



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش جوشکاری

عنوان

اتصال آلومینیوم ۶۰۶۱ به مس خالص به روش اصطکاکی اغتشاشی با

اضافه کردن نانو ذرات Sic در محل اتصال

نگارش

روح اله سیاهپوش

استاد راهنما

دکتر حمید امیدوار

دی ۱۳۹۳

اینجانب روح اله سیاهپوش متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

روح اله سیاهپوش

امضا

## تشکر و قدردانی:

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. انجام این مهم را مدیون حمایت های بی دریغ خانواده مهربانم هستم، که خستگی های این راه را به امید و روشنی تبدیل کرده اند. نهایت سپاس و تشکر فراوان از کلیه اساتید محترم دانشکده که در محضرشان کسب علم نمودم، خاصه استاد محترم جناب آقای دکتر امیدوار که با راهنمایی های فراوانشان در مراحل مختلف این پایان نامه مرا یاری نمودند. همچنین از استاد ارجمند جناب آقای مهندس اکبری تشکر ویژه دارم چرا که بدون کمک ها و راهنماییهای ایشان انجام این پایان نامه بسیار مشکل می بود.

## چکیده

اتصال مس به آلومینیوم به صورت سر به سر غالباً در صنعت برای کاربردهای الکتریکی استفاده می شود. از عمده مصارف اتصال آلومینیوم به مس در شین های انتقال جریان در ترانسفورماتورهای اصلی، ورودی و خروجی خطوط انتقال جریان و در اتصال مولدهای تولید برق به ترانسفورماتورهای اصلی می باشد. در این تحقیق، امکان متصل کردن آلیاژ آلومینیوم T6-6061 به مس خالص با ورقهایی به ضخامت ۵ میلی متر به وسیله فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با اضافه نمودن نانو ذرات کاربید سیلیسیم در محل اتصال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می دهد جوش سالم زمانی بوجود می آید که ورق مسی در سمت پیش رونده قرار گیرد و بهترین خواص مکانیکی در سرعت دورانی ۱۲۵۰ rpm و سرعت پیشروی ۱۵ میلی متر بر دقیقه حاصل شد و در مقایسه با نمونه ای که با افزودن پودر در محل اتصال انجام شد استحکام کششی در حدود ۹۵ درصد بهبود یافت که دلیل اصلی این رفتار ناشی از حضور ذرات کاربید سیلیسیم است که آزمونهای ریزساختاری صورت گرفته نیز موید این موضوع بودند. علاوه بر این نتایج آزمون ریز سختی سنجی نیز حاکی از این بود که افزودن پودر سبب افزایش سختی در محل اتصال شده است.

## واژه های کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری مس به آلومینیوم، نانو ذرات کاربید سیلیسیم، بررسی ریز ساختار، استحکام کششی، ریز سختی.

۱	مقدمه	۱
۳	مروری بر منابع مطالعاتی	۳
۴	۱-۲ مقدمه	۴
۵	۲-۲ آلیاژهای آلومینیوم گروه XXX (Al-Mg-Si)۶	۵
۵	۳-۲ مس خالص	۵
۶	۴-۲ فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)	۶
۸	۵-۲ پارامترهای فرآیند	۸
۹	۱-۵-۲ ابزار جوشکاری	۹
۱۵	۲-۵-۲ سرعت‌های دورانی و پیشروی	۱۵
۱۸	۳-۵-۲ زاویه انحراف ابزار	۱۸
۱۸	۴-۵-۲ فشار اعمالی	۱۸
۱۹	۵-۵-۲ سایر پارامترهای موثر	۱۹
۱۹	۶-۲ بررسی های ریز ساختاری	۱۹
۲۰	۱-۶-۲ منطقه اغتشاش یافته	۲۰
۲۲	۲-۶-۲ ناحیه متأثر از فرآیند ترمومکانیکی (TMAZ)	۲۲
۲۳	۳-۶-۲ منطقه تحت تاثیر حرارت (HAZ)	۲۳
۲۲	۲-۶-۲ ناحیه متأثر از فرآیند ترمومکانیکی (TMAZ)	۲۲
۲۴	۷-۲ تبلور مجدد حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی	۲۴
۲۴	۸-۲ کامپوزیتهای زمینه فلزی	۲۴
۲۶	۱-۸-۲ کامپوزیتهای زمینه فلزی تقویت شده با ذره	۲۶
۳۲	۹-۲ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فلزات ناهمجنس	۳۲
۳۵	۱۰-۲ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم به مس	۳۵
۴۴	۱۱-۲ عیوب	۴۴
۴۴	۱-۱۱-۲ عیوب جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۴۴
۴۶	۲-۱۱-۲ عیوب جوشکاری کامپوزیتهای زمینه فلزی تقویت شده با ذره	۴۶
۵۳	مواد و روش تحقیق	۵۳
۵۴	۱.۳ فلز پایه	۵۴
۵۵	۲.۳ فاز تقویت کننده	۵۵
۵۵	۳.۳ ابزار جوشکاری	۵۵
۵۷	۴.۳ نحوه انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی	۵۷
۶۴	۵.۳ پارامترهای بررسی شده	۶۴

۶۴.....	تغییر تعداد پاسهای جوشکاری.....	۱.۵.۳
۶۴.....	ریز ساختار.....	۲.۵.۳
۶۴.....	آزمون کشش.....	۳.۵.۳
۶۵.....	آزمون ریز سختی سنجی.....	۴.۵.۳
<b>۶۶.....</b>	<b>۴ نتایج و بحث.....</b>	
۶۷.....	مطالعات ریز ساختاری.....	۱.۴
۷۶.....	خواص کششی.....	۲.۴
۷۷.....	شکست نگاری.....	۳.۴
۸۳.....	ریز سختی سنجی.....	۴.۴
<b>۹۳.....</b>	<b>۵ جمع بندی و نتیجه گیری.....</b>	
۹۴.....	نتایج.....	۱.۵
۹۵.....	پیشنهادها.....	۲.۵
<b>۹۶.....</b>	<b>منابع و مراجع.....</b>	

## صفحه

## فهرست اشکال

- شکل ۲-۱ اصول فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی..... ۷
- شکل ۲-۲ نمای بالا از جبهه جوش، فلز سرد در نقش قالب و ابزار در نقش سنبه ..... ۸
- شکل ۲-۳ شکل ابزار فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی..... ۹
- شکل ۲-۴ تصویر ابزار فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پس از هر پاس ..... ۱۲
- شکل ۲-۵ شماتیکی از نمونه های ابزار فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ..... ۱۳
- شکل ۲-۶ شماتیک پین های استفاده شده در آزمایش ..... ۱۵
- شکل ۲-۷ پروفیل میکرو سختی جوش ..... ۱۶
- شکل ۲-۸ ظاهر جوش در سرعت های دورانی مختلف ..... ۱۷
- شکل ۲-۹ مناطق ریزساختاری مختلف در فراوری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ Al۷۰۷۵-T۶۱ ..... ۲۰
- شکل ۲-۱۰ اشکال مختلف منطقه اغتشاش یافته (a) بستر رودخانه ای، (b) بیضوی ..... ۲۲
- شکل ۲-۱۱ ریزساختاری منطقه تحت تاثیر ترمومکانیکی در فراوری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ Al ۷۰۷۵ ..... ۲۳
- شکل ۲-۱۲ تاثیر FSP بر خرد کردن و توزیع ذرات سیلیس. تصویر میکروسکوپ نوری از قطعه (a) ریخته شده FSP (b) ..... ۲۷
- شکل ۲-۱۳ تغییرات میزان خم شوندگی در اثر FSP در سطح و عمق (a). تغییرات انرژی شکست در اثر FSP در سطح و عمق (b) ..... ۲۹
- شکل ۲-۱۴ بهبود عمر خستگی در اثر FSP ..... ۳۰
- شکل ۲-۱۵ یکنواختی میکروسختی در اثر اعمال FSP ..... ۳۱
- شکل ۲-۱۶ تغییرات سختی با تغییرات سرعت دورانی ..... ۳۱
- شکل ۲-۱۷ تاثیر افسد ابزار بر مقدار استحکام کششی ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۸ تاثیر سرعت خطی ابزار بر استحکام ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۹ تاثیر سرعت های پیشروی مختلف در مقدار سختی ..... ۳۴
- شکل ۲-۲۰ تاثیر عملیات حرارتی اتصال بر مقدار استحکام کششی و درصد ازدیاد طول ..... ۳۵
- شکل ۲-۲۱ ماکرو گراف سطح شکست اتصال آلومینیوم ۱۳۵۰ به مس ..... ۳۷
- شکل ۲-۲۲ تصاویر SEM از سطح شکست اتصال آلومینیوم ۱۳۵۰ به مس خالص: (a) ماکروگراف سطح شکست. (b~e) بزرگنمایی میکرو ساختار مناطق مختلف در شکل (a) ..... ۳۹
- شکل ۲-۲۳ سطح شکست جوش تولید شده در سرعت جوشکاری ۹۵۰ rpm و سرعت چرخش ۵۰ mm/min ..... ۴۰
- شکل ۲-۲۴ مقطع عرضی ماکروساختار اتصال در سرعت های چرخش (a) ۴۰۰ rpm (b) ۶۰۰ rpm (c) ..... ۴۱
- شکل ۲-۲۵ (a) اتصال Al۶۰۶۱-Cu (b) منطقه بزرگنمایی شده از سطح جوش (c) منطقه بزرگنمایی شده از مقطع عرضی جوش ..... ۴۲

- شکل ۲-۲۶ ساختارهای تکرار شونده لایه ای (a) تصویر میکروسکوپ نوری از این لایه ها (b) تصویر SEM از لایه های تکرار شونده ..... ۴۳
- شکل ۲-۲۷ تصاویر (a) میکروسکوپ نوری و (b) تصویر SEM از یک قسمت مشابه از سمت پیش رونده در ناگت ..... ۴۴
- شکل ۲-۲۸ عیب حفره ..... ۴۵
- شکل ۲-۲۹ عیب نفوذ ناقص ریشه ..... ۴۶
- شکل ۲-۳۰ ریزساختار کامپوزیت AA۲۱۲۴/SiC/۲۵p در جهات طولی (L) و عرضی (T) پس از نورد ..... ۴۷
- شکل ۲-۳۱ ریزساختار SEM کامپوزیت AA2124/SiC/25P در دکمه جوش و آنالیز EDX از موقعیت های ۱، ۲ و ۳ در همان ریز ساختار ..... ۴۸
- شکل ۲-۳۲ تشکیل حفرات و تخلل ها در اطراف برخی از ذرات SiC درشت در دکمه جوش ..... ۴۹
- شکل ۲-۳۳ ترک خوردگی برخی از ذرات SiC درشت در دکمه جوش ..... ۴۹
- شکل ۲-۳۴ توزیع ذرات SiC در (a) ماده پایه ، (b) ناحیه انتقالی و (c) در ناحیه اغتشاش یافته ..... ۵۰
- شکل ۲-۳۵ بزرگنمایی کوچک و بزرگ از ریزساختار نواری شکل که حاوی ذرات SiC درشت در دکمه جوش ..... ۵۱
- شکل ۳-۱ تصویر نیم شیار ایجاد شده بر روی ورق ..... ۵۵
- شکل ۲-۲ تصویر الکترونی تهیه شده از نانو ذرات کاربرد سیلیسیم ..... ۵۵
- شکل ۳-۳ تصویر شماتیک ابزار مورد استفاده ..... ۵۷
- شکل ۳-۴ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش اول ..... ۵۸
- شکل ۳-۵ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش دوم ..... ۵۸
- شکل ۳-۶ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش سوم ..... ۵۹
- شکل ۳-۷ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش چهارم ..... ۶۰
- شکل ۳-۸ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش پنجم ..... ۶۱
- شکل ۳-۹ تصویر نمونه آماده سازی شده برای تست کشش و مشاهده ترک سطحی ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۰ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش ششم ..... ۶۳
- شکل ۴-۱ تصویر ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسه پاد ساعتگرد ..... ۶۸
- شکل ۴-۲ تصویر میکرو ساختار مس در ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسه پاد ساعتگرد ..... ۶۹
- شکل ۴-۳ تصویر میکرو ساختار آلومینیوم در ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسه پاد ساعتگرد ..... ۶۹
- شکل ۴-۴ تصویر ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسه ساعتگرد ..... ۷۰
- شکل ۴-۵ تصویر میکرو ساختار مس در ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسه ساعتگرد ..... ۷۰
- شکل ۴-۶ تصویر میکرو ساختار آلومینیوم در ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسه ساعتگرد ..... ۷۱
- شکل ۴-۷ تصویر ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسه پاد ساعتگرد ..... ۷۱
- شکل ۴-۸ تصویر میکرو ساختار مس در ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسه پاد ساعتگرد ..... ۷۲
- شکل ۴-۸ تصویر میکرو ساختار آلومینیوم در ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسه پاد ساعتگرد ..... ۷۲



- شکل ۴-۱۰ تصویر ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسه ساعتگرد ..... ۷۳
- شکل ۴-۱۱ تصویر میکرو ساختار مس در ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسه ساعتگرد ..... ۷۳
- شکل ۴-۱۲ تصویر میکرو ساختار آلومینیوم در ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسه ساعتگرد ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۳ نمودار مقایسه استحکام کششی نمونه ها ..... ۷۷
- شکل ۴-۱۴ نمودار تنش- کرنش نمونه شماره ۱۲ ..... ۷۸
- شکل ۴-۱۵ نمودار تنش- کرنش نمونه شماره ۱۳ ..... ۷۸
- شکل ۴-۱۶ نمودار تنش- کرنش نمونه شماره ۱۴ ..... ۷۹
- شکل ۴-۱۷ نمودار تنش- کرنش نمونه شماره ۱۵ ..... ۷۹
- شکل ۴-۱۸ سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۲ ..... ۸۱
- شکل ۴-۱۹ سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۳ ..... ۸۱
- شکل ۴-۲۰ سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۴ ..... ۸۲
- شکل ۴-۲۱ سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۵ ..... ۸۲
- شکل ۴-۲۲ توزیع یکنواخت تر ذرات کاربرد سیلیسیم نمونه شماره ۱۳ ..... ۸۳
- شکل ۴-۲۳ تجمع شدید ذرات کاربرد سیلیسیم در ناحیه اغتشاشی ..... ۸۴
- شکل ۴-۲۴ تجمع ذرات پودری در سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۲ با بزرگنمایی پایین ..... ۸۵
- شکل ۴-۲۵ تجمع ذرات پودری در سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۲ با بزرگنمایی بالا ..... ۸۵
- شکل ۴-۲۶ تجمع ذرات پودری در سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۴ ..... ۸۶
- شکل ۴-۲۷ پروفیل ریز سختی سنجی اتصال مس-آلومینیوم در نمونه شماره ۱۲ در راستای الف ( طولی، ب) عرضی ..... ۸۸
- شکل ۴-۲۸ تصویر نقطه متناظر با سختی ۲۱۱ ویکرز در نمونه شماره ۱۲ ..... ۸۹
- شکل ۴-۲۹ تصویر نقطه متناظر با سختی ۴۳۰ ویکرز در نمونه شماره ۱۲ ..... ۹۰
- شکل ۴-۳۰ الگوی پراش اشعه X اتصال آلیاژ ۶۰۶۱-مس خالص برای سه مقطع طولی مختلف (a) در مرکز خط جوش (b) در فاصله ۴ mm از خط جوش در سمت آلیاژ (c) در فاصله ۴ mm از خط جوش در سمت مس ..... ۹۱
- شکل ۴-۳۱ الگوی پراش اشعه X منطقه جوش اتصال آلیاژ ۱۰۶۰-مس خالص ۴۰۰ و ۱۰۰۰ rpm ..... ۹۲
- شکل ۴-۳۲ پروفیل ریز سختی سنجی اتصال مس-آلومینیوم در نمونه شماره ۱۳ در راستای الف ( طولی، ب) عرضی ..... ۹۳
- شکل ۴-۳۳ پروفیل ریز سختی سنجی اتصال مس-آلومینیوم در نمونه شماره ۱۴ در راستای الف ( طولی، ب) عرضی ..... ۹۵
- شکل ۴-۳۴ پروفیل ریز سختی سنجی اتصال مس-آلومینیوم در نمونه شماره ۱۵ در راستای الف ( طولی، ب) عرضی ..... ۹۶

## صفحه

## فهرست جداول

جدول ۱-۲	تغییر اندازه و درصد حجمی تخلخل در نتیجه FSP	۲۸
جدول ۲-۲	تغییرات خواص مکانیکی بعد از FSP	۲۸
جدول ۳-۲	تأثیر FSP بر خواص مکانیکی	۳۰
جدول ۴-۲	نتایج آزمون کشش اتصال آلیاژ ۱۰۶۰ و مس خالص	۳۶
جدول ۵-۲	خواص کششی اتصال آلیاژ آلومینیوم ۱۳۵۰-مس خالص	۳۷
جدول ۱-۳	نتایج آنالیز شیمیایی	۵۴
جدول ۲-۳	نتایج آزمون کشش	۵۴
جدول ۳-۳	مشخصات نانو ذرات کاربید سیلیسیم	۵۵
جدول ۴-۳	ویژگیهای ابزار مورد استفاده در فرآیند	۵۶
جدول ۱-۴	اندازه دانه در نمونه های جوشکاری شده با پودر	۷۵
جدول ۲-۴	مشخصات نمونه های جوشکاری شده که تحت آزمون کشش قرار گرفته اند	۷۶

۱

## فصل اول

### مقدمه

۱

## مقدمه

آلومینیوم و مس استفاده گسترده ای در کاربردهای صنعتی به ویژه در زمینه قطعات الکتریکی دارند و به دلیل خواص منحصر به فرد خود مانند هدایت الکتریکی، هدایت حرارتی، مقاومت در برابر خوردگی و خواص مکانیکی به طور گسترده ای در سازه های مهندسی استفاده می شوند. کاربرد مهم اتصال مس به آلومینیوم، کاربرد الکتریکی است (مثلا در کاتد های سلول الکترولیز آلومینیوم) به عبارت دیگر، اتصال مس به آلومینیوم غالبا برای عبور دادن جریان الکتریسیته به کار برده می شود. اتصال فلزات غیر مشابه استفاده گسترده ای در ساخت قطعات مختلف ماشین آلات و اجزای سازنده ی آنها دارد، و نحوه ی متصل کردن این نوع قطعات جای بسیاری برای تحقیق دارد. برای یک اتصال خوب که بین از دو فلز ایجاد می شود خواص فلزات بسیار مهم است. آلومینیوم و مس را نمی توان به دلیل تشکیل فاز های سخت و شکننده بین فلزی در فصل مشترک که منجر به ترک در هنگام و یا پس از جوشکاری، کاهش چقرمگی جوش و افزایش مقاومت محل اتصال به راحتی به وسیله فرایند جوشکاری ذوبی به یکدیگر متصل کرد لزوم اتصال دهی و جوشکاری این مواد باعث شده تا امروزه تحقیقات گسترده ای در خصوص استفاده از روشها و راهکارهای مناسب جهت غلبه بر محدودیتهای اتصال دهی و جوشکاری این مواد صورت پذیرد و تلاشهای متعددی برای اتصال دو فلز از طریق فرایندهای حالت جامد انجام گردید که در نهایت با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اتصال انجام گردید.

لازم به ذکر است در این تحقیق علاوه بر بکارگیری فرایند اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از نانو ذرات سرامیکی کاربرد سیلیسیم در محل اتصال سعی در افزایش خواص سطحی محل اتصال داشته که این امر باعث کاهش هزینه های ناشی از ساخت کامپوزیت شده و پس از جوشکاری تنها ناحیه جوشکاری شده کامپوزیتی می گردد.

در فصل دوم تحقیق حاضر، مروری بر منابع و تحقیقات صورت گرفته در زمینه جوشکاری و فراوری اصطکاکی اغتشاشی صورت گرفته است. در فصل سوم به مواد و روش انجام آزمایش ها اشاره شده است. نتایج آزمایش ها و بحث های مربوطه به طور مفصل در فصل چهارم شرح داده شده است. و در فصل پنجم، نتیجه گیری جهت انجام مطالعات و تحقیقات بیشتر در این زمینه یا زمینه های مشابه به صورت مختصر ذکر شده است.

۲

## فصل دوم

### مروری بر منابع مطالعاتی

۳

## ۲- مروری بر منابع

در این فصل تحقیقات انجام شده در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیر همجنس و فراوری اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفته و به طور خلاصه برجسته ترین مطالب آن نگارنده شده است.

### ۲-۱ مقدمه

پیشرفت در اتصال دادن سالم و بی عیب مواد غیر همجنس برای کاربردهای هوافضا، حمل و نقل، تولید قدرت و صنایع الکترونیک دارای اهمیت بالایی است. اما اتصال دادن مواد غیر همجنس به وسیله جوش ذوبی به دلیل جوش پذیری ضعیف ناشی از خواص شیمیایی، مکانیکی و گرمایی مختلف مواد جوش شده و همچنین به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی سخت و شکننده در مقیاس بزرگ در فصل مشترک جوش بسیار مشکل است [۱].

مس و آلومینیوم به طور گسترده ای در سازه های مهندسی به دلیل کارایی بی نظیر مانند هدایت الکتریکی بالا، هدایت گرمایی، مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی استفاده شده اند. در صورتیکه بتوان آنها را به هم متصل نمود ممکن است اختلاف زیادی در ساختار و کارایی اتصال آنها به یکدیگر ایجاد شود. به علاوه آنکه آلومینیوم به راحتی در دمای بالا اکسید می شود و در اتصال لحیم سخت و جوش ذوبی مس ترکیب جوش به سادگی به وجود می آید و در جوش ذوبی یا فشاری از ترکیبات بین فلزی مس-آلومینیوم که حاصل از افت خواص مکانیکی اتصال است به سختی می توان اجتناب نمود، بنابراین اتصال مس به آلومینیوم با کیفیت بالا توسط روشهای مرسوم جوشکاری مشکل می باشد [۲،۳].

با جایگزین نمودن جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به جای اتصالهای مرسوم می توان به کاهش چشمگیر وزن و هزینه ها دست یافت که پیشنهادی بسیار عالی برای بسیاری از صنایع که در زمینه ساخت بدنه هواپیما فعالیت دارند می باشد. این کاهش وزن و هزینه به دلیل ساده تر شدن مراحل طراحی، ساخت، مونتاژ و تعداد دفعات تعمیر و نگهداری محصول می باشد [۴].

و از آنجایی که این فرایند در حالت جامد عمل اتصال را برقرار می کند، هیچ گونه ذوبی ایجاد نگشته و مشکلات و عیوب فرایندهای اتصال ذوبی به طور خود به خود حذف می شوند.

لازم به ذکر است که در این پژوهش علاوه بر به کارگیری این فرایند در محل اتصال نیز از نانو ذرات سرامیکی کاربرد سیلیسیم استفاده گردیده که باعث بهبود خواص سطحی و ایجاد کامپوزیت زمینه فلزی تقویت شده با ذرات در محل اتصال می گردد. برای تولید کامپوزیت، کافی است ذرات فاز تقویت کننده

به طریقی در مسیر ابزار قرار گیرند، برای این منظور عموماً از یک شیار در مسیر ابزار که با فاز تقویت کننده پر می شود، استفاده می گردد. استفاده از کامپوزیت زمینه فلزی تقویت شده با ذرات به دلیل خواص مطلوب نظیر استحکام ویژه بالا، مدول ویژه<sup>۱</sup> و مقاومت به سایش خوب به سرعت در حال افزایش است.

کامپوزیتهای تولید شده با ذرات تقویت کننده، در مقایسه با سایر نمونه ها جایگاه ویژه ای داشته که یکی از دلایل این امر به هزینه پایین تولید آنها برمی گردد [۵].

استفاده از ذرات سرامیکی در زمینه انعطاف پذیر سبب افزایش مقاومت به سایش، افزایش دمای قابل استفاده در شرایط کاری، افزایش استحکام و مدول الاستیک، کاهش وزن، کاهش ضریب انبساط حرارتی (نسبت به آلیاژ یا فلز پایه) و افزایش هدایت حرارتی و الکتریکی می گردد [۵].

## ۲-۲ آلیاژهای آلومینیوم گروه XXX (Al-Mg-Si)

این گروه به عنوان آلیاژهای ساختمانی استحکام متوسط که دارای خواص خوب دیگر مانند جوش پذیری، مقاومت به خوردگی و مقاومت در برابر ترک خوردگی تنشی هستند موارد استفاده فراوانی پیدا کرده اند این آلیاژها بیشتر به صورت قطعات اکستروود شده کاربرد دارند و به شکل ورق یا صفحه نیز مورد استفاده قرار می گیرند [۶]. آلیاژهای سری ۶۰۰۰ جزو آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر به شمار می روند. در این گروه منیزیم و سیلیسیم به مقدار متعادل آلیاژ شبه دوتایی  $Al-Mg_2Si$  افزوده می شود، یا اینکه با سیلیسیم بیشتر از مقدار لازم برای بالانس تشکیل سیلیسید منیزیم می دهد.

## ۳-۲ مس خالص

این فلز با داشتن سختی کافی دارای خاصیت انعطاف پذیری عالی نیز می باشد به طوری که می توان آنرا به اشکال گوناگونی تبدیل کرد مهم ترین خواص مس هدایت الکتریکی و هدایت حرارتی بالا، مقاومت به خوردگی خوب، استحکام بالا و راحتی ساخت قطعات از آن است. به علاوه، مس غیر مغناطیس است، رنگ خوبی دارد، قابلیت جوشکاری و لحیم کاری دارد و با آبکاری یا ایجاد لاک می توان سطح آن را پوشاند. با افزودن عناصر آلیاژی می توان حتی برخی از این خواص را بهبود داد.

<sup>۱</sup> Specific modulus

## ۴-۲ فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۲</sup> (FSW)

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از فرایندهای حالت جامد است که در سال ۱۹۹۱ توسط انیستیتو جوشکاری بریتانیا<sup>۳</sup> ابداع شده است و بسیاری از مشکلات جوشکاری ذوبی را ندارد و این روش یک فرایند برشی داغ حالت جامد است و همانگونه که در شکل ۲-۱ دیده می شود در آن ابزار در حال چرخش که انتهای آن یک پین<sup>۴</sup> قرار دارد در مرز بین دو ورقی که محکم بسته شده اند حرکت می کند، شانه<sup>۵</sup> ابزار با سطح بالایی قطعات تماس دارد و حرارت تولید شده توسط اصطکاک بین قطعه کار با شانه ابزار و پین باعث نرم شدن فصل مشترک می شود و همچنان که ابزار حرکت می کند تغییر شکل مومسان شدید و سیلان در خط جوش رخ داده و ماده از جلوی پین به پشت آن انتقال می یابد و به فلز جوش قبلی آهنگری می شود، قطعه ای که جهت چرخش ابزار با جهت جوشکاری یکی است پیش ران<sup>۶</sup> و قطعه دیگر پس ران<sup>۷</sup> نامیده می شود که این تفاوت منجر به عدم تقارن در انتقال حرارت، سیلان ماده و خواص دو سمت اتصال می گردد. جوش حاصل از این روش نسبت به سایر روش های جوشکاری از اعوجاج کمتر و پایداری ابعادی بالاتری برخوردار است از این فرایند در صنایع هوافضا، کشتی سازی و راه آهن استفاده می شود. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان یک پیشرفت در خور توجه در اتصال فلزات در طی دهه اخیر مطرح شده است و به عنوان یک فناوری سبز مطرح می شود و این امر به دلیل راندمان انرژی، دوست دار محیط زیست بودن، تنوع و تطبیق پذیری آن است [۱].

<sup>۲</sup> Friction Stir Welding

<sup>۳</sup> Training Welding Institute

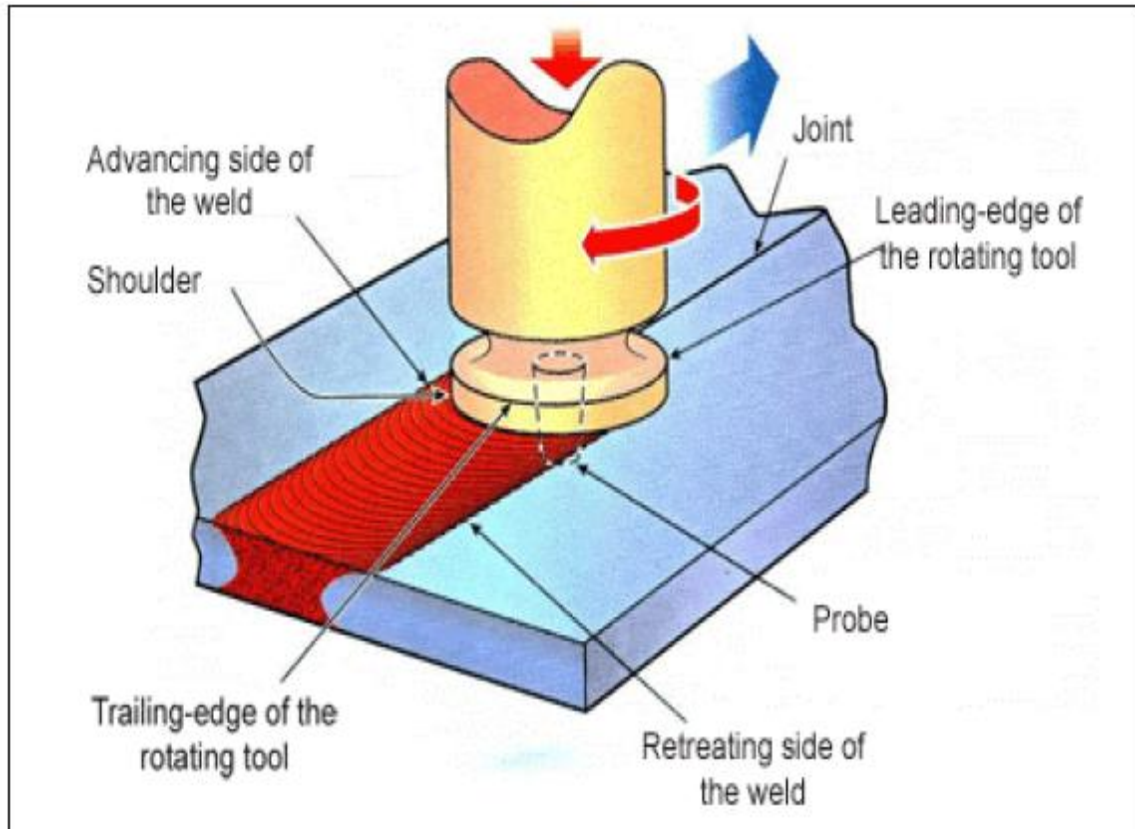
<sup>۴</sup> Pine

<sup>۵</sup> Shoulder

<sup>۶</sup> Advancing side

<sup>۷</sup> Retreating side



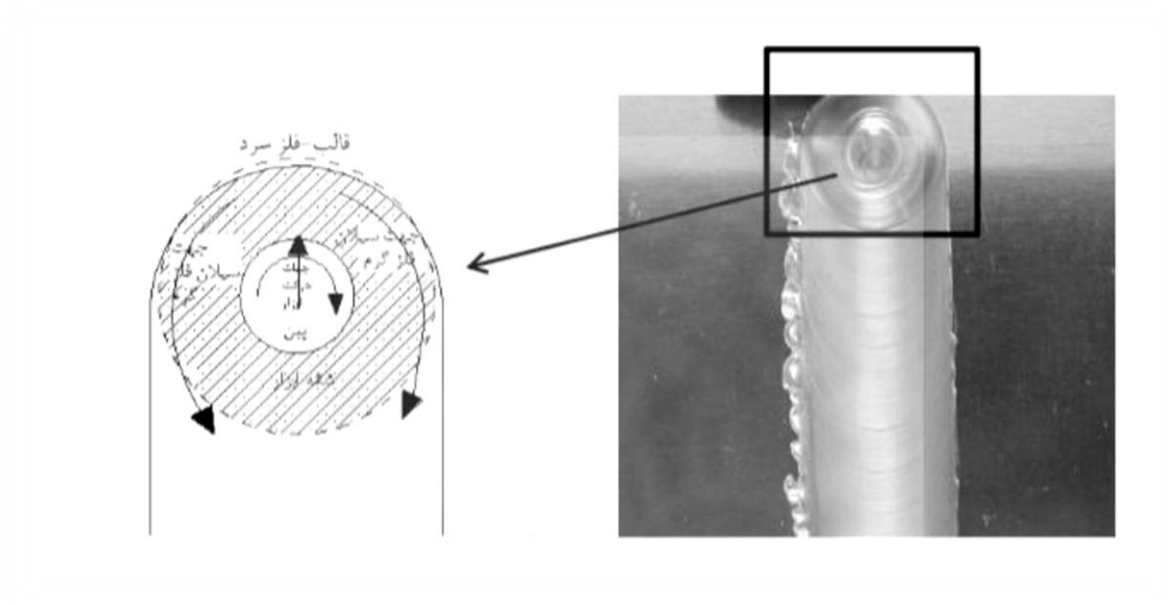


شکل ۱-۲ اصول فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۷].

جنبه منحصر به فرد فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی این است که سیلان ماده مجاور ابزار به انتقال حرارت کمک می کند، انتقال جرم و انتقال حرارت به خواص ماده، متغیرهای جوشکاری نظیر سرعت چرخش و انتقال ابزار و هندسه ابزار بستگی دارد. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به واسطه روزن رانیو آهنگری ساده در نرخ کرنش زیاد اتفاق می افتد [۸].

وضعیت سیلان در وجوه مختلف ابزار متفاوت است که رینولدز و همکارانش [۹] با تعبیه شاخصهایی درون فلز پایه توانسته اند تا حدودی نحوه سیلان فلز را در جوشکاری FSW روشن کنند. آنها نتیجه گرفتند که حداکثر فشار بین ابزار و فلز، در جلوی پین است و گرمای اصطکاکی تولید شده در آنجا بیشتر است. با حرکت ابزار به سمت جلو، فلز به سمت عقب پین اکستروود می شود. در این جا ماده سرد نقش قالب و ابزار جوشکاری نقش سنبه شکل دهی را ایفا می کنند. فلز گرم با فشار ابزار به پشت رانده شده و

بر اثر همین فشار، پیوند فلزی برقرار می‌کند (شکل ۲-۲). در واقع در این فرایند جوشکاری، یک فرایند ترمومکانیکال موضعی بر روی فلز انجام می‌گیرد. برای به دست آوردن جوش سالم و مستحکم، فلز باید به طور موضعی به بالاتر از دمای کار گرم خود برسد (دمای کار گرم را تقریباً نصف دمای ذوب، برحسب درجه کلوین می‌توان فرض کرد).



شکل ۲-۲ نمای بالا از جبهه جوش، فلز سرد در نقش قالب و ابزار در نقش سنبه [۹].

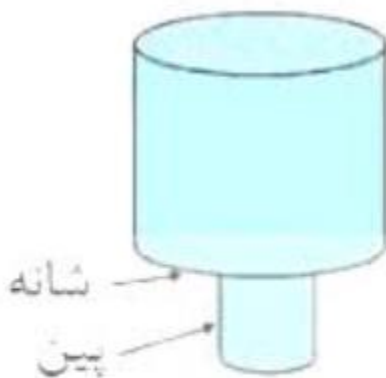
## ۲-۵ پارامترهای فرایند

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شامل حرکت پیچیده مواد و تغییر شکل پلاستیک است. پارامترهای جوشکاری، شکل هندسی ابزار و طراحی اتصال تاثیر زیادی بر الگوی حرکت مواد، توزیع دما و تغییر ریز ساختار ماده دارد [۱].

در ادامه بحث تعدادی از فاکتورهای موثر بر فرایند نظیر تغییر شکل هندسی ابزار، پارامترهای جوشکاری و طراحی اتصال توضیح داده شده است.

## ۲-۵-۱ ابزار جوشکاری

همه ابزارهای مورد استفاده در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از دو قسمت به نام های شانه و پین ساخته شده اند که نمونه ای از آن در شکل ۲-۳ دیده می شود. ابزار دو وظیفه اصلی را انجام می دهد اول گرم کردن قطعه، دوم به حرکت درآوردن ماده جهت اتصال که این فلز داغ در زیر شانه ابزار محدود می گردد. به خاطر اصطکاک بین پین و شانه ابزار با قطعه کار و همچنین تغییر شکل مومسان شدید، حرارت ایجاد می شود و حرارت موضعی ایجاد شده و حرکت چرخشی و خطی ابزار باعث نرم شدن ماده اطراف پین شده و این امر منجر به حرکت مواد از جلوی پین به سمت پشت آن می شود و بنابراین حفره ای که به دلیل وجود ابزار ایجاد شده است پر می شود [۱].



شکل ۲-۳ شکل ابزار فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۱].

شانه ابزار موجب محدود شدن سیلان ماده به سطح زیر ابزار (سطح فوقانی قطعه کار) می شود. هنگامی که ابزار به درستی به کار گرفته شود یک اتصال حالت جامد ایجاد می شود که این به معنای عدم ذوب در حین اتصال است. به دلیل برجستگیهای هندسی مختلف بر روی ابزار، حرکت ماده اطراف پین می تواند پیچیده باشد و گرادیانهای کرنش، دما و نرخ کرنش به وجود آید و در نتیجه ریزساختار نقاط مختلف فلز جوش حاصل در معرض عملیات ترمومکانیکی مختلف قرار گرفته و جوش حاصل همگن نخواهد بود، علی رغم این ناهمگونیهای ریز ساختاری یکی از مزیت‌های قابل توجه این روش جوشکاری، ریز ساختار تبلور مجدد یافته، هم محور و ریزدانه است که حاصل تغییر شکل در دمای بالا است [۱].

## ۲-۵-۱-۱ جنس ابزار

شانه ابزار برای تولید حرارت در سطح قطعه کار و سطوح زیر آن طراحی می شود در مورد مقاطع نازک، شانه ابزار بیشترین سهم تولید حرارت را از طریق اصطکاک و تغییر شکل دارد در حالی که در مورد مقاطع ضخیم پین عمده حرارت را تولید می کند همچنین شانه ابزار نیزوی آهنگری لازم را برای چگالش جوش تامین می کند [۱۰].

اغتشاش اصطکاکی یک فرایند ترمودینامیکی است که در آن دمای ابزار تا دمای پایان انجماد قطعه کار افزایش می یابد و یک جوش با کیفیت مطلوب توسط فرایند جوشکاری اغتشاشی نیازمند انتخاب ماده مناسب جهت ساخت ابزار است. ابزار جوشکاری دارای ویژگیهای طراحی منحصر به فرد است به گونه ای که هر قسمت آن وظیفه خاصی بر عهده دارد، ابزاری که پایداری ابعادی نداشته باشد نامطلوب است [۱۱].

## ۲-۵-۱-۲ مشخصه های جنس ابزار

انتخاب ماده مناسب جهت ساخت ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از فاکتورهای اساسی محسوب می شود، در این راستا ماده مورد استفاده بایستی ویژگیهای لازم را دارا باشد. مشخصه های زیادی از جنس ابزار بایستی در نظر گرفته شود ولی اولویت این مشخصه ها بستگی به جنس قطعه کار دارد که در ذیل تعدادی از این موارد شرح داده شده است.

## ۲-۵-۱-۲-۱ استحکام و پایداری در دمای محیط و دمای بالا

هنگام تماس ابزار با قطعه کار لازم است ابزار جوشکاری توانایی تحمل نیروهای فشاری را داشته باشد، همچنین در حین فرایند جوشکاری که دما بالا است ابزار بایستی استحکام فشاری و برشی کافی داشته باشد. پیش بینی استحکام مورد نیاز ابزار برای دمای بالا نیازمند شبیه سازیهای رایانه ای پیچیده ای است بنابراین استحکام مورد نیاز اغلب از طریق تجربه به دست می آید. ابزار جوشکاری علاوه بر داشتن استحکام کافی در دمای بالا بایستی بتواند با گذشت زمان این استحکام را حفظ نماید. مقاومت خزشی ضعیف منجر به تغییرات ابعادی ابزار در حین جوشکاری می گردد و هنگامی که ابزار جوشکاری در معرض سیکلهای حرارتی سرد شدن و گرم شدن متعدد قرار می گیرد نظیر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کوتاه مدت و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای استحکام خستگی حرارتی را نیز باید مد نظر قرار داد [۱].

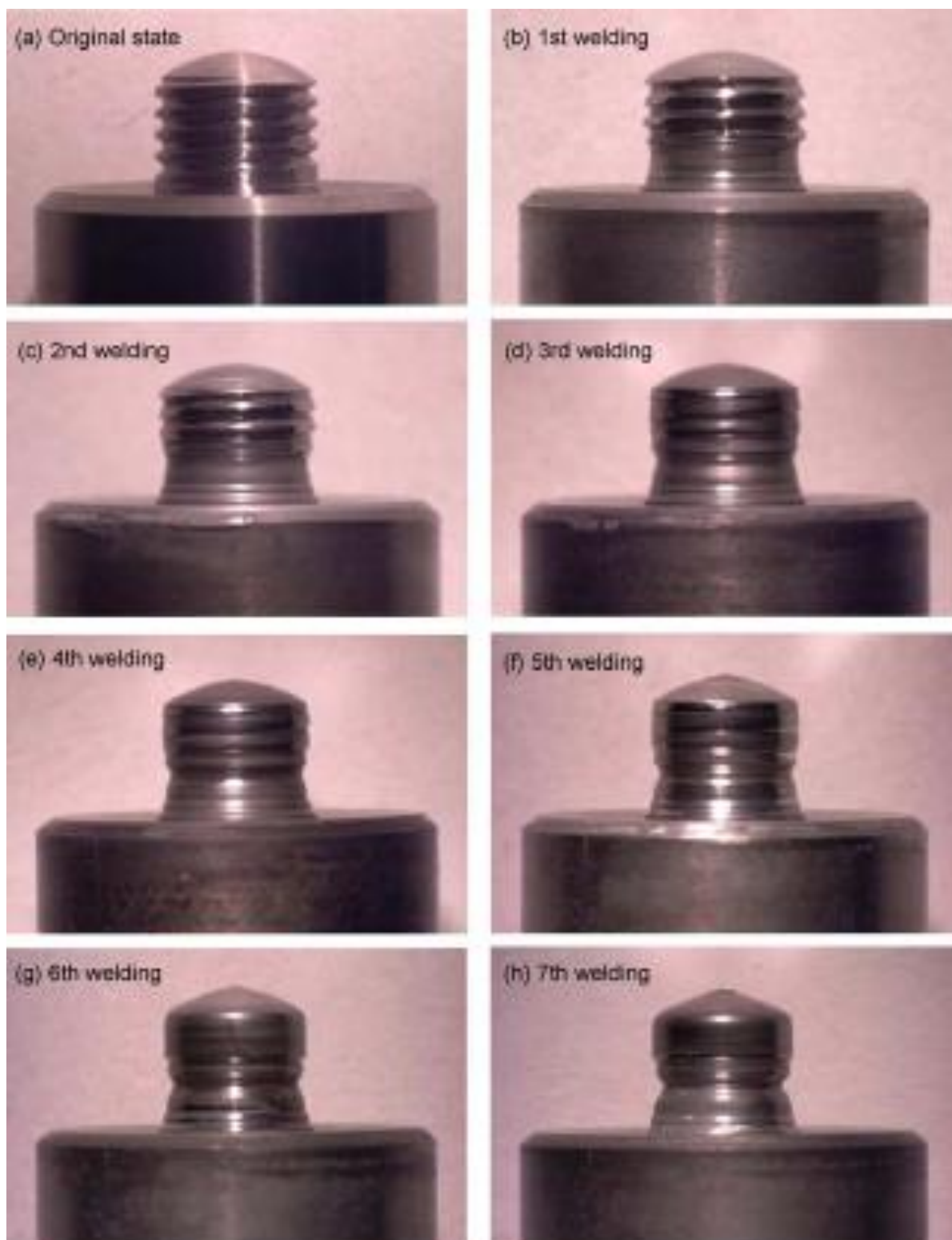
## ۲-۵-۱-۲-۲ مقاومت به سایش

سایش ابزار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مساله مهمی به شمار می رود و این مساله زمانی که کسر ذرات تقویت کننده در هنگام فرایند اضافه گردند، شکل جدی تری به خود می گیرد. سایش بیش از حد ابزار شکل آن را تغییر می دهد این امر عموماً با کنده شدن انجام می شود بنابراین کیفیت جوش تغییر یافته و احتمال ایجاد نقایص افزایش می یابد. در اغتشاش اصطکاکی سایش ابزار می تواند توسط مکانیزمهای سایش چسبان، سایش خراشان و سایش شیمیایی باشد، مکانیزم دقیق سایش بستگی به اندر کنش قطعه کار و ابزار جوشکاری و پارامترهای ابزار مورد نظر دارد مثلاً در مورد ابزار جوشکاری چندبلورین مکعبی بورون نیتريد (PCBN)<sup>۸</sup> تحت سرعت چرخش کم سایش ابزار به واسطه سایش چسبان است ولی در سرعت چرخش بالا سایش خراشان رخ می دهد [۱].

لیو<sup>۹</sup> و همکاران [۱۲] از آلیاژ WC-Co که ماده ای سخت محسوب می شود برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت های Al-Si (AC4A) حاوی ۳۰٪ حجمی ذرات Sic استفاده کردند تا سایش ابزار را بررسی کنند. نتایج بدست آمده نشان داد که میزان سایش ابزار در نقاط مختلف پین متفاوت است و بیشترین سایش در فاصله ای به اندازه ۱/۳ طول پین، از ریشه پین اتفاق می افتد. بعد از هر پاس جوشکاری ابزار در محلولی حاوی ۵٪ محلول هیدروکسید سدیم قرار می گرفت تا ذرات آلومینیم از سطح ابزار و از میان رزوه های پین جدا شوند. نمونه در سرعت دورانی یکسان و سرعت پیشروی متفاوت در ۷ پاس جوشکاری گردید که تصویر پین در مراحل مختلف در شکل ۲-۴ قابل مشاهده است [۱۲].

از مشاهده شکل ۲-۴ می توان دریافت که بیشترین سایش برای نیمه پایینی و کمترین سایش در نیمه بالایی پین رخ داده است. همچنین مشاهده می شود که رزوه های قسمتی از پین که به شانه ابزار نزدیکتر است پس از پاس اول جوشکاری تقریباً به طور کامل ساییده شده و از بین رفته اند. از مشاهده تصاویر مربوط به پاس ۶ و ۷ نیز می توان دریافت که پس از ۶ پاس جوشکاری، همه رزوه ها به طور کامل حذف شده اند. بدون توجه به این که سایش در چه قسمتی از پین اتفاق می افتد می توان گفت که همواره بیشترین میزان سایش در اولین پاس جوشکاری ایجاد می شود [۱۲].

<sup>۸</sup> Liu<sup>۹</sup> Polycrystalline Cubic Boron Nitride



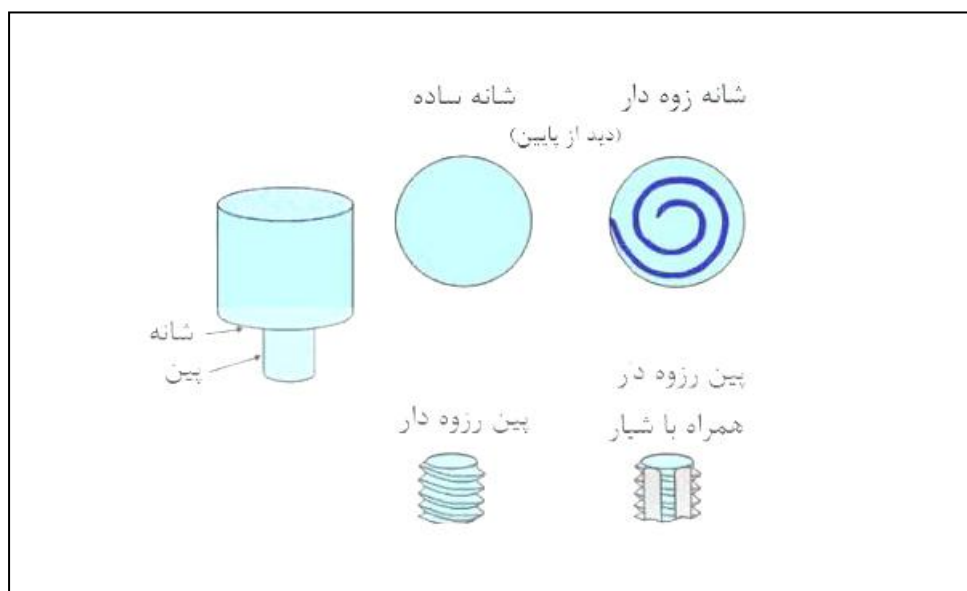
شکل ۲-۴ تصویر ابزار فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پس از هر پاس [۱۲].

سرعت جوشکاری بر نرخ سایش ابزار تاثیرگذار است، مور<sup>۱۰</sup> و همکاران [۱۳] در آزمایشی دریافتند کاهش سرعت دورانی و افزایش سرعت جابجایی ابزار موجب کاهش میزان سایش پین فولادی استفاده شده برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت زمینه Al<sub>۳۵۹</sub> حاوی ۲۰٪ ذرات تقویت کننده Sic می شود. سایر خصوصیات مهم ابزار شامل واکنش پذیری ابزار، چقرمگی شکست، یکنواختی ریز ساختار و چگالی، ضریب انبساط حرارتی (ابزارهای دو جنسی)، قابلیت ماشین کاری و در دسترس بودن ابزار است.

### ۳-۱-۵-۲ شکل هندسی ابزار

هندس ابزار نقش مهمی در سیلان ماده ایفا می کند و در کنار آن میزان سرعت انتقالی ابزار (سرعت جوشکاری) را مشخص می کند و همچنین تعیین کننده عرض منطقه فرایند نیز می باشد. با افزایش تجربه و پیشرفت در درک سیلان ماده، هندسه ابزار توسعه روزافزونی یافت. این تغییرات به کاهش نیروی جوشکاری، سیلان آسان تر ماده در حالت پلاستیک و افزایش فصل مشترک پین و ماده در حالت پلاستیک و در نتیجه افزایش حرارت تولیدی منجر شده است [۱].

ابزاری که بتواند راحت تر جریان مواد را در تغییر شکل پلاستیک مهیا کند، حرکت مواد را تسریع می کند. ابزارهای مختلفی برای ایجاد مقدار سیلان مواد مختلف طراحی شده است که در شکل ۲-۵ می توان شماتیکی از نمونه های ابزار فرایند را مشاهده نمود [۱].



شکل ۲-۵ شماتیکی از نمونه های ابزار فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۱].

ابزار رزوه دار مواد بیشتری نسبت به ابزارهای استوانه ای با قطر برابر جابجا می کند، همچنین نیروی جوشکاری را کاهش داده و جریان مواد را آسان کرده و کیفیت جوشها را افزایش می دهد. جوشکاری با این پین ها باعث افزایش سرعت جوشکاری به میزان بیش از ۱۰۰٪، کاهش نیروی محوری اعمالی به میزان ۲۰٪ و عریض شدن منطقه جوش و در نهایت کاهش محدودیت ضخامت می شود [۱].

الانگوران<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۴] اثر شکل پین و قطر شانه ابزار را بر کیفیت منطقه FSP شده آلیاژ آلومینیوم AA6061 مورد بررسی قرار دادند. آنها در تحقیق خود از ۵ شکل ابزار (استوانه ای ساده، استوانه ای رزوه دار، مخروطی، مثلثی و مربعی) و ۳ قطر متفاوت شانه (۱۵، ۱۸ و ۲۱ mm) استفاده کردند. آنها گزارش نمودند که از ۵ پین به کار رفته، پین مربعی و مثلثی ناحیه FSP عاری از عیب تولید می کند.

فوجی<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۵] تاثیر شکل ابزار را بر خواص جوش FSW بررسی کردند. در شکل ۲-۶ می توان طرح پین های به کار رفته توسط آنها را مشاهده نمود. آنها از سه آلیاژ متفاوت استفاده نمودند و گزارش کردند که برای آلیاژ Al1050-H24 که دارای مقاومت به تغییر شکل پایینی است، با سرعت پیشروی ۷۰۰-۱۰۰ mm/min و سرعت چرخش ابزار ۱۵۰-۶۰۰ rpm، استفاده از پین استوانه ای و بدون رزوه بهترین خواص را ایجاد کرده و کمترین عیوب جوش را داشته است.

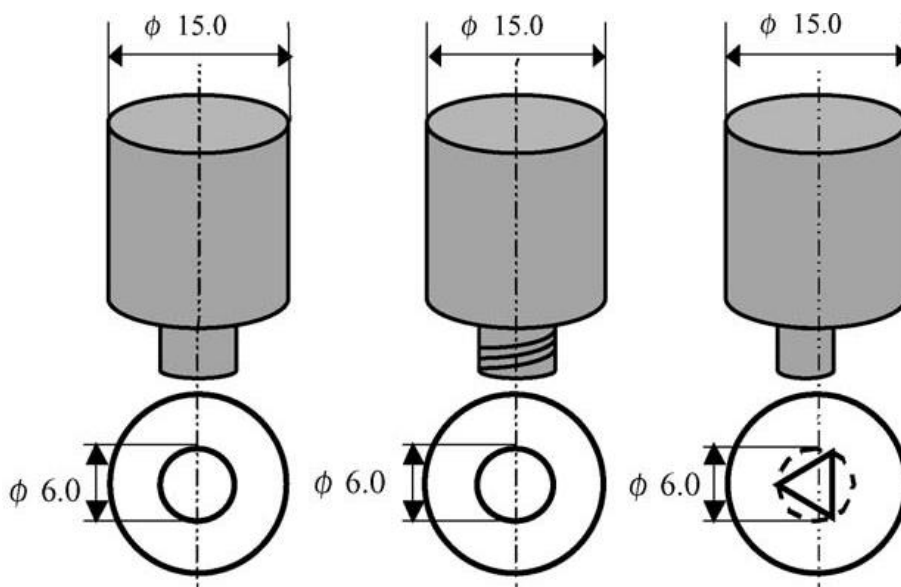
برای آلیاژ Al6061-T6 که مقاومت به تغییر شکل نسبتاً پایینی دارد، با وجود اینکه متغیرهای جوشکاری برابر با آلیاژ اول انتخاب شد، مشاهده گردید که شکل پین تاثیر عمده ای در خواص مکانیکی و ریزساختار نداشته است.

در نهایت در آلیاژ Al5083 که مقاومت به تغییر شکل نسبتاً بالایی دارد، قابلیت جوشکاری به مقدار زیادی به سرعت چرخش ابزار بستگی داشته است و در سرعت چرخش بالا (۱۵۰۰ rpm) بهترین نتیجه هنگام استفاده از پین منشوری حاصل شده است و در سرعت چرخش متوسط (۸۰۰ rpm) پین استوانه ای بهترین نتیجه را داشته و در سرعت چرخش پایین (۶۰۰ rpm) شکل پین تاثیری بر خواص جوش نداشته است.

<sup>۱۱</sup> Elangovan

<sup>۱۲</sup> Fujii





شکل ۲-۶ شماتیک پین های استفاده شده در آزمایش [۱۵].

## ۲-۵-۲ سرعت‌های دورانی و پیشروی

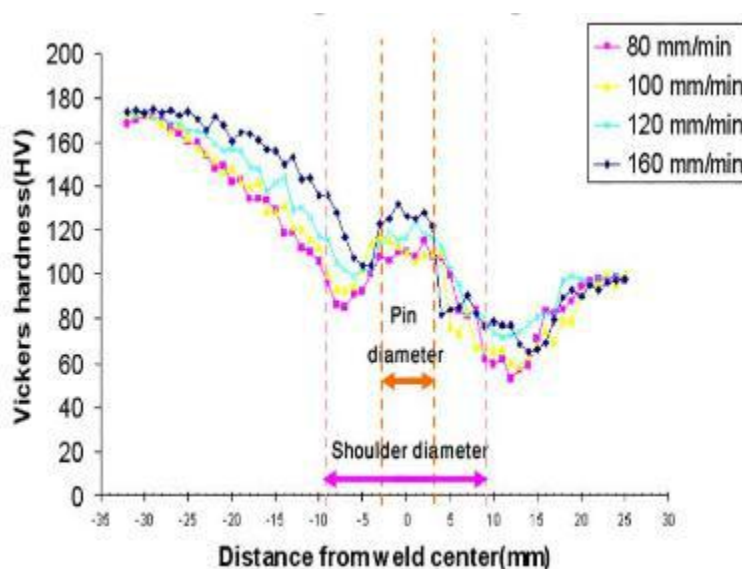
دو پارامتر سرعت چرخش ابزار ( $\omega$ ) بر حسب دور در هر دقیقه (rpm) در جهت و یا خلاف جهت عقربه های ساعت و دیگری سرعت حرکت انتقالی ابزار یا سرعت جوشکاری ( $V$ ) بر حسب  $\text{mm/min}$  در طول خط اتصال می باشد، چرخش ابزار منجر به اغتشاش و اختلاط ماده اطراف پین در حال چرخش شده و جابه جایی آن باعث می شود که ماده مومسان و اغتشاش یافته اطراف پین از جلوی آن به سمت عقب رانده شوند [۱].

سرعت‌های چرخش ابزار بیشتر، دمای بالاتری ایجاد کرده که ناشی از افزایش گرمای اصطکاکی است و باعث اغتشاش و اختلاط بیشتر ماده می شود ضمن اینکه سرعت انتقالی کمتر نیز منجر به تولی حرارت بیشتر می گردد [۱].

از تلفیق دو متغیر  $\omega$  و  $V$  نسبت  $\omega/V$  حاصل می شود که مهمترین متغیر تکنیکی فرایند FSW از نظر دستیابی به جوش سالم می باشد. بررسی ها نشان می دهد در صورت ثابت بودن سایر متغیرها، هر آلیاژی می تواند در محدوده مشخصی از این نسبت جوشکاری شود، افزایش  $\omega$  و کاهش  $V$  باعث افزایش حرارت ورودی و افزایش ذمای نواحی ابزار می گردد که در این حالت نیروهای اعمالی از جانب قطعه کار

به ابزار کاهش می یابند، به عبارت دیگر با افزایش نسبت  $\omega/V$  از طریق افزایش  $\omega$ ، به سرعت‌های جوشکاری بالاتری دست یافت چرا که در این حالت نیروهای اعمال شده از جانب قطعه کار به ابزار کاهش می یابند [۱۴].

باهمت و همکارانش [۱۶] در پژوهشی تاثیر سرعت چرخشی ابزار بر سختی فلزات جوش داده شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت پیشروی، مقدار سختی جوش نیز افزایش می یابد که در شکل شماره ۲-۷ ارایه شده است. این پژوهش بر روی دو فلز غیر همجنس AA ۶۰۶۱ و AA ۷۰۷۵ انجام شد.

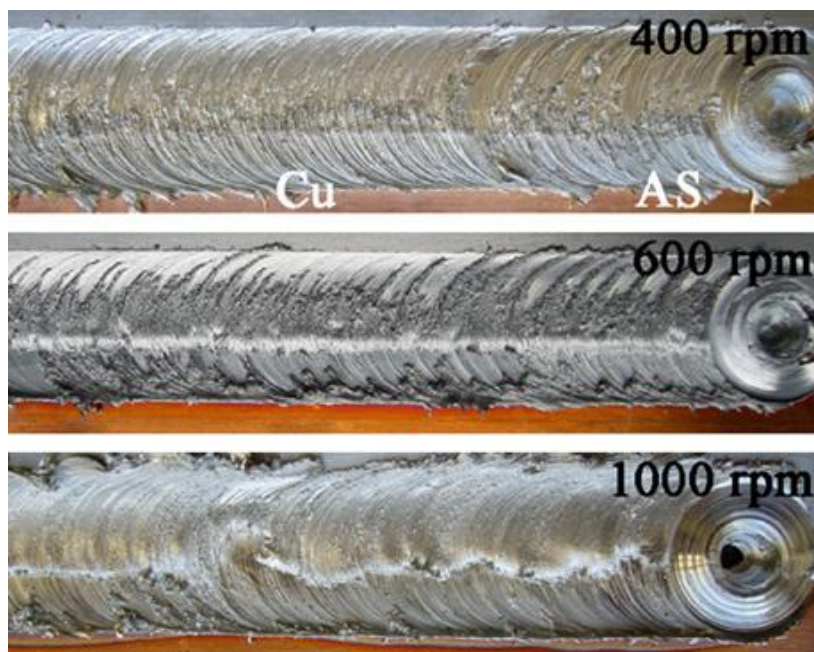


شکل ۲-۷ پروفیل میکرو سختی جوش [۱۶].

در تمام نمونه ها همانطور که مشخص است با فاصله گرفتن از مرکز جوش، سختی کاهش می یابد تا به کمترین مقدار خود می رسد که مشخص کننده مرز دو ناحیه TMAZ و HAZ است. با فاصله گرفتن از این مرز، سختی دوباره افزایش می یابد تا به سختی فلز پایه می رسد [۱۶].

فراحتی و همکارانش [۱۷] به بررسی ریز ساختار، رسوبات حاصل از جوشکاری و میکروسختی در اتصال آلیاژ آلومینیم ۱۰۵۰ به مس خالص پرداخته اند یافتند که جوش با سرعت ۱۲۵ rpm سطح جوش بهتر و استحکام بالاتری در مقایسه با سرعت‌های ۱۶۰۰ rpm و ۲۰۰۰ rpm دارد [۱۷].

زو<sup>۱۳</sup> و همکارانش [۱۸] به بررسی تاثیر سرعت دورانی بر شکل ظاهری، ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم ۱۰۶۰ به مس خالص پرداختند که در این پژوهش از سه سرعت دورانی ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ rpm استفاده گردید و گزارش نمودند که در سرعت دورانی پایین (۴۰۰ rpm) جوش دارای ظاهر بهتر و سالم تری می باشد که در تصویر شماره ۲-۸ نیز قابل مشاهده است [۱۸].



شکل ۲-۸ ظاهر جوش در سرعت‌های دورانی مختلف [۱۸].

عباسی قراچه و همکارانش [۱۹] اثر نسبت سرعت چرخشی به سرعت انتقالی ( $\omega/V$ ) را روی خواص مکانیکی آلیاژ AZ31 بررسی کردند و گزارش نمودند که افزایش این نسبت منجر به کاهش ناچیز استحکام تسلیم و استحکام کششی در ناحیه اغتشاش یافته می شود که علت این امر افزایش حرارت ورودی و نرم شدن مواد در این ناحیه گزارش شده است [۱۹].

<sup>۱۳</sup> Xue

## ۲-۵-۳ زاویه انحراف ابزار

علاوه بر پارامترهای ذکر شده پارامتر مهم دیگر جوشکاری زاویه محور ابزار نسبت به سطح قطعه کار یا میزان کجی<sup>۱۴</sup> است. کجی مناسب برای محور ابزار نسبت به جهت جابه جایی آن، این اطمینان را به دست می دهد که شانه ابزار، ماده اغتشاش یافته توسط پین را نگه داشته و آن را به خوبی از جلوی پین به عقب پین جابه جا می کند [۱].

## ۲-۵-۴ فشار اعمالی

متغیر مهم دیگر عبارت است از فشار اعمالی که دارای یک مقدار بهینه است، در فشارهای بالاتر از مقدار بهینه فروروی ابزار در سطح قطعه کار زیاد شده که در این حالت پین به صفحه زیرین یا صفحه پشت بند می رسد و در فشارهای کمتر از مقدار بهینه به دلیل کافی نبودن نیروی لازم جهت پر نمودن درز اتصال عیب حفره تونلی ایجاد می شود.

عمق ورود پین به درون قطعه کار عمق هدف<sup>۱۵</sup> نامیده می شود و برای تولید جوشهای سالم توسط ابزارهایی با شانه بدون شیار بسیار مهم است. اگر عمق فرو رونده کم باشد، شانه ابزار با سطح قطعه کار تماس مناسب را پیدا نکرده و در نتیجه قادر به حرکت دادن مناسب مواد نخواهد بود و در این حالت جوش دارای شیار سطحی و یا حفره ممتد داخلی خواهد بود، اما اگر عمق فرو رفتگی بالا باشد شانه ابزار به سطح قطعه کار فرو رفته و پلیسه ایجاد خواهد شد و در این مواقع جوش بسیار مقعر خواهد بود [۱].

نیروی فشاری اعمالی تاثیر بسیار زیادی بر روی کیفیت نهایی قطعه خواهد داشت، کیم<sup>۱۶</sup> و همکاران [۲۰] تاثیر این پارامتر را در حین فرایند و جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی بررسی کردند و گزارش نمودند که بالا رفتن نیروی اعمالی موجب عریض شدن منطقه بهینه جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی خواهد شد، یعنی با بالا رفتن نیروی اعمالی امکان استفاده از سرعتهای بالاتر ممکن خواهد بود [۲۰].

<sup>۱۴</sup>Tilt Angle

<sup>۱۵</sup>Target Depth

<sup>۱۶</sup>Kim

## ۲-۵-۵ سایر پارامترهای موثر

علاوه بر موارد ذکر شده پیش گرمایش و یا سرد کردن در برخی حالتها اهمیت دارد. برای مواد با نقطه ذوب بالا مانند فولاد و تیتانیوم و یا با هدایت حرارتی بالا مانند مس، ممکن است که حرارت ورودی ناشی از اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک برای نرم کردن مواد اطراف ابزار کافی نباشد. بنابراین ایجاد جوش بدون عیب مشکل خواهد بود که در این موارد از پیشگرم کردن برای افزایش حرارت ورودی جوش و در نتیجه بالا رفتن سیلان مواد استفاده می شود. همچنین در موادی که دمای ذوب پایین و در نتیجه دمای آنیل پایین دارند و یا در موادی که فازهای قابل حل در اثر حرارت وجود دارند باید از درشت دانگی و یا حل شدن فازها جلوگیری شود و در نتیجه باید کمترین زمان سرد شدن جوش را برای کاهش استحاله ها داشته باشیم در این حالت از تکنیک سرد کردن استفاده می نمایم [۱].

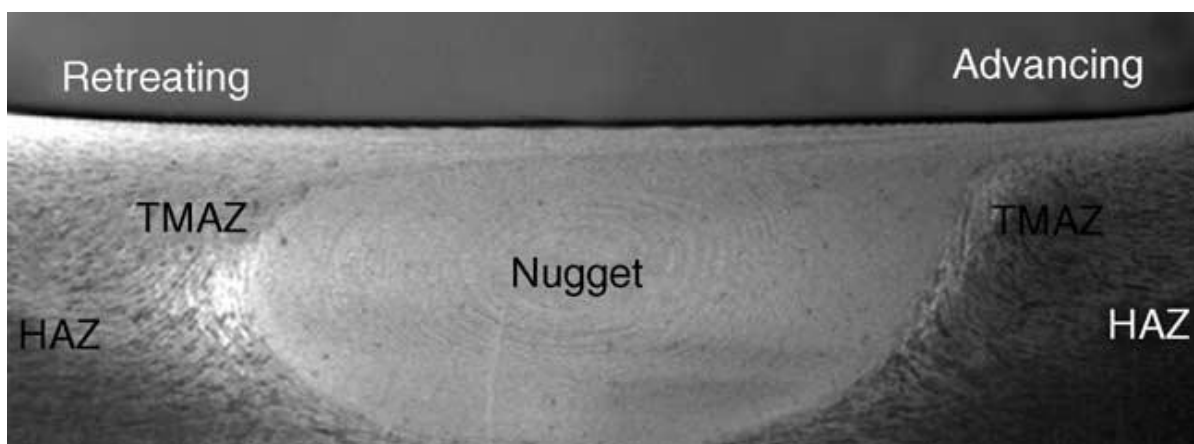
## ۲-۶ بررسی های ریز ساختاری

تغییر شکل پلاستیک شدید و قرارگیری ماده در معرض درجه حرارت بالا حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و فراوری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱۷</sup> (FSP) و سپس تبلور مجدد و انحلال و درشت شدن رسوبات در داخل و اطراف منطقه اغتشاش یافته را می توان از عوامل تحولات ریز ساختاری در حین فرایند دانست [۱]. بر اساس مشخصات ریزساختاری دانه ها و رسوبات، سه منطقه مجزا تحت عنوان منطقه اغتشاش یافته، منطقه تحت تاثیر ترمومکانیکی<sup>۱۸</sup> (TMAZ) و منطقه تحت تاثیر حرارت<sup>۱۹</sup> (HAZ) شناسایی شدند که این مناطق در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. تغییرات ریزساختاری در مناطق مختلف تاثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی ماده دارد. بنابراین، تحولات ریزساختاری حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی توسط تعدادی از محققین مورد مطالعه قرار گرفته است.

<sup>۱۷</sup> Friction stir processing

<sup>۱۸</sup> Thermo mechanically affected zone

<sup>۱۹</sup> Heat affected zone



شکل ۲-۹ مناطق ریزساختاری مختلف در فراوری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ Al7075-T61 [۱].

#### ۲-۶-۱ منطقه اغتشاش یافته

تغییر شکل پلاستیک شدید و گرمای حاصل از اصطکاک حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی باعث تولید ریز ساختار تبلور مجدد شده با دانه های خیلی ریز در ناحیه اغتشاش یافته<sup>۲۰</sup> می شود. معمولاً این منطقه را به عنوان منطقه ناگت<sup>۲۱</sup> یا منطقه تبلور مجدد پویا شده<sup>۲۲</sup> می شناسند. تحت برخی از شرایط فرایند اصطکاکی اغتشاشی، ساختار حلقه پیازی در منطقه ناگت مشاهده می شود. داخل دانه های تبلور مجدد شده، معمولاً چگالی نابه جایی کم است [۲۱، ۲۲]. با این حال تعدادی از محققین وجود دانه های کوچک تبلور مجدد شده در منطقه ناگت که شامل چگالی بالایی از مرزهای فرعی [۲۳] و نابه جایی ها [۲۴] را گزارش کردند.

<sup>۲۰</sup> Stir zone

<sup>۲۱</sup> Nugget

<sup>۲۲</sup> Dynamically Recrystallized Zone

<sup>۲۳</sup> Liu

اثر متغیرهای فرایند بر ریزساختار آلیاژهای آلومینیوم نشان می دهد که اندازه دانه تبلور مجدد یافته با کاهش نرخ چرخش ابزار در یک سرعت انتقال ثابت و یا کاهش نرخ چرخش ابزار به سرعت انتقال کم شده است [۱].

اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و تغییر شکل پلاستیک حول پین در حال چرخش به افزایش دما تا ۴۰۰-۵۵۰ درجه سانتیگراد در منطقه ناگت می انجامد، در چنین دمای بالایی رسوبها در آلیاژ آلومینیوم بسته به نوع آلیاژ و دمای ماکزیمم می توانند درشت شده یا حل شوند [۱]. به عنوان مثال لیو<sup>۲۳</sup> و همکارانش [۲۵].

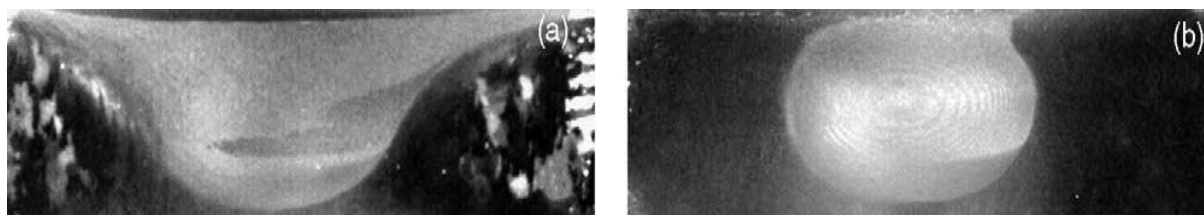
بر روی ریز ساختار جوش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیومی AA6061-T6 تحقیق کردند و آنها توزیع یکنواخت رسوبات در قطعه کار را گزارش نمودند و به طور کلی رسوبات در فلز پایه اندازه کوچکتر و تعداد بیشتری از منطقه اغتشاش یافته داشتند، این ساختار دلیلی بر انحلال و درشت شدن رسوبات منطقه اغتشاش یافته در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دارد [۲۵].

ال داناف<sup>۲۴</sup> و همکاران [۲۶] تأثیر تعداد پاس، سرعت پیشروی و سرعت چرخش ابزار را بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش تعداد پاسها منجر به افزایش اندازه دانه در SZ و انحلال بیشتر رسوبات می شود. افزایش سرعت خطی سبب کاهش اندازه ذرات فاز دوم و افزایش سختی می شود. اما افزایش سرعت چرخش ابزار تأثیر قابل ملاحظه ای روی خواص مکانیکی نداشت و افزایش سرعت چرخشی سبب رشد دانه ها در SZ شد، علاوه بر آن مشخص شد که هم پوشانی فازها نسبت به سرعت پیشروی ابزار، تأثیر بیشتری روی ریزساختار و خواص مکانیکی دارد [۲۶].

هراتی و همکاران [۲۷] به منظور اصلاح ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ از فرایند اصطکاکی اغتشاشی استفاده شد. نمونه ها با سرعت چرخشی ۵۰۰ rpm، سرعت های پیشروی ۱۲/۵ و ۱۰۰ mm/min و زاویه انحرافی ۳ درجه تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی های ساختاری نشان داد که در منطقه اغتشاشی دانه های ریز تبلور مجدد دینامیکی یافته ایجاد می شود. همچنین با افزایش سرعت پیشروی ابزار، ابعاد منطقه اغتشاشی کاهش می یابد. ارزیابی سختی در مقطع عرضی نمونه ها نشان داد که میزان سختی در منطقه اغتشاشی نسبت به فلز پایه بیشتر است و با افزایش سرعت پیشروی ابزار، افزایش سختی قابل ملاحظه تر است، که به دلیل اندازه دانه کوچکتر و توزیع یکنواخت تر رسوبات می باشد [۲۷].

<sup>۲۴</sup> El-Danaf

شکل منطقه اغتشاش یافته کاملاً متاثر از متغیرهای فرآیند، شکل ابزار، دمای قطعه کار و هدایت حرارتی ماده قطعه کار است، طبق آنچه گزارش شده، در سرعت های چرخشی کم، شکل این منطقه شبیه به بستر رودخانه و در سرعت های بالا، متمایل به بیضی می گردد. نمونه هایی از بستر های موجود در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است [۱].



شکل ۱۰-۲ اشکال مختلف منطقه اغتشاش یافته (a) بستر رودخانه ای، (b) بیضوی [۱].

یکی از مشاهدات از منطقه اغتشاش یافته در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی حضور حلقه ها و ساختارهای بیضی شکل در مقاطع متالوگرافی اچ شده می باشد که ساختار پوست پیازی<sup>۲۵</sup> نامیده می شوند، لیونارد<sup>۲۶</sup> و همکارانش با مطالعه بر روی آلیاژ AA ۲۰۱۴، دلیل تشکیل ساختار پوست پیازی در منطقه اغتشاش یافته را تفاوت در اندازه دانه های موجود بین هر لایه و همچنین توزیع غیر یکنواخت ذرات خورد شده موجود در این ناحیه گزارش نموده اند [۲۸].

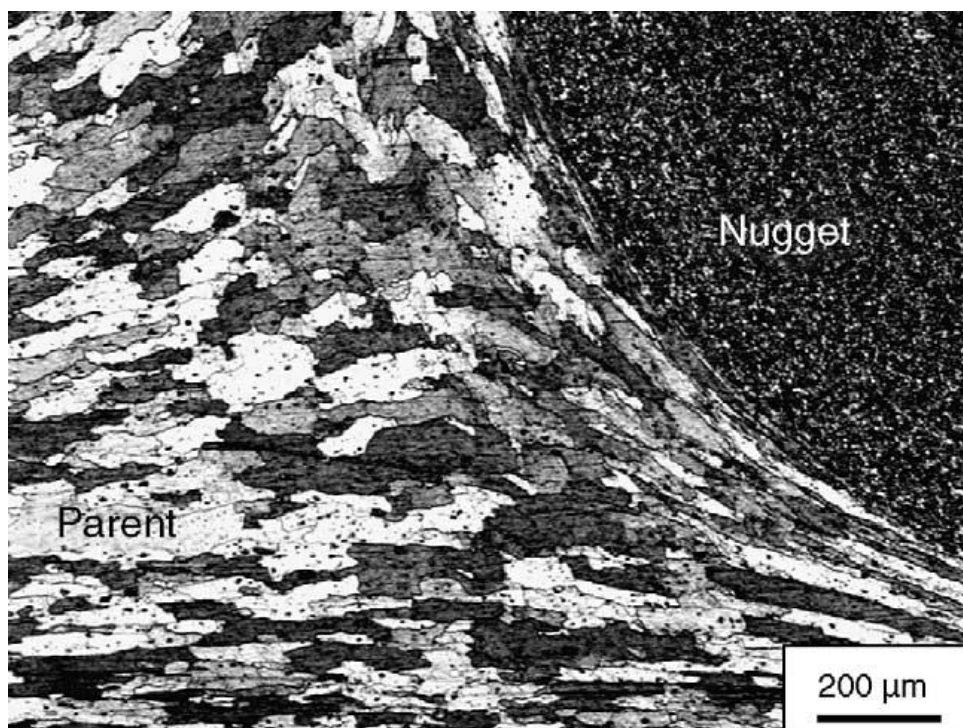
## ۲-۶-۲ ناحیه متاثر از فرایند ترمومکانیکی (TMAZ)

این منطقه تنها در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به وجود می آید بین ماده زمینه و منطقه به هم خورده دیده می شود. این ناحیه در حین فرایند دما و تغییر شکل پلاستیک را تجربه می کند، یک تصویر میکروسکوپی معمولی از منطقه تحت تاثیر ترمومکانیکی در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است. منطقه

<sup>۲۵</sup> Onion Ring Structure

<sup>۲۶</sup> Leonard





شکل ۲-۱۱ ریزساختاری منطقه تحت تاثیر ترمومکانیکی در فراوری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ Al 7075 [۱].

تحت تاثیر ترمومکانیکی توسط ساختار شدیداً تغییر شکل داده شده مشخص می شوند که در واقع دانه های کشیده شده فلز پایه در اطراف منطقه ناگت در حین سیلان ماده تغییر شکل یافته اند، دانه های فلز اولیه در این ناحیه به علت تماس با منطقه ناگت ونحوه سیلان ماده در منطقه ناگت دچار کشیدگی می شوند [۱،۲۳].

## ۲-۶-۳ منطقه تحت تاثیر حرارت (HAZ)

دورتر از منطقه تحت تاثیر ترمومکانیکی، منطقه متأثر از حرارت وجود دارد. این منطقه تنها یک چرخه حرارتی را تجربه کرده و هیچ گونه تغییر شکل پلاستیکی را تجربه نمی کند، برای قطعات ریختگی به دلیل حساسیت کم ریز ساختار به تغییرات حرارتی، ناحیه میانی عمدتاً شامل TMAZ بوده و HAZ در آن ملاحظه نمی شود [۱].

گرچه ساختار دانه ها در این منطقه همانند فلز پایه باقی می ماند اما قرار گرفتن در معرض دمای بالا اغلب موجب تغییر در ساختار و توزیع رسوبات می شود. در شرایطی که فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

بر روی آلیاژهای سخت شده توسط مکانیزم رسوب سختی صورت گیرد، احتمال افت خواص در اثر اعمال حرارت در این منطقه وجود دارد [۲۳].

## ۷-۲ تبلور مجدد حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی

نوع کار مکانیکی اعمال شده حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی برای تشخیص مکانیزم تشکیل دانه در منطقه اغتشاش یافته بسیار مهم می باشد. اگر کار مکانیکی در دمای پایین انجام شود و مقدار مشخصی از انرژی کار مکانیکی به صورت انرژی کرنشی در فلز ذخیره شود، آن فلز تحت کار سرد قرار گرفته است و اگر کار مکانیکی در دمایی باشد که انرژی کرنشی در فلز ذخیره نشود کار گرم بر روی آن فلز انجام شده است. با توجه به تحقیقات انجام شده، فرآیند FSW برای آلیاژهای آلومینیوم یک فرایند کار گرم می باشد [۲۹،۳۰]. حین کار گرم پدیده های بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه اتفاق می افتد. اگر بازیابی و تبلور مجدد در حین تغییر شکل پلاستیک در دمای بالا اتفاق بیافتد، به این دو پدیده، فرآیند بازیابی دینامیکی<sup>۲۷</sup> و تبلور مجدد دینامیکی<sup>۲۸</sup> می گویند. انرژی نقص چیدمان<sup>۲۹</sup> در فلزاتی مانند آلومینیوم و آلیاژهای آن بالا است، بنابراین صعود<sup>۳۰</sup>، و لغزش متقاطع نابجایی ها در حین کار گرم به راحتی انجام می شود و به عبارت دیگر بازیابی دینامیکی در دماهای بالا، برای این آلیاژها بسیار سریع و وسیع اتفاق می افتد [۳۱].

به دلیل کار مکانیکی شدید در دمای بالا حین فرآیند جوشکاری، دانه های بسیار ریز در منطقه اغتشاش یافته با مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی تشکیل میشوند. برای تبلور مجدد دینامیکی سه مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته<sup>۳۱</sup> (DDRX)، تبلور مجدد دینامیکی پیوسته<sup>۳۲</sup> (CDRX) و تبلور مجدد دینامیکی هندسی<sup>۳۳</sup> (GDRX) ارائه شده است [۳۴].

<sup>۲۷</sup> Dynamic Recovery.

<sup>۲۸</sup> Dynamic Recrystallization.

<sup>۲۹</sup> Stacking fault energy

<sup>۳۰</sup> Climb.

به دلیل بالا بودن انرژی نقص چیدمان در آلومینیوم و آلیاژهای آن بازیابی مکانیکی به راحتی اتفاق می افتد و این امر از شروع تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته جلوگیری می نماید [۳۲] و بنابراین مکانیزم تشکیل دانه های بسیار ریز در منطقه اختلاط آلیاژهای آلومینیوم حین فرایند FSW تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته، نمی باشد، مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی هندسی نیز به طور خلاصه زمانی اتفاق می افتد که مواد تحت تغییر فرم کششی و یا فشاری شدید در دمای بالا باشند و یکی از علائم آن در ریزساختار، دندانه دار شدن مرزهای اصلی است [۳۵]. از آنجا که حین فرآیند جوشکاری FSW تغییر فرم به صورت کششی و یا فشاری اتفاق نمی افتد و اثری از دندانه دار شدن مرزهای اصلی در ریزساختار منطقه اختلاط نمونه های جوشکاری شده وجود ندارد بنابراین مکانیزم تبلور مجدد هندسی نمی تواند دلیل تشکیل دانه های بسیار ریز در منطقه اختلاط آلیاژهای آلومینیوم باشد. چندین مکانیزم برای تبلور مجدد دینامیکی پیوسته مطرح شده است که به موجب آنها زیردانه ها چرخیده و یک اختلاف زاویه جهت گیری بالا با مهاجرت کوچک مرز به دست می آید.

## ۸-۲ کامپوزیتهای زمینه فلزی<sup>۳۴</sup> (MMCS)

با ظهور صنایع مدرن نیاز روز افزونی به ساخت و استفاده از کامپوزیتهای زمینه فلزی احساس می شود. کامپوزیتهای زمینه فلزی به طور کلی از حداقل دو جزء فلز زمینه و فاز تقویت کننده تشکیل می شود، این کامپوزیتهای معمولاً دارای قابلیت افزایش دمای کار و بهبود استحکام، سفتی، هدایت حرارتی، مقاومت به سایش، مقاومت به خزش یا پایداری ابعادی هستند. در مقابل این کامپوزیتهای دارای چقرمگی و انعطاف پذیری پایینی هستند که از ذرات فاز دوم تقویت کننده غیر قابل تغییر فرم و بسیار ترد و شکننده موجود در آنها حاصل می شود که کاربرد آنها را در مواردی که خواص فوق مورد نیاز است، محدود می کند. در بسیاری از کاربردها مانند مقاومت به خوردگی و سایش، عمر مفید قطعات معمولاً به شرایط سطحی آنها بستگی دارد. کامپوزیتهای سطحی زمینه فلزی<sup>۳۵</sup> دسته ای از مواد هستند که با بهبود خواص سطحی مواد، خواص حجمی (بالک) آنها را حفظ می کنند. افزودن ذرات سرامیکی به سطح ماده به جای

<sup>۳۱</sup> Discontinuous Dynamic Recrystallization.

<sup>۳۲</sup> Geometric Dynamic Recrystallization.

<sup>۳۳</sup> Continuous Dynamic Recrystallization

<sup>۳۴</sup> Metal matrix composites.

<sup>۳۵</sup> Metal matrix Surface composites.

افزودن آن به کل حجم ماده، باعث بهبود مقاومت سایشی بدون کاهش خواص حجمی می شود [۳۶]. باید توجه داشت که وجود ذرات سرامیکی در داخل زمینه باعث کاهش انعطاف پذیری خواهد شد.

در سالهای اخیر چندین روش اصلاح ویژگی سطحی نظیر عملیات سطحی با پرتو پر انرژی لیزر، عملیات سطحی با پرتو الکترونی، اسپری پلاسما، ریخته گری و عملیات با قوس تنگستن برای تولید کامپوزیتهای زمینه فلزی سطحی به کار رفته است. در میان روشهای ذکر شده عملیات ذوب سطحی با لیزر که مهندسی سطح با لیزر نیز نامیده می شود برای بهبود خواص به کار رفته است. در ضمن باید متذکر شد که فرایندهای موجود برای ایجاد یک کامپوزیت سطحی عموماً بر اساس ایجاد فاز مذاب در دمای بالا استوار هستند، که در این حالت جلوگیری از انجام واکنش بین فاز ثانویه تقویت کننده و فلز پایه و تشکیل برخی از فازهای مضر بسیار مشکل است. اگر فرایند کامپوزیت سازی در دمایی پایین تر از دمای ذوب زمینه صورت پذیرد، بسیاری از مشکلات مطرح شده وجود نخواهند داشت.

مزیت استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی برای ایجاد کامپوزیت سطحی این است که اولاً این فرایند در حالت جامد بوده و واکنشهای مضر بین ذرات تقویت کننده و فلز پایه و تشکیل فازهای مضر به حداقل می رسد [۳۷]. بنابراین می توان انواع مختلفی از آلیاژهای فلزی و ذرات تقویت کننده را برای عملیات انتخاب نمود، ثانیاً فرایند اصطکاکی اغتشاشی موجب اصلاح ریزساختار می گردد و همچنین این فرایند نسبتاً ساده بوده و کنترل آن آسان تر است.

## ۲-۸-۱ کامپوزیتهای زمینه فلزی تقویت شده با ذره

کامپوزیت زمینه آلومینیمی تقویت شده با ذرات یکی از پرکاربردترین و قابل اطمینان ترین مواد مورد استفاده در سازه های به کار رفته در صنایع هوافضا، نقل و انتقالات، نظامی و .. می باشد [۱۲].

استفاده از کامپوزیت زمینه فلزی تقویت شده با ذرات به سرعت در حال افزایش است چراکه استحکام ویژه بالا، مدول ویژه بالا و مقاومت به سایش مطلوبی دارند. از میان کامپوزیت های زمینه آلومینیمی تولید شده، آنهایی که با استفاده از ذرات تقویت می شوند، جایگاه ویژه ای دارند که یکی از دلایل این امر به هزینه پایین تولید آنها برمی گردد. همچنین هزینه تولید کامپوزیت زمینه فلزی تقویت شده با ذرات نسبت به کامپوزیت های تقویت شده با رشته های کوتاه و بلند، کمتر است [۵].

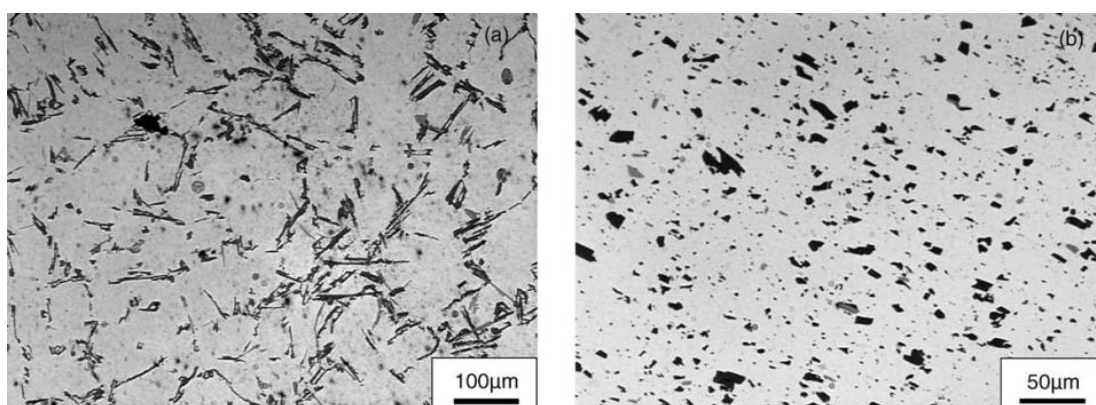
به طور کلی کامپوزیت زمینه فلزی تقویت شده با ذره سرامیکی خواص بهتری در مقایسه با زمینه دارند. خواصی مانند مقاومت به سایش، سفتی و انبساط حرارتی را می توان با تنظیم کسر حجمی ذره های سرامیکی در کامپوزیتها به دست آورد.

نقش ذرات مقاوم کننده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی را می‌توان از دو منظر بررسی کرد. حضور این ذرات موجب انتقال تنش وارد شده از زمینه به آنها شده و از منطری دیگر چون این ذرات به صورت فاز دوم و معمولاً با خواص مکانیکی و جنسی کاملاً متفاوت وارد زمینه می‌شوند موجب افزایش چگالی نابجایی‌ها در زمینه می‌شوند [۳۸].

## ۲-۸-۱-۱-۱ خواص مکانیکی کامپوزیتهای زمینه فلزی تقویت شده با ذره

در مطالعه ای که ما<sup>۳۶</sup> و همکارانش [۳۰] روی کامپوزیت زمینه ۲۰۰۹ Al حاوی ۱۵٪ حجمی ذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیم انجام دادند متوجه شدند که استحکام تسلیم و استحکام کششی کامپوزیت جوشکاری اصطکاکی شده نسبت به کامپوزیت اکسترود شده در هر دو جهت طولی و عرضی بیشتر است. استحکام بیشتری که در کامپوزیت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده بدست آمده ناشی از سیکل‌های حرارتی می باشد که سبب استحکام بخشی از طریق رسوبگذاری شده است. همچنین توزیع یکنواخت ذرات کاربید سیلیسیم و ریز شدن دانه ها نیز در افزایش استحکام سهیم بوده اند. با این وجود پس از عملیات حرارتی پیر سازی طبیعی (T4)، استحکام ناحیه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده از کامپوزیت پایه کمتر شده است زیرا رشد دانه به صورت محدودی انجام شده و بنابراین ریز ساختار دانه ای عامل غالب در تعیین استحکام جوش نمی باشد.

در پژوهش دیگری توسط ما و همکارانش [۳۹] بر روی آلیاژ ۳۵۶ FSP، A شده، تأثیر این عملیات بر خواص مکانیکی و همچنین میکروساختار را نشان می‌دهد. شکل ۲-۱۲ تصویر توزیع ذرات سیلیسیم در اثر FSP را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۲ تأثیر FSP بر خرد کردن و توزیع ذرات سیلیس. تصویر میکروسکوپ نوری از قطعه (a) ریخته شده (b) FSP [۳۹].

<sup>۳۶</sup> Z.Y. Ma.

در جدول ۱-۲ نیز نسبت ابعادی<sup>۳۷</sup> ذرات سیلیسیوم و میزان تخلخل برای آلیاژ A356 قبل و بعد از FSP آورده شده است. در اثر FSP علاوه بر اینکه ذرات سیلیسیوم کوچکتر شده‌اند کاهش درصد تخلخل هم قابل توجه است.

جدول ۱-۲ تغییر اندازه و درصد حجمی تخلخل در نتیجه‌ی FSP [۳۹].

Material	Particle size ( $\mu\text{m}$ )	Aspect ratio	Porosity volume fraction (%)
As-cast	16.75 $\pm$ 9.21	5.92 $\pm$ 4.34	0.95
FSP	2.50 $\pm$ 2.02	1.94 $\pm$ 0.88	0.024

در جدول ۲-۲ نیز خواص کششی آلیاژ A ۳۵۶ قبل و بعد از FSP آورده شده است. FSP باعث بهبود خواص مکانیکی به ویژه افزایش داکتیلیتی می‌شود.

جدول ۲-۲ تغییرات خواص مکانیکی بعد از FSP [۳۹].

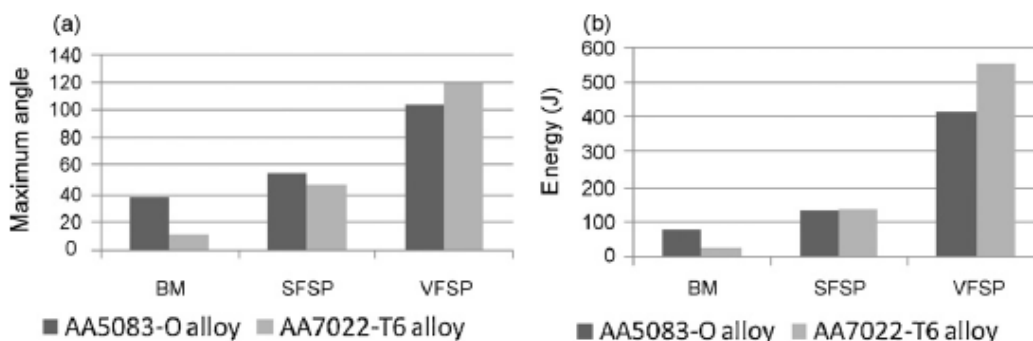
Materials	As-cast or as-FSP			Aged (155 °C/4 h)			T6 (540 °C/4 h + 155 °C/4 h)		
	UTS (MPa)	YS (MPa)	Elongation (%)	UTS (MPa)	YS (MPa)	Elongation (%)	UTS (MPa)	YS (MPa)	Elongation (%)
As-cast	169 $\pm$ 8	132 $\pm$ 3	3 $\pm$ 1	153 $\pm$ 6	138 $\pm$ 4	2 $\pm$ 1	220 $\pm$ 10	210 $\pm$ 8	2 $\pm$ 1
FSP	251 $\pm$ 4	171 $\pm$ 12	31 $\pm$ 1	281 $\pm$ 4	209 $\pm$ 2	26 $\pm$ 2	301 $\pm$ 6	216 $\pm$ 11	28 $\pm$ 2

در پژوهش دیگری که توسط الانگوان و همکارانش [۴۰] بر روی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ صورت گرفت افزایش ۴۶٪ استحکام در اثر FSP گزارش شده است.

در پژوهشی دیگر که توسط ناسیمنتو<sup>۳۸</sup> و همکارانش [۴۱] بر روی آلیاژهای AA7022-T6 و AA5083-O صورت گرفته است، ورق‌هایی به ضخامت‌های ۱۰ میلیمتر از هر دو آلیاژ به صورت سطحی (SFSP) تا عمق ۲ میلیمتر و عمقی (VFSP)، FSP شده‌اند، در شکل ۲-۱۳ نمودارهای مربوط به مقایسه دو آلیاژ آورده شده است.

<sup>۳۷</sup>Aspect Ratio.

<sup>۳۸</sup>F. Nascimento



شکل ۲-۱۳ تغییرات میزان خم شوندگی در اثر FSP در سطح و عمق (a). تغییرات انرژی شکست در اثر FSP در سطح و عمق (b) [۴۱].

این پژوهشگران دلیل افزایش میزان خم شوندگی و انرژی شکست را به کاهش اندازه دانه و بهبود ساختار نسبت داده‌اند زیرا اندازه‌ی دانه‌ها از  $160 \mu\text{m}$  و  $106 \mu\text{m}$  برای آلیاژ AA5083-O و AA7022-T6 به ترتیب به  $7/1$  و  $5/9$  میکرون کاهش یافته است.

در پژوهش دیگری که توسط ناکاتا<sup>۳۹</sup> و همکارانش [۴۲] بر روی آلیاژ آلومینیوم ADC۱۲ انجام شده است، استحکام کششی در اثر FSP، از  $190 \text{ MPa}$  در آلیاژ مادر، با  $1/7$  برابر افزایش به  $330 \text{ MPa}$  رسیده است.

بهبود عمر خستگی در نتیجه FSP مسئله دیگری است که مورد توجه تعدادی از پژوهشگران قرار گرفته است. در آلیاژهای ریختگی آلومینیوم که تحت بارهای سیکلی واقع می‌شوند جوانه زنی ترک معمولاً از عیوب ریخته‌گری آغاز می‌شود. اگر این عیوب از بین بروند یا به حداقل میزان خود برسند کارایی این قطعات به مراتب بالاتر می‌رود [۴۳]. در شکل ۲-۱۴ نتایج آزمون خستگی برای هر دو حالت A356 ریخته‌شده و FSP A356 آورده شده است. همان گونه که در شکل نیز دیده می‌شود تنش حد خستگی به میزان بیش از  $80\%$  افزایش یافته است که این بهبود را به کاهش ابعاد ذرات سیلیسیوم و کسر حجمی تخلخل‌ها نسبت می‌دهند.

نی<sup>۴۰</sup> و همکارانش [۴۴] به بررسی تاثیر FSP بر عمر خستگی آلیاژ AZ91 که تحت  $2$  پاس FSP با همپوشانی کامل و عملیات پیرسازی در دمای  $168$  درجه سانتیگراد صورت گرفته بود، پرداختند.

<sup>۴۰</sup>D.R. Ni.

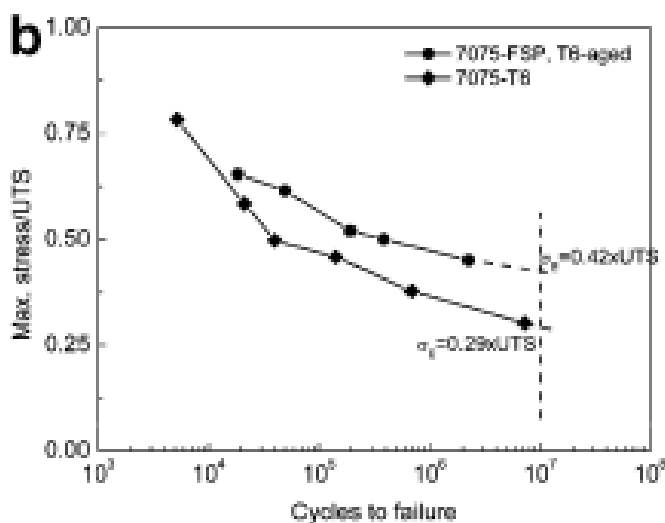
بهبود خواص مکانیکی بر طبق جدول ۲-۳ نتیجه پژوهش آنها بود و علت آن، کاهش اندازه‌ی دانه-های اولیه از ۱۲۰ میکرون به ۱۵ میکرون می باشد.

جدول ۲-۳ تاثیر FSP بر خواص مکانیکی [۴۴].

Sample	YS (MPa)	UTS (MPa)	El. (%)
As-cast	75 ± 4	100 ± 10	2.5 ± 0.3
FSP + 168 °C/16 h	179 ± 11	336 ± 20	12.5 ± 0.5

همچنین استحکام خستگی نمونه‌ی FSP شده در حدود ۱۰۵ MPa گزارش شد این در حالی است که این مقدار برای نمونه‌ی ریخته‌گری شده ۴۵ MPa است.

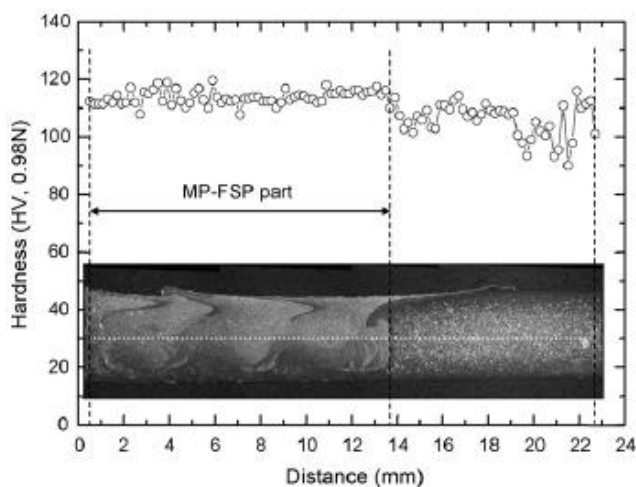
در پژوهشی که میشرا و همکارانش [۴۵] به منظور بررسی عمر خستگی قطعات FSP شده، بر روی آلیاژ AA7075T651 انجام داده‌اند، افزایش قابل توجه عمر خستگی گزارش شد که این مسئله با کاهش تنش اعمالی، بیشتر و بیشتر نمایان می‌شود. این موضوع در شکل ۲-۱۴ آورده شده است.



شکل ۲-۱۴ بهبود عمر خستگی در اثر FSP [۴۵].

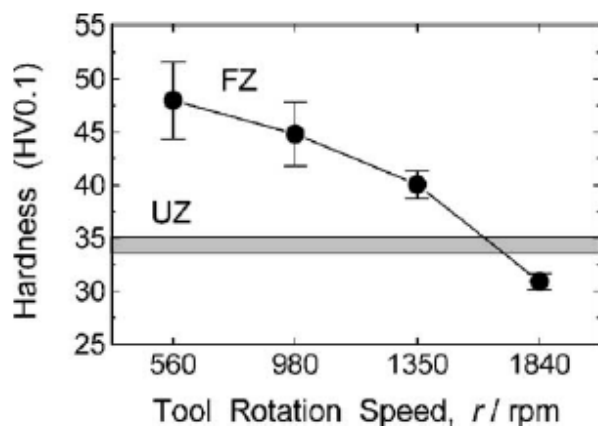
یکی دیگر از جنبه‌های بهبود خواص مکانیکی از طریق FSP افزایش سختی است که ناشی از ریزدانه شدن میکروساختار است. در شکل ۲-۱۵ پروفیل سختی نمونه‌ای که چندین پاس FSP شده آورده شده است. علاوه بر افزایش سختی تا ۱۱۰ HV که تقریباً ۲۰٪ بیشتر از فلز پایه است، نوسان چندانی در پروفیل سختی مشاهده نمی‌شود در حالی که در فلز پایه نوسانات پروفیل سختی، زیاد است [۴۲].





شکل ۲-۱۵. یکنواختی میکروسختی در اثر اعمال FSP [۴۲].

در پژوهش الانگوان و همکارانش [۴۰] افزایش ریزسختی از  $35\text{HV}$  فلز پایه به  $47\text{HV}$  در اثر FSP گزارش شده است که در شکل ۲-۱۶ قابل مشاهده است، همچنین کاهش میزان ریزسختی با افزایش سرعت دورانی به علت افزایش دما و بزرگ شدن دانه طبیعی به نظر می رسد.



شکل ۲-۱۶ تغییرات سختی با تغییرات سرعت دورانی [۴۰].

## ۲-۹ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فلزات ناهمجنس

اتصال فلزات غیر همجنس با کیفیت و خواص مکانیکی مطلوب از مشکلات مهم و اساسی صنعت می باشد. یکی از روشهای بسیار پر کاربرد جهت رفع این مشکل فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی میباشد. هدف از اتصال دو فلز غیر همجنس ترکیب خواص مکانیکی همچون شکل پذیری بالا فلز اولیه و خواصی همچون مقاومت به خوردگی، حرارتی و الکتریکی فلز ثانویه که ترکیب این دو خاصیت ممکن است در صنایع زیادی استفاده شود.

زمانی که جوشکاری فلزات غیر مشابه توسط FSW مدنظر است به دو نکته باید توجه کرد:

- ✓ خواص مواد.
- ✓ امکان تشکیل ترکیبات ترد بین فلزی.

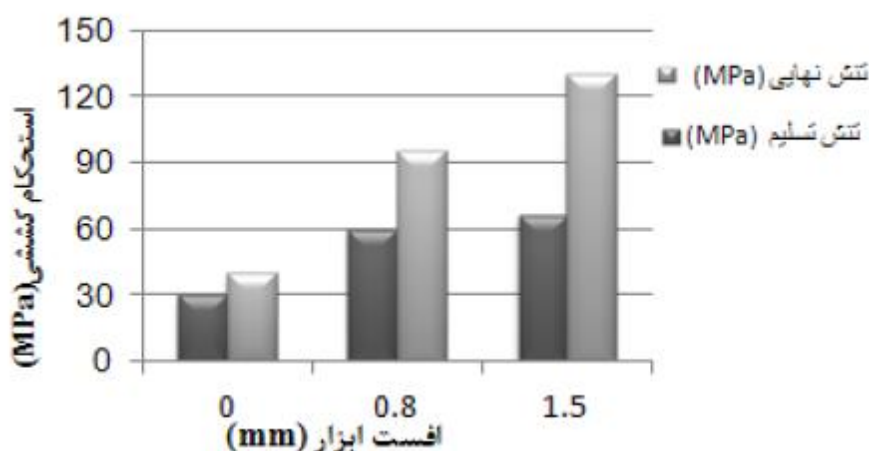
از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه اتصال فلزات غیر هم جنس به روش اصطکاکی اغتشاشی کیمپونگ<sup>۴۱</sup> و همکاران [۴۶] در تحقیقی امکان اتصال AL۶۰۶۱ به فولاد نرم را بررسی کرد. آنها گزارش دادند که هم سرعت چرخشی ابزار و هم موقعیت نسبی پین به خط اتصال، بروی میکروساختار و خواص کششی اتصال تاثیرگذار است. سرعت چرخشی در ۲۵۰ rpm بهینه گزارش گردیده و هرگونه افزایش یا کاهش در سرعت چرخشی، افت قابل توجهی در استحکام کششی اتصال را به همراه دارد. در این پژوهش با انتقال پین به سمت آلومینیوم که در سمت پسروری قرار گرفته بود استحکام کششی جوش افزایش پیدا کرد. هنگامی که ۹۰ درصد قطر پین پین به سمت آلومینیوم آفست شد، استحکام کششی اتصال به بیشترین مقدار خود رسید که در حدود ۲۴۰ MPa بود که تقریباً ۸۶ درصد استحکام کششی آلومینیوم می باشد.

در پژوهش دیگری اتصال دو فلز غیر هم جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۰ به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ به وسیله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط نوروزی و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [۴۷]. تاثیر برخی از پارامترهای جوشکاری بررسی و نتایج ذیل حاصل گردید:

- ✓ افست ابزار نقش تعیین کننده ای در خواص مکانیکی ناحیه اتصال دارد به طوری که با افزایش افست ابزار تا ۱/۵ میلی متر استحکام جوش از ۴۰ به ۱۳۰ MPa افزایش یافت. نتایج حاصل از آزمون کشش در افستهای مختلف در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است، مقدار استحکام کششی در افست صفر و ۰/۸ میلی متر به دلیل وجود عیوبی همچون ترک و حفره در ناحیه اغتشاش ،

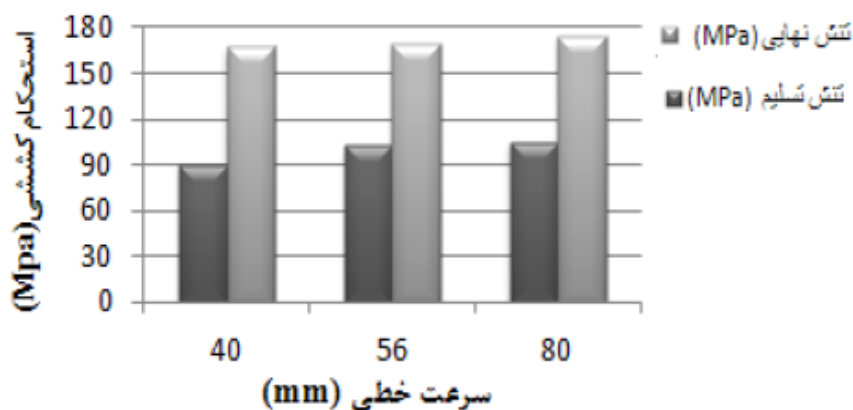
<sup>۴۱</sup>Kimapong

افت کرده و همچنین محل شکستها نمونه ها بوده است.



شکل ۲-۱۷ تاثیر افست ابزار بر مقدار استحکام کششی [۴۷].

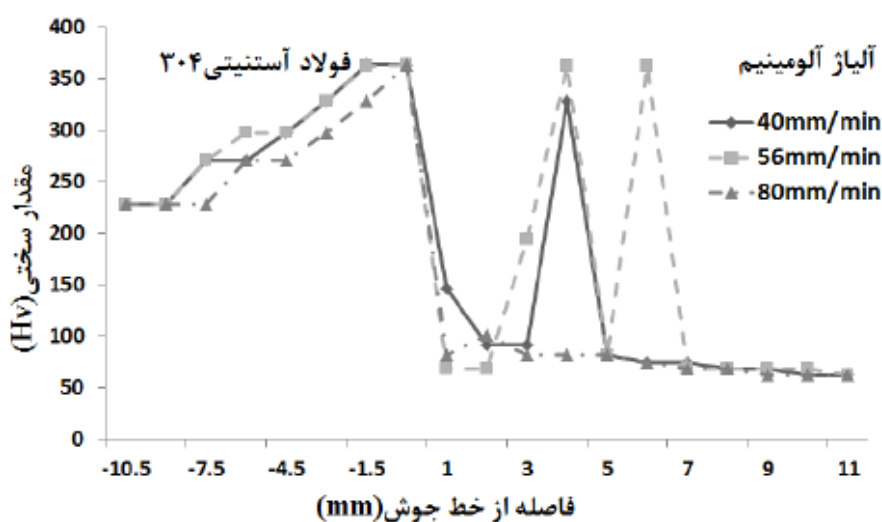
✓ سرعت پیشروی تاثیر بسیار زیادی بر روی استحکام کششی اتصال نداشته به گونه ای که با افزایش آن از مقدار ۴۰ به ۸۰ mm/min ، استحکام کششی از ۱۶۰ به ۱۷۵ MPa افزایش یافت. در شکل ۲-۱۸ نتایج آزمون کشش در سرعتهای پیشروی مختلف در افست ۱/۵ mm نشان داده شده است .



شکل ۲-۱۸ تاثیر سرعت خطی ابزار بر استحکام [۴۷].

✓ با انتخاب سرعت دورانی ۵۰۰ rpm ، افست ۱/۵ mm ، سرعت خطی ۸۰ mm/min و شرایط مطلوب حاصل گردید.

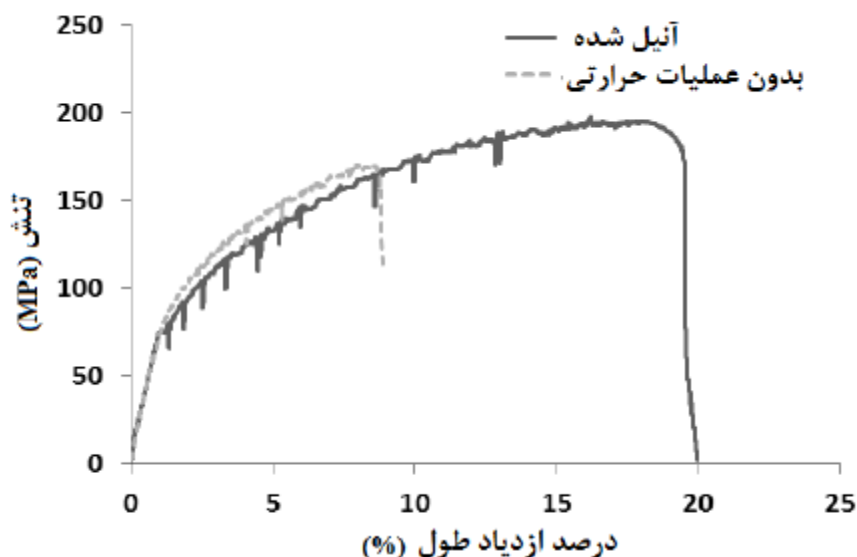
✓ مقدر سختی با افزایش سرعت پیشروی، کاهش یافته است، شکل ۲-۱۹ تغییرات مقدار سختی با سرعت‌های مختلف ابزار با فاصله از مرکز جوش را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی، مقدار سختی در ناحیه فولاد کاهش و در ناحیه آلیاژ آلومینیوم، با کاهش سرعت پیشروی مقدار سختی افزایش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان به ریز دانه شدن بیشتر آلیاژ آلومینیوم نسبت داد، همچنین مقدار سختی در ناحیه اغتشاش به دلیل وجود ذرات فولاد، دارای نوسان می‌باشد.



شکل ۲-۱۹ تاثیر سرعت‌های پیشروی مختلف در مقدار سختی [۴۷].

✓ با عملیات آنیل روی نمونه جوشکاری شده مقدار استحکام به میزان ۹ درصد و ازدیاد طول به ۲ برابر افزایش یافته است. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به دلیل جابه جایی مواد به وسیله ابزار جوشکاری، به هم ریختن ساختاری و مرز دانه ها در ناحیه اغتشاش حادث می‌شود. همچنین به دلیل اینکه نمونه جوش در تماس با هوا بوده و به سرعت سرد می‌شود، فرصت کافی برای برطرف کردن این عیوب وجود ندارد. این عامل دلیل اصلی کاهش استحکام در ناحیه اغتشاش بوده و به دنبال آن شکست نمونه ها در این ناحیه وقوع می‌پیوندد. با آنیل نمونه جوش، زمان لازم برای نفوذ و جابه جایی اتمها فراهم می‌شود. لذا ضمن اینکه عیوب موجود در

دانه بندی ناحیه اغتشاش برطرف می شود، تنشهای باقی مانده نیز حذف می شود و این امر باعث می شود که مقدار ازدیاد طول نمونه اتصال افزایش یابد.



شکل ۲-۲۰ تاثیر عملیات حرارتی اتصال بر مقدار استحکام کششی و درصد ازدیاد طول [۴۷].

## ۱۰-۲ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم به مس

اتصال آلومینیوم به مس تا به امروز به روشهای مختلفی از جمله جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری انفجاری، جوشکاری نوردی انجام شده است. به علت اینکه اختلاف نقطه ذوب آلومینیوم و مس در حدود  $425^{\circ}\text{C}$  است و به ندرت میتوان هر دو را در یک لحظه ذوب کرد. علاوه بر این،  $\text{Cu}$  و  $\text{Al}$  در حالت مذاب به طور کامل در هم حل می شوند ولی حلالیت کمی در حالت جامد دارند که این امر باعث تشکیل ترکیبات بین فلزی بسیاری در محل اتصال می شود و استحکام و خواص کششی اتصال به شدت تحت تاثیر قرار می گیرد [۴۸]. گزارش شده است که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فلزات غیر همجنس، این ترکیبات بین فلزی، به علت تغییر شکل شدید و حرارت ایجاد میشوند. مشابه دیگر روشهای اتصال دهی در صورت ایجاد این ترکیبات در سطح وسیع، اتصال مورد نظر خواص مکانیکی ضعیفی از خود نشان میدهد؛ که این به دلیل طبیعت ترد این ترکیبات می باشد [۴۹].

از جمله تحقیقات انجام شده در خصوص جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم به مس تحقیق عبدالله زاده و همکارانش [۵۰] تاثیر FSW را بر روی استحکام کششی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۶۰ و مس

خالص که به صورت لپ متصل گردیده بودند می باشد، نمونه های تست کشش در جهت عرضی (Transverse) که شامل هر چهار ناحیه جوش Parent Material، HAZ، MAZ، Nugget می باشد تهیه گردید. نتایج تست کشش بر حسب نیروی شکست و محل شکست در جدول ۲-۴ قابل مشاهده می باشد.

جدول ۲-۴. نتایج آزمون کشش اتصال آلیاژ ۱۰۶۰ و مس خالص [۵۰].

	Rotational speed (rpm)			
	750	950	1180	1500
Welding speed (mm/min)				
30	2175 (t.n, A)	2091 (t.n, A)	1902 (t.n, A)	1873 (t.n, A)
60	1362 (t.n, A)	2336 (BM)	2252 (t.n, A)	2152 (t.n, A)
95	732 (t.n, A)	1276 (t.n, A)	2642 (BM)	2472 (BM)
118	0	1215 (t.n, A)	2024 (t.n, A)	2709 (BM)
190	0	0	2078 (t.n, A)	2359 (BM)
300	0	0	0	1406 (t.n, A)
375	0	0	0	1370 (t.n, A)

از نقطه نظر میکروساختاری، تشکیل ترکیبات بین فلزی در سمت پیشرونده بدلیل کرنش بیشتر و دمای بالاتر در این سمت زیادتر است. تعداد زیادی از محققان بر این اعتقادند که ترکیبات بین فلزی  $CuAl_2$ ،  $CuAl$  و  $Cu_9Al_4$  مسبب رشد ترک در حین تست کشش هستند.

افزایش سرعت جوشکاری در سرعت های چرخش ثابت rpm ۱۱۸۰، ۱۵۰۰ و ۹۵۰ باعث افزایش نیروی شکست تا مقدار حداکثر و سپس کاهش می یابد.

افزایش سرعت چرخش یا کاهش سرعت جوشکاری باعث کاهش نیروی برشی می شود بدلیل اینکه مقادیر بالاتری از ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک آلومینیوم و مس بوجود می آید. چون در زمانی که سرعت چرخش بیشتر می شود حرارت نیز بالاتر می رود و تولید این ترکیبات افزایش می یابد. بنابراین افزایش دما باعث تسریع جوانه زنی و رشد ترکیبات بین فلزی می شود.

در تحقیق دیگری Xia-Wei و همکارانش [۵۱] استحکام کششی اتصال آلیاژ آلومینیوم ۱۳۵۰ و مس خالص مورد بررسی قرار داده است. جدول ۲-۵ خواص کششی اتصالات آلومینیوم - مس را نشان می دهد.

جدول ۲-۵ خواص کششی اتصال آلیاژ آلومینیوم ۱۳۵۰-مس خالص [۵۱].

Material	UTS/MPa	Elongation/%
1350 Al alloy	205	12.8
Copper	301	27.4
Al-Cu joints	152	6.3

همانطور که در جدول فوق مشاهده می شود استحکام اتصال نسبتا خوب است. مقدار استحکام کششی (Ultimate Tensile Strength) اتصال در حدود ۱۵۲ Mpa بوده که این مقدار، ۷۴ درصد استحکام کششی فلز پایه آلومینیومی می باشد. درصد ازدیاد طول این اتصال غیر هم جنس ۶/۳ درصد می باشد. به دلیل میکروساختار غیر همجنس، استحکام این اتصال کمتر از فلزات پایه آن می باشد. شکل ۲-۲۱ محل شکست نمونه ها از سمت ناگت آلومینیوم را نشان می دهد پدیده گلویی شدن نیز در نمونه ها بوجود آمده است که این موضوع بیانگر پیوند قوی بین آلومینیوم و مس می باشد.

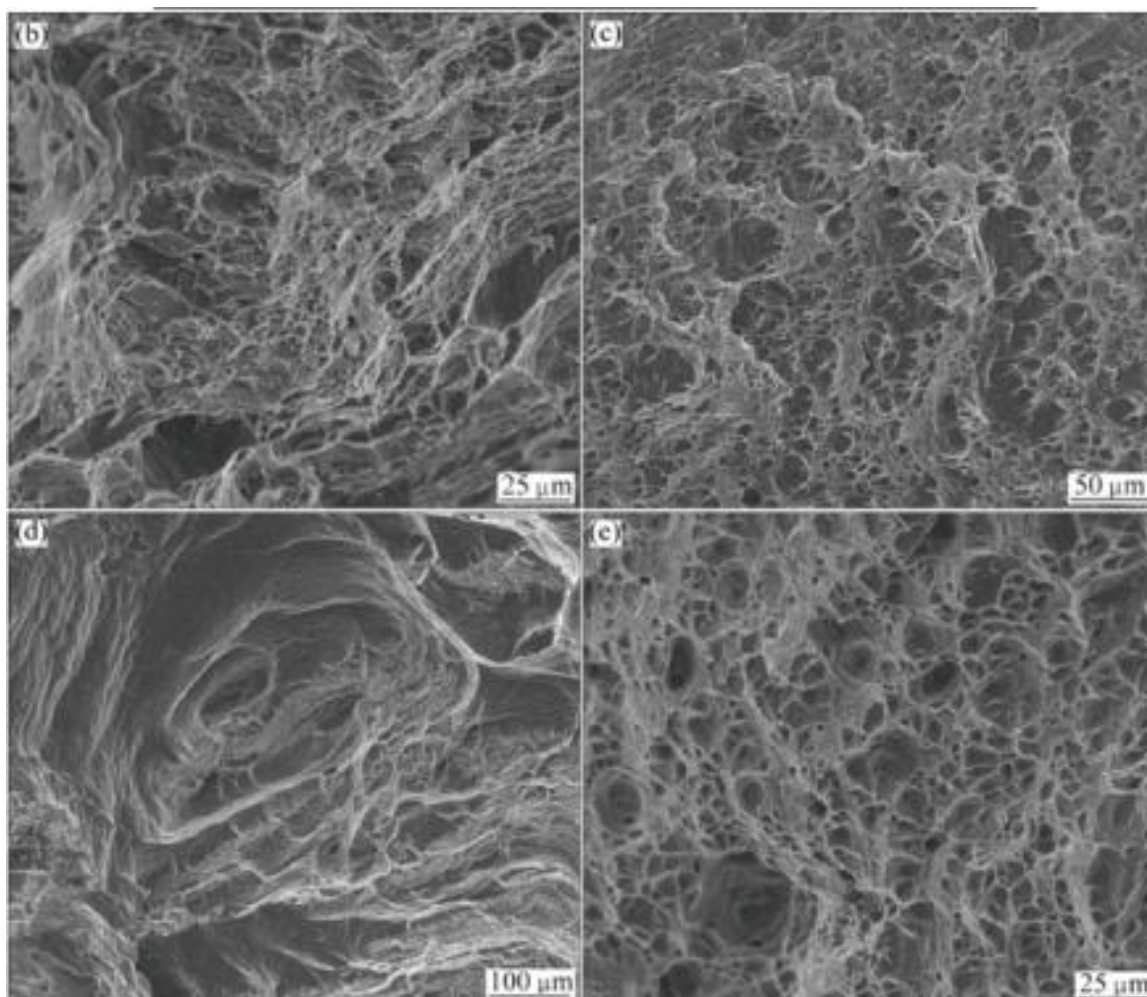
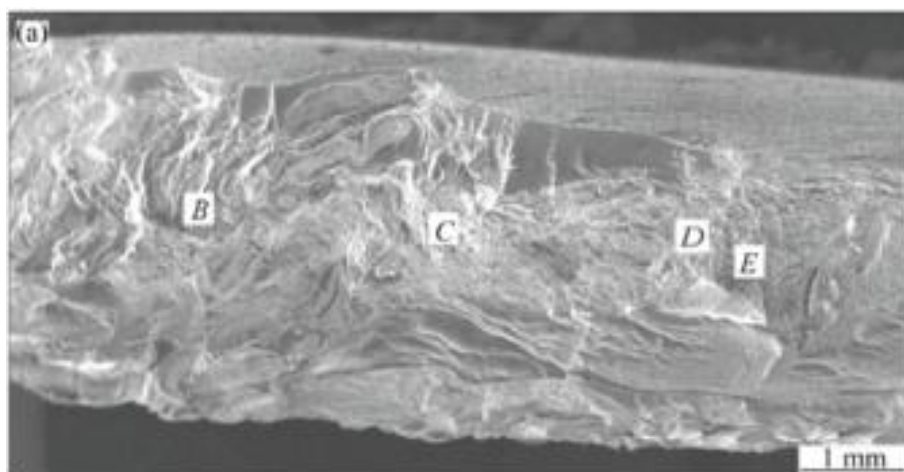


شکل ۲-۲۱ ماکرو گراف سطح شکست اتصال آلومینیوم ۱۳۵۰ به مس [۵۱].

شکل ۲-۲۲ تصاویر SEM از محل شکست را نشان می دهد، شکل (a) سطح شکست و ویژگی های متفاوت سطح شکست در مقطع عرضی جوش بدلیل میکروساختار پیچیده ناگت را نشان داده و شکل های (b~e) بزرگنمایی سطح شکست از نقاط مختلف شکل (a) را نشان می دهد. همانطور که در شکل (b) مشاهده می شود، سطح صاف و گودیهای کوچک در این منطقه وجود دارد، تعداد زیادی گودی با عمق های متفاوت در شکل های (c) و (e) دیده می شود که نشان دهنده وقوع شکست داکتیل در این منطقه می باشد و در شکل (d) الگوی شکست بین دانه ای در بعضی از نقاط مشاهده می گردد.

از آنجا که رسیدن به ساختار بدون نقص در فرآیند FSW اتصال آلیاژهای نامشابه مس خالص به ۶۰۶۱ کاملاً سخت است، بنابراین مقدار زیادی حفره، ترک و نقایص دیگری در منطقه جوش به وجود می آید.

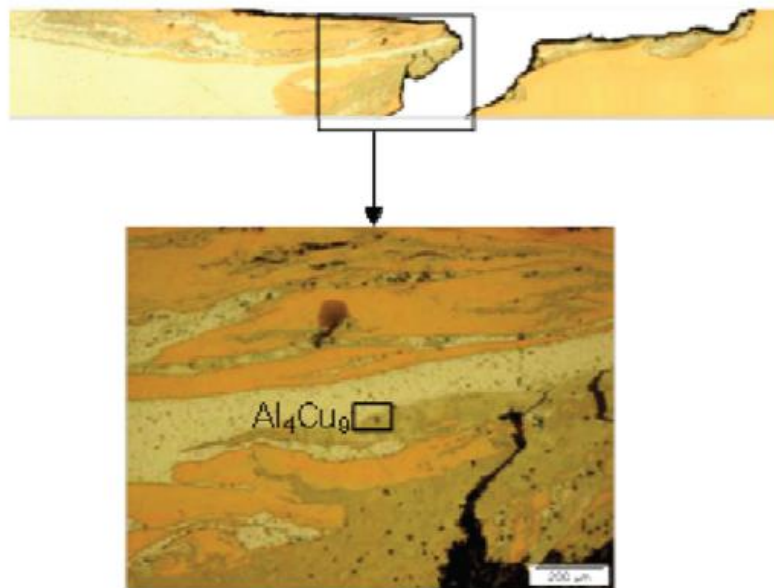




شکل ۲-۲۲ تصاویر SEM از سطح شکست اتصال آلومینیوم ۱۳.۵۰ به مس خالص: (a) ماکروگراف سطح شکست، (b~e) بزرگنمایی میکروساختار مناطق مختلف در شکل (a) [۵۱].

در پژوهش دیگری اویانگ<sup>۴۲</sup> و همکارانش، سختی اتصال ۶-T ۶۰۶۱ /مس خالص را بررسی کرده اند، آنها میکرو سختی اتصال را در جهت ضخامت در شرایط جوشکاری ۹۱۴rpm و ۹۵ mm/min مورد بررسی قرار دادند. آنها در تحقیقات خود به ترکیبات متعدد بین فلزی نظیر  $CuAl$ ،  $CuAl_2$  و  $Cu_9Al_4$  با مقدار کمی از محلول اشباع شده  $\alpha-Al$  برخورد کردند، سختی فلزات پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ و مس خالص به ترتیب برابر ۹۰-۱۰۰ Hv و ۷۵-۸۵ Hv است. کمترین میزان سختی برابر ۶۵ Hv در منطقه HAZ آلیاژ ۶۰۶۱ می باشد، یک سختی نوسانی (۷۶۰-۱۳۶ Hv) در ناگت مشاهده می شود که این امر به دلیل وجود ترکیبات بین فلزی با میکرو ساختارهای متفاوت و الگوی سیلان مواد می باشد، سختی و استحکام کششی ترکیبات بین فلزی بالاتر از مس و آلیاژ ۶۰۶۱ است [۵۲].

در تحقیق دیگری آکینلابی<sup>۴۳</sup> و همکارانش سیلان مواد و دلایل شکست نمونه ها و محل شکست اتصال  $Cu-Al_{15}V_{54}$  را بررسی نمودند، همانطور که در شکل ۲-۲۳ مشاهده می شود شکست این اتصال از ناحیه TMAZ آلومینیوم در حالتی که آلومینیوم در سمت پس رونده قرار گرفته اتفاق می افتد، با توجه به ویژگیهای مورفولوژیکی فصل مشترک اتصال با میکس شدن خیلی کم می توان انتظار داشت که مقدار UTS بدست آمده برای این اتصال بدلیل مقدار نفوذ کم و پیوند متالورژیکی ضعیفی که بین دو فلز در فصل مشترک آنها بوجود آمده پایین می باشد [۵۳].

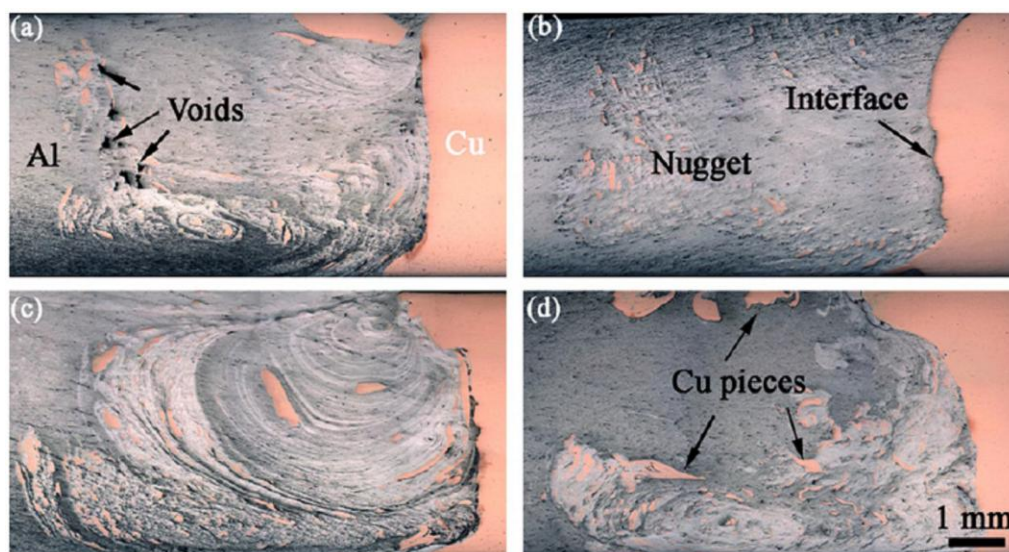


شکل ۲-۲۳ سطح شکست جوش تولید شده در سرعت جوشکاری ۹۵۰rpm و سرعت چرخش ۵۰mm/min [۵۳].

<sup>۴۲</sup>Ouyang

<sup>۴۳</sup>Akinlabi

در پژوهش دیگری که توسط زو<sup>۴۴</sup> و همکارانش انجام شد تاثیر سرعت دورانی بر شکل ظاهری، ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم ۱۰۶۰ به مس خالص مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲-۲۴ ماکروساختار مقطع عرضی اتصال در سرعت های دورانی متفاوت نشان داده شده است. در سرعت های چرخش پایین ۶۰۰ rpm و ۴۰۰، تکه های مس جدا شده از ورق مسی در انتها و قسمت پس رونده ناگت توزیع شده است که در نتیجه سیلان مواد در اثر چرخش پین می باشد. علاوه براین، در فصل مشترک Al-Cu تنها مقدار کمی از تکه های مس دیده شد. حفرات زیادی در سرعت چرخش ۴۰۰ rpm در منطقه ناگت مشاهده شد (شکل (a)). در حالیکه جوش بدون نقص در سرعت چرخش ۶۰۰ rpm به دست آمد (شکل (b)). تشکیل حفرات بستگی به ناکافی بودن واکنش در سرعت چرخش پایین دارد. با افزایش سرعت چرخش، عمل مخلوط شدن قوی تر انجام می شود، بنابراین تکه های مس بیشتری از ورق مسی تراشیده می شود و در تمام ناگت توزیع می شود. در حالیکه، مقدار زیادی از تکه های مس در انتهای منطقه جوش توزیع می شوند و مقدار زیادی از آنها در فصل مشترک Al-Cu در سرعت های چرخش ۱۰۰۰ rpm و ۸۰۰ مشاهده گردیدند (شکل (c,d)) [۱۸].



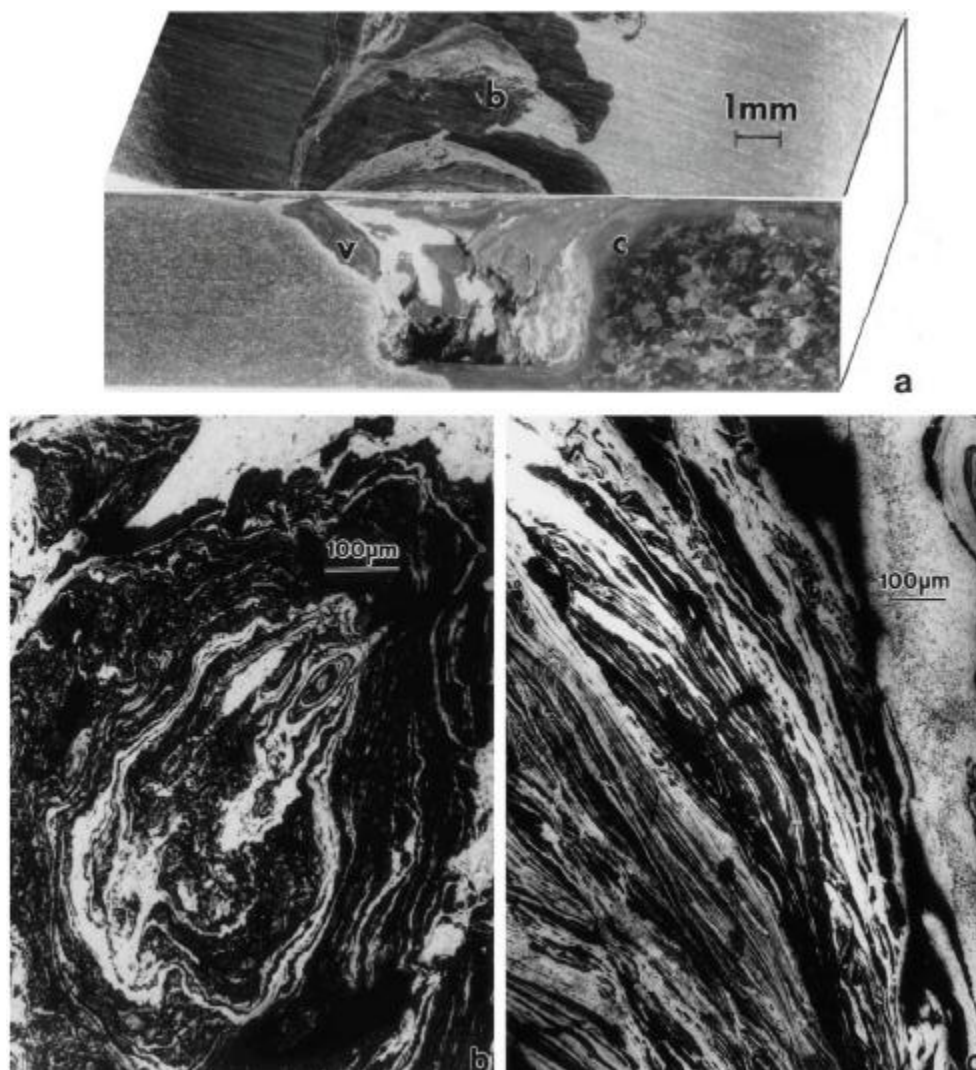
شکل ۲-۲۴ مقطع عرضی ماکروساختار اتصال در سرعت های چرخش (a) ۴۰۰ rpm (b) ۶۰۰ rpm (c) ۸۰۰ rpm (d) ۱۰۰۰ rpm [۱۸].

در تحقیق مور<sup>۴۵</sup> و همکارانش، نیز سیلان مواد در اتصال Al<sub>۶۰۶۱</sub>-Cu نشان داده شده است. در شکل ۲-۲۵ بزرگنمایی میکروساختار اتصال نشان داده شده است. شکل های (b,c) لایه های تکرار شونده که

<sup>۴۴</sup>Xue

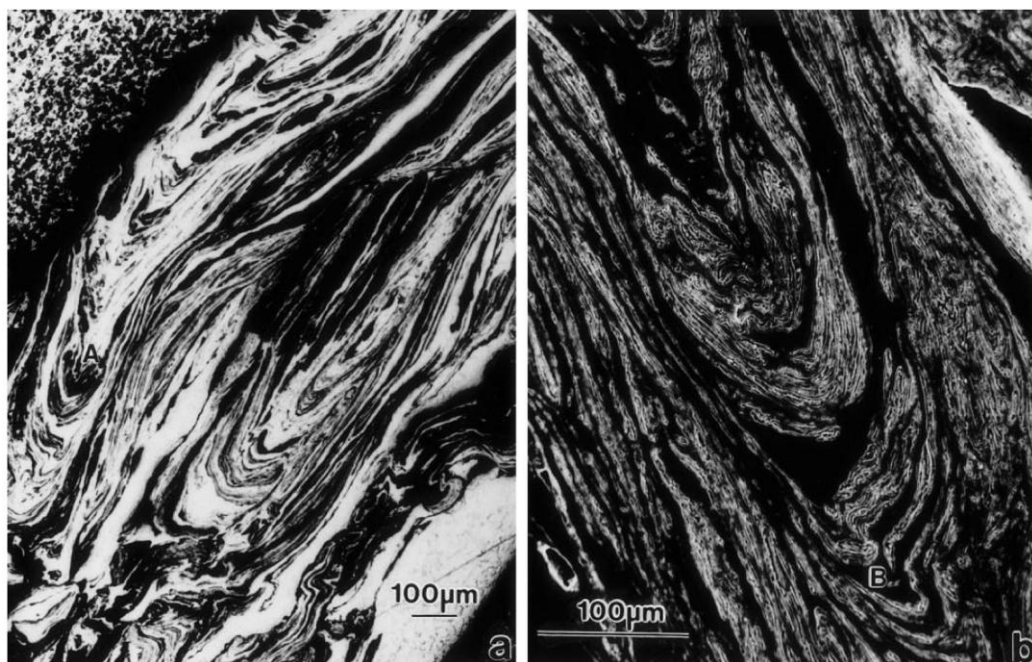
<sup>۴۵</sup>Murr

به وسیله تبلور مجدد مکانیکی به وجود می آیند را نشان می دهد. این منطقه تبلور مجدد یافته دارای اندازه دانه های متغیر که این نشان دهنده درشت شدن بعضی از دانه ها در ادامه تبلور مجدد دینامیکی در حین سیلان حالت جامد در پروسه FSW می باشد [۵۴].



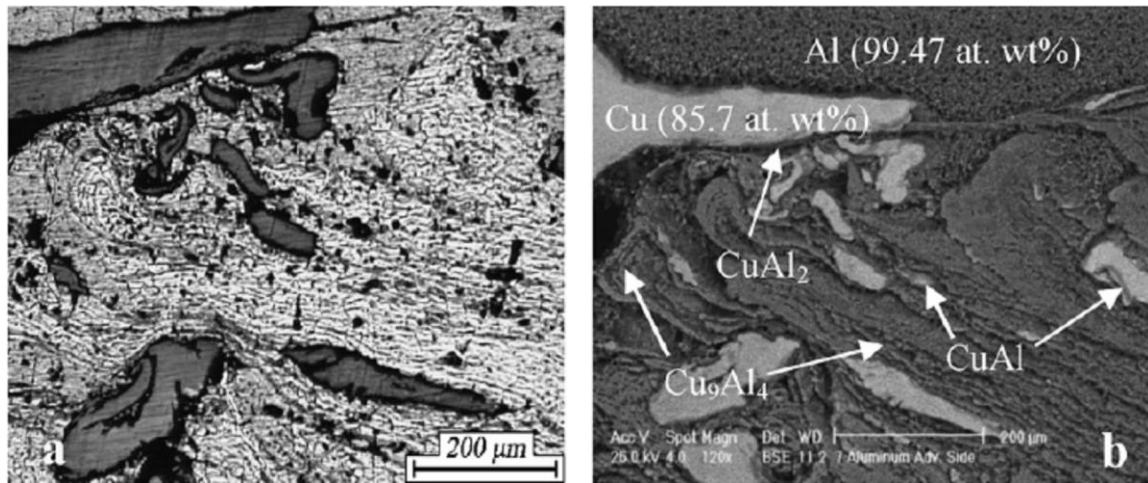
شکل ۲-۲۵ (a) اتصال Al6061-Cu (b) منطقه بزرگنمایی شده از سطح جوش (c) منطقه بزرگنمایی شده از مقطع عرضی جوش [۵۴].

شکل ۲-۲۶ جزئیات بیشتری از ساختارهای تکرار شونده لایه ای که در شکل بالا مشخص شده است را نشان می دهد که ناشی از تبلور مجدد دینامیکی می باشد.



شکل ۲-۲۶ ساختارهای تکرار شونده لایه ای (a) تصویر میکروسکوپ نوری از این لایه ها (b) تصویر SEM از لایه های تکرار شونده [۵۴].

ساختار فصل مشترک Al/Cu بسیار پیچیده است. داخل این منطقه، یک ساختار لایه ای که شامل منطقه مخلوط شده مکانیکی از لایه های مس و آلومینیوم است که نزدیک به فصل مشترک تشکیل شده و در شکل ۲-۲۷ نشان داده شده است. این ساختارهای لایه ای همراه با ساختار خاکستری رنگ هستند که در شکل (a) نشان داده شده است. قسمت هایی از مواد با کنتراست متفاوت بصورت اتفاقی در زیر لایه آلومینیومی نزدیک فصل مشترک با اندازه ها و ساختارهای متفاوت توزیع شده اند. بعضی از این قسمت ها محتوی ساختار لایه ای و دانه های ریز دیگر با ساختار غنی از مس می باشد. شکل (b) تصاویر SEM از بخش های مشابه با فازهای متفاوت که بدلیل کنتراست می باشد را نشان می دهد.



شکل ۲-۲۷ تصاویر (a) میکروسکوپ نوری و (b) تصویر SEM از یک قسمت مشابه از سمت پیش رونده در ناگت [۵۴].

## ۱۱-۲ عیوب

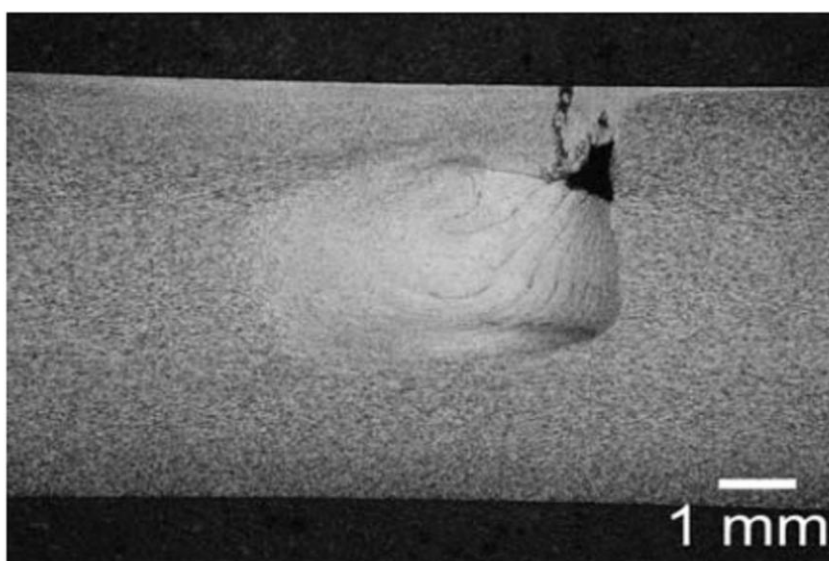
### ۱-۱۱-۲ عیوب جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

عیوب رایج در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شامل حفره، تخلخل و عیوب سطحی می شود. در سرعت چرخشی ثابت، افزایش سرعت پیشروی منجر به ایجاد عیب حفره تونلی می شود. اندازه حفره تونلی با افزایش سرعت پیشروی افزایش می یابد که به خاطر جریان ناکافی ماده در ته جوش است. نسبت سرعت پیشروی به سرعت چرخشی و شکل ابزار عوامل مهم در شکل گیری عیب حفره تونلی می باشند. برای شکل و جنس یکسان ابزار، نسبت بالا به شکل گیری حفره کمک می کند. جوشکاری اصطکاکی با انواع مختلف عیوب همراه است که از پارامترهای نامناسب جوش نتیجه گشته اند. دمای فرآیند ناکافی که برای مثال از سرعت چرخش پایین یا سرعت حرکت زیاد ناشی می شود، نمیتواند مواد را برای فرآیند در وسعت زیاد در هنگام اتصال آماده کند. این حالت میتواند عیب تونلی را در سطح یا زیر سطح جوش ایجاد کند. دمای کم، نیروی فورج را محدود می کند و چسبندگی مواد را به طور گسترده از هر طرف کاهش می دهد. همچنین اگر پین به مقدار کافی بلند نباشد، سطح مشترک پایین قطعه ممکن است که در هم خوب ادغام نگردد که موجب کمبود نفوذ میشود. این عیب می تواند عامل اصلی در ترک های خستگی باشد. البته در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با توجه به اندازه پین احتمال وقوع عیب تونلی به مانند جوش اصطکاکی اغتشاشی نیست. برای جلوگیری از این عیب عموماً از چندین پاس عملیات اغتشاشی با طول متفاوت پین استفاده می گردد [۵۵].

سه نوع عیب عمده در جوشکاری همزن اصطکاکی وجود دارد:

### • حفره

ایجاد حفره به دلایل مختلفی ممکن است اتفاق بیفتد از جمله: فشار فورج ناکافی، سرعت جوشکاری خیلی بالا، گپ اتصال خیلی بزرگ. موادی که توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تغییر فرم داده باید قادر باشند که حفرات تولید شده به وسیله حرکت پین را پر کنند. اگر طراحی ابزار نادرست باشد (قطر خیلی زیاد پین) یا سرعت حرکت خیلی سریع باشد، ماده تغییر فرم یافته قبل از اینکه بتواند ناحیه پشت ابزار را پر کند سرد میشود. بعلاوه نیاز است که شانه حرارت کافی تولید کند تا به ماده اجازه دهد که در اطراف پین جریان پیدا کنند. اگر حرارت کافی تولید نشود (فشار فورج ناکافی یا قطر شانه ناصحیح) بنابراین ماده به طور صحیح جریان نمی یابد و حفره شکل می گیرد.



شکل ۲-۲۸ عیب حفره [۱۱].

### • بقایای خط اتصال

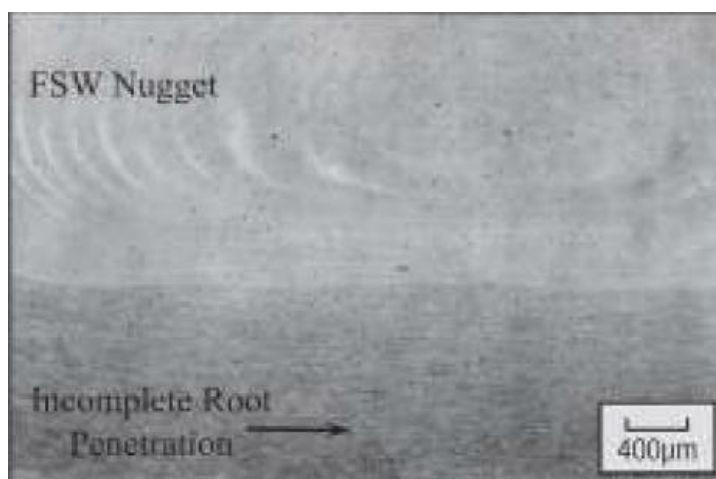
این عیب ناشی از حضور لایه های نیمه پیوسته اکسید در طول ناحیه ناگت جوش است و به خاطر تمیزکاری ناکافی قطعه کار قبل از جوشکاری یا تغییر شکل ناکافی در سطوح اکسید سطحی بین دو ورق بخاطر محل ناصحیح ابزار در خط اتصال، سرعت خیلی زیاد جوشکاری یا قطر خیلی بزرگ شانه ابزار اتفاق می افتد. این عیب به راحتی قابل تشخیص و دیده شدن نیست [۱۱].

در مواقعی سطوح اکسیدی در طول جوشکاری دفرمه و شکسته میشوند و گسترش می یابند. چسبندگی ناکافی سطوح اکسیدی باعث شکل گیری این عیب می شود و به دلیل مخلوط شدن نامنظم لایه اکسیدی روی سطح بوده و باعث کاهش داکتیلیتی می شود (عیب اس تنبل).

• نفوذ ناقص ریشه

چندین دلیل برای نفوذ ناقص ریشه وجود دارد که شامل: تغییرات موضعی در ضخامت ورق، همترازی نامناسب و طراحی ناصحیح ابزار می باشد. نفوذ ناقص ریشه زمانی اتفاق می افتد که پین از میز نگه دارنده، فاصله زیادی داشته بنابراین یک ناحیه ای بین کف ابزار و سطح پایینی ورق بدون تغییر فرم باقی می ماند.

وقتی جوش اصطکاکی اغتشاشی تحت تنش خمشی قرار میگیرد در طول خط نفوذ ناقص گسیخته می شود. بنابراین نیاز است که ابزار مناسبی با طول پین بیشتر استفاده شود تا عمق تغییر شکل کافی و نفوذ ناقص ریشه را کم کند لازم به ذکر است که این پین نباید میز نگه دارنده پشتی را لمس کند [۱۱].



شکل ۲-۲۹ عیب نفوذ ناقص ریشه [۱۱].

۲-۱۱-۲ عیوب جوشکاری کامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با ذره

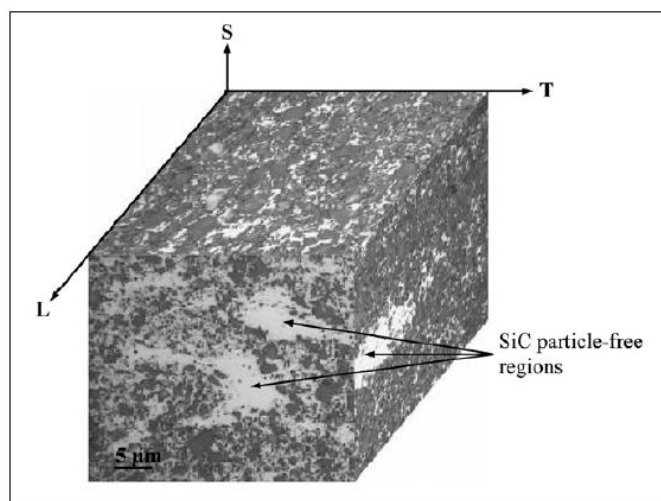
یکی از مشکلاتی که در راستای جوشکاری کامپوزیتهای زمینه فلزی تقویت شده با ذرات با استفاده از روشهای جوشکاری مرسوم وجود دارد، جدایش<sup>۴۶</sup> است.

در مطالعه ای که ازن<sup>۴۷</sup> و همکاران روی کامپوزیت زمینه ۲۱۲۴ Al حاوی ۲۵٪ ذرات تقویت کننده SiC انجام دادند، متوجه شدند که در اثر نور، مناطقی خالی از ذرات تقویت کننده وجود دارد که در راستای نور کشیده شده اند و تصویر شماتیک آن در شکل ۲-۳۰ قابل مشاهده است.

<sup>۴۶</sup> Segregation

<sup>۴۷</sup> SeyinUzun

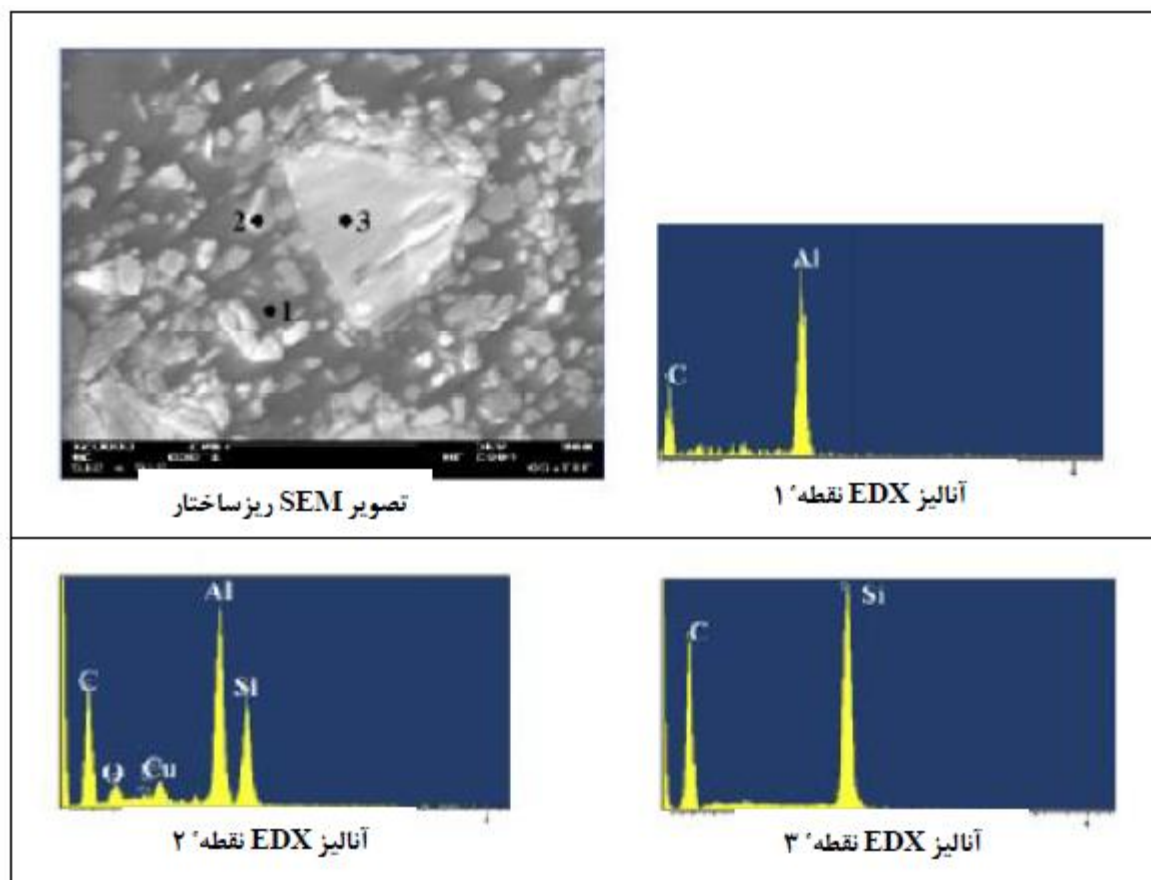




شکل ۲-۳۰ ریزساختار کامپوزیت AA2124/SiC/25p در جهات طولی (L) و عرضی (T) پس از نورد [۵۶].

در ریزساختار به دست آمده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۴۸</sup> (SEM) سه ناحیه مختلف قابل رویت است: زمینه ی آلومینیمی، ذرات SiC ریز و ذرات SiC درشت که پیک EDX و ریزساختار متناظر هریک در شکل ۲-۳۱ دیده می شود. در شکل ۲-۳۱ نقطه ۱ متناظر با زمینه Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و نقاط ۲ و ۳ به ترتیب با ذرات SiC ریز و درشت متناظرند. اندازه میانگین ذرات ریز ۰.۴-۰.۰۵ μm و میانگین اندازه ذرات درشت ۵-۱۱ μm است [۵۶].

<sup>۴۸</sup>Scanning Electron Microscopy

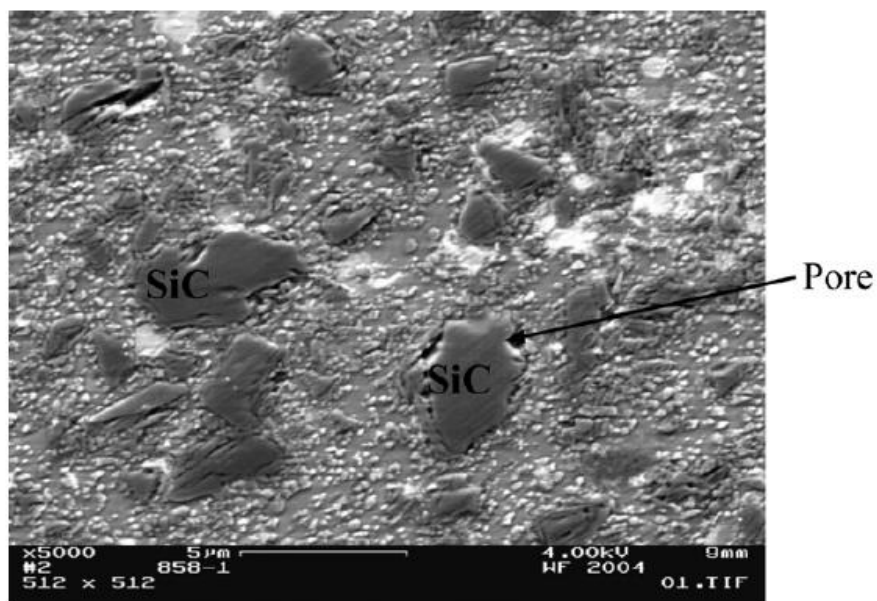


شکل ۲-۳۱ ریزساختار SEM کامپوزیت AA2124/SiC/25P در دکمه جوش و آنالیز EDX از موقعیت های ۱، ۲ و ۳ در همان ریز ساختار [۵۶].

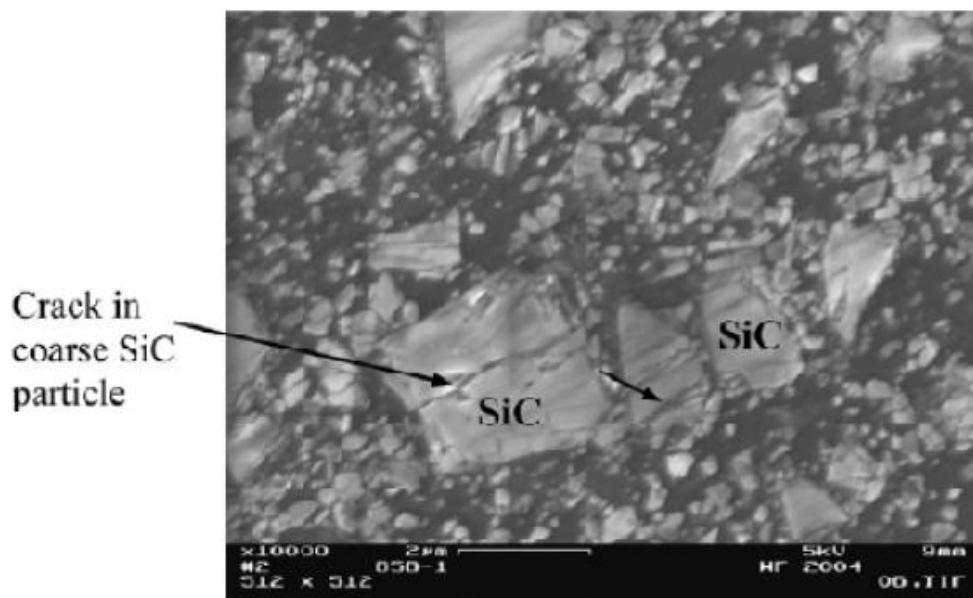
مشاهده شده است که در فصل مشترک زمینه و ذرات SiC درشت حفراتی تشکیل شده اند که ناشی از سرعت بالای اغتشاش و تلاطمی است که در دکمه جوش<sup>۴۹</sup> ایجاد می شود. حفرات مذکور در شکل ۲-۳۲ قابل مشاهده هستند.

از طرف دیگر برخی از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به دست آمده ترکهایی را نشان می دهد که در ذرات کاربید سیلیسیم درشت واقع در ناحیه اغتشاش یافته، به وجود آمده اند. این ترک ها در شکل ۲-۳۳ قابل مشاهده است و دلیل این امر احتمالاً به خاطر اغتشاش و تلاطم بسیار شدیدی است که در دکمه ی جوش بر روی زمینه آلومینیمی و ذرات تقویت کننده SiC صورت می گیرد.

<sup>۴۹</sup> Nugget

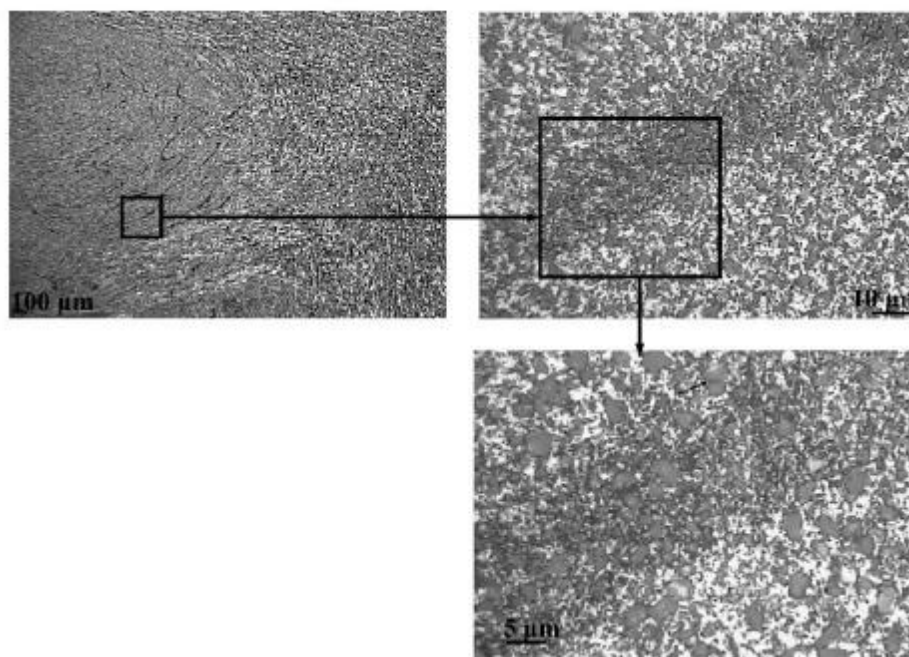


شکل ۲-۳۲ تشکیل حفرات و تخلل ها در اطراف برخی از ذرات SiC درشت در دکمه جوش [۵۶].



شکل ۲-۳۳ ترک خوردگی برخی از ذرات SiC درشت در دکمه جوش [۵۶].

عیب دیگری که در جوشکاری کامپوزیت AA۲۱۲۴/SiC/۲۵P اتفاق افتاد جدایش ذرات کاربید سیلیسیم و تشکیل نوارهایی غنی از کاربید سیلیسیم در زمینه آلومینیمی بود. در ریز ساختارهای به دست آمده از میکروسکوپ نوری<sup>۵۰</sup> مشاهده شد که نوارهایی غنی و فقیر از ذرات SiC به طور متناوب در کنار یکدیگر قرار گرفته اند. وجود چنین ساختارهایی در ریشه و نواحی میانی قطعه مشهودتر است. در شکل ۲-۳۴ ریزساختار نواری قابل مشاهده است [۵۶].

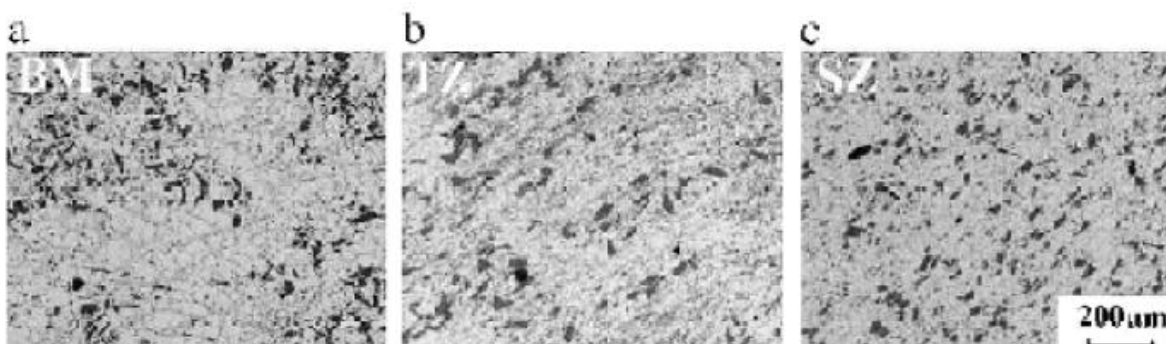


شکل ۲-۳۴ بزرگنمایی کوچک و بزرگ از ریزساختار نواری شکل که حاوی ذرات SiC درشت در دکمه جوش [۵۶].

در آزمایشی که قراچه و همکاران روی کامپوزیت زمینه A۳۵۶ حاوی ۱۵٪ حجمی ذرات تقویت کننده SiC انجام دادند، متوجه شدند که در ماده پایه، ذرات توزیع غیریکنواختی دارند و همچنین تجمع ذرات SiC به صورت موضعی دیده می شود. در ناحیه انتقالی که (شامل TMAZ و HAZ می باشد) نیز جدایش ذرات SiC به صورت نوارهایی در ریزساختار اتفاق می افتد که در شکل ۲-۳۵ قابل مشاهده

<sup>۵۰</sup> Optical microscopy

است. در ناحیه اغتشاش یافته در اثر تغییر شکل و گرمایش همزمان، ذرات به هم پیوسته از یکدیگر جدا شده و توزیع یکنواختی از ذرات تقویت کننده در منطقه اغتشاش یافته ایجاد می شود [۵۷].



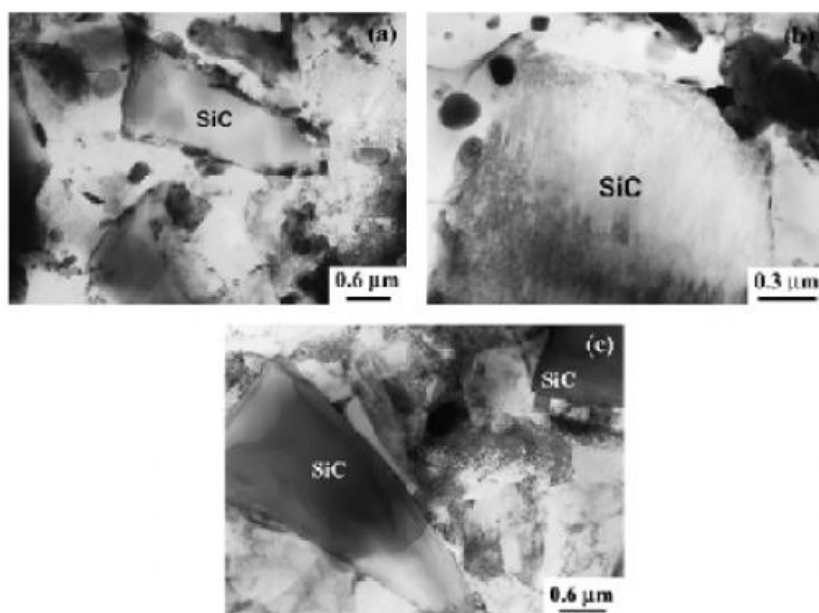
شکل ۲-۳۵ توزیع ذرات SiC در (a) ماده پایه، (b) ناحیه انتقالی و (c) در ناحیه اغتشاش یافته [۵۷].

در جوشکاری کامپوزیتهای زمینه فلزی توجه به دو موضوع لازم است. اول اینکه افزودن ذرات فاز ثانویه به زمینه، سبب افت پلاستیسیته<sup>۵۱</sup> کامپوزیت حاصل نسبت به ماده یا آلیاژ پایه می شود و دوم اینکه حضور ذرات سرامیکی فاز ثانویه سبب سایش و کاهش عمر کارکرد ابزار و همچنین تشکیل فاز های بین فلزی مضر می شود.

در مطالعه ای که ما و همکاران بر روی کامپوزیت  $Al-Cu-Mg$  ۲۰۰۹ تقویت شده با ذرات SiC انجام دادند، متوجه شدیم که ترکیب بین فلزی  $Cu_2FeAl_7$  در ناحیه اغتشاش یافته تشکیل شده است. در این تحقیق از فولاد ابزار H۱۳ برای ساخت ابزار استفاده شد و در اثر تماس ابزار با ذرات سرامیکی، ابزار دچار سایش شده است. تصاویر ریز ساختاری بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۵۲</sup> (TEM) شکل ۲-۳۶ نشان می دهد که فاز بین فلزی  $Cu_2FeAl_7$  در اطراف ذرات SiC تشکیل شده است چرا که پس از سایش ابزار توسط ذرات سرامیکی، آهن (Fe) ساییده شده از ابزار در اطراف ذرات SiC بر جای مانده و پس از واکنش با آلیاژ زمینه، فاز بین فلزی  $Cu_2FeAl_7$  تشکیل شده است [۵۸].

<sup>۵۱</sup> Plasticity

<sup>۵۲</sup> Transmission Electron Microscopy



شکل ۲-۳۶ تصاویر TEM فاز  $\text{Cu}_2\text{FeAl}_v$  در اطراف ذرات SiC در ناحیه اغتشاش یافته در شرایط (a) As-FSW ، (b) T-۴ و (c) فصل مشترک نسبتاً تمیز در حالت اکسترود شده. [۵۸].

۳

## فصل سوم مواد و روش تحقیق

### ۳ - مواد و روش تحقیق

در این پژوهش با استفاده از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، در محل اتصال، نانوکامپوزیتی با زمینه آلومینیوم ۶۰۶۱-مس خالص و ذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیم تولید شد. برای انجام این کار یک ابزار اصطکاکی اغتشاشی ساخته شد. پس از جوشکاری در دو حالت ساعتگرد و پادساعتگرد یک پاسه و دو پاسه با سرعت دورانی و سرعت پیشروی یکسان، سطح مقطع جوش مورد ارزیابی ریزساختاری گرفت. علاوه بر این، از جوشهای حاصل نمونه های تست کشش، تهیه شد و تاثیر افزودن پودر بر خواص فوق بررسی گردید.

#### ۱-۳ فلز پایه

ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ و مس خالص با ضخامت ۵ میلی متر تهیه شد و به منظور حصول اطمینان از ترکیب شیمیایی و استحکام، ورقها مورد آنالیز شیمیایی و تست کشش قرار گرفتند. لازم به ذکر است با توجه به مشخص نبودن جهت نورد متریال تامین شده برای آزمون کشش دو نمونه در جهت های عمود بر هم تهیه گردید. نتایج آنالیز شیمیایی در جدول ۱-۳ و نتایج تست کشش در جدول ۲-۳ قابل مشاهده می باشد که با توجه به نتایج به دست آمده صحت متریال تهیه شده مورد تایید قرار گرفت.

جدول ۱-۳ نتایج آنالیز شیمیایی

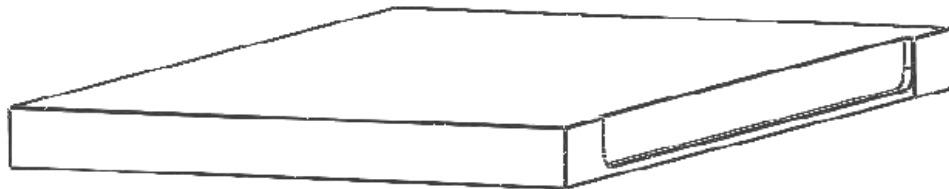
ترکیب شیمیایی								فلزات
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	
۰/۶۳	۰/۴۵	۰/۲۱	۰/۰۳	۰/۸۵	۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۰۱	Al6061-T6
۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۲۵	۹۹/۹	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۴	-	Pure Copper

جدول ۲-۳ نتایج آزمون کشش

استحکام کششی (Mpa)	فلزات
۳۲۸ و ۳۳۳	Al6061-T6
۲۱۹ و ۲۱۶	Pure Copper



به کمک اهر نواری نمونه‌ها با ابعاد  $5 \times 60 \times 120$  میلی‌متر تهیه گردید، سپس لبه طولی نمونه‌های تهیه شده کاملاً صیقلی گردید و نیم‌شیارهایی U شکل به پهنای  $0.5$  میلی‌متر و عمق  $4$  میلی‌متر به صورت کاملاً متقارن در هر یک از تسمه‌ها ایجاد شد. ابعاد و تصویر نیم‌شیار ایجاد شده بر روی تسمه در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



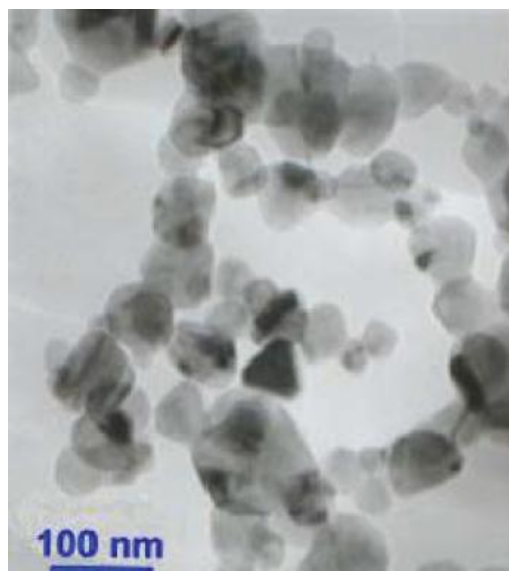
شکل ۱-۳ تصویر نیم‌شیار ایجاد شده بر لبه ورق.

### ۲-۳ فاز تقویت کننده

فاز تقویت کننده مورد استفاده در این پژوهش، پودر نانو ذرات کاربید سیلیسیم بود که اندازه متوسطی در حدود  $45-65$  nm داشت. برخی از مشخصات این پودر در جدول ۲-۳ و تصویر TEM آن در شکل ۳-۳ قابل ملاحظه می‌باشد.

جدول ۲-۳ مشخصات نانو ذرات کاربید سیلیسیم

خلوص	محدوده اندازه ذرات (nm)	چگالی حجمی ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
٪۹۹	۴۵-۶۵	۰/۰۵



شکل ۲-۳ تصویر الکترونی تهیه شده از نانو ذرات کاربید سیلیسیم.

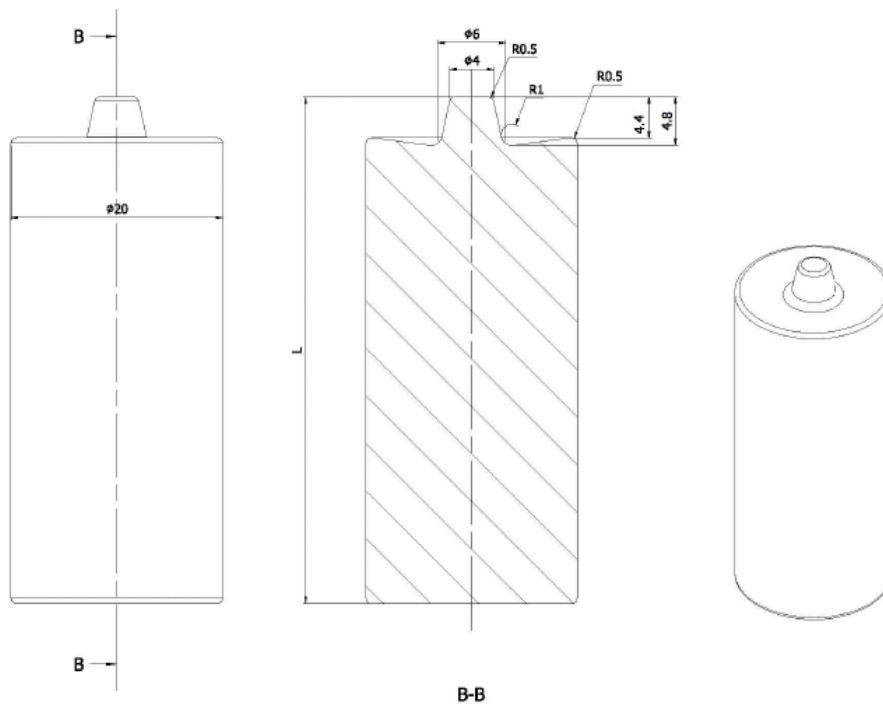
## ۳-۳ ابزار جوشکاری

نمونه ها با استفاده از ابزاری از جنس فولاد ابزار سرد کار SPK جوشکاری شدند. پین ابزار، به شکل مخروط ناقص و با قطر کوچک ۴ میلی متر، قطر بزرگ ۶ میلی متر و ارتفاع ۴/۸ میلی متر انتخاب شد. اطلاعات کامل تری از ویژگی های ابزار مورد استفاده در فرایند در جدول ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۳-۴ ویژگیهای ابزار مورد استفاده در فرایند

فولاد ابزار سرد کار SPK	جنس ابزار
۲۰	قطر شولدر (mm)
مخروط پین	شکل پین
۴	قطر بزرگ پین (mm)
۶	قطر کوچک پین (mm)
۴/۸	طول پین (mm)

لازم به ذکر است با توجه به استفاده از ذرات تقویت کننده SiC در محل درز اتصال و امکان سایش ابزار، قبل از استفاده، عملیات سختی کاری سطحی بر روی پین انجام گردید و سختی اندازه گیری شده پین پس از عملیات سختی کاری در حدود ۵۰ HRC بود. تصویر شماتیک ابزار مورد استفاده، در شکل ۳-۳ قابل ملاحظه می باشد.



شکل ۳-۳ تصویر شماتیک ابزار مورد استفاده

### ۴-۳ نحوه انجام فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

به منظور انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از دستگاه فرز معمولی استفاده شد قطعات توسط گیره به بر روی دستگاه بسته شدند این گیره به گونه ای طراحی گردید که امکان حرکت تسمه ها در طی فرایند جوشکاری ممکن نباشد. برای به دست آوردن پارامترهای ایده ال جوشکاری ابتدا تعداد ۱۱ نمونه بدون ایجاد شیار در لبه و اضافه نمودن پودر در شرایط مختلف جوشکاری گردید و توسط این آزمونهای سعی و خطا اعتبار انواع نظریه ها و پیش بینی ها سنجیده شد که خلاصه ای از این فعالیتها در ذیل اشاره شده است.

#### آزمایش اول

سرعت جوشکاری ۱۶ mm/min و سرعت چرخش ۲۰۰۰ rpm انتخاب گردید، مس در سمت پیش رونده و آلومینیوم در سمت پس رونده قرار گرفت. مقدار offset بین ۱/۲ میلی متر و به سمت آلومینیوم و زاویه انحراف ابزار ۲ درجه بوده است.

#### نتیجه

- حفره در بعضی نقاط اتصال.
- رفتار ترد جوش.

- ظاهر جوش نسبتاً خوب بوده ولی نفوذ در ریشه انجام نشده و مقداری Flash کوچک در لبه اتصال دیده شد، تصویر جوش انجام شده در شکل ۳-۴ قابل ملاحظه می باشد.



شکل ۳-۴ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش اول.

#### آزمایش دوم

سرعت جوشکاری ۲۵ mm/min و سرعت چرخش ۱۶۰۰ rpm انتخاب گردید، مس در سمت پیش رونده و آلومینیوم در سمت پس رونده قرار گرفت. مقدار offset بین ۱/۲ میلی متر و به سمت آلومینیوم و زاویه انحراف ابزار ۲ درجه بوده است.

#### نتیجه

- حفره تونلی سراسری در اتصال ایجاد شده.
- رفتار ترد جوش.
- ظاهر جوش نامناسب و عدم نفوذ در ریشه، تصویر جوش انجام شده در شکل ۳-۵ قابل ملاحظه می باشد.



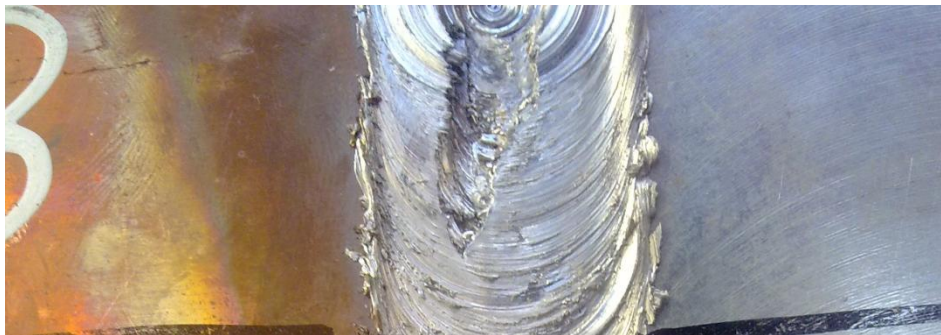
شکل ۳-۵ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش دوم.

### آزمایش سوم

سرعت جوشکاری ۲۵ mm/min و سرعت چرخش ۲۰۰۰ rpm انتخاب گردید، مس در سمت پیش رونده و آلومینیوم در سمت پس رونده قرار گرفت. مقدار offset پین ۱/۲ میلی متر و به سمت آلومینیوم و زاویه انحراف ابزار ۲ درجه بوده است.

#### نتیجه

- افزایش حفره تونلی سراسری در اتصال ایجاد شده نسبت به حالت‌های قبلی.
- رفتار ترد جوش.
- ظاهر جوش بسیار نامناسب و عدم نفوذ در ریشه و مشاهده Flash در لبه اتصال ، تصویر جوش انجام شده در شکل ۳-۶ قابل ملاحظه می باشد.



شکل ۳-۶ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش سوم.

### آزمایش چهارم

سرعت جوشکاری ۱۶ mm/min و سرعت چرخش ۲۰۰۰ rpm انتخاب گردید، مس در سمت پیش رونده و آلومینیوم در سمت پس رونده قرار گرفت. زاویه انحراف ابزار ۲ درجه بوده است. پارامترهای استفاده شده در این آزمایش مشابه با آزمایش اول بوده فقط مقدار offset پین در آلومینیوم از ۱/۲ میلی متر به ۲ میلی متر افزایش یافت.

#### نتیجه

- حفره تونلی سراسری در اتصال ایجاد شده.
- رفتار بسیار ترد جوش.

- ظاهر جوش بسیار نامناسب و عدم نفوذ در ریشه و مقدار Flash مشاهده شده در لبه اتصال نسبت به آزمایش اول به میزان قابل توجهی افزایش یافت ، تصویر جوش انجام شده در شکل ۳-۷ قابل ملاحظه می باشد.



شکل ۳-۷ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش چهارم.

#### آزمایش پنجم

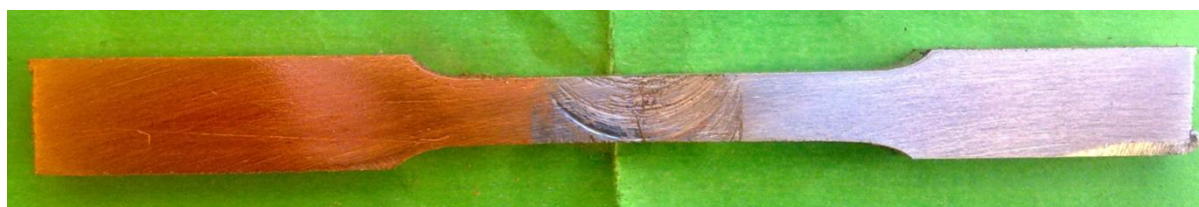
سرعت جوشکاری  $25 \text{ mm/min}$  و سرعت چرخش  $2000 \text{ rpm}$  انتخاب گردید، مس در سمت پیش رونده و آلومینیوم در سمت پس رونده قرار گرفت. زاویه انحراف ابزار  $2$  درجه بوده است. پارامترهای استفاده شده در این آزمایش مشابه با آزمایش سوم بوده و فقط مقدار offset پین در آلومینیوم از  $1/2$  میلی متر به  $2$  میلی متر افزایش یافت.

#### نتیجه

- حفره های بسیار ریزی در سطح جوش مشاهده گردید.
- ظاهر جوش مناسب ولی نفوذ در ریشه به صورت کامل نبوده و مقدار Flash کمی در لبه اتصال مشاهده گردید ، تصویر جوش انجام شده در شکل ۳-۸ قابل ملاحظه می باشد.
- استحکام جوش بسیار پایین بوده به نحوی که پس از آماده سازی نمونه جهت تست کشش، ترکهای سطحی مشاهده گردید و نمونه از استحکام بسیار پایینی برخوردار بود. تصویر نمونه آماده سازی شده جهت تست کشش در شکل ۳-۹ قابل ملاحظه است که در این تصویر می توان وجود ترک سطحی در جوش را مشاهده نمود.



شکل ۳-۸ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش پنجم.



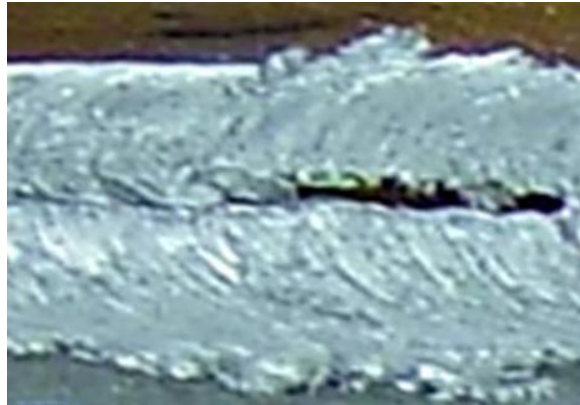
شکل ۳-۹ تصویر نمونه آماده سازی شده برای تست کشش و مشاهده ترک سطحی.

#### آزمایش ششم

- سرعت جوشکاری  $20 \text{ mm/min}$  و سرعت چرخش  $2000 \text{ rpm}$  انتخاب گردید، مس در سمت پیش رونده و آلومینیوم در سمت پس رونده قرار گرفت، مقدار offset بین ۲ میلی متر و به سمت آلومینیوم و زاویه انحراف ابزار ۲ درجه بوده است.

#### نتیجه

- حفره تونلی سراسری در اتصال ایجاد شده.
- رفتار بسیار ترد جوش.
- ظاهر جوش بسیار نامناسب و عدم نفوذ در ریشه، تصویر جوش انجام شده در شکل ۳-۱۰ قابل ملاحظه می باشد.



شکل ۳-۱۰ تصویر سطح اتصال تولید شده در آزمایش ششم.

#### آزمایش هفتم

سرعت جوشکاری ۱۵ mm/min و سرعت چرخش ۱۲۵۰ rpm انتخاب گردید، مس در سمت پیش رونده و آلومینیوم در سمت پس رونده قرار گرفت، مقدار offset بین ۲ میلی متر و به سمت آلومینیوم و زاویه انحراف ابزار ۲ درجه بوده است.

#### نتیجه

- حفرات بسیار ریز در بعضی از نقاط اتصال.
- ظاهر جوش مناسب.
- استحکام نمونه تحت آزمون کشش ۳۸/۴ Mpa گزارش گردید.

#### آزمایش هشتم

سرعت جوشکاری ۱۵ mm/min و سرعت چرخش ۱۲۵۰ rpm انتخاب گردید، مس در سمت پیش رونده و آلومینیوم در سمت پس رونده قرار گرفت. زاویه انحراف ابزار ۲ درجه بوده و هیچ گونه offset در نظر گرفته نشد.

#### نتیجه

- میزان حفرات بسیار ریز در بعضی از نقاط اتصال که در مقایسه با حالت قبل کمتر می باشد.
- ظاهر جوش بسیار مناسب.
- استحکام نمونه تحت آزمون کشش در حدود ۷۶ Mpa گزارش گردید.



### آزمایش نهم

کلیه شرایط مشابه آزمایش قبل بوده و تنها تفاوت آن تغییر فلز پیش رونده و پس رونده می باشد به نحوی که در این آزمایش مس در سمت پس رونده و آلومینیوم در سمت پیش رونده قرار گرفت.

#### نتیجه

- حفرات بسیار ریز در بعضی از نقاط اتصال که در مقایسه با حالت قبل بیشتر می باشد.
- ظاهر جوش مناسب فقط مقداری جزیی Flash در لبه های اتصال مشاهده گردید.
- استحکام نمونه تحت آزمون کشش در حدود ۶۴ Mpa گزارش گردید.

### آزمایش دهم

سرعت جوشکاری ۱۵ mm/min و سرعت چرخش ۱۲۵۰ rpm انتخاب گردید، مس در سمت پیش رونده و آلومینیوم در سمت پس رونده قرار گرفت. زاویه انحراف ابزار ۲ درجه بوده و مقدار offset پین ۱/۲ میلی متر و به سمت مس در نظر گرفته شد.

#### نتیجه

- حفره تونلی سراسری در اتصال ایجاد شده.
- ظاهر جوش بسیار مناسب و مشاهده Flash در لبه های اتصال.
- رفتار بسیار ترد جوش.

### آزمایش یازدهم

کلیه شرایط مشابه آزمایش قبل بوده و تنها تفاوت آن تغییر فلز پیش رونده و پس رونده می باشد به نحوی که در این آزمایش مس در سمت پس رونده و آلومینیوم در سمت پیش رونده قرار گرفت.

#### نتیجه

- حفره تونلی سراسری در اتصال ایجاد شده.
- ظاهر جوش بسیار مناسب و مشاهده Flash در لبه های اتصال که در مقایسه با حالت قبلی افزایش داشته است.
- رفتار بسیار ترد جوش.

### ۳-۵ پارامترهای بررسی شده

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشهای صورت گرفته مشاهده گردید که نتایج حاصل از آزمایش هشتم بهترین نتایج آزمایشات می باشد بنابراین با استفاده از پارامترهای مورد استفاده در این آزمایش، فرآیند FSW با اضافه نمودن نانو ذرات SiC انجام گردید و به منظور بهینه کردن خواص در محل اتصال، پارامترهای مختلفی مانند افزایش تعداد پاسهای جوشکاری و تغییر جهت چرخش پین بررسی و جهت حصول شرایط بهینه متغیرهای مذکور، خواص ریزساختاری (متوسط اندازه دانه) همچنین خواص مکانیکی مانند سختی، مقاومت کششی مورد بررسی قرار گرفتند.

### ۳-۵-۱ تغییر تعداد پاسهای جوشکاری

در این پژوهش، نمونه ها به صورت تک پاسه و دوپاسه جوشکاری گردیدند و در حالت دو پاسه، پاس دوم بلافاصله پس از پاس اول اعمال شده است.

### ۳-۵-۲ ریزساختار

به منظور بررسی اندازه دانه ها از میکروسکوپ نوری استفاده گردید. جهت انجام آزمایشات متالوگرافی، در ابتدا مقاطع عرضی از نمونه های تولیدی جدا شده و جهت تسهیل در روند انجام نمونه ها مانع گردیده و سپس عملیات سنباده زنی از شماره ۸۰ تا شماره ۵۰۰۰ بر روی نمونه ها انجام گردید. نمونه ها توسط محلول کلر و برای مدت ۴۵ تا ۷۰ ثانیه اچ گردیدند، برای مس از محلول  $HNO_3$  برای اچ استفاده شد و نمونه ها به مدت ۴۰ ثانیه در این محلول قرار گرفتند.

با استفاده از میکروسکوپ نوری عکسهایی از نواحی مختلف تهیه گردید و متوسط اندازه دانه به روش دستی محاسبه گردید.

به منظور بررسی سطح شکست نمونه های آزمون کشش، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید

### ۳-۵-۳ آزمون کشش

به منظور بررسی رفتار ماده جوشکاری شده تحت تنشهای کششی، از هر قطعه جوشکاری شده یک نمونه آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM-E8 تهیه شد، نرخ کرنش مورد استفاده در آزمون کشش ۱ میلی متر بر دقیقه بود.

### ۳-۵-۴ آزمون ریز سختی سنجی

برای آگاهی از سختی فلز پایه و ناحیه جوشکاری شده، سختی سنجی به صورت صلیبی شکل (در راستای طول و عرض مقطع جوشکاری شده) و مطابق استاندارد ASTM-E348 انجام شد. ریز سختی سنجی طولی در حد فاصل دو فلز انجام شد. فاصله نقاط سختی سنجی شده از یکدیگر  $300\mu\text{m}$  و مقدار و زمان اعمال بار در هر اثر به ترتیب  $50\text{gf}$  و  $10$  ثانیه بود. ریز سختی سنجی عرضی در امتداد سطح به عمق جوش و فاصله نقاط سختی سنجی شده از یکدیگر  $1\text{mm}$  و مقدار و زمان بار اعمالی مشابه با حالت قبلی بود.

۴

## فصل چهارم نتایج و بحث

## ۴- نتایج و بحث

در این فصل نتایج بدست آمده از آزمونهای مختلف بر روی نمونه های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده به طور مفصل بیان شده است.

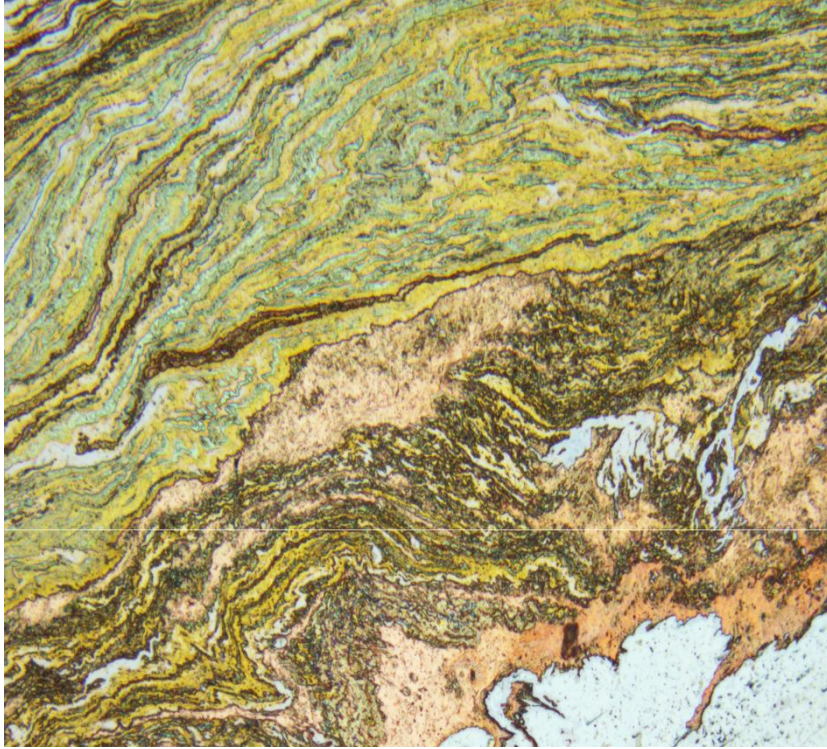
### ۴-۱ مطالعات ریز ساختاری

ریزساختار همه نمونه های جوشکاری شده با پودر به کمک میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که انتظار می رفت در ناحیه اغتشاشی کلیه نمونه های جوشکاری شده ترکیبی از مس، آلومینیوم و ذرات تقویت کننده مشاهده گردید. ریز ساختار ناحیه اغتشاشی و ریز ساختار مس و آلومینیوم در ناحیه اغتشاشی در هر نمونه در شکلهای ۴-۱ تا ۴-۱۲ قابل مشاهده می باشد.

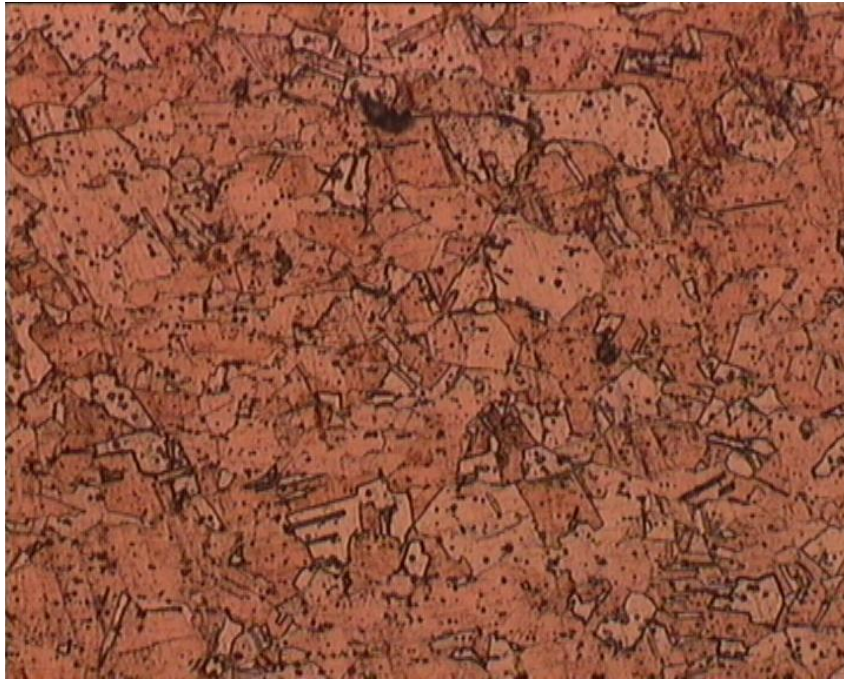
توزیع مس در آلومینیوم دارای یک مرز واضح است و فلز در منطقه اختلاط ترکیب پلاستیک را به وضوح نشان می دهد. در شکلها مشاهده می شود که فلز مس در اثر اختلاط پلاستیک و حرارت ناشی از ابزار در فلز آلومینیوم ترکیب شده و با توجه به جریان مواد می تواند باعث به وجود آوردن ساختار فلزی متفاوت در هر دو سمت شود. در این پژوهش دمای منطقه هسته جوش به وضوح پایین تر از دمای انجماد مس و آلومینیوم می باشد. فلز آلومینیوم دچار تبلور مجدد مکانیکی گردیده و همانطور که در شکلهای مربوط به ریزساختار آلومینیوم مشاهده می شود دانه ها در این منطقه تصفیه شده اند. اما مس فرآیند تبلور مجدد دینامیکی را زمانی که دما پایین تر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد است تجربه نمی کند (به دلیل اینکه این دما از دمای تبلور مجدد برای مس پایین تر است) از طرف دیگر به وسیله عمل اختلاط و حرارت ناشی از اصطکاک ابزار منطقه هسته جوش با لایه لایه شدن متناوب و ساختار ترکیبی شکل دهی می شود، لایه های تکرار شونده در اثر پدیده تبلور مجدد دینامیکی به وجود می آیند. هدایت حرارتی متفاوت در دو سمت منطقه هسته جوش نیز می تواند دلیل اصلی دیگری بر ایجاد ساختار متفاوت می باشد. چون هدایت حرارتی مس در حدود ۲/۵ برابر آلومینیوم است و بیشتر حرارت اصطکاکی تولید شده در عمل اختلاط در سمت مس در مجاورت آلومینیوم از دست می رود که باعث کاهش دما در این منطقه شده و در نتیجه ساختارهای متفاوتی در طرفهای مختلف منطقه هسته جوش ایجاد می شود.

همانطور که مشاهده می شود ناحیه اغتشاشی دارای ترکیبات متفاوتی است، ناحیه تیره رنگ ناحیه غنی از مس است. غلظت مس در منطقه اشباع از مس بسیار بالاتر است و محتوی درصد مشخصی از ترکیب بین فلزی  $Cu_9Al_4$  می باشد. فصل مشترک  $Al-Cu$  یک منطقه مستعد برای جوانه زنی و رشد ترکیبات بین فلزی در دماهای بالاتر از ۱۲۰ درجه سانتیگراد می باشد. با افزایش دما، جوانه زنی و رشد این ترکیبات تسریع می گردد، مناطق روشن (نارنجی) لایه های مس مخلوط نشده است و مناطق سفید

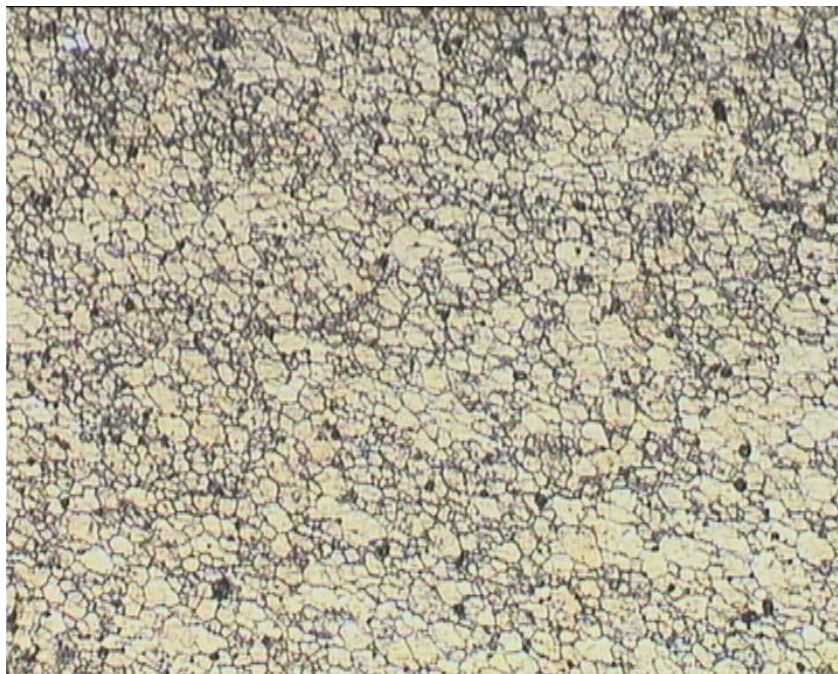
رنگ ، ناحیه غنی از آلومینیوم که محتوی درصد زیادی از ترکیب بین فلزی  $CuAl_2$  می باشد. این ترکیبات بین فلزی ماهیت ترد داشته و جوانه زنی و رشد ترک از این مناطق شروع می شود. در کلیه نمونه های جوشکاری شده ، اکثریت هسته جوش را مس تشکیل می دهد و مس با اشکال مختلف در این ناحیه توزیع می شود.



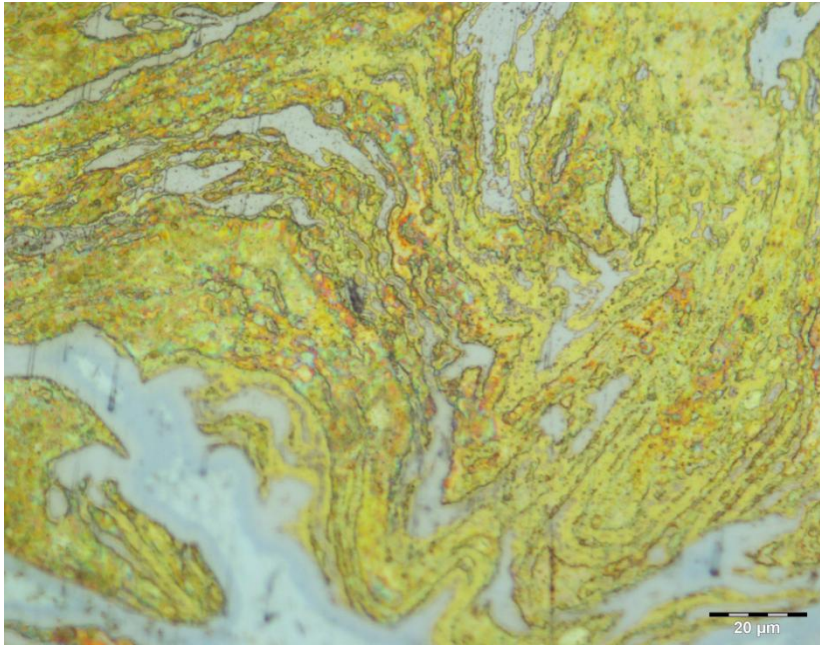
شکل ۴-۱ تصویر ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسه پاد ساعتگرد.



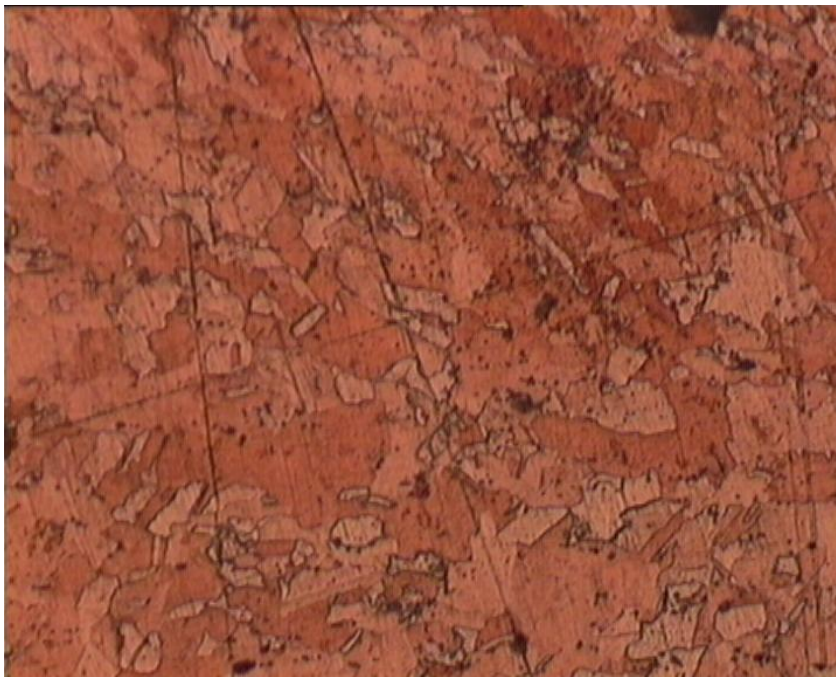
شکل ۴-۲ تصویر میکروساختار مس در ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسه پاد ساعتگرد.



شکل ۴-۳ تصویر میکروساختار آلومینیوم در ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسه پاد ساعتگرد.



شکل ۴-۴ تصویر ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسه ساعتگرد.

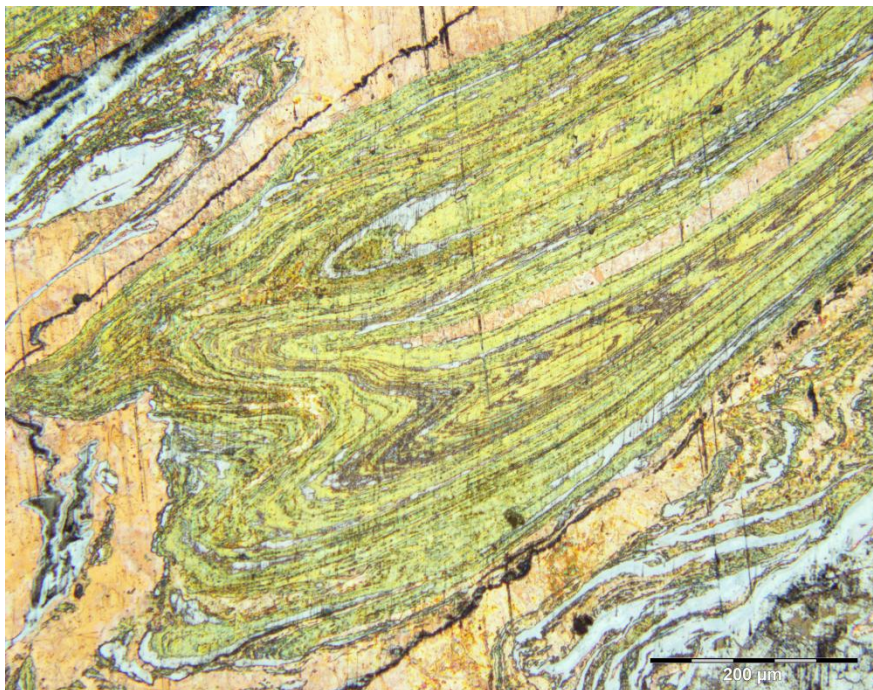


شکل ۴-۵ تصویر میکروساختار مس در ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسه ساعتگرد.

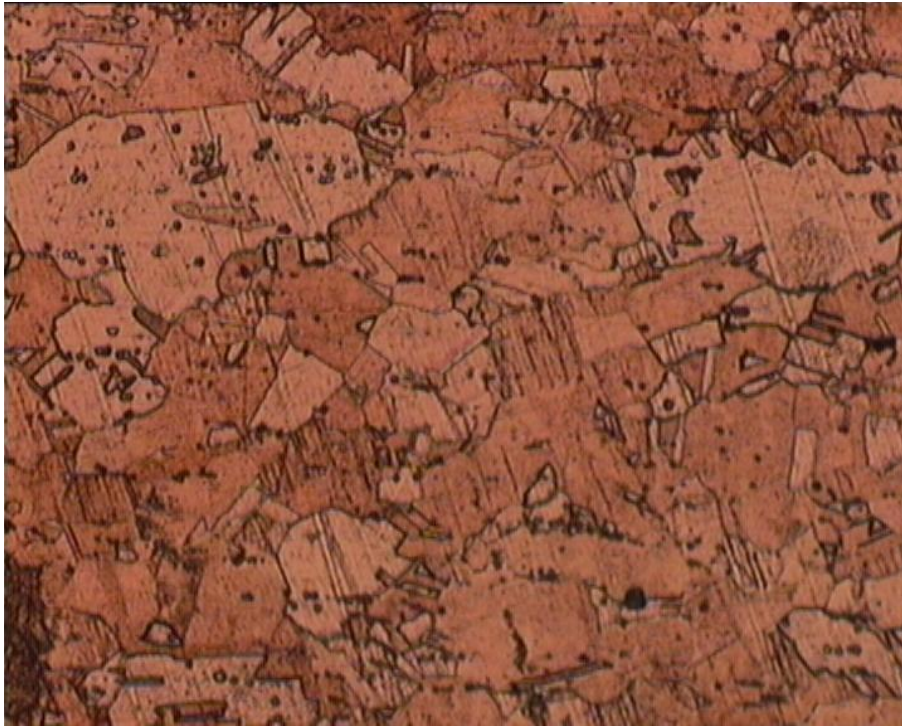




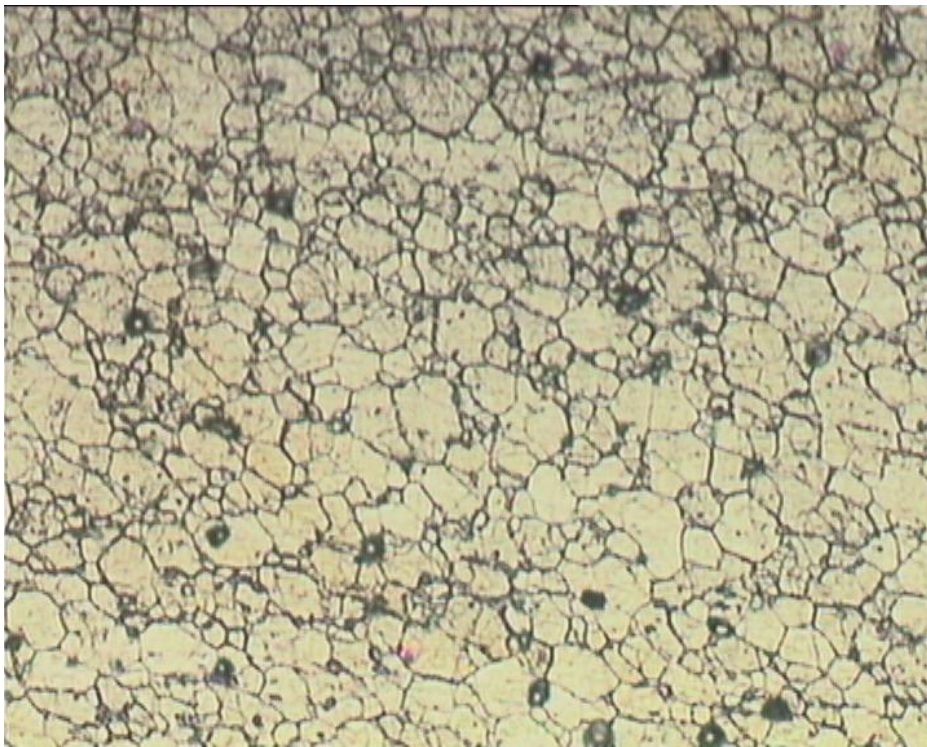
شکل ۴-۶ تصویر میکروساختار آلومینیوم در ناحیه اغتشاشی در حالت یک پاسب ساعتگرد.



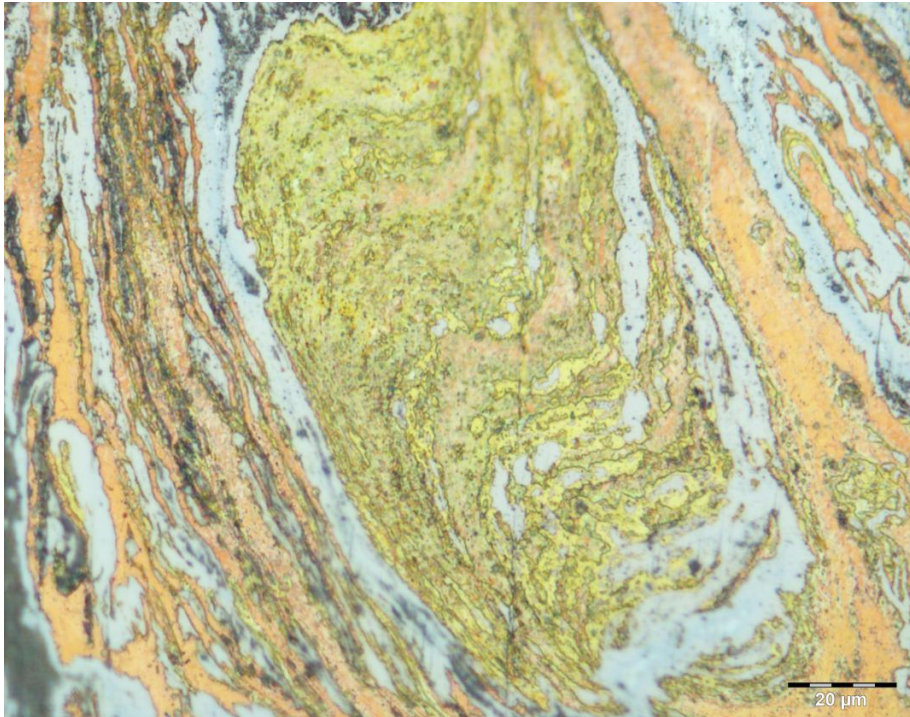
شکل ۴-۷ تصویر ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسب یاد ساعتگرد.



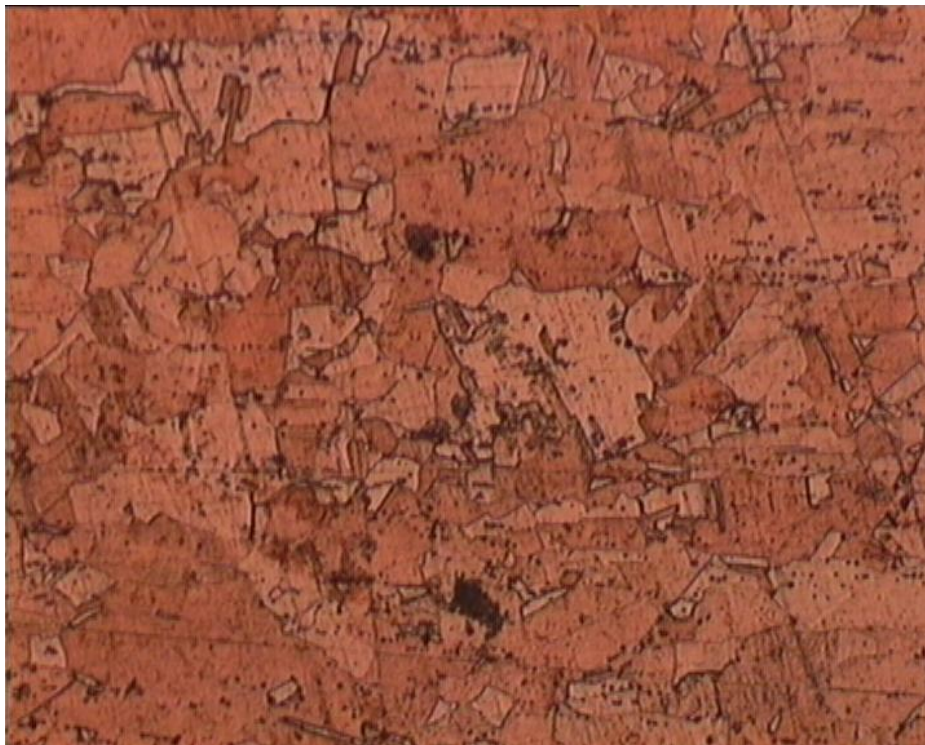
شکل ۴-۸ تصویر میکروساختار مس در ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسبه پادساعتگرد.



شکل ۴-۹ تصویر میکروساختار آلومینیوم در ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسبه پاد ساعتگرد.



شکل ۴-۱۰ تصویر ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسه ساعتگرد.



شکل ۴-۱۱ تصویر میکروساختار مس در ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسه ساعتگرد.



شکل ۴-۱۲ تصویر میکروساختار آلومینیوم در ناحیه اغتشاشی در حالت دو پاسه ساعتگرد.

در شرایطی که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بدون افزودن پودر انجام شود، عامل تعیین کننده اندازه دانه، حرارتی است که ماده در خلال تبلور مجدد تجربه می کند اما زمانی که از ذرات تقویت کننده نیز استفاده شود، شرایط متفاوت است. در این حالت عوامل دیگری بر اندازه نهایی دانه های جدید تاثیر دارند. از نگاهی، حرارت وارده به قطعه در طی جوشکاری به رشد دانه های تبلور مجدد یافته کمک میکند، چراکه حرکت مرزدانه یک پدیده نفوذی است و با افزایش دما حرکت آن تسریع می شود. افزایش سرعت دورانی یا کاهش سرعت پیشروی و افزایش تعداد پاسها حرارت ورودی را افزایش می دهد و در نهایت منجر به درشت شدن دانه های تبلور مجدد یافته میشود. از منظر دیگر، ذرات تقویت کننده در صورت توزیع یکنواخت می توانند به مثابه مانعی در برابر حرکت مرزدانه عمل کنند و با محدود کردن حرکت آنها از درشت شدن دانه جلوگیری کنند. ممانعت از رشد دانه به کمک ذرات تقویت کننده، به اثر قفل کنندگی<sup>۵۳</sup> معروف است. علاوه بر این، حضور ذرات تقویت کننده، مکانهای جوانه زنی تبلور مجدد را

<sup>۵۳</sup> Pining Effect

تعدد می بخشد. هرچه تعداد دانه های تبلور مجدد یافته بیشتر باشد، ریزساختار نهایی ریزدانه تر می شود.

حضور ذرات تقویت کننده باعث شکسته شدن دانه های اولیه نیز میگردد. در طی تغییر شکل پلاستیک، دانه ها شکسته می شوند و تعداد زیادی مرزدانه کم زاویه بوجود می آید.

چنین مرزدانه هایی، مکانهای مناسبی برای برای جوانه زنی دانه های تبلور مجدد بشمار می روند. در خلال تبلور مجدد دینامیکی، مرزدانه های کم زاویه به نوع پرزاویه تبدیل شده و جوانه زنی دانه های جدید در نواحی مرجح اتفاق می افتد. در مرحله بعد دانه های نوپا که بسیار هم کوچک اند، رشد می کنند، زیرا انرژی قابل توجهی در مرزدانه های آنها ذخیره شده است. در پایان مرحله رشد دانه ریزساختار هم محور بسیار ریزی حاصل می شود.

نتایج حاصل از محاسبه اندازه دانه در کلیه نمونه های جوشکاری شده با پودر، از مس و آلومینیوم موجود در ناحیه اغتشاشی در جدول ۴-۱ قابل مشاهده می باشد.

جدول ۴-۱ اندازه دانه در نمونه های جوشکاری شده با پودر.

شماره نمونه	فلز سمت پیش رونده	تعداد پاس	متوسط اندازه دانه آلومینیوم در ناحیه اغتشاشی ( $\mu\text{m}$ )	متوسط اندازه دانه مس در ناحیه اغتشاشی ( $\mu\text{m}$ )
۱۲	آلومینیوم	۱	۲/۵	۳/۸
۱۳	مس	۱	۲/۲	۳/۴
۱۴	آلومینیوم	۲	۳/۷	۵/۵
۱۵	مس	۲	۳/۲	۴/۶

همانگونه که در جدول مشاهده می شود کوچکترین اندازه دانه مربوط به نمونه شماره ۱۳ بوده که در این حالت مس در حالت پیش رونده و فرآیند به وسیله یک پاس انجام شده و بیشترین سختی مربوط به نمونه شماره ۱۴ که آلومینیوم در سمت پیش رونده و فرآیند به وسیله دو پاس متوالی انجام شده است.

همانگونه که قبلا توضیح داده شد یکی از عوامل مهم کاهش اندازه دانه وجود ذرات پودر در زمینه می باشد که باعث جلوگیری از رشد دانه ها در هنگام تبلور مجدد می شود لذا محل هایی که تراکم و پخش ذرات بهتری داشته باشند اندازه دانه ریزتر خواهد بود.

افزایش تعداد پاس منجر به توزیع بهتر ذرات تقویت کننده در فاز زمینه می شود که با توجه به اثر قفل کنندگی ذرات تقویت کننده فاز زمینه، افزایش محلهای مستعد برای جوانه زنی دانه های تبلور مجدد یافته و همچنین تاثیر در شکسته شدن دانه های اولیه، به ریز دانه شدن ساختار کمک می کند، از طرفی افزایش میزان حرارت ورودی نیز باعث درشت شدن ریز ساختار جوشکاری شده می گردد با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش مشاهده می شود که با افزایش تعداد پاسها، افزایش میزان حرارت ورودی بر اثر ذرات تقویت کننده غلبه کرده و افزایش متوسط اندازه دانه را در بر خواهد داشت. این اثر در نواحی که ذرات SiC کمتر می باشد، بیشتر و موثرتر است

#### ۴-۲ خواص کششی

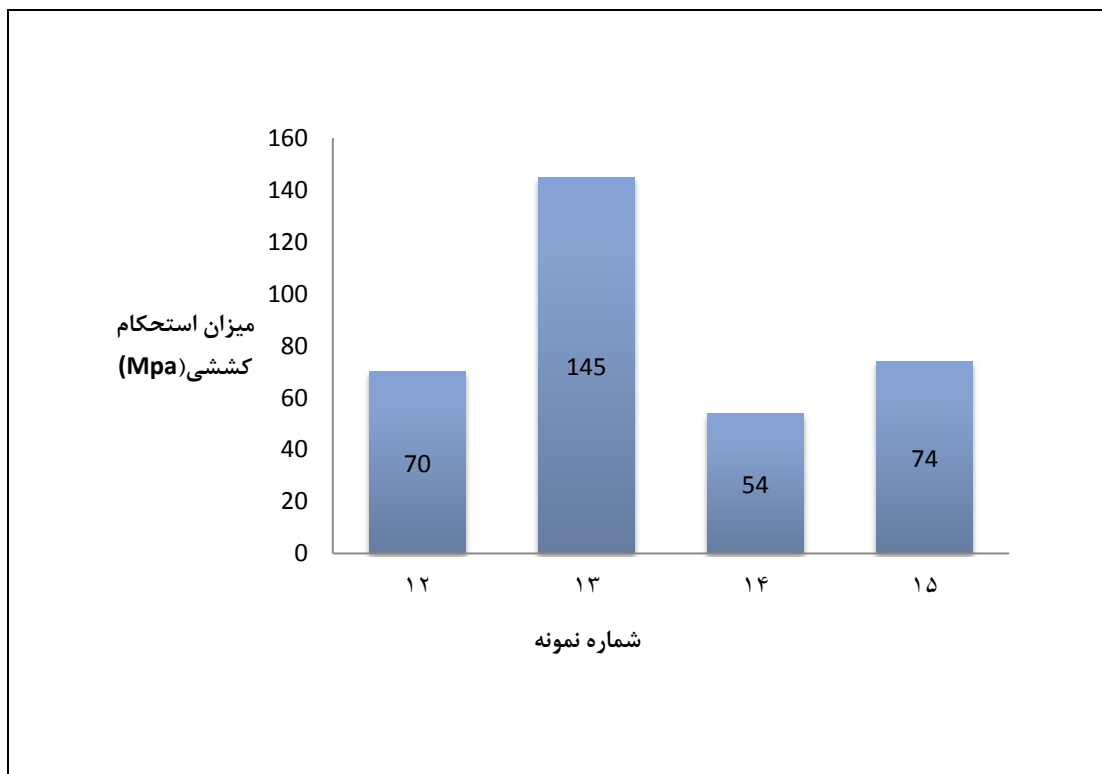
در جدول ۴-۲ مشخصات همه نمونه های جوشکاری شده ای که تحت آزمون کشش قرار گرفتند، دیده می شود. خواص کششی نمونه جوشکاری شده بدون پودر نیز به منظور مقایسه و بررسی تاثیر افزودن پودر، عنوان شده است. عواملی نظیر نحوه توزیع پودر، اندازه دانه، چگالی نابجاییها و پیوند بین ذرات تقویت کننده و فاز زمینه از جمله مهمترین عوامل تاثیرگذار بر استحکام اتصال می باشند.

وقتی بار کششی به اتصال اعمال می شود، تمرکز تنش و کرنش در نواحی کم استحکام اتصال اتفاق می افتد و متعاقبا اتصال از آن ناحیه ترک می خورد. محل شکست هر اتصال ارتباط مستقیم با ضعیف ترین قسمت اتصال دارد. مطالعه محل شکست اتصال برای فهمیدن و بهبود ویژگی های مکانیکی اتصال مهم است.

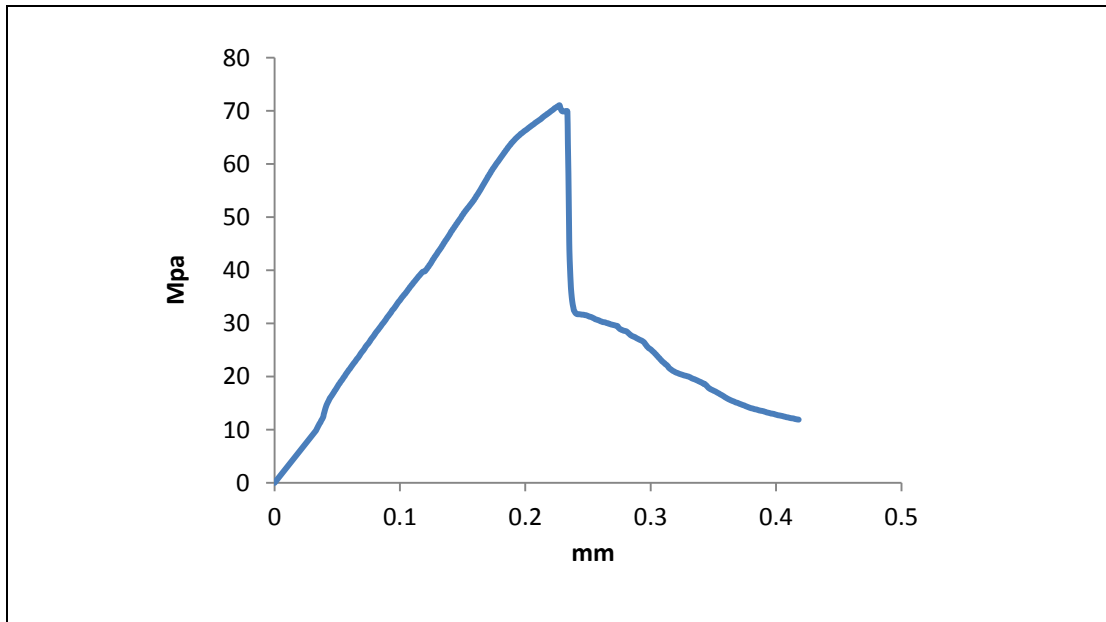
جدول ۴-۲ مشخصات نمونه های جوشکاری شده که تحت آزمون کشش قرار گرفته اند.

شماره نمونه	سرعت پیشروی mm/min	سرعت دورانی rpm	فلز سمت پیش رونده	ذرات تقویت کننده	تعداد پاس	استحکام کششی MPa
۷	۱۵	۱۲۵۰	مس	ندارد	یک	۳۸/۴
۸	۱۵	۱۲۵۰	مس	ندارد	یک	۷۵/۷۸
۹	۱۵	۱۲۵۰	آلومینیوم	ندارد	یک	۶۳/۷۷
۱۲	۱۵	۱۲۵۰	آلومینیوم	SiC	یک	۷۰
۱۳	۱۵	۱۲۵۰	مس	SiC	یک	۱۴۵
۱۴	۱۵	۱۲۵۰	آلومینیوم	SiC	دو	۵۴
۱۵	۱۵	۱۲۵۰	مس	SiC	دو	۷۴

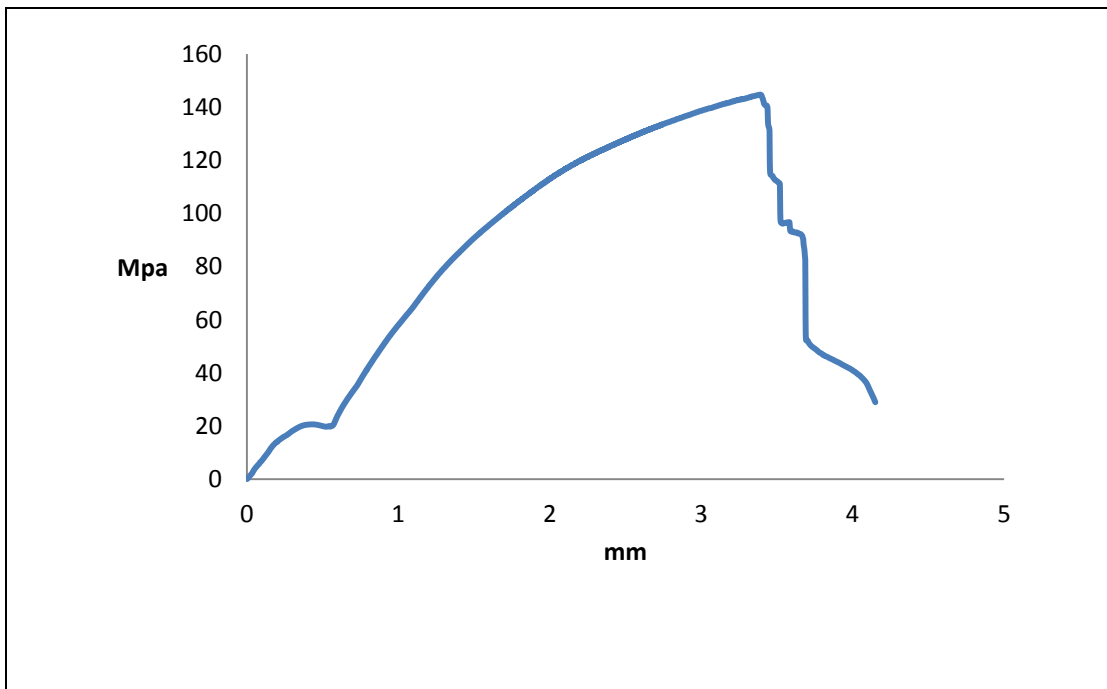
همانگونه که از نتایج جدول ۴-۲ استنباط و در شکل‌های شماره ۴-۱۳ تا ۴-۱۷ مشاهده می‌شود، نمونه شماره ۱۳ بیشترین استحکام کششی را دارد که در نتایج مربوط به اندازه دانه نیز مشاهده گردید این نمونه دارای کوچکترین اندازه دانه بود. با توجه به نزدیک بودن میزان اندازه دانه در نمونه های شماره ۱۲ و ۱۳ ولی مشاهده گردید که میزان استحکام کششی این دو نمونه با یکدیگر تفاوت زیادی داشته که یکی از دلایل این امر می‌تواند، تجمع شدیدتر ذرات در ناحیه اغتشاشی و عدم ایجاد پیوند مناسب میان پودر و زمینه باشد که این نواحی مناطق مستعد به ایجاد ترک خواهند بود و استحکام را کاهش می‌دهند. می‌توان دریافت که موثرترین عامل در کاهش یا افزایش استحکام کششی نمونه های مختلف جوشکاری شده، تغییرات اندازه دانه می‌باشد. در واقع هر قدر که نمونه جوشکاری شده دانه ریزتر باشد، دانه ها جهت های متفاوت تری نسبت به هم خواهند داشت و ترک برای حرکت می‌بایست انرژی بیشتری را صرف کند و به این ترتیب حرکت ترک سخت تر انجام خواهد شد. همچنین بنابر قانون زرنر، هر قدر که ماده دانه درشت تر باشد، تجمع بیشتری از نابجایی ها در پشت مرزدانه ایجاد می‌شود و این پدیده باعث بالا رفتن تنش در پشت مرزدانه می‌شود که با غلبه بر استحکام نظری ماده، جوانه ترک به وجود می‌آید. به این ترتیب هر قدر که نمونه جوشکاری شده دارای ساختاری ریزدانه تری باشد، جوانه زنی ترک دیرتر انجام خواهد شد و رشد ترک با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد.



شکل ۴-۱۳ نمودار مقایسه استحکام کششی نمونه ها .

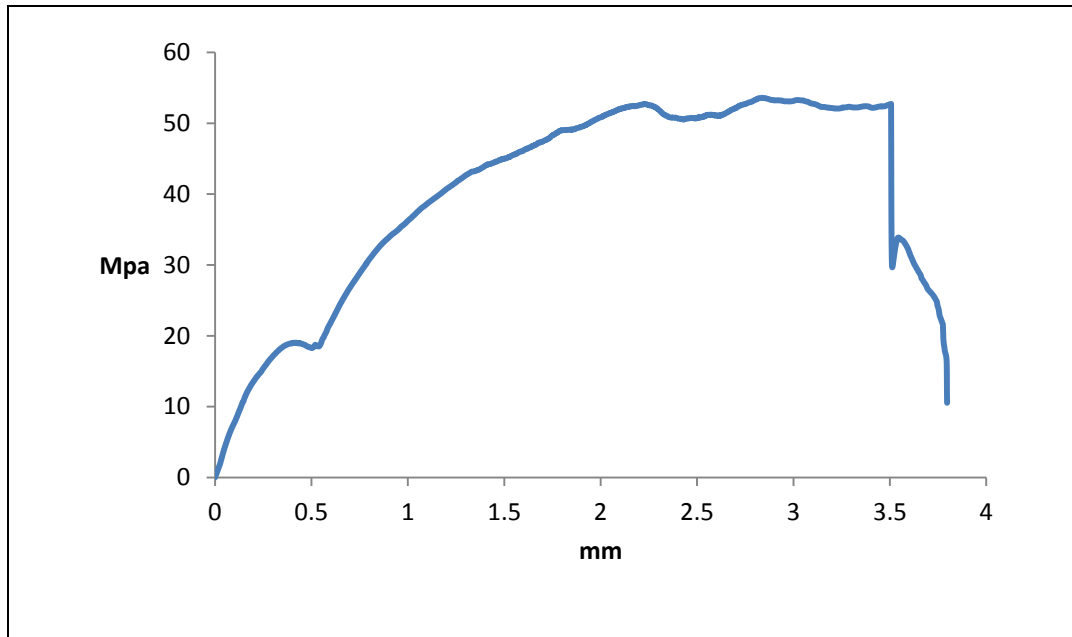


شکل ۴-۱۴ نمودار تنش کرنش نمونه شماره ۱۲.

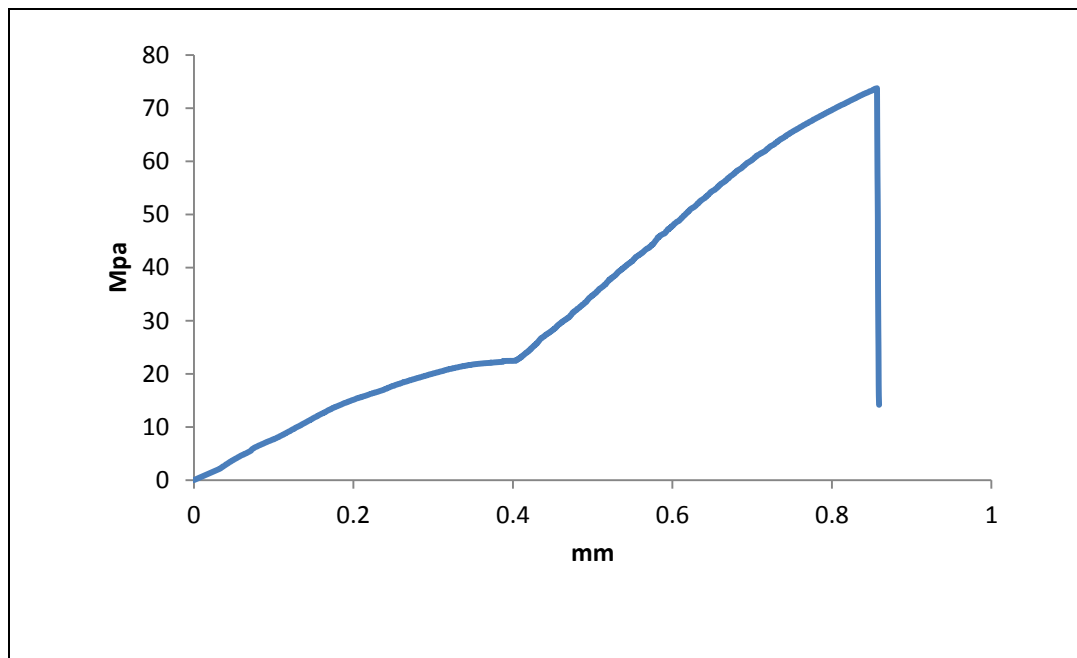


شکل ۴-۱۵ نمودار تنش - کرنش نمونه شماره ۱۳.





شکل ۴-۱۶ نمودار تنش - کرنش نمونه شماره ۱۴.



شکل ۴-۱۷ نمودار تنش - کرنش نمونه شماره ۱۵.

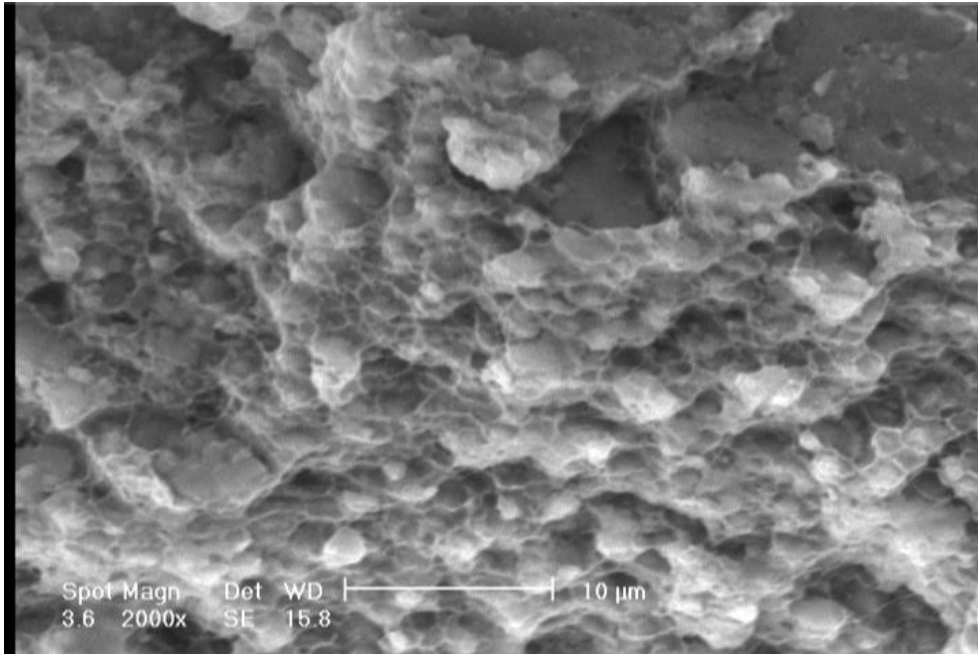
در حالت‌های دو پاسه با توجه به اینکه دو پاس به صورت پیوسته اجرا گردیده، میزان حرارت ورودی افزایش و دانه های درشت تری به نسبت حالت یک پاسه داشته که باعث کاهش استحکام در مقایسه با حالت یک پاسه می شود.

از آنجا که استحکام کششی  $Al\ 6061$  و مس خالص به ترتیب  $310\ MPa$  و  $273\ MPa$  می باشد، با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات که در جدول ۴-۱ ذکر گردیده، مشاهده شد که در تمامی نمونه ها استحکام کششی در مقایسه با فلزات پایه کاهش یافته است، علت این موضوع این است که در ناحیه ناگت جوش، پدیده تبلور مجدد باعث شده که نابجایی هایی که در فلزات پایه وجود داشته در این قسمت بطور کامل حذف شود. ولی عمده استحکام این اتصال ناشی از دانه های ریز تبلور مجدد یافته می باشد.

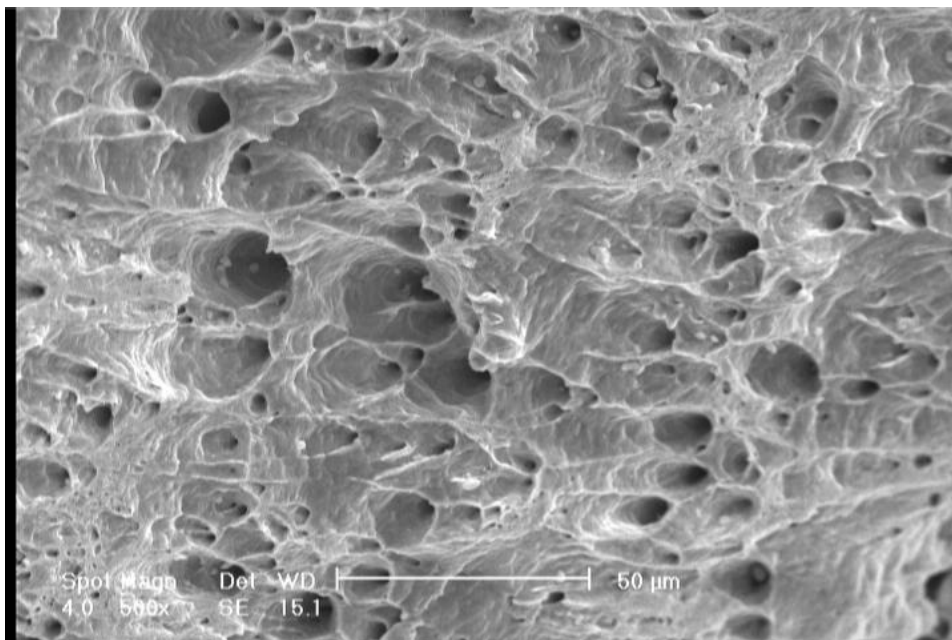
به منظور مشخص شدن تاثیر افزودن کاربید سیلیسیم بر خواص مکانیکی اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده، جوشکاری بدون افزودن پودر نیز انجام گردید. مقایسه استحکام کششی نمونه های ۸ و ۱۳ حاکی از این حقیقت است که افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم، استحکام کششی را به میزان ۹۵ درصد افزایش داده است که یکی از دلایل اصلی این امر ریز شدن دانه های ناحیه جوش نمونه ۱۲ به خاطر حضور ذرات نانو کاربید سیلیسیم می باشد.

#### ۴-۳ شکست نگاری

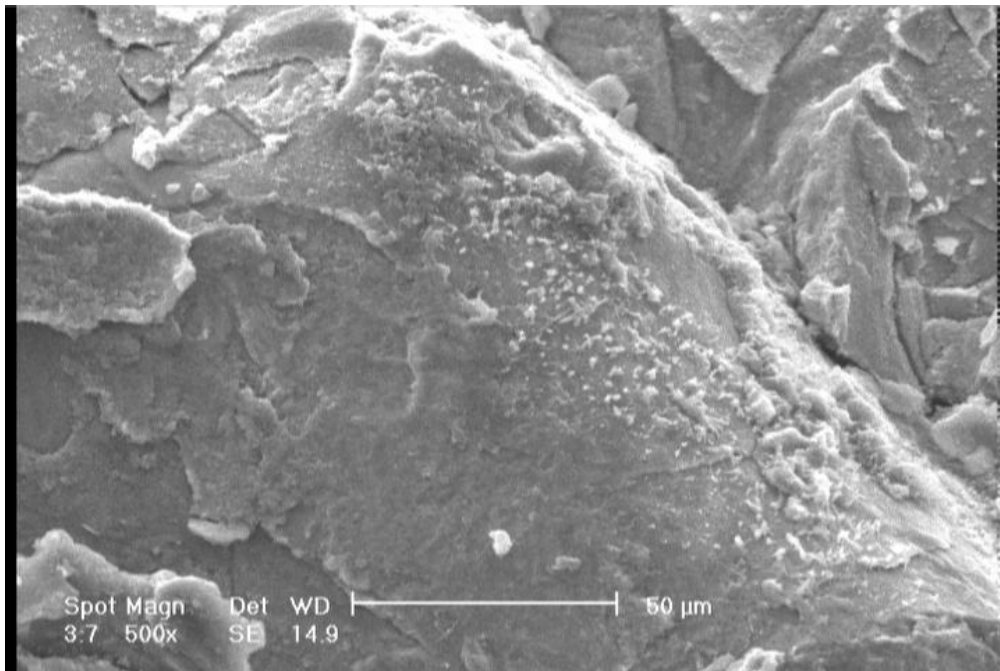
شکست کلیه نمونه های جوشکاری شده از منطقه اغتشاشی صورت گرفته است. که تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به سطح مقطع شکست کلیه نمونه های جوشکاری شده با پودر در شکل‌های ۴-۱۸ تا ۴-۲۱ قابل مشاهده می باشد.



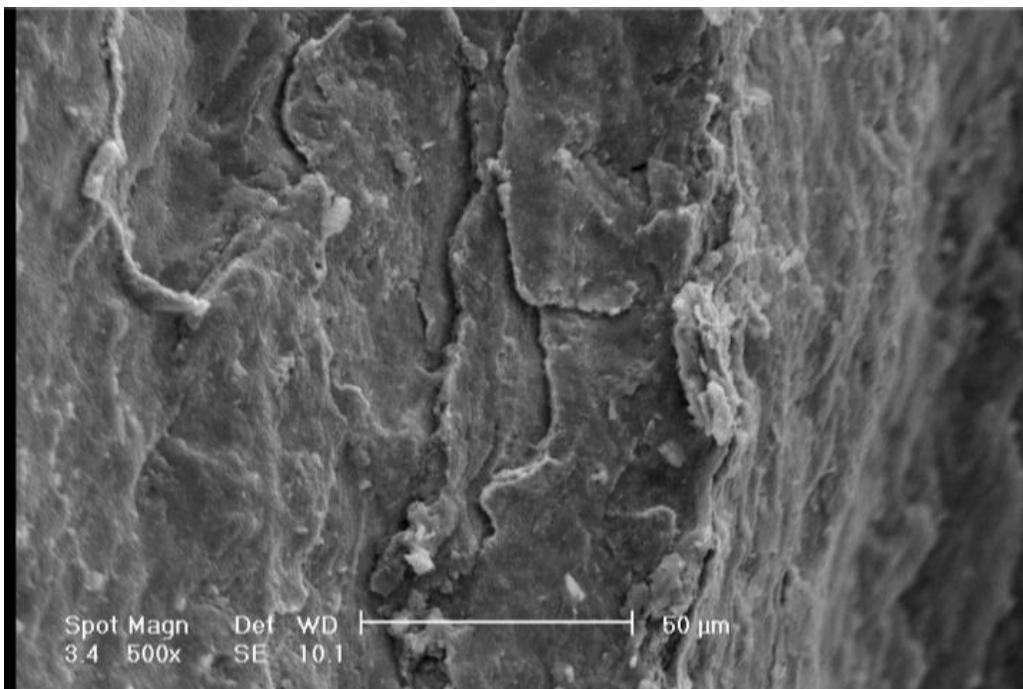
شکل ۴-۱۸ سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۲.



شکل ۴-۱۹ سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۳.



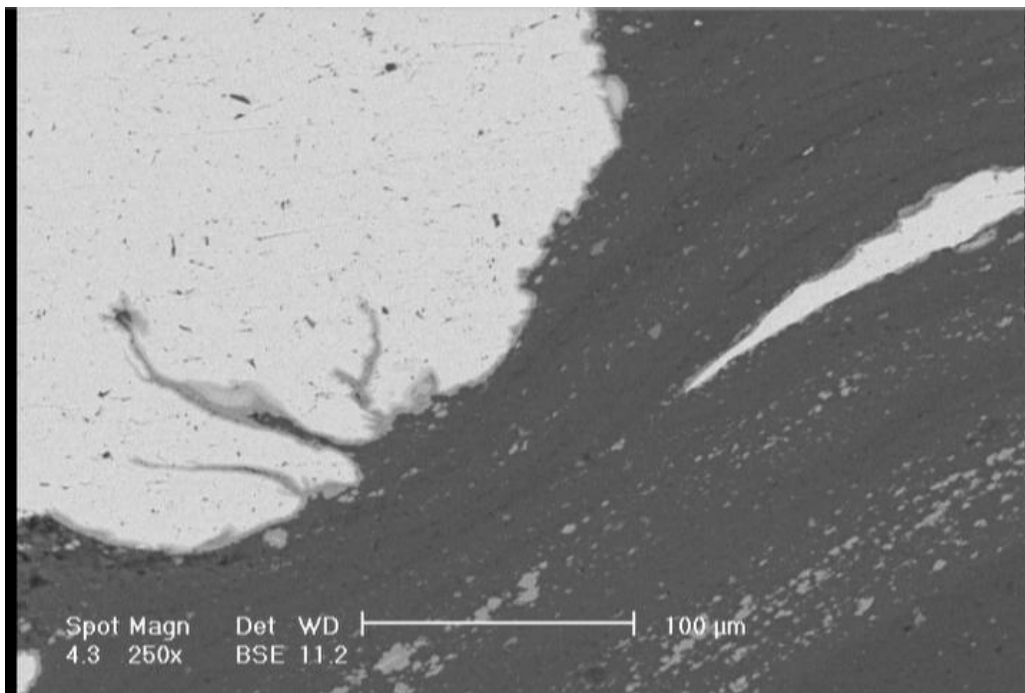
شکل ۴-۲۰ سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۴.



شکل ۴-۲۱ سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۵.

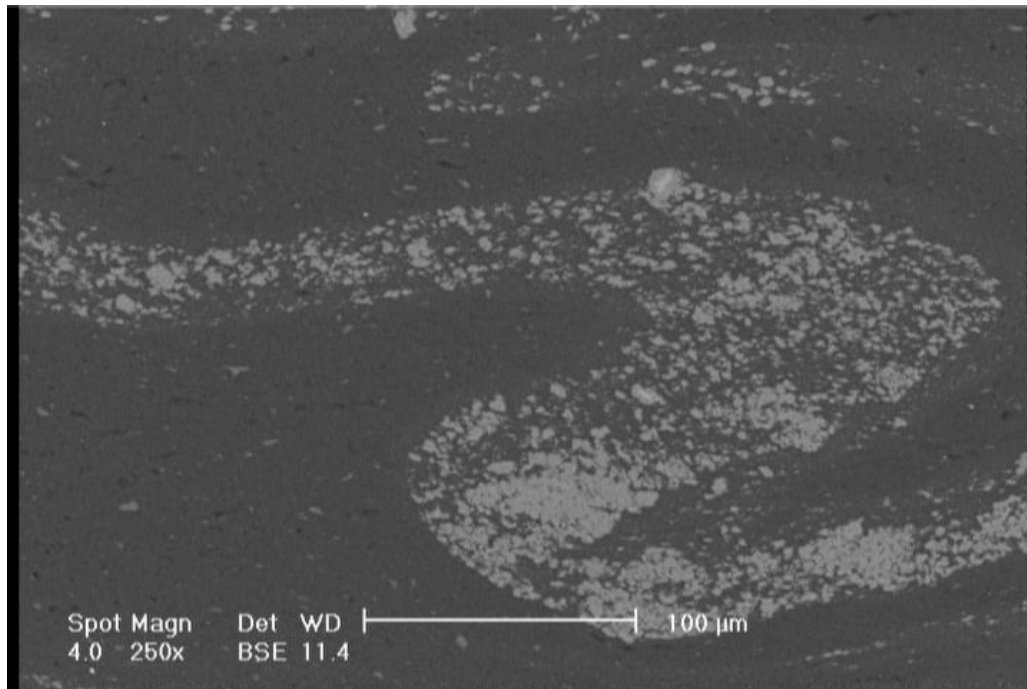
همانگونه که قبلا نیز اشاره شده بود استحکام کششی نمونه شماره ۱۳ بیشتر از سایر نمونه ها بوده که در تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح مقطع شکست این نمونه می توان چاله<sup>۵۴</sup> و حفراتی مشاهده نمود که حاکی از شکست نرم این نمونه است. و با بررسی تصویر میکروسکوپ الکترونی روبروشی از نحوه توزیع ذرات در نمونه شماره ۱۳ (شکل ۴-۲۲) مشاهده می شود که توزیه ذرات تقریبا به صورت یکنواخت تری صورت گرفته است.

در نمونه های شماره ۱۲ و ۱۴ توزیع ذرات تقویت کننده کاربرد سیلیسیم به صورت مناسب صورت نگرفته و همان طور که در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است توزیع زیگزاگی شکلی از ذرات تقویت کننده تجمع یافته در ناحیه اغتشاشی ایجاد شد.



شکل ۴-۲۲ توزیع یکنواخت تر ذرات کاربرد سیلیسیم در نمونه شماره ۱۳.

<sup>۵۴</sup> Dimple



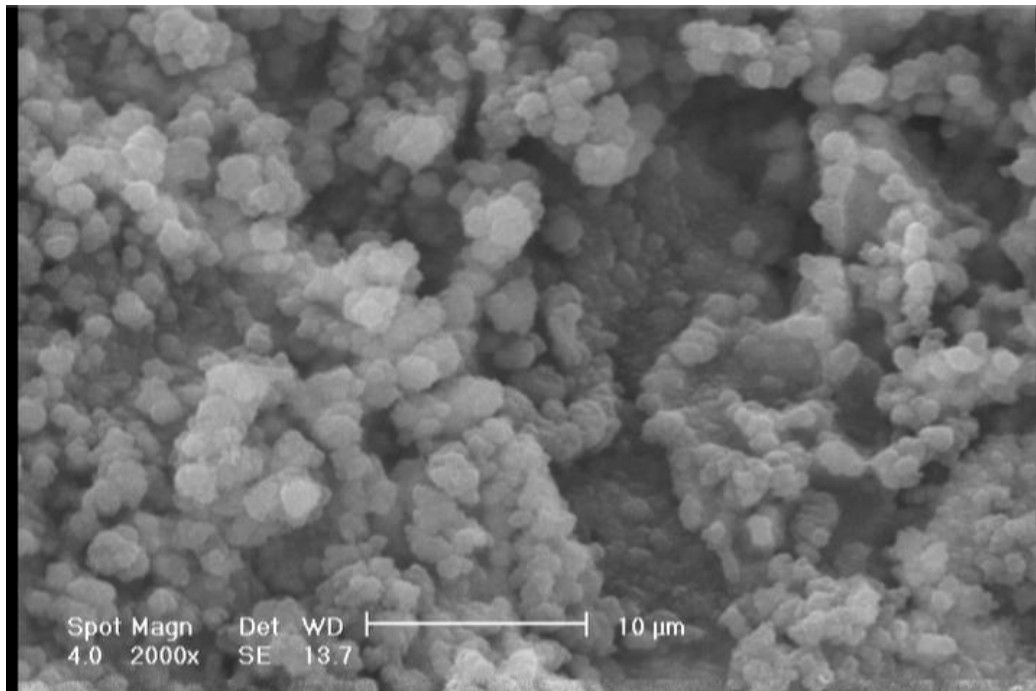
شکل ۴-۲۳ تجمع شدید ذرات کاربید سیلیسیم در ناحیه اغتشاشی.

با توجه به این که ذرات شدیداً آگلومره شده دارای فصل مشترک نا همسپما<sup>۵۵</sup> با فاز زمینه می باشند و این پیوند ضعیف تر از پیوندی است که بین خود ذرات کاربید سیلیسیم وجود دارد، شکست در ناحیه اغتشاشی و در فصل مشترک ذرات تقویت کننده تجمع یافته و فاز زمینه رخ می دهد.

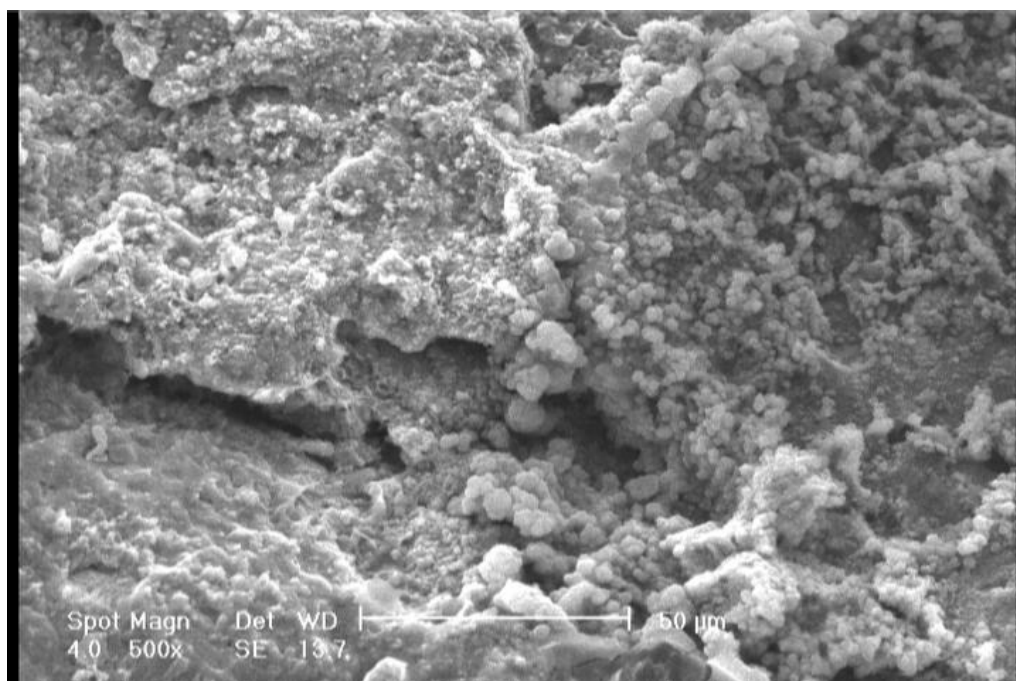
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به تجمع ذرات پودری در سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۲ در شکل‌های ۴-۲۴ و ۴-۲۵ و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به تجمع ذرات پودری در سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۴ نیز در شکل ۴-۲۶ قابل مشاهده می باشد.

از مشاهده تصاویر و بررسی نتایج به دست آمده اینگونه استنباط می گردد که در حالتی که آلومینیوم در سمت پیش رونده قرار دارد توزیع یکنواخت پودر در حالت یک پاسه و دو پاسه نخواهیم داشت .

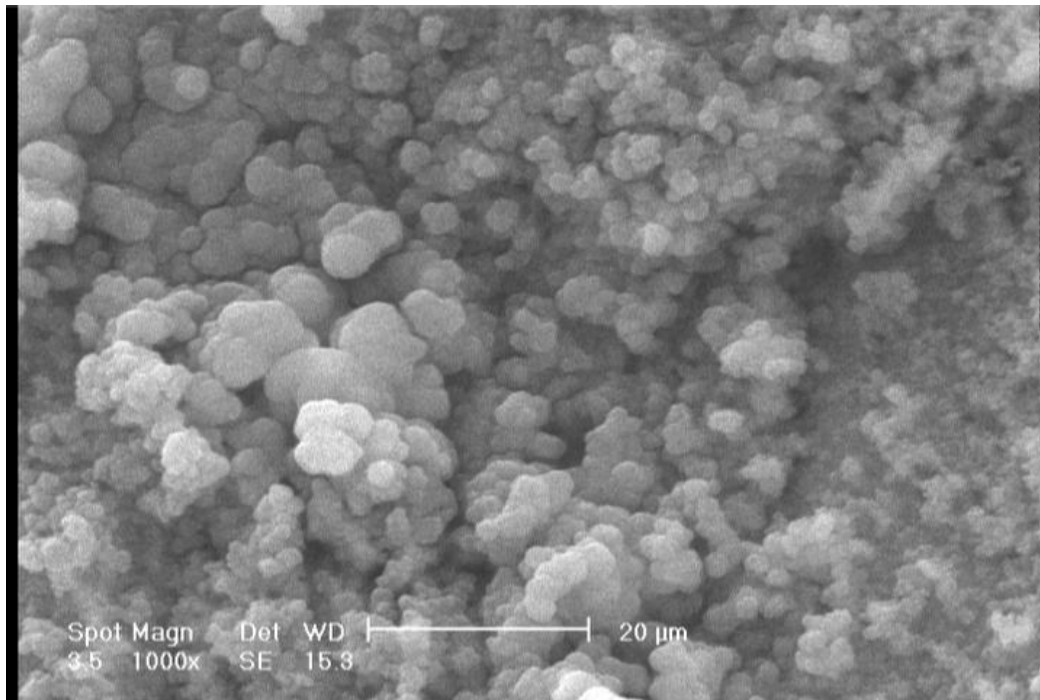
<sup>۵۵</sup> Incoherent



شکل ۴-۲۴ تجمع ذرات پودری در سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۲ با بزرگنمایی پایین.



شکل ۴-۲۵ تجمع ذرات پودری در سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۲ با بزرگنمایی بالا.



شکل ۴-۲۶ تجمع ذرات پودری در سطح مقطع شکست نمونه شماره ۱۴.

#### ۴-۴ ریز سختی سنجی

در ناحیه کامپوزیت شده چند عامل بر مقدار سختی تاثیرگذارند. برخی از این عوامل سختی را افزایش می دهند که از جمله آنها می توان به موارد زیر اشاره کرد :

- (۱) ریزدانه شدن: بر اساس رابطه هال-پچ، با کاهش اندازه دانه سختی افزایش پیدا میکند
- (۲) چگالی نابجایی: در اثر اختلافی که بین ضرایب انبساط حرارتی زمینه و نانوذرات تقویت کننده کاربرد سیلیسیم وجود دارد و همچنین به خاطر تغییرشکلی که در طی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی صورت می گیرد، نابجاییها تشکیل می شوند.
- (۳) ذرات تقویت کننده: سختی نانوذرات کاربرد سیلیسیم بالاست و بنابراین سختی ناحیه کامپوزیت شده را بالا می برد .
- (۴) مهمترین عاملی که باعث افزایش سختی در منطقه جوش می شود حضور حجم زیاد ترکیبات بین فلزی مانند  $\text{CuAl}_2$  ،  $\text{CuAl}$  و  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  در منطقه جوش می باشد.



از طرف دیگر، برخی عوامل سختی را کاهش می دهند:

(۱) اثر تابکاری<sup>۵۶</sup> یکی از این عوامل است. اثر تابکاری ناشی از حرارت ورودی مقدار سختی ناحیه اغتشاش یافته را کاهش می دهد. به بیان دیگر، زمانی که ماده آنیل<sup>۵۷</sup> می شود، تنشهای پسماند فشاری در آن آزاد می شوند.

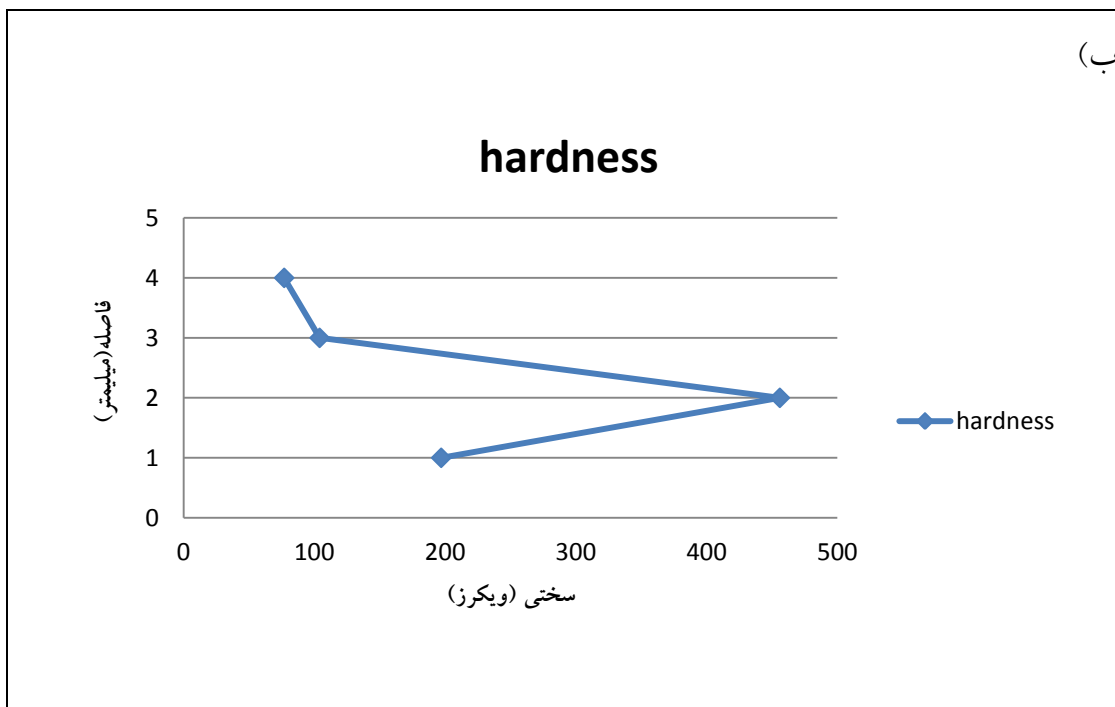
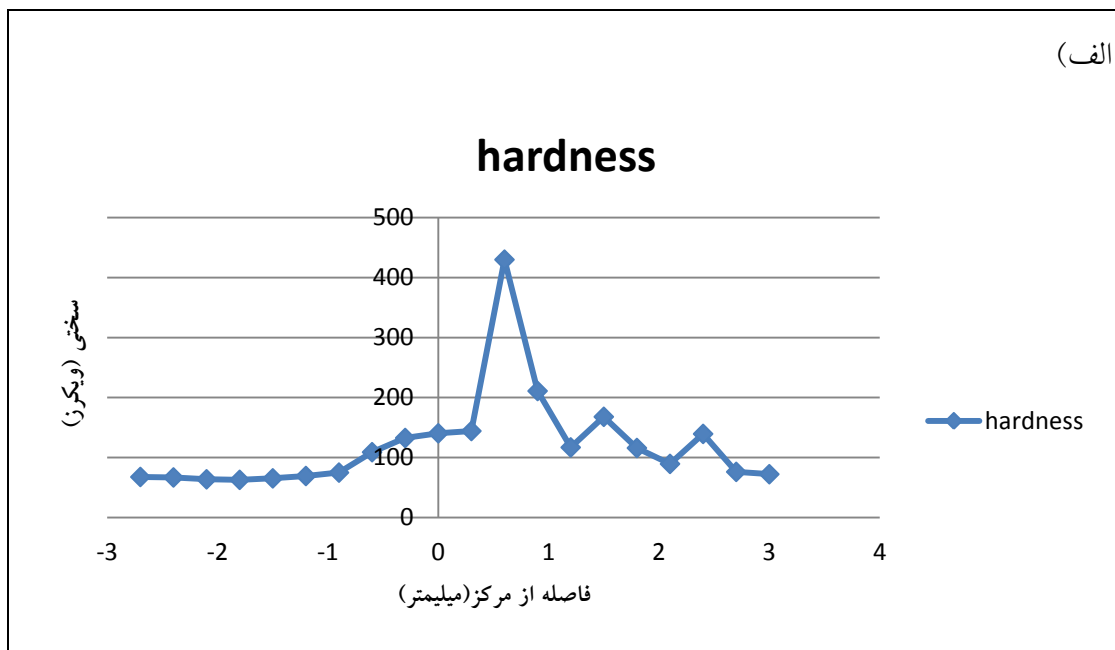
(۲) تبلور مجدد در دماهای بالا، چگالی نابجایی ها و تنشهای پسماند ناحیه اغتشاش یافته را کاهش می دهد.

میانگین سختی آلومینیم ۶۰۶۱ و مس خریداری شده به ترتیب ۱۰۰ و ۸۰ ویکرز بود. رفتار ریز سختی کلیه نمونه های جوشکاری شده با پودر مورد بررسی قرار گرفت، در همه جوشهای کامپوزیت شده، مقدار سختی بیشتر از فلز پایه بود. لازم به ذکر است همانگونه که قبلا نیز ذکر گردید با توجه به اینکه حجم زیادی از ناحیه اغتشاشی، مس می باشد سختی ناحیه اغتشاشی در کلیه نقاط اندازه گیری شده از سختی مس بیشتر بوده است. در شکل ۴-۲۷ پروفیل ریز سختی نمونه شماره ۱۲ در راستای طولی و عرضی قابل مشاهده می باشد.

---

<sup>۵۶</sup>Annealing Effect

<sup>۵۷</sup>Annealing

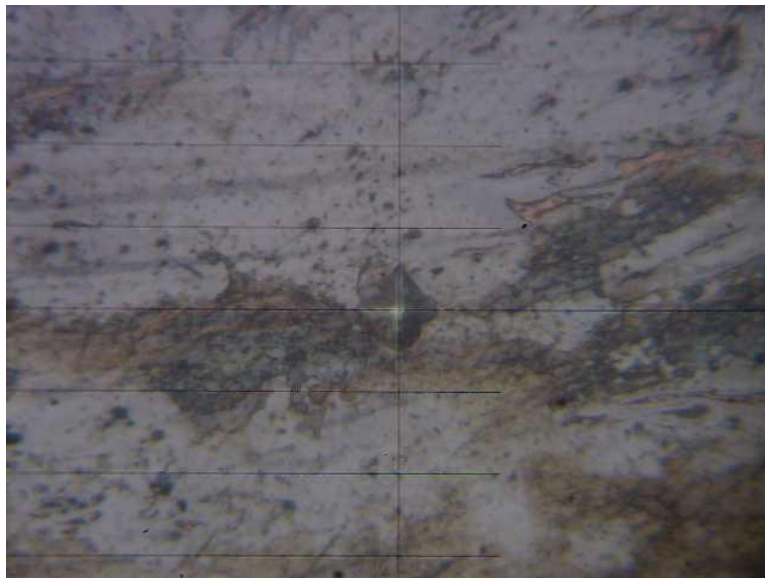


شکل ۴-۲۷ پروفیل ریز سختی سنجی اتصال مس-آلومینیوم در نمونه شماره ۱۲ در راستای (الف) طولی، (ب) عرضی.

در پروفیل ریز سختی سنجی نمونه شماره ۱۲ نوسانات شدیدی مشاهده گردید که این نوسانات شدید به دلایل ذیل می باشد:

(۱) نشان دهنده حضور نواحی غنی و فقیر از ذرات تقویت کننده است. در برخی نقاط سختی افزایش و در برخی دیگر کاهش پیدا کرده است که این نقاط به ترتیب با مناطق غنی و فقیر از ذرات تقویت کننده متناظر

بودند. همانطور که توضیح داده شد توزیع پودر در نمونه شماره ۱۲ و ۱۴ به صورت زیگزاکی بوده و این امر باعث شده که منحنی سختی یکنواخت نباشد. در شکل ۴-۲۸ نقطه متناظر با سختی ۲۱۱ ویکرز قابل مشاهده است.



شکل ۴-۲۸ تصویر نقطه متناظر با سختی ۲۱۱ ویکرز در نمونه شماره ۱۲.

(۲) حجم زیاد ترکیبات بین فلزی در ناحیه اغتشاشی.

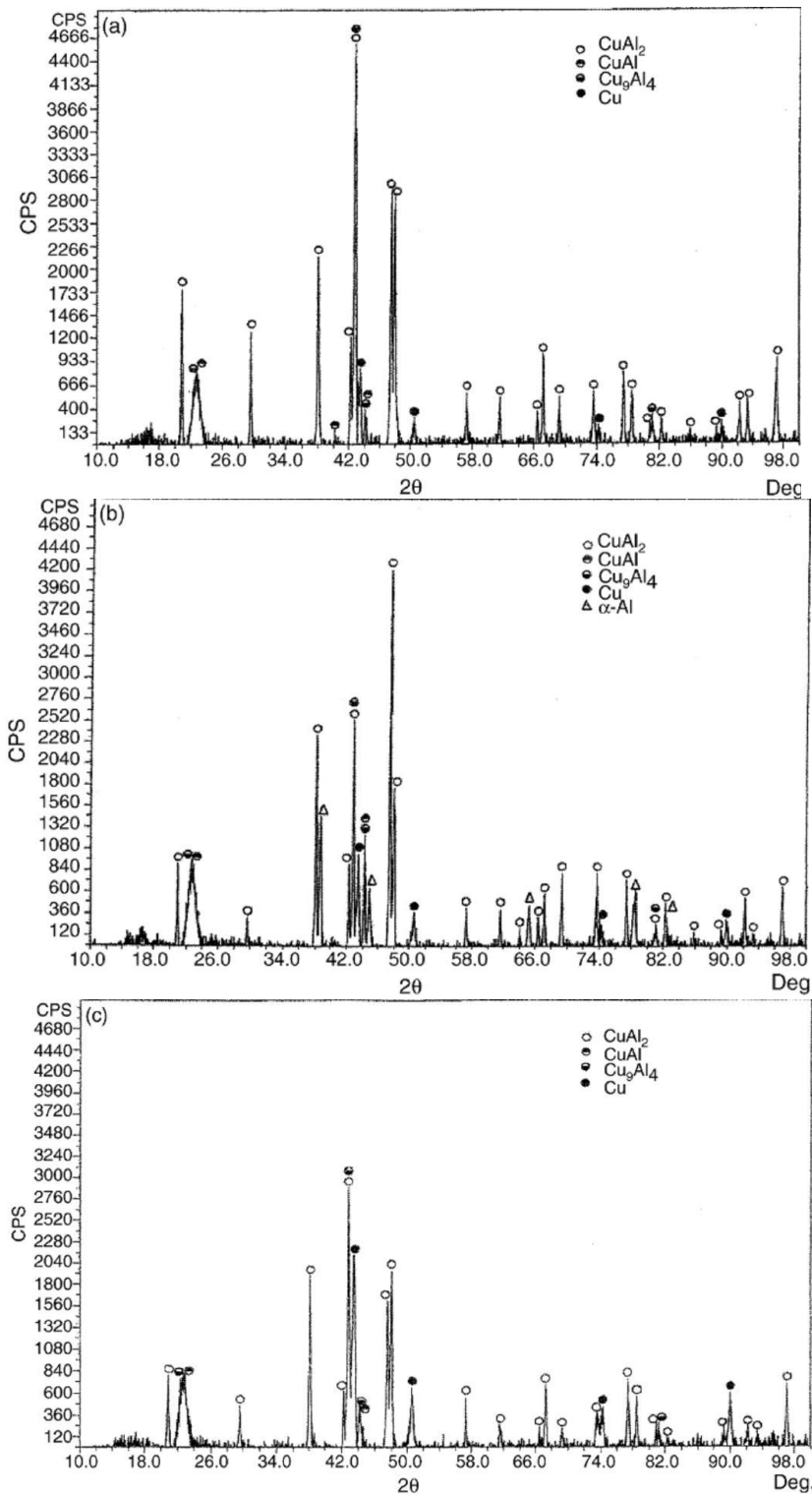
با توجه به اینکه سختی بعضی از نقاط دارای مقادیر زیادی می باشد احتمال حضور حجم زیاد ترکیبات بین فلزی مانند  $\text{CuAl}_2$  ،  $\text{CuAl}$  و  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  در منطقه جوش می باشد.



شکل ۴-۲۹ تصویر نقطه متناظر با سختی ۴۳۰ ویکرز در نمونه شماره ۱۲.

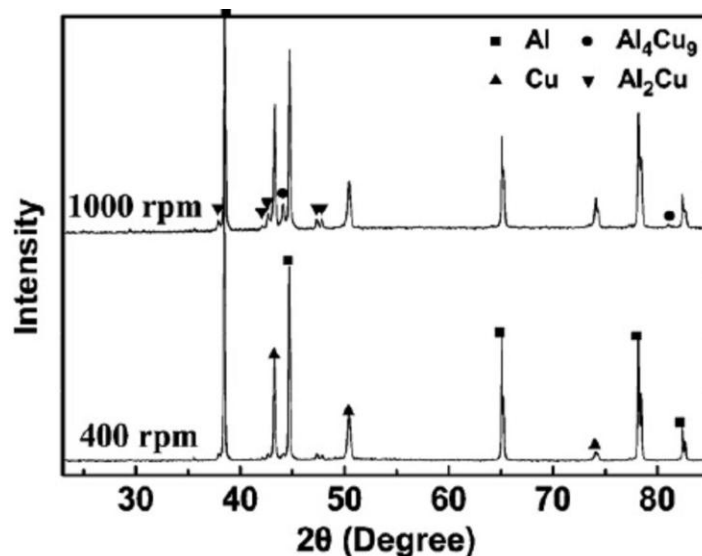
در خصوص ترکیبات بین فلزی در محل اتصال ، اویانگ<sup>۵۸</sup> و همکارانش [۵۲] الگوی پراش اشعه X اتصال آلیاژ ۶۰۶۱ و مس خالص را بررسی کرده اند. شکل ۴-۳۰ الگوی پراش اشعه X اتصال غیرمشابه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و مس خالص را در سه مقطع مختلف نشان می دهد که اولین مقطع در مرکز خط جوش و دو مقطع بعدی در فاصله ۴ mm از خط جوش هم برای آلیاژ ۶۰۶۱ و هم برای مس زده شد. نتایج حاکی از بوجود آمدن مقدار زیادی عناصر بین فلزی مانند  $\text{CuAl}_2$  ،  $\text{CuAl}$  و  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  همراه با مقداری فاز  $\alpha\text{-Al}$  و  $\text{Cu}$  در نزدیکی قسمتی که آلیاژ ۶۰۶۱ قرار دارد می باشد. تنوع زیاد پیک های مس،  $\alpha\text{-Al}$  و ترکیبات بین فلزی، اثبات این موضوع است که منطقه جوش آلیاژ- ۶۰۶۱ مس شامل یک مخلوط پیچیده می باشد. مطابق با نتایج حاصل از الگوی پراش اشعه ایکس، وجود دمای بالا همراه با عملکرد اغتشاشی بالای پین باعث مخلوط شدن هتروژن آلومینیوم و مس شده که موجب بوجود آمدن ترکیبات بین فلزی  $\text{CuAl}_2$  ،  $\text{CuAl}$  و  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  می شود.

<sup>۵۷</sup> Ouyang



شکل ۴-۳۰ الگوی پراش اشعه X اتصال آلیاژ ۶۰۶۱-مس برای ۳ مقطع طولی مختلف (a) در مرکز خط جوش (b) در فاصله ۴ mm از خط جوش در سمت آلیاژ ۶۰۶۱ (c) در فاصله ۴ mm از خط جوش در سمت مس [۵۲].

زو<sup>۵۸</sup> و همکاران نیز بر روی اتصال غیر همجنس آلیاژ ۱۰۶۰ و مس خالص تحقیق نمودند [۱۸]. نتایج حاصل از پراش اشعه X، منطقه ناگت در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده است. در سرعت های چرخش پایین (۴۰۰ rpm)، پیک های پراش ترکیبات بین فلزی آشکار نبودند و تنها چند پیک کوچک از این ترکیبات مشخص شده بودند. در حالی که در سرعت های چرخش بالاتر (۱۰۰۰ rpm)، پیک های ترکیبات بین فلزی  $Al_2Cu$  و  $Al_4Cu_9$  مشاهده گردیدند.

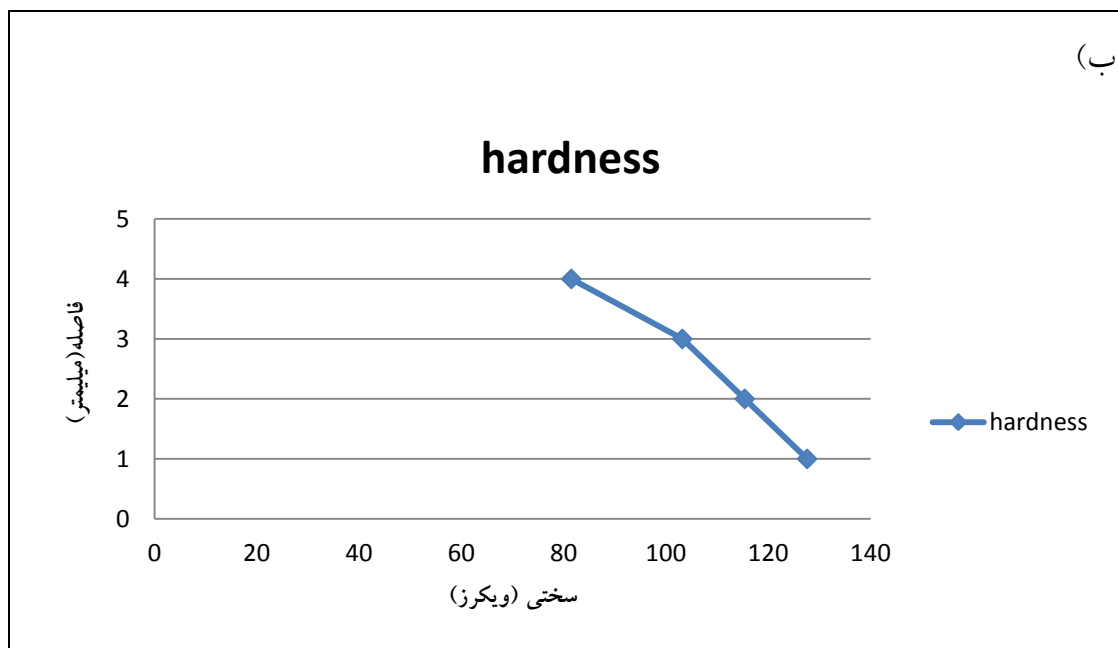
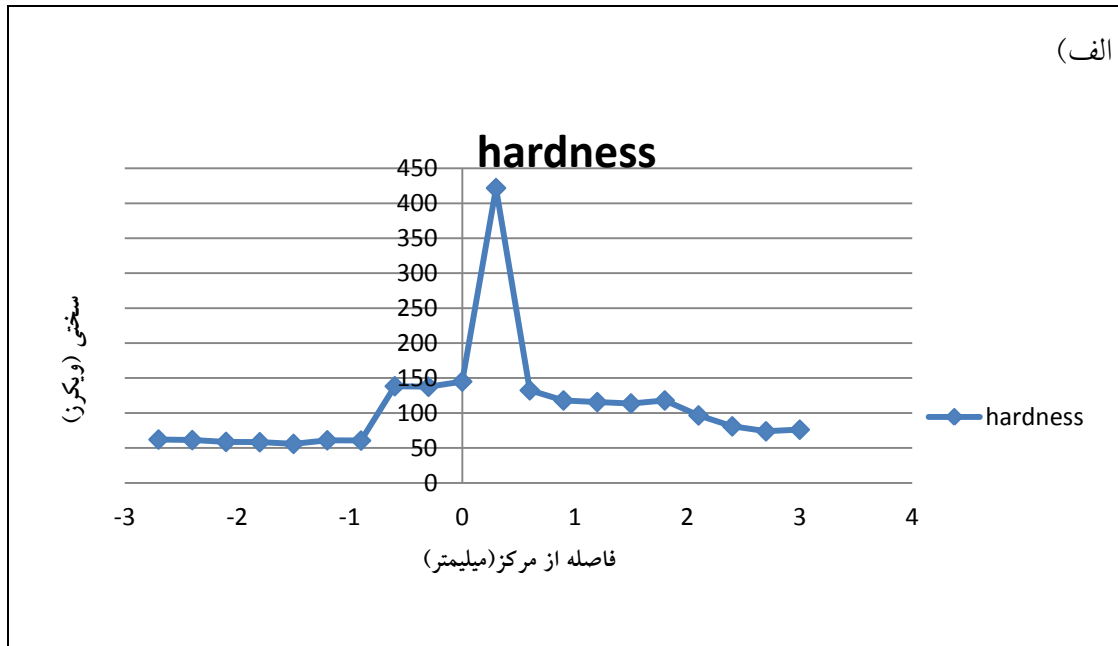


شکل ۴-۳۱ الگوی پراش اشعه X منطقه جوش اتصال آلیاژ ۱۰۶۰-مس در سرعت های ۴۰۰ rpm و ۱۰۰۰ rpm [۱۸].

به صورت کلی با فاصله گرفتن از مرکز جوش به تدریج از میزان سختی کاسته می شود تا در ناحیه متأثر از حرارت به کمترین مقدار می رسد و سپس افزایش خواهد یافت تا به سختی فلز پایه برسد.

با بررسی تغییرات سختی در عرض ناحیه اغتشاشی مشخص است که با حرکت از بالا به سمت پایین این ناحیه، سختی کاهش می یابد و یکی از دلایل آن این است که توزیع ذرات کاربید سیلیسیم در ناحیه پایینی منطقه اغتشاشی، فقیرتر از نواحی میانی آن می باشد و این موضوع باعث کمتر شدن سختی این ناحیه نسبت به نواحی میانی ناحیه اغتشاشی شده است.

در شکل ۴-۳۲ پروفیل ریز سختی نمونه شماره ۱۳ در راستای طولی و عرضی قابل مشاهده می باشد.



شکل ۴-۳۲ پروفیل ریز سختی سنجی اتصال مس-آلومینیوم در نمونه شماره ۱۳ در راستای (الف) طولی، (ب) عرضی.

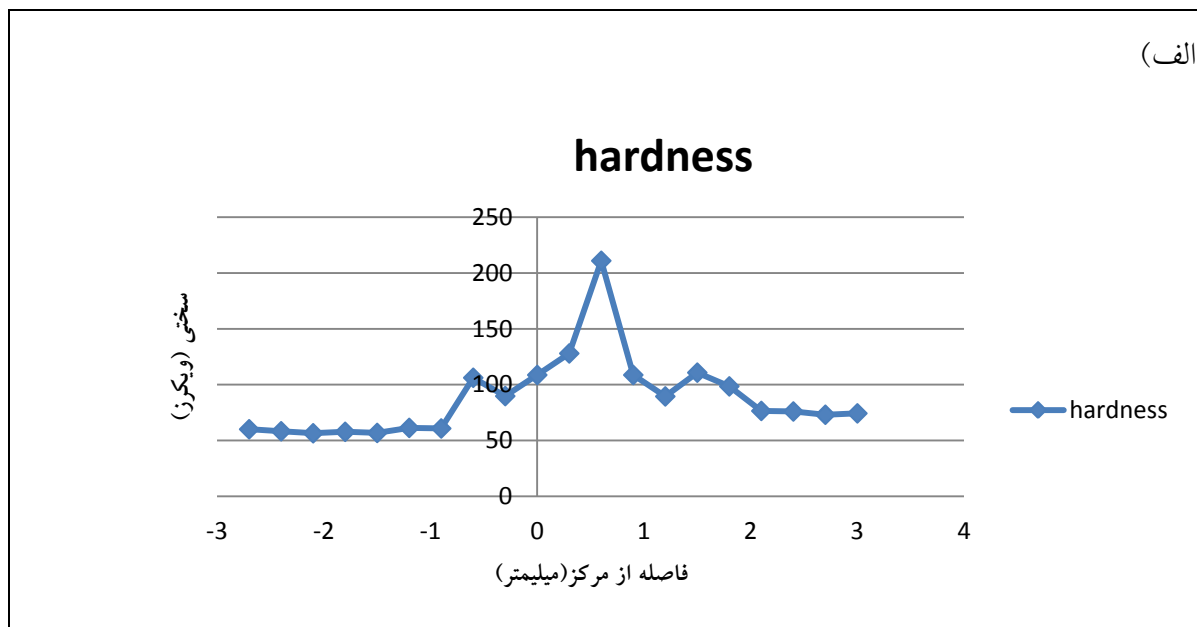
با مشاهده پروفیل ریز سختی سنجی نمونه شماره ۱۳ می توان دریافت که نسبت به نمونه شماره ۱۲ از پروفیل ریز سختی سنجی یکنواخت تری برخوردار است که ارتباط مستقیم با نحوه توزیع ذرات کاربرد سیلیسیم داشته و همانگونه که در قبل نیز توضیح داده شد توزیع ذرات کاربرد سیلیسیم در نمونه شماره ۱۳ بسیار یکنواخت تر می باشد در مواردی که شاهد افزایش میزان سختی می باشیم احتمال حضور ترکیبات بین فلزی در آن نقطه قوت خواهد گرفت. بیشترین میزان سختی در مرکز جوش مشاهده می شود و به تدریج با فاصله گرفتن از مرکز جوش از میزان سختی کاسته می شود تا در ناحیه متاثر از حرارت به کمترین مقدار می رسد و سپس افزایش خواهد یافته تا به سختی فلز پایه برسد و تغییرات سختی در عرض ناحیه اغتشاشی نشان دهنده کاهش سختی از سطح اتصال به سمت پایین می باشد.

هرچند اندازه دانه جوش نمونه شماره ۱۳ بزرگتر از نمونه شماره ۱۲ است و طبق رابطه هال-پیچ بایستی سختی بیشتری باشد اما توزیع غیر یکنواخت ذرات کاربرد سیلیسیم در نمونه شماره ۱۲ باعث شده است که نمونه شماره ۱۲ سختی بیشتری داشته باشد.

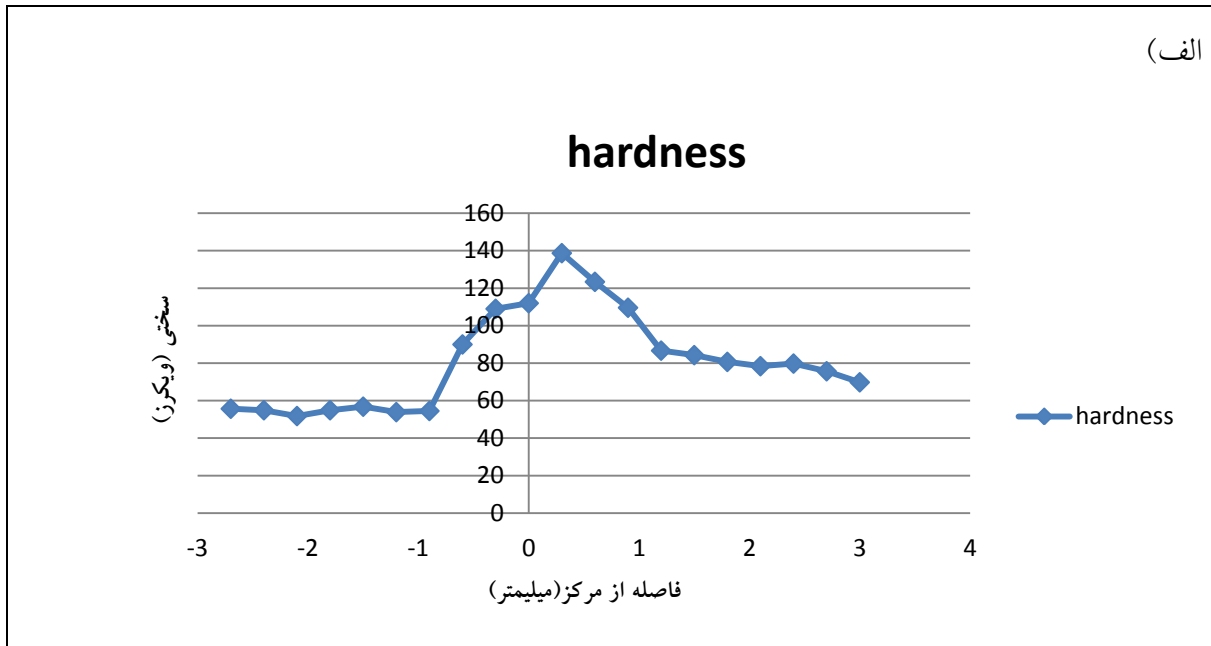
در شکل ۴-۳۳ و ۴-۳۴ به ترتیب پروفیل ریز سختی نمونه های شماره ۱۴ و شماره ۱۵ در راستای طولی و عرضی قابل مشاهده می باشد.

همانگونه که مشاهده می شود نیز در پروفیل ریز سختی نمونه شماره ۱۴ در راستای عرضی به صورت کلی با فاصله گرفتن از مرکز جوش به تدریج از میزان سختی کاسته می شود تا در ناحیه متاثر از حرارت به کمترین مقدار می رسد و سپس افزایش خواهد یافته تا به سختی فلز پایه برسد و همانگونه که قبلا نیز توضیح داده شد نوسانات در مقدار سختی نشان دهنده توزیع غیر یکنواخت پودر و حضور نواحی غنی و فقیر از ذرات تقویت کننده است.





شکل ۴-۳۳ پروفیل ریز سختی سنجی اتصال مس-آلومینیوم در نمونه شماره ۱۴ در راستای (الف) طولی، (ب) عرضی.



شکل ۴-۳۴ پروفیل ریز سختی سنجی اتصال مس-آلومینیوم در نمونه شماره ۱۵ در راستای (الف) طولی، (ب) عرضی.

نمونه شماره ۱۵ در مقایسه با نمونه شماره ۱۴ پروفیل ریز سختی یکنواخت تری داشته و با حرکت از سطح به سمت عمق از میزان سختی کاسته می شود.

همانطور که مشاهده می شود میزان افت سختی نمونه ها در سمت فلز آلومینیوم با مس فرق دارد که این موضوع به دلیل ماهیت متفاوت این دو فلز می باشد. در فلز آلومینیوم علت این افت سختی این است که استحکام این آلیاژها بدلیل رسوبات سخت پراکنده است. در آلیاژ ۶۰۶۱ ذرات  $Mg_2Si$  هستند که باعث افزایش سختی و استحکام می شوند که در اثر دمای بالای جوشکاری، این رسوبات در نواحی جوش و TMAZ حل شده و در نواحی HAZ فراپیر شدن آنها رخ می دهد و به صورت کلی سختی در بالای ناحیه جوش بیشتر از پایین آن است که این تغییرات به دلیل اندازه دانه، که ناشی از ساختار لایه ای هموزن تر و ریزتر در این قسمت و کارسختی است. ولی دلیل اصلی آن حجم زیادتر ترکیبات بین فلزی در بالای ناگت می باشد.

۵

## فصل پنجم

### جمع بندی و نتیجه گیری

## ۵-۱ نتایج:

۱- اتصال مس به آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی امکان پذیر بوده و زمانی که مس در سمت پیش رونده قرار دارد نتایج بهتری به نسبت قرار گرفتن مس در حالت پس رونده حاصل گردید

۲- بهترین نتایج در زمانی حاصل شد که سرعت جوشکاری ۱۵ میلی متر و سرعت چرخش ۱۲۵۰ rpm بود.

۳- نانو ذرات کاربرد سیلیسم از طریق (۱) جلوگیری از رشد دانه های تبلور مجدد یافته، (۲) افزایش مکانهای جوانه زنی دانه های تبلور مجدد یافته و (۳) شکستن دانه های اولیه در طی تغییر شکل پلاستیکی که در خلال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی رخ می دهد، اندازه دانه ناحیه اغتشاش یافته را کاهش داد.

۴- بر اساس مشاهدات میکروسکوپی، ناحیه اغتشاش تمامی نمونه‌ها در هر دو عضو اتصال مس و آلومینیوم، دارای کوچکترین اندازه دانه نسبت به سایر نواحی اتصال بود.

۵- در راستای عرضی به صورت کلی با فاصله گرفتن از مرکز جوش به تدریج از میزان سختی کاسته می شود تا در ناحیه متأثر از حرارت به کمترین مقدار می رسد و سپس افزایش خواهد یافت تا به سختی فلز پایه برسد.

۶- نوسانات در مقدار سختی به دلیل توزیع غیر یکنواخت پودر و حضور نواحی غنی و فقیر از ذرات تقویت کننده و در بعضی از نقاط حضور ترکیبات بین فلزی تولید شده در حین فرایند است.

۷- با حرکت از نواحی بالایی ناحیه اغتشاشی به سمت نواحی پایینی ناحیه اغتشاشی، مقدار سختی کاهش می یابد.

۸- اندازه دانه در حالت یک پاسه راستگرد دارای کوچکترین مقدار می باشد.

## ۲-۵ پیشنهادها:

- ۱- به کار بردن هندسه‌های متفاوتی از پین، تاثیر آن بر نحوه توزیع ذرات پودری، ریزساختار و خواص مکانیکی جوش بررسی شود.
- ۲- با تغییر پهناي شيار يا تعبیه دو يا چند شيار با فاصله بسیار نزدیک در کنار یکدیگر تاثیر درصد حجمی فاز تقویت کننده مورد استفاده در فرایند مورد بررسی قرار گیرد.
- ۳- بررسی تغییر جهت چرخش در هر یک از پاسهای جوشکاری شده بر ریز ساختار و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گیرد.
- ۴- بررسی تاثیر لحاظ نمودن زمان پس از هر پاس و سر نمودن قبل از شروع پاس بعدی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گیرد.
- ۵- انجام جوشکاری در دو طرف قطعه و تاثیر آن بر ریزساختار و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گیرد.

## منابع و مراجع

- [۱] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, “Friction stir welding and processing”, *Materials Science and Engineering R 50 (2005) 1–78*.
- [۲] K.Kimapon, T.Watanabe, *Weld. J 83 (2004) 277S*.
- [۳] C.M. Chen, R. Covacevice, *Int. J. Mach. Tool M anu. 44 (2004) 1205*.
- [۴] Khaled TERRY, “An Outsider Looks at Friction Stir Welding”, *Federal Aviation Administration, July 2005*.
- [۵] S. Gopalakrishnan, N. Murugan, “Prediction of tensile strength of friction stir welded aluminium matrix TiCp particulate reinforced composite”, *Materials and Design, vol., 32 (2011), pp. 462–467*.
- [۶] Palmer , I.J, “Light alloys metallurgy of the light metals”, *2<sup>nd</sup> edition, Australia, 1978*.
- [۷] A. Pironi, L. Collini, D. Fersini, “Fracture and fatigue crack growth behavior of PMMC friction stir welded butt joints”, *Engineering Fracture Mechanics, vol.,75 (2008), pp. 4333–4342*.
- [۸] Nandan,R,DebRoy,T,Bhadeshia, H.K.D.H. “Recent advances in friction-stir welding—Process,weldment structure and properties”. *Prog. Mater. Sci. 2008, 53, 980–1023*.
- [۱۰] D. Lohwasser and Z. Chen: "Friction stir welding — From basics to applications" Woodhead Publishing 2010, *Chapter 5, Pages 118–163*.
- [۱۱] By Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney: “Friction stir welding and processing”, *ASM International*.
- [۱۲] H.J. Liu , J.C. Fenga, H. Fujii , K. Nogi, “Wear characteristics of a WC–Co tool in friction stir welding of AC4AC30 vol%SiCp composite”, *Machine Tools & Manufacture, vol., 45 (2005), pp. ۱۶۳۰–۱۶۳۹*.
- [۱۳] G.J. Fernandez, L.E. Murr, “Characterization of tool wear and weld optimization in the friction-stir welding of cast aluminum 359+20% SiC metal matrix composite”, *Materials Characterization, vol., 52 (2004), pp. 65– 75*.
- [۱۴] Elangoran.K et al. “Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminum alloy” *Material processing technology pp.163-175 ,2008* .
- [۱۵] H. Fujii et al. “ Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys”. *Materials Science and Engineering A 419 (2006) 25–31,2005* .

[۱۶] P.Bahemmat, M.K Besharati Givi and K.Reshad Seighalani, "The Influence of Welding Speed on Microhardness and Microstructure in Dissimilar Friction Stir Welded in AA6061-T6 and AA7071-T6", *The International Institute of Welding (IIW) Congress Welding & Joining (2009)* 397-402.

[۱۷] محمد مهدی فراهتی، مهرداد عباسی، سید حسین رضوی، جوشکاری آلومینیوم ۱۰۵۰ - مس خالص به روش اصطکاکی اغتشاشی (FSW)، دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران (ICME) ۱۰-۱۲ اسفند ماه ۸۸، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

[۱۸] P. Xue, D.R. Ni, D. Wang, B.L. Xiao, Z.Y. Ma, "Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints", *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 4683-4689.

[۱۹] Abbasi Gharacheh, M.; Kokabi, A.H.; Daneshi, G.H.; Shalchi, B.; Sarrafi, R.; "The influence of the ratio of rotational speed/traverse speed on mechanical properties of AZ31 friction stir welds". *Machine Tools and Manufacture*, 46 P. 1983-1987, 2006.

[۲۰] Y.G. Kim , H. Fujii , T. Tsumura , T. Komazaki , K. Nakata.; "Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy". *Materials Science and Engineering A* 415 (2006) 250-254.

[۲۱] Rhodes, C.G.; Mahoney, M.W.; Bingel, W.H.; Spurling, R.A.; Bampton, C.C.; "Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium", *Scripta Materialia*, 36 p.69-75, 1997.

[۲۲] Liu, G.; Murr, L.E.; Niou, C.S.; Mclure, J.C.; Vega, F.R.; "Microstructural aspects of the friction stir welding of 6061-T6 aluminum", *Scripta Materialia*, 37 p.355-361, 1997.

[۲۳] Sato, Y.S.; Kokawa, H.; Enomoto, M.; Jordan, SH.; "Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction stir welding", *Metal Mater Trans A*, 30 p.2429-2437, 1999.

[۲۴] Jata, K.V.; Sankaran, K.K.; Ruschau, J.J.; "Friction stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7075-T7451", *Metall Mater Trans A*, 31 p.2181-2192, 2000.

[۲۵] Magdy M. El-Rayes and Ehab A. El-Danaf, "The influence of multi-pass friction stir processing on the micro structural and mechanical properties of Aluminum Alloy 6082" *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 2012, 1157-1168.

[۲۶] Leonard, A.J., Microstructure and ageing behaviour of FSW in aluminium alloys 2014A-T651 and 7075-T651, 2<sup>nd</sup> FSW Symposium, 26-28 June 2000, Quality Hotel 11, Gothenburg, Sweden.



- [۲۹] M. W. Mahoney, C. G. Rhodes, J. G. Flintoff, R. A. Spurling, W. H. Bingel, "Properties of friction-stir-welded 7075-T651 aluminum", *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 29, pp. 1955-1965, 1998.
- [۳۰] H. Feng, B. L. Xiao, Z. Y. Ma, "Effect of microstructural evolution on mechanical properties of friction stir welded AA2009/SiCp composite", *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 2141-2148, 2008.
- [۳۱] G. E. Dieter, "Mechanical metallurgy", 3rd ed., Mc Graw-Hill, 1976.
- [۳۲] F. J. Humphreys, M. Hatherly, "Recrystallization and Related Annealing Phenomena", 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [۳۳] M. A. Martorano, A. F. Padilha, "Modelling grain boundary migration during geometric dynamic recrystallization", *Philosophical Magazine Letters*, vol.88, pp. 725–734, 2008.
- [۳۴] Gourder, S.; Konopleva, E.V.; McQueen, H.J.; Montheillet, F.; "Recrystallization during hot deformation of aluminum", *Materials Science Forum*, 217-222 p.441-446, 1996.
- [۳۵] M. E. Kassner, S. R. Barrabes, "New developments in geometric dynamic recrystallization", *Materials Science and Engineering A*, vol. 410–411, pp. 152–155, 2005.
- [۳۶] B.Zahmatkesh, M.H. Enayati” A novel approach for development of surface nanocomposite by friction stir processing” *Materials Science and Engineering A* 527 (2010) 6734–6740.
- [۳۷] Liming Ke, Chunping Huang, Li Xing, Kehui Huang” Al–Ni intermetallic composites produced in situ by friction stir processing” *Journal of Alloys and Compounds* 503 (2010) 494–499.
- [۳۸]. C.J. Dawes, P.L. Threadgill, E.J.R. Spurgin, and D.G. Staines, “Development of the New Friction Stir Technique for Welding Aluminum—Phase II,” *TWI member report* 5651/35/95, Nov 1995.
- [۳۹]. Z.Y. Ma, S.R. Sharma, R.S. Mishra, M.W. Manohey,” *High strain rate superplasticity in friction stir processed Al-Mg-Zr alloy*”.*Material Science and engineering A*, 426–432 (2003) 2891.
- [۴۰]. K. Elangovan And V. B. Alasubramanian, ” Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy”, *Materials Science and Engineering A* 459 (2007) 7-18.

- [۴۱]. F. Nascimento, T. Santos, P. Vilac, R.M. Miranda, L. Quintino, "Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys". *Materials Science and Engineering A* 506 (2009) 16–22.
- [۴۲]. K. Nakata, Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, "Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing". *Materials Science and Engineering A* 437 (2006) 274–280.
- [۴۳]. S.R. Sharma, Z.Y. Ma, R.S. Mishra, "Effect of friction stir processing on fatigue behavior of A356 alloy". *Scripta Materialia* 51 (2004) 237–241.
- [۴۴]. D.R. Ni, D. Wang, A.H. Feng, G. Yao and Z.Y. Ma, "Enhancing the high-cycle fatigue strength of Mg–9Al–1Zn casting by friction stir processing". *Scripta Materialia* 61 (2009) 568–571.
- [۴۵]. P.S. De, R.S. Mishra and C.B. Smith. "Effect of microstructure on fatigue life and fracture morphology in an aluminum alloy". *Scripta Materialia* 60 (2009) 500–503.
- [۴۶]. K.Kimapong, and T.Watanabe. "Effect of Welding Process Parameters on Mechanical Property of FSW Lap Joint between Aluminum Alloy and Steel". *Materials Transactions, Vol. 46, pp. 2211 to 2217, (2005)*.
- [۴۷]. S. Nourouzi, M.Shakeri, M.Habibnia. "Effect of microstructure on fatigue life and fracture morphology in an aluminum alloy. " Friction stir welding of dissimilar metal Al5050 Aluminum alloy to AISI304 Stainless Steel". *Advanced Materials Research, Vol.445,2012*.
- [۴۸]. M. Abbasi, A. Karimi Taheri, M.T. Salehi, " Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process", *J. Alloys Compd.* 319 (2001)233–241.
- [۴۹]. P. Xue, B.L. Xiao, D.R. Ni, Z.Y. Ma, " Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al–Cu joint by intermetallic compounds, " *Materials Science and Engineering A* 527 (2010) pp. 5723–5727.
- [۵۰]. A. Abdollah-Zadeh, T. Saeid, B. Sazgari, "Microstructural And Mechanical Properties Of Friction Stir Welded Aluminum/Copper Lap Joints", *Journal Of Alloys And Compounds* 460 ,535–538, 2008.
- [۵۱]. LI Xia-wei, ZHANG Da-tong, QIU Cheng, ZHANG Wen, "Microstructure And Mechanical Properties Of Dissimilar Pure Copper/1350 Aluminum Alloy Butt Joints By Friction Stir Welding", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22, 1298\_1306, 2012.

- [۵۲]. Jiahu Ouyang, Eswar Yarrapareddy, Radovan Kovacevic, "Microstructural Evolution In The Friction Stir Welded 6061 Aluminum Alloy (T6-Temper Condition) To Copper", *Journal Of Materials Processing Technology*, 172 110–122, 2006.
- [۵۳]. Murr LE, Li Y, Flores RD, Trillo EA, McClure JC, " Intercalation vortices and related microstructural features in the friction stir welding of dissimilar metals" *Material Resources Innovation* 1998; 2: p. 150-163.
- [۵۴]. N.T.Kumbhar, " Friction Stir Welding Of Al 6061 Alloy ", *Asian J.Exp. Sci*, vol 22, 63-74, 2008.
- [۵۵]. Hu'seyin Uzun, "Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA۲۱۲۴ aluminium alloy matrix composite", *Materials and Design*, vol., ۲۸ (۲۰۰۷), pp. ۱۴۴۰–۱۴۴۶
- [۵۶]. M. Amirizad, A.H. Kokabi, M. Abbasi Gharacheh, R. Sarrafi, B. Shalchi, M.Azizieh, "Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir welded A۳۰۶+۱۰%SiCp cast composite", *Materials Letters*, vol., ۶۰ (۲۰۰۶), pp. ۵۶۵–۵۶۸
- [۵۷]. A.H. Feng and Z.Y. Ma, "Formation of Cu<sub>v</sub>FeAl<sub>v</sub> phase in friction-stir-welded SiCp/Al–Cu–Mg composite", *Scripta Materialia*, vol., ۵۷ (۲۰۰۷), pp. ۱۱۱۳–۱۱۱۶.

### Abstract

A butt joint of Al and pure copper is often used in the industry for electrical applications. Al and Cu are used in the production of bus-bars. A bus-bar is an electrical conductor that makes a common connection between several circuits; and it is found in the interconnection of the incoming and outgoing transmission lines and transformers at an electrical substation. Bus-bars are also used to connect generators and the main transformers in a power plant. In this paper nano silicon carbide was added in butt joint and friction stir welding was used to make butt joints of Al 6061-T6 and commercially pure copper (with 5mm thickness). The main object of the present study is to investigate the effect of nano-sized SiC particle on the mechanical and microstructural properties of the friction stir welding (FSW) joints of Aluminum Alloy and commercially pure copper. The experimental results obtained showed that relatively better joints could be obtained when the hard Cu plate was fixed at the advancing side and the best mechanical properties were obtained in rotation speed 1250 rpm and speed 15mm/min. The results demonstrate that the mechanical and microstructural properties in the joint improved. Microstructural observations by optical microscope, scanning electron microscope, the hardness and strength test all were in good agreement with corresponding results.

**Key Words:** Friction stir welding, dissimilar joint Aluminum-copper, SiC nanoparticle, Microstructural examination, tensile strength, hardness.



**Amirkabir University of Technology  
(Tehran Polytechnic)**

**Mining and Material Department**

**MSc Thesis**

**Title**

**Friction stir welding of 6061-T6 Aluminum alloy by  
addition of Sic nano-particles.**

**By**

**Rohollah Siahpoush**

**Supervisor**

**Dr.Hamid Omidvar**

**January2015**