





بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای علی عزیزاده رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان ساخت و بررسی خواص مکانیکی و سایسی نانو کامپوزیت Al-B4C در تاریخ ۱۳۹۰/۱۰/۱۱ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی مواد - سرامیک پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر احسان ظاهری نساج	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر حمید رضا بهاروندی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر رسول صراف مأموری	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر پروین عزیزاده	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمدرضا رحیمی پور	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر - عیدی زاده	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر پروین عزیزاده	دانشیار	

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:
«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی مواد است که در سال ۱۳۹۰ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر احسان طاهری نساج و مشاوره جناب آقای دکتر حمید رضا بهاروندی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب علی علیزاده دانشجوی رشته مهندسی مواد مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: علی علیزاده

تاریخ و امضا:
۹۷/۱۰/۱۹

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

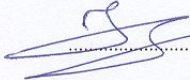
تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب علی‌علیزاده دانشجوی رشته مهندسی مواد ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۶ مقطع دکتری دانشکده فنی و مهندسی متعهد می‌شوم کلیه نکات مندرج در آئین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته‌های علمی مستخرج از پایان‌نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین‌نامه فوق‌الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: 
تاریخ: ۹۰/۱/۱۹



دانشکده فنی و مهندسی

رساله برای دریافت درجه دکتری
رشته مهندسی مواد - گرایش سرامیک

ساخت و بررسی خواص مکانیکی و سایشی نانو کامپوزیت $Al-B_4C$

نگارش:

علی علیزاده

استاد راهنما:

دکتر احسان طاهری نساج

استاد مشاور:

دکتر حمید رضا بهاروندی

تقدیم به آنان که همواره چراغ راهم بودند

مهربان و صبور

پدر و مادر عزیزم

همسر گرانقدرم

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که به انسان جان بخشید و با زینت "عشق" جان را مزین نمود. اکنون که به مدد لطف جمیلش این پژوهش را با موفقیت به اتمام رساندم، دست به قلم نیایش بردم و به شکرانه لطفش، جبین به سجاده شکر می‌سایم و از لطف پر کرامتش سپاسگزاری می‌کنم.

بر خود لازم می‌دانم از زحمات و راهنمایی‌های استاد فرزانه و بزرگووارم جناب آقای دکتر احسان طاهری‌نساچ کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم که در کلیه مراحل پژوهش از نظرات، راهنمایی‌ها و پشتیبانی‌های گرانبهایشان بهره‌جستم.

در ادامه از آقایان دکتر حمید رضا بهاروندی و دکتر ناصر احسانی که از مشاوره ایشان در طول مراحل انجام این پژوهش بهره‌بردم نهایت قدردانی را به عمل می‌آورم.

و از دوستان عزیزم آقایان مهندس محمد جزیره پور، مهندس محسن حاج زمانی، مهندس محمد افقهی و مهندس رضا عجمی و کلیه دوستانی که نامشان در این مختصر نمی‌گنجد به خاطر همراهی و همفکریشان نهایت سپاسگزاری را دارم. همچنین از همکاری و زحمات کارشناس محترم آزمایشگاه دانشکده مهندسی مواد خانم مهندس فرهنگیان که اینجانب را در انجام آزمایش‌ها یاری کردند کمال تشکر را دارم.

چکیده

در این پژوهش نانو پودر B_4C با متوسط اندازه ذره 80 nm از طریق آسیاب پودر کاربید بور با متوسط اندازه اولیه $0.8\text{ }\mu\text{m}$ به مدت 140 ساعت تولید شد. پودرهای نانو کامپوزیتی $Al-B_4C$ با درصدهای مختلف وزنی 2 ، 4 ، 6 ، 8 و 10 از نانو ذرات کاربید بور به روش آسیاب مکانیکی سنتز شدند. برای این منظور پودرهای آلیاژی $Al-2\text{wt}\%Cu$ و کاربید بور بوسیله آسیای سیاره‌ای تحت اتمسفر آرگون آسیاب شدند. تغییرات ریز ساختاری و مورفولوژیکی ذرات پودرهای نانو کامپوزیتی در زمان‌های مختلف آسیاب مکانیکی با استفاده از روش‌های پراش اشعه X و میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و عبوری مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد با افزایش مقدار نانو ذرات سخت B_4C فرآیند آسیاب مکانیکی تسریع و منجر به تشکیل پودرهای نانو کامپوزیتی ریزتر با توزیع اندازه ذرات یکنواخت‌تر شد. علاوه بر آن بررسی الگوهای پراش اشعه X نشان داد که اندازه دانه‌های زمینه آلومینیوم با افزایش درصد وزنی ذرات نانومتری B_4C کاهش یافت. سپس اکستروژن داغ پودر در دمای 550°C و نسبت $10:1$ برای تولید قطعه مورد استفاده قرار گرفت. بررسی‌های ریز ساختاری قطعه‌های نانوکامپوزیتی نشان داد که نانوذرات B_4C بطور یکنواخت در زمینه آلیاژ آلومینیوم توزیع شده‌اند. علاوه بر این، فاز میله‌ای شکل Al_3BC نیز با قطر $5-10\text{ nm}$ و طول حدود 30 nm به صورت درجا (In situ) سنتز شد که به صورت یکنواخت در راستای اکستروژن توزیع شده‌اند. اندازه گیری خواص کششی و فشاری نشان داد که با ریز کردن ساختار دانه زمینه، افزودن ذرات تقویت کننده و تشکیل فاز Al_3BC به صورت درجا، افزایش قابل توجهی در تنش تسلیم و استحکام نهایی آلیاژ $Al-2\text{wt}\%Cu$ به وجود آمد. بطوریکه استحکام نهایی کششی آلیاژ آلومینیوم نانو ساختار، $Al-Cu/2\text{wt}\%B_4C$ و $Al-Cu/4\text{wt}\%B_4C$ به ترتیب حدود 148 ، 180 و 200 درصد بیشتر از آلیاژ آلومینیوم درشت دانه بود. اما انعطاف پذیری (Ductility) به شدت کاهش و رفتار ترد از خود نشان داد.

جهت بهبود انعطاف پذیری آلیاژ آلومینیوم نانو ساختار و نانوکامپوزیت‌های Al-Cu/B₄C با تغییرات ریز ساختاری، آلیاژهای آلومینیوم با ساختار اندازه دانه دو تایی (Bimodal) و کامپوزیت‌های با ساختار اندازه دانه سه تایی (Trimodal) طراحی شدند. بررسی‌های ریز ساختاری نشانگر توزیع یکنواخت فاز درشت دانه در زمینه نانو ساختار و کشیده شدن آنها در جهت اکستروژن می‌باشد. نتایج آزمون‌های کششی و فشاری نشان داد که با افزودن فاز درشت دانه، افزایش قابل توجهی در انعطاف پذیری مواد نانو ساختار حاصل شد. بررسی سطوح شکست نشان داد که فاز درشت دانه مانع از رشد ترک‌ها در زمینه نانو ساختار شده است. رفتار سایشی آلومینیوم نانو ساختار، Al-Cu/2wt%B₄C و Al-Cu/4wt%B₄C در بارهای ۲۰، ۳۵ و ۵۰N مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ریز کردن ساختار دانه زمینه و افزودن ذرات تقویت کننده منجر به افزایش قابل توجهی در مقاومت سایشی آلیاژ Al-2wt%Cu شد.

کلمات کلیدی: نانوکامپوزیت، آسیاب مکانیکی، اکستروژن داغ، B₄C، Al₃BC، خواص سایشی، خواص

مکانیکی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
فصل دوم: مروری بر منابع مطالعاتی	۵
۱-۲- آسیاب کردن ذرات سرامیکی	۵
۲-۲- روش تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی	۱۰
۱-۲-۲- ریخته‌گری	۱۰
۲-۲-۲- روش متالورژی پودر	۱۳
۳-۲-۲- آلیاژسازی مکانیکی	۱۵
۱-۳-۲-۲- مکانیزم آلیاژسازی مکانیکی پودرهای فلزی	۱۷
۲-۳-۲-۲- مکانیزم آسیاب مکانیکی پودرهای کامپوزیتی	۱۹
۳-۲-۳-۲- مکانیزم‌های انحلال ناشی از کرنش فازها در فلزات	۲۳
۱-۳-۲-۲- انحلال فاز توسط مکانیزم نابجایی در فلزات	۲۳
۲-۳-۲-۲- مکانیزم جذب ناخالصی توسط مرزدانه	۲۶
۳-۳-۲-۲- مکانیزم جذب ناخالصی توسط جاهای خالی	۲۸
۴-۲- چگالش داغ	۲۸
۵-۲- خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی	۳۲

- ۳۲..... اثر اندازه دانه‌ها ۱-۵-۲
- ۳۶..... تاثیر فاز تقویت کننده ۲-۵-۲
- ۴۲..... ساختارهای چند اندازه دانه‌ای ۶-۲
- ۴۳..... آلیاژهای با ساختار اندازه دانه دوتایی ۱-۶-۲
- ۴۷..... کامپوزیت‌های با ساختار دانه سه‌تایی ۲-۶-۲
- ۵۱..... خواص سایشی کامپوزیت‌های زمینه فلزی ۷-۲
- ۵۱..... تریبولوژی و سایش ۱-۷-۲
- ۵۲..... مکانیزم‌های سایش ۲-۷-۲
- ۵۲..... سایش خراشان ۱-۲-۷-۲
- ۵۳..... سایش چسبان ۲-۲-۷-۲
- ۵۴..... سایش ورقه‌ای ۳-۲-۷-۲
- ۵۶..... سایش خستگی ۴-۲-۷-۲
- ۵۶..... رفتار سایشی ۳-۷-۲
- ۵۷..... سایش خفیف ۱-۳-۷-۲
- ۵۹..... سایش شدید ۲-۳-۷-۲
- ۶۱..... تاثیر پارامترهای موثر بر نرخ سایش کامپوزیت‌های زمینه فلزی ۴-۷-۲
- ۶۱..... تاثیر بار بر نرخ سایش ۱-۴-۷-۲

۶۲..... ۲-۴-۷-۲- تاثیر مسافت لغزش بر نرخ سایش

۶۳..... ۳-۴-۷-۲- تاثیر فاز تقویت کننده

۶۴..... ۴-۴-۷-۲- تاثیر اندازه ذرات فاز تقویت کننده

۶۶..... ۵-۴-۷-۲- تاثیر اندازه دانه فاز زمینه

۷۰..... فصل سوم: روش تحقیق

۷۰..... ۱-۳- مواد اولیه

۷۰..... ۳-۱-۱- پودر آلومینیوم

۷۲..... ۳-۱-۲- پودر کاربید بور

۷۴..... ۳-۲- آسیاب مکانیکی

۷۸..... ۳-۳- تهیه نمونه های با ساختار چند اندازه دانه ای

۷۸..... ۳-۴- اکستروژن داغ

۷۸..... ۳-۴-۱- طراحی و ساخت سیستم اکستروژن

۸۰..... ۳-۴-۲- فرآیند اکستروژن داغ

۸۲..... ۳-۵- بررسی خواص مکانیکی نمونه های اکستروژن شده

۸۳..... ۳-۶- بررسی خواص سایشی نمونه های اکستروژن شده

۸۴..... ۳-۶-۱- طراحی آزمایش سایش

۸۵..... ۳-۶-۲- بررسی های انجام شده جهت ارائه مکانیزم سایش

فصل چهارم: نتایج و بحث ۸۷

۱-۴- تولید نانوپودر کاربید بور به روش آسیاب مکانیکی ۸۷

۲-۴- اثر ذرات تقویت کننده بر آسیاب مکانیکی پودر آلومینیوم ۹۰

۳-۴- آنالیز ریز ساختاری و خواص مکانیکی قطعات اکسترود شده ۱۱۷

۱-۳-۴- آنالیز ریزساختاری قطعات اکسترود شده ۱۱۷

۲-۳-۴- خواص مکانیکی قطعات اکسترود شده ۱۲۵

۴-۴- آنالیز ریز ساختاری و خواص مکانیکی نمونه‌های چند اندازه دانه‌ای ۱۳۸

۱-۴-۴- آنالیز ریزساختاری و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم با ساختار اندازه دانه دو تایی ۱۳۸

۲-۴-۴- آنالیز ریزساختاری و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های با ساختار دانه سه‌تایی ۱۵۱

۵-۴- نتایج بررسی رفتار سایشی نمونه‌های اکسترود شده ۱۶۲

۱-۵-۴- بررسی نرخ سایش ۱۶۲

۲-۵-۴- بررسی سطوح سایش ۱۶۴

۳-۵-۴- بررسی نواحی زیر سطحی ۱۸۳

۶-۴- بررسی رفتار سایشی کامپوزیت‌های با ساختار دانه سه‌تایی ۱۹۰

۱-۶-۴- بررسی نرخ سایش ۱۹۰

۲-۶-۴- بررسی سطوح سایش ۱۹۱

۳-۶-۴- بررسی نواحی زیر سطحی ۱۹۷

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۲۰۰

فصل ششم: فهرست مراجع ۲۰۵

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- طرح واره‌ای از یک آسیاب سایشی..... ۶
- شکل ۲-۲- الف) تصویر SEM پودر آسیاب نشده Ti_3SiC_2 و تصاویر TEM پودر آسیاب شده برای، ب) سه ساعت، ج) نه ساعت و د) ۱۸ ساعت ۸
- شکل ۳-۲- تاثیر سرعت آسیاب بر اندازه ذرات تیتانات باریوم..... ۹
- شکل ۴-۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانوذرات کاربید بور تولید شده به روش آسیاب سیاره‌ای..... ۹
- شکل ۵-۲- استحکام کششی و تنش تسلیم و ب) درصد ازدیاد طول برحسب درصد وزنی فاز تقویت کننده ۱۱
- شکل ۶-۲- نمونه‌ای از ذرات خوشه‌ای شده نانو ذرات SiC در زمینه آلومینیومی ۱۱
- شکل ۷-۲- نمودار استحکام تسلیم و درصد تخلخل نمونه‌های ریخته‌گری شده و اکستروود شده برحسب درصد وزنی فاز تقویت کننده ۱۲
- شکل ۸-۲- الف) تصویری از یک آسیاب سیاره‌ای و ب) مکانیزم عملکرد آن ۱۶
- شکل ۹-۲- نمایی از تغییر شکل ذرات پودر در بین گلوله‌های آسیاب و بین گلوله‌ها و دیواره ظرف ۱۷
- شکل ۱۰-۲- مراحل مختلف تغییر شکل ذرات نرم فلزی در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی ۱۸
- شکل ۱۱-۲- مراحل تشکیل پودرهای کامپوزیتی در فرآیند آسیاب مکانیکی ۱۹
- شکل ۱۲-۲- تغییرات ریز ساختار Al6061 تقویت شده با پنج درصد وزنی ذرات Si_3N_4 بر حسب زمان آسیای مکانیکی. الف) یک و نیم، ب) سه، ج) چهار و نیم، د) شش، ه) هشت و و) ۱۰ ساعت ۲۱

- شکل ۲-۱۳- تغییرات ریز ساختار پودر Al6061 تقویت شده با پنج درصد وزنی ذرات AlN پس از سه ساعت آسیاب مکانیکی ۲۲
- شکل ۲-۱۴- مراحل تشکیل دانه های نانومتری در فرآیند آسیای مکانیکی ۲۳
- شکل ۲-۱۵- مکانیزم انحلال فاز ثانویه در اثر اندرکنش با نابجایی ها ۲۴
- شکل ۲-۱۶- طرح واره انحلال فاز ثانویه بوسیله مکانیزم غیر تماسی نابجایی ها؛ A منبع تولید نابجایی و F فاز حل شونده است. دایره ها و نقاط به ترتیب نشان دهنده اتمسفرهای کاترل و اتم های ناخالصی هستند. پیکان ها نیز جهت نفوذ در زمینه را نشان می دهند ۲۵
- شکل ۲-۱۷- طرح واره مراحل تغییرات ساختاری ناشی از فرآیند تغییر شکل. قسمت های روشن، فلز و قسمت های تیره، فاز ثانویه می باشند ۲۷
- شکل ۲-۱۸- تصویر SEM از ریز ساختار نانوکامپوزیت Al5083- 6.5vol%SiC در بزرگنمایی، الف) کم و ب) زیاد. مناطق تیره مناطق عاری از نانو ذرات و مناطق روشن مناطق حاوی نانو ذرات SiC را نشان می دهند ۳۰
- شکل ۲-۱۹- منحنی های تنش- کرنش کششی آلیاژ Al5083 تولید شده به روش های مختلف ۳۲
- شکل ۲-۲۰- منحنی های تنش- کرنش کششی آلومینیوم فشرده شده از پودرهای آلومینیوم آسیاب شده در زمان های مختلف ۳۳
- شکل ۲-۲۱- مکانیزم تغییر شکل پلاستیک بر حسب اندازه دانه ها ۳۵
- شکل ۲-۲۲- اثر کسر حجمی فاز تقویت کننده SiC بر، الف) سختی و ب) مدول یانگ و مدول برشی نانوکامپوزیت Al-SiC ۳۶

- شکل ۲-۲۳- منحنی تنش- کرنش مس خالص و نانوکامپوزیت‌های مسی تقویت شده با نانوذرات آلومینا تولید شده به روش مخلوط کردن پودر و روش آسیاب مکانیکی ۴۰
- شکل ۲-۲۴- تصویر SEM نانوکامپوزیت $\text{Cu-3vol\%Al}_2\text{O}_3$ تولید شده به روش مخلوط کردن پودرهای نانومتری آلومینا و میکرومتری مس ۴۱
- شکل ۲-۲۵- تصویر TEM نانوکامپوزیت $\text{Cu-3vol\%Al}_2\text{O}_3$ تولید شده به روش آسیاب مکانیکی و اکستروژن ۴۴
- شکل ۲-۲۶- تصویر TEM نانوکامپوزیت $\text{Al-5vol\%Al}_2\text{O}_3$ تولید شده به روش مخلوط‌سازی/تف جوشی/ اکستروژن ۴۲
- شکل ۲-۲۷- طرح واره‌ای از یک ساختار با اندازه دانه دوتایی ۴۴
- شکل ۲-۲۸- ریزساختار آلیاژ Al-7.5Mg با ساختار اندازه دانه دوتایی حاوی ۳۰٪ فاز درشت دانه ۴۶
- شکل ۲-۲۹- سختی ویکرز اندازه‌گیری شده مربوط به نواحی نانساختار و درشت دانه در آلیاژ Al-7.5Mg با ساختار اندازه دانه دوتایی ۴۶
- شکل ۲-۳۰- تصویر SEM ورقه‌ای شدن فصل مشترک در آلیاژهای با ساختار اندازه دانه دو تایی آلومینیوم پس از آزمون کششی ۴۷
- شکل ۲-۳۱- طرح واره‌ای از کامپوزیت با ساختار دانه سه‌تایی ۴۸
- شکل ۲-۳۲- منحنی‌های تنش- کرنش کششی کامپوزیت‌های A و B ۴۹
- شکل ۲-۳۳- کامپوزیت با ساختار دانه سه‌تایی ؛ الف) توزیع غیر یکنواخت (نواحی تیره کلوخه‌های بزرگ پودر نانوکامپوزیتی هستند) و ب) توزیع یکنواخت ۵۰

- شکل ۲-۳۴- طرح واره ساییش خراشی. الف) خراش دو جسمه و ب) خراش سه جسمه ۵۲
- شکل ۲-۳۵- طرح واره مکانیزم ساییش چسبندگی ۵۴
- شکل ۲-۳۶- طرح واره مکانیزم ساییش ورقه‌ای ۵۵
- شکل ۲-۳۷- جوانه زنی حفره و ترک در اطراف ذرات فاز ثانویه در زیر سطح تماس ۵۶
- شکل ۲-۳۸- طرح واره کنده شدن و شکل‌گیری مجدد فیلم اکسیدی ۵۸
- شکل ۲-۳۹- طرح واره نواحی زیر سطح ساییش؛ نشان دهنده سه ناحیه مجزا در زیر سطح ۶۱
- شکل ۲-۴۰- تاثیر بار اعمالی بر نرخ ساییش آلیاژ Al-7Si با درصد‌های مختلف TiB_2 بر حسب بار اعمالی ۶۲
- شکل ۲-۴۱- تاثیر مسافت لغزش بر نرخ ساییش آلیاژهای Al-Si ۶۳
- شکل ۲-۴۲- تاثیر اندازه ذرات تقویت کننده بر روی نرخ ساییش کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ ۶۵
- شکل ۲-۴۳- تاثیر اندازه دانه بر الف) سختی و ب) نرخ ساییش پوشش نیکل ۶۷
- شکل ۲-۴۴- تصاویر سطوح ساییش نمونه های مس. الف) و ب) با اندازه دانه میکرومتری و ج)، د)، ه) و و) با اندازه دانه نانومتری ۶۸
- شکل ۳-۱- تصویر SEM پودر Al-2 wt%Cu تولید شده به روش افشانش گازی ۷۱
- شکل ۳-۲- توزیع اندازه ذرات پودر Al-2 wt%Cu تولید شده به روش افشانش گازی ۷۱
- شکل ۳-۳- تصویر SEM ذرات میکرومتری B_4C ۷۲
- شکل ۳-۴- تصویری از دستگاه آسیاب مکانیکی ساییشی مورد استفاده در این پژوهش ۷۳

- شکل ۳-۵- تصویری از قالب اکستروژن مورد استفاده در این تحقیق ۷۹
- شکل ۳-۶- تصویر نمونه های اکستروژن شده ۸۰
- شکل ۳-۷- نمونه تست کشش ساخته شده در این تحقیق ۸۲
- شکل ۳-۸- تصویر دستگاه آزمون سایش به کار رفته در این پژوهش ۸۳
- شکل ۴-۱- الف) تصویر SEM ذرات میکرومتری B_4C و ب) تصویر TEM ذرات نانومتری B_4C بعد از آسیاب مکانیکی ۸۷
- شکل ۴-۲- الف) توزیع اندازه ذرات B_4C در زمان های مختلف آسیاب و ب) میانگین اندازه ذرات پودر کاربرد بور بر حسب زمان آسیاب ۸۸
- شکل ۴-۳- الگوی پراش اشعه ایکس پودر B_4C قبل و بعد از آسیاب مکانیکی ۸۹
- شکل ۴-۴- مورفولوژی پودر آلومینیوم پس از زمان های مختلف آسیاب مکانیکی (ساعت؛ الف) صفر، ب) پنج، ج) ۱۰، د) ۱۵ و ه) ۲۰ ۹۱
- شکل ۴-۵- الف) مورفولوژی ذرات پودر نانوکامپوزیت $Al-Cu/4wt\%B_4C$ پس از اختلاط مکانیکی، ب) تصویر بزرگ‌نمایی بالا از محل تجمع نانو ذرات B_4C ۹۲
- شکل ۴-۶- مورفولوژی ذرات پودر نانوکامپوزیت $Al-Cu/4wt\%B_4C$ پس از زمان های مختلف آسیاب مکانیکی (ساعت؛ الف) صفر، ب) پنج، ج) ۱۰، د) ۱۵ و ه) ۲۰ ۹۳
- شکل ۴-۷- مورفولوژی ذرات آلومینیوم و پودرهای نانوکامپوزیت پس از ۲۰ ساعت آسیاب مکانیکی؛ الف) $Al-Cu/4wt\%B_4C$ ، ب) $Al-Cu/6wt\%B_4C$ ، ج) $Al-Cu/8wt\%B_4C$ ، د) $Al-Cu/10wt\%B_4C$ ، ه) $Al-Cu/10wt\%B_4C$ ۹۵

شکل ۴-۸- مورفولوژی ذرات پودر کامپوزیت B_4C Al-Cu/4wt% (تقویت شده با ذرات میکرومتری B_4C)

پس از ۲۰ ساعت آسیاب مکانیکی ۹۶

شکل ۴-۹- توزیع اندازه ذرات پودرهای آسیا شده ۹۸

شکل ۴-۱۰- تغییرات چگالی ظاهری پودرهای آلومینیوم و کامپوزیت B_4C Al-Cu/4wt% با زمان آسیاب

مکانیکی ۹۹

شکل ۴-۱۱- تغییرات چگالی ظاهری پودرهای کامپوزیتی B_4C Al- بر حسب مقدار نانوذرات کاربیدبور. ۱۰۰

شکل ۴-۱۲- توزیع ذرات کاربید بور در زمینه آلومینیوم در زمان‌های مختلف آسیاب مکانیکی (ساعت)؛

(الف) ۱۰، (ب) ۱۵ ۱۰۱

شکل ۴-۱۳- الگوی پراش اشعه X در زمان‌های مختلف آسیاب مکانیکی؛ (الف) پودر آلومینیوم و (ب) Al-

B_4C 4 wt% Cu ۱۰۳

شکل ۴-۱۴- تغییرات اندازه کریستال و کرنش شبکه پودرهای آلومینیوم و نانوکامپوزیت Al-Cu/4

B_4C wt% ۱۰۴

شکل ۴-۱۵- اندازه دانه آلومینیوم بر حسب مقدار کاربید بور بعد از ۲۰ ساعت آسیاب مکانیکی ۱۰۵

شکل ۴-۱۶- اثر زمان آسیاب مکانیکی بر میکروسختی پودر آلومینیوم و پودر B_4C Al-Cu/4wt% ۱۰۶

شکل ۴-۱۷- (الف) تصویر BF-TEM، (ب) تصویر DF-TEM، (ج) طرح SAD و (د) آنالیز EDS از پودر

نانوکامپوزیت B_4C Al-Cu ۱۰۷

شکل ۴-۱۸- (الف) تصویر BF-TEM از پودر نانوکامپوزیت B_4C Al-Cu/4wt%، (ب) آنالیز EDS از نقطه A و

(ج) آنالیز EDS از نقطه B ۱۰۸