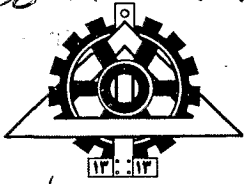


به نام خدا

۱۹۷۷

۲۲۹ ۸۷ ۳۴۴۹۶  
۸۱۰۷ ۸۴۰۲۹



۸۷/۱/۱۵۷۸۶۳  
۸۸/۱/۲۹

دانشگاه تهران  
پردیس دانشکده‌های فنی  
دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

عنوان پایان‌نامه:

ایجاد لایه‌ی سطحی نانو کامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  با استفاده

از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

۱۰۱۵۹۵

ارائه دهنده:

عزیز شفیعی زرقانی

اساتید راهنما:

دکتر سید فرشید کاشانی بزرگ

دکتر عباس زارعی هنزکی

استاد مشاور:

دکتر علی محمد هادیان

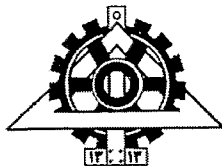
پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در

رشته‌ی مهندسی متالورژی و مواد

گرایش جوشکاری

بهمن‌ماه ۱۳۸۶

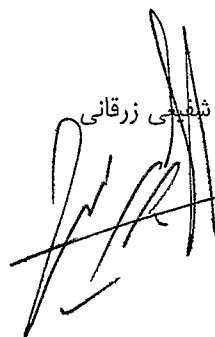
۱۰۹۳۳۲

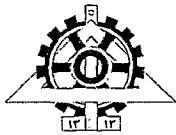


## تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب عزیز شفیعی زرقانی تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع گردیده است. ضمناً این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نشده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر نیز متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: عزیز شفیعی زرقانی

  
امضاء



به نام خدا -

دانشگاه تهران

عطای



### گواهی دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

هیات محترم داوران پایان نامه کارشناسی ارشد آقای عزیز شفیعی زرقانی به شماره دانشجویی ۸۱۰۷۸۴۰۲۹ در رشته مهندسی مواد و متالورژی گرایش جوشکاری را در تاریخ ۱۳۸۶/۱۱/۳۰ با عنوان ایجاد لایه‌ی سطحی نانو کامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

به عدد به حروف

۳۵ بیست و پنج

با نمره نهایی:

ارزیابی نمود

معالی

در درجه

ردیف	مشخصات هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا موسسه	امضاء
۱	استاد راهنما	دکتر سید فرشید کاشانی بزرگ	استادیار	دانشگاه تهران	
۲	استاد راهنمای دوم	دکتر عباس زارعی هنزکی	دانشیار	دانشگاه تهران	
۳	استاد مشاور	دکتر علی محمد هادیان	دانشیار	دانشگاه تهران	
۴	داور مدعو	دکتر حمید اسدی	دانشیار	دانشگاه تربیت مدرس	
۵	داور داخلی	دکتر سید علی اصغر اکبری موسوی	استادیار	دانشگاه تهران	
۶	نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سید علی اصغر اکبری موسوی	استادیار	دانشگاه تهران	

تذکر: این برگه پس از تکمیل توسط هیات داوران در نخستین صفحه پایان نامه درج می گردد.

تقديم به:

## خانوادهام

## چکیده

لایه‌های کامپوزیت سطحی حاوی نانوذرات آلومینا بر زیرلایه‌ی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ایجاد گردید. همچنین با بهینه نمودن متغیرهای فرآیند، حصول لایه‌های نانو کامپوزیت سطحی حاوی نانوذانه‌های زمینه و نانوذرات آلومینا مقدور گشت. اثر متغیرهای فرآیند چون سرعت دورانی، سرعت پیش‌رونده و تعداد پاس‌ها بر اندازه ذرات آلومینا و نحوه‌ی توزیع آن‌ها، اندازه دانه‌های زمینه، عیوب به‌وجود آمده (تخلخل و تاول‌زدگی) و میزان سختی لایه‌های کامپوزیت سطحی به‌توسط روش‌های میکروسکوپی نوری و الکترونی و سختی سنجی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که با کاهش نسبت سرعت دورانی به سرعت پیش‌رونده، عیوب تاول‌زدگی سطحی و با افزایش همین نسبت عیوب حفرای و تخلخل واقع در فصل مشترک لایه‌ی کامپوزیت سطحی و زیرلایه کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت سرعت دورانی به سرعت پیش‌رونده و نیز افزایش تعداد پاس‌ها، توزیع ذرات آلومینا یکنواخت‌تر شده و از تجمع ذرات کاسته شد. همچنین کاهش اندازه دانه‌های زمینه‌ی لایه‌های کامپوزیت سطحی با کاهش نسبت سرعت دورانی به سرعت پیش‌رونده و افزایش تعداد پاس‌ها مقدور گشت. میزان سختی لایه‌های کامپوزیت سطحی تا حدود سه برابر میزان سختی زیرلایه رسید. بررسی خواص سایشی لایه‌های کامپوزیت سطحی و زیرلایه آلومینیومی حاکی از مقاومت سایش برتر آن‌ها به‌واسطه‌ی حضور نانوذرات آلومینا و ریزی دانه‌های زمینه داشت.

واژه‌های کلیدی: فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، ساختار نانو، نانوکامپوزیت، مهندسی سطح، آلومینیوم، سایش.

## تشکر و قدردانی:

خدای را سپاس می‌دارم که در این گام نیز مرا همراه بوده است. ابتدا لازم است از زحمات و تلاش‌های دلسوزانه و کارای استاد بزرگوار جناب آقای دکتر سید فرشید کاشانی بزرگ که امر هدایت این پایان نامه را به عهده داشته‌اند، کمال تشکر و تقدیر را داشته و از خداوند منان برای ایشان در تمامی مراحل بهروزی و پیروزی را خواستارم. استاد دلسوز، جناب آقای دکتر عباس زارعی هنزکی، در هر زمانی هیچ راهنمایی را دریغ نداشته و با نکته‌سنجی‌های ظریف به این راستا جهت داده‌اند، لذا زحمات ایشان نیز در خور سپاس ویژه و تقدیر بسیار فراوان است. از استاد گرامی جناب آقای دکتر علی‌محمد هادیان نیز به خاطر راهنمایی‌های بی‌دریغشان سپاسگزارم.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	<b>فصل ۱ مقدمه</b>
۵	<b>فصل ۲ مروری بر منابع مطالعاتی</b>
۶	۱-۲. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (FSP).....
۸	۱-۱-۲. متغیرهای FSW/FSP.....
۹	۲-۱-۲. ریز ساختار حاصله در FSW/FSP.....
۱۴	۳-۱-۲. پدیده‌ی تبلور مجدد در فرآیند FSW/FSP.....
۱۸	۴-۱-۲. تولید آلومینیوم بسیار ریز دانه (UFG) توسط فرآیند FSW/FSP.....
۲۰	۲-۲. خواص سایشی آلومینیوم و آلیاژهای آن.....
۲۰	۱-۲-۲. فرآیندها و مکانیزم‌های سایش.....
۲۷	۲-۲-۲. نقش اصطکاک در رفتار سایشی مواد.....
۲۸	۳-۲-۲. رفتار سایشی آلومینیوم و آلیاژهای آن.....
۳۲	۳-۲. کامپوزیت‌های سطحی آلومینیوم و خواص آن‌ها.....
۳۳	۱-۳-۲. روش‌های ذوبی ایجاد لایه‌های کامپوزیت سطحی بر روی آلومینیوم.....
۳۷	۲-۳-۲. تولید کامپوزیت‌های سطحی آلومینیوم توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی.....
۴۰	<b>فصل ۳ روش تحقیق</b>
۴۱	۱-۳. آماده سازی نمونه‌ها.....
۴۳	۲-۳. طراحی و ساخت ابزار.....
۴۴	۳-۳. طراحی نحوه‌ی انجام فرآیند و متغیرهای آن.....
۴۶	۴-۳. بررسی ریزساختاری.....
۴۶	۱-۴-۳. متالوگرافی.....
۴۷	۲-۴-۳. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).....
۴۸	۵-۳. آزمایش سختی سنجی.....
۴۸	۶-۳. آزمایش‌های سایش و اصطکاک.....
۵۱	<b>فصل ۴ نتایج و بحث</b>
۵۳	۱-۴. نتایج حاصل از ثبت پیک‌های دمایی نمونه حین فرآیند.....
۵۴	۲-۴. بررسی عیوب ایجاد شده در لایه‌های کامپوزیت سطحی.....
۶۳	۳-۴. ریزساختار.....
۷۲	۱-۳-۴. نحوه‌ی توزیع ذرات تقویت کننده.....



۷۸.....	۲-۳-۴. اندازه دانه‌های زمینه‌ی آلومینیومی.....
۸۵.....	۳-۳-۴. رابطه‌ی بین پارامتر زرن- هولمن و اندازه دانه.....
۹۲.....	۴-۴. سختی.....
۱۰۴.....	۵-۴. سایش.....
۱۰۴.....	۱-۵-۴. بررسی کاهش وزن، نرخ سایش و ضریب اصطکاک در آزمایش‌های سایش.....
۱۱۱.....	۲-۵-۴. بررسی تصاویر SEM مناطق تحت سایش.....

۱۱۸

## فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۱۹.....	۱-۵. نتیجه‌گیری.....
۱۲۱.....	۲-۵. پیشنهادها.....

۱۲۲

## فصل ۶ مراجع

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱	<b>فصل ۱</b> مقدمه
۵	<b>فصل ۲</b> مروری بر منابع مطالعاتی
۱۸	جدول ۱-۲. خلاصه‌ای از ریزساختارهای بسیار ریز دانه تولید شده با فرایند FSW:FSP در آلیاژهای آلومینیوم.....
۳۸	جدول ۲-۲. تاثیر متغیرهای FSP بر تشکیل لایه کامپوزیت سطحی 5083Al-SiC (طول پین ابزار برابر با ۱ میلی‌متر و سرعت دوران آن برابر با ۳۰۰ rpm) [۱۵].....
۳۹	جدول ۳-۲. ریزسختی آلیاژهای آلومینیوم و کامپوزیت‌های سطحی Al-SiC ایجاد شده توسط فرایند FSP [۵۷].....
۴۰	<b>فصل ۳</b> روش تحقیق
۴۱	جدول ۱-۳. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲.....
۴۵	جدول ۲-۳. بازه‌ی نمونه‌زنی، نشان‌دهنده‌ی متغیرهای استفاده شده در ساخت لایه‌های کامپوزیت سطحی (علامت •) و نمونه‌های FSP شده (علامت o).....
۴۷	جدول ۳-۳. ترکیب محلول Keller اصلاح شده برای حکاکی نمونه خام [۵۸] و شرایط الکتروپالیش نمونه‌های FSP شده و لایه‌های کامپوزیتی [۵۹].....
۵۱	<b>فصل ۴</b> نتایج و بحث
۶۸	جدول ۱-۴. تصاویر مقطع عرضی لایه‌های کامپوزیت سطحی ایجاد شده در سرعت‌های دورانی و پیش‌رونده مختلف.....
۸۴	جدول ۲-۴. مقادیر اندازه دانه متوسط زمینه‌ی آلومینیومی در خصوص نمونه‌های لایه‌ی کامپوزیت سطحی ایجاد شده تحت متغیرهای مختلف فرایند.....
۹۱	جدول ۳-۴. رابطه‌ی بین اندازه دانه و پارامتر نزن- هولمن برای لایه‌های کامپوزیت سطحی و نمونه‌های FSP شده.....

صفحه	عنوان
۱	<b>فصل ۱ مقدمه</b>
۵	<b>فصل ۲ مروری بر منابع مطالعاتی</b>
۷	شکل ۱-۲. شماتیکی از فرآیند FSW [۳].
۱۰	شکل ۲-۲. سطح مقطع جوش اصطکاکی اغتشاشی در آلیاژ Al Si [۱۷].
۱۱	شکل ۳-۲. تأثیر متغیرهای فرآیند FSP بر شکل ناحیه‌ی هم‌زده پس از انجام فرآیند FSP بر آلومینیوم ریختگی A356: (a) ۳۰۰ rpm و ۵۱ mm/min (b) ۹۰۰ rpm و ۲۰۳ mm/min [۱۸].
۱۲	شکل ۴-۲. تأثیر متغیرهای FSP بر اندازه دانه‌های ناحیه‌ی هم‌زده در آلومینیوم 7075Al-T7651: (a) ۳۵۰ rpm و ۱۵۲ mm/min (b) ۴۰۰ rpm و ۱۰۲ mm/min [۱۹].
۱۳	شکل ۵-۲. ریزساختار ناحیه‌ی متأثر از عملیات ترمومکانیکی در آلیاژ FSP شده‌ی 7075Al [۱۹].
۱۷	شکل ۶-۲. شماتیک تحولات شکل‌گیری ریز ساختار در فرآیند FSW/FSP [۲۴].
۲۱	شکل ۷-۲. مؤلفه‌های تریبوسیستم که بر رفتار سایشی و اصطکاکی مواد تأثیر می‌گذارند [۳۴].
۲۲	شکل ۸-۲. مکانیزم فرآیند سایش چسبنده [۳۵].
۲۴	شکل ۹-۲. فرآیند سایش خراشان (الف) دو جسمی، (ب) سه جسمی [۳۳].
۲۹	شکل ۱۰-۲. ضریب اصطکاک در مالش مابین فلزات با آلومینا در خلا و اکسیژن [۴۹].
۳۰	شکل ۱۱-۲. میزان سایش فلزات مختلف در برابر آلومینا در دو محیط خلا و اکسیژن دار، با بار اعمالی ۹/۸ N، سرعت لغزش ۱۵۵ mm/s و مسافت لغزش ۲۵۰۰ متر [۴۹].
۳۸	شکل ۱۲-۲. تصاویر میکروسکوپ نوری از لایه‌های کامپوزیت سطحی بر آلیاژ 5083Al ایجاد شده توسط فریند FSP با سرعت چرخش ۳۰۰ rpm و سرعت پیش‌رونده: (a) ۱۰۱/۶ mm/min (b) ۲۵/۴ [۱۵].
۴۰	<b>فصل ۳ روش تحقیق</b>
۴۲	شکل ۱-۳. ابعاد هندسی ورق استفاده شده و شیار تعبیه شده در آن.
۴۲	شکل ۲-۳. مورفولوژی ذرات آلومینا.
۴۳	شکل ۳-۳. شکل هندسی ابزار.
۴۴	شکل ۴-۳. تصویر مربوط به نحوه نگه‌داشتن ورق‌ها در حین فرآیند کامپوزیت‌سازی سطحی.
۴۹	شکل ۵-۳. تصویر شماتیک دستگاه آزمایش بین روی دیسک.
۵۱	<b>فصل ۴ نتایج و بحث</b>
۵۴	شکل ۱-۴. تغییرات پیک دمایی حین فرآیند FSP در سرعت‌های دورانی و پیش‌رونده مختلف.
۵۵	شکل ۲-۴. نمایی از سطح نمونه لایه‌ی کامپوزیت سطحی ایجاد شده توسط فرآیند FSP در سرعت دورانی ۶۳۰ rpm و سرعت پیش‌رونده ۵۳۰ mm/min.
۵۶	شکل ۳-۴. نمایی از سطح نمونه‌های لایه کامپوزیتی ایجاد شده توسط فرآیند FSP در سرعت دورانی ۱۶۰۰ rpm و سرعت پیش‌رونده؛ (الف) ۵۳۰ mm/min (ب) ۱۳۵ mm/min (ج) ۳۵ mm/min.

- شکل ۴-۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع طولی نمونه‌ی لایه‌ی کامپوزیت سطحی ایجاد شده توسط FSP در سرعت دورانی ۱۶۰۰ rpm و سرعت پیش رونده ۳۵ mm/min؛ نشان‌دهنده وجود تاول در نزدیک سطح..... ۵۷
- شکل ۴-۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی نمونه لایه کامپوزیت سطحی ایجاد شده توسط FSP در سرعت دورانی ۶۳۰ rpm و سرعت پیش رونده ۵۳۰ mm/min؛ نشان‌دهنده وجود حفره در قسمت پایینی لایه. .... ۵۸
- شکل ۴-۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع طولی مرز فلز پایه و لایه کامپوزیت سطحی ایجاد شده در سرعت دورانی ۶۳۰ rpm و سرعت پیش‌رونده: الف) ۵۳۰ mm/min ب) ۳۵ mm/min ..... ۵۹
- شکل ۴-۷. وضعیت عیوب بوجود آمده در شرایط مختلف فرایند FSP و مقدار سرعت دورانی به پیش‌رونده برای هر نمونه..... ۶۱
- شکل ۴-۸. محدوده متغیرهای پهنه FSW در نیروهای عمودی متفاوت [۶۴]..... ۶۲
- شکل ۴-۹. تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع عمود بر جهت اکستروژن آلیاژ آلومینیوم اولیه..... ۶۳
- شکل ۴-۱۰. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع موازی با جهت اکستروژن آلیاژ آلومینیوم اولیه..... ۶۴
- شکل ۴-۱۱. تجزیه‌ی شیمیایی عنصری سنجش شدت انرژی طیف پرتو X (EDS) از ذرات رسوب فاز ثانویه موجود در آلیاژ آلومینیوم اولیه..... ۶۵
- شکل ۴-۱۲. مقطع لایه‌ی کامپوزیت سطحی ایجاد شده در سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm و پیش‌رونده‌ی ۳۳۰ mm/min (الف) مناطق مختلف، ب) ناحیه‌ی هم‌زده و ج) ناحیه‌ی متأثر از عملیات ترمومکانیکی..... ۶۶
- شکل ۴-۱۳. تأثیر قطر پین بر ابعاد ناحیه‌ی هم‌زده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ 2195 Al- T8 [۶۵]..... ۶۷
- شکل ۴-۱۴. نمودارهای تغییرات الف) بیشترین پهنای عمق ناحیه‌ی هم‌زده بر حسب سرعت دورانی در سرعت‌های پیش‌رونده ۱۳۵ mm/min و ۳۳۰ mm/min..... ۶۹
- شکل ۴-۱۵. تغییرات مساحت ناحیه‌ی هم‌زده بر حسب شاخص شبهه حرارت در فرایند FSP..... ۷۱
- شکل ۴-۱۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نحوه توزیع ذرات  $Al_2O_3$  در لایه‌های کامپوزیت سطحی ایجاد شده با یک پاس FSP در سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm و سرعت پیش‌رونده: الف) ۱۳۵ mm/min و ب) ۳۳۰ mm/min..... ۷۳
- شکل ۴-۱۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نحوه توزیع ذرات  $Al_2O_3$  در لایه‌های کامپوزیت سطحی ایجاد شده با یک پاس FSP در سرعت پیش‌رونده ۶۵ mm/min و سرعت دورانی: الف) rpm ۱۰۰۰ و ب) rpm ۱۶۰۰..... ۷۴
- شکل ۴-۱۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نحوه توزیع ذرات  $Al_2O_3$  در لایه‌های کامپوزیت سطحی ایجاد شده در سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm و پیش‌رونده ۱۳۵ mm/min با: الف) یک پاس FSP، ب) دو پاس FSP و ج) سه پاس FSP..... ۷۷
- شکل ۴-۱۹. تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع عرضی نمونه‌ی لایه‌ی کامپوزیت سطحی ایجاد شده با چهار پاس FSP در سرعت دورانی ۱۶۰۰ rpm و سرعت پیش‌رونده ۱۳۵ mm/min، دو ذره آلومینا با فلش مشخص شده‌اند..... ۷۸
- شکل ۴-۲۰. تغییرات اندازه دانه بر حسب سرعت دورانی در سرعت‌های پیش‌رونده مختلف برای نمونه‌های لایه‌ی کامپوزیت سطحی ایجاد شده با یک پاس FSP..... ۸۰
- شکل ۴-۲۱. تغییرات اندازه دانه بر حسب سرعت دورانی در سرعت‌های پیش‌رونده مختلف برای نمونه‌های فاقد ذرات آلومینا) تحت یک پاس FSP..... ۸۰

- شکل ۴-۲۲. مقادیر اندازه دانه‌های زمینه‌ی آلومینیومی برای نمونه‌های لایه‌ی کامپوزیت سطحی و نمونه‌های FSP شده (فاقد ذرات آلومینا) در سرعت دورانی ۶۳۰ rpm و سرعت پیش‌رونده ۵۳۰ mm/min بر حسب تعداد پاس‌های مختلف. ۸۱.....
- شکل ۴-۲۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی بالا نشان دهنده دانه‌های با ابعاد نانومتری از نمونه‌های لایه‌ی کامپوزیت سطحی ایجاد شده در سرعت دورانی ۶۳۰ rpm و سرعت پیش‌رونده ۵۳۰ mm/min (سه پاس و ب) چهار پاس. ۸۵.....
- شکل ۴-۲۴. تغییرات نرخ کرنش بر حسب سرعت دورانی ابزار در سرعت‌های پیش‌رونده مختلف. ۸۷.....
- شکل ۴-۲۵. مقادیر پارامتر زنر- هولمن بر حسب سرعت دورانی و سرعت پیش‌رونده. ۸۹.....
- شکل ۴-۲۶. ارتباط اندازه دانه و پارامتر زنر- هولمن در تعداد پاس‌های مختلف برای: الف) لایه‌های کامپوزیت سطحی و ب) نمونه‌های FSP شده. ۹۰.....
- شکل ۴-۲۷. پروفیل سختی از مقطع عرضی نمونه‌ی یک پاس FSP شده در سرعت دورانی ۱۶۰۰ rpm و سرعت پیش‌رونده ۵۳۰ mm/min. ۹۳.....
- شکل ۴-۲۸. پروفیل سختی از مقطع عرضی نمونه‌های یک پاس FSP شده در سرعت پیش‌رونده ۳۵ mm/min و سرعت‌های دورانی: الف) ۶۳۰ rpm (ب) ۱۰۰۰ rpm (ج) ۱۶۰۰ rpm. ۹۴.....
- شکل ۴-۲۹. پروفیل سختی از مقطع عرضی نمونه‌های یک پاس FSP شده در سرعت دورانی ۱۶۰۰ rpm و سرعت‌های پیش‌رونده ۳۵ mm/min و ۵۳۰ mm/min. ۹۶.....
- شکل ۴-۳۰. پروفیل سختی از مقطع عرضی لایه‌های کامپوزیت سطحی ایجاد شده با یک پاس FSP در سرعت پیش‌رونده ۱۳۵ mm/min و سرعت‌های دورانی: الف) ۶۳۰ rpm (ب) ۱۰۰۰ rpm (ج) ۱۶۰۰ rpm. ۹۷.....
- شکل ۴-۳۱. پروفیل سختی از مقطع عرضی لایه‌های کامپوزیت سطحی ایجاد شده با یک پاس FSP در سرعت دورانی ۱۶۰۰ rpm و سرعت‌های پیش‌رونده ۳۵ mm/min و ۱۳۵ mm/min. ۹۹.....
- شکل ۴-۳۲. تغییرات میانگین سختی لایه‌های کامپوزیت سطحی ایجاد شده در سرعت پیش‌رونده ۳۵ mm/min بعد از تعداد پاس‌های مختلف. ۱۰۱.....
- شکل ۴-۳۳. تغییرات میانگین سختی لایه‌های کامپوزیت سطحی ایجاد شده در سرعت دورانی ۶۳۰ rpm بعد از تعداد پاس‌های مختلف. ۱۰۱.....
- شکل ۴-۳۴. تغییرات کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش تحت نیروی اعمالی ۴۰ نیوتن برای نمونه خام و لایه‌ی کامپوزیت سطحی. ۱۰۵.....
- شکل ۴-۳۵. تغییرات الف) کاهش وزن، ب) نرخ سایش و ج) ضریب اصطکاک در سایش لایه‌ی کامپوزیت سطحی. ۱۰۷.....
- شکل ۴-۳۶. تغییرات الف) کاهش وزن، ب) نرخ سایش و ج) ضریب اصطکاک در سایش نمونه خام. ۱۰۸.....
- شکل ۴-۳۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌ی خام تحت نیروی ۴۰ نیوتن. ۱۱۲.....
- شکل ۴-۳۸. آنالیز EDS از الف) مناطق روشن و ب) مناطق تیره در شکل ۴-۳۷-ج. ۱۱۳.....
- شکل ۴-۳۹. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش لایه‌ی کامپوزیت سطحی تحت نیروی ۴۰ نیوتن. ۱۱۴.....
- شکل ۴-۴۰. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌ی خام تحت نیروی ۲۰ نیوتن. ۱۱۵.....
- شکل ۴-۴۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش لایه‌ی کامپوزیت سطحی تحت نیروی ۲۰ نیوتن. ۱۱۵.....
- شکل ۴-۴۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌ی خام تحت نیروی ۶۰ نیوتن. ۱۱۷.....
- شکل ۴-۴۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش لایه‌ی کامپوزیت سطحی تحت نیروی ۶۰ نیوتن. ۱۱۷.....

# فصل ۱

## مقدمه

یکی از جدیدترین و پرکاربردترین روش‌های اتصال حالت جامد، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> (FSW) می باشد که در اواخر سال ۱۹۹۱ توسط مؤسسه‌ی جوشکاری انگلستان<sup>۲</sup> (TWI) ابداع شد و هم‌اکنون به‌طور قابل توجهی برای اتصال اغلب فلزات، به‌خصوص آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با پیشرفت و گسترش کاربرد این روش در اتصال آلیاژهای آلومینیوم در صنایع هوافضا و حمل‌ونقل، امروزه تحقیقات محققین در زمینه‌ی استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی<sup>۳</sup> (FSP) در جهت ریز کردن اندازه دانه‌ها در آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم ریختگی و کار شده از طریق مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی متمرکز شده و تاکنون با استفاده از این فرآیند دانه‌هایی با اندازه‌ی ۳۰ تا ۱۸۰ نانومتر حاصل شده است.

---

1- Friction Stir Welding  
2- The Welding Institute  
3- Friction Stir Processing

کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات سرامیکی در مقایسه با آلیاژهای تقویت نشده، دارای استحکام زیاد، مدول یانگ بالا و مقاومت به سایش، خزش و خستگی خوب می‌باشند که باعث افزایش روزافزون کاربردشان در صنایع حمل‌ونقل و هوافضا گردیده است. آلومینیوم تقویت شده با ذرات  $Al_2O_3$  یکی از این کامپوزیت‌هاست که به خاطر دارا بودن خواص بی‌نظیر و استحکام ویژه‌ی بالا کاربرد فراوانی در این صنایع دارد.

از طرفی تقویت فلزات با ذرات سخت سرامیکی سبب افت چقرمگی و خاصیت چکش‌خواری آن‌ها می‌گردد، که همین امر باعث کاهش کاربردشان در برخی از زمینه‌های خاص گردیده است. در بسیاری از شرایط کاری، عمر مفید قطعات وابسته به خواص سطحی آن‌ها، از جمله مقاومت در برابر سایش می‌باشد. در این گونه از موارد شایسته است که تنها لایه‌ای از سطح قطعه با ذرات سرامیکی سخت تقویت شده و ترکیب و ساختار اولیه‌ی حجم درونی قطعه ثابت بماند.

در سال‌های اخیر تکنیک‌های متعددی نظیر تابش پرتو لیزر، تابش پرتو الکترون پرتو پرتو و پلاسما اسپری به منظور ساخت لایه‌های کامپوزیت سطحی زمینه فلزی گسترش و بهبود یافته‌اند. نکته قابل ذکر در مورد کامپوزیت‌سازی توسط روش‌های ذوبی این است که، از آنجایی که این فرآیندها در دمای بسیار بالا و در فاز مایع انجام می‌شوند، در طی انجام این فرآیندها، واکنش‌هایی انجام می‌گیرد که منجر به تشکیل فازهای ترد و شکننده می‌گردد. نکته‌ی دیگر این‌که، حصول ریزساختار منجمد شده‌ی مطلوب، مستلزم انتخاب دقیق و کنترل شدید پارامترها می‌باشد. علاوه بر این موارد، محدودیت دیگری در این روش‌ها وجود دارد و آن، اندازه ذرات تقویت کننده می‌باشد. توضیح بیش‌تر این‌که در صورت وجود فاز مایع لازم است که ذرات تقویت کننده توسط فاز مایع تر شوند و هر چه اندازه‌ی این ذرات ریزتر باشد، ترشوندگی نیز مشکل‌تر خواهد بود. این در حالی است که یکی از عوامل مؤثر بر استحکام و سختی کامپوزیت‌ها، اندازه ذرات تقویت کننده می‌باشد، به نحوی که هرچه این ذرات کوچک‌تر باشند سختی و استحکام کامپوزیت بیش‌تر می‌باشد. بنابراین اگر بتوان فرآیند ایجاد لایه‌ی کامپوزیت سطحی را در دمای پایین و در فاز جامد انجام داد می‌توان بر مشکلات



فوق فائق آمد.

در این پایان‌نامه لایه‌های کامپوزیت سطحی بر مبنای ذرات نانومتری  $Al_2O_3$  با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) بر زیر لایه‌ی آلومینیوم با موفقیت ایجاد گردید. پس از آن تاثیر متغیرهای مختلف فرآیند، شامل سرعت دورانی و پیش‌رونده‌ی ابزار و همچنین تعداد پاس‌های فرآیند بر خواص لایه‌های کامپوزیت سطحی حاصل بررسی شد. به‌منظور بررسی خواص لایه‌های کامپوزیت سطحی، ریزساختارهای به‌وجود آمده با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (SEM) مطالعه شد و آزمایش‌های سختی سنجی و سایش نیز بر نمونه‌ها صورت گرفت. همچنین جهت بررسی تاثیر نانو ذرات  $Al_2O_3$  بر خواص لایه‌های کامپوزیت سطحی، نمونه‌های FSP شده بدون حضور ذرات  $Al_2O_3$  نیز مورد بررسی قرار گرفته و با لایه‌های کامپوزیت سطحی مقایسه شدند.

## فصل ۲

مروری بر منابع مطالعاتی

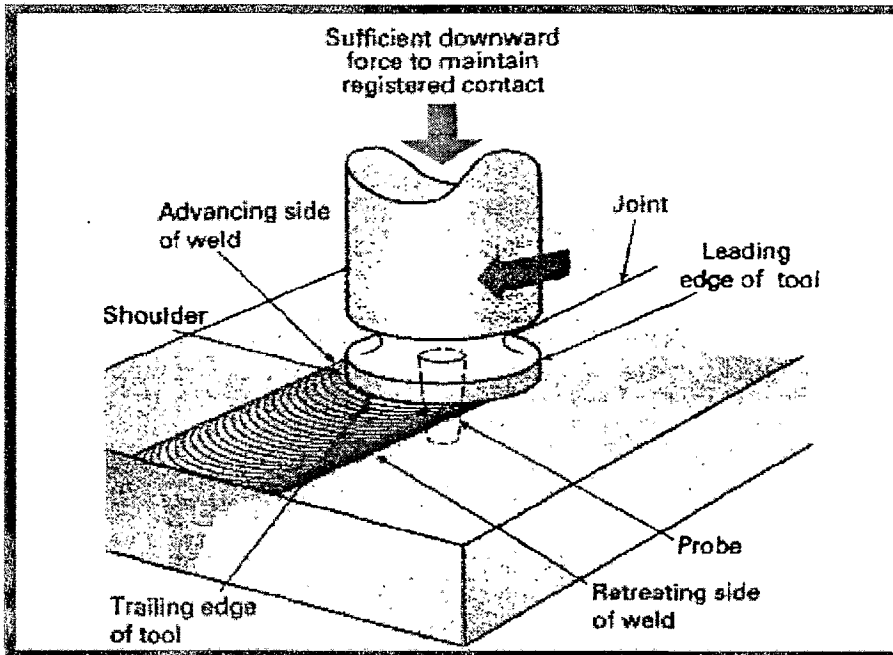
## ۱-۲. فرایند اصطکاکی اغتشاشی (FSP)

مشکلات ایجاد جوش‌هایی با استحکام، مقاومت خستگی و شکست بالا در آلیاژهای آلومینیوم به کار رفته در صنایع هوافضا به خصوص آلومینیوم‌های پر آلیاژ سری 2XXX و 7XXX، استفاده وسیع از جوشکاری برای برقراری اتصالات در سازه‌های موجود در این صنعت را بسیار محدود کرده است. از این رو و برای چیرگی بر مشکلات ناشی از جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیوم، فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که اختصاراً به آن FSW گفته می‌شود در سال ۱۹۹۱ میلادی توسط موسسه TWI انگلستان ابداع گردید [۲۱].

روش اجرای FSW به‌طور قابل ملاحظه‌ای ساده می‌باشد. یک ابزار غیر مصرفی دوآر با شکل و طراحی مخصوص که شامل پین و شانه می‌باشد در حالی که با سرعت زیادی می‌چرخد، وارد درز اتصال شده و در طول درز حرکت می‌کند (شکل ۱-۲). ابزار دو نقش اساسی را ایفا می‌کند:

۱. گرم کردن قطعه کار

۲. حرکت مواد به‌منظور ایجاد اتصال



شکل ۲-۱. شماتیکی از فرآیند FSW [۳].

گرمای ایجاد شده در قطعه ناشی از اصطکاک بین ابزار و قطعه و همچنین تغییر شکل پلاستیک شدید در قطعه کار می‌باشد. گرمای موضعی باعث نرم شدن مواد در اطراف پین شده و ترکیب حرکت چرخشی و روبه جلو ابزار سبب انتقال مواد از قسمت جلو پین به قسمت پشت آن گشته و بنابراین اتصال در حالت جامد<sup>۱</sup> برقرار می‌شود.

اخیراً فرآیند اصطکاکی اغتشاشی یا FSP بر اساس اصول پایه‌ای FSW و به‌عنوان یک ابزار عمومی برای انجام اصلاحات ریزساختاری توسط Mishra و همکارانش [۴] ابداع گردید. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) همانند فرآیند FSW انجام می‌شود، فقط با این تفاوت که ابزار چرخان در یک قطعه بدون درز وارد شده و اتصالی برقرار نمی‌گردد. در اینجا ابزار در طول ناحیه مورد نظر

1- Solid State