- شکل ۲-۲۵- نمودار تنش-کرنش فشاری ساختار های دو گانه تولیدی در جهت عرضی. ۳۵
- شکل ۲-۲۶- تاثیر کسر حجمی دانه های درشت بر استحکام تسلیم و تنش سیلان فشاری آلیاژ Al5083 در دو جهت عرضی و طولی. ۳۶
- شکل ۲-۲۷- منحنی تنش-کرنش حقیقی آلیاژ Al5083 با ساختار دو گانه. ۳۷
- شکل ۲-۲۸- نمونه شکسته شده تست کشش آلیاژ Al5083 با ۳۰ درصد دانه درشت. ۳۸
- شکل ۲-۲۹- استحکام تسلیم، استحکام نهایی، کرنش یکنواخت و کرنش در لحظه شکست بر حسب کسر حجمی دانه های درشت. ۳۸

- شکل ۲-۳۰- سطح شکست نمونه تست کشش آلیاژ Al5083 با ۳۰ درصد دانه درشت در بزرگنمایی های مختلف. ۳۹
- شکل ۲-۳۱- (a) اکستروژن مستقیم (b) اکستروژن معکوس. ۴۱
- شکل ۲-۳۲- طرح شماتیک روش های مختلف اکستروژن گرم پودر های فلزی. ۴۳
- شکل ۲-۳۳- منحنی فشار برای اکستروژن مستقیم و معکوس. ۴۴
- شکل ۲-۳۴- کیفیت ظاهری نمونه های تولید شده (a) فشار سرد و نسبت اکستروژن ۲۵، (b) فشار سرد و نسبت اکستروژن ۶/۲۵، (c) فشار گرم و نسبت اکستروژن ۲۵، (d) فشار سرد و نسبت اکستروژن ۶/۲۵. ۴۶
- شکل ۳-۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از پودر آلومینیوم. ۴۹
- شکل ۳-۲- آنالیز EDS پودر آلومینیوم اولیه. ۵۰
- شکل ۳-۳ (a) تصویر تراشه های مورد استفاده، (b) تصویر محل های برش در حین تراشکاری. ۵۱
- شکل ۳-۴- نقشه مورد استفاده جهت ساخت قالب فشرده سازی. ۵۱
- شکل ۳-۵- مجموعه قالب ساخته شده جهت عملیات فشرده سازی. ۵۲
- شکل ۳-۶- نقشه مورد استفاده جهت ساخت قالب اکستروژن. ۵۳
- شکل ۳-۷- مجموعه قالب ساخته شده جهت انجام عملیات اکستروژن گرم. ۵۴
- شکل ۳-۸- تصویر کوره مورد استفاده جهت گرم کردن قالب و نمونه اولیه. ۵۵
- شکل ۳-۹- نحوه سوار شدن اجزای قالب بر روی هم و قرارگیری مجموعه قالب در زیر پرس. ۵۶
- شکل ۳-۱۰- سیستم اندازه گیری دانسیته به روش ارشمیدس. ۵۸
- شکل ۳-۱۱- تصویر شماتیک نمونه های استاندارد کششی. ۵۸
- شکل ۳-۱۲- تصویر نمونه کششی ساخته شده. ۵۹
- شکل ۳-۱۳- دستگاه Instron مورد استفاده جهت انجام تست کشش. ۵۹
- شکل ۴-۱- نمودار تغییرات دانسیته نسبی خام لقمه های اولیه بر حسب درصد وزنی براده. ۶۲
- شکل ۴-۲- نمونه های حاوی ۱۰٪ وزنی براده اکستروژن شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  و با سرعت (الف)  $0.2\text{ mm/s}$ ، (ب)  $0.4\text{ mm/s}$  و (ج)  $0.6\text{ mm/s}$ . ۶۳
- شکل ۴-۳- (الف) نمونه اکستروژن شده در دمای  $300^{\circ}\text{C}$  حاوی ۱۰٪ وزنی براده، (ب) نمونه اکستروژن شده در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  حاوی ۱۰٪ وزنی براده، (ج) نمونه اکستروژن شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  حاوی ۱۰٪ وزنی براده، (د)

- نمونه اکستروود شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  حاوی ۴۰٪ وزنی براده، (ه) نمونه اکستروود شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  حاوی ۴۰٪ وزنی براده، (و) نمونه اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  حاوی ۴۰٪ وزنی براده و (ی) نمونه اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  حاوی ۸۰٪ وزنی براده. ۶۴
- شکل ۴-۴- تغییرات فشار اکستروژن بر حسب میزان کاهش سطح مقطع قالب در یک دمای ثابت برای نمونه های حاوی ۱۰۰٪ درصد پودر خالص. ۶۵
- شکل ۴-۵- تغییرات فشار اکستروژن بر حسب سرعت انجام فرآیند اکستروژن برای نمونه های حاوی ۱۰۰٪ درصد پودر خالص در دمای  $430^{\circ}\text{C}$  و قالب ۸۶٪. ۶۶
- شکل ۴-۶- تغییرات فشار اکستروژن بر حسب دما برای نمونه های دارای ۱۰٪، ۲۰٪ وزنی براده. ۶۷
- شکل ۴-۷- تغییرات فشار اکستروژن بر حسب درصد وزنی براده برای نمونه های اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ . ۶۸
- شکل ۴-۸- تغییرات دانسیته نسبی نمونه های حاوی ۱۰۰٪ وزنی پودر آلومینیوم بر حسب سرعت انجام فرآیند اکستروژن در دمای  $430^{\circ}\text{C}$  و کاهش سطح مقطع ۸۶٪. ۶۹
- شکل ۴-۹- تغییرات دانسیته نسبی نمونه های حاوی ۱۰۰٪ وزنی پودر آلومینیوم بر حسب میزان کاهش در سطح مقطع در یک دمای ثابت. ۶۹
- شکل ۴-۱۰- نمودار تغییرات دانسیته نسبی بر حسب درصد وزنی براده در دماهای مختلف انجام فرآیند اکستروژن. ۷۱
- شکل ۴-۱۱- سطح مقطع (الف) طولی و (ب) عرضی نمونه حاوی ۱۰٪ وزنی براده اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ . ۷۲
- شکل ۴-۱۲- سطح مقطع (الف) طولی و (ب) عرضی نمونه حاوی ۲۰٪ وزنی براده اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ . ۷۲
- شکل ۴-۱۳- سطح مقطع (الف) طولی و (ب) عرضی نمونه حاوی ۴۰٪ وزنی براده اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ . ۷۲
- شکل ۴-۱۴- سطح مقطع (الف) طولی و (ب) عرضی نمونه حاوی ۶۰٪ وزنی براده اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ . ۷۳
- شکل ۴-۱۵- تصویر میکروسکوپ نوری (الف) و (ب) مقطع عرضی و (ج) مقطع طولی نمونه اکستروود شده در دمای  $300^{\circ}\text{C}$  حاوی ۱۰٪ وزنی براده. ۷۴
- شکل ۴-۱۶- تصویر میکروسکوپ نوری (الف) مقطع عرضی و (ب) مقطع طولی نمونه اکستروود شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  حاوی ۲۰٪ وزنی براده. ۷۵

- شکل ۴-۱۷- تصویر میکروسکوپ نوری (الف) مقطع عرضی و (ب) مقطع طولی نمونه اکستروود شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  حاوی ۱۰٪ وزنی براده. ۷۶
- شکل ۴-۱۸- تصویر میکروسکوپ نوری (الف) مقطع عرضی و (ب) مقطع طولی نمونه اکستروود شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  حاوی ۲۰٪ وزنی براده. ۷۷
- شکل ۴-۱۹- تصویر میکروسکوپ نوری دو مقطع عرضی از نمونه اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  حاوی ۶۰٪ وزنی براده. ۷۸
- شکل ۴-۲۰- ایجاد جوش نفوذی در فصل مشترک پودر و براده در نمونه اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  حاوی ۶۰٪ وزنی براده. ۷۹
- شکل ۴-۲۱- نمودار تغییرات سختی براده ها و زمینه پودری در هر نمونه بر حسب دمای انجام فرآیند اکستروژن. ۸۰
- شکل ۴-۲۲- نمودار تغییرات استحام نهایی (UTS) و درصد ازدیاد طول در لحظه شکست ( $e_f\%$ ) بر حسب دما برای نمونه های شامل ۱۰۰٪ وزنی پودر. ۸۱
- شکل ۴-۲۳- نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه های اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  و  $450^{\circ}\text{C}$  شامل درصدهای وزنی مختلف براده. ۸۲
- شکل ۴-۲۴- نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه های اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  شامل درصدهای وزنی مختلف براده. ۸۳
- شکل ۴-۲۵- نمودار تغییرات استحام نهایی (UTS) و درصد ازدیاد طول در لحظه شکست ( $e_f\%$ ) بر حسب درصد وزنی پودر برای نمونه های اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ . ۸۴
- شکل ۴-۲۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست نمونه حاوی ۱۰٪ وزنی براده اکستروود شده در دمای  $350^{\circ}\text{C}$ . ۸۵
- شکل ۴-۲۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست نمونه حاوی ۱۰٪ وزنی براده اکستروود شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$ . ۸۵
- شکل ۴-۲۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست نمونه حاوی ۱۰٪ وزنی براده اکستروود شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$ . ۸۶
- شکل ۴-۲۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست نمونه حاوی ۱۰٪ وزنی براده اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ . ۸۶
- شکل ۴-۳۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست نمونه حاوی ۴۰٪ وزنی براده اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ . ۸۷
- شکل ۴-۳۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع شکست نمونه حاوی ۶۰٪ وزنی براده اکستروود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ . ۸۷



- شکل ۴-۳۲- نمودار تنش- کرنش واقعی فشاری نمونه های اکسترود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  حاوی درصد های مختلف براده. ۸۹
- شکل ۴-۳۳- نمودار تنش- کرنش واقعی فشاری نمونه های اکسترود شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  حاوی درصد های مختلف براده. ۸۹
- شکل ۴-۳۴- نمودار تنش- کرنش واقعی فشاری نمونه های اکسترود شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  حاوی درصد های مختلف براده. ۹۰
- شکل ۴-۳۵- نمودار تنش- کرنش واقعی فشاری نمونه های حاوی ۲۰٪ وزنی براده اکسترود شده در دماهای مختلف. ۹۰
- شکل ۴-۳۶- نمودار تنش- کرنش واقعی فشاری نمونه های حاوی ۴۰٪ وزنی براده اکسترود شده در دماهای مختلف. ۹۱
- شکل ۴-۳۷- تصویر نمونه های تست فشار بعد از انجام تست. ۹۱
- شکل ۴-۳۸- نمودار  $\ln\sigma$  بر حسب  $\ln\epsilon$  برای نمونه دارای ۶۰٪ وزنی براده. ۹۴
- شکل ۴-۳۹- نمودار  $n$  بر حسب درصد وزنی براده برای نمونه های اکسترود شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  در صورت ثابت در نظر گرفتن مقدار  $n$ . ۹۴
- شکل ۴-۴۰- نمودار تغییرات  $n$  بر حسب کرنش برای نمونه دارای ۶۰٪ وزنی براده. ۹۵
- شکل ۴-۴۱- نمودار شیب تغییرات  $n$  بر حسب کرنش برای نمونه دارای ۶۰٪ وزنی براده. ۹۵
- شکل ۴-۴۲- نمودار تغییرات  $n$  بر حسب کرنش برای نمونه های اکسترود شده، حاوی درصد های مختلف براده، در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ . ۹۶
- شکل ۴-۴۳- نمودار شیب تغییرات  $n$  بر حسب کرنش برای نمونه های اکسترود شده، حاوی درصد های مختلف براده، در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ . ۹۶

# فصل اول

## مقدمه

## ۱- مقدمه

تولید مواد با استحکام و شکل پذیری بالا از اهمیت زیادی برخوردار است. ماده با استحکام بالاتر، مقدار نیروی بیشتری را تحمل خواهد کرد و شکل پذیری بالا سبب می شود ماده دچار شکست ناگهانی و فاجعه آمیز نشود. اما متأسفانه استحکام و شکل پذیری با هم رابطه معکوس دارند و افزایش یکی سبب کاهش دیگری می شود. کاهش اندازه دانه تنها مکانیزمی است که سبب افزایش همزمان استحکام و شکل پذیری می شود. به همین دلیل مواد دانه ریز بسیار مورد توجه قرار گرفتند. مطالعات اولیه بر روی مواد دانه ریز در دهه ۱۹۶۰ آغاز گردید [۱ و ۲]. اما می توان گفت تلاش های جدی در زمینه تولید و بررسی خواص مواد نانو کریستالی از سال ۱۹۸۱ با تولید فلزات نانو کریستالی با استفاده از روش چگالش گاز خنثی توسط گلیتر آغاز گردید [۳]. روش های مختلفی برای تولید مواد نانو کریستالی مورد استفاده قرار گرفته اند که مهم ترین آنها عبارتند از: چگالش با گاز خنثی، آلیاژسازی مکانیکی، رسوب دهی الکتریکی و تغییر فرم پلاستیک شدید. تغییر فرم پلاستیک شدید به عنوان یک روش تولید مواد نانو کریستالی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این روش امکان تولید مواد نانو کریستالی با دانسیته کامل و بدون ناخالصی و آلودگی را فراهم می کند. از روش های تغییر فرم پلاستیک شدید متداول می توان روش ECAP را نام برد. اما روش های تغییر فرم پلاستیک شدید کنونی دارای محدودیت هایی می باشند. اول اینکه چندین مرحله ی تغییر فرم برای ایجاد یک کرنش پلاستیک قابل ملاحظه لازم است. همچنین برای مواد با استحکام متوسط و استحکام بالا یا شکل پذیری کم، روش های تغییر فرم پلاستیک شدید کنونی فقط در دماهای بالا می توانند انجام شوند. یک روش جدید برای ایجاد کرنش های پلاستیک زیاد در یک مرحله ی تغییر فرم و در دماهای نزدیک به دمای محیط، حتی برای مواد با استحکام بالا، تشکیل تراشه به وسیله ی ماشینکاری در حالت کرنش صفحه ای می باشد. تحقیقات نشان داده اند که کرنش پلاستیک زیادی که در یک مرحله در تراشه ایجاد می شود، سبب ریز شدن ریز ساختار و ایجاد یک ماده نانو کریستالی می شود [۴-۶]. این روش، فرآیندی ارزان قیمت برای تولید مواد نانو کریستالی بشمار می آید.

با تولید مواد نانو کریستالی انتظار می رفت که این مواد استحکام و شکل پذیری بسیار بالایی از خود نشان دهند. با توجه به رابطه Hall-Petch، استحکامی نزدیک به استحکام تئوری برای این مواد پیش بینی می شد. همچنین نتایج ارائه شده اولیه از داکتیلیتی نانوسرامیک ها، بهبود شکل پذیری در محدوده نانو کریستالی را تایید کرد. مطالعات بیشتر بر روی خواص مواد نانو کریستالی نشان داد که مواد نانو کریستالی استحکام بسیار بالایی از خود نشان می دهند، هر چند این افزایش استحکام کمتر از مقداری است که انتظار می رفت و در واقع مواد در محدوده نانو متری از رابطه هال-پیچ پیروی نمی کنند. اما متأسفانه شکل پذیری در مواد نانو کریستالی به شدت کاهش می یابد و حتی موادی که در اندازه های درشت، موادی شکل پذیر هستند، در محدوده نانو کریستالی کاملاً ترد عمل می کنند. کچ (Koch) [۷] سه دلیل اصلی برای شکل پذیری کم مواد نانو کریستالی ذکر کرده است که عبارتند از: ۱- عیوب ناشی از فرآیند تولید، ۲- ناپایداری نیرو در آزمایش کشش و ۳- ناپایداری جوانه زنی و رشد ترک. کم بودن شکل پذیری مواد نانو کریستالی سبب شد کاربرد این مواد کاهش یابد. به همین دلیل تحقیقات زیادی بر روی بهبود شکل پذیری مواد نانو کریستالی صورت گرفت. روش های مختلفی برای بهبود شکل پذیری مواد نانو کریستالی ارائه گردید که مهم ترین آنها عبارتند از: ایجاد ساختار دو گانه، تغییر فرم در دماهای پایین و یا نرخ کرنش های بالا و ایجاد حساسیت به نرخ کرنش بالا در دمای محیط.

یکی از موفق ترین روش های بهبود شکل پذیری مواد نانو کریستالی ایجاد ساختارهای دو گانه می باشد. ساختارهای دو گانه دارای ترکیبی از دانه های ریز و درشت می باشند که قسمت دانه ریز سبب افزایش استحکام می شود و قسمت دانه درشت سبب بهبود شکل پذیری می شود. ساختارهای دو گانه دارای استحکام قابل قبولی می باشند و شکل پذیری خوبی هم از خود نشان می دهند. ایده ایجاد ساختار های دو گانه با مشاهده بهبود شکل پذیری در مواد نانو کریستالی که در آنها دانه های درشت تری به صورت اتفاقی در اثر عملیات حرارتی به وجود آمده بودند، به وجود آمد.

دو روش برای ایجاد ساختار های دو گانه وجود دارد [۸]:

۱- عملیات ترمو مکانیکی شامل تغییر فرم پلاستیک شدید و عملیات حرارتی مناسب تحت شرایط کنترل شده

۲- مخلوط کردن نسبت های مناسبی از پودر هایی با اندازه های متفاوت و فشرده کردن آنها و تولید یک قطعه ی چگال

هدف از انجام این تحقیق ساخت قطعات آلومینیومی با ساختار دو گانه ای از دانه های ریز و درشت و بررسی خواص آن بوده است. اما به جای پودر نانو کریستالی آلومینیوم که تولید آن بسیار هزینه بر است، از تراشه های نانو ساختار استفاده شده است. این تراشه ها با نسبت های وزنی مختلف با پودر میکرونی آلومینیوم مخلوط شده اند و تحت فشار سرد متراکم گردیده اند.