دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت نانو ساختار $Al-Al_2O_3$ تولید شده با فرایند نورد تجمعی و ارزیابی خواص اتصال

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد- شناسایی و انتخاب مواد

حامد آدینه‌لو

اساتید راهنما

دکتر مرتضی شمعانیان اصفهانی- دکتر احمد کرمانپور

۱۳۹۰

به نام خداوند جان و خرد

کزین برتر اندیشه برنگذرد

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت نانوساختار $Al- Al_2O_3$ تولید شده با فرایند نورد تجمعی و ارزیابی خواص اتصال

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد-شناسایی و انتخاب مواد

حامد آدینه‌لو

اساتید راهنما

دکتر مرتضی شمعانیان اصفهانی – دکتر احمد کرمانپور

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد – شناسایی و انتخاب مواد آقای حامد آدینه‌لو

تحت عنوان

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت نانوساختار $Al- Al_2O_3$ تولید شده با فرایند نورد تجمعی و ارزیابی خواص اتصال

در تاریخ ۸۸/۲/۱۹ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مرتضی شمعانیان اصفهانی
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر احمد کرمانپور
۳- استاد داور	دکتر فتح‌الله کریم‌زاده
۴- استاد داور	دکتر محمدرضا سلیمی‌جزی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسعود پنجه‌پور

تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش ایزد یکتا را که در پرتو لطف و عنایت بیکران او انجام این پژوهش میسر گردید.

درود و سپاس قلبی خود را به پدر و مادر نازنینم و خواهر مهربانم تقدیم می‌نمایم که در تمام مراحل زندگی حامی و مشوق من بوده‌اند.

تشکر و سپاس بی دریغ تقدیم اساتید گرامی پروژه، جناب آقای دکتر مرتضی شمعانیان و جناب آقای دکتر احمد کرمانپور که همواره در طول انجام این پروژه از راهنمایی‌های مفیدشان بهره بردم.

از همکاری کادر محترم دانشکده مهندسی مواد و کارگاه آموزشی در طول انجام این پروژه، به ویژه جناب آقای مهدی محمدی سپاس‌گزارم.

از دوست و همکار عزیزم، جناب آقای مهندس حمیدرضا مرآتی که دوشادوش بنده در تمام مراحل پروژه بنده را یاری دادند، صمیمیمانه متشکرم.

از دوست گرامی، جناب آقای مهندس روح‌الله جماعتی که در تمام مراحل پروژه، بی‌دریغ بنده را راهنمایی نموده‌اند سپاس‌گزارم.

از تمامی دوستان عزیزم به ویژه سرکار خانم مهندس هانیه عابدی، جناب آقای مهندس وهاب راستار، جناب آقای مهندس مهدی عباسی، جناب آقای مهندس آیدین صابریان، جناب آقای مهندس مهدی کسکنی و باقی سروران که در تمام مدت تحصیل لحظات شاد و آرامش‌بخشی را در کنارشان سپری کردم ممنونم.

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

تقدیم به وجود استوار و پر مهر **پدرم** که حضورش قوت قلب و مایه دلگرمیم است.

تقدیم به **مادرم** که تار و پود وجودش را با محبت و دلسوزی بافته‌اند.

و تقدیم به تنها **خواهر** مهربان و عزیزم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
فهرست اشکال ..... ده
فهرست جداول ..... دوازده
چکیده ۱
فصل اول: مقدمه
فصل دوم: مروری بر منابع مطالعاتی
۲-۱ مقدمه ۶
۲-۲ کامپوزیت‌ها ۷
۲-۲-۱ کامپوزیت‌های زمینه فلزی ۷
۲-۳ تغییر شکل پلاستیکی شدید ۹
۲-۳-۱ فرایند نورد تجمعی(ARB) ۱۱
۲-۳-۲ تولید کامپوزیت به کمک فرایند ARB ۱۳
۲-۴ اتصال کامپوزیت‌های زمینه فلزی ۲۰
۲-۴-۱ روشهای اتصال کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی ۲۰
۲-۵ جوشکاری مواد فوق ریزدانه ۲۴
۲-۶ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی(FSW) ۲۵
۲-۶-۱ متغیرهای جوشکاری ۳۰
۲-۶-۲ شانه‌ی ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۳۱
۲-۶-۳ پین ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۳۲
۲-۷ FSW کامپوزیت‌های زمینه فلزی ۳۷
۲-۸ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مواد تولیدی با روش نورد تجمعی ۴۱
۲-۹ جمع‌بندی و هدف پژوهش حاضر ۴۹
فصل سوم: مواد و روش انجام آزمایش‌ها
۳-۱ مواد مصرفی ۵۱
۳-۲ فرایند نورد ۵۲
۳-۲-۱ تولید کامپوزیت ۵۳
۳-۳ جوشکاری کامپوزیت‌ها ۵۴
۳-۳-۱ تعیین متغیرهای بهینه جوشکاری ۵۷
۳-۴ بررسی اثر هندسه پین ۵۸
۳-۵ بررسی‌های ریزساختاری ۵۹
۳-۶ بررسی‌های خواص مکانیکی ۵۹
فصل چهارم: نتایج و بحث

۴-۱ مقدمه ۶۰
۴-۱-۱ بررسی‌های ریزساختاری کامپوزیت ARBشده ۶۰
۴-۱-۲ بررسی‌های خواص مکانیکی کامپوزیت ARB شده ۶۲
۴-۲ جوشکاری کامپوزیت‌ها ۶۴
۴-۲-۱ شکل ظاهری جوش ۶۴
۴-۲-۲ نحوه توزیع ذرات و ریزساختار منطقه جوش ۶۷
۴-۲-۳ آزمون کشش ۷۵
۴-۲-۴ بررسی مقاطع شکست ۸۲
۴-۲-۵ آزمون سختی‌سنجی ۸۴
۴-۳ بررسی اثر هندسه پین بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش ۸۹
۴-۳-۱ بررسی ریزساختاری ۸۹
۴-۳-۲ آزمون کشش ۹۳
۴-۳-۳ آزمون سختی‌سنجی ۹۸
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۵-۱ نتیجه‌گیری ۱۰۰
۵-۲ پیشنهادها ۱۰۲
مراجع ۱۰۳

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱شمای کلی فرایند ARB ۱۲
شکل ۲-۲ شماتیکی از فرایند ARB برای تولید کامپوزیت ۱۵
شکل ۲-۳ تصاویر SEM کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ در سیکلهای مختلف ۱۶
شکل ۲-۴ خواص مکانیکی کامپوزت Al–۷% SiC تولید شده به روش ARB در سیکلهای مختلف ۱۷
شکل ۲-۵ (الف) تصویر شماتیک از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۲۶
شکل ۲-۶ انواع طرح اتصال در فرایند FSW ۲۸
شکل ۲-۷- شماتیکی از مناطق مختلف ایجاد شده در جوشکاری اصطکی اغتشاشی ۲۹
شکل ۲-۸ طرح‌های مختلف شانه ۳۲
شکل ۲-۹ مقاطع پین فرایند FSW ۳۴
شکل ۲-۱۰ (الف) ریزساختار فلزپایه، (ب) ریزساختار ناگت جوش ۳۸
شکل ۲-۱۱ هندسه نمونههای FCG و دستگاه انجام آزمایش ۴۰
شکل ۲-۱۲ تشکیل حفره در فصل مشترک برخی ذرات SiC با زمینه در دکمه جوش ۴۱
شکل ۲-۱۳ ترکخوردن برخی از ذرات درشت SiC در دکمه جوش ۴۱
شکل ۲-۱۴ تصویر TEM آلیاژ آلومینیم خالص تجاری ARB شده پس از ۶ سیکل ۴۲
شکل ۲-۱۵ تصاویر TEM آلومینیم خالص تجاری ARBشده پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۴۴
شکل ۲-۱۶ پروفیل سختی ویکرز ناحیه اغتشاش جوش ماده ARBشده و ماده اولیه ۴۴
شکل ۲-۱۷ تصاویر EBSD (الف) نمونه اولیه(خام)، (ب) نمونه ARB ۴۵
شکل ۲-۱۸ تصاویر EBSD از ناحیه اغتشاش نمونههای جوشکاری شده در درجه دوران ۴۶
شکل ۲-۱۹ سطح رویی نمونههای جوشکاری‌شده (الف) حالت محیطی (در هوا) (ب) حالت غوطه‌وری (در آب) ۴۸
شکل ۲-۲۰ پروفیل سختی نمونههای جوشکاری شده در هوا و زیرآب ۴۹
شکل ۲-۲۱- نمودار تنش- کرنش مهندسی برای نمونههای مختلف ۴۹
شکل ۳-۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات پودر Al_2O_3 ..... ۵۲
شکل ۳-۲ (الف) دستگاه نورد مورد استفاده، (ب) غلتک و دو دریچه‌ی ورود ورق. ۵۳
شکل ۳-۳ شماتیکی از مراحل فرایند ARB برای تولید کامپوزیت‌های $Al-Al_2O_3$ ۵۴
شکل ۳-۴ (الف)شماتیکی از نحوه قرارگیری ورق‌ها، (ب) تصویر حقیقی از نحوه قرارگیری ورق‌ها ۵۵
شکل ۳-۵ دستگاه فرز مورد استفاده برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی. ۵۶
شکل ۳-۶ نحوه قراگیری ترموکوپل نوع K در قسمت پسرو جوش. ۵۷
شکل ۳-۷ هندسه پین‌های استفاده شده در این تحقیق. ۵۹
شکل ۴-۱ ریزساختار کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ پس از ۱۰ سیکل نورد ۶۱
شکل ۴-۲ نمودار تنش –کرنش مهندسی آلومنیم خالص تجاری آنیل‌شده (۱۰۵۰ AA) ۶۲
شکل ۴-۳ (الف) تصویر سطح مقطع شکست کامپوزیت $Al–5Vol\%Al_2O_3$ پس از ۱۰ پاس نورد. ۶۴
شکل ۴-۴ (الف) تصویر جوش بدون ورق آغازگر جوشکاری، (ب) شمای نزدیک‌تر از اتصال معیوب. ۶۵
شکل ۴-۵ تصویر ظاهر جوش ۶۶
شکل ۴-۶ حفرات و عدم پیوستگی در زمینه ۶۸

شکل ۴-۷ توزیع ذرات در مناطق مختلف قطعه برای متغیرهای گوناگون ۶۹
شکل ۴-۸ توزیع ذرات در منطقه اغتشاش برای متغیرهای مختلف ۷۰
شکل ۴-۹ (الف) ترک‌خوردگی در ذرات درشت Al_2O_3، (ب) خردشدن و ترک در ذرات درشت و نوک‌تیز ۷۱
شکل ۴-۱۰ پروفیلهای دمایی ثبتشده برای متغیرهای۹۰۰ rpm- ۶۳، ۸۰ و ۱۰۰mm/min ۷۲
شکل ۴-۱۱ پروفیلهای دمایی ثبتشده برای متغیرهای مختلف ۷۳
شکل ۴-۱۲ تصویر محل شکست نمونه‌های آزمایش کشش ۷۶
شکل ۴-۱۳- نمودار تنش- کرنش مربوط به آلومینیم خالص، کامپوزیت اولیه و متغیرهای جوشکاری ۷۸
شکل ۴-۱۴- نمودار تنش-کرنش مهندسی مربوط به آلومینیم خالص، کامپوزیت اولیه و شش متغیر جوشکاری ۷۸
شکل ۴-۱۵ نمودار ستونی استحکام کششی برحسب سرعت چرخش ابزار در سرعت‌های جوشکاری ۸۱
شکل ۴-۱۶ نمودار ستونی ازدیاد طول برحسب سرعت چرخش ابزار در سرعت‌های جوشکاری متفاوت ۸۲
شکل ۴-۱۷ سطح مقطع شکست کامپوزیت‌های جوشکاری‌شده در سه متغیر ۸۳
شکل ۴-۱۸ نمودار سختی- فاصله برای متغیرهای ۹۰۰rpm- ۶۳mm، ۹۰۰rpm- ۸۰mm/min ۸۵
شکل ۴-۱۹ نمودار سختی- فاصله از مرکز جوش ۸۵
شکل ۴-۲۰ نمودار ستونی سختی بر حسب سرعت جوشکاری در سرعت‌های چرخش متفاوت ۸۸
شکل ۴-۲۱- توزیع ذرات تقویت‌کننده در منطقه اغتشاش ۹۰
شکل ۴-۲۲- نمودار تنش- کرنش مهندسی برای آلومینیم خالص، کامپوزیت تولید شده و هندسه‌های مختلف ۹۳
شکل ۴-۲۳- نمودار ستونی استحکام کششی برای هندسه‌های مختلف پین در متغیر جوشکاری ۹۷
شکل ۴-۲۴- نمودار ستونی درصد ازدیاد طول برای هندسه‌های مختلف پین در متغیر جوشکاری ۹۷
شکل ۴-۲۵- نمودار سختی برحسب فاصله از مرکز جوش برای چهار هندسه‌ی پین مختلف ۹۸
شکل ۴-۲۶- نمودار ستونی مربوط به سختی پین‌های مختلف در متغیر جوشکاری ۱۴۰۰rpm- ۱۰۰mm/min ۹۹

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱ تغییرات هندسی ایجاد شده در نمونه(با ضخامت ۱mm) حین سیکلهای مختلف ARB ۱۳
جدول ۲-۲ مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۲۷
جدول ۲-۳ مواد متداول مورد استفاده برای ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۳۱
جدول ۲-۴- انواع پین‌های طراحی شده توسط TWI برای مصارف پیشرفته ۳۳
جدول ۲-۵ متغیرهای جوشکاری و ابعاد ابزار بکار رفته برای آلیاژ آلومینیم ۲۰۱۹ AA ۳۵
جدول ۲-۶ تأثیر پروفیل پین بر نسبت حجم دینامیک به حجم استاتیک ۳۶
جدول ۲-۷- تأثیر پروفیل ابزار بر دوران دینامیک و رفتار ضربانی ۳۷
جدول ۲-۸ اندازه دانه مواد پایه و مواد جوشکاری شده در منطقه اغتشاش (بر حسب µm) ۴۷
جدول ۳-۱ ترکیب شیمیایی ورق آلومینیوم خالص تجارتی (۱۰۵۰ AA) ۵۱
جدول ۳-۲ متغیرهای جوشکاری مورد استفاده در این تحقیق ۵۸
جدول ۴-۱ نتایج حاصل از آزمون کشش و سختی‌سنجی را برای آلومینیم خالص تجارتی آنیل‌شده ۶۳
جدول ۴-۲ دماهای ثبت‌شده برای شش متغیر جوش توسط ترموکوپل نوع K مستقر در جهت پسران جوش ۷۴
جدول ۴-۳ درجه دوران برای شش متغیر مطلوب و بدون عیب جوش ۷۵
جدول ۴-۴- نتایج حاصل از آزمون کشش برای کامپوزیت پایه و کلیه متغیرهای جوشکاری ۸۰
جدول ۴-۵ مقادیر حجم دینامیک و استاتیک و نسبت آن‌ها برای پروفیل‌های مختلف پین ۹۱
جدول ۴-۶- شکل مدار دینامیک و تعداد ضربان بر ثانیه در متغیر ۱۴۰۰rpm – ۱۰۰mm/min ۹۲
جدول ۴-۷- اطلاعات آزمون کشش مربوط به کامپوزیت پایه و پین‌های مختلف ۹۶

چکیده

کامپوزیت‌های زمینه فلزی به عنوان دسته‌ای از مواد پیشرفته، امروزه کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوافضا، خودروسازی و غیره پیدا کرده‌اند. جوشکاری این دسته از مواد با مشکلات بسیاری همراه می‌باشد. از بین فرایندهای جوشکاری مختلف، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به دلیل خواص منحصر به فرد خود، از جمله بهترین روش‌های اتصال کامپوزیت‌ها محسوب می‌شود. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از فرایند نورد تجمعی کامپوزیت Al-۵Vol% Al_2O_3 با اعمال ۱۰سیکل نورد تولید شده است.سپس کامپوزیت تولیدشده با در نظر گرفتن ۹ متغیرجوشکاری شامل سه سرعت چرخش ۹۰۰، ۱۱۲۰ و ۱۴۰۰rpm و سه سرعت جوشکاری ۶۳، ۸۰ و ۱۰۰mm/min و ثابت در نظر گرفتن دیگر پارامترها، تحت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفته است. به منظور ثبت دما، از ترموکوپل نوع K در قسمت پس‌رو جوش استفاده شده است. در ادامه با در نظر گرفتن چهار هندسه‌ی پین مختلف (مربع، مثلث، شش‌ضلعی و استوانه) تاثیر شکل پین بر نحوه توزیع ذرات و خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده بررسی شده است. بررسی‌های ریزساختاری کامپوزیت‌های اولیه و نمونه‌های جوشکاری‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شده است. ارزیابی‌های خواص مکانیکی نیز توسط آزمون کشش و سختی‌سنجی صورت گرفته است. همچنین سطح مقطع شکست نمونه‌ها قبل و بعد از جوشکاری مطالعه و مکانیزم شکست تعیین شده است. ارزیابی‌های ریزساختاری از کامپوزیت تولیدشده نشان داده است که پس از ۱۰ سیکل نورد، توزیع ذرات تقویت‌کننده بهبود یافته است و ریزساختار بدون تخلخلی در فصل‌مشترک ذرات و زمینه ایجاد شده است. خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدشده و مقایسه آن با آلومینیم خالص تجاری آنیل‌شده تغییرات قابل ملاحظه‌ی استحکام کششی، سختی و درصد ازدیاد طول را نشان داده است. شکست‌نگاری نمونه‌ها نیز حضور دیمپل‌های کم‌عمق را گزارش کرده و مکانیزم شکست نیز نرم بوده است. بررسی ریزساختار جوش نشان داد که پارامترهای ۹۰۰rpm- ۶۳، ۸۰ و ۱۰۰mm/min به جهت عدم تامین حرارت کافی منجر به ایجاد ریزساختار معیوب دارای حفره و عدم‌پیوستگی بوده و نامطلوب بوده‌اند. نتایج حاصل از آزمون کشش و سختی سنجی نیز برای ۳ متغیر ۹۰۰rpm- ۶۳، ۸۰ و ۱۰۰mm/min نتایج ضعیفی راگزارش کرده است. مجموعه متغیرهای دیگر با ایجاد حرارت کافی، ریزساختار کامل و بدون نقصی را ایجاد کرده‌اند. از بین این متغیرها، با توجه به مقدار درجه دوران (نسبت سرعت جوشکاری به سرعت چرخش ابزار) که معیاری از میزان حرارت ورودی نیز می‌باشد، متغیر۱۱۲۰rpm- ۱۰۰mm/min با داشتن بالاترین عدد درجه دوران ۰/۰۸۹mm/r، کم‌ترین حرارت را به قطعه‌کار وارد کرده و دارای بالاترین استحکام کششی و سختی و پایین‌ترین درصد ازدیاد طول بوده است. همچنین متغیر۱۴۰۰rpm- ۶۳mm/min نیز با درجه دوران ۰/۰۴۵mm/r بیش‌ترین حرارت را به قطعه وارد کرده و دارای پایین‌ترین استحکام و سختی و بیش‌ترین درصد ازدیاد طول بوده است. شکست‌نگاری نمونه‌های جوشکاری‌شده دیمپل‌های عمیق‌تری را در مقایسه با کامپوزیت‌های اولیه نشان داده است که موید شکست نرم بوده است. نتایج حاصل از هندسه‌های مختلف پین، خردشدن بیش‌تر و توزیع یکنواخت‌تر ذرات تقویت کننده را برای پین مربعی در مقایسه با شکل‌های دیگر نشان داده است. نتایج حاصل از آزمون کشش برای هندسه‌های مختلف پین، بالاترین استحکام کششی، سختی و درصد ازدیاد طول را برای پین مربعی نشان داده است.

کلمات کلیدی: نورد تجمعی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، درجه دوران، شکست‌نگاری، پروفیل پین.

فصل اول
مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی[1](MMCs) تقویت شده با ذرات سرامیکی، دارای خواص حرارتی و مکانیکی مطلوب و منحصر به فردی می‌باشند. در مقایسه با فلزات و آلیاژهای دیگر که تقویت نشده‌اند، کامپوزیت‌ها دارای استحکام، مدول الاستیسیته، مقاوت سایشی و مقاومت به خستگی بالاتر و نیز انبساط حرارتی کم‌تری هستند. همچنین این گروه از کامپوزیت‌ها که در دسته بندی کامپوزیت‌های با تقویت‌کننده‌های غیرپیوسته قرار می‌گیرند، در مقایسه با کامپوزیت‌های تقویت‌شده با فیبرهای پیوسته، نسبتاً ارزان بوده و می‌توان آن‌ها را توسط روش‌های مرسوم تولید کرد. در حال حاضر این دسته از کامپوزیت‌ها توسط روش‌های مختلف ریخته‌گری، متالورژی پودر و آلیاژسازی مکانیکی تولید می‌شوند. هر یک از این روش ها در کنار مزایایی که دارند، دارای محدودیت‌هایی نیز هستند که تولید کامپوزیت‌ها با روش‌های دیگر را توجیه می‌کنند.

تغییرشکل پلاستیکی شدید[2](SPD) به دسته‌ای از فرایندها اطلاق می‌شود که در آن‌ها با اعمال کرنش پلاستیکی شدید به ماده، می‌توان مواد حجیم با دانه‌های فوق‌ریز تولید کرد. ویژگی منحصر به فرد این فرایندها، ثابت ماندن ابعاد نمونه حین فرایند می‌باشد که در نتیجه آن، اعمال کرنش‌های بسیار بالا بر ماده امکان‌پذیر می‌شود. در سال‌های اخیر تحقیقات و تلاش‌هایی در زمینه گسترش روش‌های جدیدی به منظور دست‌یابی به تغییرشکل پلاستیکی شدید انجام گرفته است.

---
[1] Metal Matrix Composites
[2] Severe Plastic Deformation

برخی از این روش‌ها عبارتند از اکستروژن در کانال زاویه دار با مقطع یکسان[1](ECAP)، اکستروژن و فشار سیکلی[2](CEC)، پیچش تحت فشار بالا[3](HPT)، اکستروژن هیدرواستاتیکی[4](HE). اشکال عمده این فرایندها، میزان تولید نسبتاً پایین و نیاز به ماشین‌های شکل‌دهی با ظرفیت بالا و قالب‌های گران قیمت می‌باشد.

در سال ۱۹۹۸ فرایند جدیدی در ژاپن ابداع گردید که مستقیما با استفاده از نورد موفق به تولید مواد فوق ریزدانه گردید. در این روش که فرایند نورد تجمعی[5](ARB) نام دارد، ابتدا سطح دو ورق فلزی با ابعاد یکسان تحت عملیات آماده‌سازی قرار می‌گیرد که این مرحله شامل چربی‌زدایی و برس‌کاری می‌باشد. سپس این دو ورق روی هم قرار گرفته و نورد با کاهش ضخامت ۵۰٪ انجام می‌گیرد. پس از آن ورق‌ها در راستای طولی به دو قسمت مساوی برش داده شده و مراحل ذکر شده تا چندین سیکل تکرار می‌گردد. از آنجایی که ضخامت ورق حین فرایند ثابت است، می‌توان فرایند را تا کرنش بالا جهت رسیدن به ورق‌هایی با اندازه دانه‌ی بسیار ریز و استحکام بالا تکرار کرد. مزیت اصلی این روش این است که اعمال کرنش فقط با نوردکردن صورت می‌گیرد و نورد رایج‌ترین، سودمندترین و اقتصادی‌ترین روش برای شکل‌دهی فلزات به ویژه ورق‌ها محسوب می‌شود. فرایند ARB روی آلیاژهای بسیاری انجام شده است و در تولید ریزساختارهایی با ابعاد نانومتری فرایندی کارامد بوده است. این فرایند تا به حال بیش‌تر روی آلیاژهای آلومینیم، فولاد، مس، برنج، منیزیم و نیز برای تولید کامپوزیت‌های چندفلزی و لایه‌ای نظیر آلومینیم/مس، آلومینیم/نیکل و آلومینیم/تیتانیم استفاده شده است.

اخیراً عده‌ای از محققین در پژوهشی نوین اقدام به تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی با تقویت کننده‌های غیرپیوسته با کمک فرایند ARB نموده‌اند. در این تحقیقات پس از آماده‌سازی ورق‌ها، پودر سرامیکی به طور یکنواخت روی سطح یکی از ورق‌ها توزیع شده و پس از قرار دادن ورق‌ها روی هم و بستن آن‌ها توسط سیم‌های فولادی، مجموعه فوق با کاهش ضخامت ۵۰٪ تحت عملیات نورد قرارگرفته است. عمل توزیع پودر تا تعداد سیکل مشخصی انجام شده است. پس از آن کامپوزیت تولید شده در این مرحله دارای فصل مشترک ذره با زمینه‌ی ضعیفی بوده و دارای مقادیر زیادی تخلخل می‌باشد لذا به منظور از بین بردن تخلخل‌های ایجاد شده و هر چه یکنواخت‌تر شدن توزیع ذرات تقویت‌کننده، عملیات نورد بدون افزودن پودر تا سیکل‌های بالاتر ادامه یافته و در نهایت کامپوزیت مورد نظر با خواصی مطلوب حاصل گردیده است. طبق تحقیقات صورت گرفته، کامپوزیت تولید شده با این روش نسبت به کامپوزیت‌های تولیدی به روش‌های ریخته‌گری و متالورژی پودر خواصی به مراتب بهتر داشته است. از آنجایی که کامپوزیت‌ها موادی مطلوب با خواص بسیار عالی هستند، برای گسترش این مواد در صنایع مختلف لزوم اعمال

---

[1] Equal Channel Angular Pressing
[2] Cyclic Extrusion-Compression
[3] High Pressure Torsion
[4] Hydrostatic Extrusion
[5] Accumulative Roll Bonding

فرایندهای ثانویه نظیر جوشکاری این مواد ضروری به نظر می‌رسد. در واقع این مواد پیشرفته زمانی خواهند توانست جایگاه خود را در صنعت مستحکم کنند که بتوان آن‌ها را به یکدیگر یا به مواد دیگر متصل کرد. لذا طی سالیان گذشته مطالعات بسیاری در زمینه روش‌های اتصال کامپوزیت‌ها صورت گرفته است.

از آنجایی که در روش‌های جوشکاری ذوبی حرارت ایجاد شده جهت برقراری اتصال بسیار بالا می‌باشد، لذا این گروه از روش‌های جوشکاری مشکلات عدیده‌ای همچون آگلومره شدن ذرات تقویت‌کننده، واکنش بین زمینه و ذرات تقویت‌کننده و تشکیل فازهای ترد و بین‌فلزی را در کامپوزیت‌ها پدید می‌آورند. از طرف دیگر، این فرایندها برای اتصال مواد نانوساختار نیز به هیچ وجه مناسب نیست، چرا که به واسطه‌ی حرارت بالای تولیدی، ساختار فوق ریزدانه از بین رفته و خواص مکانیکی این دسته از مواد به شدت کاهش خواهد یافت. همین مسائل باعث شده تا روش‌های جوشکاری حالت جامد مورد توجه قرار گیرند. از آنجایی که در این روش‌ها حرارت ناشی از فرایند کم‌تر است و ذوب و انجمادی نیز رخ نمی‌دهد، لذا این روش‌ها در جوشکاری مواد نانوساختار و نیز کامپوزیت‌ها می‌توانند مفید باشند. یکی از روش‌های اتصال حالت جامد، فرایندی موسوم به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[1] (FSW) است که در سال ۱۹۹۱ در انستیتو جوشکاری انگلستان ابداع شد و در ابتدای امر نیز برای جوشکاری مواد نرم و با نقطه ذوب پایین نظیر آلومینیم و آلیاژهای آن مورد استفاده قرار گرفت.

تحقیقات زیادی در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت‌ها و همچنین مواد فوق ریزدانه تولیدی به روش ARB صورت گرفته است. اما، در تمام تحقیقات مذکور کامپوزیت‌های جوشکاری شده همگی یا به کمک فرایندهای ریخته‌گری تولید شده‌اند یا روش‌هایی مثل متالورژی پودر برای تولید کامپوزیت‌ها استفاده شده است. همچنین، موادی که از طریق ARB تولید و FSW شده‌اند نیز یا آلومینیم خالص تجاری بوده‌اند و یا آلومینیم آلیاژی. از آنجایی‌که، کامپوزیت‌های تولید شده به روش ARB خواصی به مراتب بهتر از کامپوزیت‌های تولیدشده به روش‌های دیگر دارا هستند، لذا لزوم اتصال این دسته از کامپوزیت‌ها به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی احساس شده و انجام پژوهش حاضر امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

هدف از این پژوهش، در مرحله اول، تولید کامپوزیت آلومینیم/آلومینا توسط فرایند نورد تجمعی و بررسی ریزساختاری و خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده می‌باشد. در ادامه کامپوزیت‌های تولید شده به روش ARB با استفاده از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جوشکاری شده و خواص مکانیکی و ریزساختار اتصالات با ماده اولیه مقایسه شده است. همچنین اثر متغیرهای مختلف فرایند جوشکاری از جمله اثر هندسه‌ی ابزار در نحوه خردشدن و توزیع ذرات تقویت‌کننده در منطقه جوش نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا فصل دوم این پایان‌نامه به معرفی مختصر روش‌های تغییرشکل پلاستیکی شدید و به ویژه فرایند ARB و فرایندهای جوشکاری کامپوزیت‌ها

[1] Friction Stir Welding

به خصوص فرایند FSW و تحقیقات انجام شده در این زمینه‌ها می‌پردازد. فصل سوم مواد استفاده شـده، نحـوه انجـام فرایندهای نورد و جوشکاری و آزمایش‌های صورت‌گرفته روی قطعات اولیه و متصل‌شده را معرفـی مـی‌کنـد. فصـل چهارم به بیان نتایج به دست آمده و بحث بر روی آن‌ها اختصاص یافته است و در خاتمه در فصل پنجم، نتیجـه‌گیـری از این پژوهش ارائه می‌گردد.

فصل دوم
مروری بر منابع مطالعاتی

۲-۱ مقدمه

با گسترش روزافزون استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی در صنایع مختلف، در بخش اول این فصل پس از توضیح مختصری درباره کامپوزیت‌ها، روش‌های مختلف ساخت و تولید این مواد معرفی شده است. در ادامه، فرایند نوینی به نام نورد تجمعی[1] (ARB) و کامپوزیت‌های تولیدی به کمک این روش مورد بررسی قرار گرفته است. همانطورکه پیش‌تر نیز اشاره شد کامپوزیت‌ها زمانی می‌توانند در صنایع گوناگون جایگاه قابل توجهی داشته باشند که بتوان آن‌ها را به روش‌های مختلف اتصال داد. لذا، در ادامه‌ی این فصل به بررسی روش‌های اتصال کامپوزیت‌ها پرداخته شده است. از آنجایی‌که اکثر روش‌های جوشکاری مشکلات جدی در خواص کامپوزیت‌ها ایجاد می‌کنند، روش‌های جوشکاری حالت جامد برای برقراری اتصال در این گروه از مواد مطرح شده است. لذا، در ادامه به معرفی روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[2] (FSW) پرداخته شده و در نهایت کامپوزیت‌ها و مواد نانوساختاری که توسط محققین مختلف با روش FSW جوشکاری شده‌اند مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل از آن‌ها عنوان و بررسی شده است.

---

[1] Accumulative Roll Bonding
[2] Friction Stir Welding

۲-۲ کامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌ها دسته‌ای از مواد هستند که از دو یا چند جز مختلف تشکیل شده‌اند به‌طوری که خواص مجموعه از خواص تک تک اجزا بهتر می‌باشد. این مواد دارای یک زمینه هستند که جزء نرم مجموعه است و تقویت کننده‌هایی نیز دارند که معمولا سختی بالاتری از زمینه دارا هستند. کامپوزیت‌ها را از دو جنبه تقسیم بندی می‌کنند [۱]: الف) از نظر زمینه ب) از نظر تقویت‌کننده.

کامپوزیت‌ها از نظر زمینه به شکل های مختلفی همچون کامپوزیت‌های زمینه فلزی[1] (MMCs)، کامپوزیت‌های زمینه پلیمری[2](PMCs)، کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی[3] (CMCs) وکامپوزیت‌های زمینه ترکیبات بین‌فلزی[4](IMMCs) تقسیم‌بندی می‌کنند که در این بین کامپوزیت‌های زمینه فلزی بیش‌تر مورد توجه هستند.

از نظر تقویت‌کننده نیز کامپوزیت‌ها را به دو دسته کامپوزیت‌های با تقویت‌کننده‌های پیوسته و کامپوزیت‌های با تقویت‌کننده‌های غیرپیوسته تقسیم کرده‌اند. استفاده از الیاف یا رشته‌های پیوسته اگرچه بالقوه در جهت تقویت‌کننده استحکام استاتیکی و دینامیکی خیلی بالایی را به وجود می‌آورد، امّا استفاده از آن‌ها هزینه‌ی بالا و پیچیدگی‌های فنّی قابل ملاحظه‌ای را در بر دارد. متداول‌ترین MMCهای نوع ناپیوسته، MMCهای تقویت شده با ذرات می‌باشند که این ذرات ممکن است ذرات سرامیک‌هایی مانند SiC، Al_2O_3، B_4C، TiB_2، TiC باشند. MMCهای تقویت شده با ذرات همسانگرد بوده، نسبتاً ساده تولید می‌شوند و نسبت به MMCهای نوع پیوسته می‌توان عملیات بعدی را در مورد آن‌ها به صورت ساده‌تر به کار برد [۱و۲].

۲-۲-۱ کامپوزیت‌های زمینه فلزی

کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs) موادی هستند که تقویت‌کننده‌های سرامیکی سخت، در یک زمینه ی فلزی یا آلیاژی انعطاف پذیر قرار می‌گیرد. کامپوزیت‌های زمینه فلزی ترکیبی از خواص فلزی (چقرمگی و انعطاف‌پذیری) و خواص سرامیکی (استحکام و مدول بالا) می‌باشند که این خصوصیات منجر به استحکام بالاتر آن ها در برش و فشار می‌شود. خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوبی مانند مدول، پایداری حرارتی بالا و استحکام بالا را می‌توان با تولید این مواد به دست آورد لذا از این مواد به طور گسترده‌ای در پژوهش‌های مختلف استفاده شده است. در سال‌های اخیر، تمایل به تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی به منظور استفاده در صنایع هوافضا، هسته‌ای، اتومبیل و دیگر کاربردهای

[1] Metal Matrix Composites
[2] Polymer Matrix Composites
[3] Ceramic Matrix Composites
[4] Intermetallic Matrix Composites