علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال سوم، شماره 2، پاییز و زمستان 1396، صفحه 89-79

بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی آلیاژهای نانو/فوق ریزدانه آلومینیوم- اسکاندیم در جوشکاری اصطکاکی– اختلاطی به وسیله طراحی آماری آزمایش

محمد یوسفیه[1]، مرتضی تمیزی فر[1*]، سید محمدعلی بوترابی[1]، احسان برهانی[2]

1- دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

2- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه سمنان، ایران

(دریافت مقاله: 1396/05/14 ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: 1396/07/03)

چکیده

در این تحقیق از روش طراحی آماری آزمایش (DOE) تحت عنوان روش تاگوچی برای بهینه‌سازی عوامل موثر بر خواص مکانیکی آلیاژهای نانو/فوق ریزدانه آلومینیوم- اسکاندیم در جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی (FSW) استفاده شده است. شرایط بهینه به دست آمده از این روش منجر به بهترین خواص مکانیکی شد. نتایج آنالیز واریانس و تاگوچی نشان داد که سرعت دورانی ابزار با درصد تاثیر 60/08% به عنوان موثرترین پارامتر بر خواص مکانیکی قطعات جوش آلیاژهای آلومینیوم-اسکاندیم است. همچنین سرعت جوشکاری با درصد تاثیر 35/79% در رتبه دوم قرار داشت در حالیکه پارامتر زاویه ابزار با قطعه کار با درصد تاثیر 2/81% کمترین تاثیر را بر خواص مکانیکی قطعات جوش داشت. برای به دست آوردن شرایط بهینه مشخصه کیفی هر چه بیشتر بهتر انتخاب شد. سرعت دورانی ابزار700 rpm، سرعت جوشکاری80 mm/min و زاویه ابزار با قطعه کار 3 درجه به عنوان شرایط کاری بهینه به دست آمدند. آزمایش تایید بر اساس شرایط کاری بهینه انجام شد. سختی میانگین و استحکام تسلیم به دست آمده در شرایط آزمایش تایید به ترتیب برابر 63 ویکرز و119 MPa بودند که این مقادیر بزرگ ترین سختی و استحکام تسلیم به دست آمده برای قطعات جوش در این تحقیق هستند. بنابراین روش تاگوچی به عنوان یک روش موثر و سیستماتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای FSW برای رسیدن به بیش‌ترین خواص مکانیکی در قطعات جوش آلیاژهای نانو/فوق ریزدانه آلومینیوم- اسکاندیم شناخته شد. همچنین نتایج آنالیز پراش الکترون برگشتی (EBSD) و بافت نشان داد که فلز پایه دارای بافت مکعبی و نمونه نورد تجمعی شده دارای بافت مس است. در حالیکه نمونه جوش بهینه شده دارای ریزساختار با دانه های هم محور تبلور مجدد یافته و بافت کاملا متفاوت از فلز پایه و نمونه نورد تجمعی شده بود. به طوریکه ترکیبی از بافت های $B/\bar{B}$ و C در نمونه جوش بهینه شده مشاهده شد که نشان از وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی است.

کلمات کلیدی: نانو ساختار، جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی، آلیاژهای آلومینیوم-اسکاندیم ، خواص مکانیکی، ریزساختار، طراحی آماری آزمایش،بافت.

Optimization of FSW parameters for mechanical properties of Nano/UFG Aluminum- scandium alloys by using design of experiment method

M. Yousefieh[1], , M. Tamizifar[1], S.M.A. Boutorabi[1], E. Borhani[2]

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: tamizifar@iust.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

1-School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran
2-Department of Metallurgy and Materials Engineering, Semnan University, Iran
(Received 5 August 2017 ; Accepted 25 September 2017)

Abstract
In the present research, the parameters of FSW process were optimized for the mechanical properties of thin aluminum-scandium alloys by a design of experiment (DOE) technique. The optimum conditions providing the highest mechanical properties were found by this method. Among the three factors and three levels tested, it was concluded that the tool rotational speed had the most significant effect on the mechanical properties and the travel speed had the next most significant effect. The effect of tool tilt angle was less important when compared to the other factors. The EBSD results demonstrated a recrystallized equi axial structure and the existence of a mixture of B and C components in the weld nugget.

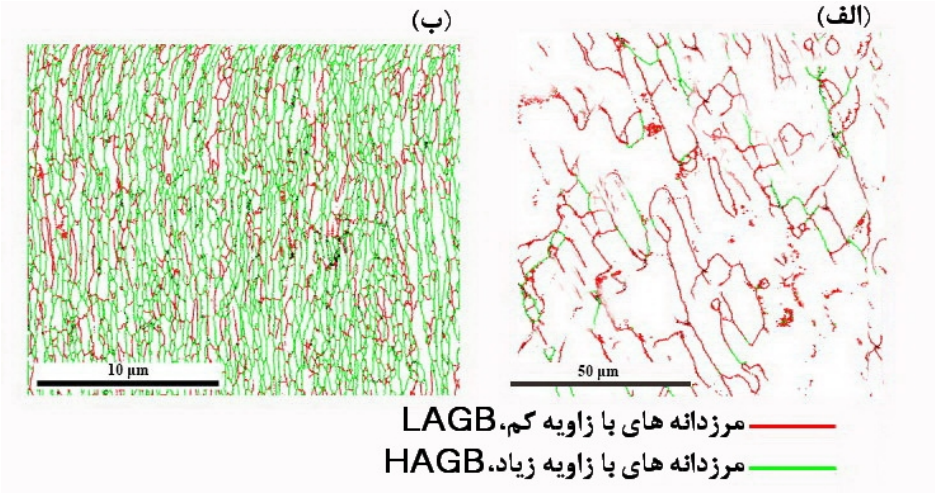
Keywords: Friction stir welding, Al-Sc alloys, Mechanical properties, Microstructure, Design of experiment, Texture.

1- مقدمه

روش‌های تغییرشکل پلاستیکی شدید (SPD) به طور موفقیت آمیزی برای تولید مواد نانو/فوق ریز دانه (UFG) گسترش یافته‌اند [1]. در این روش‌ها کرنش‌های پلاستیکی بسیار بالا بر روی ماده اعمال می‌شود که منجر به ریز شدن ساختار و افزایش استحکام ماده می‌گردد. شکل (1) نقشه های مرزدانه به دست آمده از آنالیز پراش الکترون برگشتی (EBSD) را برای (الف) نمونه نورد متداول شده و (ب) نمونه نورد تجمعی شده (ARB) نشان می دهد. با توجه به شکل(1-الف)، تغییر شکل‌های متداول مانند نورد سرد می‌تواند منجر به ریز شدن ریزساختار در دماهای پایین شود. اما معمولاً ساختارهای تشکیل شده، ریزساختارهایی از نوع سلولی حاوی مرزهای زاویه کم (LAGB) می‌باشند (شکل1-الف). تفاوت این ساختارها با نانوساختارهای حاصل از تغییرشکل پلاستیکی شدید این است که نانوساختارها، حاوی دانه‌هایی فوق‌ریز با مرزهای زاویه زیاد (HAGB) هستند (شکل1-ب). مشخصه مهم و تقریبا مشترک در تمامی روش‌های تغییرشکل پلاستیکی شدید، اعمال کرنش های بسیار بالا به نمونه بدون تغییر در ابعاد کلی آن است. مشخصه دیگر این است که شکل نمونه پس از اعمال کرنش های پلاستیکی شدید حفظ می شود، یعنی ابزار مورد استفاده مانع از سیلان آزاد ماده به اطراف می شوند که در نتیجه آن فشار هیدرواستاتیکی شدیدی به ماده اعمال می شود. حضور این فشار بالا برای دستیابی به کرنش-های بالا و همچنین ایجاد دانسیته بالایی از نواقص کریستالی برای ریز کردن دانه ها لازم و ضروری است. مهمترین مزیت این روش‌ها قابلیت تولید مواد ریزدانه به صورت بالک می باشد [1و2]. روش های تغییر شکل پلاستیکی شدید مختلفی برای تولید مواد ریزساختار و پر استحکام گسترش یافته اند.

یکی از مهمترین روش‌های تغییرشکل پلاستیکی شدید روش نورد تجمعی (ARB) است که برای اولین بار توسط ساتو و همکارانش در سال 1998 معرفی شد. روش نورد تجمعی به دلیل تجهیزات ساده و در دسترس بودن و به دلیل قابلیت اجرا بودن بر روی قطعات بالک بسیار بزرگ، نسبت به سایر روش‌های تغییرشکل پلاستیکی شدید، مزیت دارد. تیم پروفسور تسوجی (Nobuhiro Tsuji) در دانشگاه کیوتو ژاپن به موفقیت هایی در صنعتی کردن این فرایند در شرکت خودروسازی رسیده است، اما همچنان در ابتدای راه قرار دارند. در این روش ابتدا دو ورق هم اندازه پس از آماده سازی سطحی بر روی یکدیگر قرار گرفته و نورد می شوند. پس از نورد ضخامت آنها به اندازه ضخامت یک ورق می رسد سپس ورق به دست آمده به دو قسمت بریده می شود و عملیات نورد تکرار می شود و این فرآیند تا چند سیکل ادامه می یابد [3-5].

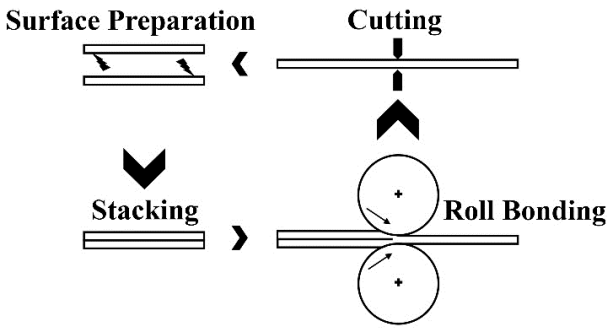
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]



شکل 1- نقشه های مرزدانه به دست آمده از آنالیز پراش الکترون برگشتی (EBSD) برای (الف) نمونه نورد متداول شده و (ب) نمونه نورد تجمعی شده (ARB).

اصول این فرایند در شکل (2)نشان داده شده است.

آلومینیوم از جمله فلزات راهبردی - نظامی است که به دلیل ویژگی های شاخص و کاربرد وسیع در صنایع نظامی و مهمات سازی، هوافضا، صنایع دریائی و کشتی سازی، صنایع حمل و نقل ریلی و جاده‌ای، ساختمان، تجهیزات الکتریکی و بسته بندی مواد غذائی در دنیا مورد توجه زیادی قرار گرفته است.اخیرا آلیاژهای آلومینیوم- اسکاندیم (Al-Sc) به دلیل ویژگیها و محاسن منحصربفرد مورد توجه ویژه ای قرار گرفته اند. این آلیاژها دارای مقاومت خوردگی عالی و خواص جوش پذیری خوب هستند. استحکام بالا، وزن کم و پایداری در دماهای بالا نیز یکی دیگر از مشخصات ویژه این آلیاژها هستند. همچنین آلیاژهای Al-Sc برای عملیات های شکل دهی سوپر پلاستیک مناسب هستند[5 و 6]. امروزه این آلیاژها به عنوان مثال در تجهیزات ورزشی که نیاز به وزن سبک و استحکام بالاست (مثل بدنه دوچرخه و چوب بیسبال) مورد استفاده قرار می گیرند. هرچند قیمت بالای این آلیاژها یکی از محدودیت های استفاده از آن است، اما به دلیل خواص فوق العاده در صنایع مختلف از جمله هوا فضا مورد استفاده قرار می گیرد. با افزایش تقاضا برای اسکاندیم، وایلی اولین نوع از آلیاژهای Al-Sc را ثبت اختراع کرد. او دریافت که با اضافه کردن اسکاندیم به آلیاژهای آلومینیوم، خواص مکانیکی به مقدار زیادی افزایش می یابد[5-8].



شکل2- اصول فرایند نورد تجمعی

هرچند در مقایسه با سایر روش های SPD، با استفاده از فرایند ARB می توان قطعات بزرگ تری را تولید کرد، اما به دلیل محدودیت هایی که در دستگاه نورد وجود دارد، امکان تولید قطعات پیچیده تر میسر نیست. از طرفی برای اتصال قطعات در صنعت به ناچار باید سراغ روش های اتصال از جمله جوشکاری برویم. بنابراین یکی از اهداف این پژوهش بررسی جوشکاری قطعات تولید شده با روش ARB و دستیابی به حداکثر خواص مکانیکی است. به‌وضوح آشکار است که حوضچه جوش ایجادشده در جوشکاری این مواد با روش‌های ذوبی به‌صورت اجتناب‌ناپذیری ساختار این مواد را به هم ریخته و درنهایت باعث تشکیل دانه‌های درشت در ناحیه جوش می‌شود، لذا جوشکاری مواد فوق ریزدانه با روش‌های ذوبی توصیه نمی‌شود[9-12]. تحقیقات اخیر [9،12و13] نشان داده اند که استفاده از روش های جوشکاری حالت جامد مانند

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی (FSW) می تواند بر مشکل درشت شدن دانه ها و کاهش خواص مکانیکی غلبه نماید. لذا جوشکاری اصطکاکی-اختلاطی ازجمله مؤثرترین فرآیندها برای اتصال مواد فوق ریزدانه و نانو ساختار است.

مطالعاتی برای بهینه سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی قطعات جوش آلیاژهای مختلف صورت گرفته است. به عنوان مثال صفری و همکاران [14] پارامترهای جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی را برای دستیابی به بیشینه استحکام شکست در فولاد IF بهینه سازی کرده اند. اماتاکنون هیچ مطالعه سیستماتیک بر جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی از آلیاژهای نانو/فوق ریزدانه Al-Sc ساخته شده توسط ARB صورت نگرفته است.یکی از اهداف این پژوهش بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی به کمک روش طراحی آماری آزمایش (DOE) تحت عنوان تاگوچی است تا خواص مکانیکی مطلوب در ورق های جوشکاری شده به‌دست آید. روش تاگوچی به عنوان یک روش سیستماتیک در طراحی و تحلیل آزمایش‌ها برای بهبود مشخصات کیفی شناخته شده است. این روش امکان ارزیابی اثر عوامل را به صورت مستقل از سایر عوامل می‌دهد[15-18]. مراحل روش تاگوچی عبارتند از: تعیین مشخصه کیفی و تعیین عوامل طراحی، تعیین تعداد سطوح، انتخاب آرایه متعامد مناسب، انجام آزمایش‌ها بر اساس آرایه متعامد انتخاب شده، ارزیابی نتایج با استفاده از نسبت سیگنال به اختلال ، انتخاب سطوح بهینه عوامل، تصدیق شرایط بهینه با استفاده از آزمایش مورد تایید[3] همچنین یکی دیگر از اهداف این تحقیق بررسی ریزساختار و بافت قطعات جوش آلیاژ Al-Sc بود.

2- طراحی آزمایش بر اساس روش تاگوچی

طرح آزمایش در روش تاگوچی بر اساس عاملیل جزیی است. بنابراین تعداد آزمایش‌ها به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. انتخاب آرایه متعامد مناسب، بستگی به تعداد عوامل قابل کنترل و سطوح موردنظر دارد. سه پارامتر شامل سرعت دورانی ابزار، سرعت جوشکاری و زاویه ابزار با قطعه کار در سه سطح متفاوت به عنوان عوامل متغیر در جدول (1) دیده می‌شوند. بر اساس طرح تاگوچی، آرایه متعامد (L_9 (3^3) به صورت آورده شده در جدول (2) انتخاب گردید [3]. با انتخاب آرایه متعامد (L_9 (3^3)، تعداد آزمایش‌ها به عدد 9 کاهش یافت. در حالی که اگر از روش فاکتوریل کامل استفاده شود، باید تعداد $3^3=27$ آزمایش انجام شود.

3- روش آزمایش

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیم– اسکاندیم (Al-0.2wt%Sc) با ضخامت 2 میلیمتر برای ایجاد ساختاری ریزدانه و فوق ریزدانه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول (3) آورده شده است.به‌منظور ایجاد دانه‌هایی تقریبا درشت و همگن و انحلال رسوبات، عملیات انحلالی بر روی نمونه ها در دمای 630°C و مدت زمان 1440 دقیقه انجام شد. سپس نمونه ها تا دمای محیط در آب سریع سرد شدند. با توجه به تحقیقات قبلی برای دستیابی به بهترین خواص نمونه ها در دمای 300°C و مدت زمان 150 دقیقه پیرسازی شدند.ورق های تهیه شده به عنوان مواد اولیه برای فرایند ARB می باشند. برای اتصال دهی ورق‌ها با روش نورد تجمعی ابتدا عملیات آماده‌سازی سطحی روی نمونه‌ها انجام شد، که شامل چربی زدایی سطوح اتصال و سپس برس کاری سطوح چربی زدایی شده است. چربی زدایی نمونه‌ها با استون انجام شد.سپس سطوح آماده‌شده ورق‌ها روی‌هم گذاشته شده و برای جلوگیری از لغزش زیر نورد نمونه ها با سیم‌های مسی محکم به هم متصل شدند. مرحله بعدی، نورد همزمان این ورق‌ها است. در هر مرحله از این فرآیند ضخامت ورق‌ها به میزان میانگین 50% کاهش می‌یابد.همچنین در هر مرحله از فرآیند نورد تجمعی به میزان 0/8کرنش به نمونه اعمال می‌گردد. فرایند فوق نه بار تکرار می شود تا کرنشی معادل 8 به نمونه ها اعمال شود. شکل (3) تصویری از نمونه های نورد تجمعی شده در مقیاس آزمایشگاهی را نشان می دهد. سپس نمونه های نورد تجمعی شده بر اساس طرح تاگوچی و با توجه به آرایه متعامد (L_9 (3^3) تحت جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی قرار گرفتند.

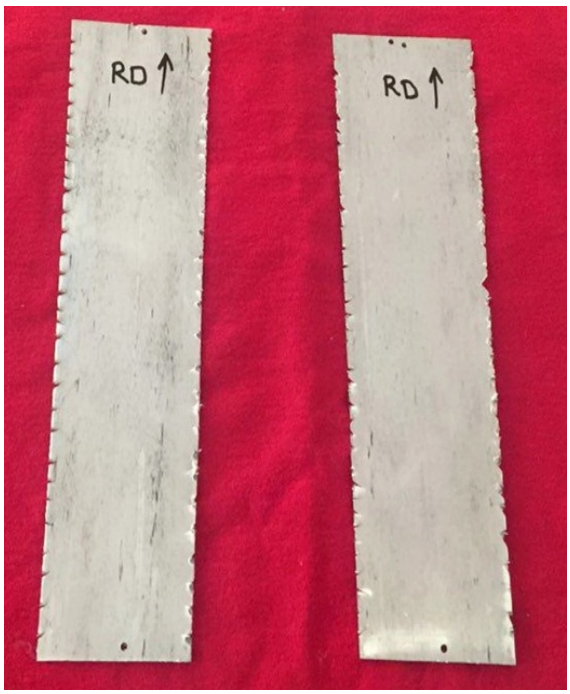
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

جدول1-پارامترهاواندازه آن ها برحسب سطوح مربوطه.

پارامتر	علامت	سطح		
		۱	۲	۳
زاویه ابزار با قطعه کار(°)	A	۲	۲/۵	۳
سرعت جوشکاری (mm/min)	B	۲۰	۴۰	۸۰
سرعت دورانی ابزار (rpm)	C	۷۰۰	۱۱۰۰	۱۵۰۰

جدول2-آرایه متعامد L9 با استفاده از روش تاگوچی [3]، نتایج و نسبت سیگنال به اختلال مربوطه.

شماره آزمایش	پارامتر			سختی میانگین (ویکرز، HV)	نسبت سیگنال به اختلال
	A	B	C		
۱	۱	۱	۱	۵۰	۳۳/۹۷۹۴
۲	۱	۲	۲	۴۷	۳۳/۴۴۲۰
۳	۱	۳	۳	۴۶	۳۳/۲۵۵۲
۴	۲	۱	۲	۴۱	۳۲/۲۵۵۷
۵	۲	۲	۳	۴۳	۳۲/۶۶۹۴
۶	۲	۳	۱	۶۱	۳۵/۷۰۶۶
۷	۳	۱	۳	۳۹	۳۱/۸۲۱۳
۸	۳	۲	۱	۵۸	۳۵/۲۶۸۶
۹	۳	۳	۲	۵۵	۳۴/۸۰۷۳



شکل3 - تصویری از نمونه های نورد تجمعی شده

به منظور مشخصه یابی ریزساختاری و بافت از آنالیز پراش الکترون برگشتی (EBSD) استفاده شد.این تکنیک اندازه دانه، مشخصه های مرزدانه، جهت گیری دانه، بافت و تابع توزیع جهت (ODF) نمونه تحت بررسی را آشکار می کند. اطلاعات مفید تکنیک EBSD از یک ضخامت بسیار کوچک (10 تا 20 نانومتر) حاصل می گردد که توزیعی از دانه ها در یک سطح دو بعدی به حساب می آید. EBSD در حالت کلی بر این پایه استوار است که الگو ضعیف تفرق یافته ای از اشعه الکترونی اولیه ساکن و متمرکز که به یک سطح پولیش شده برخورد کرده، ایجاد می کند. دستگاه مورد استفاده ساخت شرکت Philips مدل XL30 با قدرت 15 kV است. بررسی و تحلیل نتایج حاصل از EBSD توسط نرم افزار OIM انجام شد. همچنین برای اطلاع از خواص مکانیکی، آزمایش‌های کشش و سختی سنجی به کار گرفته شد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

جدول 3-ترکیب شیمیایی آلیاژ Al-0.2wt%Sc مورداستفاده دراین تحقیق(درصدوزنی).

Al	Cu	Ti	Mg	Cr	Si	Zn	Fe	Mn	Sc
پایه	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۱۶	۰/۰۰۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۱	۰/۲۰۱

جدول4- مقادیرنسبت سیگنال به اختلال متوسط برای هر پارامتر در هر سطح.

نسبت سیگنال به اختلال متوسط			
سطح	زاویه ابزار با قطعه کار	سرعت جوشکاری	سرعت دورانی ابزار
۱	۳۳/۵۶	۳۲/۶۹	**۳۴/۹۸**
۲	۳۳/۵۴	۳۳/۷۹	۳۳/۵۰
۳	**۳۳/۹۷**	**۳۴/۵۹**	۳۲/۵۸
Δ=حداکثر – حداقل	۰/۴۳	۱/۹۰	۲/۴۰

4- نتایج و بحث

4-1-تحلیل تاگوچی، آنالیز واریانس و رتبه بندی تاثیر عوامل جوشکاری بر خواص مکانیکی

مناطق مختلفی بعد از جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی در آلیاژهای فوق ریزدانه آلومینیوم-اسکاندیم قابل تشخیص است، که ساختار این مناطق متاثر از حرکت مکانیکی پین و دما است. منطقه اختلاط در معرض بالاترین کرنش و افزایش موضعی دمااست، لذا از مهمترین مناطق در جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی محسوب می شود. لذا خواص مکانیکی منطقه اختلاط در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

به‌طورکلی سه نوع نسبت سیگنال به اختلال را می‌توان با توجه به مشخصه کیفی مورد نظر انتخاب نمود که عبارتند از: هر چه بیشتر بهتر، هرچه کمتر بهتر و اندازه اسمی بهتر. بزرگ‌ترین نسبت سیگنال به اختلال مربوط به بهترین عملکرد است. از آنجا که هدف از این تحقیق دستیابی به بیشینه خواص مکانیکی در ورق های جوش آلیاژ فوق ریزدانه آلومینیوم- اسکاندیم است، بنابراین مشخصه کیفی هر چه بیشتر بهتر بر اساس معادله(1) انتخاب شد [3و 16-18]:

$$S/N = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{Y_i^2}\right) \quad (1)$$

که Y_i هر کدام از نتایج به‌دست آمده و n تعداد آزمایش‌ها است. مقـــادیر سختی میانگین و نسبت‌های سیگنـال به اختلال مربوط به هر آزمایش در جدول(2) آورده شده است. برای ارزیابی اثر هر عامل بر روی خواص مکانیکی، نسبت سیگنال به اختلال برای هر عامل باید محاسبه شود. این نسبت برای یک عامل از میانگین نسبت‌های سیگنال به اختلال در سطوح مختلف به‌دست می‌آید که این مقادیر در هر سطح در جدول (4) دیده می‌شود. پارامتر دلتا (Δ) در جدول (4) اختلاف بین حداکثر و حداقل میانگین نسبت‌های سیگنال به اختلال در سطوح مختلف برای یک عامل است. هرچه دلتا بر ای یک عامل بزرگ تر باشد، نشان دهنده مهم تر بودن عامل مورد نظر نسبت به سایر عوامل است. با توجه به جدول (4)، بزرگ ترین دلتا مربوط به عامل سرعت دورانی ابزار است. لذا سرعت دورانی ابزار مهمترین عامل بر خواص مکانیکی قطعات جوش آلیاژهای فوق ریزدانه آلومینیوم-اسکاندیم است. سرعت جوشکاری در رتبه دوم و زاویه ابزار با قطعه کار در رتبه سوم اهمیت قرار دارند.

شکل (4) اثر عوامل سرعت دورانی ابزار، سرعت جوشکاری و زاویه ابزار با قطعه کار را بر نسبت‌های سیگنال به اختلال متوسط نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، سرعت دورانی ابزار و سرعت جوشکاری تغییرات بیشتری را نسبت به زاویه ابزار با قطعه کار نشان می دهند. بنابراین سرعت دورانی ابزار و سرعت جوشکاری تاثیر بیشتری بر خواص مکانیکی دارند، در حالیکه زاویه ابـزار با قطعه کـار دارای کمتـــرین تاثیر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

جدول5- آنالیزواریانس (ANOVA) برای پارامترهای FSW.

علامت	پارامتر	درجه آزادی (f)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	مجموع مربعات تصحیح شده (S')	درصد تاثیر (P)	رتبه
A	زاویه ابزار با قطعه کار	۲	۱۴/۸۸۹	۷/۴۴۴	۱۳/۳۳۳	۲/۸۱	۳
B	سرعت جوشکاری	۲	۱۷۱/۵۵۶	۸۵/۷۷۸	۱۷۰/۰۰۰	۳۵/۷۹	۲
C	سرعت دورانی ابزار	۲	۲۸۶/۸۸۹	۱۴۳/۴۴۴	۲۸۵/۳۳۳	۶۰/۰۸	۱
e	خطا	۲	۱/۵۵۶	۰/۷۷۸	--	۱/۳۲	--
مجموع	--	۸	۴۷۴/۸۸۹	--	--	۱۰۰	--

است.

تحلیل نسبت‌های سیگنال به اختلال (SN) تنها نشان می‌دهد کدام عامل اثر بیشتری بر فرآیند دارد، اما آنالیز واریانس میزان این اثر را ارزیابی و بصورت کمی بیان می‌کند. چهار عامل مهم در تحلیل واریانس عبارتند از: جمع مربعات ، درجه آزادی ، واریانس و درصد اثر عوامل [17]. نتایج آنالیز واریانس در جدول (5) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود، سرعت دورانی ابزار با در صد تاثیر برابر 60/08% به عنوان موثرترین پارامتر FSW بر خواص مکانیکی درقطعات جوش آلیاژهای نانو/فوق ریزدانه آلومینیوم-اسکاندیم شناخته شد. سرعت جوشکاری با در صد تاثیر 35/79% دومین پارامتر موثر در فرایند FSW است. درحالیکه پارامتر زاویه ابزار با قطعه کار با درصد تاثیر 2/81% به عنوان رتبه بعدی موثر بر خواص مکانیکی قرار دارد. اگر در آنالیز واریانس در صد تاثیر خطا (Pe) کمتر از 15% باشد، در این صورت هیچ فاکتوری در طراحی آزمایش نادیده گرفته نشده است[17]. اما در صورتی که درصد تاثیر خطا بیشتر از 50% باشد، در این صورت آزمایش باید مجددا طراحی گردد. همانطور که در جدول (5) مشاهده می شود، درصد تاثیر خطا برابر 1/32% می باشد. بنابراین تمامی فاکتورهای تاثیرگذار در طراحی آزمایش مد نظر قرار گرفته است.

4-2- شرایط بهینه و دستیابی به حداکثر خواص مکانیکی

روش تاگوچی از نسبت سیگنال به اختلال برای مشخصه‌یابی کیفی استفاده می‌نماید. بزرگ‌ترین مقدار این نسبت بیانگر بهترین خواص مکانیکی است. جدول (2) نسبت‌های مربوط به هر آزمایش را نشان می‌دهد. هم‌چنین جدول (4) نسبت سیگنال به اختلال متوسط را برای عوامل مختلف در سطوح مختلف نشان می‌دهد. با توجه به جدول (4)، بزرگ‌ترین نسبت سیگنال به اختلال در هر ردیف عمودی بیانگر سطح بهینه برای عامل موردنظر است. بنابراین A3، B3 وC1 به ترتیب نشان دهنده بزرگ‌ترین مقدار برای عوامل A، B وC هستند. بنابراین، شرایط بهینه برای عوامل فرایند جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی عبارتند از:

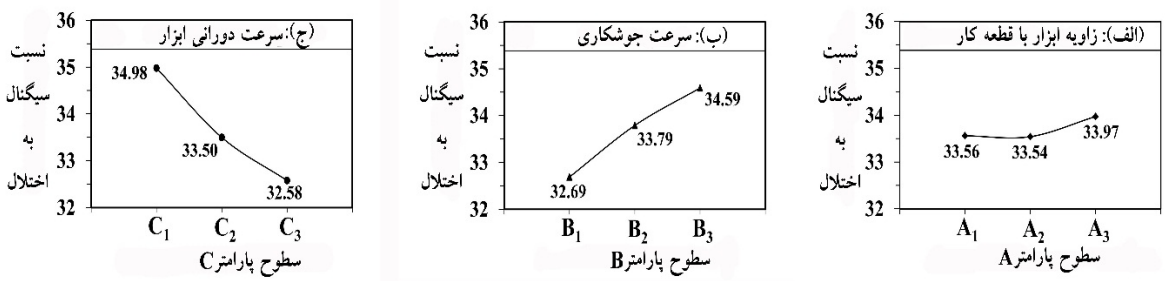
زاویه ابزار با قطعه کار 3 درجه، سرعت جوشکاری mm/min 80 و سرعت دورانی ابزار700rpm.

آزمایش تایید به عنوان آخرین گام موثر در روش تاگوچی شناخته می‌شود. بعد از تعیین شرایط کاری بهینه، آزمایش تایید بر اساس سطوح بهینه مشخص شده انجام می‌شود. بنابراین شرایط انجام آزمایش تایید همان شرایط کاری بهینه است. سختی میانگین و استحکام تسلیم به دست آمده در شرایط آزمایش تایید به ترتیب برابر 63 ویکرز و 119 MPa می باشند. این مقادیر بزرگ ترین سختی و استحکام تسلیم به دست آمده برای قطعات جوش در این تحقیق هستند. بنابراین روش تاگوچی یک روش موثر و سیستماتیک برای بهینه‌سازی عوامل فرایند جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی در آلیاژهای فوق ریزدانه آلومینیوم-اسکاندیم برای رسیدن به بیش‌ترین خواص مکانیکی است.

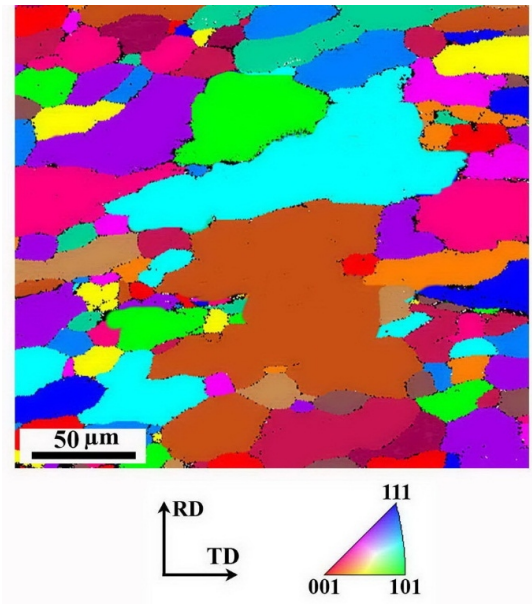
4-3- ریزساختار و بافت

شکل های (5) تا (7) به ترتیب نقشه های EBSD از نمـونه های خام، نورد تجمعی شده و منطقه اختـلاط در نمونه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

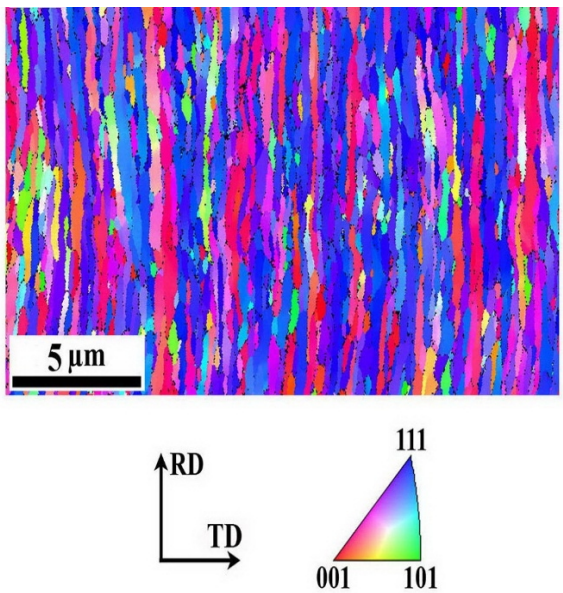


شکل4-اثر عوامل سرعت دورانی ابزار، سرعت جوشکاری و زاویه ابزار با قطعه کار بر نسبت‌های سیگنال به اختلال متوسط.

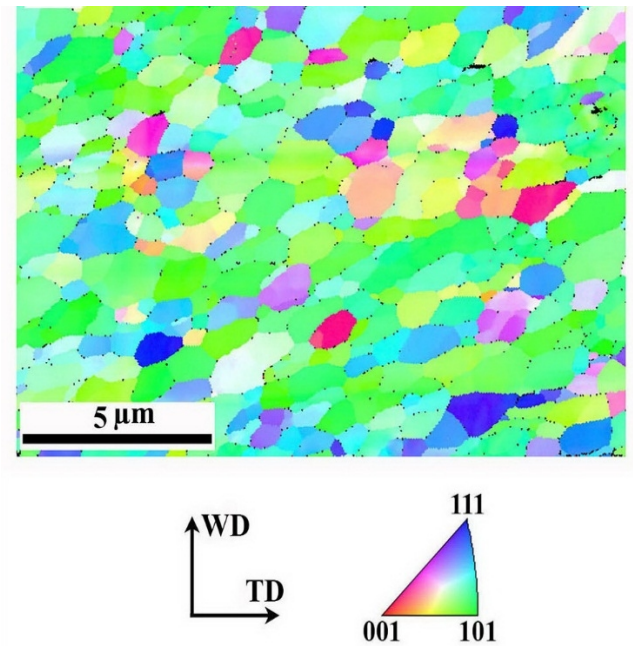


شکل5- تصویر پراش الکترون برگشتی (EBSD) از نمونه خام.

جوش بهینه شده را نشان می دهد. ریزساختار و اندازه دانه در این نمونه ها کاملا از یکدیگر متفاوت می باشند. همان طور که در شکل (5) دیده می شود، نمونه خام یک ساختار آنیل شده با دانه های خشن هم محور را نشان می دهد. در حالیکه با توجه به شکل (6)، در نمونه نورد تجمعی شده یک ساختار کشیده نانو/فوق ریزدانه درجهت نورد با اندازه دانه متوسط حدود 220 nm دیده می شود.با توجه به شکل (7)، جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی در آلیاژهای فوق ریزدانه آلومینیوم-اسکاندیم منجر به ایجاد ریزساختار با دانه های هم محور تبلور مجدد یافته با اندازه دانه متوسط حدود 710 nm شده است. وجوددانه های هم محور مربوط به وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی است[19-21].

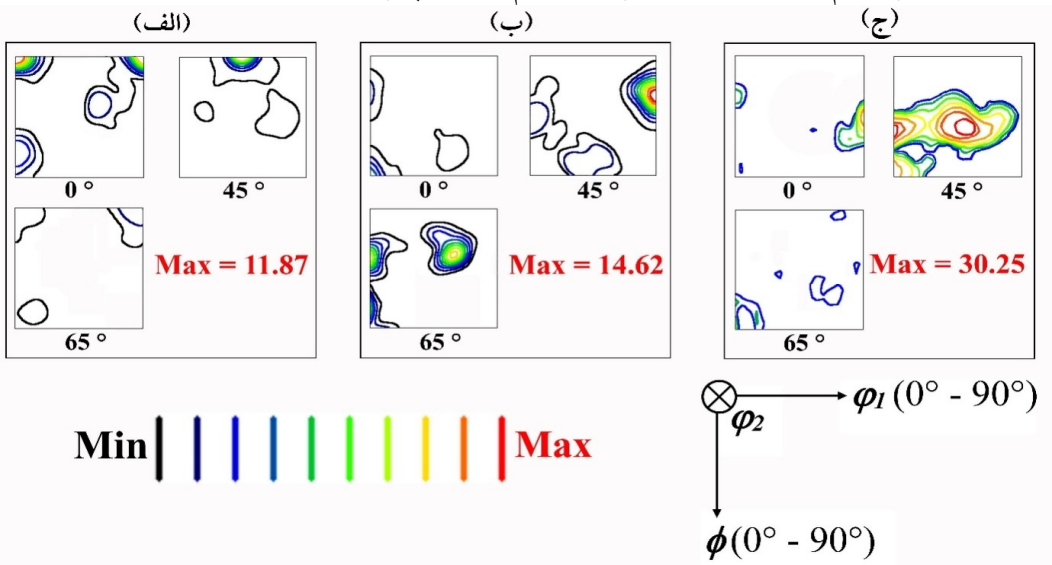


شکل6- تصویر پراش الکترون برگشتی (EBSD) از نمونه نورد تجمعی شده.



شکل 7- تصویر پراش الکترون برگشتی (EBSD) از منطقه اختلاط در نمونه جوش بهینه شده.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]



شکل8- مقاطع تابع توزیع جهت (ODF) برای نمونه های (الف) خام، (ب) نورد تجمعی شده و (ج) منطقه اختلاط در نمونه جوش بهینه شده.

جدول6-زوایای اویلر و اندیس میلر از موقعیت های ایده آل از بافت ها در مواد FCC [18-20]

جز بافت	اندیس میلر {hkl}<uvw>	زوایای اویلر برحسب درجه		
		φ_1	ϕ	φ_2
B	$(1\bar{1}2)[110]$	0	54.74	45
$\bar{B}$	$(\bar{1}1\bar{2})[\bar{1}\bar{1}0]$	60	54.74	45
C	{001}<110>	90	45	0/90
		0	90	45
مکعبی	{001}<100>	0/45	0	0/45
مس	{112}<111>	90	35	45
S	{123}<634>	59	34	65

شکل (8) مهمترین مقاطع (0، 45 و 60 درجه) از تابع توزیع جهت (ODF) در فضای اویلر را به ترتیب برای نمونه های خام، نورد تجمعی شده و منطقه اختلاط در نمونه جوش بهینه شده نشان می دهد. برای مقایسه نتایج تابع توزیع جهت (ODF) با اجزای ایده آل، موقعیت های ایده آل از بافت ها در مواد FCC در جدول (6) آورده شده است. با توجه به جدول (6) و شکل(8 (الف))، فلز پایه دارای بافت مکعبی <100>{001} نسبتا ضعیفی است. در شکل (8 (ب))، بافت مس <111>{112} در نمونه نورد تجمعی یافته مشاهده می شود. همچنین مقدار جزیی از بافت {123}<634>S نیز در این نمونه مشاهده شد. با توجه به تحقیقات قبلی، معمولا توسعه بافت مس <111>{112} در اثر تغییر شکل ناشی از لغزش است، که در طی فرایند نورد تجمعی به وقوع می پیوندد[22]. با توجه به شکل (8 -ج) بافت توسعه یافته در نمونه جوش بهینه شده کاملا متفاوت از نمونه های خام و نورد تجمعی شده است. به طوریکه ترکیبی از بافت قوی B/B {112}<110>B/B و بافت نسبتا ضعیف {001}<110>C در نمونه جوش بهینه شده مشاهده شد.

وجود بافت های{112}<110> B/B و {001}<110>C و همچنین عدم وجود بافت مکعب چرخش یافته در نمونه جوش بهینه شده نشان می دهد که تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی در آلیاژهای فوق ریزدانه آلومینیوم- اسکاندیم اتفاق نیفتاده است و تبلور مجدد دینامیکی پیوسته در حین فرایند جوشکاری به

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

وقوع پیوسته است[21و23].

5-خلاصه

در این تحقیق، روش تاگوچی به عنوان یک روش سیستماتیک و موثر به منظور بهینه‌سازی عوامل جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی در آلیاژهای نانو/فوق ریزدانه آلومینیوم-اسکاندیم برای رسیدن به بیش‌ترین خواص مکانیکی شناخته شد. سرعت دورانی ابزار، سرعت جوشکاری و زاویه ابزار با قطعه کار در سه سطح مختلف به عنوان عوامل متغیر در نظر گرفته شدند. آرایه متعامد $L9(3^3)$ به کمک روش تاگوچی انتخاب شد. برای تحلیل نتایج آزمایش از مشخصه کیفی هر چه بیشتر بهتر استفاده شد. همچنین ریزساختار و بافت توسط آنالیز پراش الکترون برگشتی (EBSD)مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با توجه به نتایج تاگوچی در میان سه عامل که در سه سطح قرار داشتند، سرعت دورانی ابزار و سرعت جوشکاری به ترتیب بیش‌ترین اثر را بر روی خواص مکانیکی داشتند. همچنین زاویه ابزار با قطعه کار نیز در رتبه بعدی قرار داشت. شرایط کاری بهینه به‌این صورت به‌دست آمد: زاویه ابزار با قطعه کار 3 درجه، سرعت جوشکاری80 mm/min و سرعت دورانی ابزار 700 rpm. آزمایش تایید در شرایط کاری بهینه انجام شد. در شرایط بهینه در آزمایش تایید بالاترین مقادیر سختی و استحکام تسلیم به دست آمد.نمونه نورد تجمعی شده دارای یک ریزساختار کشیده نانو/فوق ریزدانه درجهت نورد با اندازه دانه متوسط حدود220 nm و بافت مس <111>{112} بود. در حالیکه نمونه جوش بهینه شده دارای ریزساختار با دانه های هم محور تبلور مجدد یافته با اندازه دانه متوسط حدود710 nm و ترکیبی از بافت های{112}<110>B/B و {001}<110>C بود که نشان از وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی – اختلاطی در آلیاژهای نانو/فوق ریزدانه آلومینیوم-اسکاندیم است.

6-تقدیر و تشکر

نویسندگان از همکاری پرسنل کارگاهی و آزمایشگاهی دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران و از آقای پروفسور تسوجی در دانشگاه کیوتو ژاپن به دلیل در اختیار گذاشتن برخی تجهیزات آزمایشگاهی و ارایه نظرات ارزشمند کمال تشکر و قدردانی را دارند. همچنین از آقای مهندس مجید یوسفیه نیز به جهت همکاری در برخی امور اجرایی کمال تشکر و سپاسگزاری را داریم.

منابع

1-Schwarz KT, Kormout KS, Pippan R, Hohenwarter A (2017)Impact of severeplasticdeformation on microstructure and fracture toughness evolution of a duplex-steel, Mater SciEng A703: 173-179.

2- Fong KS, Danno A, Tan MJ, Chua BW (2017) Tensile flow behavior of AZ31 magnesium alloy processed by severe plastic deformation and post-annealing at moderately high temperatures, J Mater Processing Technol 246: 235-244.

3- Yousefieh M, Tamizifar M, Boutorabi SMA, Borhani E (2016) Taguchi Optimization on the Initial Thickness and Pre-aging of Nano-/Ultrafine-Grained Al-0.2 wt.%Sc Alloy Produced by ARB, J Mater Eng Perform 25:4239–4248.

4- Azad B and Borhani E (2015) The Effect of Al2Cu Precipitate Size on Microstructure and Mechanical Properties of Al-2 wt.%Cu Alloys Fabricated by ARB, J Mater Eng Perform24:4789–4796.

5- Quadir MZ, Najafzadeh N and Munroe PR (2016) Variations in through-thickness recrystallization and grain growth textures in the Al layers in ARB-processed Al/Al(0.3% Sc) composite sheets, Mater Des 93:467–473.

6- Lathabai S and Lloyd PG (2002) The effect of scandium on the microstructure, mechanical properties and weldability of a cast Al–Mg alloy,Acta Mater 50:4275–4292.

7- Jindal V, De PK and Venkateswarlu K (2006) Effect of Al3Sc precipitates on the work hardening behavior of aluminum–scandium alloys, Mater Lett 60:3373–3375.

8- Watanabe C, Kondo T and Monzen R (2004) Coarsening of Al3Sc precipitates in an Al-0.28 wtpctSc alloy, Metall Mater Trans A 35:3003–3008.

9- Sato YS, Kurihara Y, Park SHC, Kokawa H, Tsuji N (2004) Friction stir welding of ultrafine grained Al alloy 1100 produced by accumulative roll-bonding, Scripta Mater 50:57-60.

10- Sun Y, Fujii H, Takada Y, Tsuji N, Nakata K, Nogi K (2009) Effect of initial grain size on the joint properties of friction stir welded aluminum, *Mater SciEng A* 527:317–321.

11- Lilleby A, Grong Ø and Hemmer H (2010) Cold pressure welding of severely plastically deformed aluminium by divergent extrusion, *Mater SciEngA* 527:1351–1360.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

12- Topic I, Hoppel HW and Goken M (2009) Friction stir welding of accumulative roll-bonded commercial-purity aluminium AA1050 and aluminium alloy AA6016, *Mater SciEngA* 503:163-166.
13- Fujii H, Ueji R, Takada Y, Kitahara H, Tsuji N, Nakata K, Nogi K (2006) Friction stir welding of ultrafine grained interstitial free steels, *Mater Trans* 47:239–242.
14- مهدی صفری، حسین مستعان، آرش بختیاری (1395) بهینه سازی متغیرهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با هدف دستیابی به استحکام شکست بیشینه، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، جلد 2 شماره 1 صفحات 32-48.
15-محمد جولا، رضا دهملایی، سید رضا علوی زارع (1395) بهینه سازی پارامترهای فرایند جوشکاری قوسی تنگستن گاز پالسی برای دست یابی به بیشترین چقرمگی فلز جوش در اتصال غیرمشابه فولاد 316AISIبه فولاد Gr 387A.91 به روش تاگوچی، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، جلد 3 شماره 2 صفحات 71-83.
16- Chauhan R, Singh T, Kumar N, Patnaik A, Thakur NS (2017) Experimental investigation and optimization of impinging jet solar thermal collector by Taguchi method, *ApplThermEng* 116: 100-109.
17- Yousefieh M, Shamanian M and Saatchi A (2011) Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method, *J Alloys Compd* 509:782–788.
18- Yousefieh M, Shamanian M and Saatchi A (2012) Optimization of Experimental Conditions of the Pulsed Current GTAW Parameters for Mechanical Properties of SDSS UNS S32760 Welds Based on the Taguchi Design Method, *J Mater Eng Perform*21:1978-1988.
19- Park SHC, Sato YS, Kokawa H, Okamoto K, Hirano S, Inagaki M (2005) Microstructural characterisation of stir zone containing residual ferrite in friction stir welded 304 austenitic stainless steel, *SciTechnol Weld Join* 10:550–556.
20-Suhuddin UFHR, Mironov S, Sato YS, Kokawa H (2010) Grain structure and texture evolution during friction stir welding of thin 6016 aluminum alloy sheets, *Mater SciEng A* 527:1962–1969.
21-Bocher P, Azar J, Adams BL, Jonas JJ (1998) Using OIM to interpret the dynamically recrystallized texture of a low stacking fault energy FCC material, *Mater Sci Forum* 273-275:249-254.
22- Chen Z, Cai H, Li S, Zhang X, Wang F, Tan C (2007) Analysis of crystallographic twinning and slip in fcc crystals under plane strain compression, *Mater SciEng A* 464:101–109.
23-Sabooni S, Karimzadeh F, Enayati MH, Ngan AHW (2015) Friction-stir welding of ultrafine grained austenitic 304L stainless steel produced by martensitic thermomechanical processing, *Mater Des* 76:130-140.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]