

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت $Al-B_4C$ تولید شده به روش نورد تجمعی و ارزیابی خواص اتصال

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش جوشکاری

علیرضا مرادی فرادنبه

اساتید راهنما

دکتر حسین ادريس

دکتر مرتضی شمعیان

بهمن ۱۳۹۱



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مواد گرایش جوشکاری آقای علیرضا مرادی
تحت عنوان

**جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت $Al-B_4C$ تولید شده به روش نورد تجمعی و
ارزیابی خواص اتصال**

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۱ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر مرتضی شمعیان

۲- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر حسین ادريس

۳- استاد داور دکتر محمدرضا طرقي نژاد

۴- استاد داور دکتر علی اشرفی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر کیوان ریسی

تشکر و قدردانی

سپاس خداوند بلند مرتبه را که در پرتو لطف و رحمت بی کران او، انجام این پروژه میسر گردید. درود و تشکر قلبی خود را به حامیان همیشگی زندگی زندگیم، پدر و مادر مهربانم و نیز برادر و خواهر عزیزم تقدیم می‌نمایم که همواره مشوق و مایه دلگرمی من بوده‌اند.

تشکر و قدردانی از اساتید محترم پروژه، جناب آقای دکتر مرتضی شمعانیان و جناب آقای دکتر حسین ادريس که با راهنمایی‌های مفیدشان همواره در طی انجام پروژه مرا یاری نمودند.

از همکاری کادر دانشکده‌ی مهندسی مواد و کارگاه تراشکاری، به ویژه مسئول آزمایشگاه خواص مکانیکی آقای مویدی و مسئول کارگاه تراش آقای محمدی در طی انجام این پروژه، سپاس گزارم.

همچنین از کلیه دوستان و عزیزانی که مرا در انجام این پروژه یاری نمودند، کمال تقدیر و تشکر را دارم.

علیرضا مرادی فرادنبه

بهمن ۹۱

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

و این کم‌ترین، تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

که به من طریقه زندگی و محبت کردن را آموختند
و گوهر وجودشان، نسیم کلامشان و باران محبتشان
را همواره بی هیچ منت و ادعایی ارزانیم داشتند.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
ده	فهرست شکل ها
چهارده	فهرست جدول ها
۱	چکیده

فصل اول: مقدمه

فصل دوم: مبانی علمی و مرور مطالعاتی

۵	۱-۲ معرفی و تاریخچه
۶	۲-۲ فرایند نورد تجمعی
۷	۱-۲-۲ ساخت کامپوزیت
۱۲	۳-۲ پایداری حرارتی مواد فوق ریزدانه
۱۳	۴-۲ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)
۱۳	۵-۲ پارامترهای جوشکاری
۱۴	۱-۵-۲ پارامتر زبر- هولمن
۱۵	۶-۲ حرارت ورودی جوش
۱۶	۱-۶-۲ تأثیر ابزار جوشکاری بر میزان حرارت تولیدی در قطعه
۱۸	۷-۲ شمای ظاهری جوش و ریزساختار
۱۹	۱-۷-۲ ناحیه اغتشاش
۲۰	۲-۷-۲ ناحیه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی (TMAZ)
۲۱	۳-۷-۲ ناحیه متاثر از حرارت (HAZ)
۲۱	۸-۲ مواد فوق ریزدانه و نانو ساختار
۲۲	۹-۲ جوشکاری مواد ARB شده
۲۷	۱۰-۲ جوشکاری کامپوزیت های زمینه فلزی
۳۵	۱۱-۲ جمع بندی و برنامه پژوهش حاضر

فصل سوم: مواد و روش های آزمایش

۳۶	۱-۳ مواد مصرفی
۳۸	۲-۳ تولید کامپوزیت Al/B ₄ C به روش ARB
۳۸	۳-۳ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت های تولید شده
۴۰	۴-۳ تعیین پارامترهای بهینه جوشکاری
۴۱	۵-۳ تاثیر هندسه پین های مختلف بر خواص جوش
۴۲	۶-۳ ارزیابی ریزساختاری

۴۲	.....۷-۳ بررسی خواص مکانیکی
	فصل چهارم: یافته‌ها و بحث
۴۳	.....۱-۴ تولید کامپوزیت B_4C ۴ vol.% Al به روش نورد تجمعی
۴۵	.....۱-۱-۴ بررسی ریزساختار کامپوزیت‌های اولیه
۴۷	.....۲-۱-۴ بررسی خواص کششی و سختی
۴۸	.....۳-۱-۴ بررسی سطوح شکست
۵۰	.....۲-۴ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت تولید شده
۵۲	.....۱-۲-۴ استفاده از صفحات آغازگر
۵۲	.....۲-۲-۴ انتخاب محدوده سرعت چرخش و سرعت جوشکاری
۵۴	.....۳-۲-۴ بررسی ریزساختار جوش
۶۱	.....۴-۲-۴ اندازه‌گیری دما و بررسی پروفیل‌های دمایی
۶۵	.....۵-۲-۴ پروفیل سختی ناحیه‌ی جوش
۶۸	.....۶-۲-۴ بررسی خواص کششی اتصالات ایجاد شده
۷۳	.....۷-۲-۴ بررسی سطوح شکست
۷۵	.....۳-۴ بررسی اثر هندسه‌ی پین
۷۵	.....۱-۳-۴ بررسی ریزساختاری
۷۶	.....۲-۳-۴ بررسی رفتار ضربانی در پین‌های با وجوه تخت
۷۸	.....۳-۳-۴ بررسی سختی
۷۹	.....۴-۳-۴ بررسی خواص کششی
۸۲	.....۴-۴ تحلیل کلی و جمع‌بندی
	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۸۴	.....۱-۵ نتیجه‌گیری
۸۷	.....۲-۵ پیشنهادها

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۷	شکل ۱-۲ اصول فرایند ARB.....
۸	شکل ۲-۲ تصویر SEM مربوط به کامپوزیت Al/B ₄ C تولید شده بعد از سیکل آخر به روش الف (ARB، ب) RRB.....
۹	شکل ۳-۲ تصویر TEM مربوط به کامپوزیت Al/B ₄ C تولید شده به روش ARB پس از هشت سیکل متوالی.....
۹	شکل ۴-۲ تصویر SEM مربوط به کامپوزیت Al/B ₄ C تولید شده به روش RRB در پایان سیکل آخر.....
۱۰	شکل ۵-۲ منحنی تنش- کرنش مهندسی کامپوزیت Al/B ₄ C تولید شده به روش ARB و RRB و آلومینیم خالص.....
۱۱	شکل ۶-۲ تصویر میکروسکوپ نوری از صفحه RD-ND نمونه کامپوزیت Al/B ₄ C با ۷/۷ درصد پودر B ₄ C در دو بزرگنمایی متفاوت.....
۱۱	شکل ۷-۲ تصویر میکروسکوپ نوری کامپوزیت Al/10 vol.% B ₄ C بعد از انجام فرایند ARB، الف) یک سیکل، ب) سه سیکل، ج) پنج سیکل، د) هفت سیکل.....
۱۳	شکل ۸-۲ شماتیک جوشکاری FSW.....
۱۶	شکل ۹-۲ شماتیک ابزار جوشکاری و سهم هر قسمت از آن در تولید حرارت.....
۱۹	شکل ۱۰-۲ شمای کلی از نواحی مختلف تشکیل شده در جوش FSW.....
۲۰	شکل ۱۱-۲ ریزساختار ناحیه TMAZ در آلیاژ AA7075 با فرایند FSW.....
۲۱	شکل ۱۲-۲ ریزساختارهای رسوبات در جلو و در امتداد مرزخانه‌ها: الف) فلز پایه، ب) HAZ، ج) TMAZ در نزدیکی ناحیه HAZ، د) TMAZ در نزدیکی ناحیه اغتشاش یافته در آلیاژ FSW شده‌ی AA7075-T651 (v=15 mm/min، ω=350 rpm).....
۲۲	شکل ۱۳-۲ تصویر TEM از آلیاژ آلومینیم AA1100 تولید شده به روش ARB پس از ۶ سیکل.....
۲۳	شکل ۱۴-۲ پروفیل‌های سختی مربوط به ناحیه اغتشاشی مواد ARB شده و مواد خام اولیه آلیاژ آلومینیم AA1100 جوشکاری شده به روش FSW.....
۲۴	شکل ۱۵-۲ تصاویر TEM الف) ناحیه اغتشاشی، ب) ناحیه اغتشاشی نزدیک TMAZ، ج) TMAZ در آلیاژ AA1100 تولید شده به روش ARB.....
۲۵	شکل ۱۶-۲ نمودارهای توزیع سختی جوش FSW، الف) AA1050، ب) AA6016، عدد x در N _x تعداد پاس‌های نورد می‌باشد.....
۲۵	شکل ۱۷-۲ تصاویر TEM از نمونه‌های آلومینیم ARB شده، الف) ماده اولیه، ب) ناحیه اغتشاشی در CFSW، ج) ناحیه اغتشاشی در IFSW.....
۲۶	شکل ۱۸-۲ پروفیل سختی نمونه‌های آلومینیم تولید شده به روش ARB و جوشکاری شده در حالت‌های CFSW و IFSW.....
۲۶	شکل ۱۹-۲ منحنی تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های آلومینیم تولید شده به روش ARB و جوشکاری شده در حالت‌های مختلف.....
۲۸	شکل ۲۰-۲ تصاویر ریزساختار کامپوزیت Al/B ₄ C الف) نمای کلی از اتصال لیزر، ب) ماده اولیه، ج) ناحیه جوش زیر میکروسکوپ نوری و د) ناحیه جوش زیر میکروسکوپ SEM.....
۲۹	شکل ۲۱-۲ ریزساختار مربوط به کامپوزیت Al/SiC الف) فلز پایه و ب) دکمه‌ی جوش.....
۲۹	شکل ۲۲-۲ سختی جوش FSW کامپوزیت AA2024/SiC در بالا، پایین و وسط ضخامت عمود بر راستای جوشکاری.....

- شکل ۲-۲۳ تصویر میکروسکوپ نوری، الف) ماده‌ی اولیه، ب) ناحیه دکمه‌ی جوش کامپوزیت Al/Al₂O₃ ۳۰
- شکل ۲-۲۴ پروفیل ریزسختی در امتداد جوش FSW کامپوزیت Al/Al₂O₃ ۳۱
- شکل ۲-۲۵ تصویر میکروسکوپ نوری از الف) ماده اولیه، ب) دکمه جوش کامپوزیت Al-16%B₄C ۳۱
- شکل ۲-۲۶ پروفیل ریزسختی اتصال حاصل از جوشکاری FSW کامپوزیت Al-16% B₄C ۳۲
- شکل ۲-۲۷ پروفیل ریزسختی از مقطع عرضی اتصال جوش FSW غیرمشابه کامپوزیت Al/B₄C و آلیاژ Al-6063 ۳۲
- شکل ۲-۲۸ نواحی مختلف شکل یافته در طی FSW کامپوزیت Al/TiB₂ با هندسه پین الف) شش ضلعی مخروطی و ب) مربعی مستقیم ۳۳
- شکل ۲-۲۹ ریزساختار دکمه جوش با استفاده هندسه پین الف) مربعی مستقیم و ب) شش ضلعی مخروطی ۳۴
- شکل ۳-۱ ریزنگار ذرات B₄C مورد استفاده به عنوان تقویت کننده ۳۷
- شکل ۳-۲ الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه‌ی پودری B₄C ۳۷
- شکل ۳-۳ شماتیک انجام جوشکاری کامپوزیت Al/B₄C با استفاده از تکنیک ورق‌های آغازگر و موقعیت ترموکوپل‌ها در این تحقیق ۳۹
- شکل ۳-۴ شماتیک انجام جوشکاری FSW و نحوه‌ی قرارگیری ابزار جوشکاری نسبت به خط نرمال در طی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت Al/B₄C ۴۱
- شکل ۳-۵ ابزار جوشکاری با هندسه پین‌های مختلف مورد استفاده در این تحقیق، الف) استوانه‌ای، ب) مثلثی، ج) مربعی، د) شش ضلعی ۴۲
- شکل ۳-۶ تصویر مقطع عرضی جوش و محورهای ND، TD و RD برای مشخص کردن مقطع کامپوزیت اولیه و جوشکاری شده ۴۲
- شکل ۴-۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع ND-TD کامپوزیت B₄C ۴vol.% Al پس از: الف) ۶، ب) ۸ و ج) ۱۰ سیکل فرایند ARB ۴۴
- شکل ۴-۲ چسبندگی ذرات B₄C به زمینه و کیفیت پیوند ایجاد شده بین لایه‌های آلومینیوم و نیز در فصل مشترک زمینه با ذرات کامپوزیت Al-۴vol.% B₄C ۱۰ سیکل فرایند ARB ۴۶
- شکل ۴-۳ الگوی پراش پرتو ایکس از مقطع ND-TD نمونه کامپوزیتی تولید شده ۴۶
- شکل ۴-۴ منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی مربوط به نمونه‌ی آنیل شده، آلومینیم خالص و کامپوزیت ساخته شده توسط فرایند ARB ۴۷
- شکل ۴-۵ تصویر SEM از سطح شکست نمونه کامپوزیتی Al/B₄C بعد از آزمون کشش ۴۸
- شکل ۴-۶ الف) و ب) تصاویر SEM با بزرگنمایی بالاتر از سطح شکست نمونه کامپوزیتی Al/B₄C بعد از آزمون کشش ۴۹
- شکل ۴-۷ الف) اتصال مربوط به نمونه کامپوزیتی Al/B₄C جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی و بدون استفاده از صفحات آغازگر و ب) همان تصویر با بزرگنمایی بالاتر ۵۲
- شکل ۴-۸ الف) ظاهر جوش اتصال حاصل از شرایط ۱۰۰ mm/min-۵۶۰ rpm و ب) همان تصویر با بزرگنمایی بالاتر ۵۳
- شکل ۴-۹ ظاهر جوش ایجاد شده در اتصال حاصل از متغیر ۳۰۰ mm/min-۵۶۰ rpm ۵۳
- شکل ۴-۱۰ اتصال جوش ایجاد شده با سرعت چرخش ۷۱۰ rpm و سرعت پیشروی ۲۰۰ mm/min ۵۴
- شکل ۴-۱۱ تصاویر مربوط به ناحیه اغتشاش جوش حاصل از سرعت چرخش ۵۶۰ rpm و سرعت‌های پیشروی الف) ۳۰۰ و

(ب) ۲۰۰ mm/min ۵۶
 شکل ۱۲-۴ وضعیت اتصال‌های ایجاد شده با سرعت‌های چرخش و پیشروی متفاوت. ۵۶
 شکل ۱۳-۴ تصاویر SEM از ناحیه‌ی اغتشاشی اتصال‌های ایجاد شده با سرعت‌های چرخش و پیشروی به ترتیب
 الف) (الف) ۳۰۰ mm/min-۷۱۰ rpm، ب) (ب) ۲۰۰ mm/min-۷۱۰ rpm، ج) (ج) ۳۰۰ mm/min-۹۰۰ rpm،
 د) (د) ۲۰۰ mm/min-۹۰۰ rpm ۵۷
 شکل ۱۴-۴ تصاویر SEM از ناحیه‌ی اغتشاشی اتصال‌های ایجاد شده با سرعت‌های چرخش و پیشروی به ترتیب
 الف) (الف) ۳۰۰ mm/min-۷۱۰ rpm، ب) (ب) ۲۰۰ mm/min-۷۱۰ rpm، ج) (ج) ۳۰۰ mm/min-۹۰۰ rpm،
 د) (د) ۲۰۰ mm/min-۹۰۰ rpm ۵۹
 شکل ۱۵-۴ درصد توزیع ذرات با مساحت‌های مختلف در منطقه‌ی اغتشاش جوش‌های حاصل از سرعت‌های چرخش ۷۱۰ و
 ۹۰۰ rpm و سرعت‌های پیشروی ۲۰۰ و ۳۰۰ mm/min ۶۰
 شکل ۱۶-۴ درصد توزیع ذرات با فاکتور شکل‌های مختلف در منطقه‌ی اغتشاش جوش‌های حاصل از سرعت‌های چرخش
 ۷۱۰ و ۹۰۰ rpm و سرعت‌های پیشروی ۲۰۰ و ۳۰۰ mm/min ۶۰
 شکل ۱۷-۴ ترک خوردن ذرات B₄C در سرعت‌های چرخش و پیشروی بالا، ب) همان تصویر با بزرگنمایی بالاتر ۶۰
 شکل ۱۸-۴ پروفیل‌های دمایی اندازه‌گیری شده برای سرعت چرخش ثابت ۵۶۰ rpm و سرعت‌های جوشکاری
 الف) (الف) ۲۰۰ و ب) (ب) ۳۰۰ mm/min ۶۱
 شکل ۱۹-۴ پروفیل‌های دمایی اندازه‌گیری شده برای سرعت چرخش ثابت ۷۱۰ rpm و سرعت‌های جوشکاری
 الف) (الف) ۲۰۰ و ب) (ب) ۳۰۰ mm/min ۶۲
 شکل ۲۰-۴ پروفیل‌های دمایی اندازه‌گیری شده برای سرعت چرخش ثابت ۹۰۰ rpm و سرعت‌های پیشروی
 الف) (الف) ۲۰۰ و ب) (ب) ۳۰۰ mm/min ۶۲
 شکل ۲۱-۴ نمودار نسبت دمایی بیشینه به دمای ذوب بر حسب اندیس حرارتی. ۶۴
 شکل ۲۲-۴ ارتباط بین دمایی بیشینه‌ی منطقه‌ی اغتشاش با سرعت‌های چرخش و پیشروی مختلف. ۶۴
 شکل ۲۳-۴ الگوی پراش پرتو ایکس از مقطع ND-TD نمونه کامپوزیتی جوشکاری شده. ۶۵
 شکل ۲۴-۴ پروفیل‌های سختی به دست آمده از مقطع عرضی نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت‌های چرخش ۷۱۰ و
 ۹۰۰ rpm و سرعت‌های پیشروی ۲۰۰ و ۳۰۰ mm/min ۶۸
 شکل ۲۵-۴ محل رخداد شکست در نمونه‌های جوشکاری شده با پارامترهای مختلف بعد از آزمون کشش. ۷۰
 شکل ۲۶-۴ نمودارهای تنش- کرنش مهندسی مربوط به اتصالات جوشکاری شده با سرعت چرخش ۵۶۰ rpm
 و سرعت‌های پیشروی ۲۰۰ و ۳۰۰ mm/min ۶۹
 شکل ۲۷-۴ نمودارهای تنش - کرنش مهندسی مربوط به اتصالات ایجاد شده با سرعت‌های چرخش ۷۱۰ و ۹۰۰ rpm
 و سرعت‌های پیشروی ۲۰۰ و ۳۰۰ mm/min ۷۰
 شکل ۲۸-۴ نمودارهای ستونی مربوط به مقایسه مقادیر نسبی خواص کششی، شامل استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد
 طول برای کامپوزیت اولیه و اتصالات جوشکاری شده با سرعت‌های چرخش و پیشروی متفاوت. ۷۲
 شکل ۲۹-۴ تصاویر مربوط به سطوح مقطع شکست جوش‌های ایجاد شده با متغیرهای الف) (الف) ۳۰۰ mm/min-۷۱۰ rpm،
 ب) (ب) ۲۰۰ mm/min-۷۱۰ rpm، ج) (ج) ۳۰۰ mm/min-۹۰۰ rpm، د) (د) ۲۰۰ mm/min-۹۰۰ rpm ۷۴
 شکل ۳۰-۴ تصاویر SEM مربوط به ریزساختار ناحیه‌ی اغتشاشی جوش‌های ایجاد شده با پارامتر ۳۰۰ mm/min-۹۰۰ rpm

و پین ابزار الف) استوانه‌ای، ب) مربعی، ج) مثلثی و د) شش ضلعی. ۷۶.....

شکل ۳۱-۴ میانگین مقادیر سختی ناحیه اغتشاشی جوش‌های ایجاد شده با هندسه ابزار مختلف و پارامتر ۷۸..... ۹۰۰ rpm-۳۰۰ mm/min

شکل ۳۲-۴ محل رخداد شکست در نمونه‌های جوشکاری شده با هندسه پین‌های مختلف و شرایط ثابت ۹۰۰ rpm و ۳۰۰ mm/min بعد از آزمون کشش ۸۱

شکل ۳۳-۴ نمودارهای تنش- کرنش مهندسی مربوط به اتصالات جوشکاری شده با هندسه پین مختلف و شرایط ثابت جوشکاری ۹۰۰ rpm-۳۰۰ mm/min..... ۸۰

شکل ۳۴-۴ نمودار ستونی مربوط به مقایسه خواص کششی کامپوزیت اولیه با نمونه‌های جوشکاری شده به وسیله هندسه پین مختلف و شرایط ثابت جوشکاری ۹۰۰ rpm-۳۰۰ mm/min..... ۸۳

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ خواص مکانیکی اتصالات FSW با استفاده از هندسه پین‌های مختلف	۳۵
جدول ۱-۳ ترکیب شیمیایی ورق‌های آلومینیم مورد استفاده در تحقیق	۳۶
جدول ۲-۳ برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی آلومینیم ۱۰۵۰ آنیل شده مورد استفاده در این تحقیق	۳۷
جدول ۳-۳ برخی از خواص فیزیکی پودر B ₄ C مورد استفاده در این تحقیق	۳۷
جدول ۴-۳ پارامترهای مورد استفاده در جوشکاری FSW کامپوزیت Al/B ₄ C	۴۱
جدول ۱-۴ رابطه بین حجم استاتیک و حجم دینامیک برای هندسه پین‌های مختلف	۷۷
جدول ۲-۴ تاثیر پروفیل پین بر مدار دینامیکی و رفتار ضربانی	۷۷

چکیده

در این پژوهش کامپوزیت B_4C ۴vol.% Al به روش نورد تجمعی و پس از ۱۰ سیکل نورد متوالی تولید شد. سپس جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نمونه‌های کامپوزیتی با سرعت‌های چرخش ابزار ۵۶۰، ۷۱۰ و ۹۰۰ rpm و سرعت‌های جوشکاری ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ mm/min انجام شد. به منظور بررسی تاثیر هندسه پین ابزار جوشکاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی، نمونه‌های کامپوزیتی با سرعت چرخش و پیشروی ثابت به ترتیب ۹۰۰ rpm و ۳۰۰ mm/min و با استفاده از چهار هندسه پین مختلف شامل، استوانه‌ای، مربعی، مثلثی و شش ضلعی تحت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفتند. بررسی‌های ریزساختاری کامپوزیت اولیه نشان داد که انجام ۱۰ سیکل فرآیند نورد تجمعی، سبب خرد شدن و توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه‌ی آلومینیومی شده است. بررسی خواص مکانیکی نیز نشان داد که استحکام کششی و سختی کامپوزیت تولید شده به ترتیب ۲/۹ و ۲/۴ برابر مقادیر مربوط به آلومینیم آنیل شده اولیه است، در حالی که درصد ازدیاد طول از ۴۱٪ به ۸/۵٪ کاهش یافت. سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی، حضور حفره‌ها و دیمل‌های هم‌محور را نشان داد که بیانگر مکانیزم شکست نرم در این مواد می‌باشد. انجام جوشکاری با سرعت‌های چرخش مختلف و سرعت جوشکاری ۱۰۰ mm/min به دلیل سرعت پیشروی کم ابزار و وارد شدن فشار زیاد از طرف ابزار جوشکاری به ساختار لایه‌لایه کامپوزیت اولیه، موفقیت آمیز نبود و اتصال برقرار نشد. جوشکاری با سرعت چرخش ۵۶۰ rpm و سرعت‌های پیشروی ۲۰۰ و ۳۰۰ mm/min نیز به علت حرارت جوشکاری کم وارد شده به قطعه و عدم سیلان و امتزاج مناسب ماده‌ی حول پین، باعث ایجاد حفره‌هایی در ریزساختار جوش‌های مربوطه شد که کاهش شدید خواص مکانیکی را به دنبال داشت. انجام جوشکاری با سرعت‌های چرخش بالاتر به علت اعمال حرارت ورودی بیشتر به نمونه باعث ایجاد اتصالات سالم و بدون عیبی شد. بررسی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده با سایر متغیرهای جوشکاری نشان داد که تاثیر حرارت ورودی و اندازه دانه نهایی ساختار جوش بر خواص اتصالات حاصل، بیشتر از نقش اندازه ذرات تقویت کننده و توزیع آن‌ها در زمینه است. نتایج نشان داد که با انجام جوشکاری در حالت ۲۰۰ mm/min - ۹۰۰ rpm به علت حرارت ورودی بیشتر و رشد سریع تر دانه‌های تبلور مجدد یافته در منطقه‌ی جوش، کم‌ترین میزان استحکام کششی و سختی و بیشترین درصد ازدیاد طول حاصل شد. شرایط بهینه نیز از لحاظ بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی برای اتصال ایجاد شده با پارامتر ۳۰۰ mm/min - ۷۱۰ rpm به دست آمد که به علت حرارت ورودی کمتر، بیشترین میزان استحکام کششی و سختی و کم‌ترین درصد ازدیاد طول را نشان داد. سطح شکست نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخش بیشتر و یا سرعت پیشروی کمتر، حفره‌ها و دیمل‌های بزرگ‌تری را در مقایسه با سایر نمونه‌های نشان داد. نتایج ریزساختاری و خواص مکانیکی مربوط به اتصالات جوشکاری شده با هندسه پین‌های مختلف نشان داد که پین مربعی به علت فاکتور اغتشاشی ضربانی بالاتر، خرد شدن بیشتر و توزیع یکنواخت تر ذرات تقویت کننده در زمینه را ایجاد کرده است که در نتیجه بیشترین میزان استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی برای اتصال حاصل از آن ایجاد شده است. به علت سیلان و امتزاج نا مناسب ماده‌ی اطراف پین شش ضلعی، عیوب حفره‌ای شکل در ریزساختار جوش ایجاد شده به وسیله‌ی این پین مشاهده شد که باعث افت خواص مکانیکی شد به نحوی که اتصال جوشکاری حاصل، کم‌ترین میزان استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی را از خود نشان داد.

کلمات کلیدی: نورد تجمعی، کامپوزیت، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، حرارت ورودی، ریزساختار، خواص مکانیکی، هندسه پین ابزار.

فصل اول

مقدمه

کامپوزیت‌های با زمینه فلزی آلومینیمی (Al MMCs)¹ به علت ویژگی‌هایی چون نسبت استحکام به وزن بالا، مدول ویژه بالا، ضریب انبساط حرارتی کم، خصوصیات شکست مطلوب و مقاومت سایشی خوب، به عنوان گروهی از مواد توسعه یافته جدید مورد توجه قرار گرفته و کاربردهای فراوانی در خودروسازی، صنایع هوا-فضا و سایر صنایع پیدا کرده‌اند. SiC، Al₂O₃، TiC و B₄C به عنوان ذرات تقویت کننده سرامیکی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی به کار برده می‌شوند. از مزایای کاربرد بور (B₄C) که کاربرد آن را گسترش داده است می‌توان به ذوب آن در دمای بالا، خواص مکانیکی عالی، مقاومت شیمیایی بالا و جذب نوترون توسط آن اشاره کرد. با وجود تمام این مزایا، پایین بودن چقرمگی شکست کاربرد بور مهم‌ترین عیب آن محسوب می‌شود. کاربرد بور بعد از الماس و نیتراید بور مکعبی، سخت‌ترین ماده به شمار می‌آید. کاربرد کامپوزیت‌های Al/B₄C شامل استفاده از آن‌ها در ساختار جذب کننده‌های نوترونی، مواد ابزارآلات زره‌ای و مواد زیرلایه برای دیسک‌های سخت کامپیوتر می‌باشد. فرایندهای تولید کامپوزیت‌های Al MMCs شامل فرایند ریخته‌گری، فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید² و متالورژی پودر می‌باشد.

این در حالی است که از یک سو اکثر این فرایندها نیاز به ابزارآلات و تجهیزات گران قیمت پیچیده دارند و از سوی دیگر کنترل نامناسب بعضی پارامترها در این فرایندها باعث به وجود آمدن عیوبی مثل پیوند ضعیف بین تقویت کننده و زمینه، تخلخل، توزیع نامناسب ذرات و مناطق بزرگ خالی از ذرات تقویت کننده می‌شود؛ که مجموع این عوامل منجر به ایجاد محدودیت‌های زیادی به لحاظ تجاری و صنعتی در تولید کامپوزیت با این

¹ Aluminum metal matrix composites

² Severe plastic deformation

روش‌ها می‌شود.

اخیراً دو روش جدید حالت جامد برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی بر پایه فرایند اتصال نوردی پیشنهاد شده است. این روش‌ها شامل اتصال نورد تجمعی (ARB)^۱ و اتصال نورد تکراری (RRB)^۲ می‌باشد. در روش ARB دو ورق از آلیاژهای مختلف پس از قرار گرفتن بر روی هم، چندین پاس تحت فرایند نورد قرار می‌گیرند. تغییر شکل‌های مختلفی که در اثر فرایند ARB ایجاد می‌شود، در نهایت منجر به ایجاد ساختاری با دانه‌های بسیار ریز و استحکام و انعطاف‌پذیری بالا می‌شود. تولید کامپوزیت به شکل ورق، تولید کامپوزیت با ساختار نانو کریستال و دانه‌های بسیار ریز (UFG)^۳، عدم نیاز به امکانات و تجهیزات گران‌بها، نرخ تولید بالا و محدودیت کم در اندازه مواد مورد استفاده برای تولید، از جمله مزایای روش ARB می‌باشد.

یکی از مواردی که پس از تولید مواد پیشرفته باید مورد توجه قرار گیرد، امکان انجام فرایندهای مختلفی از جمله شکل‌دهی، آسیاب کاری، جوشکاری و غیره بر روی این گونه مواد می‌باشد. چنانچه ماده مورد نظر به لحاظ توانایی انجام چنین فرایندهایی با محدودیت مواجه شود، ماده تولید شده از دیدگاه صنعتی ارزش چندانی نخواهد داشت. برای مثال فرایند جوشکاری مواد کامپوزیتی می‌تواند مشکلات خاص خود را داشته باشد. آگلومره شدن ذرات تقویت‌کننده و همچنین امکان تشکیل فازهای بین‌فلزی که در پاره‌ای از موارد می‌تواند به کیفیت جوش حاصله آسیب وارد کند مواردی هستند که باید در جوشکاری این مواد لحاظ شوند. از این رو برای جوشکاری کامپوزیت‌ها از روش‌های جوشکاری حالت جامد می‌توان استفاده نمود. در این حالت حرارت ورودی به قطعه جوشکاری شده کاهش می‌یابد و بنابراین میزان تغییرات فازی و آگلومره شدن ذرات کاهش می‌یابد.

یکی از روش‌های جوشکاری حالت جامد، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)^۴ می‌باشد. این روش مزایای زیادی را در پی دارد که از آن جمله می‌توان به حفظ خواص مکانیکی، اعوجاج کمتر، تنش‌های پسماند کمتر و عیوب کمتر جوشکاری اشاره نمود. در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت‌ها و مواد فوق ریزدانه تحقیقات زیادی انجام شده است؛ اما در تمام این موارد، کامپوزیت‌های مورد نظر با استفاده از فرایندهایی نظیر ریخته‌گری و متالورژی پودر تولید شده‌اند. همچنین موادی که ARB شده و به روش FSW جوشکاری شده‌اند، در بیشتر موارد شامل آلومینیم خالص تجاری یا آلومینیم آلیاژی بوده و لذا تا کنون در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت‌های تولید شده توسط روش ARB اقدامات کمی صورت گرفته است در حالی که فرایند صنعتی شدن این کامپوزیت‌ها به وجود روش مناسب و پارامترهای بهینه برای جوشکاری نیاز دارد. بنابراین باید کارهای بیشتری در زمینه جوشکاری FSW مواد ARB شده، به خصوص برای مواد کامپوزیتی تقویت شده با ذرات سرامیکی نظیر کامپوزیت Al/B₄C صورت گیرد تا پارامترهای بهینه جوش برای رسیدن به خواص نهایی بهتر مشخص شود؛ لذا انجام پروژه حاضر، امری ضروری و لازم به نظر می‌رسد.

هدف از این پژوهش، ابتدا تولید کامپوزیت Al/B₄C توسط فرایند نورد تجمعی و بررسی ریزساختار و خواص

^۱ Accumulative roll bonding

^۲ Repeated roll bonding

^۳ Ultrafine grain

^۴ Friction stir welding

مکانیکی کامپوزیت تولید شده می‌باشد. در مرحله بعد، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت‌های تولید شده به روش ARB، انجام شده و به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری شده و مقایسه آن با ماده اولیه، پرداخته می‌شود. همچنین تاثیر متغیرهای مختلف جوشکاری، از جمله سرعت چرخش و پیشروی ابزار و هندسه پین بر نحوه خرد شدن و توزیع ذرات تقویت کننده در منطقه جوش مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا فصل دوم این پایان نامه به بیان روش‌های مختلف تولید کامپوزیت‌ها از جمله تولید کامپوزیت به روش ARB و بررسی خواص آن و همچنین فرایندهای مختلف جوشکاری کامپوزیت‌ها به ویژه فرایند FSW و تحقیقات انجام شده در این زمینه‌ها می‌پردازد. فصل سوم، مواد مورد استفاده، نحوه تولید کامپوزیت Al/B₄C به روش ARB و جوشکاری FSW آن و همچنین آزمایش‌های مختلف صورت گرفته روی ماده اولیه و اتصالات جوشکاری شده را بیان می‌کند. در فصل چهارم نیز به بیان نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و بحث بر روی آن‌ها پرداخته می‌شود. در نهایت در فصل پنجم، نتیجه‌گیری از این پژوهش بیان می‌گردد.

فصل دوم

مبانی علمی و مرور مطالعاتی

۲-۱ معرفی و تاریخچه

مشکل ساخت جوش‌های با استحکام بالا و مقاوم به خستگی و شکست در آلیاژهای آلومینیم هوا-فضا نظیر آلومینیم‌های سری 2XXX و 7XXX وجود دارد. به خاطر ریزساختار انجمادی ضعیف و خلل و فرج‌هایی که در منطقه مذاب^۱ باقی می‌ماند و همچنین خواص مکانیکی ضعیف منطقه جوش در مقایسه با فلز پایه، این نوع را به عنوان آلومینیم غیر قابل جوش طبقه بندی می‌کنند. بعضی آلومینیم‌ها نیز قابلیت جوشکاری دارند ولی در عوض با اکسیدهای سطحی مشکل بزرگی دارند که بر طرف کردن آن نیز گران می‌باشد [۲۰۱].

روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) به عنوان یک تکنیک اتصال جامد نخستین بار در سال ۱۹۹۱ توسط انستیتو جوشکاری انگلستان (TWI)^۲ به منظور اتصال ورق‌های نازک آلومینیمی و منیزیمی اجرا شد. در جوشکاری FSW، مواد در گرمای بالا تغییر شکل زیادی می‌دهند و ساختار نهایی، دانه‌های کریستالی هم‌محور و خوبی دارد و همچنین دارای خواص مکانیکی مطلوبی است. این روش مزایای زیادی در پی دارد که از آن جمله می‌توان به حفظ خواص مکانیکی، اعوجاج کمتر، تنش‌های پسماند کمتر و عیوب کمتر جوشکاری اشاره نمود. از این روش در طی سال‌های اخیر جهت جوشکاری کامپوزیت‌ها استفاده شده است [۴۰۳].

FSW به عنوان مهم‌ترین پیشرفت در اتصال فلزات در دهه‌ی اخیر قابل توجه بوده و به علت بازده انرژی بالا و سازگاری با محیط و تطبیق‌پذیری آن تکنولوژی سبز نامیده می‌شود. در مقام مقایسه با روش‌های جوشکاری مرسوم، FSW انرژی بسیار کمتری مصرف می‌کند و هیچ گاز محافظ یا سرباره‌ای استفاده نمی‌شود، لذا این فرایند

^۱ Fusion zone

^۲ The welding institute

سازگار با محیط زیست است. اتصال ایجاد شده هیچ‌گونه فلز پر کننده ای ندارد، بنابراین هر نوع آلیاژ آلومینیم بدون نگرانی از به هم خوردن ترکیبش که در جوشکاری ذوبی وجود دارد، می‌تواند اتصال داده شود. در مقایسه با روش جوشکاری اصطکاکی که معمولاً بر روی قطعات کوچک که نسبت به هم قرینه می‌چرخند و فشار داده می‌شوند تا اتصال یابند؛ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در انواع مختلف اتصالات مانند اتصال سر به سر^۱، اتصال لب به لب^۲، اتصال T شکل^۳ و اتصالات گوشه‌ای^۴ به کار می‌رود [۱].

۲-۲ فرایند نورد تجمعی

در تمام فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید که قبلاً استفاده می‌شد، عدم تغییر ابعاد نمونه پس از هر سیکل فرایند باعث می‌شد که تکرار فرایند به آسانی امکان‌پذیر باشد و به این ترتیب کرنش زیادی به ماده اعمال گردد، اما این فرایندها دو محدودیت عمده دارند؛ اول اینکه ماشین‌های شکل‌دهی با ظرفیت بار بالا و قالب‌های گران قیمت برای این فرایندها ضروری است. محدودیت دوم پایین بودن میزان تولید و محدود بودن ابعاد محصول نهایی می‌باشد. بنابراین این فرایندها برای کاربرد عملی مخصوصاً برای مواد با اندازه بزرگ مانند ورق‌های فلزی مناسب نیستند. با توجه به این محدودیت‌ها در سال ۱۹۹۸ میلادی یک فرایند تغییر شکل پلاستیکی شدید از نورد به نام نورد تجمعی توسط سائتو^۵ و همکاران ابداع شد [۵]. فرایند ARB توانایی بالایی برای تولید پیوسته‌ی مواد دارد. این روش تنها فرایند تغییر شکل پلاستیکی شدید است که در آن از تغییر شکل توسط نورد به تنهایی استفاده می‌شود. نورد مفیدترین فرایند فلز کاری برای تولید پیوسته‌ی صفحات، ورق‌ها و شمش‌ها می‌باشد [۷و۶].

این فرایند شامل تکرار مراحل آماده سازی سطح دو ورق فلزی یکسان، روی هم قرار دادن آن‌ها، نورد دو ورق با کاهش ضخامت ۵۰٪ و برش در راستای طولی ورق پس از پیوند می‌باشد. قبل از روی هم قرار دادن ورق‌ها عملیات سطحی مانند چربی‌زدایی و برس کاری حتماً باید انجام شود تا پیوند مناسبی بین دو ورق به وجود آید. چربی‌زدایی معمولاً با قرار دادن ورق‌ها در محلولی مناسب مانند استون انجام می‌شود. برای جلوگیری از لغزش ورق‌ها زیر غلتک‌های نورد، باید آن‌ها را با سیم‌های فولادی یا مسی و یا به کمک گیره به هم متصل کرد. البته در برخی مواد مانند فولادها می‌توان از جوش نقطه‌ای برای دو ورق استفاده نمود [۵].

از آنجایی که با اعمال کرنش زیاد و تغییر شکل پلاستیکی شدید در هر مرحله، ساختار ماده به سمت ترد شدن پیش می‌رود؛ لذا ممکن است جوشکاری این کامپوزیت‌ها با ساختار ترد، با مشکل مواجه شود. در همین راستا اخیراً روش اتصال نوردی دیگری تحت عنوان روش نورد تجمعی پیوسته^۶ ابداع شده است که با انجام آنیل نمونه بعد از هر پاس نورد، تا مقدار زیادی از تردی ایجاد شده در کامپوزیت کاهش می‌یابد [۸-۱۱].

^۱ Butt joint

^۲ lap joint

^۳ T butt joint

^۴ Fillet joint

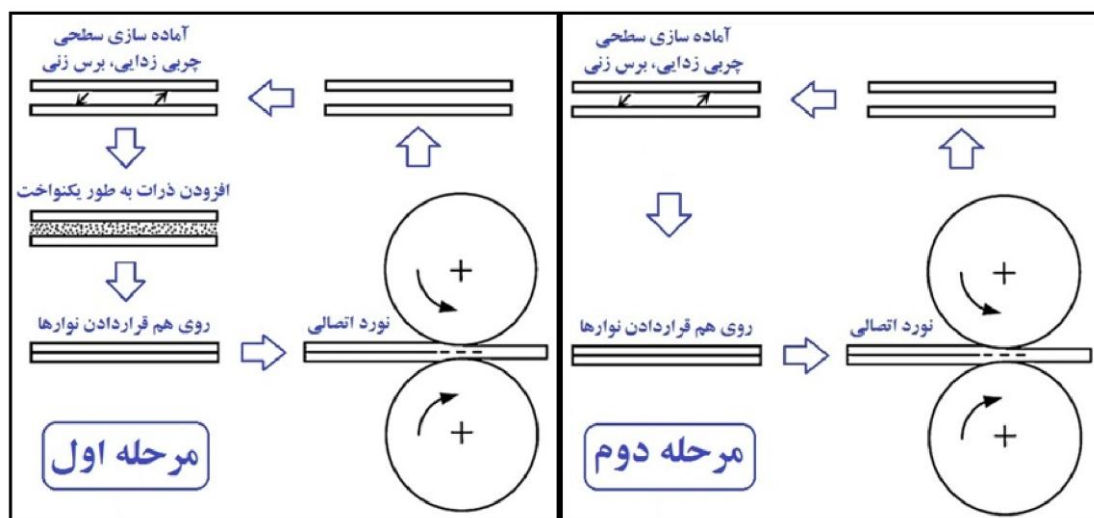
^۵ Saito

^۶ Continual annealing and roll bonding

۲-۱-۲ ساخت کامپوزیت

کامپوزیت‌های زمینه فلزی^۱ موادی هستند که تقویت‌کننده‌های سرامیکی سخت، در یک زمینه فلزی یا آلیاژی انعطاف‌پذیر قرار می‌گیرد. اندازه، شکل و نحوه توزیع تقویت‌کننده‌ها در زمینه از عوامل موثر بر استحکام این کامپوزیت‌ها می‌باشد [۱۲]. در چند سال گذشته، تمایل به تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی به منظور استفاده در صنایع هوا-فضا و اتومبیل و دیگر کاربردهای ساختاری افزایش یافته است. در این میان کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی به علت داشتن دانسیته کم، صلیبت زیاد و نرخ سایش کم، مواد امیدبخشی برای صنایع هوا فضا، اتومبیل، دریایی، تولید انرژی هسته‌ای و دیگر کاربردهای ساختاری به شمار می‌آیند [۱۳-۱۵].

در حین فرایند تغییر شکل ARB در سیستم‌هایی که از دو آلیاژ مختلف در آن‌ها استفاده می‌شود، به دلیل اختلافی که در خواص مکانیکی دو آلیاژ وجود دارد، یکی از آن‌ها زودتر به حد اشباع خود از نظر تحمل کرنش می‌رسد و در نتیجه هنگامی که کرنش‌ها افزایش پیدا می‌کنند، لایه سخت‌تر گسیختگی زودرسی را تجربه می‌کند؛ به این ترتیب کامپوزیت مورد نظر ساخته می‌شود [۱۶-۱۸]. ساخت این گونه کامپوزیت‌ها معمولاً شامل دو مرحله‌ی مختلف است که در شکل ۱-۲ آورده شده است.



شکل ۱-۲ اصول فرایند ARB [۵].

در مرحله اول، ورق‌ها ابتدا در حمام استون شستشو داده می‌شوند و سپس به کمک برس مخصوص، سطح آن‌ها خراش‌دار می‌شود. آنگاه، ذرات تقویت‌کننده به طور یکنواخت بین دو ورق اضافه می‌شود. به منظور جلوگیری از سر خوردگی ورق‌ها بر روی یکدیگر لازم است که ساندویچ تهیه شده توسط سیم از چهارگوش محکم شود. ساندویچ تهیه شده در نهایت نورد شده تا به ضخامت مورد نظر جهت فرایند ARB برسد. بعد از آن ساندویچ نورد شده از مرحله‌ی قبل، نصف شده و دوباره عملیات آماده‌سازی سطوح جدید شامل تمیزکاری با استون، خشک

^۱ Metal matrix composites