

بهینه سازی متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با هدف دستیابی به استحکام شکست بیشینه

مهدي صفرى^{*}، حسين مستعان^۲، آرش بختيارى^۱

۱- دانشکده مهندسي مکانيك، دانشگاه صنعتي اراک، اراک، ايران

۲- دانشکده مهندسي، گروه مواد و متالورژي، دانشگاه اراک، اراک، ايران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۱/۲۲)

چکیده

در این پژوهش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق فولادی IF به ضخامت ۷/۰ میلیمتر به صورت لب روی هم مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور خواص مکانیکی اتصالات و همچنین تغییرات ریزساختاری آنها مطالعه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی ابزار، استحکام شکست اتصالات جوشکاری شده افزایش می‌یابد. نتایج مربوط به مطالعات بافت شناسی نیز نشان می‌دهند که با انجام عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی فولاد IF، تغییری در مؤلفه‌های بافت ایجاد نمی‌شود. عدم تغییر در مؤلفه‌های بافت را می‌توان به انرژی نقض در چیده شدن زیاد فولاد IF و در نتیجه وقوع تبلور مجدد دیناميکی شدید در حین انجام فرایند نسبت داد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت دورانی ابزار از ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، نیروی نهایی شکست اتصالات حاصل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی افزایش می‌یابد. همچنین از نتایج استنباط می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی ابزار از ۵۰ تا ۱۶۰ میلیمتر بر دقیقه، نیروی نهایی شکست اتصالات کاهش می‌یابد. در نهایت، از نتایج این مقاله ثابت می‌شود که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های فولادی IF با ضخامت ۷/۰ میلیمتر، بیشترین نیروی شکست اتصالات جوش در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۵ میلیمتر بر دقیقه بدست می‌آید.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، فولاد IF، مطالعات بافت، ریزساختار، بهینه سازی.

Optimization of variables of friction stir welding process with the aim of achieving the maximum fracture strength

M. Safari¹, H. Mostaan², A. Bakhtiari¹

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

2- Faculty of Engineering, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

(Received 3 March 2016 ; Accepted 10 April 2016)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی m.safari@arakut.ac.ir

Abstract

In this research, lap joint frictionstir welding of IF sheets with thickness of 0.7 mm is investigated. For this purpose, mechanical properties of joints and also microstructural evolutions are studied. It was found that increase in tool rotational speed and decrease in travel speed results in increase in fracture stress of welded joints. Texture study indicates that no changes can be observed in texture components after friction stir welding. This phenomenon in texture components can be related to high stacking fault energy of IF steel and consequently severe dynamic recrystallization during welding. The results show with increase in the tool rotational speed between 900-1400 Rev/min, ultimate force of fracture of friction stir welded joints is increased. Also, it is concluded from results that with increase in tool travel speed between 50-160 mm/min, ultimate force of fracture of welded joints is decreased. Finally it is proved from results of this paper that in the frictionstir welding of IF sheets with thickness of 0.7 mm, maximum force of fracture of welded joints is achieved in rotational speed of 1400 Rev/min and travel speed of 105 mm/min.

Keywords: Friction stir welding, IF steel, texture study, Microstructure, optimization.

خصوصیات فولادها، به دلیل استحکام و سختی بالا و نیاز به

ابزاری با گرمایی زیاد و همچنین هزینه بالای ساخت ابزار با محدودیت همراه است. البته در سال‌های اخیر به دلیل مزایای این روش جوشکاری، محققین مطالعاتی را برای بررسی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی انواع فولادها انجام داده اند که در ادامه به چند مورد از آن اشاره می‌شود. رینولذ و همکارانش در سال ۲۰۰۳ توانستند با استفاده از ابزاری از جنس کاربید تنگستن، ورق‌های از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و فولاد کربنی ۳۶ DH به ضخامت $\frac{6}{4}$ میلیمتر را به صورت موفقیت‌آمیزی به این روش جوش دهنده و مشاهده نمودند که خواص مکانیکی جوش بهبود یافته است [۳۴]. آلتکین و همکارانش در سال ۲۰۰۶ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای اتصال ورق‌های فولادی زنگ نزن آستینیتی ۳۰۴ به ضخامت ۳ میلیمتر به کار برداشتند و مشاهده نمودند که بهترین جوش در سرعت چرخشی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۶۳ میلیمتر بر دقیقه و زاویه ابزار ۱ درجه و با استفاده از ابزاری از جنس کاربید تنگستن حاصل می‌شود [۵]. یوجی و همکارانش در سال ۲۰۰۶ تاثیر میزان کربن در فولادهای کربنی و انجام استحاله فازی را در حین

۱- مقدمه

در دو دهه گذشته، در بحث روش‌های نوین جوشکاری توجه خاصی به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که نوعی فرآیند جوشکاری حالت جامد می‌باشد در سال ۱۹۹۱ توسط موسسه جوشکاری انگلستان ابداع شد. این فرآیند جوشکاری با استفاده از یک ابزار مصرف نشدنی از جنس سخت‌تر از فلز مورد جوشکاری، که دارای حرکت همزمان دورانی و خطی است انجام می‌شود و 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 اصطکاکی اغتشاشی عمل ذوب فلزات اتفاق نمی‌افتد، دمای این فرآیند نسبت به جوشکاری حالت مذاب کمتر بوده که در نتیجه باعث کاهش شبکه حرارتی در ناحیه ذوب شده و خواص مکانیکی و کیفیت جوش را بهبود می‌بخشد [۲۱].

با توجه به مطالعات زیادی که در زمینه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مورد آلیاژهای آلومینیوم انجام شده است، استفاده از این فرآیند برای آلیاژهای با استحکام بالاتر از آلومینیوم و به

فریتی فاز اصلی، طی خنک کاری سریع ناحیه جوش به دانه هایی با ساختاری دوگانه فریتی و مارتزیتی تبدیل شدند و نمونه های جوش داده شده از استحکام کششی بهتری نسبت به فلز اصلی برخوردار می باشند [۱۱]. لی و همکارانش در سال ۲۰۱۵، فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای ورق های فولادی زنگ نزن آستینتی بدون نیکل، با نیتروژن زیاد و با ضخامت $2/4$ میلیمتر، به طور موقعت آمیزی انجام دادند و توانستند با سرعت دورانی 400 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 100 میلیمتر بر دقیقه، جوش با کیفیت بالا و خواص مطلوب ایجاد کنند [۱۲].

در تحقیقات انجام شده پیشین که به تعدادی از آنها اشاره شد، محققین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای ورق های با ضخامت بیشتر از $1/5$ میلیمتر و بیشتر به صورت لب به لب مورد بررسی قرار دادند. این در حالیست که در بسیاری از صنایع از جمله خودروسازی، ورقهایی با ضخامت های کمتر از یک میلیمتر مورد استفاده قرار می گیرند و لازم است که این ورقهای نازک به یکدیگر جوش داده شوند. در این تحقیق از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال لب روی هم ورق هایی از جنس فولاد عاری از عنصر بین نشین با ضخامت کمتر از یک میلیمتر و با استفاده از هندسه خاص ابزار (ابزار بدون پین)، استفاده می شود.

همچنین با استفاده از روش طراحی آزمایشات، متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بهینه سازی شده و یک مدل ریاضی نیز جهت پیش بینی استحکام اتصالات جوشکاری شده ارائه می شود. بررسی های ریزساختاری و مکانیکی اتصالات نیز به منظور مطالعه عمیق تر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های فولاد IF با ضخامت $0/7$ میلیمتر انجام می شوند.

انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار جوش حاصل بررسی نمودند و برای اولین بار جوش بدون عیی بdest آورند، که هیچ استحاله فازی در آن اتفاق نیفتاده بود [۶]. مران و همکارانش در سال ۲۰۰۷ به بررسی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق فولادی زنگ نزن آستینتی 304 به ضخامت 3 میلیمتر پرداختند و توانستند با سرعت دورانی 1000 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 40 تا 100 میلیمتر بر دقیقه و با استفاده از ابزاری با جنس کاریبید تنگستن این فولاد را بدون عیب جوش دهند [۷]. همچنین آن ها در سال ۲۰۰۸ به بررسی تاثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر روی ورق فولاد زنگ نزن آستینتی 304 جوش داده شده به روش اصطکاکی اغتشاشی پرداختند [۸]. ساتیا و همکارانش در سال ۲۰۰۸ به مطالعه بر روی اتصال دو نوع فولاد زنگ نزن آستینتی 304 و فولاد فریتی $AISI\ 430$ به روش اصطکاکی اغتشاشی پرداختند و مشاهده کردند که اتصالات انجام شده به روش اصطکاکی اغتشاشی از خواص مکانیکی بهتری نسبت به جوش های حالت مذاب برخوردار است [۹]. سعید و همکارانش در سال ۲۰۰۸، جوشکاری ورق فولادی دو فازی $SAF\ 2205$ به ضخامت 2 میلیمتر را تحت پارامترهای مختلف جوشکاری، با استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام دادند و نتیجه گرفتند که افزایش سرعت جوشکاری منجر به کاهش اندازه دانه های α و γ در ناحیه اغتشاش شده و این امر موجب افزایش سختی و استحکام کششی در این ناحیه می شود [۱۰]. لاکاشمینارایان و بالاسوبرامانیان در سال 2010 ، به بررسی خواص میکروسکوپی، سختی، استحکام کششی و مقاومت به ضربه اتصالات ورق فولاد زنگ نزن فریتی $M409$ به ضخامت 4 میلیمتر، که به روش اصطکاکی اغتشاشی جوش داده شده بود پرداختند. آن ها مشاهده کردند که دانه های

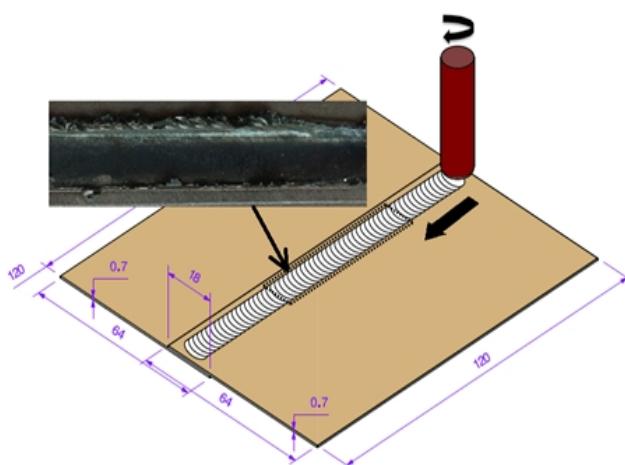
جدول ۱- ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی کاربید تنگستن مورد استفاده برای ابزار

کد استاندارد	میلگین اندازه دانه	(Wt%) ترکیب شیمیایی			استحکام شکست عرضی (TRS) N/mm	سختی ویکرز HV30	چگالی g/cm³
		WC	TaC	Co			
K20	۲/۰	۹۳/۰	۱/۰	۶/۰	۱۹۰۰	۱۶۰۰	۱۴/۹

جدول ۲- ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد IF

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)								خواص مکانیکی		
C	Ti	N	S	Al	Nb	Fe	درصد از دیاد (مگاپاسکال)	تش تشنهای (مگاپاسکال)	درصد از دیاد (مگاپاسکال)	
۰/۰۰۲	۰/۴۲۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۴۶۵	۰/۰۰۲۹	Rem	۳۰۳	۱۸۶	۴۷	

میلیمتر می‌باشد که در جدول ۲ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آنها آورده شده است. فولاد عاری از عناصر بین نشین، جز فولادهایی می‌باشد که کربن و نیتروژن بسیار کمی دارند و همچنین میزان انعطاف پذیری آنها بالاست. این نوع فولاد در دهه‌های اخیر به صورت ورق‌های نازک در صنعت خودروسازی، کاربرد گسترده‌ای یافته است.



شکل ۱- تصویر شماتیک اتصال ناشی از جوشکاری اصطکاکی
اغتشاشی به صورت لب روی هم

با توجه به انجام جوشکاری به صورت لب روی هم، فیکسچری با گیره‌های تسممه‌ای و یکپارچه برای گیرش بهتر مطابق شکل ۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق و کار تجربی

در پژوهش حاضر، هدف بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های فولادی IF با ضخامت ۰/۷ میلیمتر به صورت لب روی هم می‌باشد. در شکل ۱ شماتیک نحوه قرارگیری ورق‌ها بر روی هم به همراه ابعاد نمونه‌های اولیه و همچنین نمونه‌ای از فلز جوش در آزمایشات تجربی نشان داده شده است. با توجه به افزایش دانش و انجام آزمایش‌های مختلف، ابزارهای مختلفی با جنس‌های خاص از جمله کاربید تنگستن، نیترید بور مکعبی^۱ و ... که گرم‌ساختی بالایی دارند، به منظور استفاده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها مورد استفاده قرار گرفته است. هندسه ابزار از بخش‌های مهم و تاثیرگذار در این فرآیند می‌باشد و به خصوص در ریزساختار جوش بسیار موثر است [۱۳]. در این تحقیق از ابزاری با جنس کاربید تنگستن استفاده شده که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن در جدول ۱ آمده است. لازم به ذکر است که فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شده در این تحقیق با ابزار بدون پینی به قطر ۱۰ میلیمتر انجام می‌شود.

همانطور که قبل نیز اشاره شد ورق‌های مورد استفاده جهت جوشکاری در این تحقیق، از جنس فولاد IF با ضخامت ۰/۷

فراهم نیست و حداقل سرعت دورانی 1400 دور بر دقیقه نیز با توجه به محدودیت های فنی دستگاه فرز مورد استفاده در نظر گرفته می شود. محدوده سرعت پیشروی ابزار بین 50 تا 160 میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته می شود. دلیل این موضوع اینست که در سرعت پیشروی کمتر از 50 میلیمتر بر دقیقه با توجه به حداقل سرعت دورانی مورد استفاده، دمای ابزار به شدت افزایش یافته و امکان شکست یا دفعه شدن آن وجود دارد و در سرعت پیشروی بالاتر از 160 میلیمتر بر دقیقه نیز با توجه به حداقل سرعت دورانی مورد استفاده، امکان اختشاش مناسب برای ایجاد جوش مطلوب فراهم نیست.

محدوده زاویه ابزار بین $0/5$ تا $1/5$ درجه نیز با توجه به محدودیت های فنی در نظر گرفته شده است. با توجه به محدوده های مجاز، برای هر پارامتر سه سطح در نظر گرفته شد که این سه سطح برای سرعت دورانی ابزار عبارتند از سرعت های 900 ، 1150 و 1400 دور بر دقیقه و برای سرعت پیشروی ابزار عبارتند از 50 ، 105 و 160 میلیمتر بر دقیقه و برای زاویه ابزار نیز $0/5$ ، 1 و $1/5$ درجه در نظر گرفته می شود.

۱-۲- تعیین ماتریس طراحی آزمایش، اجرا و ثبت داده های آزمایش

همان طور که قبلاً بیان شد، به منظور استفاده از روش رویه پاسخ برای انجام طراحی آزمایش، سه سطح از هر متغیر در نظر گرفته شده و از روش طراحی آزمایش باکس-بنکن با سه فاکتور و سه سطح استفاده شد. به منظور پیش بینی رابطه میان متغیرهای جوشکاری و تنفس شکست هر یک از اتصالات ایجاد شده توسط فرآیند جوشکاری اصطکاکی اختشاشی، از یک مدل ریاضی توسعه یافته بر پایه رگرسیون بهره گرفته شده است و خواهیم داشت:

$$N_{f,FSW} = f(\omega, V, \varphi) \quad (1)$$



شکل ۲- فیکسچر مورد استفاده در آزمایشات تجربی جوشکاری اصطکاکی اختشاشی ورق های فولادی با ضخامت $0/7$ میلیمتر

در این تحقیق، به منظور انجام آزمایش های جوشکاری جهت بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند بر خواص مکانیکی و متالورژیکی فلز جوش در اتصال لب روی هم، از روش طراحی آزمایش باکس-بنکن استفاده شده و از روش رویه پاسخ نیز جهت بهینه سازی متغیرهای فرایند بهره گرفته شده است. روش باکس-بنکن در شرایطی که محدوده کاری برای هر پارامتر یکسان باشد مورد استفاده قرار می گیرد و در مقایسه با روش طراحی مرکب مرکزی نیاز به تعداد آزمایش کمتری داشته و در عین حال دقت بسیار خوبی نیز در بهینه سازی دارد. به همین دلیل از سوی بسیاری از محققین مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق، آزمایش دارای 3 متغیر اصلی، سرعت دورانی ابزار (ω)، سرعت پیشروی ابزار (V) و زاویه ابزار (Φ) می باشد. همچنین به منظور استفاده از روش رویه پاسخ برای انجام طراحی آزمایش، سه سطح از هر متغیر در محدوده مجاز در نظر گرفته می شود. محدوده سرعت دورانی ابزار، حداقل 900 و حداقل 1400 دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. دلیل این موضوع اینست که در سرعت دورانی کمتر از 900 دور بر دقیقه امکان ایجاد اتصال مطلوب

گرفتند.

جدول ۳- لیست آزمایش های انجام شده به همراه مقادیر نیروی

شکست اتصالات

شماره آزمایش	متغیرها			نیروی شکست اتصالات
	ω (Rev/min)	V (mm/min)	Φ (Degree)	
۱	۹۰۰	۵۰	۱	۷۴۰۰
۲	۱۴۰۰	۵۰	۱	۷۴۱۳
۳	۹۰۰	۱۶۰	۱	۶۵۰۰
۴	۱۴۰۰	۱۶۰	۱	۷۴۹۳
۵	۹۰۰	۱۰۵	۰/۵	۷۱۵۲
۶	۱۴۰۰	۱۰۵	۰/۵	۷۵۴۰
۷	۹۰۰	۱۰۵	۱/۵	۷۷۷۵
۸	۱۴۰۰	۱۰۵	۱/۵	۷۳۸۵
۹	۱۱۵۰	۵۰	۰/۵	۷۱۷۳
۱۰	۱۱۵۰	۱۶۰	۰/۵	۷۱۲۵
۱۱	۱۱۵۰	۵۰	۱/۵	۷۲۹۸
۱۲	۱۱۵۰	۱۶۰	۱/۵	۶۷۶۵
۱۳	۱۱۵۰	۱۰۵	۱	۷۲۳۵
۱۴	۱۱۵۰	۱۰۵	۱	۷۲۳۷
۱۵	۱۱۵۰	۱۰۵	۱	۷۲۳۰

۳- نتایج و بحث

۱-۱- ریز ساختار

در شکل ۳ تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به فلز پایه و فلز جوش (مرکز ناحیه اغتشاش یافته) نشان داده شده است. لازم به ذکر است فلز پایه مورد مطالعه در شرایط نورد سرد و سپس آئیل شده قرار دارد. ملاحظه می شود که فلز پایه از دانه های نسبتاً درشت با اندازه ای در حدود ۳۰ میکرومتر تشکیل شده است. اما در فلز جوش دانه ها تا حد زیادی ریز شده و اندازه آنها تا حدود ۴ میکرومتر کاهش پیدا کرده است. عمل اغتشاش و یا هم زدن ناشی از ابزار در حین انجام فرایند منجر به در هم شکسته شدن دانه ها شده و لذا ریز شدن دانه ها را در پی دارد. به عبارت دیگر، گرمای ایجاد شده ناشی از اصطکاک بین ابزار و

که در این رابطه، N بیانگر نیروی شکست اتصالات حاصل از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ω سرعت دورانی ابزار، V سرعت پیشروی ابزار و Φ زاویه ابزار می باشد. بر این اساس، معادله رگرسیون مرتبه دوم استفاده شده برای پیش بینی

مقادیر نیروی شکست اتصالات برآبرخواهد بود با:

$$N_{f,FSW} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^k b_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2)$$

ماتریس طراحی آزمایش که دربردارنده مقادیر کدگذاری شده متغیرها و مقادیر نیروی شکست اتصالات، $N_{f,FSW}$ ، مربوط به هر شرایط جوشکاری می باشد، در جدول ۳ نشان داده شده است. به منظور بررسی خواص ریزساختاری از آزمایش استاندارد متالوگرافی برای نمونه های جوش داده شده استفاده می شود. بدین منظور ابتدا نمونه ها از سطح مقطع جوشکاری شده با دستگاه وايرکات جدا شدند و قبل از انجام عمل تصویر برداری، مقطع نمونه ها توسط سنباده و پوليشه آماده سازی شد و برای سهولت در انجام اين کار نمونه ها با استفاده از رزين اپوكسي، مانت گرم شدند و پس از آماده سازی نمونه های مانت شده عملیات اچ نمودن مطابق استاندارد ASTM E407-07 و با استفاده از محلول نايتال ۲۰ درصد ۲۰ میلی لیتر اسید نيتريک +۸۰ ميلی لیتر اتيل الكل (کل) انجام شد. پس از چند بار آغشته کردن نمونه به محلول ذکر شده و شستشو و ارزیابی آن با ميكروسكوب نوري، در مجموع نمونه ها به مدت ۸ ثانية در اين محلول قرار داده شده و در نهايىت با MIRA II LMU/Tescan مدل تصاویر ميكروسكوبی ضبط شدند.

به منظور بررسی خواص مکانيكى نمونه های جوش داده شده، از آزمایش کشش تک محوری با سرعت ۱ ميليمتر بر دقيقه استفاده شد. همچنین برای انجام آزمایش ميكروسكختی از دستگاه KOOPA استفاده شد که برای انجام اين آزمایش، نمونه هايی از سطح مقطع جوش ها با دستگاه وايرکات جدا شدند و بعد از انجام مانت گرم به منظور تسهيل در انجام فرآيند، سنباده و پوليشه شدند و مورد آزمایش ميكروسكختی با اعمال نیروی ۲۰۰ گرم و مدت زمان نشست ۱۰ ثانية قرار

۲-۳- استحکام کششی

برای بررسی استحکام جوش های ایجاد شده، نمونه ها در راستای خط جوش و در راستای عمود بر خط جوش مطابق شکل ۴ از اتصالات جوشکاری شده جدا شدند و مورد آزمایش کشش تک محوری قرار گرفتند و نتایج حاصل از شکست نمونه های جدا شده در راستای جوش به صورت ماکریم نیرو در جدول ۳ ثبت شدند. همچنین در شکل ۵ تصویر یکی از اتصالات شکسته شده که در راستای خط جوش بوده است و بیشترین استحکام را دارد به همراه نمودار نیرو- جابجایی آن مشاهده می شود. تمامی تست های انجام شده برای نمونه های در راستای عمود بر خط جوش، از فلز پایه دچار شکست شدند که در شکل ۶ محل شکست یکی از نمونه ها به همراه نمودار نیرو- جابجایی آن قبل مشاهده است. با توجه به اینکه تمامی نمونه های در راستای عمود بر خط جوش از فلز پایه دچار شکست می شوند، نمودار نیرو- جابجایی همه آنها تقریباً مشابه نمودار شکل ۶ می باشد.

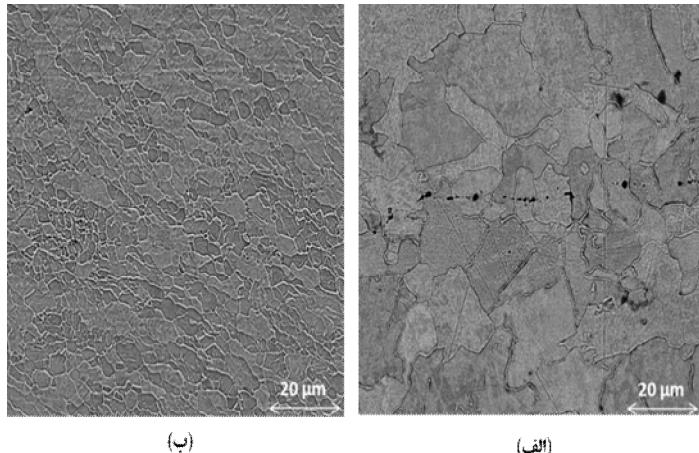


شکل ۴- نمونه های مورد استفاده در آزمایش کشش تک محور. (الف) در راستای جوش (ب) عمود بر راستای جوش

۳- سختی

نمودار تغییرات سختی در طول خط میانی مقطع جوش ایجاد شده برای یکی از نمونه ها، در شکل ۷ به صورت پروفیل

ورق ها و سیلان پلاستیک شدید ناشی از چرخش ابزار سبب می شود تا در حین انجام فرآیند، تبلور مجدد دینامیکی رخداده که منجر به تشکیل دانه های نسبتاً ریز می شود مگر آنکه گرمای ایجاد شده آنقدر شدید باشد که رشد دانه ها را در این مرحله در پی داشته باشد.



شکل ۳- تصاویر ریزساختاری حاصل از میکروسکوپ الکترونی رویشی مربوط به (الف) فلز پایه و (ب) مرکز ناحیه اتصال (فلز جوش)

محاسبات انجام شده توسط سایر محققان نشان داده است که در حین انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تغییر شکل پلاستیکی شدید (کرنش بین ۴۰ تا ۶۰) با آهنگ کرنشی در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ بر ثانیه در منطقه اتصال ایجاد می شود [۱۴]. اما برخی دیگر از محققان بر این باورند که علت ریزدانه شدن منطقه اتصال در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ناشی از بازیابی دینامیکی است و تبلور مجدد دینامیکی نمی باشد [۱۵]. در این پژوهش که آلیاژ مورد مطالعه از جنس فولاد IF با ساختار مکعبی مرکزی می باشد، مقدار انرژی نقص در چیده شدن زیاد بوده و لذا بازیابی قبل از وقوع تبلور مجدد به مقدار زیادی رخ می دهد. از این رو به نظر می رسد که در رابطه با فولاد IF، مکانیزم حاکم ریزدانه شدن در منطقه اغتشاش یافته، وقوع بازیابی دینامیکی در حین انجام فرآیند باشد.

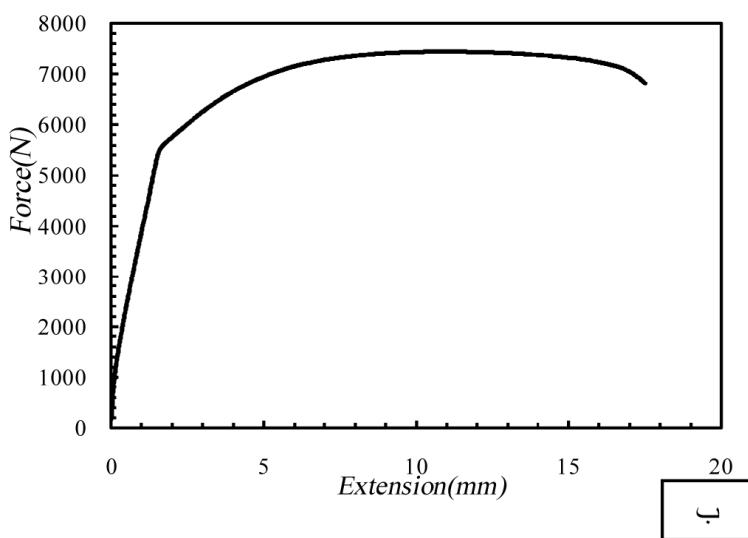
خواص به وجود آمده در حین جوشکاری را می‌توان با تحولات مؤلفه‌های بافت مرتبط دانست و بوسیله این تحولات، سازوکارهای حاکم بر تغییر برخی از خواص مشخص می‌شوند. در این بخش تغییرات به وجود آمده در مؤلفه‌های بافت، در اثر انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در شکل ۸ توابع توزیع جهت به همراه تصاویر قطبی از فلز پایه و یک نمونه جوشکاری شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است. با دقت در این تصاویر، به ویژه مقاطع $\Phi_2 = 45^\circ$ از توابع توزیع جهت مشخص می‌شود که در اثر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی فولاد IF تغییری در مؤلفه‌های بافت ایجاد نمی‌شود.

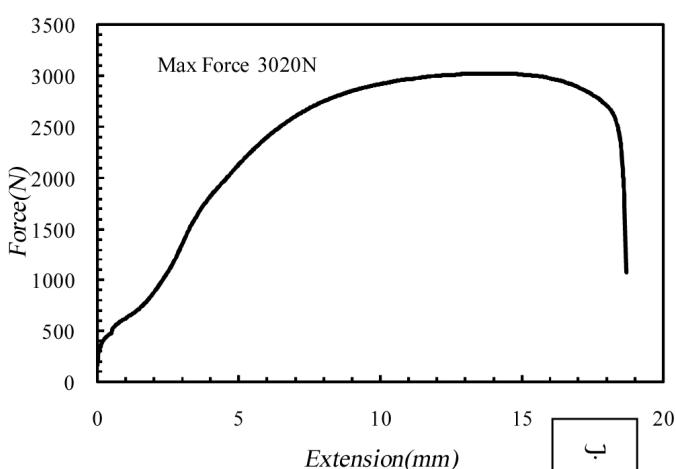
سختی ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود سختی در منطقه اغتشاش افزایش چشمگیری داشته است و این به دلیل ریزتر شدن دانه‌ها، در این منطقه می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۳ نیز ریزساختار این منطقه را نشان می‌دهد که دارای اندازه دانه کوچکتری نسبت به فلز پایه می‌باشد و مشخصاً کوچکتر شدن اندازه دانه‌ها در این ناحیه موجب افزایش سختی می‌شود.

۴-۳- مطالعات بافت شناسی

یکی از ویژگی‌های ماده که بسیاری از خواص ماده از جمله خواص مکانیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، بافت موجود در آن می‌باشد. تعیین بافت ایجاد شده در ورق پس از جوشکاری از اهمیت بالایی برخوردار است چرا که بسیاری از تغییرات



شکل ۵-الف) تصویر شکست نمونه جدا شده در راستای جوش ب) نمودار نیرو- جابجایی نمونه‌ای با بیشترین استحکام

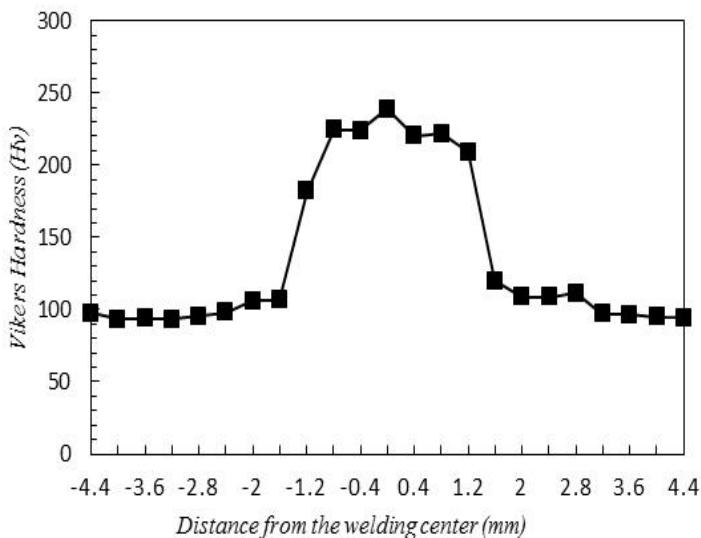


شکل ۶-الف) تصویر شکست نمونه جدا شده در راستای عمود بر خط جوش ب) نمودار نیرو- جابجایی نمونه‌های جدا شده در راستای عمود بر خط جوش.

همان گونه که در فولاد IF نیز این رفتار مشاهده می‌شود. این بدان علت است که در این مواد برای وقوع لغزش تقاطعی و در نتیجه تحمل کرنش‌های بسیار زیاد تنها به سه سیستم لغزشی نیاز است. بنابراین، کریستال‌ها در مواد با انرژی نقص در چیده شدن زیاد برای تغییر شکل نیازی نیست تا جهت گیری خود را تغییر دهند. لذا، جهت گیری دانه‌ها قبل و بعد از تغییر شکل تفاوتی ندارد. بنابر آنچه که گفته شد، می‌توان علت عدم تغییر در مؤلفه‌های بافت فولاد IF در اثر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را امری طبیعی دانست.

۵-۵-۳- مورفولوژی سطح شکست

در شکل ۹ تصاویر شکست نگاری حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به ورق‌های IF جوشکاری شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است. با دقت در این تصاویر می‌توان دریافت که این سطوح از دو منطقه قابل تفکیک از هم تشکیل شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در ناحیه بالایی و پایینی (ورق بالا و ورق پایین) اتصالات، دیمپل‌های زیادی وجود دارند، که این موضوع نشان از تغییر شکل پلاستیک قابل ملاحظه، قبل از شکست می‌باشد. قسمت مربوط به لبه اتصال ورق بالایی و پایینی نیز که آثار شکست ترد در آن مشهود است، دارای ظاهری تورقی بوده که نشان از ترد بودن این ناحیه دارد. عوامل متعددی وجود دارند که سازوکار شکست مواد را تحت تاثیر قرار می‌دهند. به عنوان مثال، می‌توان به حضور و یا عدم حضور آخال‌ها، ناخالصی‌ها و ذرات بین فلزی و یا به طورکلی وجود هر گونه ناهمگنی در ترکیب شیمیایی که سیستم‌های لغزش در ماده را تحت تاثیر قرار می‌دهند، اشاره نمود. برخی از عوامل نظیر تابش پرتوهای پر انرژی (بمباران نوترونی و یا الکترونی) نیز می‌توانند رفتار شکست مواد را به شدت دگرگون سازند. وجود



شکل ۷- پروفیل سختی یکی از نمونه‌های جوشکاری شده

تنها تغییری که مشاهده می‌شود آن است که شدت بافت و یا همان جهت گیری دانه‌ها اندکی کاهش پیدا کرده است. با توجه به تغییر شکل شدیدی که در حین فرآیند در فلز پایه به وجود می‌آید، انتظار می‌رود که تغییرات شدیدی در مؤلفه‌های بافت پدید آید و مؤلفه‌های بافت تبلور مجدد (فلز پایه در حالت آنیل شده بوده است)، جای خود را به مؤلفه‌های بافت تغییر شکل بدهد. اما در مورد فولاد IF چنین اتفاقی رخ نداده است. با مراجعه به منابع [۱۶]، مشخص می‌شود که فولاد IF دارای نقص در چیده شدن بالایی می‌باشد. این بدان معناست که فواصل نابجایی‌های شاکلی با یکدیگر کم بوده و لذا لغزش تقاطعی نابجایی‌ها به راحتی صورت می‌گیرد. لغزش در مواد با انرژی نقص در چیده شدن بالا از طریق لغزش نابجایی‌ها انجام می‌شود. از آنجا که نقص چیدمان اتم‌ها در این حالت اندک است، نابجایی‌های پیچی می‌توانند به صورت تقاطعی لغزش کنند. دیلامور [۱۶] نشان داده است که در این حالت، در اثر تنش‌های کم نیز لغزش تقاطعی صورت می‌گیرد. همین موضوع سبب می‌شود تا مواد با انرژی نقص در چیده شدن بالا دارای انعطاف پذیری بسیار زیادی باشند،

در نتیجه شکست ترد اتصال فراهم گردد.

فاق در سطح ماده نیز، به علت ایجاد تنش های سه محوره، سیلان پلاستیک ماده و در نهایت رفتار شکست ماده را تحت تاثیر قرار می دهد [۱۷].

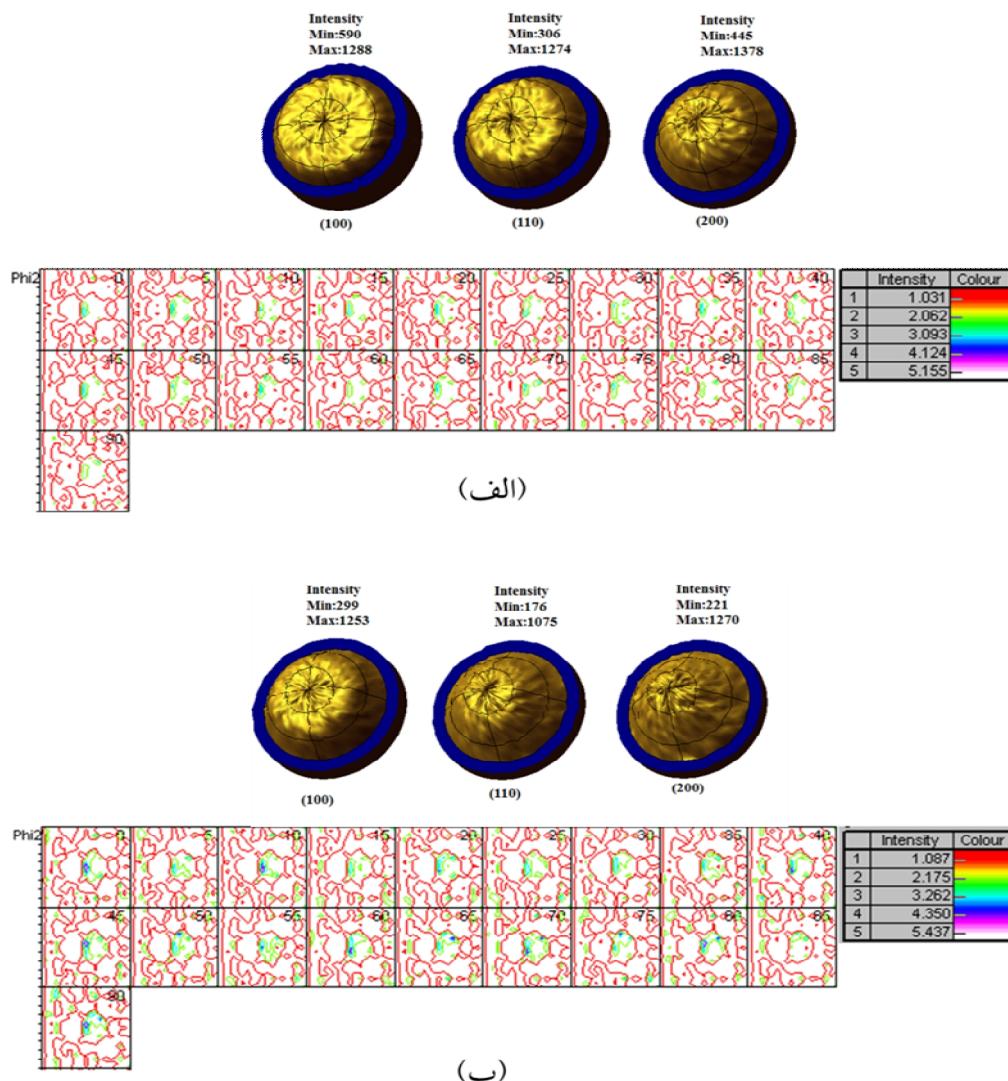
۴-بحث

۱-۴- بهینه سازی متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی

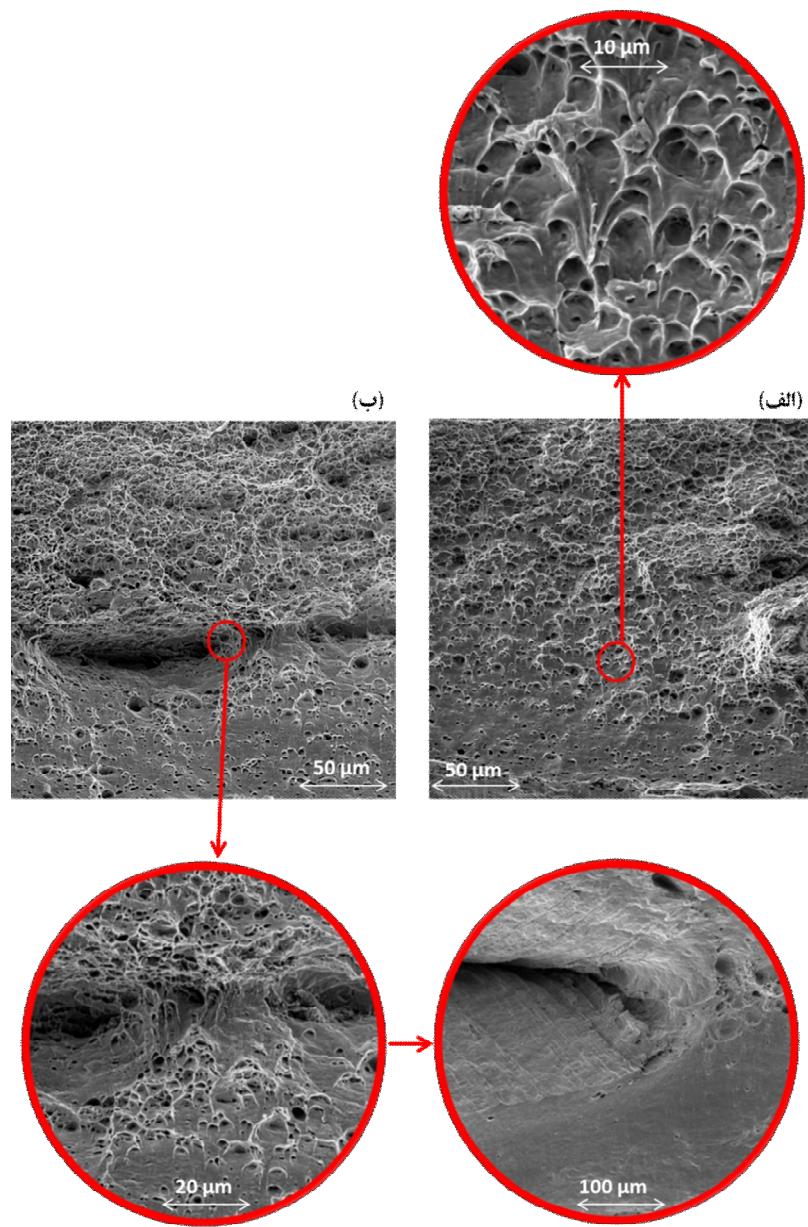
اغتشاشی با هدف دستیابی به استحکام شکست پیشینه

با توجه به پیچیدگی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، رسیدن به استحکام مناسب مقاطع جوش نیازمند مطالعه دقیق تر بر پایه مدل سازی ریاضی می باشد. پیچیدگی فرآیند بدین علت است که تغییرات اندک در متغیرهای متعدد فرآیند، سبب می شود تا هندسه اتصال، ریزساختار منطقه اتصال، میزان تنش پسماند و ... به شدت تحت تاثیر قرار گرفته

با توجه به عاری بودن فولادهای مورد استفاده از آخال ها و ناخالصی ها، عدم حضور عناصری با میل تشکیل ترکیبات بین فلزی و همچنین عدم قرارگیری نمونه ها در معرض پرتوهای پر انرژی، می توان این گونه اظهار داشت که وجود ریزناپیوستگی های احتمالی در مرز اتصال دو ورق بالایی و پایینی (ناشی از عدم اختلاط کامل مواد) به عنوان فاق و یا ریزترک عمل نموده و سبب می شود در حین آزمون کشش تک محوره، در مراحل انتهایی آزمون، تنش های سه محوره ایجاد شوند و شرایط برای تغییر رفتار سیلان پلاستیک ماده و



شکل ۸- توابع توزیع جهت و تصاویر قطبی مربوط به (الف) فلز پایه و (ب) فلز جوش (ناحیه اغتشاش).



شکل ۹- تصاویر شکست نگاری مربوط به یک نمونه جوشکاری شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، (الف): قسمت بالایی ناحیه جوش و (ب): مرکز ناحیه جوش.

این بخش از روش رویه پاسخ جهت بهینه سازی متغیرهای فرایند بهره گرفته شده است.

۲-۴- متغیرهای تاثیرگذار فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی اتصال ها

و در نتیجه خواص مکانیکی اتصالات به وجود آمده دستخوش تغییرات زیاد و بعضًا نامطلوب شود. لذا ضروری است تا متغیرهای تاثیرگذار بر کیفیت اتصالات به گونه ای انتخاب و با یکدیگر ترکیب شوند تا افت استحکام شکست در اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به حداقل ممکن کاهش پیدا کرده و شرایط جوشکاری بهینه تعیین شود. بدین منظور، در

بیش از ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است. بدین معنا که اگر مقدار P-value در آنالیز واریانس برای یک متغیر کمتر از ۵ درصد باشد، آن متغیر به عنوان یک متغیر تاثیرگذار در نیروی شکست نهایی جوش محسوب می‌شود. نتایج آنالیز واریانس برای نیروی شکست اتصالات، در جدول ۴ آورده شده است. مطابق با نتایج به دست آمده از آنالیز واریانس، پس از معین کردن ضرایب با اهمیت و حذف ضرایب بی اهمیت، می‌توان مدل ریاضی را برای پیش‌بینی ارتباط میان نیروی شکست جوش و متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه نمود. مدل ریاضی به دست آمده با توجه به آنالیز واریانس (به صورت کدگذاری شده) در زیر آورده شده است:

$$N_{f,FSW} = 7234 + 200.5\omega - 175.13V + 120\omega^2 - 152.63V^2 + 245\omega \times V - 121.25V \times \varphi$$

۴-۴- اعتبارسنجی مدل ریاضی ارائه شده

صحت مدل ریاضی ارائه شده در پیش‌بینی مقدار نیروی شکست اتصالات توسط آنالیز واریانس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به این آزمون در جدول ۵ آورده شده است. نتایج به دست آمده از محاسبات نشان می‌دهد که معادله رگرسیونی ارائه شده در معادله (۲) برای اجزای خطی، مرتبه دوم و تعاملات بین متغیرها معتبر می‌باشد. همچنین اعتبار مدل ریاضی ارائه شده با رسم نمودارهای باقیمانده برای خروجی نیروی شکست اتصالات نیز مورد بررسی قرار گرفت که این نمودارها در شکل ۱۰ نشان داده اند. به عبارتی می‌توان گفت که شرط تایید نتایج آنالیز واریانس این است که باقیمانده‌ها به صورت نرمال توزیع شوند، خط مستقل بوده و واریانس ثابت باشد. نرمال بودن توزیع خط توسط نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده که در شکل ۱۰ نشان داده شده است بررسی می‌شود. پراکندگی روند توزیع نقاط اطراف خط راست مورب، نشان دهنده نرمال بودن توزیع مقادیر باقیمانده یا همان خطاهاست. به عبارت دیگر، نمودار احتمال نرمال

با توجه به ارتباط میان خواص مکانیکی اتصالات و ریزساختار، هر متغیری که میزان اغتشاش، شرایط دمایی (شیب دمایی، دمای بیشینه و توزیع دما)، سرعت سرد شدن و هندسه جوش را تحت تاثیر قرار دهد، می‌تواند کیفیت اتصالات از منظر خواص مکانیکی را دستخوش تغییرات گسترده سازد. بر اساس مطالعات صورت گرفته و انجام آزمایشات مختلف در آزمایشگاه، سه متغیر سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و زاویه ابزار، پروفیل حرارتی و کرنشی قطعه را تحت تأثیر قرار داده و به تبع آن ریزساختار، ابعاد منطقه جوش و هندسه مقطع جوش را تغییر می‌دهند. لذا، این متغیرها به عنوان عوامل اصلی کنترل کننده خواص مکانیکی اتصالات مطرح می‌باشند. پس از تعیین مهم‌رین متغیرهای تاثیرگذار بر خواص مکانیکی اتصالات با انجام آزمایش‌های مختلف و با توجه به خواص فیزیکی و حرارتی ورق‌های فولاد IF، مقادیر بیشینه و کمینه هر یک از متغیرها تعیین می‌شوند. در این بخش نیز با انجام آزمایش‌هایی و ثابت نگاه داشتن یک متغیر و تغییر دادن متغیرهای دیگر، محدوده متغیرهای تعیین شده که بتوان در آن محدوده‌ها اتصالاتی عاری از عیوب بدست آورد، تعیین می‌شود. بنابر آزمایشات انجام شده، محدوده مجاز تغییرات برای هر یک از متغیرهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه ابزار، با توجه به محدودیت‌های بیان شده در بخش قبلی، به ترتیب برابر با ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، ۵۰ تا ۱۶۰ میلیمتر بر دقیقه و ۰/۵ تا ۱/۵ درجه می‌باشد.

۴-۳- توسعه مدل ریاضی

در توسعه یک مدل ریاضی که بیان گر ارتباط میان متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و نیروی شکست اتصالات هر یک از نمونه‌ها می‌باشد، حد بحرانی برای اهمیت و میزان تاثیرگذاری هر یک از ضرایب متغیرها با اعتبار

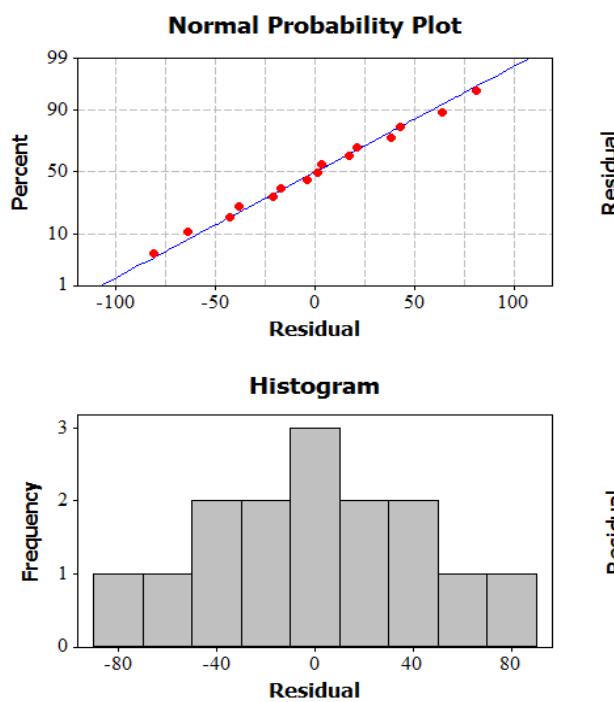
جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس برای خروجی نیروی شکست اتصالات نمونه های جوشکاری شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	۷۷۳۴/۰۰	۴۴/۲۰	۱۶۳/۶۷۷	۰/۰۰۰
ω	۲۰۰/۵۰	۲۷/۰۶	۴۰۸/۷	۰/۰۰۱
V	-۱۷۵/۱۳	۲۷/۰۶	-۶/۴۷۱	۰/۰۰۱
φ	-۴۵/۸۷	۲۷/۰۶	-۱/۶۹۵	۰/۱۰۱
$\omega^*\omega$	۱۲۰/۱۲	۳۹/۸۴	۳/۰۱۵	۰/۰۳۰
V^*V	-۱۵۲/۶۳	۳۹/۸۴	-۳/۸۳۱	۰/۰۱۲
$\varphi^*\varphi$	۸/۸۷	۳۹/۸۴	۰/۲۲۳	۰/۸۳۳
ω^*V	۲۴۵/۰۰	۳۸/۲۸	۶/۴۰۱	۰/۰۰۱
$\omega^*\varphi$	-۹۴/۵۰	۳۸/۲۸	-۲/۴۶۹	۰/۰۵۷
$V^*\varphi$	۱۲۱/۲۵	۳۸/۲۸	-۳/۱۶۸	۰/۰۲۵

جدول ۵- نتایج آزمون آنالیز واریانس برای تعیین صحت و اعتبار مدل ریاضی ارائه شده.

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	۹	۱۰۶۹۴۷۹	۱۰۶۹۴۷۹	۱۱۸۸۳۱	۲۰/۲۸	۰/۰۰۲
Linear	۱	۵۸۳۷۸۸	۵۸۳۷۸۸	۱۹۴۰۹۶	۳۳/۲۱	۰/۰۰۱
ω	۱	۳۲۱۶۰۲	۳۲۱۶۰۲	۳۲۱۶۰۲	۵۴/۸۸	۰/۰۰۱
V	۱	۲۴۵۳۵۰	۲۴۵۳۵۰	۲۴۵۳۵۰	۴۱/۸۷	۰/۰۰۱
φ	۱	۱۶۸۳۶	۱۶۸۳۶	۱۶۸۳۶	۲/۸۷	۰/۱۰۱
Square	۲	۱۰۱۰۶۴	۱۰۱۰۶۴	۵۰۳۵۵	۸/۰۹	۰/۰۲۰
$\omega^*\omega$	۱	۶۳۴۷۵	۵۳۲۸۰	۵۳۲۸۰	۹/۰۹	۰/۰۳۰
V^*V	۱	۸۷۲۹۸	۸۶۰۱۰	۸۶۰۱۰	۱۴/۶۸	۰/۰۱۲
$\varphi^*\varphi$	۱	۲۹۱	۲۹۱	۲۹۱	۰/۰۵	۰/۸۳۳
Interaction	۲	۳۳۴۶۲۷	۳۳۴۶۲۷	۱۱۱۰۴۲	۱۹/۰۳	۰/۰۰۴
ω^*V	۱	۲۴۰۱۰۰	۲۴۰۱۰۰	۲۴۰۱۰۰	۴۰/۹۷	۰/۰۰۱
$\omega^*\varphi$	۱	۳۵۷۲۱	۳۵۷۲۱	۳۵۷۲۱	۶/۱۰	۰/۰۵۷
$V^*\varphi$	۱	۵۸۸۰۶	۵۸۸۰۶	۵۸۸۰۶	۱۰/۰۴	۰/۰۲۵
Residual Error	۵	۲۹۳۰۰	۲۹۳۰۰	۵۸۶		
Lack-of-Fit	۲	۲۹۲۷۴	۲۹۲۷۴	۹۷۵۸	۷۵۰/۶۲	۰/۰۰۱
Pure Error	۲	۲۶	۲۶	۱۳		
Total	۱۴	۱۰۹۸۷۸۰				

سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بیشترین تاثیر را بر مقادیر نیروی شکست جوش دارند. در واقع، تنها تاثیر این دو ریاضی ارائه شده می‌توان دریافت که در میان متغیرها، متغیر بر روی خروجی آزمایش با اهمیت می‌باشد و متغیر دیگر، یعنی زاویه ابزار به عنوان متغیر کم اهمیت و یا بی معنا تلقی شده و تغییر آن تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر نیروی شکست اتصالات نمی‌گذارد. از طرفی، تاثیر سرعت دورانی بر نیروی شکست بیشتر از تاثیر سرعت پیشروی ابزار می‌باشد. تاثیر هر یک از این متغیرها به تنها یکی بر روی نیروی شکست اتصالات در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، با افزایش سرعت دورانی ابزار از ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه، نیروی نهایی شکست اتصالات حاصل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش سرعت پیشروی ابزار از ۵۰ تا ۱۶۰ میلیمتر بر دقیقه، نیروی شکست اتصالات با کاهش روبروست. روند افزایش یا کاهش نیروی شکست اتصالات را می‌بایستی در مقدار حرارت ورودی به اتصالات و میزان اغتشاش و در هم آمیخته شدن ورق‌های بالایی و پایینی در یکدیگر جستجو نمود.

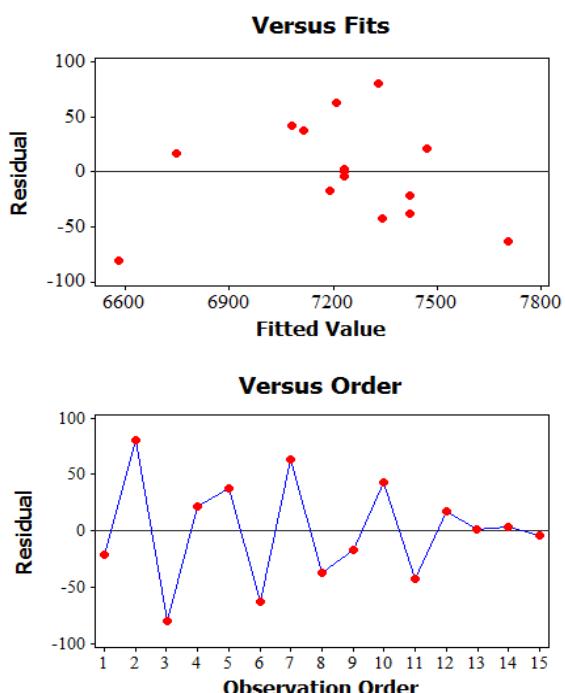


شکل ۱۰- نمودارهای احتمال نرم‌مربوط به خروجی نیروی شکست اتصالات نمونه‌های جوشکاری شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

نشان داده شده برای نیروی شکست اتصالات بیان گر این موضوع است که باقیمانده‌ها با تقریب خوبی بر روی یک خط راست قرار می‌گیرند که دلالت بر توزیع نرمال خطاطها دارد. دو فرض دیگر نیز توسط نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده در شکل ۱۰ بررسی می‌شوند. نبود ساختار مشخص در نقاط نمودار، ثابت بودن واریانس و مستقل بودن آن را نشان می‌دهد. ضریب تعیین، R^2 ، به منظور مشخص نمودن میزان نزدیکی داده‌های حاصل از آزمایش به داده‌های پیش‌بینی شده توسط رابطه (۳) تعیین شد. نتیجه به دست آمده حاکی از آن است که مقدار R^2 برابر با $0.97/33$ می‌باشد. بنابراین می‌وان نتیجه گرفت که تطابق بسیار خوبی بین مقادیر به دست آمده از آزمایش و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل ریاضی وجود دارد.

۵- تحلیل نتایج

در پایان به تحلیل متغیرهای با اهمیت و تاثیرگذار بر خروجی آزمایش، یعنی نیروی شکست اتصالات ایجاد شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی پرداخته می‌شود. با دقت در مدل



۱-۵- آنالیز اثر تعاملی سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار

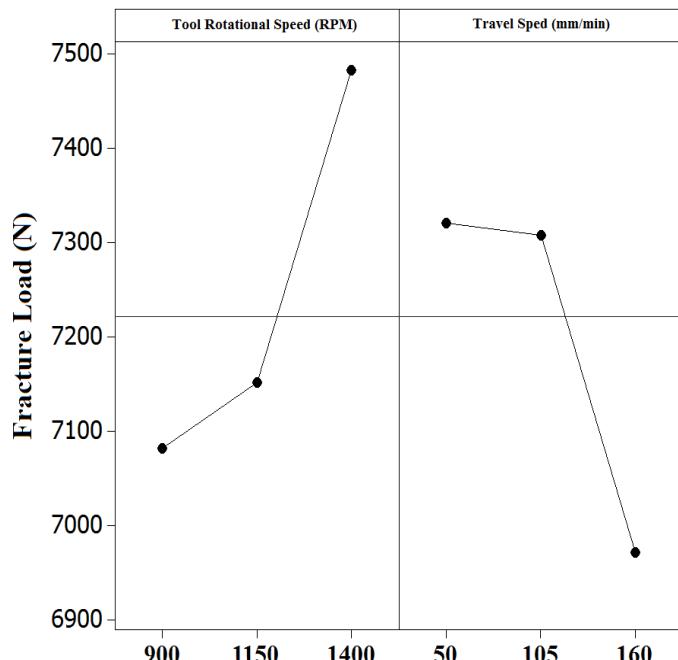
منحنی های هم ترازی نقش بسیار مهمی در مدل سازی به روش رویه پاسخ، بازی می کنند. با رسم منحنی های هم ترازی توسط نرم افزار Minitab می توان با مشخصه یابی شکل سطوح درباره استقلال و یا عدم استقلال متغیرها اظهار نظر نمود. اگر منحنی هم ترازی به دست آمده به صورت دایروی باشد، می توان گفت که اثر هر یک از متغیرها مستقل از هم است. اما اگر به صورت بیضوی باشد، احتمال تعامل بین متغیرها وجود دارد. در ادامه با استفاده از منحنی های هم ترازی به دست آمده از آنالیز، در رابطه با اثر تعاملی متغیرها بحث خواهد شد. همان گونه که ملاحظه می شود، روند افزایشی نیروی شکست اتصالات با افزایش سرعت دورانی ابزار و کاهش سرعت پیشروی ابزار در نمودار هم ترازی نشان داده شده در شکل ۱۲ کاملاً مشهود است.

با توجه به توضیحات بالا می توان این گونه نتیجه گرفت که بین این دو متغیر یعنی سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار تعامل وجود دارد. به عبارت دیگر، در سرعت های دورانی کمتر، روند کاهش نیروی شکست با افزایش سرعت پیشروی ابزار سریع تر می باشد. در مجموع می توان این گونه اظهار ابزار را در نامطلوب ترین ترکیب از متغیرهای فرایند داشت که نامطلوب ترین ترکیب از متغیرهای اصطکاکی احتشامی ترکیبی است که شامل سرعت جوشکاری اصطکاکی احتشامی ترکیبی است که شامل سرعت پیشروی بالا و سرعت دورانی پایین باشد. این شرایط منجر به کاهش سیلان پلاستیک ورق ها و به تبع آن احتمال ایجاد حفره ها در منطقه اتصال شده که این موضوع کاهش نیروی شکست اتصالات ایجاد شده را در پی خواهد داشت.

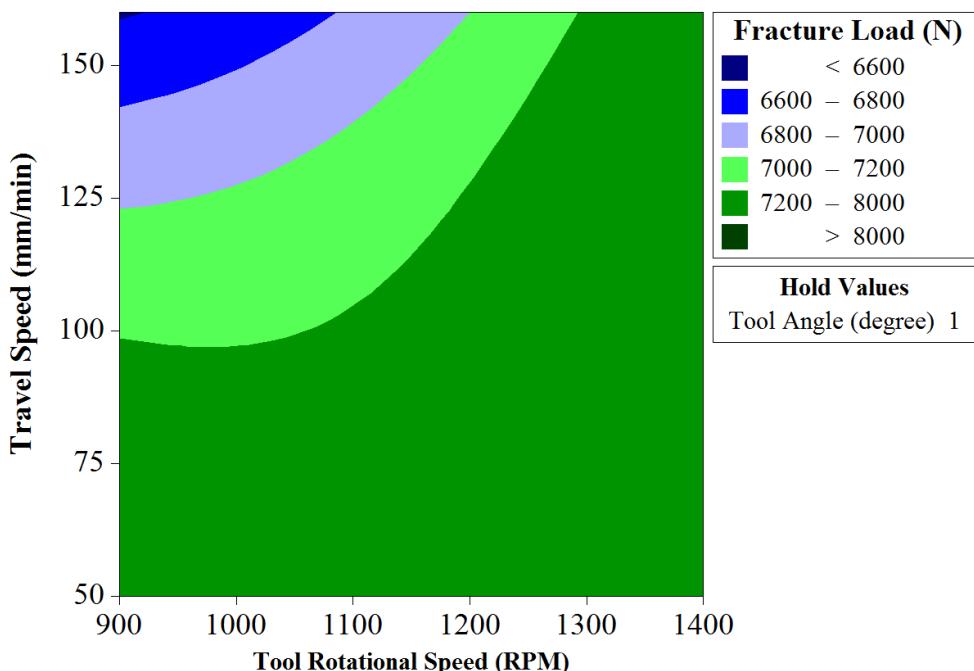
۶-نتیجه گیری

در این تحقیق اتصال لب روی هم ورق های فولاد IF با ضخامت ۰/۷ میلیمتر با استفاده از ابزاری از جنس کاربید تنگستن و با هندسه ساده (بدون پین) به روش جوشکاری اصطکاکی احتشامی به صورت موفقیت آمیزی انجام گرفت.

علت کم بودن مقدار نیروی شکست اتصالات جوشکاری شده با سرعت دورانی ۹۰۰ دور بر دقیقه آن است که نیروی محرکه کافی برای هم زدن و یا به عبارتی آمیخته شدن ورق ها در یکدیگر فراهم نبوده و لذا اتصالی نه چندان قوی، بین ورق بالایی و پایینی ایجاد می شود. اما در سرعت های دورانی بالاتر، به علت ایجاد حرارت بیشتر ناشی از چرخش سریع تر ابزار، ورق بالایی و پایینی به خوبی در یکدیگر آمیخته شده و لذا پیوند مستحکم تری بین ورق ها ایجاد می شود. از سوی دیگر، ملاحظه می شود که اتصال ایجاد شده در سرعت پیشروی ۵ میلیمتر بر دقیقه بیشترین نیروی شکست را دارد. در این حالت، پیشروی آهسته ابزار سبب می شود تا حرارت به اندازه کافی ایجاد شده و سیلان ماده به راحتی رخ دهد. سهولت سیلان ماده در این حالت سبب می شود تا اتصال بین دو ورق به خوبی صورت گرفته و عیوب احتمالی از قبیل حفره های کرمی شکل و تونلی ایجاد نشوند. اما با افزایش سرعت پیشروی و به دنبال آن کاهش سیلان پلاستیک ماده، شرایط برای ایجاد اتصالی مطلوب و با استحکام وجود نخواهد داشت.



شکل ۱۱- تأثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر نیروی نهایی شکست.



شکل ۱۲- تاثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر نیروی نهایی شکست.

می یابد.

- از نتایج ثابت شد که با افزایش سرعت پیشروی ابزار از ۵۰ تا ۱۶۰ میلیمتر بر دقیقه، نیروی شکست اتصالات کاهش می یابد.

- نتایج نشان دادند که بین متغیرهای سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار اثر تعاملی وجود دارد و در سرعت-های دورانی کمتر، روند کاهش نیروی شکست با افزایش سرعت پیشروی ابزار سریع تر می شود .

نتایج نشان دادند که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های فولادی IF با ضخامت ۰/۷ میلیمتر، بیشترین نیروی لازم برای شکست اتصالات جوش در سرعت دورانی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۵ میلیمتر بر دقیقه بدست آمد.

- نتایج حاصل از مطالعات بافت شناسی نشان دادند که در اثر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی فولاد IF تغییری در مؤلفه های بافت ایجاد نمی شود. با توجه به این نکته که فولاد دارای نقص در چیده شدن زیاد است، بنابراین،

آزمایش های لازم جهت بررسی تغییرات ریزساختار، استحکام اتصالات، سختی و بافت شناسی نمونه ها انجام شد و تاثیر سه پارامتر مهم فرآیند جوشکاری از جمله سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه ابزار بر روی نیروی شکست اتصالات با استفاده از روش طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- در میان متغیرها، سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بیشترین تاثیر را بر مقادیر نیروی شکست اتصالات در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های فولادی IF با ضخامت ۰/۷ میلیمتر دارند .

- نتایج نشان دادند که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تغییر زاویه ابزار تاثیر قابل ملاحظه ای بر نیروی شکست اتصالات نمی گذارد.

از این پژوهش نتیجه گرفته شد که با افزایش سرعت دورانی ابزار از ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه نیروی نهایی شکست اتصالات حاصل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی افزایش

austenitic stainless steels by friction stir welding method". VII'nci Ulusal Kaynak Teknolojist Kongresi 2008: 157-70.

9-Sathiya P, Aravindan S, Noorul Haq A. "Some experimental investigations on friction welded stainless steel joints". Mater Des, 2008; 29:1099-109.

10-Saeid T, Abdollah-zadeh A, Assadia H, Malek Ghainia F. "Effect of friction stir welding speed on microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel". Mater Sci Eng, A 2008, 496 (1-2): 262-8.

11-Lakshminarayanan A K., Balasubramanian V., "An assessment of microstructure, hardness, tensile and impact strength of friction stir welded ferritic stainless steel joints", Mater Des 2010; 31: 4592-600.

12-H.B. Li , Z.H. Jiang , H. Feng, S.C. Zhang , L. Li , P.D.Han, R.D.K. Misra , J.Z. Li. "Microstructure, mechanical and corrosion properties of friction stir welded high nitrogen nickel-free austenitic stainless steel" . Materials and Design 84 (2015) 291-299.

13-Rai R., De A., Bhadeshia H. K. D. H., DebRoy T., "Review: friction stir welding tools", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 16, pp. 3252-342, 2011.

14-Alidokht, S.A., Abdollah-zadeh, A., Soleymani, S., Saeid, T., Assadi, H., "Evaluation of microstructure and wear behavior of friction stir processed cast aluminum alloy", Materials Characterization, Vol. 63, pp. 90-97, 2012.

15-Mishra, R., Ma, Z., Charit, I., "Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite", Materials Science and Engineering: A, Vol. 341, pp. 1-4, 2003.

16-Dillamore, I., Butler, E., Green, D., "Crystal rotations under conditions of imposed strain and the influence of twinning and cross-slip", Metal Science Journal, Vol. 2, pp. 161-167, 1968.

17-Calcagnotto, M., Adachi, Y., Ponge, D., Raabe, D., "Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite / martensite dual-phase steels and the effect of aging", Acta Materialia, Vol. 59, pp. 658-670, 2011.

کریستال ها برای تغییر شکل نیازی نیست تا جهت گیری خود را تغییر دهند. لذا، جهت گیری دانه ها قبل و بعد از تغییر شکل تفاوتی ندارد و می توان علت عدم تغییر در مؤلفه های بافت فولاد IF در اثر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را امری طبیعی دانست.

منابع

- 1- R.S. Mishra and Z.Y. Ma, "Friction Stir welding and processing". Mater Sci Eng, R 2005;50:1-78.
- 2- Emam, S. A. and Domiaty, A. E., "A refined energy, based model for friction-stir welding", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 53, No., pp. 1016-1022, 2009.
- 3- Reynolds A. P., Tang W., Gnaupel-Herold T., Prask H., "Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds", Scripta Materialia, Vol. 48, pp. 1289-1294, 2003.
- 4- Reynolds A. P., Tang W., Posada M., DeLoach J., "Friction stir welding of DH36 steel", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 8, pp. 455-460, 2003.
- 5-Alptekin A. "The effect of tool rotational speed on welding of AISI 304 austenitic stainless steels by friction stir welding". Temmuz: Pamukkale Universitesi FBE; 2006.
- 6-Ueji R., Fujii H., Cui L., Nishioka A., Kunishige K., Nogi K., "Friction stir welding of ultrafine grained plain low-carbon steel formed by the marten site process", Materials science and Engineering A, Vol. 423, pp. 324-330, 2006.
- 7-Meran C, Kovancı V, Alptekin A. "Friction stir welding of AISI austenitic stainless steel (2007)". Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2007; 37 (10): 829-35.
- 8-Meran C, Canyurt OE. "The effect of tool rotational speed and traverse speed on welding of AISI 304