

اندازه گیری تنش های پسماند در تکنیک جوشکاری اصطکاکی به روش سوراخکاری مرکزی

فتح اله طاهری بهروز*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمود معروفی

دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

وحید هادی زاده

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمدرضا محمد علیها

استادیار، مرکز تحقیقات جوش و اتصال، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک جوشکاری حالت جامد محسوب می شود که امروزه کاربرد گسترده ای به خصوص در جوشکاری های غیر هم جنس پیدا کرده است، مخصوصاً آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ که قابلیت جوشکاری ذوبی را ندارند. این روش نه تنها محدودیت های جوشکاری ذوبی را ندارد بلکه به دلیل عدم ذوب قطعات امکان اتصال فلزات با نقطه ذوب متفاوت را نیز دارا می باشد. در این تحقیق به روش تجربی مطالعه تنش پسماند ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیر متشابه بین آلیاژها ۷۰۷۵-T6 و ۶۰۶۱-T6 و مقایسه آن با جوشکاری معمولی ذوبی آلیاژ ۶۰۶۱-T6 به وسیله روش سوراخکاری مرکزی صورت گرفته است. همچنین با استفاده از این روش تغییرات تنش پسماند در راستای ضخامت نیز برای دو نمونه اندازه گیری گردیده و نشان داده شد که تنش پسماند در جوشکاری اصطکاکی به نسبت کمتر و توزیع یکنواختی نسبت به جوشکاری ذوبی دارد. بیشینه تنش در جوش ذوبی درست در محل خط جوش است ولی در جوش اصطکاکی بافاصله از خط جوش تنش پسماند بیشینه می گردد. سختی دو نمونه نیز با روش میکرو سختی سنج ویکرز اندازه گیری و با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که در جوشکاری اصطکاکی منطقه TMAZ کمترین میزان سختی نسبت به HAZ و ناگت را دارا است اما سختی آن از سختی فلز پایه بیشتر است.

واژه های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، روش سوراخکاری مرکزی، تنش پسماند.

Measurements of Residual Stresses in Friction Welding Using the Hole Drilling Method

F. Taheri-Behrooz

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

M. Maroofi

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

V. Hadizadeh

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

M. R. M. Aliha

Welding and Joining Research Center, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

Friction Stir Welding is a solid-state process, which means that the objects are joined without reaching melting point. Which has demonstrated very high suitability for the joining of dissimilar aluminium alloys. The aim of this investigation was to study residual stress and micro hardness distribution in different zones of dissimilar friction stir welding of AA6061-T6 and AA7075-T6 and compare it with the tungsten inert gas (TIG) welding of AA6061-T6 by using increment hole drilling technique. Also The evolution of the residual stresses in the thickness direction was investigated, it was found that the maximum residual stresses are below the yield strength of the material in the shoulder region and showed that the longitudinal residual stresses in the joint were much larger than the transverse residual stresses. Vickers micro hardness measurements were performed in the transverse cross section of the samples, the results showed that Hardness peak values were observed in SZ region adjacent to the advancing side whereas low hardness regions were measured across the weld corresponding to the HAZ of both alloys and at the SZ adjacent to the retreating side.

Keywords: Friction stir weld, Hole drilling method, Residual stress.

۱- مقدمه

رسانایی گرمایی به مشکلات گفته شده افزون می گردد. مثلاً تغییر در ضریب انبساط باعث ایجاد تنش های پسماند غیر قابل قبولی در جوش می شود. با توجه به خواص گرمایی آلومینیوم AA7075 و AA6061 که حدود ۱۰۰ درجه سانتی گراد در دمای شروع ذوب متفاوت می باشند نمی توان آن ها را با استفاده از جوشکاری ذوبی به یکدیگر متصل کرد برای رفع این مشکل در سال ۱۹۹۱ در انستیتو جوش انگلستان جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ اختراع شد این جوشکاری یک فرایند

در جوشکاری ذوبی آلومینیوم و آلیاژهای آن مشکلات عدیده ای از قبیل کنترل دمای ذوب، رسانایی گرمایی بالای آلومینیوم، بالا بودن انبساط و انقباض آلومینیوم و آلیاژهای آن، کاهش مقاومت به خوردگی در ناحیه ذوب شده، حلالیت بالای هیدروژن در آلومینیوم مذاب، بروز ترک گرم و غیره به وجود می آید. همچنین برخی از آلیاژهای آلومینیوم از قبیل سری ۲۰۰۰ و ۷۰۰۰ قابلیت جوشکاری ذوبی نداشته یا خواص استحکام در ناحیه جوش به شدت پایین می آید. علاوه بر آن در جوشکاری های غیر متشابه اختلاف در دمای ذوب، ضریب انبساط و

¹ Friction stir weld (FSW)

حالت جامد محسوب می شود که گرمای لازم برای جوش را از اصطکاک به دست می آورد و قطعات بدون رسیدن به نقطه جوش به هم متصل می شوند [۱]. به دلیل عدم ذوب، جوشکاری اصطکاکي خیلی از عيوب جوشکاری های معمولی ذوبی نظیر ایجاد تخلخل و حفره، ذوب ناقص (به علت لایه های اکسیدی)، نفوذ ناقص، ترک و ناخالصی اتفاق نمی افتد. همچنین ضریب انبساط گرمایی آلیاژهای آلومینیوم زیاد و حدود دو برابر فولاد هست، لذا اتصالات جوش آلومینیوم، در حین سرد شدن سریع از دمای ذوب، دارای تمرکز تنش پس ماند قابل ملاحظه ای می شوند. تحقیقات زیادی در خصوص اندازه گیری تنش های پس ماند در اتصالات جوش های اصطکاکي انجام شده است. در سال ۲۰۱۱ کاسترو [۲] و همکارانش در جوشکاری اصطکاکي اغتشاشی در یک اتصال تی شکل^۱ میدان تنش پسماند را به روش سوراخکاری مرکزی مشخص کردند. فلنج جوش از آلومینیوم AA6056 و جان جوش از جنس AA7075 است. نتایج نشان داد که میدان تنش پسماند در ناحیه اغتشاشی بین ناحیه های ترمومکانیک و ناحیه گرمایی می تواند به صورت نمودار لگاریتمی مدل شود حداکثر تنش کششی پسماند حدوداً ۱۰۰ مگا پاسکال و حداکثر تنش فشاری حدوداً ۴۰ مگا پاسکال به دست آمد که هر دو در قسمت فلنج جوش قرار داشت. در سال ۲۰۱۲ جمشیدی [۳] پاسخ ترمومکانیکی یک جوشکاری اصطکاکي اغتشاشی غیرمتشابه روی آلومینیوم های از جنس AA5086 و AA6061 را با مدل کردن آن در نرم افزار آباکوس به دست آورد و تنش پسماند را در نمونه های آزمایشگاهی با روش سوراخکاری مرکزی به دست آورد و با مدل سازی انجام شده مقایسه کرد او نشان داد که سرعت چرخشی ابزار روی حداکثر تنش پسماند تأثیر دارد و سرعت پیشروی ابزار روی توزیع تنش عرضی پسماند تأثیرگذار است و نشان داد که تنش عرضی در جوشکاری اصطکاکي حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد تنش پسماند طولی است. در سال ۲۰۰۸ تینگلی [۴] با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی در ورق آلومینیوم با ضخامت ۳ میلی متر و از جنس AA2024-T6 تنش پسماند را در جوشکاری اصطکاکي به دست آورد او نشان داد که بیشترین تنش پسماند طولی در این نوع آلومینیوم برابر ۱۶۴/۵ مگا پاسکال است همچنین نشان داد که تنش پسماند طولی نسبت به تنش پسماند عرضی بیشتر است، فاصله بین دو سوراخ و همچنین فاصله از لبه را ۱۰ میلی متر در نظر گرفت. در سال ۲۰۱۱ ریچتر [۵] تنش پسماند را به روش کانتور در جوشکار اصطکاکي اغتشاشی روی آلومینیومی با ضخامت ۳ میلی متر و از جنس AA6082-T6 به دست آورد و برای اعتبار بخشی به آن از روش سوراخکاری مرکزی استفاده کرده است و نشان داد که با اختلاف ناچیزی نتایج یکسانی از این روش ها به دست آمد. همچنین جمشیدی [۶] در سال ۲۰۱۵ جوشکاری اصطکاکي اغتشاشی را برای یک جوشکاری غیر متشابه بین آلومینیوم های سری ۷۰۰۰ (AA7070-T6) و سری ۶۰۰۰ (AA6082-T6) مدل سازی کرد و گرمای ورودی جوشکاری و پیری جوش را در تنش پسماند و میکرو ساختار بررسی کرد. او ابتدا با نصب ۶ ترموکوپل روی قطعه در سطح مقطع مختلف دما را در طول جوشکاری در این سه مقطع اندازه گیری کرد سپس برای اندازه گیری استحکام قطعات، آزمون کشش را انجام داد و تنش پسماند را نیز با

روش اشعه X اندازه گیری کرد. در سال ۲۰۰۸ لینتون [۷] تنش پسماند را در جوشکاری اصطکاکي در آلومینیوم های سری ۷۰۰۰ با استفاده از روش پراش نوترونی^۲ به دست آورد و نشان داد که باگذشت زمان چگونه تنش پسماند تغییر می کند، همچنین نشان داد که تنش پسماند در ناحیه جوش باگذشت زمان کاهش می یابد و در ناحیه تحت تأثیر گرما این تنش باگذشت زمان کاهش می یابد. همچنین وو [۸] نیز در سال ۲۰۰۶ با استفاده از روش پراش نوترونی در آلومینیوم های سری ۶۰۰۰ (AA6061-T6) نشان داد که اعوجاج زاویه ای هندسی می تواند منجر به توزیع غیریکنواخت گرمای تولیدی به وسیله شانه ابزار منجر شود و آن باعث توزیع غیریکنواخت تنش پسماند در راستای ضخامت قطعه می گردد.

در سال ۲۰۱۳ جانکر [۹] گشتاور، دما و سختی را در جوشکاری اصطکاکي اغتشاشی متشابه و غیر متشابه در آلومینیوم هایی از جنس AA6061-T6 و AA2014-T6 با ضخامت ۴/۷ میلی متر بررسی کرد او همچنین تأثیر فاصله مجانبی ابزار و از خط جوش که به آن آفتست گویند و در جوشکاری غیر متشابه پارامتر مهمی محسوب می گردد او نشان داد که توان مورد نیاز در جوشکاری غیر متشابه مقداری مابین توان مورد نیاز در جوشکاری متشابه دو فلز است و همچنین دما که به همین شکل است. در سال ۲۰۱۴ کول [۱۰] تأثیر آفتست در جوش اصطکاکي اغتشاشی غیر متشابه بین آلومینیوم های AA6061-T6 و AA7075-T6 با ضخامت ۴/۷۶ میلی متر را روی استحکام جوش بررسی کرد او با اندازه گیری پیوسته دما در مرز بین ابزار و قطعه تأثیر آفتست را روی استحکام کششی بررسی کرد. او نشان داد که اگر آفتست ابزار به طرف سمت برگشتی (AA7075) باشد استحکام کششی جوش افزایش می یابد. در سال ۲۰۰۳ تراساکی [۱۱] کرنش های ذاتی را با استفاده از روش لایه برداری برای جوشکاری اصطکاکي اغتشاشی و جوشکاری قوسی با گاز محافظ برای آلومینیوم 6063-T5 با ضخامت ۵ میلی متر انجام داد. وی با استفاده از ترموکوپل، دمای بیشینه را اندازه گیری کرده و نشان داد که کرنش ذاتی در جوشکاری اصطکاکي حاصل جمع مقداری فشاری در اثر بار فشاری وارده و مقداری منفی در اثر گرمای ورودی است به همین دلیل مقدار کرنش ذاتی در جوشکاری اصطکاکي کمتر از جوشکاری قوسی است. در سال ۲۰۱۴ جیو [۱۲] تأثیر پارامترهای جوشکاری را روی جریان ماده، میکرو ساختار و خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکي اغتشاشی غیر متشابه روی آلومینیوم های AA6061-T6 و AA7075 بررسی کرد او دما را در طول جوشکاری با استفاده از ترموکوپل نوع K اندازه گیری کرد. وی نشان داد که برای مخلوط شدن بهتر مواد باید AA6061 در سمت پیش رونده^۳ و AA7075 در سمت پس رونده^۴ قرار داشته باشد. وی همچنین نشان داد که اندازه دانه ها در هر دو فلز کاهش می یابد ولی در AA7075 کاهش بیشتری دارد او نشان داد که همه نمونه ها در ناحیه HAZ در سمت AA6061 می شکنند.

² Neutron diffraction

³ Advancing side

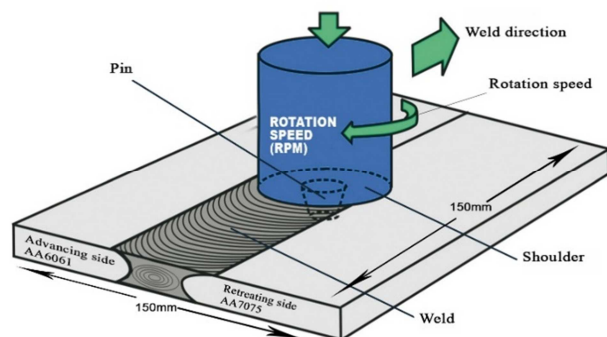
⁴ Retreating side

3 Tungsten inert gas (TIG) welding

¹ T-joint

۲-۲- اصول روش سوراخکاری مرکزی

روش سوراخکاری مرکزی پرستفاده‌ترین روش در اندازه‌گیری تنش پسماند است این روش ارزان، آسان، در دسترس و سریع است به همین دلیل پرکاربرد بوده و به‌صورت استاندارد [۱۳] درآمده است.



شکل ۱- طرحواره جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و ابعاد نمونه آزمون [۱۲]

گام‌هایی که به ترتیب برای انجام روش سوراخکاری مرکزی بکار برده می‌شود عبارتند از: قرار دادن کرنش‌سنج ۳ عضوی بر روی نمونه، اتصال کرنش‌سنج‌ها به دستگاه داده‌برداری و تنظیم آن، قرار دادن یک دستگاه برای سوراخ زنی در وسط روزت و انجام عملیات سوراخ زنی، ثبت نتایج و تبدیل آن‌ها به تنش‌های پسماند از طریق روابط موجود می‌باشد.

این روش با توجه به اندازه سوراخ و همچنین عمق آن یک روش نیمه مخرب محسوب می‌شود (قطر و عمق سوراخ معمولاً ۰/۸ تا ۳/۲ میلی‌متر است) در بعضی موارد این سوراخ را صاف کرده و یا از آن صرف‌نظر می‌کنند. در سال ۱۹۵۶ کلسی [۱۴] برای اولین بار مسئله تغییرات تنش پسماند در راستای ضخامت را به کمک این روش مطالعه کرد. شاجر [۱۵] در سال ۱۹۸۱ برای اولین بار روش المان محدود را در سوراخ زنی مرکزی ارائه و ضرایب کالیبره A و B را معرفی کرد. وی در سال ۱۹۸۸ [۱۶] ضرایب خود را تصحیح کرد و ضرایب $\bar{a}$ و $\bar{b}$ که مستقل از جنس قطعه هستند را ارائه داد. در سال ۲۰۱۳ چان لئو [۱۷] با روش کانتور تغییرات تنش پسماند در راستای ضخامت AA6061 را اندازه‌گیری نمود. در این پژوهش با استفاده از روش تعیین تنش پسماند غیریکنواخت مطابق استاندارد ASTM، تغییرات تنش پسماند در عمق ۱ میلی‌متری از سطح برای هر نمونه و در سه نقطه مطابق شکل ۲ اندازه‌گیری شده است. از کرنش‌سنج نوع روزت با مدل FRS-2-23 شرکت TML استفاده شده است. شکل ۳ دستگاه SINT MTS 3000 بکار گرفته‌شده برای سوراخ زنی مرحله‌ای با دقت بالا را نشان می‌دهد. بعد از هم‌محوری توسط میکروسکوپ دستگاه توربین هوا با سرعت بالا، نصب می‌گردد. سرعت سوراخ زنی در این آزمایش ۳۰۰۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته‌شده

در این تحقیق با استفاده از جوش آرگون^۳ (TIG) و جوش اصطکاکی دو نوع آلیاژهای آلومینیوم از جنس AA7075-T6 و AA6061-T6 به هم جوشکاری شده و با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی توزیع تنش‌های پسماند طولی و عرضی بافاصله از خط جوش برای هریک از جوشکاری‌ها اندازه‌گیری شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین با استفاده از روش سوراخ زنی افزایشی تغییرات تنش در راستای ضخامت برای هر دو نمونه اندازه‌گیری شده است. ضمناً میکرو سختی ویکرز طولی و عرضی بافاصله از خط جوش برای هریک از جوشکاری‌ها اندازه‌گیری شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۲- روش‌های تجربی

۲-۱- مواد و روش ساخت نمونه‌ها

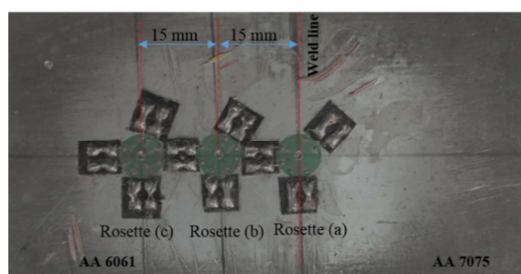
در این پژوهش، آلیاژهای آلومینیوم از جنس AA7075-T6 و AA6061-T6 با ضخامت ۶ میلی‌متر و طول و عرض نمونه نهایی به ترتیب ۱۵۰ و ۱۵۰ میلی‌متر مطالعه شده است. خواص مکانیکی هر دو آلیاژ از طریق آزمون بدست آمده و در جدول ۱ آورده شده است. در نمونه اول، از طریق جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دو آلیاژ به یکدیگر متصل شده‌اند. پیکربندی جوشکاری اصطکاکی که در شکل ۱ مشخص است به‌گونه‌ای بود که آلیاژ AA6061 در سمت پس‌رونده و AA7075 در سمت پیش‌رونده قرار گرفتند تا جوش خواص بهتری داشته باشد [۱۲]. ابزار استفاده شده از جنس فولاد H13 با قطر شانه ۲۵ میلی‌متر و قطر و ارتفاع پین به ترتیب ۱۰ و ۶ میلی‌متر است. سرعت دورانی ابزار ۱۱۱۵ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۶۰ سانتی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد.

نمونه دوم با استفاده از فرایند جوش آرگون انجام شد این فرایند بر روی آلومینیوم و آلیاژهایش بسیار متداول است. قوس الکتریکی بین الکترود غیر مصرفی تنگستن و سطح کار ایجاد می‌شود. نوک الکترود، حوضچه‌ی مذاب و منطقه‌ی گرم اطراف آن توسط گاز خنثی (آرگون، هلیوم یا مخلوط آن‌ها) که از اطراف الکترود خارج شده محافظت می‌شود فلز جوش عموماً از فلز قطعه کار و در بعضی موارد آمیزه‌ای از فلز و مفتول پرکننده است. در این تحقیق از سیم جوش آلومینیومی AL-Mg55356 استفاده شده است. ابعاد نمونه دقیقاً مشابه جوشکاری اصطکاکی در نظر گرفته‌شده است. این جوشکاری روی آلیاژ AA6061 به‌صورت مشابه انجام شد. پارامترهای جوش از قبیل زاویه الکترود با قطعه کار ۴۵ درجه و در امتداد مسیر اتصال، سرعت پیشروی ۱۰ سانتی‌متر بر دقیقه، جریان ۱۲۰ آمپر، دبی گاز ۱۵ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته‌شده و نوک تنگستن نیز با زاویه ۶۰ درجه تراشیده شده است.

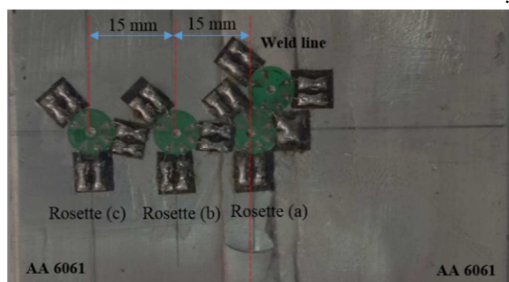
جدول ۱- خواص مکانیکی فلز پایه از آزمون

Alloy	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	سختی HV
AA7075-T6	560	498	150
AA6061-T6	310	276	95

الف



ب



شکل ۲- نقاط کرنش سنجی روی (الف) نمونه جوش اصطکاکی (ب) نمونه جوش ذوبی



شکل ۳- دستگاه استفاده شده برای سوراخ زنی مرحله ای با دقت بالا

۳- نتایج

۳-۱- تنش پسماند

تنش پسماند در ناحیه جوش اغلب به صورت کششی است و در آلیاژهای آلومینیوم مقدار تنش پسماند به مقدار استحکام آلومینیوم بستگی دارد و با افزایش استحکام فلز تنش پسماند افزایش می یابد [۱۹]. در بین آلیاژهای آلومینیوم سری های ۲۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۷۰۰۰ استحکام بالاتری نسبت به بقیه آلیاژها دارند و آلیاژ ۷۰۰۰ نسبت به آلیاژ ۶۰۰۰ استحکام بالاتر و در نتیجه تنش پسماند بیشتری دارد. مسئله دیگر درصد تنش پسماند به میزان استحکام در آلیاژهای آلومینیوم است. برای آلیاژ AA7075-T6 لمن [۱۹] نشان داد که بیشترین تنش پسماند کششی ۲۲۵ مگا پاسکال است و استحکام آن ۵۲۵ مگا پاسکال است که نسبت تنش پسماند به استحکام برابر ۴۳٪ است. اما باید توجه داشت که جوشکاری اصطکاکی مناطق مختلفی دارد لذا وی نشان داد که کمترین مقدار استحکام در منطقه HAZ^۱ برابر ۳۲۵ مگا پاسکال بوده و درصد مذکور به ۶۲٪ افزایش می یابد. در شکل ۴ کرنش های آزاد شده ناشی از سوراخ زنی ۲۰ مرحله ای مطابق با استاندارد ASTM توسط کرنش سنج ها در فواصل مختلف از مرکز جوش مطابق شکل ۲ ثبت شده و نشان داده شده است. همان طور که از شکل ۴ معلوم است از عمق حدود ۰/۷ میلی متر تغییرات کرنش آزاد شده بر اثر افزایش عمق سوراخ روند صعودی خود را از دست داده و به سمت ثابت شدن میل می کند که علت آن محدودیت روش سوراخ زنی می باشد. یعنی با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی، تنش پسماند را حداکثر تا عمق ۱ میلی متری می توان با دقت قابل قبول تعیین کرد.

طبق استاندارد حداکثر تنش قابل اندازه گیری در روش سوراخکاری مرکزی نصف استحکام تسلیم فلز پایه است و مطابق جدول ۱ که

است. بر اساس مطالعات انجام شده توسط فلامان [۱۸] در سرعت های پایین خود سوراخ زنی در کناره های سوراخ ایجاد تنش پسماند می کند. بر اساس روش تعیین تنش پسماند غیریکنواخت در استاندارد ۲۰ مرحله سوراخ زنی با عمق هر مرحله ۰/۵ میلی متر انجام شده است. در ابتدا با استفاده از کرنش های خوانده شده از هر کرنش سنج متغیرهای جدید p ، q و t تعریف می گردند.

$$p = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \quad (۱)$$

$$q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \quad (۲)$$

$$t = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2}{2} \quad (۳)$$

که ε ها کرنش های آزاد شده از روزت هستند. سپس با استفاده از معادلات به دست آمده توسط شاجر [۱۶] ترکیب تنش های p ، q و T که مطابق معادلات (۴-۶) به دست می آیند با استفاده از ضرایب کالیبراسیون مطابق معادلات (۷-۹) به کرنش های خوانده شده مرتبط می شود.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (۴)$$

$$Q = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2} \quad (۵)$$

$$T = \tau_{13} \quad (۶)$$

$$\bar{a}p = \frac{Ep}{1 + \nu} \quad (۷)$$

$$\bar{b}Q = Eq \quad (۸)$$

$$\bar{b}T = Et \quad (۹)$$

که در آن E مدول یانگ و ν ضریب پواسون قطعه مورد نظر می باشند. $\bar{a}$ و $\bar{b}$ ضرایب کالیبراسیون و σ و τ هم به ترتیب تنش نرمال و برشی در صفحه می باشند. با استفاده از تنش های به دست آمده و روابط الاستیسیته تنش های اصلی در هر لایه به صورت معادله (۱۰) به دست می آید. که در آن اندیس k مربوط به هر لایه است.

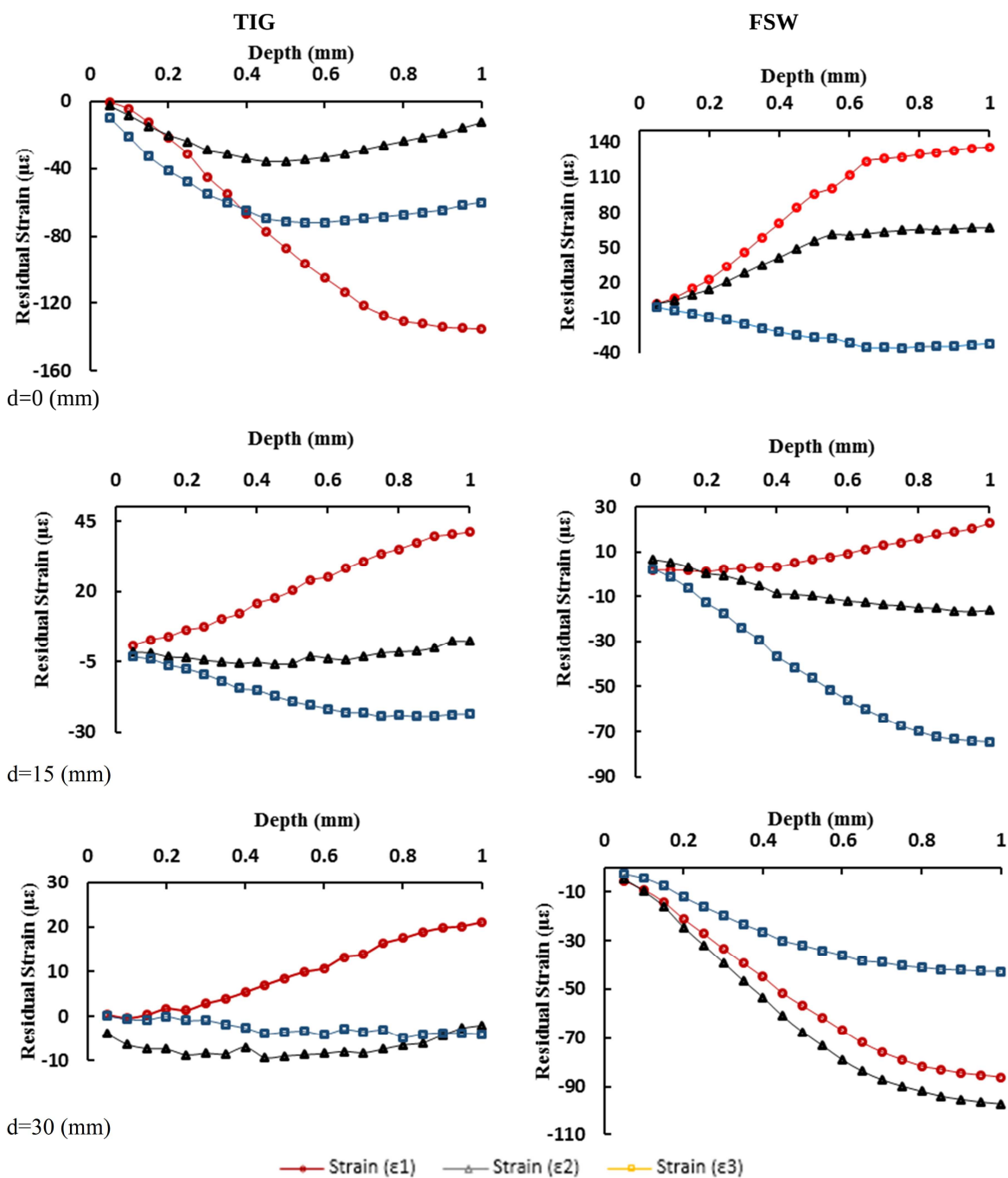
$$(\sigma_{max})_k, (\sigma_{min})_k = P_k \pm \sqrt{Q_k^2 + T_k^2} = E \left[\frac{p}{\bar{a}(1 + \nu)} \pm \frac{\sqrt{q^2 + t^2}}{\bar{b}} \right] \quad (۱۰)$$

$$\beta_k = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{T_k}{Q_k} \right) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{t}{q} \right) \quad (۱۱)$$

^۱ Heat affected zone

به‌دست‌آمده در هیچ حالتی به نصف استحکام قطعه نرسیده است.

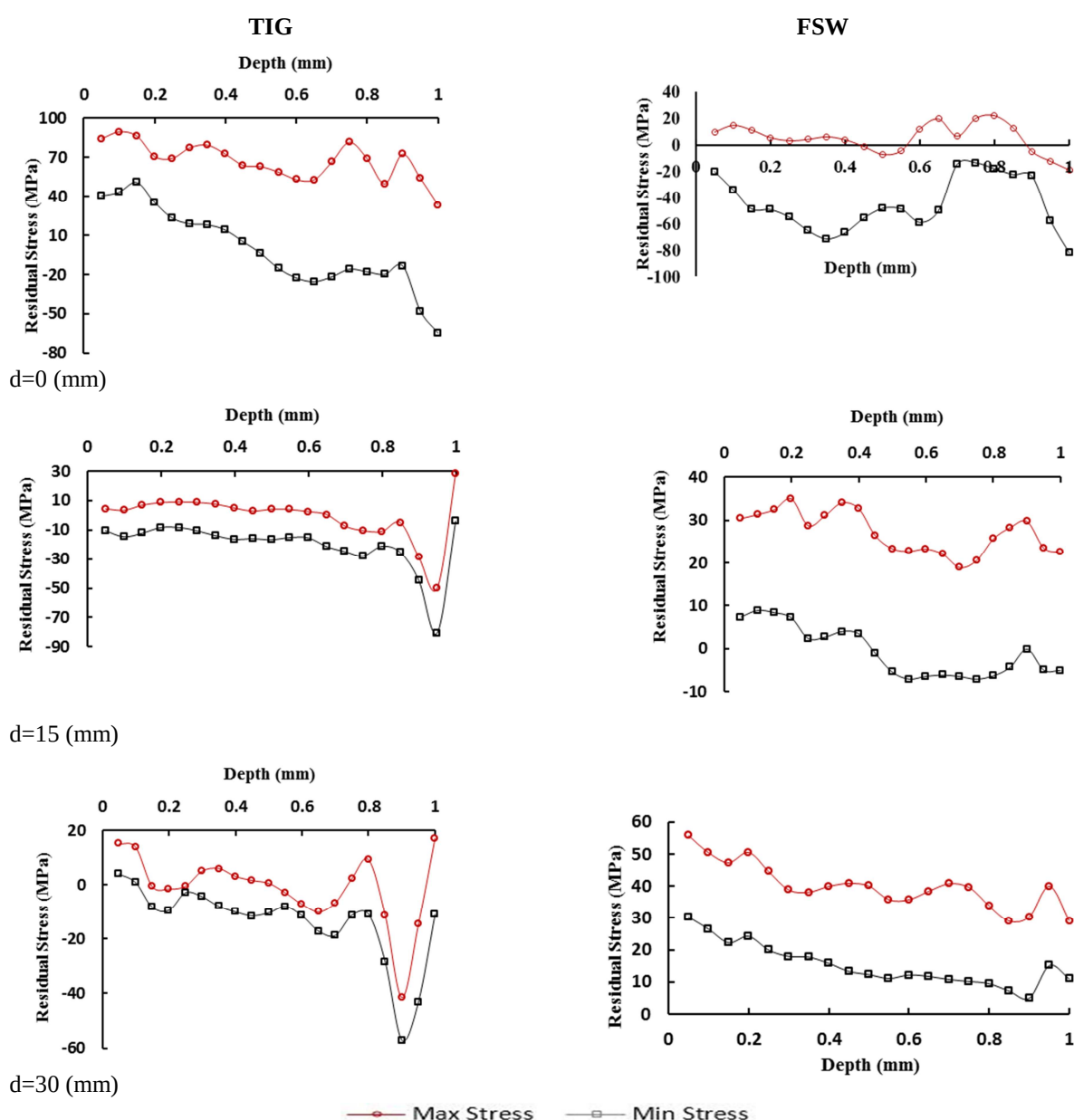
استحکام آلیاژهای مورد استفاده را نشان می‌دهد تنش‌های پسماند



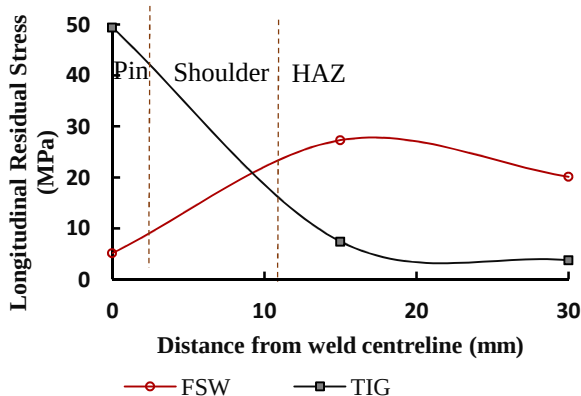
شکل ۴- کرنش‌های آزادشده ناشی از سوراخکاری در نمونه‌های جوش اصطکاکی (FSW) و ذوبی (TIG) با فاصله d از خط جوش

صدیقی و همکارانش [۲۰] در همین مورد مطالعاتی در تعیین ضرایب کالیبراسیون با استفاده از مدل‌سازی المان محدود برای تنش غیریکنواخت در راستای عمق انجام داده و با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی افزایشی تنش پسماند را در آزمون خمش چهار نقطه به دست آورد و با مقدار تئوری آن مقایسه کرده‌اند. آنها نشان دادند که تا گام هفتم سوراخ زنی دقت نتایج مناسب است ولی در سه گام پایانی نتایج قابل قبولی به دست نمی‌آید. با توجه به شکل ۴ بیشترین کرنش آزادشده مربوط به روزت a روی نمونه‌ی جوش ذوبی است که بیشترین مقدار آن برابر ۱۶۰- مگا پاسکال است و با افزایش فاصله از خط جوش برای نمونه ذوبی اندازه کرنش‌های آزادشده کاهش می‌یابد. با استفاده از رابطه ۱۰ تنش‌های بیشینه و کمینه برای تمام‌روزت‌ها در هر لایه بدیت آمده و در شکل ۵ نشان داده

شده است. با توجه به شکل، در جوش ذوبی بیشینه تنش روی خط جوش و به‌صورت کششی است و در بیشترین مقدار به ۸۹/۵ مگا پاسکال می‌رسد که با افزایش عمق، تنش بیشینه کاهش یافته و در کمترین مقدار خود به ۳۳/۵ مگا پاسکال می‌رسد. با دور شدن از خط جوش برای فاصله‌های ۱۵ و ۳۰ میلی‌متر تنش‌های بیشینه و کمینه برای جوش ذوبی کاهش یافته و به صفر نزدیک می‌شوند که نشان‌دهنده این است که بحرانی‌ترین نقطه در جوش ذوبی روی خط جوش و در سطح قطعه اتفاق می‌افتد که علت آن تمرکز حرارت ورودی به قطعه از طریق الکتروود است. در صورتی که در جوش اصطکاکی در خط جوش تنش بحرانی به‌صورت کششی و مقدار آن ۵۵/۸۲ مگا پاسکال است که با افزایش عمق این مقدار کاهش یافته و با دور شدن از خط جوش مقدار آن افزایش می‌یابد



شکل ۵- تغییرات تنش پسماند بیشینه و کمینه با فاصله از خط جوش برای نمونه جوش اصطکاکی (FSW) و ذوبی (TIG)



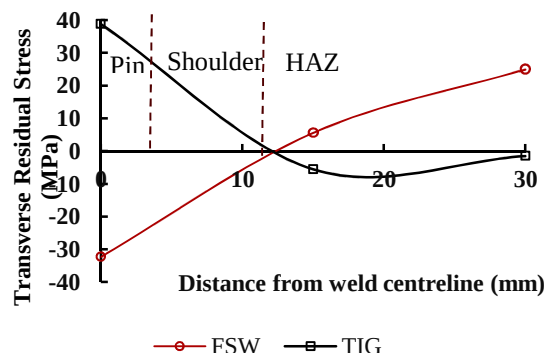
شکل ۷- تغییرات تنش پسماند عرضی بافاصله از خط جوش برای نمونه‌های جوش اصطکاکی و ذوبی

۳-۲- میکرو سختی

سختی سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شده به دو روش ذوبی و اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از دستگاه میکرو سختی سنج ویکرز و با اعمال بار ۱۰۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه و برای تعداد زیادی نقطه به فاصله یک میلی‌متر از هم در امتداد مقطع جوش تعیین گردید. حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم اعم از انواع عملیاتی حرارتی پذیر و غیرقابل عملیات حرارتی، ناحیه ناگت ریزساختاری تبلور مجدد یافته از خود نشان دهد که در مورد آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر آلومینیوم، وجود دماهای کاری بالا حین فرایند در ناحیه ناگت و مقدار جزئی در ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی، موجب انحلال بخشی از فازهای رسوبی می‌شوند [۲۱]. در نتیجه مقداری نرم شدگی در ناحیه جوش در فلزات عملیات حرارتی پذیر که در حالت T6 عملیات حرارتی شدند انتظار می‌رود. همچنین مقداری درشت شدن دانه و نرم شدگی در ناحیه متأثر از حرارت نیز به وجود می‌آید. از آنجاکه ناحیه متأثر از حرارت فلز پایه را ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی و ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی نیز ناحیه متأثر از حرارت را به ناگت متصل می‌کند لذا در نهایت توزیع سختی در مقطع اتصال به صورت W شکل خواهد شد که ناحیه متأثر از حرارت کمترین مقدار را در این بین خواهد داشت.

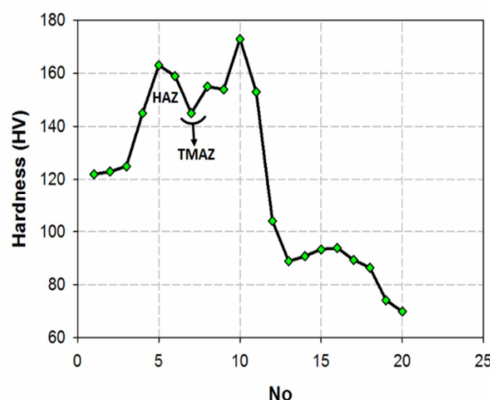
تغییر شکل پلاستیک شدید و ایجاد دمای بالا در منطقه اغتشاش در طول فرایند FSW باعث تبلور مجدد و توسعه ساختار جوش در منطقه اغتشاش و حل شدن و بزرگ شدن رسوبات درون و اطراف منطقه اغتشاش می‌شود. تغییر شکل پلاستیک شدید و حرارت ایجاد شده در طول فرایند باعث ایجاد یکسری ساختار تبلور مجدد یافته ریزدانه در ناحیه اغتشاش یافته می‌شود. این ناحیه اغلب ناحیه جوش یا ناحیه تبلور مجدد یافته دینامیکی (DXZ) نامیده می‌شود. در اثر فرایند FSW این ناحیه به صورت ساختار حلقه‌ای مانند حلقه‌های پیاز دیده می‌شود به خوبی پذیرفته شده است که تبلور مجدد دینامیکی در طول فرایند FSW سبب ایجاد دانه‌های ریز و ظریف تک‌محوره در منطقه جوش می‌شود. پارامترهای جوشکاری، هندسه ابزار، ترکیب قطعه کار، دمای قطعه کار، فشار عمودی و سرد کردن تأثیر زیادی روی اندازه

شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب تغییرات تنش پسماند طولی و عرضی را برای جوش اصطکاکی اغتشاشی و ذوبی نشان می‌دهند. تنش پسماند طولی و عرضی در جوشکاری ذوبی آلومینیوم بافاصله از خط جوش کاهش یافته و به صفر میل می‌کند ولی در جوش اصطکاکی با افزایش فاصله از خط جوش ابتدا تنش افزایش پیدا کرده و به مقدار بیشینه خود می‌رسد و سپس کاهش پیدا کرده و به صفر میل می‌کند. تنش پسماند بیشینه در جوشکاری ذوبی به مراتب بیشتر از جوش اصطکاکی است و این به دلیل این است که در جوش ذوبی قطعه ذوب می‌گردد و هنگام سرد شدن به دلیل اختلاف دمای بیشتر، تنش‌های حرارتی بیشتری تولید می‌گردد در حالی که در جوش اصطکاکی قطعه در محل جوش ذوب نمی‌گردد. همچنین بیشینه تنش در جوش ذوبی درست در محل خط جوش است ولی در جوش اصطکاکی بافاصله از خط جوش تنش پسماند بیشینه که علت آن قطر شانه ابزار است که منبع اصلی تولید گرما در جوشکاری اصطکاکی محسوب می‌گردد. چون قطر شانه ابزار حدود ۲۵ میلی‌متر است گرما به صورت گسترده‌تری وارد قطعه شده و تنش پسماند کم‌تری در خط جوش به وجود آورده و بیشینه تنش پسماند را از خط جوش دور می‌کند. در حالی که در جوش ذوبی محل ورود گرما سطح خیلی کمتری را داشته و تمرکز انتقال گرما صورت می‌گیرد که این موضوع باعث افزایش بیشینه تنش پسماند و نزدیک شدن مکان بیشینه تنش به خط جوش می‌شود.



شکل ۶- تغییرات تنش پسماند طولی بافاصله از خط جوش برای نمونه‌های جوش اصطکاکی و ذوبی

پس به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تنش پسماند در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توزیع یکنواخت‌تر و البته از نظر اندازه مقدار کمتری نسبت به تنش‌های پسماند در جوشکاری ذوبی دارد و این یکی از دلایل استفاده روزافزون از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است.



شکل ۹- تغییرات سختی برای جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ ۷۰۷۵ به ۶۰۶۱

۴- نتیجه‌گیری

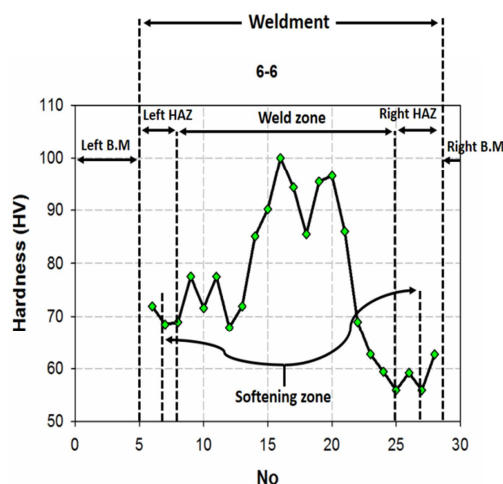
۱. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق تنش پسماند در جوشکاری ذوبی آلومینیوم بافاصله از خط جوش کاهش می‌یابد و به صفر میل می‌کند ولی در جوش اصطکاکی با افزایش فاصله از خط جوش ابتدا تنش افزایش پیدا کرده و به مقدار بیشینه خود می‌رسد و سپس کاهش پیدا می‌کند.
۲. تنش پسماند بیشینه در جوش ذوبی به‌مراتب بیشتر از جوش اصطکاکی است که علت آن ذوب قطعه در جوش ذوبی و تولید حرارت بیشتر می‌باشد.
۳. بیشینه تنش در جوش ذوبی درست در محل خط جوش است ولی در جوش اصطکاکی بافاصله از خط جوش تنش پسماند بیشینه می‌گردد و این به خاطر قطر شانه ابزار است که منبع اصلی تولید گرما در جوشکاری اصطکاکی محسوب می‌گردد.
۴. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در جوش کاری اصطکاکی منطقه TMAZ میزان سختی؛ کمتری نسبت به منطقه HAZ و ناگت را دارا است اما سختی آن از سختی فلز پایه بیشتر است.

۵- مراجع

- [1] Bastier A., Maitournam M. H., Roger F., and Dang Van K., Modelling of the residual state of friction stir welded plates, Journal of Materials Processing Technology, vol. 200, pp. 25-37, 5/8/ 2008.
- [2] Castro R. A. S., Richter-Trummer V., and Tavares S. M. O., Friction stir welding on T-joints: residual stress evaluation, in 8^o Congresso Nacional de Mecânica Experimental, 2010.
- [3] Hamed Jamshidi A., Serajzadeh S., and Kokabi H. A., Experimental and theoretical evaluations of thermal histories and residual stresses in dissimilar friction stir welding of AA5086-AA6061," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 61, pp. 149-160, 2012.
- [4] Ting L. and Qing-yu S., Residual stresses of friction stir welded 2024-T4 joints, Materials Science Forum, Vol. 582, pp. 263-266, 2008.
- [5] Richter-Trummer V., Moreira P. M. G. P., and Ribeiro J., The contour method for residual stress determination applied to an AA6082-T6 friction stir butt weld, Materials Science Forum, Vol. 681, pp. 177-188, 2011..

دانه‌های تبلور مجدد یافته می‌گذارد و طبق رابطه اچ-هال با ریزتر شدن دانه‌ها سختی افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات میکرو سختی در امتداد مقطع جوش ذوبی و اصطکاکی اغتشاشی (ناهم‌جنس ۶۰۶۱ به ۷۰۷۵) را نشان می‌دهد. همان‌طوری که از نمودار شکل ۸ مشخص است به دلیل بالا بودن شیب و تنش پسماند حرارتی منطقه جوش در حین سرد شدن، سختی میانگین منطقه جوش از بقیه قسمت‌ها بالاتر است. این پدیده در منطقه HAZ با توجه به افزایش اندازه دانه‌ها و میکرو ساختار منجر به کاهش چشمگیر سختی شده است که مؤید وقوع پدیده نرم شوندگی HAZ می‌باشد. در مناطقی از نمودار که سختی افزایش یافته است، علت اصلی، وجود رسوبات پراکنده $Mg_2Al-FeSi$ در ساختار جوش Al6061 می‌باشد که منجر به افزایش موضعی مقدار سختی گردیده است. ضمن آنکه در فلز پایه با توجه به شیب حرارتی بسیار آرام و عدم وجود تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری و نیز با توجه به عدم وجود ساختار خشن در دانه‌بندی، سختی فلز پایه نسبت به کل ناحیه جوش به نحو قابل‌ملاحظه‌ای کمتر می‌باشد.



شکل ۸- تغییرات سختی برای جوش کاری ذوبی آلومینیوم ۶۰۶۱

همچنان که از شکل ۹ برای اتصال ناهم‌جنس سری آلیاژ 6xxx به 7xxx مشخص است از نقطه یک تا یازده مربوط به آلیاژ سری ۷۰۷۵ می‌باشد. محل فصل مشترک برخورد دو آلیاژ با یکدیگر در منطقه ناگت، بین نقطه یازده و دوازده واقع شده است که از نقطه ۱۲ به بعد دچار افت شدید سختی می‌شود که نشان از ورود به آلیاژ آلومینیوم سری 6xxx می‌باشد. نقاط ۸ تا ۱۱ جزو منطقه اختلاط^۱ آلیاژ ۷۰۷۵ می‌باشد که سختی بالایی نیز از خود نشان داده‌اند. نقطه ۷، منطقه TMAZ^۲ می‌باشد که سختی دچار کمی افت سختی شده است. از نقطه ۶ تا ۹ نیز منطقه HAZ جوش می‌باشد

¹ Stir zone

² Thermo-mechanically altered zone

- [6] Jamshidi Aval H., Microstructure and residual stress distributions in friction stir welding of dissimilar aluminium alloys," *Materials & Design*, Vol. 87, pp. 405-413, 2015.
- [7] Linton V. M. and Ripley M. I., Influence of time on residual stresses in friction stir welds in agehardenable 7xxx aluminium alloys, *Acta Materialia*, Vol. 56, pp. 4319-4327, 2008.
- [8] Woo W. and Feng Z., Neutron diffraction measurements of time-dependent residual stresses generated by severe thermomechanical deformation, *Scripta Materialia*, Vol. 61, pp. 624-627, 2009.
- [9] Caroline J., de M. B., Anne D., and Aude S., Torque, temperature and hardening precipitation evolution in dissimilar friction stir welds between 6061-T6 and 2014-T6 aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, pp. 826-837, 2013.
- [10] Cole E. G., Fehrenbacher A., Duffie N. A., and Zinn M. R., Weld temperature effects during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys 6061-t6 and 7075-t6, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, pp. 643-652, 2014.
- [11] Terasaki T. and Akiyama T., Mechanical Behaviour of Joints in FSW: Residual Stress, Inherent Strain and Heat Input Generated by Friction Stir Welding, *Welding in the World*, Vol. 47, pp. 24-31, 2003.
- [12] Guo J. F., Chen H. C., Sun C. N., Bi G., and Sun Z., Friction stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters, *Materials and Design*, Vol. 56, pp. 185-192, 2014.
- [13] Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ed, 2013.
- [14] Kelsey R. A., Measuring Non-Uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method, *Proceedings SESA*, Vol. 14, pp. 181-194, 1956.
- [15] Schajer G. S., Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 103, pp. 157-163, 1981.
- [16] Schajer G. S., Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method, *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 110, pp. 338-343, 1988.
- [17] Liu C. and Yi X., Residual stress measurement on AA6061-T6 aluminum alloy friction stir butt welds using contour method, *Materials & Design*, Vol. 46, pp. 366-371, 4/ 2013.
- [18] Flaman M. T., Mills B. E., Boag J. M., Analysis of Stress Variation-With-Depth Measurement Procedures for the Center-Hole Method of Residual Stress Measurement, *Experimental Techniques*, Vol. 11, pp. 35-37, 1987.
- [19] Lemmen H. J. K., Alderliesten R. C., Pieters R. R. G. M., Benedictus R., and P. J. A., Yield Strength and Residual Stress Measurements on Friction-Stir Welded Aluminum Alloys, *Journal of Aircraft*, Vol. 47, pp. 1570-1583, 2010.
- [20] Sedighi M., Khandae M., and Joudaki J., Calibration Coefficients for Residual Stress Measurement in Incremental Hole Drilling Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, pp. 19-27, 2011.
- [21] Azizi A., Zakeri Mehrabad V., Mostofi Zadeh A., and Azarafza R., Influence of friction stie welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, pp. 56-66, 2013.