



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

ساخت کامپوزیت سطحی هیبریدی $Al7075/SiC_p/MoS_2$ با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی و ارزیابی ریزساختار و رفتار تریبولوژیکی آن

پایان نامه کارشناسی ارشد جوشکاری

فرهاد هراتی

اساتید راهنما
دکتر مرتضی شمعیان
دکتر مسعود عطاپور



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش جوشکاری آقای فرهاد هراتی
تحت عنوان

**ساخت کامپوزیت سطحی هیبریدی $Al7075/SiC_p/MoS_2$ با استفاده از فرایند اصطکاکی
اغتشاشی و ارزیابی ریزساختار و رفتار تریبولوژیکی آن**

در تاریخ ۱۳۹۲/۰۶/۲۳ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر مرتضی شمعیان

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر مسعود عطاپور

۲- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر محمد رضا طرقی نژاد

۳- استاد داور

دکتر حمیدرضا سلیمی جزی

۴- استاد داور

دکتر کیوان رئیسی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این
پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به پدر و مادر

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیایم و از ریشه آن ها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگاران که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند...

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
یازده	فهرست اشکال
چهارده	فهرست جداول
۱	چکیده
۲	فصل اول: مقدمه
۵	فصل دوم: مروری بر مطالب
۵	۱-۲ آلومینیوم و آلیاژهای آن
۷	۲-۲ آلیاژهای گروه ۷۰۰۰
۷	۳-۲ فرآیند اصطکاکی اغتشاشی
۷	۱-۳-۲ اساس فرایند اصطکاکی اغتشاشی
۷	۲-۳-۲ پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی
۹	۴-۲ تحولات ساختاری ناشی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی
۹	۱-۴-۲ منطقه اغتشاشی
۱۱	۲-۴-۲ منطقه متاثر از فرایند ترمومکانیکی
۱۱	۳-۴-۲ منطقه متاثر از حرارت
۱۲	۵-۲ تحقیقات انجام شده در زمینه فرایند اصطکاکی اغتشاشی
۱۲	۱-۵-۲ ایجاد ساختارهای ریز دانه
۱۶	۲-۵-۲ اصلاح ساختارهای ریختگی
۱۸	۳-۵-۲ ساخت کامپوزیت‌های سطحی و بالک
۲۵	۶-۲ ساخت کامپوزیت‌های سطحی هیبریدی با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی
۲۸	۷-۲ رفتار تریبولژیکی کامپوزیت‌های سطحی

۳۸	۸-۲ جمع‌بندی مرور مطالعاتی و هدف تحقیق حاضر
۳۹	فصل سوم: مواد و روش تحقیق
۳۹	۱-۳ مقدمه
۳۹	۲-۳ مواد اولیه مورد استفاده
۴۰	۳-۳ تجهیزات مربوط به فرایند اصطکاکی اغتشاشی
۴۱	۴-۳ روند نمای انجام تحقیق
۴۲	۵-۳ طراحی آزمایش و بهینه سازی به روش تاگوچی
۴۴	۶-۳ انجام مدل سازی فرایند با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی
۴۶	۷-۳ ساختار شبکه عصبی و روش آموزش
۴۷	۸-۳ بررسی ریزساختاری
۴۸	۹-۳ ارزیابی ریزسختی
۴۸	۱۰-۳ روش محاسبه خطای استاندارد میانگین
۴۸	۱۱-۳ ارزیابی رفتار سایشی
۴۹	فصل چهارم: نتایج و بحث
۴۹	۱-۴ مقدمه
۴۹	۲-۴ بهینه سازی پارامترهای فرایند
۵۲	۳-۴ انجام مدل سازی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی
۵۲	۱-۳-۴ مدل سازی داده‌های آزمایشگاهی
۵۲	۲-۳-۴ کارایی مدل
۵۳	۳-۳-۴ رسم منحنی‌های رویه و کانتور
۵۷	۴-۴ بررسی تاثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی روی آلیاژ پایه
۵۷	۱-۴-۴ تاثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار
۶۲	۲-۴-۴ تاثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر سختی و رفتار تریبولوژیکی

۶۴	۵-۴ بررسی تاثیر تعداد پاس در تولید کامپوزیت سطحی
۶۴	۱-۵-۴ بررسی تاثیر تعداد پاس بر توزیع ذرات تقویت کننده
۶۸	۲-۵-۴ بررسی تاثیر تعداد پاس بر سختی و رفتار تریبولوژیکی
۷۲	۶-۴ تولید کامپوزیت سطحی هیبریدی با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی
۷۳	۱-۶-۴ ارزیابی ریزساختار و سختی
۷۴	۲-۶-۴ ارزیابی رفتار تریبولوژیکی
۷۸	فصل پنجم: نتیجه گیری
۸۰	پیشنادهایی برای ادامه این تحقیق
۸۱	مراجع
۸۶	پیوست ۱- طراحی آزمایش و بهینه سازی به روش تاگوچی
۹۶	پیوست ۲- شبکه های عصبی مصنوعی

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ سازه بال هواپیما ۶
- شکل ۲-۲ طبقه بندی آلیاژهای آلومینیوم کار شده ۶
- شکل ۳-۲ شمایی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی ۸
- شکل ۴-۲ شمایی از ابزار مورد استفاده در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با هندسه متفاوت ۸
- شکل ۵-۲ ریزساختار مناطق مختلف AL7075-T651 پس از فرایند اصطکاکی اغتشاشی ۹
- شکل ۶-۲ تصویر TEM از منطقه اغتشاشی ۱۱
- شکل ۷-۲ الگوی XRD از فلز پایه و منطقه اغتشاشی ۱۳
- شکل ۸-۲ تصویر میکروسکوپ نوری از منطقه اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ ۱۳
- شکل ۹-۲ منطقه متاثر از فرایند ترمومکانیکی در مقطع عرضی نمونه فرایند شده ۱۴
- شکل ۱۰-۲ پروفیل ریزسختی تعیین شده در مقطع عرضی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ ۱۴
- شکل ۱۱-۲ تاثیر تعداد پاس ها بر (الف) کسر سطحی ذرات نسبت به زمینه و (ب) قطر متوسط ذرات ۱۵
- شکل ۱۲-۲ تاثیر سرعت چرخش ابزار بر میانگین اندازه دانه در منطقه اغتشاشی ۱۵
- شکل ۱۳-۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار آلیاژ ریختگی ۱۶
- شکل ۱۴-۲ تغییر سختی برینل برای نمونه های A356 ریختگی و فرایند شده ۱۷
- شکل ۱۵-۲ (الف) و (ب) نمونه ای از ماکرو ساختار ایجاد شده در سرعت پیشروی ۲۰ MM/MIN ۱۸
- شکل ۱۶-۲ تصویر میکروسکوپ نوری نشان دهنده اتصال ضعیف کامپوزیت سطحی و زیر لایه ۱۹
- شکل ۱۷-۲ تصویر میکروسکوپ نوری نشان دهنده توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه ۲۰
- شکل ۱۸-۲ روش فرایند: ایجاد شیار و اعمال ذرات تقویت کننده ۲۱
- شکل ۱۹-۲ پروفیل سختی مربوط به آلیاژ پایه AZ61 ۲۱
- شکل ۲۰-۲ تصاویر SEM مربوط به (الف) پاس اول، (ب) پاس سوم و (ج) پاس چهارم ۲۲
- شکل ۲۱-۲ تغییر ریزسختی مربوط به آلیاژ آلومینیوم فرایند شده و لایه کامپوزیتی سطحی ۲۳
- شکل ۲۲-۲ تغییر سختی کامپوزیت سطحی پس از (الف) دو، (ب) سه و (ج) چهار پاس فرایند اصطکاکی اغتشاشی ۲۴
- شکل ۲۳-۲ تغییر سختی کامپوزیت های سطحی با سرعت چرخش ابزار ۲۵
- شکل ۲۴-۲ تصاویر SEM از ذرات Al_2O_3 و SIC موجود در منطقه اغتشاشی ۲۶
- شکل ۲۵-۲ الگوی XRD منطقه اغتشاشی پس از سه پاس ۲۷
- شکل ۲۶-۲ تصویر SEM از توزیع ذرات در کامپوزیت هیبریدی $A356/SIC_p/MOS_2$ ۲۸
- شکل ۲۷-۲ تغییر سختی برینل در آلیاژ ریختگی، نمونه فرایند شده و نمونه های کامپوزیتی ۲۸
- شکل ۲۸-۲ کاهش وزن پین بر حسب مسافت لغزش برای آلیاژ پایه و لایه کامپوزیت سطحی ۲۹
- شکل ۲۹-۲ تغییر ضریب اصطکاک با مسافت لغزش برای آلیاژ ۶۰۸۲ و لایه کامپوزیت سطحی ۳۰
- شکل ۳۰-۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش ۳۰
- شکل ۳۱-۲ تغییر نرخ سایش کامپوزیت های سطحی با سرعت چرخش ابزار ۳۱
- شکل ۳۲-۲ تصاویر SEM از سطوح سایش ۳۲
- شکل ۳۳-۲ تاثیر مقدار Al_2O_3 بر میانگین سختی منطقه اغتشاشی در مقطع عرضی ۳۳
- شکل ۳۴-۲ تصاویر SEM از سطح سایش پس از ۱۰۰۰ S لغزش در بار اعمالی ۵ N ۳۳
- شکل ۳۵-۲ تغییر کاهش وزن با مسافت لغزش برای A356 ریختگی، نمونه فرایند شده و نمونه های کامپوزیتی ۳۴
- شکل ۳۶-۲ تغییرات ضریب اصطکاک با مسافت لغزش برای آلیاژ A356، نمونه فرایند شده و نمونه های کامپوزیتی ۳۵
- شکل ۳۷-۲ تصویر SEM از مسیر سایش A356 ریختگی ۳۵

- شکل ۲-۳۸ تصویر SEM از مسیر سایش نمونه فرایند شده ۳۶
- شکل ۲-۳۹ تصویر SEM از (الف) مسیر سایش و (ب) سطح زیرین کامپوزیت A356/SiCP ۳۶
- شکل ۲-۴۰ تصویر SEM از (الف) مسیر سایش و (ب) سطح زیرین کامپوزیت A356/SiCP/MOS₂ ۳۷
- شکل ۲-۴۱ شیب‌های ریزسختی در مناطق زیر سطح نمونه‌های کامپوزیتی ۳۸
- شکل ۳-۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات تقویت کننده (الف) SiC و (ب) MOS₂ ۴۰
- شکل ۳-۲ شمایی از دستگاه فرز مورد استفاده ۴۰
- شکل ۳-۳ شمایی از ابزار مورد استفاده در فرایند اصطکاکی اغتشاشی ۴۱
- شکل ۳-۴ مراحل مختلف انجام تحقیق ۴۲
- شکل ۳-۵ مدل ریاضی یک نرون تک ورودی ۴۵
- شکل ۳-۶ شمایی از شبکه عصبی تک لایه ۴۵
- شکل ۳-۷ شمایی از شبکه عصبی ۳ لایه ۴۶
- شکل ۳-۸ نمودار نقطه‌ای MSE بر حسب تعداد نرون ۴۷
- شکل ۳-۹ ساختار شبکه عصبی ۴۷
- شکل ۳-۱۰ شمایی از دستگاه سایش مورد استفاده ۴۸
- شکل ۴-۱ شمایی از کامپوزیت‌های تولید شده با استفاده از ابزارهای به قطر شانه (الف) ۱۲ MM و (ب) ۱۵ MM ۵۰
- شکل ۴-۲ مقادیر میانگین نسبت S/N برای فاکتورهای مختلف در سطوح متفاوت ۵۱
- شکل ۴-۳ منحنی‌های رویه و کانتر مربوط به داده‌های حاصل از مدل در سه زاویه انحراف متفاوت ۵۴
- شکل ۴-۴ موقعیت ابزار با زاویه انحراف θ نسبت به قطعه کار ۵۶
- شکل ۴-۵ تصویر ماکرو از مقطع عرضی نمونه فرایند شده ۵۸
- شکل ۴-۶ تصویر میکروسکوپ نوری مربوط به فصل مشترک منطقه اغتشاشی ۵۸
- شکل ۴-۷ تصویر میکروسکوپ نوری مربوط به نواحی مختلف ۵۹
- شکل ۴-۸ نتایج مربوط به تعیین اندازه دانه در منطقه اغتشاشی برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پس از فرایند اصطکاکی ۶۰
- شکل ۴-۹ نتایج مربوط به تعیین نسبت طول به عرض دانه‌ها برای مناطق مختلف نمونه فرایند شده ۶۰
- شکل ۴-۱۰ پروفیل سختی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ فرایند شده در مقطع عرضی ۶۲
- شکل ۴-۱۱ منحنی‌های کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش برای فلز پایه و نمونه فرایند شده ۶۳
- شکل ۴-۱۲ تصاویر SEM مربوط به سطح سایش فلز پایه ((الف)) و ((ب)) و نمونه فرایند شده ((ج)) و ((د)) ۶۳
- شکل ۴-۱۳ تصاویر SEM مربوط به ذرات سایش فلز پایه ((الف)) و نمونه فرایند شده ((ب)) ۶۴
- شکل ۴-۱۴ تصویر SEM مربوط به توزیع ذرات تقویت کننده در مقطع عرضی کامپوزیت‌های سطحی ۶۵
- شکل ۴-۱۵ توزیع ذرات تقویت کننده سرامیکی در سطح کامپوزیت AL7075/SiC_p ۶۶
- شکل ۴-۱۶ کسر سطحی ذرات تقویت کننده در کامپوزیت AL7075/SiC_p ۶۷
- شکل ۴-۱۷ پروفیل سختی در مقطع عرضی نمونه‌های کامپوزیتی AL7075/SiC_p ۶۸
- شکل ۴-۱۸ نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش برای نمونه‌های کامپوزیتی AL7075/SiC_p ۶۹
- شکل ۴-۱۹ تصویر SEM مربوط به سطح سایش نمونه‌های کامپوزیتی ۷۰
- شکل ۴-۲۰ تصویر SEM مربوط به ذرات سایش کامپوزیت‌های تولید شده ۷۲
- شکل ۴-۲۱ تصویر ماکرو از کامپوزیت سطحی هیبریدی تولید شده با استفاده از پارامترهای بهینه ۷۳
- شکل ۴-۲۲ تصویر SEM از توزیع ذرات تقویت کننده SiC و MOS₂ در کامپوزیت سطحی هیبریدی ۷۳
- شکل ۴-۲۳ منحنی پروفیل سختی مربوط به کامپوزیت سطحی هیبریدی AL7075/SiC_p/MOS₂ ۷۴
- شکل ۴-۲۴ منحنی کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش برای کامپوزیتی سطحی AL7075/SiC_p ۷۵

- شکل ۲۵-۴ تصویر SEM مربوط به سطوح سایش کامپوزیت سطحی ۷۵
- شکل ۲۶-۴ آنالیز EDS مربوط به سطح سایش کامپوزیت سطحی AL7075/SiC_p ۷۶
- شکل ۲۷-۴ آنالیز EDS مربوط به سطح سایش کامپوزیت سطحی هیبریدی AL7075/SiC_p/MOS₂ ۷۷

فهرست جداول

جدول ۱-۳ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵.....	۳۹
جدول ۲-۳ مشخصات دستگاه فرز مورد استفاده.....	۴۱
جدول ۳-۳ آرایه استاندارد I مورد استفاده برای طراحی آزمایش.....	۴۴
جدول ۱-۴ مقادیر خروجی و نسبت S/N برای آزمایش های انجام شده.....	۵۱
جدول ۲-۴ مقایسه سختی حاصل از مدل و سختی واقعی.....	۵۲
جدول ۳-۴ مقایسه درصد کاهش وزن حاصل از مدل و درصد کاهش وزن واقعی.....	۵۲
جدول ۴-۴ نتایج مربوط به ارزیابی مدل.....	۵۳
جدول ۵-۴ بررسی کارایی مدل برای کل نتایج به دست آمده.....	۵۳

چکیده

در این پژوهش با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی به تولید کامپوزیت سطحی هیبریدی با ذرات تقویت کننده SiC و MoS_2 بر زیر لایه آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخته شد. برای این منظور ابتدا با استفاده از طراحی آزمایش و بهینه سازی به روش تاگوشی به تعیین پارامتر بهینه برای تولید کامپوزیت سطحی Al7075/SiC_p پرداخته شد. پارامتر بهینه برای تولید کامپوزیت سطحی در شرایط سرعت چرخشی 1600 rpm ، سرعت پیشروی 25 mm/min و زاویه انحراف 3° تعیین شد. بر اساس شرایط بهینه تعیین شده تاثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار، سختی و رفتار تریبولوژیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در حالت بدون استفاده از ذرات تقویت کننده مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی های ریزساختاری نشان داد که انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی روی آلیاژ پایه سبب کاهش قابل ملاحظه در اندازه دانه منطقه اغتشاشی می شود و اندازه دانه از حدود $200 \mu\text{m}$ مربوط به فلز پایه به حدود $4 \mu\text{m}$ در منطقه اغتشاشی کاهش می یابد. همچنین ارزیابی رفتار سایشی بهبود خواص تریبولوژیکی در نمونه فرایند شده را نسبت به فلز پایه نشان داد. در ادامه تاثیر تعداد پاس روی توزیع ذرات تقویت کننده، سختی و رفتار سایشی کامپوزیت سطحی Al7075/SiC_p مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با انجام دو پاس فرایند اصطکاکی اغتشاشی به همراه تغییر در جهت چرخش ابزار توزیع یکنواختی از ذرات تقویت کننده در زمینه حاصل می شود. همچنین با افزایش تعداد پاس میزان سختی افزایش یافت و بهترین مقاومت سایشی در مورد کامپوزیت تولید شده پس از دو پاس فرایند به همراه تغییر در جهت چرخش ابزار حاصل شد. حضور ذرات SiC با سختی بسیار بالا در زمینه محدودیت هایی ایجاد می کند که از جمله آن ها می توان به افزایش نرخ سایش سطح مقابل و همچنین تمایل این ذرات به جدا شدن از زمینه اشاره کرد که به عنوان یک جسم ساینده بین پین و سطح قطعه عمل می کنند. لذا لزوم استفاده از ذرات روان کار جامد به منظور رفع این نقیصه و بهبود رفتار تریبولوژیکی حایز اهمیت است. بر این اساس با استفاده از شرایط بهینه و دو پاس فرایند اصطکاکی اغتشاشی به تولید کامپوزیت سطحی هیبریدی با درصد حجمی یکسان از ذرات تقویت کننده SiC و MoS_2 پرداخته شد. ارزیابی سختی کامپوزیت سطحی هیبریدی بهبود سختی در منطقه اغتشاشی را نسبت به فلز پایه نشان داد و در مقایسه با کامپوزیت سطحی Al7075/SiC_p مقدار سختی کمی کاهش یافت. ارزیابی سطح سایش کامپوزیت هیبریدی $\text{Al7075/SiC}_p/\text{MoS}_2$ نشان داد که به دلیل حضور ذرات تقویت کننده MoS_2 به عنوان روان کار ج تشکیل لایه مکانیکی مختلط پایدار روی سطح مقاومت سایشی به طور قابل ملاحظه ای بهبود می یابد.

کلمات کلیدی: کامپوزیت سطحی هیبریدی، آلومینیوم ۷۰۷۵، فرایند اصطکاکی اغتشاشی، ریزساختار، رفتار تریبولوژیکی.

فصل اول

مقدمه

انتخاب ماده مناسب با خواص مطلوب در بسیاری از کاربردهای صنعتی حایز اهمیت است. به طور معمول انتخاب ماده بر اساس خواصی چون استحکام بالا، چقرمگی مناسب، وزن کم و در برخی موارد مقاومت به سایش صورت می‌گیرد. آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل چگالی کم و نسبت استحکام به وزن بالا به طور گسترده در صنایع هوا-فضا و خودروسازی استفاده می‌شوند. برای بسیاری از کاربردها عمر مفید قطعات اغلب وابسته به خواص سطحی آن‌ها است. با وجود این مقاومت کم این آلیاژها در برابر سایش باعث ایجاد محدودیت در استفاده از آن‌ها شده است.

کامپوزیت‌های زمینه فلزی گروه جدیدی از مواد هستند که دارای مقاومت سایشی مطلوب، سختی و سفتی بالاتر و چگالی کم‌تر نسبت به زمینه هستند. با وجود این حضور ذرات سرامیکی در زمینه فلزی سبب ترد شدن زمینه می‌شود. با توجه به آن که رفتار تریبولوژیکی به خواص سطحی قطعه وابسته است لذا با اصلاح ریزساختار و یا ترکیب در سطح می‌توان مقاومت در برابر سایش را بهبود بخشید. به عنوان نمونه اگر ذرات سرامیکی به جای افزوده شدن به بالک به سطح قطعه افزوده شوند در این صورت بدون افت خواص بالک ماده، مقاومت در برابر سایش می‌تواند بهبود یابد.

کامپوزیت‌های سطحی زمینه فلزی¹ (SMC) ترکیبی از خواص تریبولوژیکی مطلوب سطح و چقرمگی مطلوب فلز پایه را در مقایسه با کامپوزیت‌های زمینه فلزی² (MMC) و نیز مواد یک‌پارچه³ دارا هستند. انتخاب تقویت کننده یکی از فاکتورهای مهم و موثر در خواص کامپوزیت سطحی زمینه فلزی است. کاربید سیلیسیم (SiC) و آلومینا (Al_2O_3) دو نوع از ذرات تقویت کننده‌ای هستند که به سبب سختی بیشتر، چگالی و هزینه کم‌تر نسبت به

¹ Surface metal matrix composites

² Metal matrix composites

³ Monolithic materials

سایر ذرات تقویت کننده به طور قابل ملاحظه مورد توجه محققان قرار داشته‌اند. بررسی‌های انجام شده توسط محققان نشان داده است که ذرات SiC به دلیل سختی بیشتر نسبت به ذرات تقویت کننده Al_2O_3 سبب بهبود موثرتر رفتار تریبولوژیکی می‌شوند. در حالی که ذرات Al_2O_3 سبب بهبود رفتار خوردگی و اکسیداسیون دما بالا در کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با Al_2O_3 می‌شود. در این تحقیق بهبود رفتار تریبولوژیکی در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بر اساس استفاده از ذرات SiC به عنوان تقویت کننده مورد توجه قرار گرفته است. چالش مهم استفاده از این ذرات تقویت کننده سختی زیاد آن‌ها است که نرخ سایش سطح مقابل را افزایش می‌دهد. ضمن آن که این ذرات تقویت کننده تمایل به جدا شدن از زمینه دارند که در این حالت سایش به صورت سه جسمی بوده و نرخ سایش را افزایش می‌دهد. در این حالت می‌توان به منظور بهبود رفتار تریبولوژیکی از ذرات روان کار جامد استفاده نمود. کامپوزیت سطحی تولید شده در این حالت به صورت هیبریدی است که می‌تواند مزیت‌هایی از هر دو نوع ذره تقویت کننده را دارا باشد. بررسی‌های انجام شده توسط محققان نشان داده است که افزودن ذرات روان کار جامد، نظیر گرافیت (Gr) یا دی سولفید مولیبدن (MoS_2)، به همراه ذرات با سختی بالاتر، خواص تریبولوژیکی این کامپوزیت‌ها را بهبود می‌بخشد. از آن جا که ضریب اصطکاک MoS_2 نسبت به Gr کم‌تر است لذا در این تحقیق به منظور بهبود موثرتر رفتار تریبولوژیکی از MoS_2 به عنوان روان کار جامد استفاده شده است.

با توجه به مطالب فوق لزوم تولید کامپوزیت سطحی هیبریدی زمینه فلزی با اعمال دو نوع ذره تقویت کننده، SiC و MoS_2 ، قابل توجه است. با وجود این روش تولید این نوع کامپوزیت نیز حایز اهمیت بوده و می‌تواند بر خواص نهایی کامپوزیت حاصل تاثیر گذار باشد.

شایان ذکر است که ساخت کامپوزیت‌های سطحی زمینه فلزی با روش‌های متداول مبتنی بر فرایند فاز مذاب در دماهای بالا، نظیر عملیات ذوب لیزر و پاشش حرارتی می‌تواند منجر به تخریب خواص کامپوزیت شود. در حین این روش‌ها به دلیل حضور فاز مذاب، امکان واکنش بین ذرات تقویت کننده و زمینه فلزی و تشکیل برخی فازهای مخرب وجود دارد. به عنوان مثال در مورد کامپوزیت‌های زمینه فلزی با ذرات تقویت کننده SiC، احتمال تشکیل کاربید ترد Al_4C_3 وجود دارد، که وجود چنین شرایطی لزوم کنترل پارامترهای فرایند را ایجاب می‌کند. علاوه بر آن یکی از مشکلات اصلی در مورد کامپوزیت‌های هیبریدی با فرایندهای ذوبی رایج، آگلومره شدن^۱ ذرات تقویت کننده است که منجر به توزیع غیریکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه می‌شود. همچنین کامپوزیت‌های تولید شده به روش متالورژی پودر نیز دارای محدودیت‌هایی هستند که از آن جمله می‌توان به محدودیت در اندازه، شکل و همچنین هزینه‌بر بودن فرایند اشاره کرد.

امروزه فرایند اصطکاکی اغتشاشی به عنوان یک روش بهبود خواص سطحی شناخته شده است. با در نظر گرفتن مشکلات فوق به نظر می‌رسد که فرایند اصطکاکی اغتشاشی^۲ (FSP) گزینه مناسبی برای ساخت کامپوزیت‌های سطحی زمینه فلزی روی ورق آلومینیومی باشد. فرایند اصطکاکی اغتشاشی توسط میشر^۳ و همکاران بر مبنای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به منظور اصلاح ریزساختار توسعه یافت. ابزار غیر مصرفی در حال چرخش شامل شانه و برآمدگی به داخل قطعه کار فرو می‌رود و در سطح پوشیده شده توسط شانه، اغتشاش مکانیکی و حرارت ایجاد می‌کند. با توجه به آن که در حین انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی دما کم‌تر از دمای نقطه ذوب فلز پایه است، لذا مشکلات ذکر شده در روش‌های مبتنی بر فاز مذاب وجود نخواهد داشت. علاوه بر آن فرایند اصطکاکی

¹ Agglomeration

² Friction stir processing

³ Mishra

اغتشاشی سبب اصلاح ساختار و کاهش اندازه دانه در نزدیکی سطح ماده می‌شود. آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ یکی از پراستحکام‌ترین آلیاژهای آلومینیوم است که کاربرد گسترده‌ای در صنعت خودروسازی و هوا- فضا دارد. اما کم بودن مقاومت سایشی این آلیاژها سبب محدودیت استفاده از آنها شده است. تاکنون مطالعاتی در رابطه با تاثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی این آلیاژ صورت گرفته است. اما مطالعات بسیار کمی در رابطه با بهبود خواص تریبولوژیکی این آلیاژ با استفاده فرایند اصطکاکی اغتشاشی صورت گرفته است. ستفاده ابر این اساس انتظار می‌رود تولید کامپوزیت سطحی با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی بتواند گزینه مناسبی برای رفع این نقیصه باشد.

زیاد بودن تعداد پارامترها در فرایند اصطکاکی اغتشاشی و دامنه تغییر گسترده آنها لزوم بهینه سازی پارامترهای فرایند را آشکار می‌سازد. بر این اساس در مرحله اول این تحقیق به تعیین پارامترهای بهینه جهت تولید کامپوزیت سطحی $Al7075/SiC_p$ توسط طراحی آزمایش و بهینه سازی به روش تاگوچی پرداخته شد. پس از تعیین پارامترهای بهینه تاثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص تریبولوژیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد بررسی قرار گرفت. مشکلی که در رابطه با تولید کامپوزیت‌های سطحی توسط فرایند اصطکاکی اغتشاشی وجود دارد عدم ایجاد توزیع یکنواختی از ذرات تقویت کننده در زمینه است. برای رفع این مشکل فرایند اصطکاکی اغتشاشی تا چهار پاس انجام شد و تاثیر تعداد پاس روی توزیع ذرات تقویت کننده و در نتیجه سختی و رفتار تریبولوژیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت بر اساس پارامترهای بهینه و تعداد پاس مطلوب به تولید کامپوزیت سطحی هیبریدی $Al7075/SiC_p/MoS_2$ پرداخته شد.

فصل دوم مروی بر مطالب

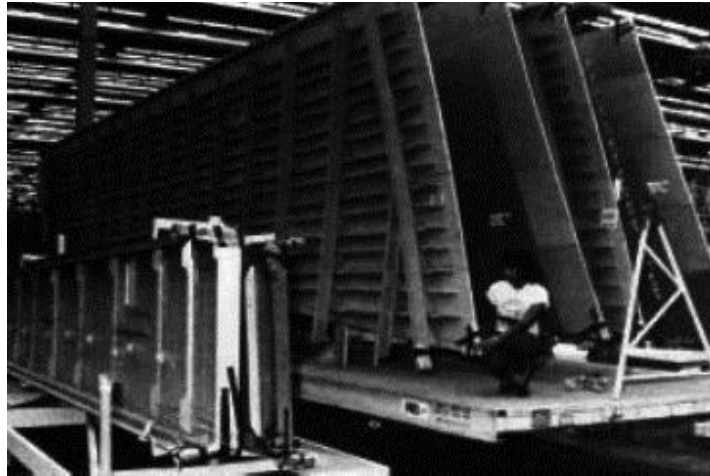
۱-۲ آلومینیوم و آلیاژهای آن

آلومینیوم به عنوان پر مصرف‌ترین فلز غیر آهنی محسوب می‌شود. این فلز به دلیل دارا بودن نسبت استحکام به وزن بالا و شکل پذیری آسان کاربردهای متعددی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوا-فضا، صنایع ساختمانی و صنایع نظامی پیدا کرده است [۱]. از آن جا که این فلز در حالت خالص داری استحکام پایینی است نمی‌توان از آن به عنوان اجزای ساختاری استفاده کرد. بنابراین معمولا این فلز با عناصر آلیاژی مختلف ترکیب شده و محصولات تولید می‌شود که برای کاربردهای زیادی قابل استفاده است. به دلیل وزن کم و هدایت حرارتی بالا از آلیاژهای آلومینیوم برای کاربردهای تریبولوژیکی مانند قطعات موتور و محصولات ورزشی استفاده می‌شود. با این وجود استفاده از آن‌ها به علت مقاومت سایشی ضعیف و استحکام کم محدود شده است [۲].

از جمله کاربردهای این آلیاژ در صنایع هوا-فضا و هواپیماسازی است. چرا که در این صنایع نیاز است که قطعه دارای استحکام بالا باشد و بسته به کاربرد آن چقرمگی خوب، مقاومت به خوردگی بالا و یا مدول الاستیک بالایی (گاهی اوقات هر سه خصوصیت) نیز داشته باشد. برای نمونه آلیاژهای گروه ۷۰۰۰ از جمله آلیاژ ۷۰۷۵ برای ساخت سازه بال هواپیما کاربرد دارد شکل (۱-۲) [۳].

خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم به ترکیب و ریزساختار آن‌ها بستگی دارد. افزودن عناصر آلیاژی به آلومینیوم خالص سبب بهبود خواص آن می‌شود. اگر چه عناصر زیادی در آلیاژ سازی آلومینیوم استفاده می‌شوند ولی تعداد محدودی از آن‌ها در حالت جامد حلالیت کافی برای ایجاد آلیاژ مورد نظر را دارند. عناصر آلیاژی اصلی در آلومینیوم عبارتند از: مس، منگنز، سیلیسیم، منیزیم و روی. سایر عناصر در مقادیر کم‌تر، اغلب با اهداف خاصی به آلیاژ افزوده می‌شوند. از جمله این عناصر می‌توان به کروم و منگنز اشاره کرد که به ترتیب سبب بهبود مقاومت به

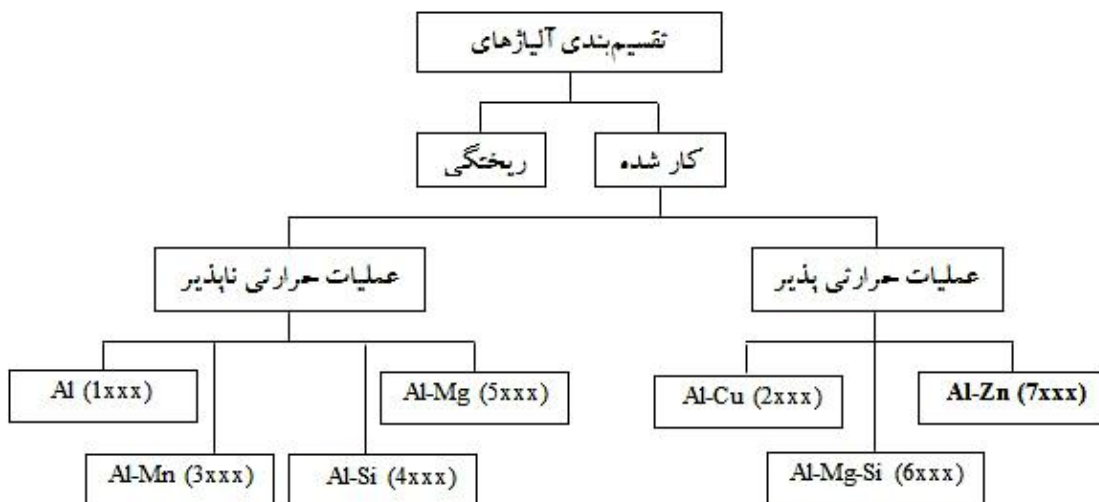
خوردگی تنش^۱ و افزایش استحکام می‌شوند و تیتانیوم و زیرکونیم نیز اغلب به منظور اصلاح ریزساختار استفاده می‌شوند [۴].



شکل ۱-۲ سازه بال هواپیما که در ساخت آن از آلیاژ آلومینیوم گروه ۷۰۰۰ (مانند ۷۰۷۵) و ۲۰۰۰ (مانند ۲۰۲۴) استفاده می‌شود [۳].

آلیاژهای آلومینیوم به دو گروه کار شده و ریختگی تقسیم‌بندی می‌شوند. آلیاژهای کار شده توسط کار مکانیکی همراه با عملیات حرارتی به محصول نهایی تبدیل می‌شوند، در صورتی که آلیاژهای ریختگی توسط روش‌های مختلف ریختگی به شکل نهایی تبدیل می‌شوند. تقسیم‌بندی بیشتر هر یک از این دو گروه بر اساس مکانیزم‌های حاکم بر بهبود خواص صورت می‌گیرد [۵].

آلیاژهای آلومینیوم کار شده به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر^۲، که افزایش استحکام در این آلیاژها ناشی از رسوب سختی و تغییر شکل است و آلیاژهای عملیات حرارتی ناپذیر^۳ که استحکام آن‌ها بر اثر کار سرد افزایش می‌یابد. طبقه‌بندی آلیاژهای آلومینیوم کار شده در شکل ۲-۲ نشان داده شده است [۱].



شکل ۲-۲ طبقه‌بندی آلیاژهای آلومینیوم کار شده [۱].

¹ Stress corrosion cracking
² Heat-treatable
³ Non heat-treatable

۲-۲ آلیاژهای گروه ۷۰۰۰

آلیاژهای گروه ۷۰۰۰ آلومینیوم جز پر استحکام‌ترین آلیاژهای آلومینیوم به شمار می‌آید. این آلیاژها به علت استحکام زیاد، چگالی کم، چقرمگی شکست بالا و پایداری حرارتی معمولاً در ساخت قطعات مورد استفاده در هوا-فضا به کار می‌روند [۶]. همان گونه که از تقسیم‌بندی ارائه شده در شکل ۲-۲ مشخص است این آلیاژها عملیات حرارتی پذیر هستند و استحکام خود را از طریق رسوب سختی به دست می‌آورند. عنصر آلیاژی اصلی در این گروه، روی است اما به علت این که این عنصر به تنهایی تا حدود زیادی در آلومینیوم قابل حل است و اثر قابل ملاحظه روی ریزساختار ندارد اغلب عناصر دیگری نظیر منیزیم، مس و غیره نیز در آن وجود دارند. آلیاژهای گروه ۷۰۰۰ به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: آلیاژهای آلومینیوم-روی-منیزیم، نظیر ۷۰۰۵ و آلیاژهای آلومینیوم-روی-منیزیم-مس، نظیر ۷۰۷۵ و ۷۱۷۸. آلیاژهای دسته دوم بیشترین استحکام را در میان آلیاژهای آلومینیوم دارا هستند که در شرایط T6 (عملیات حرارتی انحلال و پیرسازی مصنوعی در دمای 120°C و به مدت ۲۴ ساعت)، حداقل دارای استحکام کششی 84 Ksi [580 MPa] هستند و در صنایع هواپیما سازی کاربرد دارند [۷].

۳-۲ فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

۱-۳-۲ اساس فرایند اصطکاکی اغتشاشی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط مرکز تحقیقات جوش انگلستان^۱ (TWI) در سال ۱۹۹۱ به عنوان روش اتصال حالت جامد اختراع شد و در ابتدا برای آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار گرفت. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی^۲ (FSP) به عنوان روشی برای اصلاح ریزساختار بر مبنای اصول جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۳ (FSW) توسعه یافته است. این فرایند مشابه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام می‌شود. به این ترتیب که ابزار غیر مصرفی در حال چرخش با طراحی خاص و شامل برآمدگی^۴ و شانه^۵ در محل فصل مشترک دو قطعه وارد شده و در امتداد خط اتصال پیش‌روی می‌کند. اصطکاک بین شانه و قطعه کار منجر به ایجاد حرارت و افزایش دمای قطعه کار به صورت موضعی می‌شود که ماده می‌تواند به آسانی تحت تغییر شکل پلاستیک قرار گیرد. در حین پیش‌روی ابزار در حال چرخش در امتداد خط اتصال، ماده در اطراف ابزار اکستروژد می‌شود و فرآیند فورج توسط نیروی محوری صورت می‌پذیرد [۸]. شمایی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

۲-۳-۲ پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی

فرایند اصطکاکی اغتشاشی شامل سیلان پیچیده ماده و تغییر شکل پلاستیک شدید در منطقه اغتشاشی است. از جمله پارامترهای موثر در این فرایند می‌توان به سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی و هندسه ابزار اشاره نمود. پارامترهای فوق تاثیر قابل ملاحظه روی نحوه سیلان ماده و توزیع دما دارند که سبب توسعه ریزساختار ماده می‌شوند [۸]. ابزار مورد استفاده در فرایند اصطکاکی اغتشاشی شامل دو بخش برآمدگی و شانه است که شمایی از آن در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. ابزار مورد استفاده دو نقش عمده بر عهده دارد: (الف) ایجاد حرارت موضعی و (ب) جابجایی و سیلان ماده. از نقطه نظر میزان حرارت تولیدی، اندازه نسبی برآمدگی و شانه ابزار حایز اهمیت است و

¹ The Welding Institute

² Friction stir processing

³ Friction stir welding

⁴ Pin

⁵ Shoulder