http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

اسفند ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱۲ ص‌ص ۵۶-۶۶

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۲/۲/۱۵
تاریخ پذیرش ۹۲/٤/٤
ارائه در سایت ۹۲/۹/۳۰

تأثیر پارامترهای فرایند جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی و ابزار روی خواص مکانیکی اتصالات آلیاژ آلومینیوم 7075-T6

عبدالحمید عزیزی[۱*]، وحید ذاکری مهرآباد[۲]، افشین مستوفی زاده[۳]، رضا آذرافزا[۴]

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه
۲- مربی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، سنندج
۴- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
* کرمانشاه، ۶۷۱۴۹۶۷۳۴۶، ah.azizi@razi.ac.ir

چکیده- آلیاژهای آلومینیوم هوا فضا قابلیت جوش‌کاری پایینی را در روش‌های جوش‌کاری معمول ذوبی نشان می‌دهند. پیشرفت جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی یک روش بهبود یافته دیگر برای جوش‌کاری اتصالات آلومینیومی‌فراهم کرده است. در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای فرایند و ابزار بر روی خواص مکانیکی اتصالات آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 که به روش جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی تولید شده اند، مورد بررسی قرار گرفته است. اتصالات با تغییر دادن پارامترهای فرایند و پارامترهای ابزار، تولید شده است. خواص مکانیکی اتصالات اندازه‌گیری شده و با ریز ساختار و سختی منطقه اغتشاش ارتباط داده شده است. نتیجه بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که اتصالات تولید شده در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه و سرعت جوش‌کاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه با استفاده از ابزاری با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر، قطر پین ۵ میلی‌متر، سختی ابزار ۴۵ راکول C، خواص مکانیکی بالاتری بدست می‌دهد.

کلیدواژگان: جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی، سرعت دورانی، سرعت جوش‌کاری، آلیاژ آلومینیوم.

Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminum alloy joints

A.H. Azizi[1*], V. Zakeri Mehrabad[2], A. Mostofi Zadeh[3], R. Azarafza[4]

1- Assist. Prof., Mech. Eng., Razi Univ., Kermanshah, Iran
2- MSc in Manufacturing Eng., Islamic Azad Uinv., Tabriz Branch, Tabriz, Iran
3- MSc Student of Mech. Eng., Islamic Azad Univ., Science and Research Branch, Sanandaj, Iran
1- Assist. Prof., Malek Ashtar Univ. of Tech., Tehran, Iran
* P.O.B. 6714967346 Kermanshah, Iran. ah.azizi@razi.ac.ir

Abstract- The aircraft aluminum alloys generally present low weldability by traditional fusion welding process. The development of the friction stir welding has provided an improved way of producing aluminum joints. In this present work the influence of process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 joints produced by friction stir welding was analyzed. Joints were fabricated by varying process parameters and tool parameters. Strength properties of the joints were evaluated and correlated with the microstructure and hardness of weld nugget. This investigation demonstrates, Joints fabricated at rotational speed of 1400 rpm and welding speed of 60 mm/min using the tool with 15mm shoulder diameter, 5mm pin diameter and 45 HRc tool hardness ,yielded higher strength properties.

Keywords: Friction Stir Welding, Rotational Speed, Welding Speed, Aluminum Alloy.

۱- مقدمه

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ یکی از سخت‌ترین آلیاژهایی است که امروزه در صنعت کاربرد دارد. نسبت استحکام به وزن بالا، این آلیاژ را برای سازه‌های هوافضا بسیار مناسب و مورد توجه می‌گرداند [۱]. مشکل بزرگ در مورد این آلیاژ عدم جوش پذیری ذوبی آن است. این آلیاژ بسیار حساس به ترک ایجاد شده در هنگام انجماد ذوب و ترک ایجاد شده هنگام ذوب منطقه متأثر از حرارت، به دلیل حضور مس است. هرچند که حل مشکل ترک در هنگام انجماد با استفاده از فیلر آلیاژ آلومینیوم غیر قابل عملیات حرارتی، امکان پذیر است ولی اتصالات ایجاد شده کارایی پایین و غیر قابل قبولی دارند [۲]. به علاوه اکسیداسیون و تبخیر فلز روی مشکلات زیادی در حین جوش‌کاری از جمله تخلخل، ذوب و اتصال ناکافی و بخارات خطرناک ایجاد می‌کند. بنابراین استفاده از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به مواردی محدود شده بود که نیاز به جوش‌کاری نداشته باشد [۳].

در حین جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی یک ابزار چرخشی در طول اتصال حرکت می‌کند و با تولید حرارت باعث ایجاد چرخه ای از جریان مواد پلاستیکی در نزدیکی سطح ابزار می‌شود [۴]. تشکیل منطقه اغتشاش، تحت تأثیر جریان مواد توسط ابزار چرخشی است. هرچند که جریان مواد خود تحت تأثیر خواص ماده مانند استحکام تسلیم، شکل پذیری، سختی فلز پایه، طراحی ابزار و پارامترهای فرایند جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی است. در مقایسه با جوش‌کاری ذوبی، جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی، واپیچش و مقدار تنش پسماند را کاهش می‌دهد [۵-۷]. تأثیر ساچمه زنی و اصطکاک روی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش‌کاری شده آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بررسی و گزارش شده است [۸]. یافته‌های اخیر نشان می‌دهد که دانه‌ها در منطقه اغتشاش به حالت سه بعدی متساوی المحور نبوده بلکه به حالت ۲ بعدی میله مانند هستند [۹]. ساختار دانه در منطقه متاثر از حرارت - کار مکانیکی، دچار افزایش طول و اعوجاج ناشی از کار مکانیکی ابزار شده است. منطقه متأثر از حرارت تحت تأثیر کار مکانیکی ناشی از ابزار قرار نگرفته و ساختار دانه در این منطقه شبیه ساختار دانه فلز پایه است. تلاش‌های زیادی برای بررسی تأثیر پارامترهای فرایند روی جریان مواد و تشکیل ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش‌کاری شده انجام گرفته است. موضوع اصلی بسیاری از تحقیق‌ها یافتن شرایط بهینه پارامترهای فرایند برای اتصالات و تأثیر این پارامترها روی خواص اتصالات بوده است. تأثیر برخی از پارامترها نظیر نیروی محوری، سرعت دورانی و سرعت جوش‌کاری بر روی خواص جوش بررسی شده است. تأثیر مجموع پارامترهای فرایند و پارامترهای ابزار روی خواص اتصال گزارش نشده است. از این رو در این تحقیق تلاش شده است تأثیر پارامترهای ابزار و پارامترهای فرایند روی خواص مکانیکی و تشکیل منطقه اغتشاش برای اتصالات آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بررسی شود.

۲- کار تجربی

ورق‌های نورد شده به ضخامت ۵ میلی‌متر از آلیاژ آلومینیوم 7075 –T6 در اندازه مورد نظر۱۰۰ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر بریده شد. اتصال لب به لب مستطیلی و جهت جوش‌کاری، عمود بر جهت نورد فلز پایه انتخاب شد. جوش تک مرحله ای برای ایجاد اتصال انجام گرفت. خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی فلز پایه در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی فلز پایه

خواص مکانیکی	مقادیر فلز پایه
استحکام تسلیم	۴۱۰ MPa
استحکام کششی نهایی	۴۸۵ MPa
درصد ازدیاد طول	٪۱۲
سختی ویکرز	۱۶۰

جدول ۲ درصد وزنی ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵

عنصر	درصد وزنی
Mg	۲/۱
Mn	۰/۱۲
Zn	۵/۱
Fe	۰/۳۵
Cu	۱/۲
Si	۰/۵۸
Al	باقیمانده

اصطلاحات و ابعاد ابزار جوش‌کاری بصورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. جنس ابزار از فولاد ابزار

AISI H13 انتخاب شده است. این نوع فولاد، از انواع گرم کار فولاد ابزار می‌باشد، که در جدول ۳ ترکیب شیمیایی آن ارائه شده است. سختی‌های مختلف با استفاده از عملیات حرارتی و کوئنچ در مواد مختلف شامل روغن، آب نمک و آب بدست آمد.

شکل ۱ شکل، ابعاد و اصطلاحات ابزار

پارامترهای فرایند در جدول ۴ و پارامترهای ابزار در جدول ۵ نشان داده شده است.

اتصالات جوش‌کاری شده به تکه‌هایی در ابعاد مورد نیاز برای آزمون کشش بریده شده و سپس ماشین‌کاری شدند.

نمونه‌ها برای آزمون کشش طبق استاندارد ASTME8M04 [۱۰] آماده شدند که نمونه‌ای از جوش انجام گرفته به همراه ظاهر جوش بعد از انجام آزمون کشش در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳ درصد وزنی ترکیب فولاد ابزار

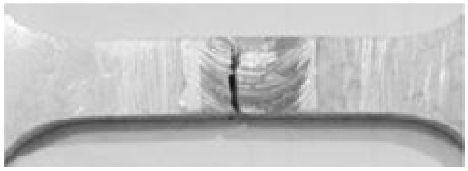
C	Mn	Si	Cr	V	Mo
۰/۳۵	۰/۴	۰/۹۶	۴/۸	۰/۹۵	۱/۱۳

جدول ۴ پارامترهای فرایند

پارامتر فرایند	سرعت دورانی (rpm)	سرعت جوش‌کاری (mm/min)
مقادیر	۱۲۰۰	۲۰
	۱۳۰۰	۴۰
	۱۴۰۰	۶۰
	۱۵۰۰	۸۰

جدول ۵ پارامترهای ابزار

پارامتر ابزار	قطر شانه D (mm)	قطر پین d (mm)	سختی ابزار H (HRc)
مقادیر	۹	۳	۳۳
	۱۲	۴	۴۰
	۱۵	۵	۴۵
	۱۸	۶	۵۰



شکل ۲ نمونه جوش انجام گرفته بعد از آزمون کشش استاندارد

آزمون کشش تحت بار ۱۰۰ کیلو نیوتن و با سرعت کلگی ۰/۵ میلی‌متر در دقیقه در دمای اتاق صورت گرفته است. نمونه‌ها برای آزمون متالوگرافی به تکه‌هایی تقسیم شدند که بخش‌های اغتشاش، منطقه متاثر از حرارت - کار مکانیکی، منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه را شامل می‌شد. سپس این تکه‌ها توسط کاغذ سمباده با دانه‌بندی‌های مختلف پلیش‌کاری و در نهایت پلیش آخر با ترکیبات الماسی توسط دستگاه پولیش دیسکی انجام شد. نمونه‌های پلیش شده توسط محلول ۱۰ درصد هیدروکسید سدیم اچ گردیدند تا ساختار آلیاژ مشخص شود. بعد از آشکارسازی، ساختار اتصال توسط میکروسکوپ نوری به همراه نرم‌افزار تحلیل‌گر مورد آنالیز قرار گرفت.

۳- نتایج

۳-۱ - ساختار ماکرو

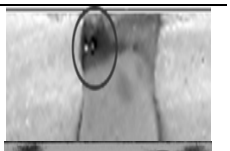
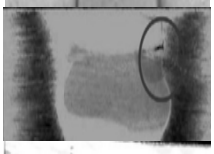
جداول ۶ تا ۱۰ تأثیر پارامترهای فرایند و ابزار را روی ساختار

اتصال نشان می‌دهد. به طور طبیعی مشخص است که جوش‌کاری ذوبی آلیاژهای آلومینیوم همراه با عیوبی مانند تخلخل، آخال، سرباره، ترک هنگام جامد شدن و موارد دیگری است که کیفیت جوش و خواص اتصال را کاهش می‌دهد. معمولاً در اتصالاتی که توسط جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی ایجاد می‌شوند عیوب ناشی از انجماد وجود ندارد، چرا که در طول جوش‌کاری هیچ گونه عمل ذوب اتفاق نمی‌افتد و فلزات در حالت جامد تحت تأثیر حرارت ایجاد شده توسط اصطکاک و جریان مواد تحت تأثیر اغتشاش به هم متصل می‌شوند. هرچند که اتصالات تولید شده به روش اصطکاکی اغتشاشی نیز در معرض عیوب دیگری مانند سوراخ پین، عیب تونل، عیوب مک لوله‌ای، باند اتصال ضعیف، خط زیگ زاگ و ترک به خاطر جریان نامناسب مواد و اتصال و به هم پیوستن ناکافی فلزات در منطقه اغتشاش است.

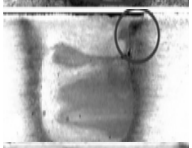
باند ضعیف اتصال به معنای اجزای باقی‌مانده از سطح اتصال جوش‌کاری نشده زیر منطقه اغتشاش است که ایجاد آن در اثر تماس ناکافی ابزار با سطح در طول جوش‌کاری است. مکانیزم تولید آن مربوط به شکستن نامناسب و ناکافی لایه اکسید به علت کشش نامناسب و ناکافی سطوح تماس نزدیک پین جوش‌کاری است. کاهش گرمای ورودی باعث شکستن ناکافی و نامناسب لایه اکسید در طول جوش می‌شود. یک احتمال زیاد وجود دارد که شکست مناسب و کافی لایه اکسید در ریشه جوش هم بدست نمی‌آید. مشاهده شده است که لایه اکسید ادامه‌دار که به خاطر اغتشاش ناکافی ایجاد می‌شود در سطح آغازین اتصال لب به لب می‌تواند به صورت مستقیم و بدون پیوند فلزی بین سطح آزاد اکسید در ریشه جوش بهم متصل شود.

تمام اتصالات ایجاد شده در این تحقیق توسط میکروسکوپ با بزرگ‌نمایی بالا آزمایش شده‌اند تا کیفیت جوش منطقه اغتشاش نشان داده شود. ماکروگرافی مقطعی اتصالات در جداول ۶ تا ۱۰ نشان داده شده است. زمانی که پارامترهای نامناسب جوش استفاده می‌شود مواد پلاستیکی (نرم شده) نمی‌توانند از قسمت پس رو نزدیک سطح پشتی ابزار به قسمت پیش رو منتقل شوند. در نتیجه عیب سوراخ پین در سطح پیش رو ایجاد می‌شود که باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شود. از ۴ سرعت دورانی انتخاب شده برای تولید اتصالات، سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه اتصالات بدون عیب تولید کرد. اتصالات تولید شده با سرعت جوش‌کاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه بدون عیب است.

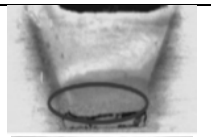
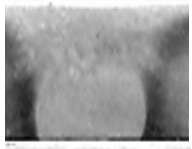
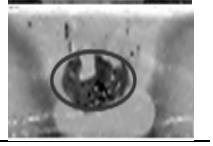
جدول ۶ تأثیر سرعت دورانی روی خواص مکانیکی
سرعت جوش‌کاری ۶۰mm/min - قطر پین ۵ mm
قطر شانه ۱۵ mm - سختی ابزار ۴۵ HRc

تصویر مقطع	سرعت دورانی (دور در دقیقه)	خواص مکانیکی
	۱۲۰۰	*YS*=۲۴۵MPa *TS* =۲۷۰MPa *H*=۱۷۵ VH
	۱۳۰۰	*YS*=۲۹۰MPa *TS*=۳۱۰ MPa *H*=۱۹۱ VH
	۱۴۰۰	*YS*=۳۱۴MPa *TS*=۳۷۲ MPa *H*=۲۰۳ VH
	۱۵۰۰	*YS*=۳۱۴MPa *TS*=۳۶۷ MPa *H*=۲۰۲ VH

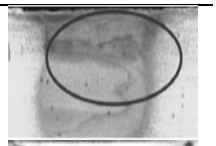
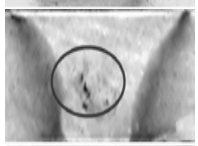
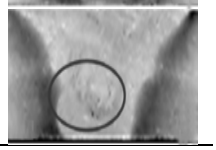
جدول ۷ تأثیر سرعت جوش‌کاری روی خواص مکانیکی
سرعت دورانی ۱۴۰۰ rpm - قطر پین ۵ mm
قطر شانه ۱۵ mm - سختی ابزار ۴۵ HRc

تصویر مقطع	سرعت جوش‌کاری (میلی‌متر در دقیقه)	خواص مکانیکی
	۲۰	*YS*=۲۲۵MPa *TS*=۲۸۰MPa *H*=۱۸۰ VH
	۴۰	*YS*=۲۷۹MPa *TS*=۳۶۳MPa *H*=۱۹۴ VH
	۶۰	*YS*=۳۱۰MPa *TS*=۳۷۲MPa *H*=۱۹۸ VH
	۸۰	*YS*=۳۰۸MPa *TS*=۳۷۱MPa *H*=۱۹۷ VH

جدول ۸ تأثیر قطر شانه روی خواص مکانیکی
سرعت دورانی ۱۴۰۰ rpm - سرعت جوش‌کاری ۶۰mm/min
قطر پین ۵ mm - سختی ابزار ۴۵ HRc

تصویر مقطع	قطر شانه (mm)	خواص مکانیکی
	۹	*YS*=۲۴۲MPa *TS*=۲۶۶ MPa *H*=۱۷۸ VH
	۱۲	*YS*=۲۸۰MPa *TS*=۲۱۰ MPa *H*=۱۹۳ VH
	۱۵	*YS*=۳۱۰MPa *TS*=۳۷۲ MPa *H*=۱۹۸ VH
	۱۸	*YS*=۲۵۶MPa *TS*=۳۵۰ MPa *H*=۱۷۸ VH

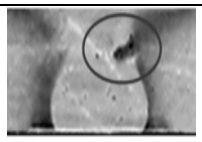
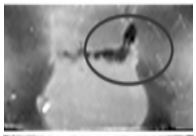
جدول ۹ تأثیر قطر پین روی خواص مکانیکی
سرعت دورانی ۱۴۰۰ rpm - سرعت جوش‌کاری ۶۰mm/min
قطر شانه ۱۵ mm - سختی ابزار ۴۵ HRc

تصویر مقطع	قطر پین (mm)	خواص مکانیکی
	۳	*YS*=۲۶۴ MPa *TS*=۲۸۱ MPa *H*=۱۸۱ VH
	۴	*YS*=۲۹۲ MPa *TS*=۳۳۱ MPa *H*=۱۹۴ VH
	۵	*YS*=۳۱۰ MPa *TS*=۳۷۲ MPa *H*=۱۹۸ VH
	۶	*YS*=۳۰۰ MPa *TS*=۳۴۰ MPa *H*=۱۹۷ VH

تولید اتصالات با استفاده از ابزاری با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر و قطر پین ۵ میلی‌متر و سختی ابزار ۴۵HRc کاملاً عاری از هرگونه عیب در ساختار ماکروست. با آنالیز ماکروساختار این نتیجه حاصل می‌شود که تشکیل منطقه اغتشاش بدون عیب، متأثر از پارامترهای جوش‌کاری و ابزار است.

در این جداول *YS* و *TS* به ترتیب استحکام تسلیم و استحکام کششی را بر حسب مگاپاسکال و *H* سختی ویکرز را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰ تأثیر سختی ابزار روی خواص مکانیکی
سرعت دورانی ۱۴۰۰ rpm - سرعت جوش‌کاری ۶۰mm/min
قطر شانه ۱۵ mm - قطر شانه ۵ mm

تصویر مقطع	سختی ابزار (HRc)	خواص مکانیکی
	۳۳	*YS*=۲۷۱ MPa *TS*=۲۹۹ MPa *H*=۱۷۸ VH
	۴۰	*YS*=۲۶۱ MPa *TS*=۲۸۳ MPa *H*=۱۸۶ VH
	۴۵	*YS*=۳۱۳ MPa *TS*=۳۷۲ MPa *H*=۱۹۸ VH
	۵۰	*YS*=۳۱۰ MPa *TS*=۳۶۸ MPa *H*=۱۹۲VH

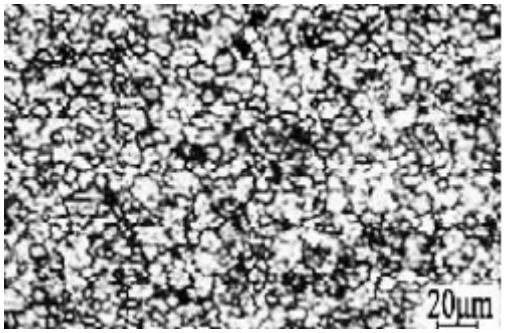
۳-۲- ریز ساختار

فلز پایه مورد نظر، آلیاژ آلومینیوم و روی است که تحت عملیات حرارتی T_6 قرار گرفته است که این عملیات شامل انحلال و کوئنچ در آب و پیر سازی مصنوعی است. در این حالت پدیده سخت شدن رسوبات $MgZn_2$ اتفاق می‌افتد. ریز ساختار فلز پایه از رسوبات یوتکتیک سوزنی شکل $MgZn_2$ متداخل در زمینه آلومینیوم آلفا تشکیل شده است. باید گفت که دانه‌های افزایش طول پیدا کرده حتی در فلز پایه با یک ارتباط خاص با مرکز اتصال، نیز مشاهده می‌شوند. شکست قابل توجه $MgZn_2$ در شرایط بهینه از پارامترهای جوش‌کاری و ابزار، توزیع یکنواخت ذرات $MgZn_2$ را در زمینه آلومینیوم آلفا به همراه دارد. این موضوع به خاطر عمل اغتشاش در حالت پلاستیک فلز در طول جوش‌کاری است. بدون در نظر گرفتن شرایط جوش‌کاری، درشت دانه شدن و خوشه‌بندی شدیدی در

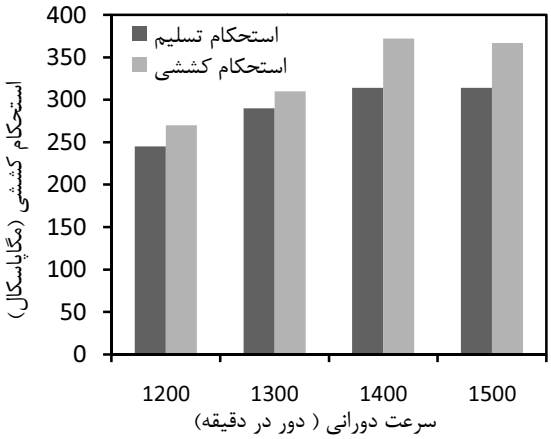
مجاورت مقطع شکست ناشی از کشش در نمونه‌های جوش‌کاری شده مشاهده شده است. شکل ۳ ریز ساختار مربوط به اتصال جوشی که منجر به حصول ۷۷ درصد استحکام فلز پایه شده است را نشان می‌دهد.

۳-۳- خواص مکانیکی

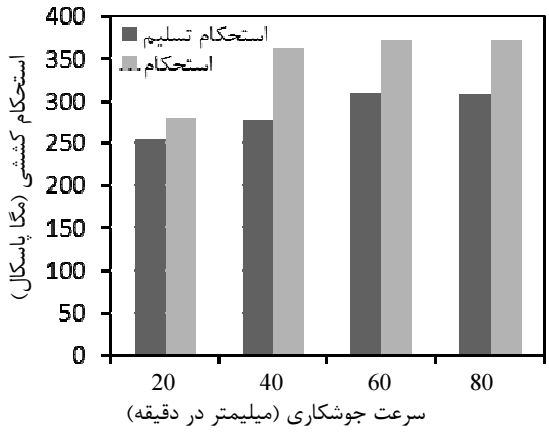
خواص مکانیکی کششی عرضی اتصالات در شکل‌های ۴ تا ۸ نشان داده شده است. ۳ نمونه برای هر یک از شرایط تحت آزمایش قرار گرفته و میانگین ۳ نتیجه در شکل نشان داده شده است. راندمان یا کارایی اتصال به عنوان نسبت استحکام کششی اتصال به استحکام کششی فلز پایه بیان شده است. با توجه به اشکال نشان داده شده می‌توان گفت اتصالاتی که در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه، سرعت جوش‌کاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه و همچنین با استفاده از ابزاری با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر، قطر پین ۵ میلی‌متر و سختی 45HRc جوش‌کاری شده‌اند، دارای بهترین خواص مکانیکی هستند.



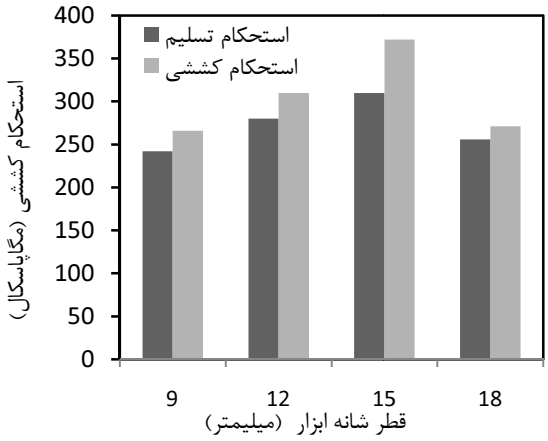
شکل ۳ ریزساختار جوش در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه و سرعت جوش‌کاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه



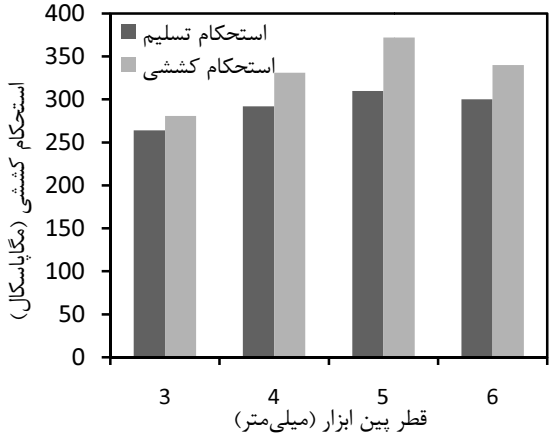
شکل ۴ تأثیر سرعت دورانی روی خواص مکانیکی



شکل ۵ تأثیر سرعت جوش‌کاری روی خواص مکانیکی



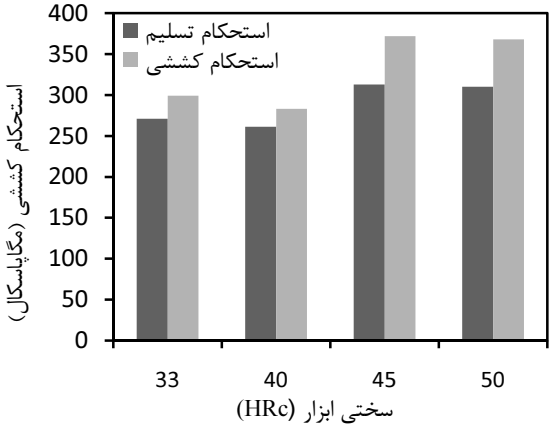
شکل ۶ تأثیر قطر شانه روی خواص مکانیکی



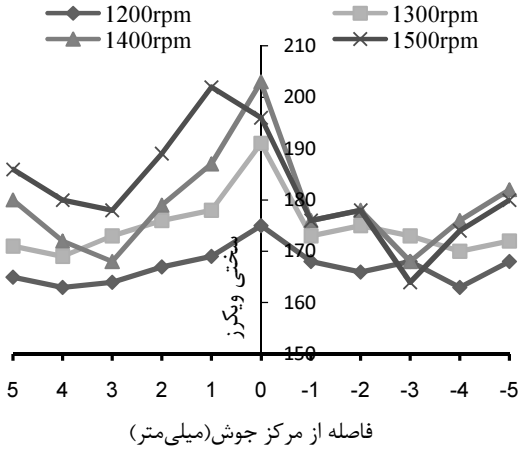
شکل ۷ تأثیر قطر پین روی خواص مکانیکی

۳-۴- ریز سختی

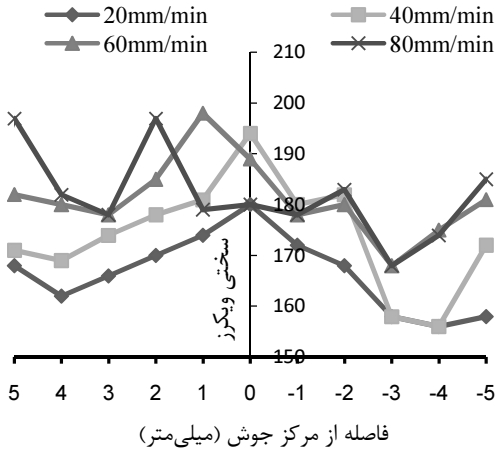
ریز سختی در ضخامت میانی و در طول جوش اندازه‌گیری شده و مقادیر آن در اشکال ۹ تا ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۸ تأثیر سختی ابزار روی خواص مکانیکی

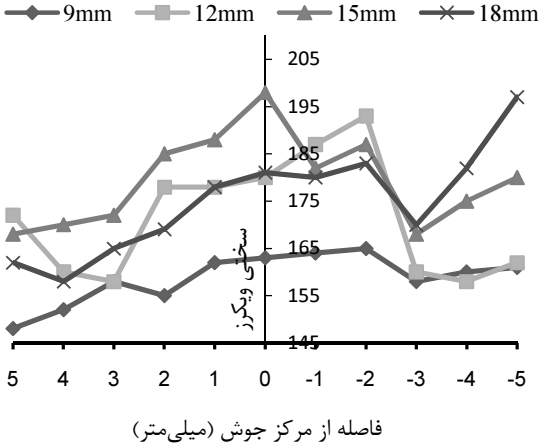


شکل ۹ تأثیر سرعت دورانی روی ریز سختی

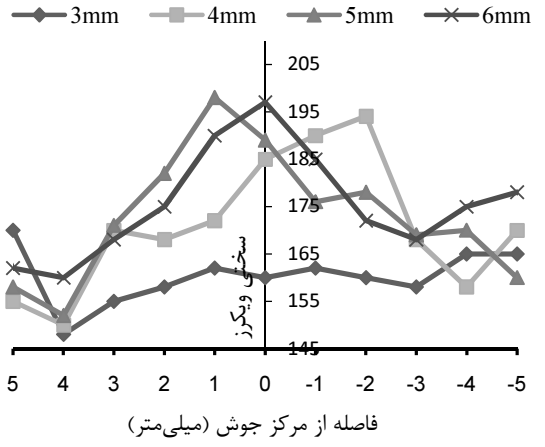


شکل ۱۰ تأثیر سرعت جوش‌کاری روی ریز سختی

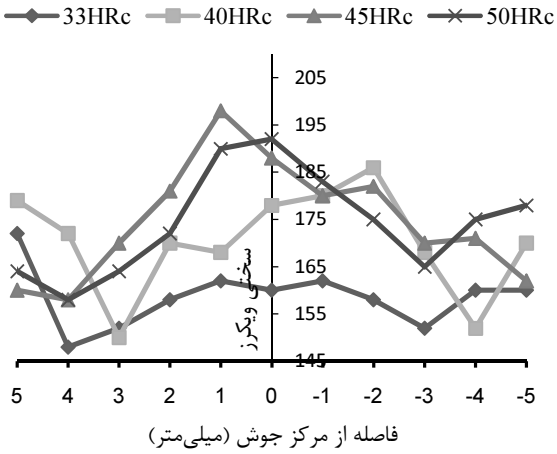
سختی فلز پایه ۱۶۰ ویکرز ثبت شده است که این مقدار کمتر از مقدار منطقه اغتشاش و بیشتر از منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی است.



شکل ۱۱ تأثیر قطر شانه روی ریز سختی



شکل ۱۲ تأثیر قطر پین روی ریز سختی



شکل ۱۳ تأثیر سختی ابزار روی ریز سختی

سختی منطقه اغتشاش بدون در نظر گرفتن سرعت دورانی

استفاده شده، از فلز پایه بیشتر است. ریز شدن دانه‌ها نقش بسیار مهمی‌در سختی مواد ایفا می‌کند.

حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم اعم از انواع عملیاتی حرارتی پذیر و غیر قابل عملیات حرارتی، ناحیه ناگت ریزساختاری تبلور مجدد یافته از خود نشان می‌دهد که در مورد آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر آلومینیوم، وجود دماهای کاری بالا حین فرایند در ناحیه ناگت و مقدار جزئی در ناحیه متاثر از حرارت و کار مکانیکی، موجب انحلال بخشی از فازهای رسوبی می‌شوند. در نتیجه مقداری نرم‌شدگی در ناحیه جوش در فلزات عملیات حرارتی پذیر که در حالت T_6 عملیات حرارتی شدند انتظار می‌رود. همچنین مقداری درشت شدن دانه و نرم‌شدگی در ناحیه متاثر از حرارت نیز به وجود می‌آید. از آنجا که ناحیه متأثر از حرارت فلز پایه را به ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی و ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی نیز ناحیه متاثر از حرارت را به ناگت متصل می کند لذا در نهایت توزیع سختی در مقطع اتصال بصورت w شکل خواهد شد که ناحیه متأثر از حرارت کمترین مقدار را در این بین خواهد داشت، که این نتیجه با نتیجه حاصل شده [۱۱] تطابق دارد.

۴- بحث

از نتایج تجربی بدست آمده است که اتصالات تولید شده با سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه و سرعت جوش‌کاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه با استفاده از ابزاری با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر، قطر پین ۵ میلی‌متر و سختی ۴۵HRc در مقایسه با سایر اتصالات استحکام کششی بالایی را نشان می‌دهد. دلیل کارکرد بهتر این اتصالات به این شرح است:

۴-۱-تأثیر سرعت دورانی

شکل ۴ و جدول ۶ تأثیر سرعت دورانی ابزار روی خواص مکانیکی و ساختار ماکرو اتصالات آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ را نشان می‌دهد. می‌توان گفت که جوش‌های انجام گرفته در سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه در مقایسه با اتصالات ایجاد شده در سرعت دورانی۱۴۰۰ دور در دقیقه دارای استحکام کششی، استحکام تسلیم، سختی منطقه اغتشاش و همچنین راندمان پایین‌تری می‌باشند. از طرفی دیگر اتصالات تولید شده با سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور در دقیقه در مقایسه با سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه استحکام کششی کمتری را حاصل می‌کنند. در نهایت می‌توان گفت که از بین ۴ سرعت دورانی مختلف سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه موجب دست‌یابی به خواص مکانیکی بهتری می‌شود.

بیان شده است که در جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی با افزایش سرعت دورانی گرمای ورودی نیز افزایش می‌یابد [۱۲]. هرچند که بیشینه دما در تمام سرعت‌های دورانی نزدیک به هم اندازه‌گیری شده است. این پدیده می‌تواند با دو دلیل زیر بیان شود:

اول این که ضریب اصطکاک زمانی که ذوب موضعی اتفاق می‌افتد کاهش می‌یابد. دوم این که گرمای نهان مقداری از حرارت ورودی را جذب می‌کند. زمانی که سرعت دورانی افزایش می‌یابد حرارت ورودی به منطقه اغتشاش، به دلیل حرارت بالای ناشی از اصطکاک افزایش می‌یابد که این نیز به نوبه خود باعث اغتشاش و اختلاط بیشتر مواد می‌شود. وقتی سرعت دورانی از ۱۲۰۰ به ۱۴۰۰ دور در دقیقه افزایش پیدا می‌کند هم استحکام و هم راندمان اتصال بهبود می‌یابد و به یک مقدار ماکزیمم، قبل از کاهش دوباره در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه، می‌رسد. سرعت دورانی بالا باعث ایجاد حرارت بیشتر و در نتیجه راه یافتن مواد اغتشاش یافته به قسمت بالاتر می‌شود که این خود باعث ایجاد ریز تهی جای در منطقه اغتشاش می‌شود. به علاوه گرمای زیادی که تولید می‌شود سرعت سرد شدن را کاهش می‌دهد که باعث ایجاد دانه‌های درشت در منطقه اغتشاش و در نهایت سختی کمتر می‌شود [۱۳]. بنابراین تأثیر کلی دانه‌های درشت، سختی کم و بوجود آمدن میکرو تهی جای‌ها، خواص کششی اتصالات تولید شده در ۱۵۰۰ دور در دقیقه را در مقایسه با اتصالات ایجاد شده در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه کاهش می‌دهد. اتصالات تولید شده در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور در دقیقه تولید دانه‌های بهتر با توزیع جای خالی یکنواخت‌تر با سختی ۲۰۳ ویکرز در منطقه اغتشاش می‌کند و این یکی از دلایل برای خواص مکانیکی بالای این اتصالات است.

۴-۲- تأثیر سرعت جوش‌کاری

شکل ۵ و جدول ۷ تأثیر سرعت جوش‌کاری روی خواص

مکانیکی و ساختار ماکرو اتصالات جوش‌کاری آلومینیوم ۷۰۷۵ را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده را به صورت زیر می‌توان دسته‌بندی کرد:

۱) اتصالات تولید شده در سرعت جوش‌کاری ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر در دقیقه در مقایسه با اتصالات تولید شده در سرعت جوش‌کاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه خواص مکانیکی پایین‌تری دارند.

۲) اتصالات تولید شده در سرعت جوش‌کاری۸۰ میلی‌متر در دقیقه در مقایسه با سرعت جوش‌کاری ۶۰ میلی‌متر در دقیقه استحکام کششی پایین‌تری را از خود نشان می‌دهند.

در سرعت جوش‌کاری بالا منطقه نرم شده (پلاستیکی) در مقایسه با سرعت جوش‌کاری پایین باریک‌تر است. بنابراین استحکام کششی آلیاژ آلومینیوم جوش‌کاری شده به صورت نسبی در ارتباط با سرعت جوش‌کاری است. سرعت جوش‌کاری بالا متناسب با حرارت ورودی پایین است که باعث خنک شدن سریع‌تر اتصالات تولید شده می‌شود. زمانی که سرعت جوش‌کاری افزایش می‌یابد عرض منطقه اغتشاش و همچنین ماکزیمم کرنش کاهش می‌یابد و منطقه مربوط به ماکزیمم کرنش به تدریج از قسمت پیش رو به قسمت پس رو جابجا می‌شود. در سرعت جوش‌کاری بالا، حرارت ورودی کم ممکن است باعث کمبود اتصال شود و تشکیل عیوب در قسمت پیش‌رو باعث افت خواص مکانیکی شود [۱۴]. زمانی که سرعت جوش‌کاری از ۲۰ به ۶۰ میلی‌متر در دقیقه افزایش می‌یابد، هم خواص مکانیکی و هم راندمان اتصالات به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد و سپس با افزایش بیشتر سرعت، کاهش می‌یابد. سرعت جوش‌کاری پایین، باعث ایجاد حرارت بالا و کاهش سرعت سرد شدن می‌شود که این خود منجر به رشد دانه‌ها و خوشه‌بندی رسوبات $MgZn_2$ در منطقه اغتشاش می‌شود که در نهایت سختی کمتری را در منطقه اغتشاش نتیجه میدهد. بنابراین تأثیر مجموع رشد دانه‌ها، سختی کمتر و ظهور عیوب، خواص استحکام کششی اتصالات تولید شده با سرعت جوش‌کاری ۲۰ میلی‌متر در دقیقه را در مقایسه با اتصالات تولید شده با سرعت ۶۰ میلی‌متر در دقیقه به صورت نامطلوبی تحت تأثیر قرار داده و کاهش می‌دهد. اتصالات تولید شده با سرعت ۶۰ میلی‌متر در دقیقه دانه‌بندی بهتر با توزیع یکنواخت حفره‌ها را با سختی ۱۹۸ ویکرز در منطقه جوش‌کاری بدست می‌دهد و این یکی از دلایل برای خواص مکانیکی بالای این اتصالات است.

۴-۳- تأثیر اندازه قطر شانه

قطر شانه ابزار ارتباط مستقیمی‌با تولید حرارت ناشی از اصطکاک دارد. گزارش شده است [۹] که در بخش بالایی منطقه اغتشاش، جابجایی مواد به خاطر شانه ابزار چرخشی اتفاق می‌افتد. مواد نزدیک بخش بالایی منطقه اغتشاش بیشتر به خاطر شانه جابجا می‌شوند تا پروفیل پین. پین باعث ایجاد حرارت و اغتشاش و اختلاط مواد جوش‌کاری می‌شود ولی شانه ابزار همان طور که از فرار مواد نرم شده جلوگیری می‌کند با تولید حرارت اصطکاکی اضافی نقش مهمتری ایفا می‌کند. اصطکاک بین شانه و قطعه کار بخش بزرگی از حرارت را نتیجه می‌دهد . از جنبه حرارتی، قطر شانه مناسب با قطر پین، بسیار مهم است. قطر شانه همچنین برای حجمی‌از مواد حرارت دیده یک قید و حصار فراهم می‌کند. دومین کاربرد شانه، اختلاط و حرکت دادن فلز است. نیروی فرایند به همان اندازه یکنواختی ریز ساختار و خواص، توسط طراحی ابزار کنترل می‌شود [۹]. شکل ۶ تأثیر قطر شانه را روی خواص مکانیکی اتصالات آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ نشان می‌دهد. از شکل ۶ و جدول ۸ نتایج زیر بدست می‌آید:

۱) قطر شانه بزرگتر منطقه بزرگ‌تر تماس را ایجاد می‌کند که باعث گسترده تر شدن منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی و منطقه متأثر از حرارت می‌شود. در نتیجه خواص مکانیکی اتصالات کاهش می‌یابد.

۲) قطر شانه کوچک‌تر منطقه تماس کوچک‌تر را ایجاد می‌کند که باعث می‌شود حرارت اصطکاکی کمتری تولید شود. بنابراین اتصال و ادغام فلز در منطقه اغتشاش مناسب نبوده، در نتیجه باعث خواص مکانیکی پایین می‌شود.

۳) از ۴ اتصال تولید شده با قطر شانه متفاوت، اتصالات تولید شده با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر منجر به حصول بهترین خواص مکانیکی گردید.

قطر شانه بزرگ‌تر، منطقه تماس گسترده‌تری را ایجاد می‌کند که باعث می‌شود مناطق متأثر از حرارت-کار مکانیکی و متاثر از حرارت گسترده شود و نتیجتاً خواص مکانیکی اتصالات کاهش یابد. وقتی قطر شانه از ۹ به ۱۵ میلی‌متر افزایش پیدا

می‌کند هم خواص مکانیکی و هم راندمان اتصالات به مقدار ماکزیمم خود قبل از کاهش دوباره در قطر شانه بزرگ‌تر می‌رسد. قطر شانه کوچک‌تر باعث تولید حرارت ناکافی به علت منطقه تماس کوچک‌تر می‌شود که باعث ایجاد عیوب در منطقه اغتشاش می‌شود و همچنین باعث رشد دانه‌ها و خوشه‌بندی خشن و نامناسب رسوبات در منطقه اغتشاش می‌شود که نهایتاً سختی پایین را در منطقه اغتشاش نتیجه می‌دهد. بنابراین مجموع آثار رشد دانه‌ها، سختی پایین و ظهور عیوب باعث کاهش خواص مکانیکی اتصالات تولید شده با ابزاری با قطر شانه ۱۸ میلی‌متر در مقایسه با اتصالات تولید شده با ابزاری به قطر شانه ۱۵ میلی‌متر می‌شود. اتصالات تولید شده با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر دانه‌بندی بهتری با توزیع یکنواخت حفره‌ها و سختی ۱۹۸ ویکرز را در منطقه اغتشاش ایجاد می‌کند و این یکی از دلایل برای استحکام بالای این اتصالات است.

۴-۴- تأثیر قطر پین

شکل ۷ و جدول ۹ تأثیر قطر پین ابزار را روی خواص مکانیکی و ساختار ماکرو اتصالات جوش‌کاری شده را نشان میدهد.
اتصالات تولید شده با قطر پین ۳ و ۴ میلی‌متر خواص استحکام کششی، تسلیم و سختی منطقه اغتشاش و راندمان پایین تری را در مقایسه با اتصالات تولید شده با قطر پین ۵ میلی‌متر نشان می‌دهند. از طرفی افزایش قطر به بیشتر از ۵ میلی‌متر نیز باعث کاهش خواص مکانیکی اتصال شده است.

در جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی قطر پین تعیین کننده مقداری از فلز است که پلاستیکی شده و اختلاط می‌یابد. اگر قطر پین بزرگ باشد مقدار مواد اغتشاش یافته بیشتر می‌شود و بر عکس. قطر پین کوچک باعث می‌شود حرارت بالایی به حجم کوچکی از فلز برسد که این باعث ایجاد جریان متلاطمی‌از مواد و رشد دانه می‌شود. همچنین باعث جریان نامناسب و ناکافی مواد می‌گردد. هردوی این شرایط باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شوند. اتصالات تولید شده با قطر پین ۳ و ۴ میلی‌متر، تولید حرارت بالا می‌کنند که خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد. وقتی قطر پین از ۳ به ۵ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند، هم خواص مکانیکی و هم راندمان اتصالات به مقدار ماکزیمم خود قبل از کاهش دوباره در قطر پین بالاتر، می‌رسد. قطر پین بزرگتر باعث تولید حرارت نامناسب به خاطر منطقه تماس بالا می‌شود که عیوبی را در قسمت پیش رو در منطقه متاثر از حرارت-کار مکانیکی، رشد دانه و خوشه‌بندی نامناسب رسوبات در منطقه اغتشاش ایجاد می‌کند که سختی پایین را نتیجه می‌دهد [۱۵]. سیر شکست حفره‌های رشد کرده و افزایش طول پیدا کرده نیز به همین دلیل بالاست. بنابراین مجموع آثار رشد دانه‌ها، سختی پایین و ظهور عیوب باعث کاهش استحکام کششی اتصالات تولید شده با قطر پین ۳ میلی‌متر در مقایسه با اتصالات تولید شده با قطر پین ۵ میلی‌متر می‌شود.

۴-۵- تأثیر سختی ابزار

در جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی سختی ابزار تعیین کننده ضریب اصطکاک است. اگر ضریب اصطکاک زیاد باشد اصطکاک بین ابزار و فلز پایه بیشتر شده در نتیجه حرارت تولیدی بالا خواهد رفت. اگر ضریب اصطکاک کم باشد اصطکاک کم بوده و حرارت تولیدی نیز کم خواهد بود. بنابراین ضریب اصطکاک یا به عبارت دیگر سختی ابزار کنترل کننده حرارت تولیدی است. سختی ابزار پایین حرارت کمی‌تولید می‌کند که نتیجتاً حرارت اعمال شده به فلز پایه کمتر خواهد بود، و این امر باعث کاهش خواص مکانیکی اتصالات می‌گردد. اگر سختی ابزار زیاد باشد حرارت تولیدی و اعمال شده به فلز پایه بیشتر خواهد بود و باز هم باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شود. حرارت ورودی بالا باعث ایجاد عیوب در قسمت پس رو در منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی و رشد دانه و خوشه‌بندی نامناسب رسوبات در منطقه اغتشاش می‌شود که نهایتاً سختی پایین را در منطقه اغتشاش باعث می‌شود. بنابراین مجموع آثار رشد دانه، سختی پایین و ظهور عیوب خواص استحکام اتصالات تولید شده با ابزاری با سختی ۵۰HRc را در مقایسه با اتصالات تولید شده با سختی ابزار ۴۵HRc کاهش می‌دهد. اتصالات تولید شده با سختی ابزار ۴۵HRc دانه‌بندی بهتر با توزیع یکنواخت حفره‌ها و سختی ۱۹۹ ویکرز را در منطقه اغتشاش فراهم می‌کند و این یکی از دلایل استحکام بالای این اتصالات است. که این امر در شکل ۸ و جدول ۱۰ نشان داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

۱) اتصالات تولید شده با پارامترهای جوش‌کاری ۱۴۰۰ دور در دقیقه سرعت دورانی، ۶۰ میلی‌متر در دقیقه سرعت جوش‌کاری

و با پارامترهای ابزار ۱۵ میلی‌متر قطر شانه، ۵ میلی‌متر قطر پین و سختی ابزار ۴۵HRc در مقایسه با سایرین خواص مکانیکی بهتری را حاصل می‌کند.

۲) در این تحقیق با استفاده از پارامترهای مناسب، استحکام کششی ۳۱۵ مگاپاسکال، استحکام تسلیم ۳۷۳ مگاپاسکال، سختی ۲۰۳ ویکرز و راندمان ۷۷ درصد در جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بدست آمد.

۳) ریز ساختاری بدون عیب با دانه‌بندی بهتر و توزیع یکنواخت رسوبات $MgZn_2$ در منطقه اغتشاش به عنوان عوامل مؤثر در خواص مکانیکی بالای اتصالات شناخته شده می‌شود.

۶- مراجع

[1] Jha Abhay K, Sreekumar K. “Metallurgical studies on cracked Al–5.5Zn–2.5Mg–1.5Cu aluminum alloy injector disc of turbine rotor”, *J. Fail Anal Prev* Vol. 8, No. 4, 2008, pp. 327-32.

[2] Balasubramanian V, Ravisankar V., Madhusudhan Reddy G. “Effect of post weld aging treatment on fatigue behavior of pulsed current welded AA7075 aluminum alloy joints”, *J Mater Eng Perform* Vol. 7, No. 2, 2008, pp. 224–33.

[3] Gupta RK, Ramkumar P, Ghosh BR. “Investigation of internal cracks in aluminum alloy AA7075 forging”, *Eng Fail Anal* ,Vol. 13, 2006, pp. 1–8.

[4] Soundarajan Vijay, Zekovic Srdja, Kovacevic Radovan. “Thermo-mechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of Al 6061”, *.Int J Mach Tools Manuf* ,Vol. 45, pp. 1577–87.

[5] Bussu G, Irving PE. “The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024–T351 aluminium joints”, *Int J Fatigue* Vol. 25, 2003, pp. 77–88.

[6] John R, Jata KV, Sadananda K. “Residual stress effects on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys”, *Int J Fatigue* Vol. 25, 2003, pp. 939–48.

[7] Jata KV, Sankaran KK, Ruschau J. “Friction stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050–T7451”, *Metall Mater Trans A*, Vol. 31, No. 9, 2000, 2181–92.

[8] Hatamleh Omar, Singh Preet M, Garmestani Hamid. “Corrosion susceptibility of peened friction stir welded 7075 aluminum alloy joints”, *Correct Sci* Vol. 51, 2009, pp. 135–43.

[9] Cai M, Huang D, Adams BL, Nelson TW. “Microstructure characteristics of friction stir processes Al 7075 via macroscopic app. roach”, *Frict Stir Weld Proc III TMS* 2005, pp. 269–75.

[10] ASTM E8 M-04. “Standard test method for tension testing of metallic materials”, *ASTM International,* 2006.

[11] A. J. Leonard, “*Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding*" in *TWI*, Gothenburg, Sweden, June 2000.

[12] Olga VF. “Microstructural issues in a friction-stir-welded aluminum alloy”, *Scripta Mater*, Vol. 38, No. 5, 1998, pp. 703–8.

[13] N. Rajamanickam, V. Balusamy, G. Madhusudhanna Reddy, K. Natarajan, “Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir weld”, *Materials and Design,* Vol. 30, 2009, pp. 2726–2731.

[14] K. Y. Hua-Bin Chen, “The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds”, *Materials Science and Engineering,* Vol. A433, 2006, pp. 64-69.

[15] R. Rai, H. Bhadeshia and T. DebRoy, “Review: friction stir welding tools”, *Science and Technology of Welding and Joining,* Vol. 16, No. 4, 2011, p. 325.