مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 69-76

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب فولاد IF با ضخامت 0.7 میلیمتر

آرش بختیاری[1]، مهدی صفری[2*]، حسین مستعان[3]

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک
3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه اراک، اراک
* اراک، صندوق پستی 38181-41167، m.safari@arakut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 بهمن 1395
پذیرش: 08 فروردین 1396
ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
فولاد IF
خواص مکانیکی
تغییرات ریزساختاری
آنالیز پراش الکترون‌های برگشتی

چکیده

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب ورق‌های فولادی با ضخامت‌های کمتر از یک میلیمتر به عنوان یکی از چالش‌های مهم سال‌های اخیر بوده است. در این پژوهش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب فولاد IF با ضخامت 0.7 میلیمتر به صورت تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور اثرات سرعت‌های دورانی و پیشروی ابزار بر استحکام و سختی اتصالات جوشکاری شده بررسی می‌شود. استحکام مکانیکی اتصالات توسط تست کشش تک محوری برآورد می‌شود. همچنین در این مقاله، تحولات ریزساختاری اتصالات جوشکاری شده ورق‌های فولادی IF با ضخامت 0.7 میلیمتر مطالعه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی ابزار، استحکام کششی اتصالات جوشکاری شده افزایش خواهد یافت. به علاوه با افزایش سرعت‌های پیشروی و دورانی ابزار، سختی ناحیه جوش افزایش می‌یابد. نتایج بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهند که ریزساختار ناحیه جوش با افزایش سرعت‌های پیشروی و دورانی ابزار بهبود می‌یابد. نتایج به دست آمده از آنالیز پراش الکترون‌های برگشتی نشان می‌دهند که در جهت‌گیری کریستالوگرافی دانه‌ها در سمت چپ ناحیه اغتشاش نسبت به مرکز ناحیه اغتشاش تغییرات عمده‌ای صورت نگرفته است. همچنین نشان داده می‌شود که کسر مرزدانه‌های با زاویه زیاد در مرکز ناحیه اغتشاش نسبت به سمت چپ این ناحیه افزایش یافته است (از 25 درصد به 48 درصد).

Experimental investigation of butt weld friction stir welding of IF steel with thickness of 0.7 mm

Arash Bakhtiari[1], Mehdi Safari[1*], Hossein Mostaan[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.
2- Department of Materials and Metallurgical Engineering, Arak University, Arak, Iran.
* P.O.B. 38181-41167, Arak, Iran, m.safari@arakut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 February 2017
Accepted 28 March 2017
Available Online 29 April 2017

Keywords:
Friction stir welding
IF steel
Mechanical properties
Microstructure evolutions
Electron Backscatter Diffraction (EBSD) analysis

ABSTRACT

Butt weld friction stir welding of steel sheets with thicknesses of less than 1 mm has been known as one of the most important challenges in recent years. In this work, butt weld friction stir welding of IF (Interstitial free) steel with the thickness of 0.7 mm is studied experimentally. For this purpose the effects of rotational and travel speeds of the tool on the strength and hardness of welded joints is investigated. Mechanical strength of the joints is evaluated with uniaxial tensile test. Also, in this paper the microstructure evolutions of welded joints of IF steel sheets with the thickness of 0.7 mm are studied. The results show that with increasing rotational speed and decrease in travel speed of the tool, the tensile strength of welded joints will be increased. In addition, with increase in rotational and travel speeds of the tool, the hardness of welded zone is increased. The results of microstructural investigations show that the microstructure of welded zone is improved with increase in rotational and travel speeds of the tool. The results of EBSD analysis show that no significant changes have occurred in the left side of stir zone in comparison to center of stir zone. Also, it is shown that the fraction of high angle grain boundaries in the center of stir zone has been increased rather than the left side of stir zone (from 25 % up to 48 %).

1- مقدمه

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، توسط مرکز تحقیقات جوش انگلستان[1] در سال 1991 میلادی تحت عنوان روش اتصال در حالت جامد ارائه گردید و در ابتدا برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم به کار گرفته شد [1].

در این فرآیند ابزار غیر مصرفی در حال دوران که شامل دو قسمت پین و شانه است، با وارد شدن در بین دو لبه و سپس حرکت در امتداد مسیر اتصال باعث اتصال آن‌ها می‌شود. فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مقایسه با فرآیندهای جوشکاری حالت مذاب دارای مزایایی از جمله اعوجاج و تنش پسماند کمتر می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به این که در فرآیند جوشکاری

[1] TWI

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Bakhtiari, M. Safari, H. Mostaan, Experimental investigation of butt weld friction stir welding of IF steel with thickness of 0.7 mm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 69-76, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.5.15.3]

اصطکاکی اغتشاشی عمل ذوب فلزات اتفاق نمی‌افتد، دمای این فرآیند نسبت به جوشکاری حالت مذاب کمتر بوده که در نتیجه باعث کاهش شیب حرارتی در ناحیه ذوب شده و خواص مکانیکی و کیفیت جوش را بهبود می‌بخشد [3،2].

جوشکاری اصطکاکی اغشاشی برای اتصال انواع فلزات در صنایع گوناگون از جمله کشتی‌سازی، هوافضا، خودروسازی، ریلی و ... استفاده می‌شود [4]. در ابتدا برای اتصال فلزات نرم مانند آلومینیوم و منیزیم مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از این فرآیند برای آلیاژهای با استحکام بالاتر به ویژه فولادها، به دلیل استحکام و سختی بالا و نیاز به ابزاری با گرماسختی زیاد و همچنین هزینه بالای ساخت ابزار، با محدودیت همراه است. در سال‌های اخیر محققین مطالعاتی را برای بررسی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انواع فولادها انجام داده‌اند. یکی از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه توسط توماس و همکارانش انجام شد و آن‌ها امکان‌پذیری جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های فولاد ساده کربنی به ضخامت 12 میلیمتر و فولاد حاوی 12% کروم به ضخامت 15 میلیمتر به صورت مشابه و غیرمشابه را مورد ارزیابی قرار دادند [5]. اوزکسین و همکارانش به بررسی تحولات ریزساختاری صورت گرفته در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های فولادهای X80 و API L80 به ضخامت 8 و 20 میلیمتر با استفاده از یک ابزار پلی کریستال مکعب نیترید بور پرداختند [6]. نتایج آن‌ها نشان داد که دلیل افزایش سختی در ناحیه جوش اتصالات تشکیل فازهای بینیت و مارتنزیت و همچنین ذرات نیترید بور ناشی از سایش ابزار می‌باشد. رینولدز و همکارانش توانستند با استفاده از ابزاری از جنس کاربید تنگستن، ورق‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن 304 و فولاد کربنی DH36 به ضخامت 6.4 میلیمتر را به صورت موفقیت آمیزی به یکدیگر جوش دهند و مشاهده نمودند که خواص مکانیکی اتصال ایجاد شده بهبود یافته است [8،7]. مران و همکارانش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای اتصال ورق‌های فولادی زنگ نزن آستنیتی 304 به ضخامت 3 میلیمتر به کار بردند و مشاهده نمودند که بهترین جوش در سرعت چرخشی 1000 دور بر دقیقه و سرعت خطی 63 میلیمتر بر دقیقه و زاویه ابزار 1 درجه و با استفاده از ابزاری از جنس کاربید تنگستن حاصل می‌شود [9]. سعید و همکارانش جوشکاری ورق‌های فولاد دو فازی SAF2205 به ضخامت 2 میلیمتر را تحت پارامترهای مختلف جوشکاری به روش اصطکاکی اغتشاشی انجام دادند و نتیجه گرفتند افزایش سرعت جوشکاری منجر به کاهش اندازه دانه‌های فاز α و γ در ناحیه اغتشاش شده که این امر موجب افزایش سختی و استحکام کششی در این ناحیه می‌شود [10]. ساتیا و همکارانش به مطالعه بر روی اتصال دو نوع فولاد زنگ نزن آستنینی 304 و فریتی 430 به روش اصطکاکی اغتشاشی پرداختند و مشاهده نمودند که اتصالات انجام شده به روش اصطکاکی اغتشاشی از خواص بهتری نسبت به جوش‌های حالت مذاب برخوردار می‌باشند [11]. ژو و همکارانش به تحقیقی در مورد تأثیر سرعت دورانی ابزار بر خواص مکانیکی و ریزساختاری جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های آلیاژ تیتانیوم به ضخامت 2 میلیمتر پرداختند و دریافتند سرعت دورانی تأثیر زیادی بر ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی اتصالات دارد [12]. سانگ و همکارانش تحقیقی در مورد خواص مکانیکی و ریزساختاری ورق‌های اینکونل 600 به ضخامت 2 میلیمتر جوش داده شده به روش اصطکاکی اغتشاشی انجام دادند و به این نتیجه دست یافتند که تبلور مجدد دینامیکی در هر شرایطی اتفاق می‌افتد و با انجام آزمایش‌های مکانیکی دریافتند که ناحیه جوشکاری شده نسبت به فلز اصلی از 20% سختی و 10% استحکام کششی بیشتر برخوردار می‌باشد [13]. راجاکومار و همکارانش تحقیقی در مورد تأثیر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و پارامترهای ابزار بر روی اتصالات آلیاژ آلومینیوم 7075 به ضخامت 5 میلیمتر انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که اتصالاتی که با سرعت دورانی 1400 دور در دقیقه، سرعت پیشروی 60 میلیمتر در دقیقه، نیروی محوری 8 کیلو نیوتن و با استفاده از ابزار با قطر شانه 15 میلیمتر و قطر پین 5 میلیمتر جوش داده شده‌اند، نسبت به سایر اتصالات از خواص مکانیکی بهتری برخوردار می‌باشند [14]. در تحقیقات انجام شده پیشین که به تعدادی از آن‌ها اشاره شد، محققین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای ورق‌های فولادی با ضخامت بیش از 1.5 میلیمتر مورد بررسی قرار دادند. در رابطه با میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق‌های با ضخامت کمتر از یک میلیمتر نیشیهارا بر روی آلیاژ منیزیم نتایج رضایت بخشی به دست آورده است [15]. همچنین سیالپی و همکارانش روش میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم 2024 به 6082 با ضخامت 0.8 میلیمتر استفاده کردند [16]. به طور کلی در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها، ضخامت حداقل ورق‌های جوشکاری شده در حدود 1.2 تا 1.8 میلیمتر بوده است [17]. جوشکاری ورق‌های نازک (کمتر از یک میلیمتر) به دلیل کاهش ضخامت، ناشی از فشار وارده از شانه ابزار محدودیت‌هایی دارد. وجود عیوب میکرونی که معمولاً در مورد ورق‌های ضخیم قابل قبول است، در مورد ورق‌های نازک مشکل جدی محسوب می‌شود [18]. این در حالی است که در بسیاری از صنایع از جمله خودروسازی، ورق‌هایی با ضخامت‌های کمتر از یک میلیمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و لازم است که این ورق‌های نازک به یکدیگر جوش داده شوند. در این تحقیق از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال لب به لب ورق‌هایی از جنس فولاد عاری از عناصر بین نشین (IF) با ضخامت کمتر از 1 میلیمتر استفاده می‌شود و هدف دستیابی به اتصالی است که در آن استحکام ناحیه جوش از استحکام فلز پایه بیشتر باشد. همچنین در این پژوهش به بررسی اثر سرعت‌های دورانی و پیشروی ابزار بر استحکام کششی اتصالات و سختی ناحیه جوش پرداخته می‌شود. به منظور مطالعه عمیق‌تر نیز بررسی‌های ریزساختاری و متالورژیکی بر روی اتصالات جوشکاری شده انجام می‌شوند. نکته قابل توجه در استفاده از فولاد IF در این پژوهش این است که فولاد IF دارای انرژی نقص در چیده شدن بالایی است. یکی از عوامل مهم در این پدیده، انرژی نقص در چیده شدن است که با تحت تأثیر قرار دادن میزان تجزیه نابجایی‌ها، نرخ صعود و لغزش متقاطع نابجایی‌ها را تعیین می‌کند و این دو فرآیند مکانیزم‌هایی هستند که معمولاً نرخ بازیابی را کنترل می‌کنند. در فلزات با انرژی در نقص چیده شدن بالا مثل فولاد IF صعود سریع بوده و بازیابی قابل توجهی اتفاق می‌افتد. لذا در حین تغییر شکل شدیدی که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی رخ می‌دهد، به علت وقوع بازیابی دینامیکی قابل توجه ناشی از انرژی در نقص چیده شدن بالای فولاد IF، انرژی لازم جهت وقوع تبلور مجدد کاهش می‌یابد. بر همین اساس در این پژوهش به بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد IF پرداخته می شود.

2- روش تحقیق و کار تجربی

با توجه به افزایش دانش و انجام آزمایش‌های مختلف، ابزارهای مختلفی با جنس‌های خاص از جمله کاربید تنگستن، نیترید بور مکعبی و ... که گرماسختی بالایی دارند، به منظور استفاده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها مورد استفاده قرار گرفته است. هندسه ابزار از بخش‌های

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.5.15.3]

مهم و تأثیرگذار در این فرآیند می‌باشد و به خصوص در ریزساختار جوش بسیار موثر است. در این تحقیق از ابزاری با جنس کاربید تنگستن گرید K20 استفاده شده است. همچنین تصویر و هندسه ابزار مورد استفاده در این تحقیق در شکل 1 نشان داده شده است. در این تحقیق از ورق‌های IF با ضخامت 0.7 میلیمتر و ابعاد 120×50 میلیمتر استفاده شده است. در جدول 1 ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد IF مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است. فولاد عاری از عناصر بین نشینی، جز فولادهایی می‌باشد که کربن و نیتروژن بسیار کمی دارند و در دهه‌های اخیر به صورت ورق‌های نازک در صنعت خودروسازی و تولید قطعات کشش عمیق و هیدروفرمینگ کاربرد گسترده‌ای یافته است. اتصال لب به لب این ورق‌ها با ضخامت پایین با استفاده روش‌های جوشکاری ذوبی باعث اعوجاج و به وجود آمدن تنش پسماند در ورق‌ها می‌شود، لذا در این تحقیق روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال این ورق‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به انجام جوشکاری به صورت لب به لب، فیکسچری با گیره‌های تسمه‌ای و یکپارچه برای گیرش بهتر و جلوگیری از جدا شدن ورق‌ها و فاصله گرفتن لبه‌های ورق‌ها در حین نفوذ ابزار به درز جوش و همچنین در حین پیمودن مسیر جوشکاری، مطابق شکل 2 طراحی و ساخته شده است. همان‌طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود از سنگ گرانیت به عنوان صفحه زیرکاری درز جوش استفاده گردیده است. دلیل این موضوع این است که در صورت استفاده از صفحات فلزی معمول به عنوان زیرکاری، با توجه به ضخامت بسیار کم ورق‌های فلزی، به دلیل دمای بالا ناشی از اصطکاک در زیر شانه ابزار و نیروی محوری ابزار، ورق فولادی در قسمت درز جوش به صفحه زیرکاری در چندین نقطه جوش می‌خورد.

به منظور بررسی اثر سرعت دورانی و پیشروی ابزار بر استحکام اتصالات جوشکاری شده، ابتدا با استفاده از ترکیبات مختلف سرعت دورانی و پیشروی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام گردید و پس از انجام تست کشش تک محوری مشخص گردید که با استفاده از سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 12 میلیمتر بر دقیقه اتصال مناسبی بین ورق‌های فولادی ایجاد گردیده است. در شکل 3 تصویر نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 12 میلیمتر بر دقیقه نشان داده شده است. پس از انجام این آزمایش جوشکاری با پارامترهای بیان شده، نمونه جدا شده با دستگاه وایرکات در راستای عمود بر خط جوش از این اتصال جوشکاری شده، تحت آزمایش کشش قرار گرفت. در شکل 4 نمونه‌ای از اتصالات ایجاد شده، پس از آزمایش کشش تک محوری نشان داده شده است.

برای اطمینان بیشتر از استحکام اتصال جوشکاری شده و تحت کنترل بودن همه شرایط جوشکاری، آزمایش جوشکاری با سرعت دورانی 1000 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 12 میلیمتر بر دقیقه دو بار دیگر تکرار شد و نمونه‌های جدا شده از آن‌ها تحت آزمایش کشش قرار گرفتند و در هر دو نمونه جدا شده از اتصالات جوشکاری شده مانند نمونه اولیه، شکست در فلز پایه رخ داد. پس از دست یافتن به استحکام مناسب در اتصالات با پارامترهای بیان شده، تأثیر سرعت پیشروی و دورانی ابزار با ثابت در نظر گرفتن یک پارامتر و بررسی اثر پارامتر دیگر بر خواص مکانیکی اتصالات ورق‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا با ثابت گرفتن سرعت پیشروی 12 میلیمتر بر دقیقه برای ابزار، سه آزمایش جوشکاری با سه سرعت دورانی 800، 1000 و 1200 دور بر دقیقه انجام شد. انتخاب این سه سرعت دورانی با توجه به نتایج مناسب حاصل شده (در اتصال جوشکاری شده با سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 12 میلیمتر بر دقیقه) و با توجه به محدودیت سرعت‌های دورانی دستگاه فرز مورد استفاده بود. همچنین در ادامه با ثابت در نظر گرفتن سرعت دورانی 1000 دور در دقیقه برای ابزار سه آزمایش

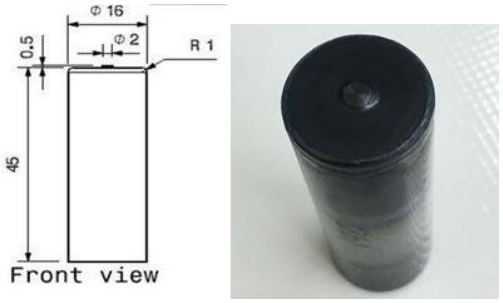


Fig. 1 The used tool for butt weld friction stir welding

شکل 1 ابزار مورد استفاده برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب



Fig. 2 The used fixture in the butt weld friction stir welding of IF steel with thickness of 0.7 mm

شکل 2 فیکسچر مورد استفاده در جوشکاری لب به لب اصطکاکی اغتشاشی ورق فولادی IF با ضخامت 0.7 میلیمتر



Fig.3 The welded specimen with rotational speed of 1000 rpm and feed rate of 12 mm/min

شکل 3 نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی 1000 rpmو پیشروی 12 mm/min

جدول 1 ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد IF

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of IF steel

ترکیب شیمیایی (wt%)							خواص مکانیکی			
C	Ti	N	S	Al	Nb	Fe	(MPa) تنش نهایی	(MPa) تنش تسلیم	(%)درصد ازدیاد طول	(HV) سختی
0.002	0.424	0.003	0.005	0.0465	0.0029	Rem	311	186	47	89.2

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.5.15.3]



Fig.4 The fracture of base metal in uniaxial tensile test of friction stir welded specimen

شکل 4 شکست فلز پایه در آزمایش کشش تک محوری نمونه جوشکاری شده اصطکاکی اغتشاشی

جوشکاری با سه سرعت پیشروی 8، 12 و 20 میلیمتر بر دقیقه انجام شد.

به منظور بررسی خواص مکانیکی جوش‌های انجام شده از آزمایش کشش تک محوری و میکروسختی استفاده شده است. برای انجام آزمایش کشش بر طبق استاندارد ASTM E8 با دستگاه آزمون کشش هانسفیلد مدل H25KS، نمونه‌ها با سرعت 1 میلیمتر بر دقیقه مورد آزمایش کشش قرار گرفتند. همچنین برای انجام آزمایش میکروسختی بر طبق استاندارد ASTM E92 با استفاده از دستگاه کوپا، نمونه‌هایی از سطح مقطع جوش‌ها مورد آزمایش میکروسختی با اعمال نیروی 200 گرم و مدت زمان نشست 10 ثانیه قرار گرفتند.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی پروفیل سختی در اتصالات اصطکاکی اغتشاشی فولاد IF

با توجه به نواحی مختلف جوش که در این روش ایجاد می‌شود، میزان سختی نیز متغیر می‌باشد. به‌عنوان مثال انتظار می‌رود که در ناحیه متأثر از حرارت[1] میزان سختی نسبت به فلز پایه افزایش یابد. دلیل این امر با توجه به این که ناحیه در معرض حرارت ناشی از این فرآیند بوده و به خاطر این حرارت تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرد، قابل توجیه می‌باشد. در نواحی دیگر ایجاد شده در این روش مانند ناحیه اغتشاش و ناحیه متأثر ترمومکانیکی[2] نیز انتظار می‌رود میزان سختی فلز جوش نسبت به فلز پایه افزایش یافته باشد و علت این امر در این ناحیه با توجه به کار مکانیکی و تغییر شکل پلاستیک انجام شده در این ناحیه توجیه‌پذیر بوده و قابل توضیح می‌باشد [20،19]. در شکل 5 نحوه تغییرات سختی در فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت، ناحیه متأثر ترمومکانیکی و فلز جوش مربوط به نمونه جوش داده شده با سرعت دورانی 1000 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 12 میلیمتر در دقیقه، از طریق رسم دیاگرام نشان داده شده است. آزمایش میکرو سختی بر روی مقطع نمونه جدا شده از فلز پایه در یک طرف آغاز شده و تا نقطه متناظر در طرف دیگر ادامه می‌یابد. با توجه با افزایش سختی در فلز جوش می‌توان اظهار داشت فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باعث افزایش سختی ناحیه جوش در اتصالات لب به لب فولاد IF می‌شود.

3-2- بررسی ریزساختار اتصالات اصطکاکی اغتشاشی فولاد IF

پس از انجام آزمایش جوشکاری با سرعت دورانی 1000 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 12 میلیمتر در دقیقه و دست یافتن به استحکامی بیش از فلز پایه در ناحیه جوش، ریزساختار این نمونه جوش داده شده مورد بررسی قرار گرفت و به منظور بررسی ریزساختار نمونه جوش داده شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نوری استفاده شد. در شکل 6 تصویر حاصل از میکروسکوپ نوری مربوط به سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر

[1] Heat affected zone (HAZ)
[2] Thermo-mechanically affected zone (TMAZ)

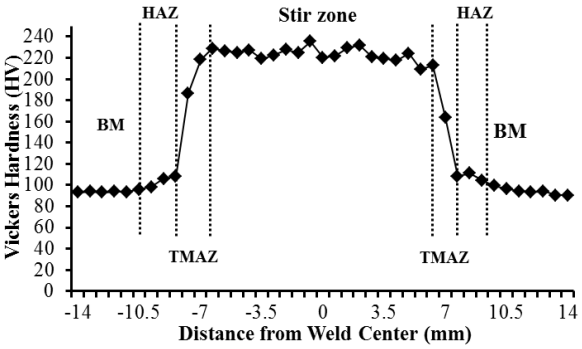


Fig.5 The hardness profile of welded specimen with rotational speed of 1000 rpm and feed rate of 12 mm/min

شکل 5 پروفیل سختی نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی 1000 rpm و سرعت پیشروی 12 mm/min

از حرارت، ناحیه متأثر ترمومکانیکی و ناحیه فلز جوش به طور همزمان نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود اندازه دانه در ناحیه اغتشاش نسبت به فلز پایه کاهش چشمگیری داشته است. دلیل این موضوع این است که عمل اغتشاش در حین انجام فرآیند منجر به در هم شکسته شدن دانه‌ها شده و لذا ریز شدن دانه‌ها را در پی دارد. به عبارت دیگر، گرمای ایجاد شده ناشی از اصطکاک بین ابزار و ورق‌ها و سیلان پلاستیک شدید ناشی از چرخش ابزار سبب می‌شود تا در حین انجام فرآیند، تبلور مجدد دینامیکی رخ داده که منجر به تشکیل دانه‌های نسبتاً ریز می‌شود.

همان‌گونه که در شکل 4 مشاهده شد، برخی از نمونه‌های جوشکاری شده در تست کشش تک محوری، شکست از ناحیه فلز پایه رخ داده است. این موضوع با توجه به تشکیل دانه‌های بسیار ریز در ناحیه فلز جوش (منطقه اغتشاش یافته) و لذا بالا رفتن سختی در این منطقه طبیعی به نظر می‌رسد. در فلز پایه، اندازه دانه‌ها بسیار درشت‌تر بوده و لذا در مقایسه با منطقه جوش ناحیه ضعیف‌تری می‌باشد. نتایج سختی‌سنجی نیز که در شکل 5 آورده شده است مؤید همین موضوع است. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی[3] که با استفاده از دستگاه هیتاچی گرفته شده است نیز در شکل 7 ارائه گردیده است. شکل 7-الف مربوط به منطقه فلز پایه (ناحیه بدون تغییر) و شکل 7-ب مربوط به منطقه جوش می‌باشد. کاهش اندازه دانه‌ها در منطقه جوش که متحمل تغییر شکل پلاستیکی شدیدی شده است، کاملاً مشهود می‌باشد. لازم به ذکر است که اگرچه میزان سختی در ناحیه فلز جوش نسبت

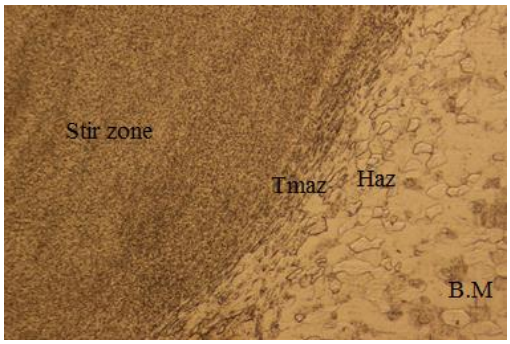
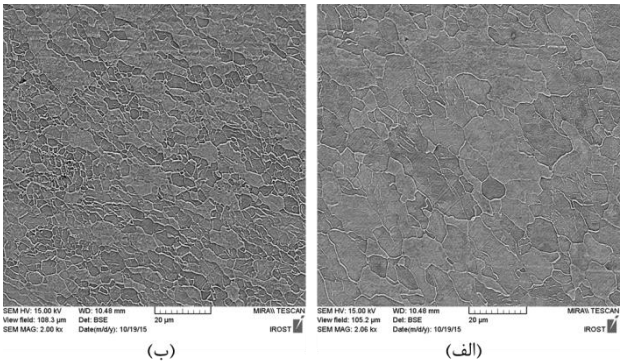


Fig.6 The microstructure cross section of welded specimen obtained by optical microscope for rotational speed of 1000 rpm and feed rate of 12 mm/min

شکل 6 ریزساختار سطح مقطع نمونه جوشکاری شده حاصل از میکروسکوپ نوری برای سرعت دورانی 1000 rpm و سرعت پیشروی 12 mm/min

[3] Scanning electron microscope (SEM)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.5.15.3]



(ب) (الف)

Fig.7 The scanning electron microscope (SEM) images of cross section of welded specimen, a- Base metal, b-Stir zone

شکل 7 تصاویر SEM سطح مقطع نمونه جوشکاری شده (الف) فلز پایه و (ب) ناحیه اغتشاش

به فلز پایه بیشتر می‌باشد، اما در برخی از نمونه‌ها به علت عدم سیلان کافی فلز پایه، انسجام مواد در منطقه جوش ضعیف بوده و به سبب به وجود آمدن عیوب میکرونی، شکست از ناحیه فلز جوش رخ داده است. به این موضوع در ادامه پرداخته خواهد شد.

3-3- آنالیز پراش الکترون‌های برگشتی[1] اتصالات اصطکاکی اغتشاشی

مطالعات مربوط به مشخصه‌های مرزدانه و مطالعات تغییرات مورفولوژی در نواحی مختلف اتصالات با آنالیز EBSD انجام شد. بدین منظور، از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به EBSD بهره گرفته شد. آماده‌سازی کامل نمونه‌ها جهت آنالیز EBSD در ادامه توضیح داده می‌شود.

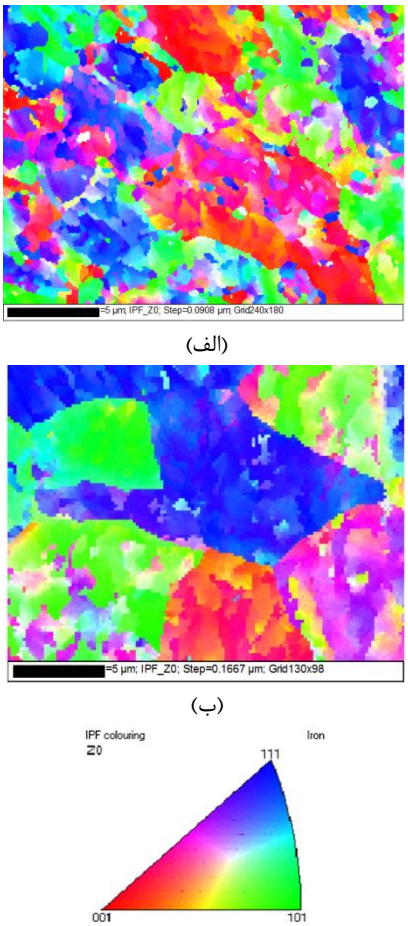
در ابتدا نمونه‌ها می‌بایستی مانت گرم شوند. پودرهای مورد استفاده جهت مانت گرم از جنس گرافیت بوده و رسانای جریان الکتریکی می‌باشند. پس از انجام مانت گرم، نمونه‌ها با خمیر الماس پولیش شده و متعاقب آن توسط محلول کلوئیدی ذرات سیلیکا با ابعاد 50 نانومتر به مدت 6 ساعت به صورت اتوماتیک (توسط دستگاه پولیش ارتعاشی) پولیش شده و پس از انجام آنالیز EBSD، داده‌های به دست آمده توسط نرم‌افزار اچ کی ال 5[2] پردازش شدند.

3-3-1- تحولات مرزدانه و تغییرات مورفولوژی در مناطق مختلف اتصال

در شکل 8 نقشه‌های قطبی معکوس[3] مربوط به مرکز ناحیه اغتشاش یافته و سمت چپ این ناحیه (درون ناحیه اغتشاش) نشان داده شده است. در این شکل همچنین مشخصه جهت‌گیری دانه‌های آن‌ها در مثلث پایین شکل نشان داده شده است. بسته به جهت‌گیری کریستالوگرافی دانه‌ها نسبت به جهت عمود بر راستای جوشکاری رنگ‌های متفاوتی به خود می‌گیرند.

با توجه به شکل 8 مشخص است که تقریباً هیچ‌گونه جهت‌گیری خاصی درون دانه‌ها در اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی رخ نداده است (وجود رنگ‌های مختلف در تصویر). به علاوه مشخص است که در جهت‌گیری کریستالوگرافی دانه‌ها در سمت چپ ناحیه اغتشاش نسبت به مرکز ناحیه اغتشاش تغییرات عمده‌ای صورت نگرفته است.

در شکل 9 توزیع اندازه دانه‌ها در دو ناحیه مورد بحث، یعنی مرکز ناحیه اغتشاش و سمت چپ این ناحیه نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل



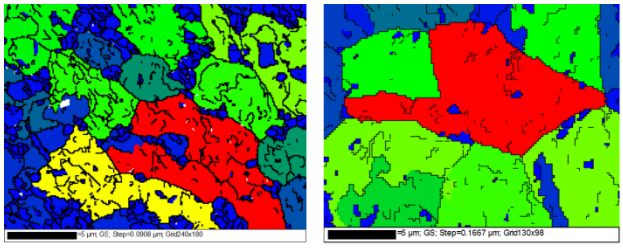
(الف)

(ب)

Fig.8 Inverse pole figures associated with characteristics of grains crystallographic orientation, a- The left side of stir zone (inside the joint area), b- The center of stir zone

شکل 8 تصاویر قطبی معکوس به همراه مشخصه جهت‌گیری کریستالوگرافی دانه‌ها (الف) سمت چپ ناحیه اغتشاش (درون ناحیه اتصال) و (ب) مرکز ناحیه اغتشاش.

نشان داده شده است، در سمت چپ ناحیه اغتشاش اندازه دانه‌ها در حدود 12 میکرومتر می‌باشد. در حالی که در مرکز ناحیه اغتشاش اندازه دانه‌ها کاهش بیشتری داشته و اندازه دانه‌ها به حدود 4.5 میکرومتر رسیده است. بنا بر نتایج به دست آمده می‌توان این‌گونه اظهار داشت که در مرکز ناحیه اغتشاش میزان تغییر شکل پلاستیک ناشی از دوران ابزار شدیدتر بوده، کرنش بیشتری در این ناحیه متمرکز شده و لذا اندازه دانه‌ها با کاهش بیشتری روبرو بوده است. این کاهش اندازه دانه ناشی از وقوع تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه اغتشاش می‌باشد. لازم به ذکر است در برخی از



(ب) (الف)

Fig.9 The grains morphology, a-The left side of stir zone, b-The center of stir zone

شکل 9 مورفولوژی دانه‌ها (الف) سمت چپ ناحیه اغتشاش یافته و (ب) مرکز ناحیه اغتشاش یافته

[1] Electron Backscatter Diffraction (EBSD)
[2] HKL CHANNEL 5
[3] Inverse Pole Figure (IPF)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.5.15.3]

پژوهش‌های صورت گرفته توسط محققان نشان داده شده است که علت اصلی ریز شدن دانه‌ها در منطقه اغتشاش یافته در اثر وقوع بازیابی دینامیکی است و نه تبلور مجدد دینامیکی در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی [21]. اما آنچه که ثابت شده است، ریز شدن دانه‌ها در اثر وقوع هر دو پدیده بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی می‌باشد. آنچه که در مورد این موضوع لازم به ذکر است آن است که فولاد مورد مطالعه، یعنی فولاد IF دارای انرژی نقص در چیده شدن بالایی است. یکی از عوامل مهم در این پدیده، انرژی نقص در چیده شدن است که با تحت تأثیر قرار دادن میزان تجزیه نابجایی‌ها، نرخ صعود و لغزش متقاطع نابجایی‌ها را تعیین می‌کند و این دو فرآیند مکانیزم‌هایی هستند که معمولاً نرخ بازیابی را کنترل می‌کنند. در فلزات با انرژی در نقص چیده شدن بالا مثل فولاد IF صعود سریع بوده و بازیابی قابل توجهی اتفاق می‌افتد. لذا در حین تغییر شکل شدیدی که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی رخ می‌دهد، به علت وقوع بازیابی دینامیکی قابل توجه ناشی از انرژی در نقص چیده شدن بالای فولاد IF، انرژی لازم جهت وقوع تبلور مجدد کاهش می‌یابد [22].

یکی از معیارهای تعیین وقوع تبلور مجدد در مواد تغییر شکل یافته، تعیین مرزدانه‌های زاویه زیاد و زاویه کم می‌باشد. در شکل 10 توزیع مرزدانه‌های زاویه زیاد (خطوط با رنگ مشکی) و مرزدانه‌های زاویه کم (خطوط با رنگ سبز) مربوط به سمت چپ ناحیه اغتشاش یافته و سمت راست این ناحیه نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود و بنا بر محاسبات صورت گرفته از طریق آنالیز تصاویر، کسر مرزدانه‌های زاویه زیاد (عدم انطباق بیش از 15 درجه) در مرکز ناحیه اغتشاش نسبت به سمت چپ این ناحیه افزایش یافته و از حدود 25 درصد به حدود 48 درصد رسیده است. دلیل این موضوع، یعنی افزایش کسر مرزدانه‌های زاویه زیاد، پیشرفت بیشتر تبلور مجدد در مرکز ناحیه اغتشاش نسبت به سمت چپ این ناحیه است [23]. این مطلب مؤید مباحث مطرح شده در بالاست که وقوع بیشتر تبلور مجدد موجب تشکیل دانه‌های ریزتر شده است.

3-4- بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری بر استحکام کششی اتصالات

پس از انجام جوشکاری با سرعت دورانی 1000 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 12 میلیمتر در دقیقه و دست یافتن به استحکام کافی و مناسب در اتصالات، آزمایش‌های جوشکاری بر طبق پارامترهای مشخص شده در جدول2 انجام شدند. پس از تولید نمونه‌های جوشکاری با پارامترهای تعیین

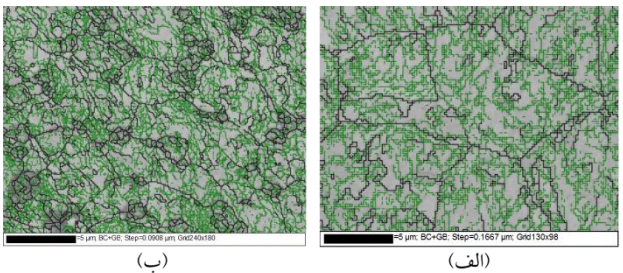


Fig.10 Representation of high-angle boundaries (Mismatch more than 15 degrees indicated with black color) and low-angle boundaries (Mismatch between 2-15 degrees indicated with green color), a- The left side of stir zone, b- the center of stir zone

شکل 10 نمایش مرزدانه‌های زاویه زیاد (عدم تطابق بیش از 15 درجه نشان داده شده با رنگ مشکی) و مرزدانه‌های زاویه کم (عدم تطابق بین 2 تا 15 درجه نشان داده شده با رنگ سبز) در (الف) سمت چپ ناحیه اغتشاش و (ب) مرکز ناحیه اغتشاش

شده برای بررسی تأثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر استحکام کششی نمونه‌های جوش داده شده، آزمایش کشش بر روی نمونه‌های جدا شده در راستای عمود بر خط جوش انجام گرفت. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، در آزمایش کشش تک محوری انجام شده، شکست نمونه در فلز پایه رخ داد که این مسئله نشان دهنده استحکام بیشتر فلز جوش نسبت به فلز پایه می‌باشد. داده‌های به دست آمده از آزمایش کشش در جدول 2 ارائه گردیده است. با استفاده از داده‌های جدول 2، در نمودارهایی که در شکل 11 نشان داده شده است نحوه تغییر استحکام کششی نمونه‌ها در سرعت پیشروی ثابت 12 میلیمتر بر دقیقه و در سرعت‌های دورانی 800، 1000 و 1200 دور در دقیقه و همچنین نحوه تغییر استحکام کششی نمونه‌ها در سرعت دورانی ثابت 1000 دور در دقیقه و در سرعت‌های پیشروی 8، 12 و 20 میلیمتر در دقیقه نشان داده شده است.

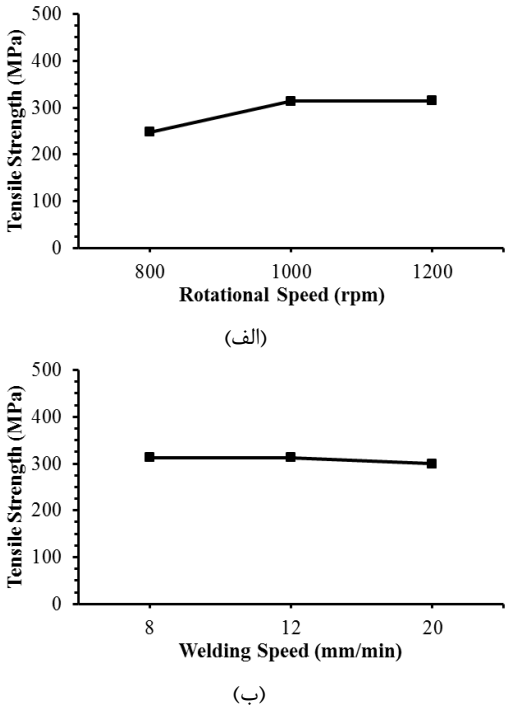


Fig.11 a-The effect of rotational speed on the tensile strength of welded specimens at feed rate of 12 mm/min, b-The effect of feed rate on the tensile strength of welded specimens at rotational speed of 1000 rpm

شکل 11 الف) تأثیر سرعت دورانی بر استحکام کششی نمونه‌ها در سرعت پیشروی 12 mm/min و ب) تأثیر سرعت پیشروی بر استحکام کششی نمونه‌ها در سرعت دورانی 1000 rpm

جدول 2 نتایج تست کشش تک محور نمونه‌های جوشکاری شده اصطکاکی اغتشاشی

Table 2. The results of uniaxial tensile test of friction stir welded specimens

جزئیات آزمایش				
شماره نمونه	پارامترهای جوشکاری		استحکام نهایی شکست اتصالات	محل وقوع شکست
	ω(rpm)	V(mm/min)	$\sigma_{f,FSW}$ (MPa)	
1	1000	8	312.85	فلز جوش
2	1000	12	313.28	فلز پایه
3	1000	20	299.57	فلز جوش
4	800	12	247.71	فلز جوش
5	1000	12	313.57	فلز پایه
6	1200	12	314.71	فلز جوش

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.5.15.3]

با توجه به نمودار شکل 11-الف می‌توان مشاهده نمود در سرعت پیشروی ثابت 12 میلیمتر بر دقیقه با افزایش سرعت دورانی از 800 تا 1200 دور در دقیقه استحکام کششی نمونه‌ها افزایش یافته است. همچنین در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه به دلیل تأمین نشدن حرارت کافی و اغتشاش مناسب، اتصال انجام شده دارای عیوب حفره در سطح و ریشه جوش می‌باشد. وجود همین عیوب در جوش باعث کم شدن استحکام کششی آن در مقایسه با فلز پایه می‌شود و لذا شکست از فلز جوش رخ می‌دهد. در شکل 12 تصویر نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی 800 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 12 میلیمتر در دقیقه و نمونه جدا شده از آن پس از آزمون کشش نشان داده شده است. همچنین در نمودار شکل11-ب می‌توان مشاهده نمود در سرعت دورانی ثابت و برابر 1000 دور در دقیقه و سرعت پیشروی ابزار از 8 تا 20 میلیمتر بر دقیقه، استحکام کششی نمونه‌ها با افزایش سرعت پیشروی ابزار ابتدا کمی افزایش و سپس کاهش یافته است. این میزان افزایش محسوس نبوده و می‌تواند به دلیل بهبود ریزساختار ماده باشد ولی با ادامه روند، تأثیر عیوب جوش بر بهبود ریزساختار غلبه کرده و باعث افت استحکام کششی جوش شده است.

3-5- بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری بر سختی اتصالات

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری بر روی سختی نمونه‌ها و امکان مقایسه‌ی سختی نمونه‌ها با یکدیگر بر روی ناحیه مرکزی جوش در چندین نقطه در هر نمونه، آزمایش میکروسختی انجام شده است. از آزمایش‌های میکروسختی انجام شده بر روی ناحیه مرکزی جوش در هر نمونه میانگین گرفته و برای فلز جوش هر نمونه یک سختی واحد در نظر گرفته شده است که با استفاده از این سختی واحد که برای هر نمونه تعیین شده تأثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر روی سختی نمونه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول 3 میانگین سختی محاسبه شده برای هر نمونه را نشان می‌دهد. برای بررسی تأثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر میکروسختی و نحوه تغییر میانگین سختی ناحیه مرکزی جوش، با استفاده از داده‌های جدول 3 نمودارهایی در شکل 13 رسم شده است. در نموداری که در شکل 13-الف نشان داده شده است، نحوه تغییر سختی در ناحیه مرکزی جوش نمونه‌ها در سرعت‌های دورانی 800، 1000 و 1200 دور در دقیقه قابل مشاهده می‌باشد. با بررسی نمودار ترسیم شده مشخص می‌شود که در سرعت پیشروی ثابت 12 میلیمتر بر دقیقه، با افزایش سرعت دورانی از 800 تا 1200 دور در دقیقه، سختی نمونه‌ها افزایش یافته است.

همچنین در نمودار شکل 13-ب نحوه تغییر سختی نمونه‌ها در



(ب) (الف)

Fig.12 a- The welded specimen with rotational speed of 800 RPM and feed rate of 12 mm/min, b- The fracture of weld metal in uniaxial tensile test of friction stir welded specimen

شکل 12 الف) نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی 800 rpm و سرعت پیشروی 12 mm/min، ب) شکست فلز جوش در آزمایش کشش تک محوری نمونه جوشکاری شده اصطکاکی اغتشاشی

جدول 3 میانگین سختی فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده اصطکاکی اغتشاشی

Table 3. The average of hardness in the weld metal of friction stir welded specimens

شماره‌ی نمونه	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	میانگین سختی در ناحیه مرکزی جوش (Vickers)
1	1000	8	189.1
2	1000	12	220.2
3	1000	20	234.8
4	800	12	97.3
5	1000	12	223.2
6	1200	12	228.8

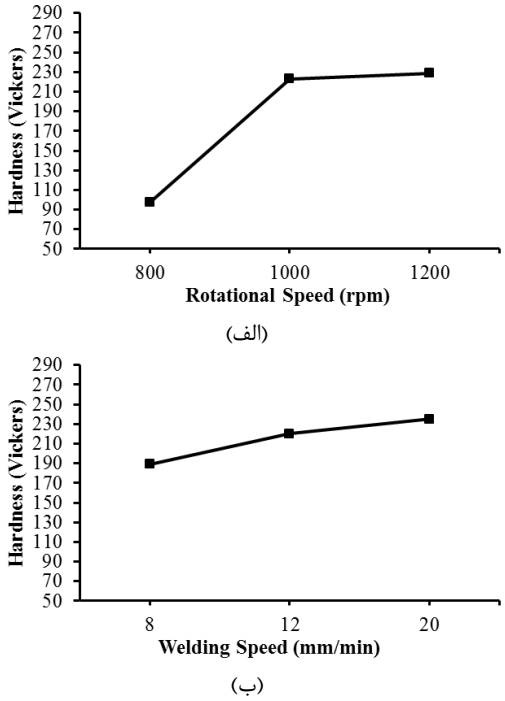


Fig.13 a- The effect of rotational speed on the hardness of welded specimens at feed rate of 12 mm/min, b- The effect of feed rate on the hardness of welded specimens at rotational speed of 1000 rpm

شکل 13 الف) تأثیر سرعت دورانی بر سختی نمونه‌ها در سرعت پیشروی 12mm/minو ب) تأثیر سرعت پیشروی بر سختی نمونه‌ها در سرعت دورانی 1000 rpm

سرعت‌های پیشروی 8، 12 و 20 میلیمتر در دقیقه نشان داده شده است که در سرعت دورانی ثابت 1000 دور در دقیقه با افزایش سرعت پیشروی از 8 تا 20 میلیمتر بر دقیقه، سختی نمونه‌ها افزایش یافته است. افزایش سختی در هر 2 نمودار نشان دهنده ریزتر شدن اندازه دانه و بهبود ریزساختار ناحیه جوش می‌باشد. نکته‌ای که باید به آن اشاره شود در تمامی نمونه‌ها، فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در فولاد IF باعث افزایش سختی فلز جوش در مقایسه با فلز پایه شده است. تغییر شکل پلاستیک شدید و گرمای حاصل از اصطکاک منجر به تبلور مجدد و به وجود آمدن ساختار ظریف و ریزدانه در ناحیه جوش می‌شود و بر طبق رابطه هال- پچ، کوچکتر شدن اندازه دانه‌ها در این ناحیه موجب افزایش سختی می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تجربی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لبه به لب ورق فولادی IF با ضخامت 0.7 میلیمتر پرداخته شد. بدین منظور اثر پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر استحکام کششی و

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.5.15.3]

سختی ناحیه جوش اتصالات جوشکاری شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج زیر از این مقاله استخراج گردیدند:

1- با انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب ورق‌های فولادی IF با ضخامت 0.7 میلیمتر مشخص گردید که می‌توان اتصال جوشکاری بین دو ورق فلزی IF با ضخامت کمتر از 1 میلیمتر ایجاد نمود که در آن استحکام فلز جوش از فلز پایه بیشتر باشد.

2- نتایج نشان داد که با افزایش سرعت دورانی ابزار، استحکام کششی نمونه‌ها افزایش یافت. همچنین نتیجه گرفته شد که با افزایش سرعت پیشروی ابزار، استحکام کششی اتصالات کاهش می‌یابد.

3- نتایج نشان داد که با افزایش سرعت‌های پیشروی و دورانی ابزار، سختی اتصالات جوشکاری شده افزایش می‌یابد.

4- بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که در اتصال جوشکاری شده، اندازه دانه‌ها در ناحیه جوش بسیار کمتر از فلز پایه بوده و به عبارتی ساختار میکروسکوپی فلز جوش، پس از فرآیند جوشکاری بهبود می‌یابد.

5- مراجع

[1] W. Thomas, *friction stir butt welding*, GB patent No. 9125978.8, 1991.
[2] R. S. Mishra, Z. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering*: R: Reports, Vol. 50, No. 1, pp. 1-78, 2005.
[3] F. Pickering, Physical metallurgy of stainless steel developments, *International Materials Reviews*,Vol. 21, No. 2, pp. 227-268, 1976.
[4] A. Rastegar, D. Ghahremani Moghadam, Kh. Farhangdoost, M. Tahani, Numerical and experimental investigation of welding speed effect on fatigue crack growth in friction stir welded 2024-T351 aluminum alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 91-100, 2016. (in Persian فارسی)
[5] W. Thomas, P. Threadgill, E. Nicholas, Feasibility of friction stir welding steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 4, No. 6, pp. 365-372, 1999.
[6] A. Ozekcin, H. Jin, J. Koo, N. Bangaru, R. Ayer, G. Vaughn, A microstructural study of friction stir welded joints of carbon steels, *Proceeding of The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Toulon, France, May 23-28, 2004.
[7] A. P. Reynolds, W. Tang, T. Gnaupel-Herold, H. Prask, Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds, *Scripta Materialia*, Vol. 48, No. 9, pp. 1289-1294, 2003.
[8] A. P. Reynolds, W. Tang, M. Posada, J. DeLoach, Friction stir welding of DH36 steel, *Science and technology of welding and joining*, Vol. 8, No. 6, pp. 455-460, 2003.
[9] C. Meran, V. Kovan, A. Alptekin, Friction stir welding of AISI 304 austenitic stainless steel, *Materials Science and Engineering Technology*, Vol. 38, No. 10, pp. 829-835, 2007.
[10] T. Saeid, A. Abdollah-Zadeh, H. Assadi, F. M. Ghaini, Effect of friction stir welding speed on the microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel, *Materials Science and Engineering*: A, Vol. 496, No. 1, pp. 262-268, 2008.
[11] P. Sathiya, S. Aravindan, A. N. Haq, Some experimental investigations on friction welded stainless steel joints, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 6, pp. 1099-1109, 2008.
[12] L. Zhou, H. Liu, Q. Liu, Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V friction stir welded joints, *Materials & Design* (1980-2015), Vol. 31, No. 5, pp. 2631-2636, 2010.
[13] K. Song, H. Fujii, K. Nakata, Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of friction stir welded Inconel 600, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 10, pp. 3972-3978, 2009.
[14] S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 2, pp. 535-549, 2011.
[15] T. Nishihara, Y. Nagasaka, Development of micro-FSW, *Proceeding of the 5th International Symposium on Friction Stir Welding*, Metz, France, pp. 14-16. 2004.
[16] A. Scialpi, L. De Filippis, P. Cuomo, P. Di Summa, Micro friction stir welding of 2024–6082 aluminium alloys, *Welding International*, Vol. 22, No. 1, pp. 16-22, 2008.
[17] M. P. Miles, J. Pew, T. W. Nelson, M. Li, Comparison of formability of friction stir welded and laser welded dual phase 590 steel sheets, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 11, No. 4, pp. 384-388, 2006.
[18] A. Scialpi, M. De Giorgi, L. De Filippis, R. Nobile, F. Panella, Mechanical analysis of ultra-thin friction stir welding joined sheets with dissimilar and similar materials, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 5, pp. 928-936, 2008.
[19] T. Saeid, A. Abdollah-Zadeh, H. Assadi, F. M. Ghaini, Effect of friction stir welding speed on the microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel, *Materials Science and Engineering*: A, Vol. 496, No. 1, pp. 262-268, 2008.
[20] P. Sathiya, S. Aravindan, A. N. Haq, Some experimental investigations on friction welded stainless steel joints, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 6, pp. 1099-1109, 2008.
[21] R. Fonda, J. Bingert, K. Colligan, Development of grain structure during friction stir welding, *Scripta Materialia*, Vol. 51, No. 3, pp. 243-248, 2004.
[22] A. Rollett, F. Humphreys, G. S. Rohrer, M. Hatherly, *Recrystallization and related annealing phenomena*, Second Edittion, pp. 244-245, Oxford: Elsevier, 2004
[23] B. Nabi, A.-L. Helbert, F. Brisset, G. André, T. Waeckerlé, T. Baudin, Effect of recrystallization and degree of order on the magnetic and mechanical properties of soft magnetic FeCo–2V alloy, *Materials Science and Engineering*: A, Vol. 578, pp. 215-221, 2013.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.5.15.3]