



۹۳۱۷۰۰۱

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد

گرایش جوشکاری

عنوان :

ارزیابی لایه سطحی نانوکامپوزیتی آلیاژ $\text{CNT/CeO}_2/\text{Al5083}$ تولید شده با فرآیند

اصطکاکی اغتشاشی

استاد راهنما:

دکتر خلیل رنجبر

استاد مشاور:

دکتر رضا دهملائی

نگارنده:

سید علی حسینی

تیرماه سال ۱۳۹۳

باسمه تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

(نتیجه ارزشیابی پایان نامه ارشد)

پایان نامه آقای سید علی حسینی دانشجوی رشته: مهندسی مواد گرایش: جوشکاری

دانشکده مهندسی به شماره دانشجویی ۹۱۱۷۰۰۱

با عنوان :

ارزیابی لایه سطحی نانوکامپوزیتی آلیاژ $\text{CNT/CeO}_2/\text{Al5083}$ تولید شده با

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

جهت اخذ مدرک : کارشناسی ارشد در تاریخ : ۱۳۹۳/۴/۱۱ توسط هیأت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه عالی تصویب گردید.

امضاء	رتبه علمی	اعضای هیأت داوران :
.....	استاد	استاد راهنما: دکتر خلیل رنجیر
.....	استادیار	استاد مشاور : دکتر رضا دهملانی
.....	استادیار	استاد داور : دکتر سید رضا علوی زارع
.....	استادیار	استاد داور : دکتر سید محمد لاری بقال
.....	استادیار	نماینده تحصیلات تکمیلی : دکتر محمدرضا صفاریان
.....	استادیار	مدیر گروه : دکتر خلیل الله قیصری
.....	استادیار	معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر علی حقیقی
.....	استاد	مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه : دکتر عبدالرحمن راسخ

قدردانی

الحمد لله و المنه که باری تعالی مجدداً به سنت همیشگی اش عمل کرده و حقیر را از روی لطف و کرم بی کرانش در این جایگاه قرار داد. پس به شکرانه‌ی این نعمت و به مصداق آیه‌ی شریفه‌ی **من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق** بر خود واجب می‌دانم تا از تمامی کسانی که مرا در رسیدن به این جایگاه مساعدت نمودند تشکر، سپاس و قدردانی نمایم.

خالصانه‌ترین تشکر و سپاس را به محضر جناب آقای پرفسور خلیل رنجبر تقدیم می‌نمایم که بی شک حضور ایشان در کنار بنده در این مقطع تحصیلی افتخاری است فراموش نشدنی؛ که حقیقتاً حمایت‌های بی دریغ و راهنمایی‌های استادانه و پدرانه‌ی ایشان این راه سخت را بر بنده هموار ساخت. بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات دکتر رضا دهملائی؛ استاد مشاور بنده در این کار کمال تشکر را داشته باشم.

در اینجا شایسته است از مهندس محمد نریمانی، مهندس مصطفی امراء، مهندس آرش بختیاری نژاد، مهندس محمد رضا شایان، مهندس میثم زهرابی، مهندس احمد نجار و مهندس یعقوب ذهبی نیا که رفیق راهم بودند صمیمانه تشکر نمایم.

و در نهایت از سرکار خانم مهندس سارا رستگاری نیا که در نگارش و ویراستیاری این پایان‌نامه بنده را یاری نموده کمال تشکر و سپاس را دارم.

تقدیم

ما حصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام بخش آلام زمینی‌ام است
به استوارترین تکیه‌گاهم دستان پر مهر پدر بزرگوارم
به سبزترین نگاه زندگی‌ام چشمان سبز مادر مهربانم
که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانیتان
را سپاس نتوانم بگویم. امروز هستی‌ام گرم است به حضور شما و فردا کلید باغ بهشت‌م رضای شما
ره آوردی گران سنگ‌تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم. باشد که حاصل تلاشم نسیم
گونه غبار خستگی‌تان را بزداید.
و تقدیم می‌شود به برادران مهربانم حسین و یوسف.

فهرست مطالب

أ.....	فرم ارزشیابی
ب.....	قدردانی
پ.....	تقدیم
ث.....	فهرست مطالب
خ.....	فهرست شکل‌ها
ز.....	فهرست جداول
ح.....	چکیده به زبان فارسی

فصل اول

۱.....	مقدمه
--------	-------

فصل دوم

۴.....	مروری بر پژوهش‌های پیشین
۴-۱-۲.....	آلومینیوم و آلیاژهای آن
۷-۲-۲.....	آلیاژهای آلومینیوم-منیزیم
۹-۳-۲.....	اهمیت جوشکاری و فرآیند اصطکاکی اغتشاشی
۹-۱-۳-۲.....	جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
۱۰-۲-۳-۲.....	فرآیند اصطکاکی اغتشاشی
۱۱-۴-۲.....	شرح عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
۱۲-۵-۲.....	شرح عملیات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی
۱۲-۶-۲.....	متغیرهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی
۱۴-۱-۶-۲.....	ابزار
۲۵-۷-۲.....	تحولات ریزساختاری در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی
۲۶-۱-۷-۲.....	ناحیه‌ی تحت اغتشاش
۳۱-۲-۷-۲.....	ناحیه‌ی ترمومکانیکال
۳۱-۳-۷-۲.....	ناحیه‌ی متأثر از حرارت

۳۱	۸-۲ نگاهی بر کامپوزیت‌های تولید شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی
۳۲	۱-۸-۲ کامپوزیت‌های تولید شده روی زمینه‌ی Al5083
۴۲	۲-۸-۲ کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات نانولوله‌ی کربنی
۵۰	۹-۲ تأثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی

فصل سوم

۵۴	مواد و روش تحقیق
۵۴	۱-۳ مواد اولیه
۵۴	۱-۱-۳ آلیاژ مورد استفاده
۵۵	۲-۱-۳ پودرهای تقویت کننده
۵۷	۳-۱-۳ ابزار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی
۵۹	۲-۳ انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی
۶۳	۳-۳ بررسی‌های ریزساختاری
۶۳	۱-۳-۳ آماده‌سازی نمونه‌ای متالوگرافی
۶۴	۲-۳-۳ متالوگرافی
۶۴	۳-۳-۳ نرم افزارهای مورد استفاده
۶۵	۴-۳ بررسی خواص مکانیکی
۶۵	۱-۴-۳ آزمون کشش
۶۷	۲-۴-۳ آزمون سختی سنجی
۶۷	۵-۳ بررسی‌های تریبولوژیکی
۶۸	۶-۳ بررسی رفتار خوردگی

فصل چهارم

۷۰	نتایج و بحث
۷۰	۱-۴ آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳
۷۱	۱-۱-۴ بررسی اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳
۷۵	۲-۴ تولید نانو کامپوزیت
۷۸	۳-۴ بررسی ریزساختار نانو کامپوزیت‌ها
۷۸	۱-۳-۴ بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ نوری
۸۱	۲-۳-۴ بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ الکترونی
۸۴	۴-۴ بررسی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها
۸۴	۱-۴-۴ آزمون کشش
۹۰	۲-۴-۴ بررسی سطوح شکست
۹۴	۳-۴-۴ آزمون سختی سنجی
۹۵	۵-۴ بررسی خواص تریبولوژیکی نانو کامپوزیت‌ها
۱۰۴	۶-۴ بررسی رفتار خوردگی نانو کامپوزیت‌ها

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۱۰

۱-۵ نتیجه‌گیری ۱۱۰

۲-۵ پیشنهادها ۱۱۱

فهرست منابع ۱۱۲

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲. گروه‌های آلیاژی آلومینیوم بر اساس تقسیم‌بندی انجمن آلومینیوم آمریکا ۵
- شکل ۲-۲. دیاگرام فازی آلومینیوم- منیزیم ۷
- شکل ۳-۲. کشتی جنگی تک دیواره ساخته شده از آلومینیوم ۵۰۸۳ ۸
- شکل ۴-۲. شماتیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۱۱
- شکل ۵-۲. شماتیک فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (الف) اصلاح و بهبود ساختار و (ب) کامپوزیت سازی ۱۳
- شکل ۶-۲. شماتیک ابزار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی که شامل شانه و پین می‌باشد ۱۳
- شکل ۷-۲. شماتیکی از شانه‌های طرح‌دار ۱۸
- شکل ۸-۲. (الف) پین استوانه‌ای با انتهای گنبدی، (ب) پین استوانه‌ای با انتهای تخت و (ج) پین مخروطی ناقص ۲۰
- شکل ۹-۲. پین حلقه‌ای یا پیچی ۲۱
- شکل ۱۰-۲. (الف) پین سه شیاره MX و (ب) پین سه وجهی ۲۲
- شکل ۱۱-۲. نمونه‌ای از پین بدون رزوه ۲۲
- شکل ۱۲-۲. تأثیر قطر شانه بر خواص مکانیکی ۲۴
- شکل ۱۳-۲. (الف) تأثیر شکل پین بر سختی ناحیه‌ی تحت اغتشاش و (ب) تأثیر قطر شانه بر سختی ۲۴
- شکل ۱۴-۲. ریزساختار نواحی مختلف پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ۲۷
- شکل ۱۵-۲. تأثیر پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر شکل ناحیه‌ی تحت اغتشاش ۳۰
- شکل ۱۶-۲. میکروگراف میکروسکوپ نوری: (الف) توزیع یکنواخت ذرات SiC ۳۲
- شکل ۱۷-۲. تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی نانوکامپوزیت Fulleren/ Al5083 ۳۴
- شکل ۱۸-۲. شماتیک ارتباط میان جریان همرفتی ایجاد شده توسط شانه و حرارت ورودی ۳۵
- شکل ۱۹-۲. تصاویر TEM نانوکامپوزیت Fulleren/ Al5083 ۳۶
- شکل ۲۰-۲. (الف) نتایج آزمون کشش (استحکام تسلیم و کششی نهایی) و (ب) نتایج سختی سنجی ۳۸
- شکل ۲۱-۲. (الف) تغییرات نرخ سایش برحسب درصد حجمی ذرات تقویت‌کننده ۳۸
- شکل ۲۲-۲. (الف) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار Al5083 ۴۰
- شکل ۲۳-۲. تغییرات وزن کاهش یافته برحسب مسافت لغزش برای نمونه‌های مختلف ۴۱
- شکل ۲۴-۲. نمودار تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت لغزش ۴۱
- شکل ۲۵-۲. میکروگراف میکروسکوپ نوری از نواحی مختلف فرآیند ۴۳
- شکل ۲۶-۲. میکروگراف میکروسکوپ نوری و مقادیر سختی Al7075/MWCNTs ۴۴
- شکل ۲۷-۲. سختی در کامپوزیت Al7075/ MWCNTs ۴۵

- شکل ۲-۲۸. الف) میکروگراف میکروسکوپ نوری از کامپوزیت‌های Al5059/MWCNTs ۴۶
- شکل ۲-۲۹. شماتیک فرآیند تولید نانو کامپوزیت Al1016/MWCNTs ۴۷
- شکل ۲-۳۰. تصاویر میکروسکوپ نوری از: الف) Al5083 ۴۸
- شکل ۲-۳۱. انعطاف‌پذیری و استحکام کششی برحسب درصد حجمی نانولوله‌ی کربنی ۴۹
- شکل ۲-۳۲. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ Al2219 ۵۱
- شکل ۲-۳۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار آلیاژ Al2219 ۵۱
- شکل ۲-۳۴. نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای نمونه‌های مختلف ۵۲
- شکل ۲-۳۵. نتایج آزمون طیف سنج امپدانس الکتروشیمیایی برای نمونه‌های مختلف ۵۲
- شکل ۳-۱. ورق در نظر گرفته شده به عنوان قطعه کار با شیار موجود در خط مرکزی ۵۵
- شکل ۳-۲. تصویر FESEM از الف) ذرات نانولوله‌ی کربنی و ب) ذرات اکسید سریم ۵۶
- شکل ۳-۳. نقشه و تصویر ابزار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ۵۸
- شکل ۳-۴. تصویر ماشین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد استفاده در پژوهش ۶۰
- شکل ۳-۵. مراحل تولید نانو کامپوزیت در این پژوهش ۶۲
- شکل ۳-۶. نمونه‌ایی از نانو کامپوزیت‌های تولید شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در این پژوهش ۶۲
- شکل ۳-۷. شماتیک نمونه‌ی متالوگرافی و محل تهیه‌ی آن ۶۳
- شکل ۳-۸. محل استخراج نمونه‌های آزمون کشش و ابعاد آن‌ها. ۶۵
- شکل ۳-۹. دستگاه کشش تک محوری SANTAM مورد استفاده در این پژوهش ۶۶
- شکل ۳-۱۰. تصویر میکروسکوپ نوری ناحیه‌ی تحت اغتشاش و موضع انجام آزمون سختی سنجی ۶۷
- شکل ۴-۱. تصویر میکروسکوپ نوری از آلیاژ Al5083 مورد استفاده در این پژوهش ۷۱
- شکل ۴-۲. تصویر ماکرو از ناحیه‌ی تحت اغتشاش ایجاد شده در آلیاژ Al5083 پس از فرآیند ۷۲
- شکل ۴-۳. تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه‌ی تحت اغتشاش در آلیاژ Al5083 ۷۳
- شکل ۴-۴. تصویر میکروسکوپ FESEM از ناحیه‌ی NZ و آنالیز شیمیایی EDS ۷۴
- شکل ۴-۵. الف) ریزساختار ناحیه‌ی ترمومکانیکال ۷۴
- شکل ۴-۶. تصویر ماکروسکوپی از نانو کامپوزیت تولیدی ۷۶
- شکل ۴-۷. تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه‌ی NZ ۷۷
- شکل ۴-۸. تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه‌ی NZ مربوط به نانو کامپوزیت Al5083/CNT ۷۸
- شکل ۴-۹. تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه‌ی NG نانو کامپوزیت Al5083/ CNT ۷۹
- شکل ۴-۱۰. نمودار توزیع اندازه دانه در ناحیه‌ی NZ ۸۰
- شکل ۴-۱۱. تصویر میکروسکوپ نوری نشان دهنده‌ی فصل مشترک ۸۰
- شکل ۴-۱۲. تصویر FESEM از توزیع ذرات نانولوله‌ی کربنی در زمینه‌ی نانو کامپوزیت ۸۲
- شکل ۴-۱۳. تصویر FESEM از نانو کامپوزیت Al5083/ CeO₂ ۸۳
- شکل ۴-۱۴. تصویر FESEM از توزیع ذرات تقویت‌کننده CNT و CeO₂ ۸۴
- شکل ۴-۱۵. منحنی تنش- کرنش مهندسی آلیاژ اولیه و نمونه‌ی FSPed Base alloy ۸۵
- شکل ۴-۱۶. منحنی تنش- کرنش مهندسی نانو کامپوزیت‌های هیبریدی ۸۵
- شکل ۴-۱۷. منحنی تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های مختلف ۸۶
- شکل ۴-۱۸. شماتیک مراحل مختلف عبور نابه‌جایی از ذرات ناهمدوس موجود در زمینه‌ی فلزات ۸۷
- شکل ۴-۱۹. تصویر SEM از سطوح شکست ۹۰
- شکل ۴-۲۰. تصویر FESEM از سطوح شکست نمونه‌های نانو کامپوزیتی ۹۲

- شکل ۴-۲۱. تصویر FESEM با بزرگنمایی بالا از ذرات نانولوله‌ی کربنی در سطح شکست ۹۳
- شکل ۴-۲۲. تصویر FESEM از توزیع ذرات اکسید سریم در سطح شکست نمونه‌ی نانو کامپوزیتی ۹۳
- شکل ۴-۲۳. پروفیل ریزسختی از مقطع تمام نمونه‌ها ۹۵
- شکل ۴-۲۴. تغییرات حجم سایش یافته در آزمون سایش برحسب مسافت لغزش برای نمونه‌های مختلف. ۹۶
- شکل ۴-۲۵. تغییرات نرخ سایش برحسب مسافت لغزش برای نمونه‌های مختلف. ۹۶
- شکل ۴-۲۶. الف) تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت لغزش ۹۹
- شکل ۴-۲۷. تصویر FESEM از سطح سایش یافته‌ی نمونه‌ی Base alloy ۱۰۱
- شکل ۴-۲۸. تصویر FESEM از سطح سایش یافته‌ی نمونه‌ی FSPed Base alloy ۱۰۱
- شکل ۴-۲۹. تصویر FESEM از سطوح سایش یافته ۱۰۳
- شکل ۴-۳۰. نمودار پلاریزاسیون آلیاژ Al5083 در محلول 3.5% NaCl ۱۰۶
- شکل ۴-۳۱. منحنی پلاریزاسیون نمونه‌های مختلف در محلول 3.5% NaCl ۱۰۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۲. مقادیر مصرف آلومینیوم در بازارهای جهانی ۴
- جدول ۲-۲. ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۵۰۸۳ ۸
- جدول ۳-۲. مزایای کلیدی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۱۱
- جدول ۴-۲. خلاصه‌ای از مواد مورد استفاده برای ابزار فرآیند و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۱۶
- جدول ۵-۲. خلاصه‌ای از اندازه دانه در آلیاژهای آلومینیوم پس از فرآیند و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۲۸
- جدول ۶-۲. خلاصه‌ای از ساختارهای فوق ریز دانه در آلیاژهای آلومینیوم پس از فرآیند ۲۹
- جدول ۷-۲. نتایج ریزسختی کامپوزیت سطحی Al/SiC و فلز پایه ۳۳
- جدول ۱-۳. ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۵۰۸۳ مورد استفاده در این پژوهش ۵۵
- جدول ۲-۳. مشخصات کاربردی ذرات نانولوله‌ی کربنی و اکسید سریم به کار رفته در این پژوهش ۵۶
- جدول ۳-۳. ترکیب شیمیایی فولاد ابزار H13 مورد استفاده در این پژوهش ۵۷
- جدول ۴-۳. شرایط کاری در نظر گرفته شده برای انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در این پژوهش ۶۱
- جدول ۵-۳. ترکیب شیمیایی محلول و جزئیات فرآیند حکاکی ۶۴
- جدول ۱-۴. پارامترهای خوردگی حاصل از منحنی‌های پلاریزاسیون شکل ۴-۳۰ ۱۰۷

چکیده

نام خانوادگی: حسینی	نام: سید علی	شماره دانشجویی: ۹۱۱۷۰۰۱
عنوان پایان نامه: ارزیابی لایه سطحی نانوکامپوزیتی آلیاژ CNT/ CeO ₂ / Al5083 تولید شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی		
استاد راهنما: دکتر خلیل رنجبر		
استاد مشاور: دکتر رضا دهملائی		
درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی مواد	گرایش: جوشکاری
دانشگاه: شهید چمران اهواز	دانشکده: مهندسی	گروه: مهندسی مواد
تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۳/۴/۱۱		تعداد صفحه: ۱۱۸
کلید واژه ها: فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، کامپوزیت هیبریدی، خوردگی حفره‌ای، آلیاژ Al5083، اکسید سریم و نانولوله‌ی کربنی.		
<p>در این تحقیق خواص ریزساختاری، مکانیکی، تریبولوژیکی و خوردگی نانوکامپوزیت هیبریدی سطحی CNT/ CeO₂/ Al5083 تولید شده با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در نسبت‌های حجمی مختلف ذرات مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مطالعات مکانیکی روی نانوکامپوزیت سطحی با استفاده از آزمون سختی‌سنجی و آزمون کشش انجام شد. مورفولوژی لایه سطحی با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (FESEM) بررسی شد. نتایج نشان داد که پودر هیبریدی نانولوله‌ی کربنی و اکسید سریم در زمینه‌ی آلیاژ آلومینیوم- منیزیم ۵۰۸۳ بعد از ۳ پاس فرآیند اصطکاکی اغتشاشی توزیع خوب و یکنواختی پیدا کرده و خواص مکانیکی زمینه شامل سختی و استحکام کششی افزایش قابل توجهی یافته است. مقاومت به سایش کامپوزیت تولیدی با انجام آزمون سایش پین روی دیسک بررسی شد. نتایج نشان داد که مقاومت به سایش کامپوزیت با افزایش درصد حجمی پودر نانولوله‌ی کربنی بهبود یافته است. مطالعه‌ی رفتار خوردگی کامپوزیت CNT/ CeO₂/ Al5083 با انجام آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محلول استاندارد 3.5% NaCl نشان داد که با افزایش درصد حجمی پودر اکسید سریم در زمینه، مقاومت به خوردگی حفره‌ای به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. تغییرات در خواص یاد شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و نسبت ترکیبی پودر هیبریدی در این تحقیق مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است.</p>		

فصل اول

مقدمه

در سال‌های اخیر روش‌های متنوعی برای اصلاح ریزساختار معرفی شده است که از این میان می‌توان به: عملیات ذوب لیزری پراثرژی، تابش پرتو الکترون پراثرژی، پاشش پلاسما و ریخته‌گری اشاره کرد. همه این روش‌ها که به منظور ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی^۱ نیز توسعه یافته‌اند به نوعی فرآیندهای حالت مایع در دماهای بالا محسوب می‌شوند. تحت این شرایط انجام واکنش میان ذرات تقویت‌کننده و زمینه فلزی و همچنین تشکیل فازهای ناخواسته اجتناب‌ناپذیر است. از این رو به منظور دستیابی به ساختار انجماد یافته‌ی مورد نظر، کنترل بسیار دقیق پارامترهای فرآیند لازم و ضروری است. کنترل تمام پارامترها هرچند شدنی و امکان‌پذیر باشد اما مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد است. واضح است که ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی در دماهایی زیر دمای ذوب فلز پایه مشکلات یادشده را به حداقل خواهد رساند [۱]. حدود یک دهه است فرآیند اصطکاکی اغتشاشی^۲ به عنوان روشی برای اصلاح ساختار و بهبود خواص و همچنین تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی در دمایی زیر دمای ذوب معرفی شده است. به عبارت دیگر کامپوزیت سازی با این روش یک فرآیند حالت جامد است [۱-۳]. کامپوزیت سازی با این روش که اصول و مبانی آن بر پایه‌ی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۳ بنا نهاده شده، به این صورت است که ابتدا شیاری با ابعاد مشخص روی سطح قطعه‌کار ایجاد می‌گردد و پس از آن ماده‌ی تقویت‌کننده با روش‌های مختلف درون شیار قرار می‌گیرد. در طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی یک ابزار چرخنده‌ی غیرمصرفی متشکل از پین و شانه با طراحی خاص در حین حرکت چرخشی خود توسط نیروی فورج به درون شیار ایجاد شده روی سطح فرو رفته و با یک سرعت مشخص طول شیار را طی می‌کند. حرکت چرخشی و انتقالی پین در ماده باعث ایجاد اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک شدید شده و این دو عامل حرارت زیادی را تولید می‌کند. حرارت تولیدی باعث سیلان ماده در جهت چرخش پین می‌گردد و ذرات پودری قرار گرفته درون شیار در زمینه

¹ Metal matrix composite

² Friction Stir Processing (FSP)

³ Friction Stir Welding (FSW)

توزیع می‌گردند و کامپوزیت در دمایی کمتر از نقطه ذوب قطعه‌کار تولید می‌گردد. حالت جامد بودن فرآیند اصطکاکی اغتشاشی باعث سهولت کنترل پارامترهای فرآیند شده است و به همین دلیل کاربردهای آن در ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی رفته‌رفته در حال افزایش است. گزارش‌های بسیار در خصوص بهبود خواص کششی [۴-۶]، خستگی [۷، ۸]، سختی و تریبولوژیکی [۹، ۱۰] و مقاومت به خوردگی [۱۱] به وسیله‌ی این فرآیند ارائه شده است.

دانسیته‌ی پایین، نسبت استحکام به وزن نسبتاً بالا، انعطاف‌پذیری خوب و هدایت حرارتی بالا و از طرف دیگر قیمت مناسب باعث شده تا آلومینیوم و آلیاژهای آن در صنعت بسیار مورد توجه قرار گیرند تا جایی که در برخی صنایع جایگزین فلزات سنگین‌تری چون فولادها شوند [۱۲]. آلیاژهای دوتایی آلومینیوم - منیزیم که آلیاژهای غیرقابل عملیات حرارتی سری ۵۰۰۰ را تشکیل می‌دهند در کنار ویژگی‌های بالا دارای قابلیت جوش‌پذیری عالی و مقاومت به خوردگی حتی در آب‌های شور هستند، به همین دلیل در صنایع دریایی، هوایی و دریایی - نظامی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند، آلیاژ AI5083 یکی از آلیاژهای این دسته است [۱۳]. این آلیاژ در حال حاضر برای ساخت زیردریایی‌ها، شناورهای تندر، هاورکرافت‌ها و سازه‌های دریایی در صنعت ایران به کار گرفته شده است. حضور بیش از پیش این آلیاژ در صنعت و به‌خصوص در صنعت ایران باعث شده محققان بیشتر از گذشته نسبت به بهبود هرچه بیشتر خواص مکانیکی، ریزساختاری و خوردگی آن اهتمام ورزند. چرا که جایگزینی این آلیاژ با فلزات صنعتی متداول در صورتی امکان‌پذیر است که خواص این آلیاژ در مقام رقابت با خواص این فلزات قرار گیرد.

امروزه کاربرد نانولوله‌های کربنی (Carbon nanotubes (CNT)) به دلیل دانسیته‌ی پایین و استحکام تئوری بسیار بالا به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت بسیار گسترش یافته است [۶، ۱۴، ۱۵]. گزارش‌های بسیاری در خصوص به کارگیری این ذرات برای بهبود خواص مواد حاکی از مؤثر بودن این ذرات در دستیابی به خواص تقویت شده، است [۱۶، ۱۷]. این در حالی است تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی به وسیله‌ی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی کمتر مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است [۶، ۱۸، ۱۹].

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد آلیاژ آلومینیوم AI5083 در محیط‌های دریایی بسیار به کار گرفته می‌شود لذا بهبود هرچه بیشتر مقاومت به خوردگی آن نیز برای افزایش دامنه‌ی کاربردهای این آلیاژ ضروری به شمار می‌آید. عنصر سریم (Ce) با عدد اتمی ۵۸ یکی از عناصر خاکی در جدول تناوبی است که نتایج تحقیقات انجام شده روی این عنصر در زمینه‌ی مواد فلزی منجر به معرفی آن به عنوان یک بازدارنده‌ی کاتدی خوردگی شده است [۲۰]. از ویژگی‌های منحصربه‌فرد این عنصر می‌توان به زیست‌سازگار بودن آن در مقایسه با دیگر عناصر به کار گرفته شده برای

ایجاد مقاومت به خوردگی در فلزات چون کرم اشاره نمود [۲۱, ۲۲].

در پژوهش پیش رو فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به منظور تولید نانوکامپوزیت تقویت شده با ذرات نانولوله‌ی کربنی و اکسید سریم روی زمینه‌ی آلیاژ A15083 به کار گرفته شده است. تأثیر این ذرات به صورت جداگانه و هم به صورت هیبریدی در زمینه‌ی این آلیاژ تاکنون مورد تحقیق قرار نگرفته است. از این رو بررسی اثر قرارگیری این ذرات در زمینه‌ی آلیاژ A15083 با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی هدف و رسالت این پژوهش قرار گرفت. نانوکامپوزیت A15083/CNT/ CeO_2 در نسبت‌های حجمی مختلف با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تولید شد و خواص ریزساختاری، مکانیکی، تریبولوژیکی و خوردگی آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

نتایج این پژوهش در ۴ فصل به تحریر در آمده است که مطالب پیش رو در فصل اول گنجانده شده است. فصل دوم به تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و کامپوزیت‌های تولید شده با این روش اختصاص یافته است. در فصل سوم گزارشی از کارهای انجام شده و دستگاه‌های مورد استفاده ارائه خواهد شد و پس از آن در فصل چهارم به منظور بررسی خواص نانوکامپوزیت‌های تولیدی نتایج آزمون‌های ریزساختاری، مکانیکی، تریبولوژیکی و خوردگی بیان می‌گردد. در نهایت نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مطالب گفته شده در فصول چهارگانه در فصل پنجم ارائه می‌گردد.

فصل دوم

مروری بر پژوهش‌های پیشین

۱-۲ آلومینیوم و آلیاژهای آن

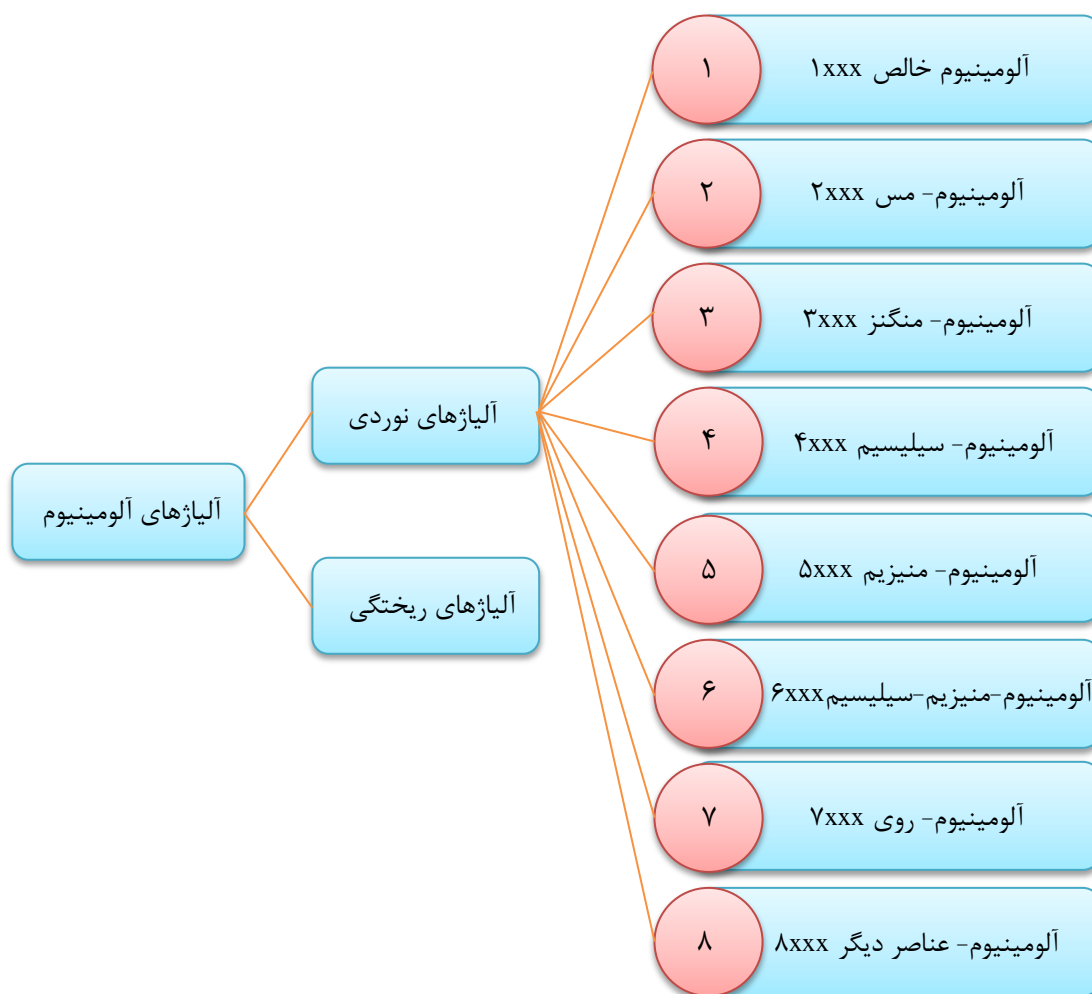
آلومینیوم پس از آهن و فولاد در بازار جهانی ردیف دوم را دارد. در سال ۱۹۷۷ ایالات متحده آمریکا ۱۳/۴ میلیارد پوند آلومینیوم صادر کرده است که از این مقدار ۱/۲۳٪ در صنایع ساختمانی و سازه‌ای و ۷/۲۱٪ در صنایع حمل‌ونقل مصرف شده است (جدول ۱-۲) [۲۳].

جدول ۱-۲. مقادیر مصرف آلومینیوم در بازارهای جهانی [۲۳].

۱۹۷۷		۱۹۷۶		نوع بازار
٪ بازار	میلیون پوند	٪ بازار	میلیون پوند	
۲۳/۱	۳۰۷۸	۲۳/۰	۲۹۳۹	ساختمانی و سازه‌ای
۲۱/۷	۲۸۹۶	۱۹/۳	۲۴۵۹	حمل‌ونقل
۷/۹	۱۰۶۱	۸/۱	۱۰۳۶	مصرف‌کنندگان دائمی
۱۰/۰	۱۳۳۶	۱۰/۳	۱۳۱۲	الکتریکی
۶/۹	۹۲۱	۷/۱	۹۰۵	ماشین‌آلات و تأسیسات
۲۰/۸	۲۷۷۷	۲۰/۲	۲۵۷۰	ظروف و بسته‌بندی
۲/۰	۵۶۰	۵/۴	۶۹۰	موارد دیگر
۵/۴	۷۲۶	۶/۶	۸۳۶	صادرات
	۱۳۳۵۵		۱۲۷۴۷	جمع

آلومینیوم عنصری شیمیایی با عدد اتمی ۱۳ و نماد AI در جدول تناوبی است. این عنصر فلزی نرم، سفید و چکش پذیر با چگالی پایین است که سومین عنصر فراوان و فراوان‌ترین فلز در پوسته کره زمین به شمار می‌رود. آلومینیوم خالص به دلیل واکنش‌پذیری بسیار بالای خود به ندرت به طور طبیعی یافت می‌شود و به جای آن در سنگ‌های معدنی مختلفی وجود دارد.

آلیاژهای آلومینیوم از لحاظ روش تولید به دو گروه بزرگ آلیاژهای ریختگی^۱ و آلیاژهای کارپذیر یا نوردی^۲ تقسیم می‌شوند. آلیاژهای نوردی که بیش از ۸۰ درصد حجم کل آلیاژهای مصرفی آلومینیوم را در بر می‌گیرند در سال ۱۹۷۴ میلادی توسط انجمن آلومینیوم آمریکا به هشت گروه تقسیم شدند که در شکل ۱-۲ این هشت گروه معرفی شده‌اند [۲۴].



شکل ۱-۲. گروه‌های آلیاژی آلومینیوم بر اساس تقسیم‌بندی انجمن آلومینیوم آمریکا.

آلیاژهای متعلق به هر یک از گروه‌های بالا بر اساس سیستم نام‌گذاری انجمن آلومینیوم با یک عدد چهار رقمی شناسایی می‌شوند. بر این اساس عدد اول تعیین‌کننده‌ی گروه آلیاژی است و عدد دوم مشخص‌کننده‌ی اصلاح آلیاژ اصلی یا حدود ناخالصی‌هاست. در این سیستم

^۱ Casting Alloys

^۲ Wrought Alloys

نام‌گذاری دو عدد آخر در نام هر آلیاژ منحصر به فرد بوده و تعیین کننده‌ی آلیاژ یا خلوص آلومینیوم در آن است.

نام گذاری هر آلیاژ تنها محدود به این چهار عدد نیست و مشخصات حالت آلیاژ علاوه بر این چهار عدد به صورت ترکیبی از حروف و اعداد بعد از خط تیر به دنبال نام آلیاژ ذکر می‌شود (مثلاً O-۲۰۲۴). حالت‌های اساسی معرفی شده توسط انجمن آلومینیوم که برای هر دو نوع آلیاژهای ریختگی و نوردی یکسان می‌باشد به شرح زیر است:

F: همان تولید شده. این حرف فقط به آلیاژهای نوردی اطلاق می‌گردد و حاکی از عدم وجود کنترل خاص بر عملیات حرارتی یا فرآیند کرنش سختی اعمالی روی آلیاژ است. خواص مکانیکی آلیاژهای در حالت F در محدوده خاصی قابل تقسیم‌بندی نیست.

O: آنیل شده. در مورد محصولات نوردی حالت O شرایطی را بیان می‌کند که آلیاژ به منظور رسیدن به کمترین استحکام کششی تحت عملیات آنیل قرار گرفته است. عملیات آنیل در آلیاژهای ریختگی به منظور افزایش انعطاف‌پذیری و پایداری ابعادی اعمال می‌گردد.

H: کرنش سخت شده. همواره حداقل دو عدد به دنبال حرف H ذکر می‌شود که میزان کارسختی و عملیات حرارتی اعمال شده بر روی آلیاژ به منظور استحصال خواص مکانیکی مورد نظر را تعیین می‌کنند.

W: عملیات حرارتی محلول سازی. این حرف به دنبال نام آلیاژهای می‌آید که بعد عملیات حرارتی محلول سازی به صورت طبیعی رسوب سختی شده‌اند. عدد بعد از حرف W زمان فرآیند رسوب سختی را بیان می‌کند.

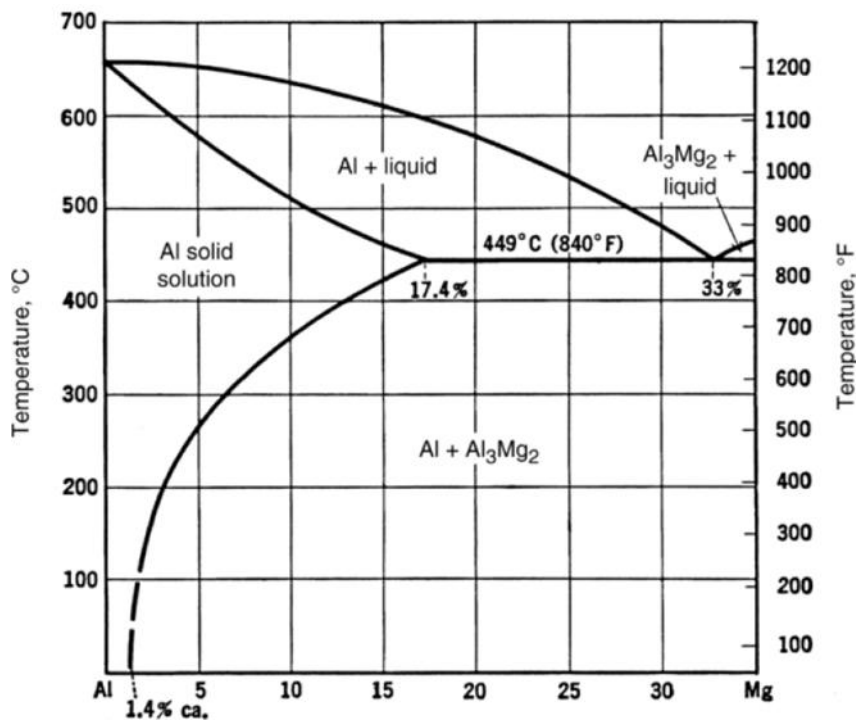
T: عملیات حرارتی. حاکی از اعمال عملیات حرارتی روی آلیاژ به منظور رسیدن به یک حالت پایدار است. اعداد بعد از این حرف مشخص کننده‌ی نوع عملیات حرارتی می‌باشند.

آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل وزن کم، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی خوب و قیمت نسبتاً پایین به طور گسترده‌ای در طراحی‌های صنعتی بکار گرفته می‌شود. علاوه بر این هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، سهولت در تولید و در دسترس بودن ویژگی‌های دیگری هستند که کاربرد آلیاژهای آلومینیوم را در صنعت بسیار افزایش داده‌اند [۲۵].

۲-۲ آلیاژهای آلومینیوم- منیزیم

سیستم دوتایی آلومینیوم- منیزیم آلیاژهای کارسختی پذیر (عملیات حرارتی ناپذیر) و استحکام بالای گروه آلیاژی ۵xxx آلومینیوم را تشکیل می‌دهند که استحکام بالای این گروه آلیاژی مدیون حضور منیزیم به عنوان اصلی‌ترین عنصر آلیاژی است. این عنصر آلیاژی خواص مکانیکی آلومینیوم را از طریق تشکیل محلول جامد به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد هرچند که کار سخت انجام شده بر روی این آلیاژها طی فرآیند تولید بر میزان استحکام نهایی آن‌ها بی‌تأثیر نیست [۲۶].

نمودار فازی Al-Mg در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. اگرچه منیزیم حلالیت قابل توجهی در آلومینیوم دارد (۱۴/۹٪ اتمی در دمای ۴۵۰ °C) و با کاهش دما میزان حلالیت آن به شدت کاهش می‌یابد اما آلیاژهای آلومینیوم- منیزیم در درصدهای کمتر از ۷٪ منیزیم به دلیل مشکل بودن جوانه‌زنی رسوب FCC ساختار Al_3Mg_2 ، رسوب سختی قابل توجهی از خود نشان نمی‌دهند. منیزیم با تشکیل محلول جامد استحکام این آلیاژها را افزایش می‌دهد و موجب کارسختی پذیری قابل توجهی می‌گردد [۲۳, ۲۷].



شکل ۲-۲. دیاگرام فازی آلومینیوم- منیزیم [۲۷].

آلیاژهای آلومینیوم- منیزیم دارای استحکام نسبتاً بالا، مقاومت به خوردگی خوب در محیط‌های دریایی، چقرمگی بالا حتی در دماهای بسیار پایین و قابلیت جوش‌پذیری خوب هستند [۱۳]. به همین دلیل این آلیاژها در صنعت خودرو سازی، صنایع هوا و فضا، صنایع دریایی و کشتیرانی، حمل‌ونقل جاده‌ای و ساخت مخازن پرفشار بسیار کاربرد دارند. شکل ۲-۳ یک کشتی تندرو و تک دیواره ساخته شده از آلومینیوم ۵۰۸۳ را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳. کشتی جنگی تک دیواره ساخته شده از آلومینیوم ۵۰۸۳ [۱۳].

آلیاژ Al5083 یکی از آلیاژهای گروه آلیاژی آلومینیوم- منیزیم است. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۲-۲ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۲-۲ آمده علاوه بر منیزیم عناصر آلیاژی دیگری نیز در مقادیر بسیار اندک در این آلیاژ وجود دارند. به عنوان مثال: عناصر آلیاژی Cr, Mn و Zr به منظور کنترل اندازه و پایداری ساختار دانه و عنصر آلیاژی Zn به منظور بهبود مقاومت به خوردگی به این آلیاژها اضافه می‌شوند علاوه بر این ناخالصی‌هایی مانند Fe و Si نیز معمولاً به صورت ذرات ترکیبات بین فلزی در این آلیاژها وجود دارند [۲۶, ۲۸].

جدول ۲-۲. ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۵۰۸۳ [۲۹].

عنصر	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti	Cu	Fe	Si	Other	Al
درصد وزنی	۴/۰-۴/۹	۰/۴-۱/۰	۰/۰۵-۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۱	۰/۴	۰/۴	۰/۱۵	باقیمانده