نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 1، بهار و تابستان1397، صفحه 87-77

ارزیابی خواص مکانیکی جوش ورق های آلومینیومی 3105 با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای

حمیدرضا رضایی آشتیانی*، میثم شفیعی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۳ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۳)

چکیده

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای یکی از انواع روش های جوشکاری حالت جامد جهت اتصال قطعات کوچک و فلزات سبک بخصوص آلیاژهای آلومینیوم محسوب می شود و یکی از دلایل عمده توسعه این فرآیند در مورد این آلیاژها، مشکلات جوشکاری ذوبی آنها می باشد. در این تحقیق تاثیر پارامترهای مهم فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از قبیل سرعت دورانی، زمان نگهداری ابزار، عمق نفوذ شانه ابزار و ضخامت ورق بر خواص مکانیکی اتصالات نقطه ای آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ به صورت تجربی و با استفاده از آزمایش های کشش و میکرو سختی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشات کشش- برش نشان می دهند که با تغییر پارامترهای موثر فرآیند چهار نوع شکست جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای شامل شکست برشی، شکست پیرامونی، شکست کششی دکمه جوش و شکست ورق پایه بوجود می آید. نتایج بررسی ها نشان می دهند که با افزایش سرعت دورانی ابزار استحکام جوش کاهش می یابد. در حالی که زمان نگهداری یک مقدار بهینه را جهت دستیابی به استحکام و سختی مناسب دارا می باشد. همچنین نتایج نشان می دهند که با افزایش ضخامت ورق، نیرو و انرژی شکست و استحکام جوش ها افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای، آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵، استحکام جوش، خواص مکانیکی.

The Mechanical Properties Evaluation of the Welded Sheets of AA 3105 Aluminum Alloy Using Friction Stir Spot Welding (FSSW)

H. Rezaei Ashtiani*, M. Shafiee

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

(Received 25 July 2017 ; Accepted 2 April 2018)

Abstract

Friction stir spot welding (FSSW) is a type of solid state welding that is used in the connection of small pieces and light metals such as aluminum alloy especially. The technical problem during melting of aluminum alloys is one of the most important reasons for developing application of friction stir welding for aluminum alloys. In this research, the effects of important processing parameters such as tool rotation speed, dwell time, plunge depth of tool and sheets thickness on the mechanical properties such as failure force and energy of FSS welded AA-3105 alloy have been experimentally studied using micro hardness and tensile tests. Tensile-shear tests show four different fracture modes of weld failure which consist of shear fracture, circumferential fracture, nugget pull out fracture and fracture in base material modes. The results show that the weld strength drops with increasing the tool rotation speed. Strength and hardness of weld and

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: hr_rezaei@arakut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]

weld zone increase and then decrease with increasing dwell time of rotational tool which it can be obtained an optimum value of dwell time. Strength and fracture energy and load of welds increases with increasing the sheet thickness.

Keywords: Friction Stir Spot Welding, AA-3105 Aluminum Alloy, Weld Strength, Mechanical Properties.

1- مقدمه

ایجاد جوش‌های با استحکام بالا و مقاوم در برابر خستگی و شکست در آلیاژهای پرکاربرد آلومینیوم در هوافضا توسط روش‌های جوشکاری ذوبی دشوار بوده و قابلیت استفاده از این آلیاژها را محدود کرده است. کاهش خواص مکانیکی جوش در مقایسه با فلزات پایه در این نوع آلیاژها قابل توجه می‌باشد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای یکی از روش‌های نوین جوشکاری حالت جامد است که جایگزین روش‌های متداول قبلی شده است. این فرآیند برای اولین بار در ساخت پنل‌های داخلی درب‌های مزدا Rx8 استفاده شد. این روش دارای بازدهی انرژی بالا و سازگار با محیط زیست می-باشد [۱]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نسبت به سایر روشهای ضمن عدم نیاز به گاز محافظ و یا فلاکس از فلز پرکننده نیز بی نیاز می باشد[۲]. در حالت کلی پارامترهای موثر بر این فرآیند شامل جنس، ابعاد و ضخامت قطعه‌کار، سرعت دورانی و جنس ابزار، میزان نفوذ شانه ابزار در ورق و زمان نگهداری می باشد[۳]. اولین دسته بندی ریزساختار جوش اصطکاکی اغتشاشی توسط تریدگیل انجام شده است[۴]. در اثر FSSW، چهار منطقه فلز پایه (BM[1])، منطقه متاثر از حرارت (HAZ[2])، منطقه متاثر از تغییرات ترمومکانیکی (TMAZ[3]) و منطقه اغتشاش (SZ[4]) تشکیل می‌شود. فرینی و همکارانش[۵] تاثیر سرعت دورانی ابزار و زمان نگهداری را بر خواص مکانیکی جوش آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ با اندازه‌های متفاوت نفوذ شانه ابزار در ورق، بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت دورانی میزان استحکام کششی جوش افت پیدا می‌کند ضمن اینکه برای مقدار نفوذ ابزار در ورق نیز مقدار بهینه وجود دارد. آرول و همکارانش[۶] ریزساختار و مکانیزم‌های شکست را در جوشهای اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های آلیاژ ۵۰۵۷ بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که در منطقه اغتشاش دانه‌بندی بسیار ریزتر از دیگر مناطق بوده و بالاترین سختی را داراست و منطقه HAZ نیز کم‌ترین سختی را داشته و شکست بیشتر در فصل مشترک دو منطقه HAZ و TMAZ رخ داده است. ترن و همکارانش [۷] مقطع شکست و استحکام جوش اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های آلومینیومی ۷۰۷۵ به ۵۷۵۴ مورد بررسی قرار دادند. توزاکی و همکارانش [۸] اثر طول پین ابزار را با تغییر سرعت دورانی و پیشروی بر استحکام ناحیه جوش مورد ارزیابی قرار دادند و گزارش کردند که با افزایش طول پین استحکام جوش افزایش می‌یابد. علی نقیان و همکارانش[۹] به بررسی اثر امواج مافوق صوت بر خواص مکانیکی جوش اصطکاکی اغتشاشی AA6061-T6 پرداختند. احمد و همکارانش [۱۰] به بررسی اثر سرعت دورانی ابزار و زمان نگهداری بر خواص مکانیکی و ریزساختاری جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای ورق‌های از جنس فولادی با تغییر شکل زیاد پرداخته و نتایج آزمایشات آنها حاکی از کاهش استحکام جوش با افزایش سرعت دورانی ابزار می باشد.

پتل و همکارانش [۱۱] در بررسی اثر سرعت دورانی ابزار بر جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای ورق‌های آلومینیومی AA5082-H32 با AA6082-T6 به این نتیجه رسیدن که افزایش سرعت دورانی ابزار تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه بهبود خواص ریزساختاری و مکانیکی نقطه جوش را بهمراه خواهد داشت.

1- Base metal
2- Heat affected zone
3-Thermo mechanical affected zone
4- Stir zone

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]

جدول1-درصد وزنی عناصر شیمیایی تشکیل دهنده آلیاژ **AA3105** [12]

منیزیم	سیلیسیم	تیتانیوم	کرم	منگنز	آهن	مس	روی
۰/۲-۰/۸	۰/۳-۱/۸	۰/۱	۰/۲	۰/۳-۰/۸	۰/۷	۰/۳	۰/۴

جدول 2- پارامترهای فرآیند جوشکاری زیرپودری برای جوشکاری ورق‌های فولاد API X42.

چگالی g/cm^3	دمای ذوب C°	استحکام تسلیم Mpa	مدول الاستیک GPa	نسبت پواسون	هدایت حرارتی W/mK
۲/۶-۲/۸	۶۴۱	۱۳۰	۷۰-۸۰	۰/۳۳	۱۷۳

آنچه از بررسی نتایج تحقیقات انجام شده در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای مشخص می باشد از جمله مهمترین پارامترهای این فرآیند که مستقیماً بر کیفیت و خواص مکانیکی این روش جوشکاری تاثیرگذار است سرعت دورانی ابزار، زمان نگهداری ابزار و ضخامت ورق می باشد. لذا در این مطالعه، به بررسی تاثیر این پارامترها بر خواص مکانیکی اتصالات نقطه‌ای ورق های آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ که دارای مقاومت خوردگی و شکل پذیری مناسب بوده و در صنایع هوافضا و ساختمانی پر کاربرد می‌باشد، پرداخته شده است. با توجه به اینکه تاکنون گزارشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی این آلیاژ ارائه نشده لذا نتایج این تحقیق می تواند جهت استفاده از این روش جوشکاری روی این آلیاژ مفید باشد. به منظور بررسی خواص مکانیکی جوش های انجام شده، نحوه شکست به صورت تجربی و با استفاده از آزمایش‌های کشش- برش و ریزسختی سنجی مورد بررسی قرار گرفته است.

2-آزمایشات تجربی

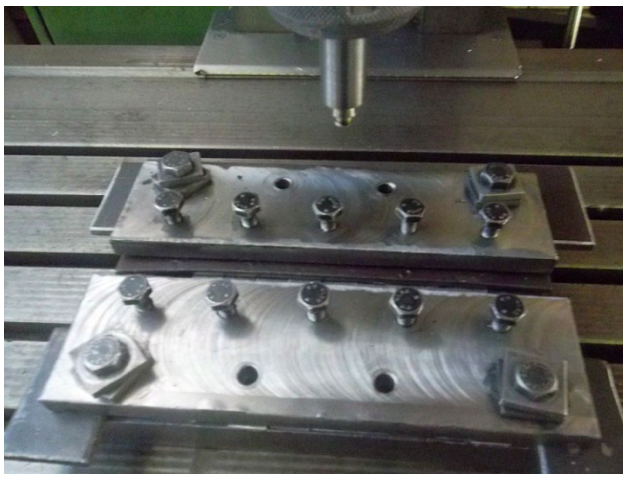
در این مطالعه از ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ با ضخامت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلیمتر استفاده شده است. در جدول(۱) درصد عناصر شیمیایی تشکیل دهنده و در جدول(۲) برخی از ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی این آلیاژ ارائه شده است. از فولاد ابزار گرم‌کارH13 نیز به عنوان ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده شده است.

در این تحقیق جهت انجام عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای از دستگاه فرز یونیورسال FP4M استفاده شده است. شکل(۱) سیستم گیره‌بندی مورد استفاده در این جوشکاری را نشان می‌دهد. همانطور که اشاره شد پارامترهای موثر بر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای متنوع می‌باشند که پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل موارد ذیل می‌باشد:

-زمان نگهداری (T_d[1]): زمان نگهداری ابزار در سه سطح ۲، ۶ و ۱۰ ثانیه انتخاب شده اند.

- سرعت دورانی(R_S[2]): سه سرعت دورانی۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شده اند.

- ضخامت ورق (t[3]):ورق‌ها با ضخامت‌های۰/۵، ۱و ۱/۵ میلیمتر انتخاب شده اند.

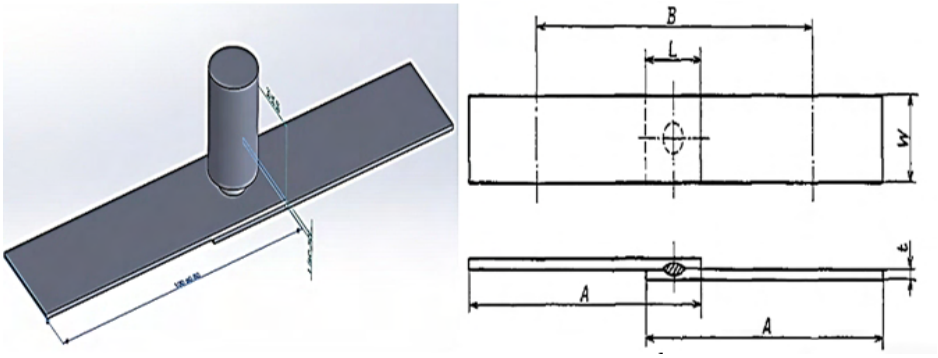


شکل1- سیستم گیره بندی استفاده شده برای جوشکاری

در شکل(۲) نحوه قرار گرفتن ورق های جوشکاری شونده و علائم اختصاری مربوط به ابعاد موردنظر آورده شده است. در جدول(۳) نیز ابعاد و اندازه‌های انتخاب شده برای ورق‌ها که

1-Dwell Time
2- Rotational Speed
3-Thickness

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]



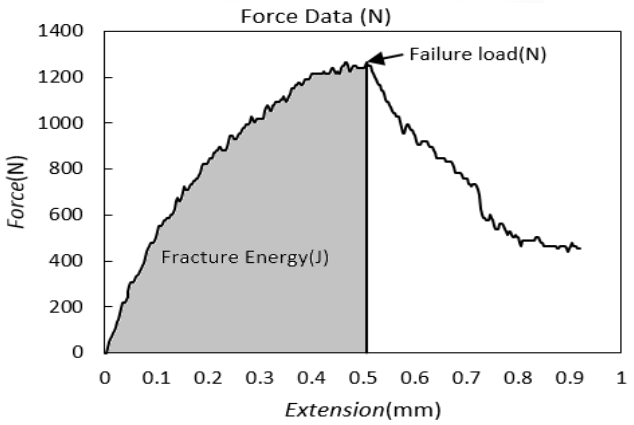
شکل2- نحوه قرار گرفتن قطعات و علائم اختصاری مربوط به ابعاد

جدول3- ابعاد و اندازه های انتخاب شده با استفاده از استاندارد JIS-3136

ضخامت ورق t (mm)	عرض W(mm)	روی‌هم‌افتادگی L(mm)	طول A(mm)	فاصله بین فک ها B(mm)
۰/۳ تا کمتر از ۰/۸	۲۰	۲۰	۷۵	۷۰
۰/۸تا کمتر از ۱/۳	۳۰	۳۰	۱۰۰	۹۰
۱/۳تا کمتر از ۲/۵	۴۰	۴۰	۱۲۵	۱۰۰
بالای ۲/۵	۵۰	۵۰	۱۵۰	۱۱۰

با استفاده از استاندارد JIS-3136 تعیین شده، ارائه شده است. جهت تعیین استحکام جوش‌های ایجاد شده از نتایج تست کشش–برش که با استفاده از دستگاه کشش–فشار یونیورسال حاصل می‌گردد استفاده شده است. نتایج حاصل از این آزمایشات بصورت نیرو و انرژی لازم جهت شکست جوش گزارش می گردد. سرعت فک‌های دستگاه ۱۰m/min انتخاب شده و با توجه به نمودار نیرو–جابجایی و همچنین محاسبه سطح زیر منحنی، به ترتیب نیرو و انرژی شکست به دست آمده است. جهت تعیین انرژی شکست، محاسبه فقط تا حداکثر نیروی ثبت شده که در آن دکمه جوش از لحاظ ظاهری نیز دچار تغییر شکل زیادی می شود و جوش نیز استحکام اولیه خود را از دست داده، انجام می گیرد.

در شکل(۳) نمودار نیرو–جابجایی ارائه شده است که در آن نیروی لازم برای شکست جوش و انرژی جذب شده توسط جوش تا لحظه شکست نشان داده شده است. منظور از نیروی شکست، حداکثر نیروی ثبت شده توسط آزمایش کشش- برش نمونه‌ها بوده و انرژی شکست انرژی ثبت شده در هنگام شکست دکمه جوش است. میزان انرژی شکست با توجه به نمودار نیرو- جابجایی به دست آمده و سطح زیر نمودار



شکل3- نمودار نیرو- جابجایی اندازه گیری شده و نمایش نیرو و انرژی شکست جوش

نیرو- جابجایی تا بیشترین نیروی ثبت شده می‌باشد. جهت تعیین میکروسختی قطعات و مناطق مختلف جوش ابتدا قطعات جوش داده شده را در راستای مقطع برش داده و پس از انجام سنباده‌زنی و پولیش‌کاری قطعات به مدت ۱۰ ثانیه در محلولی که شامل ترکیبی از ۲۰ میلی‌گرم NaOH و ۱۰۰میلی‌لیتر آب مقطر می باشد اچ می‌گردد. برای تعیین میکرو سختی قطعات نیز از دستگاه سختی سنج INNOVA TEST و با شرایط نیروی ۵۰۰ گرم و به مدت ۱۵ ثانیه و از روش سختی سنجی

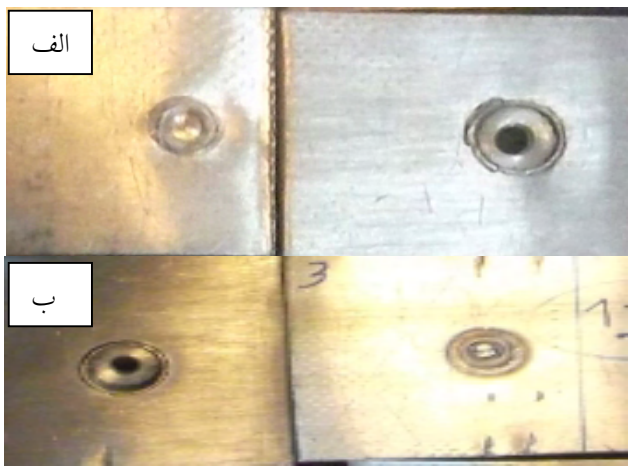
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]

ویکرز با فرو رونده هرم الماسی مربع القاعده با زاویه داخلی ۱۳۶ درجه استفاده شده است.

3- نتایج و بحث

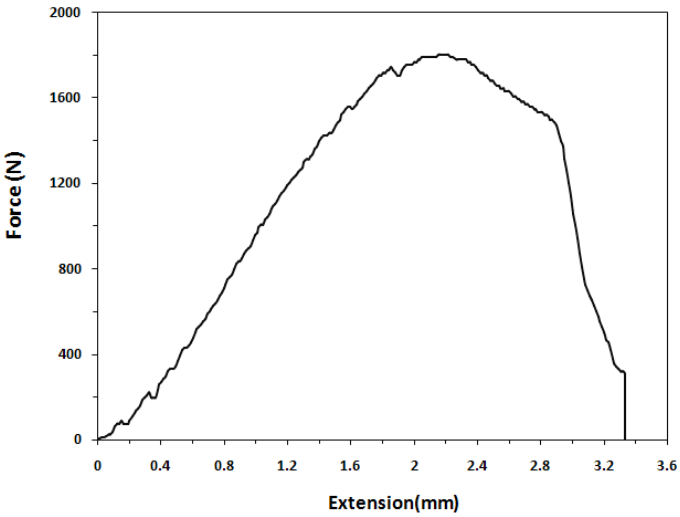
3-1- انواع مختلف شکست در قطعات جوشکاری شده

جوشهای ایجاد شده توسط فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با توجه به پارامترهای فرآیندی انتخاب شده برای این روش جوشکاری دارای ویژگیها و خواص مکانیکی متفاوتی خواهند بود. در این مطالعه ابتدا به بررسی اولیه سطوح مختلف پارامترهای جوشکاری جهت تعیین سطوح مناسب برای ایجاد جوشی با کیفیت و خواص مکانیکی بهینه پرداخته شده است. با توجه به نتایج آزمایش کشش- برش بر قطعات جوشکاری شده می توان مقطع شکست جوش را بر اساس نحوه و محل گسیختگی به چهار دسته کلی تقسیم نمود. در شکل(۴-الف و ۴-ب) مقطع شکست جوش ورق هایی با ضخامت ۱ میلیمتر، قطر شانه ابزار ۸ میلیمتر، سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و زمان نگهداری ابزار ۶ ثانیه به ترتیب با نفوذ شانه ابزار به اندازه ۰/۳ و ۰/۶ ضخامت ورق نشان داده شده است. همانطور که از مقطع شکست مشخص می باشد شکست از نوع گسیختگی برشی بوده که جوش از محل فصل مشترک دو ورق دچار گسیختگی شده است. ملاحظه می شود که در شرایط فوق افزایش عمق نفوذ شانه ابزار می تواند منجر به بهبود جوش ایجاد شده گردد.



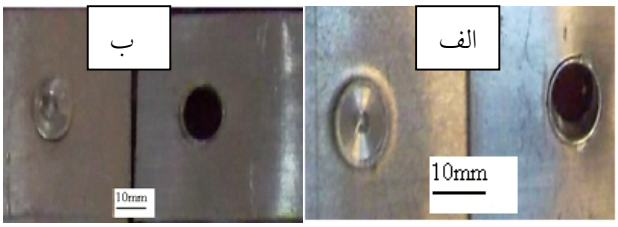
شکل۴-گسیختگی برشی جوش از محل فصل مشترک دو ورق با عمق نفوذ ابزار الف)th ۰/۳ و ب) th ۰/۶

در شکل(۵) نمودار نیرو – تغییر شکل ورقی با ضخامت ۱ میلیمتر، قطر شانه ابزار ۸ میلیمتر، سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و زمان نگهداری ابزار ۶ ثانیه با نفوذ شانه ابزار به اندازه ۰/۳ ضخامت ورق نشان داده شده است.



شکل۵- نمودار نیرو – تغییر شکل ورق جوش داده شده با برش در فصل مشترک

در نوع دیگری از شکست جوش، ملاحظه شد که دکمه جوش از دایره محاط بر آن دچار گسیختگی می گردد که نمونه ای از آن در شرایطی که ضخامت ورق ۱ میلیمتر، سرعت دورانی ابزار ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، قطر شانه ابزار۱۰ میلیمتر و نفوذ آن در ورقها th ۰/۶ می‌باشد در شکل(۶ -الف و۶- ب) به ترتیب برای زمانهای نگهداری ۶ و ۱۰ ثانیه ارائه شده است. ملاحظه می گردد با ثابت بودن پارامترهای دیگر افزایش زمان نگهداری از ۶ ثانیه به ۱۰ ثانیه کیفیت جوش انجام شده دچار افت شده است.

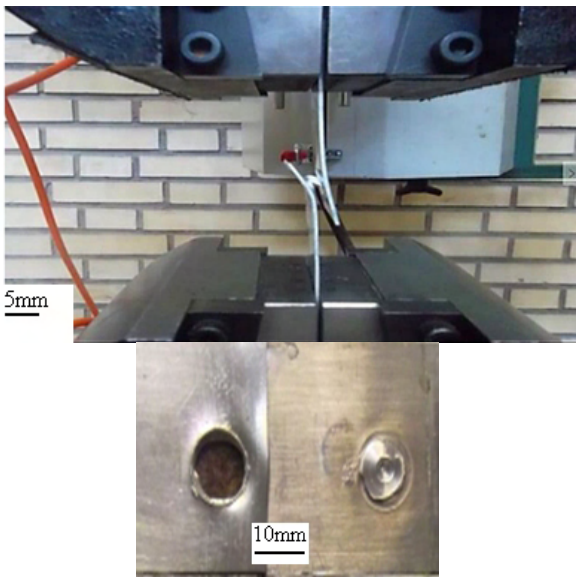


شکل۶-گسیختگی جوش از محل دایره محاط بر دکمه جوش برای زمانهای نگهداری ابزار الف) ۶ ثانیه و ب) ۱۰ ثانیه.

در نوع سوم گسیختگی جوش، دکمه جوش تحت تاثیر نیروهای کششی – برشی در ابتدا تغییر شکل پلاستیک زیاد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]

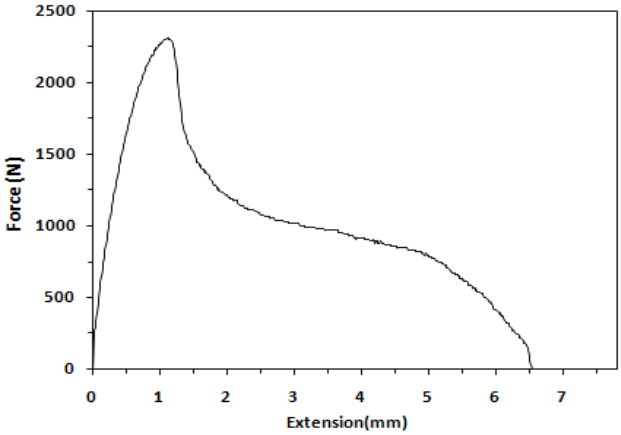
شده و پس از کش آمدگی دچار شکست از دکمه جوش می‌گردد. شکل(۷) چگونگی کشیدگی دکمه جوش و در نهایت گسیختگی آن را نشان می دهد.



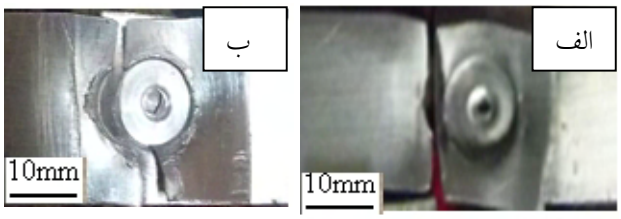
شکل7-گسیختگی دکمه جوش بعد از کشیدگی زیاد دکمه جوش و جذب بالای انرژی شکست

در شکل(۸) نمودار نیرو – تغییر شکل ورقی با ضخامت ۱ میلیمتر، قطر شانه ابزار ۱۰ میلیمتر، سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و زمان نگهداری ابزار ۱۰ ثانیه با نفوذ شانه ابزار به اندازه ۰/۳ ضخامت ورق نشان داده شده است. در این حالت ورق جوش داده شده با تغییر شکل پلاستیک و کشیدگی زیاد و در نهایت با کنده شدن دکمه جوش همراه می باشد. همانطور که مقایسه این نمودار با نمودار شکل(۵) نشان می دهد در این حالت میزان تغییر شکل دکمه جوش تا شکست حدود دو برابر شده است درحالیکه نیروی موردنیاز برای شکست نیز نزدیک به دوبرابر شده که نشان دهنده بالا بودن نیرو و انرژی شکست جوش در نوع سوم گسیختگی نسبت به نوع اول گسیختگی می باشد.

در نوع چهارم، گسیختگی در داخل خود ورق و در نواحی مجاور جوش بوجود می آید یعنی شکست در دکمه جوش رخ نمی دهد. این نوع گسیختگی برای ابزاری با قطر شانه ۱۰ میلیمتر، سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، و نفوذ شـــانه ۰/۶th، زمان نگهداری ۶ ثانیه برای ورق‌هایی به ضخامت ۱ و ۰/۵ به ترتیب در شکل(۹-الف) و(۹-ب) نشان داده شده است. که این امر حاکی از استحکام بالای جوش حاصله در مقایسه با فلز پایه می باشد. در شرایط مورد بررسی ملاحظه می شود که افزایش ضخامت ورق از ۰/۵ به ۱ میلیمتر موجب بهبود جوش شده است.



شکل8- نمودار نیرو – تغییر شکل ورق جوش داده شده با تغییر شکل پلاستیک و کشیدگی زیاد و در نهایت کنده شدن دکمه جوش



شکل9-گسیختگی ورق اصلی برای ضخامت های ورق الف) 1 و ب) 0/5 میلیمتر

بررسی ها نشان می دهند که از میان انواع گسیختگی که در جوش نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی می تواند رخ دهد، گسیختگی نوع سوم (کشیدگی و گسیختگی دکمه جوش) و چهارم (گسیختگی در ورق پایه) بهترین استحکام جوش را داراست و در نیرو و انرژی شکست بالایی نسبت به بقیه موارد گسیختگی رخ می دهد.

3-2- تاثیر سرعت دورانی بر نیرو و انرژی شکست جوش

همانطور که بیان شد دو پارامتر مهم که می تواند در ارزیابی استحکام جوش های ایجاد شده مورد استفاده قرار گیرد، نیرو و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]

انرژی شکست جوش می باشد. لذا در این تحقیق به بررسی اثر پارامترهای مهم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای بر نیرو و انرژی شکست جوش پرداخته می شود. در قسمت های (الف) و (ب) شکل۱۰ نتایج تاثیر سرعت دورانی ابزار (برحسب دور بر دقیقه(rpm))، بر نیرو (برحسب نیوتن(N)) و انرژی شکست (بر حسب ژول (J)) جوش به ترتیب برای ورق های با ضخامت ۰/۵ و ۱/۵ میلیمتر در زمان نگهداری ابزار به مدت ۲ ثانیه، قطر شانه ابزار به مقدار ۸mm و عمق نفوذ شانه ابزار به مقدار th ۰/۶نشان داده شده است.

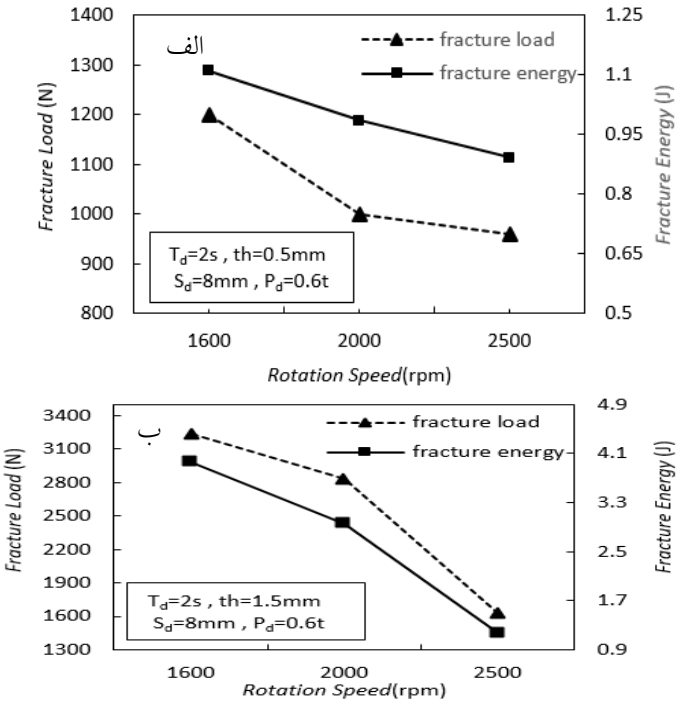
نتایج نشان می‌دهد با ازدیاد سرعت دوران ابزار، نیرو و انرژی شکست کاهش می یابد، یعنی استحکام جوش حاصله کاهش خواهد یافت. بررسی‌های محققان نیز نشان داده که با توجه به انجام یک عملیات ترمومکانیکی حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، با افزایش سرعت دورانی ابزار در زمان کمتری دما افزایش یافته و اندازه دکمه جوش کاهش می‌یابد و یا با سرعت‌های دورانی ابزار بالاتر در زمان کمتر، امکان رشد بیشتر دانه های تشکیل دهنده ورق مهیا و ساختار دانه‌ای درشت می‌شوند [۵ و۶] که این مسائل و بخصوص کاهش ابعاد دکمه جوش می‌تواند از دلایل مهم افت خواص مکانیکی جوش نقطه‌ای انجام شده با افزایش سرعت دورانی ابزار باشد.

البته آنچه در بررسی های مختلف مشخص می باشد مقدار استحکام با تغییر سرعت دورانی ابزار تغییر خواهد کرد بطوریکه یک مقدار بهینه برای سرعت دورانی ابزار و جود دارد که بیشتر یا کمتر از این مقدار افت استحکام جوش را به‌همراه خواهد داشت لذا نتایج برای ضخامت و جنس مورد بررسی بهترین شرایط را برای سرعت دورانی ابزار ۱۶۰۰ دور بر دقیقه نشان می دهد.

همچنین با مقایسه نتایج قسمتهای (الف) و (ب) شکل(۱۰) مشخص است که در صورت ثابت بودن سایر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با افزایش ضخامت ورق استحکام جوش شامل نیرو و انرژی شکست جوش به صورت کاملاً محسوسی افزایش خواهد یافت.

3-3- تاثیر سرعت دورانی بر سختی جوش

یکی دیگر از پارامتر ها و شاخص های مهم در تعیین استحکام جوش تعیین سختی در نقاط مختلف شامل جوش و نقاط اطراف آن می باشد که در این بررسی برای این منظور از ریزسختی ویکرز استفاده شده است. از جمله اطلاعات ارزشمندی که منحنی های تغییرات ریزسختی با فاصله از مرکز جوش ارائه می کنند تعیین اندازه و حدود نواحی مختلف شامل منطقه اغتشاش، منطقه متاثر از فرآیند ترمومکانیکی و منطقه متاثر از حرارت جوش می باشد. در شکل(۱۱) مناطق مختلفی که می تواند در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در قطعات یا ورق ها بوجود آمده، یا شناسایی شوند نشان داده شده است[۱۳].

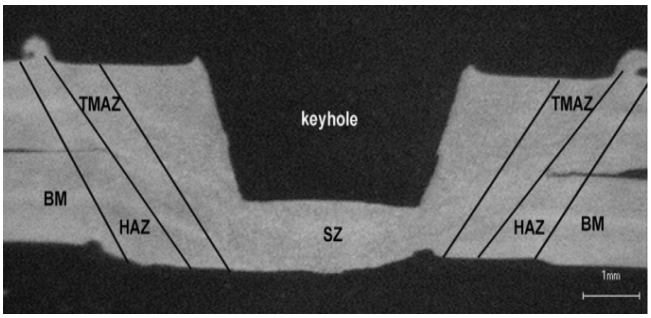


شکل۱۰- تاثیر سرعت دورانی ابزار بر نیرو و انرژی شکست جوش در ورق هایی با ضخامت الف) th=0.5mm و (ب) th=1.5mm

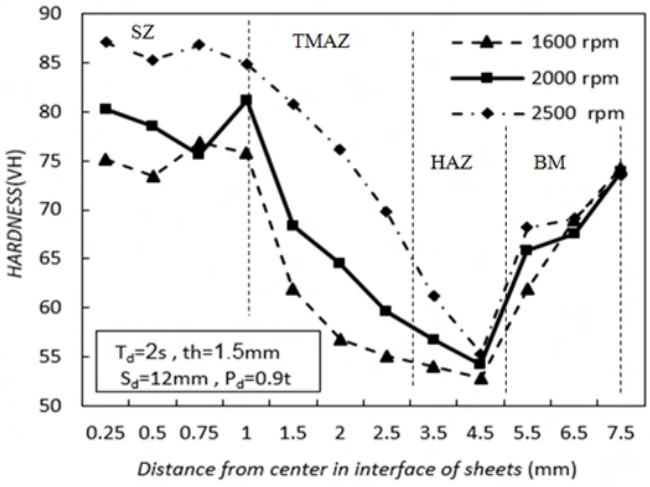
در شکل(۱۲) اثر تغییرات سرعت دورانی ابزار بر نمودار تغییرات ریزسختی با فاصله از مرکز جوش نقطه ای نشان داده شده است. بررسی نتایج سختی سنجی نشان می دهند که با فرض ثابت بودن سایر پارامترهای فرآیندی شامل قطر ابزار، ضخامت ورق، زمان نگهداری و عمق نفوذ ابزار، افزایش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]

سرعت دورانی ابزار موجب افزایش کلی میکرو سختی در هر سه ناحیه اصلی جوش خواهد شد.



شکل11- نمایش مناطق مختلف شناسایی شده در جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای [13]



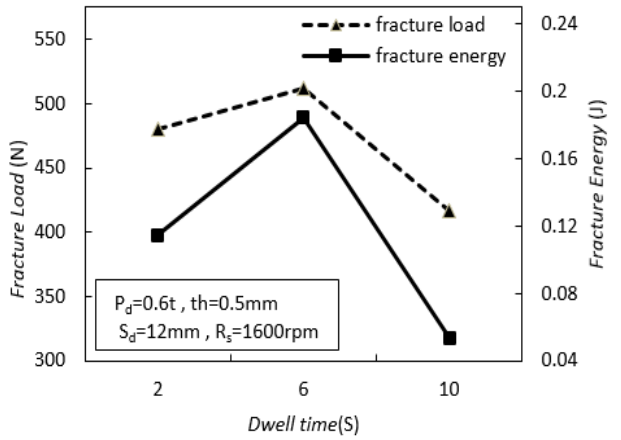
شکل12- تاثیر سرعت دورانی ابزار بر تغییرات میکرو سختی نواحی مختلف ورق های جوش اصطکاکی اغتشاشی شده با فاصله از مرکز جوش در فصل مشترک

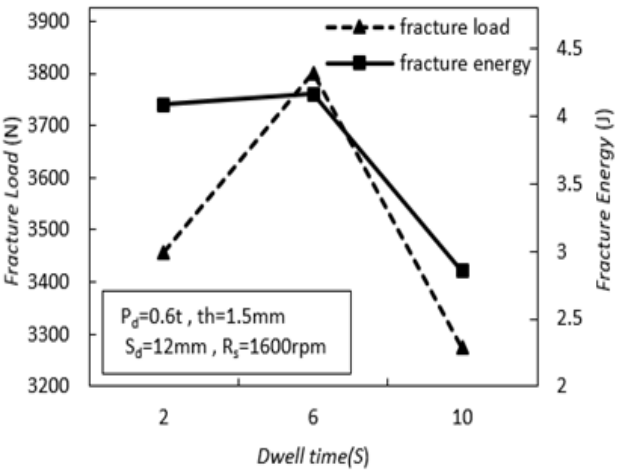
بررسی دیگر محققان نشان می دهد که افزایش سرعت دورانی ابزار موجب افزایش لحظه‌ای دمای منطقه جوش حین انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خواهد شد[۶و۱۴].

همانطور که از نتایج ریزسختی مشخص است حداکثر سختی به ثبت رسیده در منطقه اغتشاش (SZ) جوش بوده و در منطقه متاثر از فرآیند مکانیکی – حرارتی (TMAZ) مقداری کاهش یافته و در منطقه متاثر از حرارت (HAZ) کم‌ترین مقدار خود را داراست. درحالیکه با حرکت از منطقه متاثر از حرارت به سمت منطقه فلز پایه (BM) سختی روند افزایشی به خود می گیرد.

3-4- تاثیر زمان نگهداری ابزار بر نیرو و انرژی شکست جوش

بررسی نتایج آزمایشات نشان داد که زمان نگهداری ابزار دوار در محل جوش و در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای می‌تواند نقش بسزایی در استحکام جوش ورق داشته باشد. بطوریکه افزایش و یا کاهش از یک حد بهینه برای این زمان و با فرض ثابت بودن دیگر پارامترهای فرآیندی می‌تواند موجب کاهش استحکام جوش حاصله گردد. تاثیر زمان نگهداری ابزار بر نیرو و انرژی شکست جوش با فرض ثابت بودن عمق نفوذ شانه ابزار برابر ۰/۶th، قطر شانه ابزار ۱۲ میلیمتر و سرعت دورانی ابزار ۱۶۰۰ دور بر دقیقه در نمودارهای شکل(۱۳–الف) و (۱۳–ب) به ترتیب برای ورق‌هایی به ضخامت ۰/۵و ۱/۵ میلیمتر نشان داده شده است.





شکل۱۳– تاثیر زمان نگهداری بر نیرو و انرژی شکست جوش در ورق هایی با ضخامت الف)th=0.5mm و ب)th=1.5mm

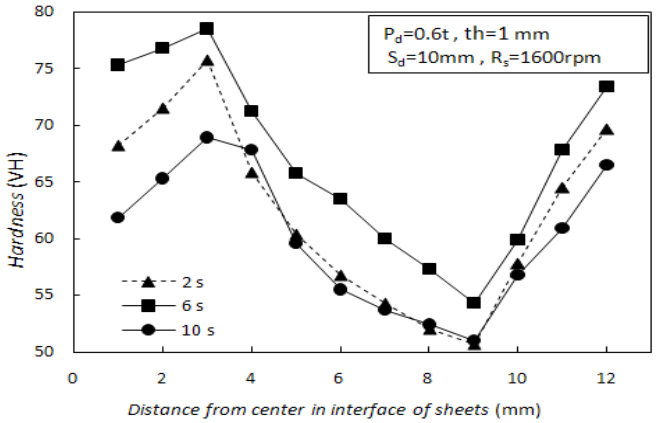
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]

همانطور که از نمودارهای این شکل مشخص است برای هر دو ضخامت مورد بررسی با افزایش زمان نگهداری ابزار تا ۶ ثانیه نیرو و انرژی شکست افزایش یافته درحالیکه افزایش بیشتر زمان نگهداری ابزار از این مقدار موجب افت نیرو و انرژی شکست و در نتیجه افت استحکام جوش می‌گردد. این نتیجه را می‌توان به فعل و انفعالات انجام شده روی دانه‌بندی و تغییرات اندازه آنها در ورق‌ها نسبت داد.

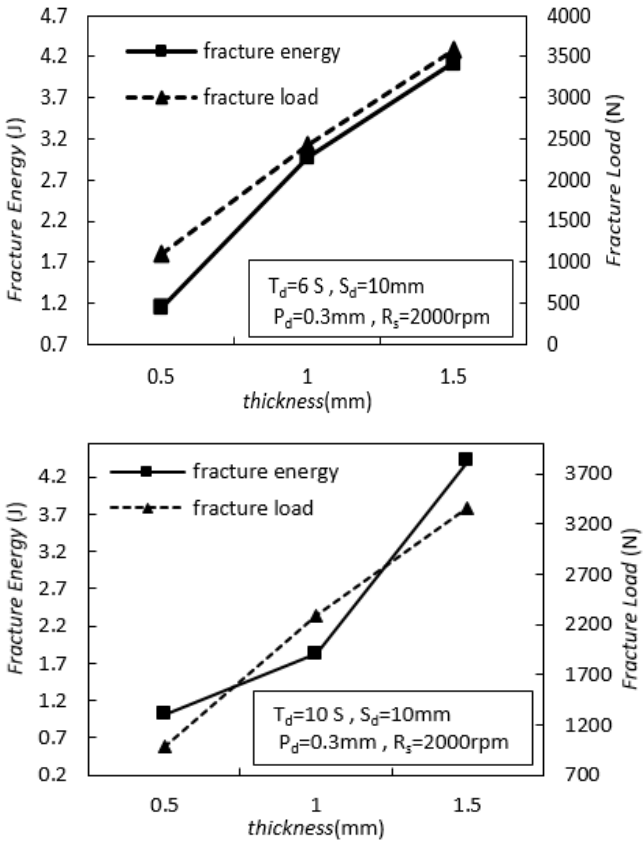
به نظر می‌آید در ابتدا با افزایش زمان نگهداری فرصت کافی جهت انجام اغتشاش کامل در منطقه جوش و در نتیجه افزایش استحکام جوش فراهم می‌گردد درحالیکه افزایش بیش از حد این زمان نگهداری می‌تواند موجب تغییرات ریزساختاری نامناسب و ناخواسته در داخل ورق از جمله افزایش اندازه دانه و ایجاد عیوب در محل جوش و در نتیجه افت استحکام جوش ایجاد شده گردد. مقایسه سطح نیرو و انرژی شکست در ورق‌های با ضخامت ۰/۵و ۱/۵میلیمتر نشان دهنده میزان تفاوت در استحکام جوش‌ها در ورق‌هایی با ضخامت‌های مختلف می‌باشد.

3-5- تاثیر زمان نگهداری بر سختی جوش

در شکل(۱۴) تاثیر زمان نگهداری بر سختی جوش در فواصل مختلف از مرکز جوش نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش زمان نگهداری ابزار از ۲ ثانیه به ۶ ثانیه سختی جوش و نواحی اطراف آن افزایش یافته؛ درحالیکه افزایش بیشتر زمان نگهداری تا ۱۰ ثانیه موجب کاهش مجدد سختی جوش خواهد شد. لذا می‌توان گفت با توجه به پارامترهای موثر جوشکاری شامل ضخامت ورق، قطر ابزار، سرعت دورانی و عمق نفوذ ابزار؛ زمان نگهداری ابزار یک مقدار بهینه را داراست که انتخاب مقادیر بالاتر یا پایین‌تر از این مقدار موجب افت خواص مکانیکی جوش و از جمله سختی محل جوش می‌گردد. بنظر می‌رسد افزایش زمان نگهداری از یک حداقل زمان، موجب افزایش درجه حرارت تا یک مقدار بهینه در محل اغتشاش و اطراف آن شده که همراه با تغییرات ریزساختاری مطلوب و در نتیجه افزایش استحکام جوش می‌باشد، درحالیکه افزایش بیش از اندازه زمان نگهداری ابزار موجب افزایش بیش از حد دما در محل اغتشاش و اطراف آن شده و تغییرات ریزساختاری نامطلوب مانند افزایش اندازه دانه‌ها را به همراه داشته که این امر کاهش خواص مکانیکی و استحکامی جوش و از جمله سختی جوش را به دنبال خواهد داشت.



شکل14- تاثیر زمان نگهداری ابزار بر سختی جوش در فواصل مختلف از مرکز ناحیه جوش در محل فصل مشترک جوش



شکل15- تاثیر ضخامت ورق بر نیرو و انرژی شکست ورق جوش داده شده با زمان نگهداری ابزار الف) 6 ثانیه و ب) 10 ثانیه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]

3-6- تاثیر ضخامت ورق بر نیرو و انرژی شکست

نتایج تاثیر ضخامت ورق بر استحکام قطعات جوش داده شده در شکل(۱۵) نشان داده شده است. در نمودارهای الف و ب این شکل تاثیر ضخامت ورق بر نیرو و انرژی شکست به ترتیب در زمانهای نگهداری ابزار ۶ و ۱۰ ثانیه با عمق نفوذ شانه ابزار th ۰/۳ و قطر شانه ابزار ۱۰ میلیمتر و سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه مشخص شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهند، با افزایش ضخامت ورق، نیرو و انرژی شکست افزایش یافته و استحکام جوش‌های حاصله افزایش چشم‌گیری خواهد داشت. مقایسه این دو نمودار نشانگر تاثیر زمان نگهداری بر نیرو و انرژی شکست در جوش های انجام شده می‌باشد، به طوریکه در زمان نگهداری ۶ ثانیه نیرو و انرژی شکست بالاتری نسبت به زمان نگهداری ۱۰ ثانیه ثبت شده است.

4- نتیجه گیری

در این تحقیق به مطالعه خواص مکانیکی و استحکام جوش‌های حاصل از جوشکاری حالت جامد اصطکاکی-اغتشاشی نقطه ای یکی از آلیاژهای پر کاربرد و در حال توسعه آلومینیوم یعنی آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ پرداخته شده است. که به منظور ارزیابی خواص مکانیکی و استحکامی جوش از آزمایشهای مختلف تجربی شامل آزمون کشش-برش و ریزسختی بر ورق‌های جوشکاری شده جهت تعیین نیرو و انرژی شکست و همچنین تعیین سختی نقاط مختلف جوش استفاده شده است. اثر پارامترهای مهم این روش جوشکاری شامل سرعت دورانی، زمان نگهداری و عمق نفوذ ابزار و همچنین ضخامت ورق بررسی شد. نتایج این بررسی بطور خلاصه به شرح ذیل می باشد.

- با تغییر پارامترهای موثر این روش جوشکاری چهار نوع شکست جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای شامل شکست برشی، شکست پیرامونی، شکست کششی دکمه جوش و شکست ورق پایه بوجود می آید.
- از میـان انـواع گسیختگی که در جوش نقطه ای رخ می دهد، گسیختگی نوع سوم (شکست کششی دکمه جوش) و چهارم (گسیختگی در ورق پایه) بهترین استحکام جوش را داراست و در مقادیر زیاد نیرو و انرژی شکست گسیختگی رخ می دهد.
- با افزایش سرعت دورانی ابزار، نیرو و انرژی شکست و در نتیجه استحکام جوش کاهش می یابد.
- با افزایش زمان نگهداری ابزار از ۲ ثانیه به ۶ ثانیه نیرو و انرژی شکست جوش و همچنین سختی جوش و نواحی اطراف آن افزایش یافته؛ درحالیکه افزایش بیشتر زمان نگهداری تا ۱۰ ثانیه موجب کاهش مجدد نیرو، انرژی و سختی جوش خواهد شد، که نشان دهنده وجود یک مقدار بهینه برای زمان نگهداری ابزار می باشد.
- با افزایش ضخامت ورق، نیرو و انرژی شکست افزایش یافته و استحکام جوش‌های حاصله نیز افزایش چشم‌گیری خواهد داشت.

منابع

1- T. Iwashita. Method and Apparatus for Joining, U.S.Patent No. 6601751 B2, 2003

2- Besharati-Givi, M.K. and Asadi, P., Advances in friction-stir welding and processing, Elsevier, 2014.

3- Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol.50(1-2), pp.1-78, 2005.

4- P.L. Threadgill, Friction stir welds in aluminium alloys– preliminary microstructural assessment. TWI Bulletin,March/April 1997.

5- Freeney, T.A., Sharma, S.R. and Mishra, R.S., "Effect of welding parameters on properties of 5052 Al friction stir spot welds", (No. 2006-01-0969). SAE Technical Paper.

6- Arul, S.G., Pan, T., Lin, P.C., Pan, J., Feng, Z. and Santella, M.L., "Microstructures and failure mechanisms of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 5754 sheets", (No. 2005-01-1256). SAE Technical Paper.

7- Tran, V.X., Pan, J. and Pan, T., "Effects of processing time on strengths and failure modes of dissimilar spot friction welds between aluminum 5754-O and 7075-T6 sheets", *Journal of materials processing technology*, Vol.209(8), pp.3724-3739, 2009.

8- Tozaki, Y., Uematsu, Y. and Tokaji, K., "Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot weldedaluminium alloys", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.47(15), pp.2230-2236, 2007

9- Alinaghian, I., Honarpisheh, M. and Amini, S., "The

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]

influence of bending mode ultrasonic-assisted friction stir welding of Al-6061-T6 alloy on residual stress, welding force and macrostructure" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.95(5-8), pp.2757-2766, 2018.

10-Ahmed, M.M.Z., Ahmed, E., Hamada, A.S., Khodir, S.A., Seleman, M.E.S. and Wynne, B.P., "Microstructure and mechanical properties evolution of friction stir spot welded high-Mn twinning-induced plasticity steel", *Materials & Design*, Vol.91, pp.378-387, 2016.

11-Patel, V.V., Sejani, D.J., Patel, N.J., Vora, J.J., Gadhvi, B.J., Padodara, N.R. and Vamja, C.D., "Effect of tool rotation speed on friction stir spot welded AA5052-H32 and AA6082-T6 dissimilar aluminum alloys", *Metallography, Microstructure, and Analysis*, Vol. 5(2), pp.142-148, 2016

12-Hatch, J.E., Aluminum, P. and Metallurgy, P., American Society for Metals. Metals Park, OH, 143, 1984.

13-Reynolds, A.P. and Tang, W., "Alloy, tool geometry, and process parameter effects on friction stir weld energies and resultant FSW joint properties", *Friction stir welding and processing*, pp.15-23, 2001.

14-Moradi, M.M., JamshidiAval, H. and Jamaati, R., "Experimental investigation on the effect of friction stir welding process parameters in dissimilar joining of AA2024-T351 and AA6061-T6 aluminum alloys", *Modares Mechanical Engineering*, Vol.16(9), pp.394-402, 2016.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]