

Finite element simulation of dynamic recrystallization phenomenon and evaluation of effective factors in friction stir welding in AA-2024 aluminum alloy

Sirous Rizehvandy¹, * Mahmoud Salimi², Ali Akbar Nasiri³

1- M.Sc., School of Metallurgy and Materials Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Chemical Engineering Department, Islamic Azad University Arak Branch, Arak, Iran.

3- M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Arak Branch, Arak, Iran.

Citation: Rizehvandy S, Salimi M, Nasiri A.A. Finite element simulation of dynamic recrystallization phenomenon and evaluation of effective factors in friction stir welding in AA-2024 aluminum alloy. Metallurgical Engineering 2020; 22(4): 254-266 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.107411.1246>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.107411.1246>

ABSTRACT

In this research, grain size variation and grain distribution and the effect of different factors such as friction, tool rotational speed, linear velocity of the tool, cooling rate, tool geometry and tool penetration depth on the temperature change and grain size during the friction stir welding process of the aluminum alloy Al-2024 sheet with a thickness of 7.8 mm has been investigated. In order to simulate the model of finite element friction stir welding, the Deform 3D software has been used. The tool is a rigid body and a sheet is considered as a formable plastic material. In order to validate, a comparison between simulation data and experimental results was performed. The effect of effective factors on the temperature of the welding and the amount of grain size variation in the cross section of the weld line have been discussed. Among the variables studied, increasing the cooling rate and the linear velocity of the tool reduce the temperature and grain size, and increase the temperature and grain size with increasing other variables. The results show that with the method presented in this paper, precise prediction of the effect of variation of the variables affecting temperature and grain size can be obtained. In the following, these results can be used to determine the optimum conditions for the friction stir welding process.

Keywords: Friction Stir Welding, Dynamic recrystallization phenomenon, Finite element method, Grain size variation, Al-2024 alloy.

Received: 7 May 2019 | Accepted: 10 February 2020

■ ■
* Corresponding Author:

Mahmoud Salimi, PhD

Address: Chemical Engineering Department, Islamic Azad University Arak Branch, Arak, Iran.

Tel: +98 (9127246004)

E-mail: M-salimi@iau-arak.ac.ir

شبیه‌سازی المان محدود پدیده تبلور مجدد دینامیکی و بررسی عوامل مؤثر بر آن در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم AA-2024

سیروس ریزه‌وندی^{۱*}، محمود سلیمی^۲، علی اکبر نصیری^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی اراک، اراک، ایران.

۳- کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی اراک، اراک، ایران.

چکیده

در پژوهش حاضر تغییرات اندازه دانه و نحوه توزیع دانه‌ها و اثر عوامل مختلف از جمله ضریب اصطکاک، سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی ابزار، نرخ سرد شدن، هندسه ابزار و عمق نفوذ ابزار بر میزان تغییرات دما و اندازه دانه در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق آلیاژی آلومینیوم AA-2024 با ضخامت ۷/۸ میلی‌متر بررسی شده است. به منظور شبیه‌سازی مدل اجزای محدود جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از نرم‌افزار D3 DEFORM استفاده شده است. ابزار به صورت جسم صلب و ورق به صورت یک ماده پلاستیک قابل تغییر فرم در نظر گرفته شده است. ضریب اصطکاک بین ورق و تمامی سطوح که با ورق در تماس هستند برابر فرض شده‌اند. به منظور صحت‌سنجی، مقایسه‌ای بین داده‌های شبیه‌سازی با نتایج تجربی انجام شده است. اثر عوامل مؤثر بر دمای حاصل از جوشکاری و میزان تغییرات اندازه دانه در مقطع عرضی خط جوش مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. از بین متغیرهای مورد مطالعه، افزایش نرخ سردکنندگی و سرعت خطی ابزار موجب کاهش دما و اندازه دانه شده و با افزایش سایر متغیرها، دما و اندازه دانه افزایش می‌یابند. نتایج نشان می‌دهند که با روش ارائه شده در این مقاله می‌توان پیش‌بینی دقیقی از اثر تغییرات متغیر مؤثر بر دما و اندازه دانه بدست آورد. در ادامه از این نتایج می‌توان برای تعیین شرایط مطلوب انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، پدیده تبلور مجدد دینامیکی، روش المان محدود، تغییرات اندازه دانه، آلیاژ AA-2024

دریافت: ۱۳۹۸/۲/۱۷ | پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۱

۱. مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ یک تکنیک نسبتاً جدید است که برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ میلادی توسط انجمن جوشکاری بریتانیا، به عنوان روش اتصال جامد ابداع و برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیومی به کار گرفته شده است [۱ و ۲].

در دهه اخیر پیشرفت‌های روز افزونی در صنایع جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای فلزات با نسبت استحکام به وزن بالا مشاهده می‌شود. در این راستا شبیه‌سازی‌های فراوانی از این فرآیند توسط محققان صورت گرفته است. چاندراشکار و همکاران [۱] اثر سرعت چرخش و هندسه پین‌های ابزار را بر خواص کششی آلیاژ AA ۵۰۸۳-H ۱۱۱ مورد مطالعه قرار

1. Friction stir welding

* نویسنده مسئول:
دکتر محمود سلیمی

نشانی: اراک، دانشگاه آزاد اسلامی اراک، دانشکده مهندسی شیمی.

تلفن: (۹۱۲۷۲۴۶۰۰۴) ۹۸+

پست الکترونیکی: M-salimi@iau-arak.ac.ir

www.SID.ir

<http://metalleng.ir/>

داده اند. نتایج حاکی از آن بود که مقادیر استحکام کششی اتصالات جوش به شدت تحت تاثیر تغییر هندسه پین ابزار و سرعت چرخش از ۶۰۰ دور در دقیقه تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه است و مقادیر استحکام کششی با افزایش سرعت چرخش در مورد پین مخروطی شکل افزایش می‌یابد؛ در حالی که در مورد پروفیل خم کن سوزنی، مقادیر استحکام کششی با افزایش سرعت چرخش کاهش می‌یابد. محمد اسیدی و همکاران [۳] روی یک شبیه‌سازی المان محدود سه بعدی از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تحقیق کرده و ضمن بررسی تأثیر نوع اصطکاک بر دمای جوش، نتایج حاصله را با داده‌های تجربی مقایسه نمودند. از بین روش‌های محاسبه اصطکاک به این نتیجه دست یافتند که نوع اصطکاک کلمبی بیشترین مطابقت را با داده‌های تجربی دارد. در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ابزار یک جزء

آندی را کاهش می‌دهد و بنابراین مقاومت به خوردگی آلیاژهای آلومینیوم را بهبود می‌بخشد. شناخت و بررسی بیشینه دما و کرنش می‌تواند باعث پیش‌بینی دقیقی از فرآیند و کنترل بیشتر روی فرآیند به منظور جلوگیری از ایجاد نقایص مختلف در منطقه جوش و اعوجاج قطعات شود. ناحیه خط جوشکاری پس از عبور ابزار خنک شده و یک منطقه تبلور مجدد یافته دینامیکی در آن ایجاد می‌شود [۱۰ و ۴].

چقرمگی یک ماده میزان توانایی جذب انرژی ماده تا مرحله شکست می‌باشد. چقرمگی سطح زیر منحنی تنش-کرنش می‌باشد که نشان دهنده مقدار کار در واحد حجم می‌باشد که می‌تواند روی ماده اعمال شود بدون اینکه ترک بردارد. تنها راهی که می‌توان همزمان چقرمگی و استحکام یک ماده را افزایش داد ریز دانه کردن از طریق فرآیند تبلور مجدد می‌باشد [۱۵-۱۱].

تبلور مجدد عبارت است از جایگزینی ساختار کارسرد شده با دانه‌های جدید فاقد کرنش. دانه‌های جدید بدون نابجایی، درون ساختار تغییرشکل یافته یا بازیابی شده تشکیل می‌شوند [۱۶-۱۰ و ۱۷]. پس از آن دانه‌ها با مصرف دانه‌های قدیمی رشد می‌کنند و در پایان تبلور مجدد ساختاری حاوی دانه‌های جدید با چگالی کم نابجایی حاصل می‌شود. تبلور مجدد به طور کلی به دو دسته دینامیکی و استاتیکی تقسیم می‌شود که در این پژوهش به بررسی تبلور مجدد دینامیکی پرداخته می‌شود. چراکه هدف در این پژوهش بررسی پدیده‌ای است که به مقدار کرنش ایجاد شده در حین جوشکاری وابسته بوده و تبلور مجدد دینامیکی در طول تغییرشکل، هنگامی که کرنش از حد بحرانی عبور می‌کند رخ می‌دهد. نیروی محرکه در این فرآیند نابجایی و حرکت نابجایی‌هاست. تبلور مجدد دینامیکی تابعی از کرنش، نرخ کرنش، درجه حرارت و اندازه اولیه دانه‌ها است که با گذشت زمان تغییر می‌کند [۱۷].

هدف از بررسی تبلور مجدد دینامیکی و عوامل مؤثر بر این پدیده بهبود خواص مکانیکی جوش یعنی افزایش همزمان استحکام و چقرمگی می‌باشد که این مهم به واسطه تشکیل دانه‌های ریز و هم محور در ناحیه جوش و نزدیک به آن محقق می‌شود. مدل کردن تبلور مجدد دینامیکی در حین انجام فرآیند شکل‌دهی کار بسیار مشکلی است. در عوض تبلور مجدد دینامیکی در یک گام بلافاصله پس از اتمام تغییرشکل محاسبه می‌شود. در دماهای میانگین، نرخ کرنش تغییرشکل دوره‌ای برای این معادلات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۶ و ۷].

با مطالعه و بررسی پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر و تلاش محققان مختلف برای اندازه‌گیری دمای حاصل از اصطکاک ایجاد شده بین ابزار (پین) و قطعه کار، ملاحظه می‌شود که شبیه‌سازی‌های صورت گرفته تنها به بررسی اثرات توزیع دما و تنش‌های باقی‌مانده و اثر متغیرهای مختلف بر دما و تنش پس‌ماند پرداخته‌اند. در این راستا ضروری به

کلیدی می‌باشد. حسن و همکاران [۴] روی تأثیر هندسه ابزار بر سیلان ماده در اطراف ابزار جوشکاری با استفاده از نرم افزار فلونت^۲ مطالعاتی انجام داده‌اند. مطالعه تأثیر هندسه ابزار پیچی شکل و ابزار بدون پیچ نشان داد هندسه ابزار می‌تواند منطقه متأثر از کار مکانیکی-حرارتی را تغییر دهد و این امر باعث تغییر در اندازه دانه خواهد شد. چرا که اگر ابزار پیچی شکل باشد شکل و اندازه منطقه متأثر از کار مکانیکی ۵/۲ میلی‌متر کوچک‌تر از اندازه این منطقه در ابزار با شکل ساده و بدون پیچ می‌باشد. از سوی دیگر اگر ابزار پیچی باشد نفوذ جوش کم بوده و به طرف دیگر قطعه کار نمی‌رسد لذا جوشکاری معیوب خواهد بود.

در مقاله‌ای که توسط سین و همکاران [۶] در رابطه با مقایسه تجربی خواص مکانیکی آلیاژ AA۶۰۸۲-T۶ در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با جوشکاری قوس تنگستن تحت پوشش گاز محافظ^۳ ارائه شده است مشخص شد که خواص مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی مطلوب‌تر از جوشکاری قوسی می‌باشد. علت این امر دانه‌های ریز و هم‌محوری است که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در محل جوش تشکیل می‌شود.

جلیلی و همکاران [۷] با مطالعه تأثیر فرآیند سرد شدن بعد از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به این مهم دست یافتند که افزایش نرخ سرد شدن موجب کاهش ۶۰ درصدی اعوجاج و ۵۰ درصدی تنش باقی‌مانده در قطعه کار خواهد شد.

تأثیر عمق نفوذ شانه ابزار بر ریزساختار میکروسکوپی و ماکروسکوپی آلیاژ مس در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط تیمورزاده و همکاران [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. تیمورزاده در این مقاله از یک روش جدید استفاده کرده است، به این صورت که پس از شروع جوشکاری، عمق نفوذ شانه ابزار تغییر کرده و به صفر می‌رسد. این کار سبب می‌شود که محل اتصال دارای ۴ منطقه مختلف متالورژیکی باشد که در هر نرخ چرخشی این مناطق با هم ترکیب شده و یک لایه جدید از جوش را بوجود می‌آورد همین امر موجب افزایش استحکام جوش خواهد شد.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال فلزاتی مانند آلومینیوم، مس، سرب، منیزیم و فولاد زنگ‌نزن در حالت جامد مورد استفاده واقع می‌شود. این روش می‌تواند در صنایع هوافضا و سایر صنایع حساس برای اتصال آلیاژهای پایه آلومینیومی با استحکام بالا که به روش‌های معمولی به راحتی جوشکاری نمی‌شوند به کار رود [۹ و ۱].

تغییرشکل پلاستیک موضعی شدید در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر به شکسته شدن ذرات فاز ثانویه در فلزاتی مانند آلومینیوم و توزیع یکنواختی از رسوبات می‌شود. این توزیع یکنواخت شانس تشکیل مناطق

2. Fluent

3. Tungsten Inert Gas (TIG)

به ترتیب در جداول ۱، ۲ و ۳ قابل مشاهده است [۱۹-۱۸]. ابعاد قطعه کار $10 \times 10 \times 8/7$ میلی‌متر می‌باشد و به منظور جلوگیری از ناپایداری‌های تماسی ناشی از غیرپیوستگی در فصل مشترک ابزار-ورق و ورق-ورق از المان محدود پیوسته استفاده شده و دو ورق به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است مطابق با این فرضیه نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج تجربی مطابقت بیشتری داشته و مقدار خطا کاهش می‌یابد. جزئیات بیشتر مربوط به این فرضیه و اثبات آن توسط بویفا و همکاران [۲۱-۲۰] به طور کامل مورد مطالعه قرار گرفته و آوردن جزئیات بیشتر در این خصوص خارج از محدوده بحث این پژوهش می‌باشد. بنابراین به دلیل شباهت زمینه مورد مطالعه و فرآیند شبیه سازی اصطکاکی اغتشاشی مشابه در اینجا از این فرضیه استفاده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم Al-2024 [۱۸].

عنصر	درصد وزنی
Cu	۴/۳-۴/۵
Mn	۰/۴-۰/۶
Mg	۱/۳-۱/۵
Si	۰-۰/۵
Ni	۰-۰/۵
Zn	۰-۰/۲
Pb	۰-۰/۱
Cr	۰-۰/۵
Al	Balance

جدول ۲. خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم Al-2024 [۱۹].

خواص ماده	واحد	مقادیر
چگالی	kg/m ³	۲/۷۱
سختی	BHN	۹۳
مدول الاستیک (یانگ)	GPa	۶۹
مدول برشی	GPa	۲۶
ضریب پواسون	----	۰,۳۳
تنش تسلیم	MPa	۹۷
تنش کششی ماکزیمم	MPa	۲۱۰
کرنش شکست	%	۱۲

مدل اجزاء محدود

همانگونه که در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد اجزاء فرآیند عبارتند از قطعه کار و ابزار که ابزار دارای دو نوع سرعت چرخشی و سرعت خطی در راستای خط جوش می‌باشد. در

نظر می‌رسد که بر اساس این تحقیقات یک شبیه‌سازی در خصوص نحوه توزیع دانه‌بندی و مقدار تغییرات اندازه دانه در نرخ‌های متفاوت سرد شدن در قطعات صورت گیرد تا اثر عواملی چون سرعت چرخشی و سرعت انتقالی ابزار (سرعت جوش)، ضریب اصطکاک، نرخ سرد شدن، عمق نفوذ ابزار و هندسه ابزار بر روی مقدار و نحوه توزیع و تغییرات اندازه دانه صورت پذیرد. در این پژوهش ابتدا دمای حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با دمای بدست آمده از نتایج تجربی یکی از منابع مقایسه شده و پس از صحت‌گذاری شبیه‌سازی، اثر عوامل مختلف بر تبلور مجدد دینامیکی مورد بحث و بررسی واقع شده است. در انتها شرایط مطلوب جوشکاری یعنی افزایش همزمان استحکام و چقرمگی منطقه جوش از طریق کاهش اندازه دانه در این ناحیه، تعیین خواهد شد.

۲. مواد و روش تحقیق

اساس در این پژوهش محاسبه تغییرات دمایی در قطعه کار در خط جوش به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی و در ادامه بررسی تغییرات اندازه دانه محل جوشکاری با تغییر متغیرهای مختلفی چون نرخ سرد شدن، سرعت خطی ابزار، ضریب اصطکاک، سرعت چرخشی ابزار، عمق نفوذ ابزار و هندسه ابزار به منظور افزایش استحکام و چقرمگی می‌باشد. جهت اعتبارسنجی فرآیند، نتایج تغییرات دمای حاصله از شبیه سازی با نتایج تجربی یکی از منابع مقایسه و صحت‌گذاری شده و به عنوان نوآوری این پژوهش با استفاده از داده های بدست آمده از دما، نحوه توزیع دانه ها شبیه سازی شده و تأثیر عوامل مختلف بر این توزیع به صورت عددی با استفاده از نرم افزار مورد بررسی واقع شده است.

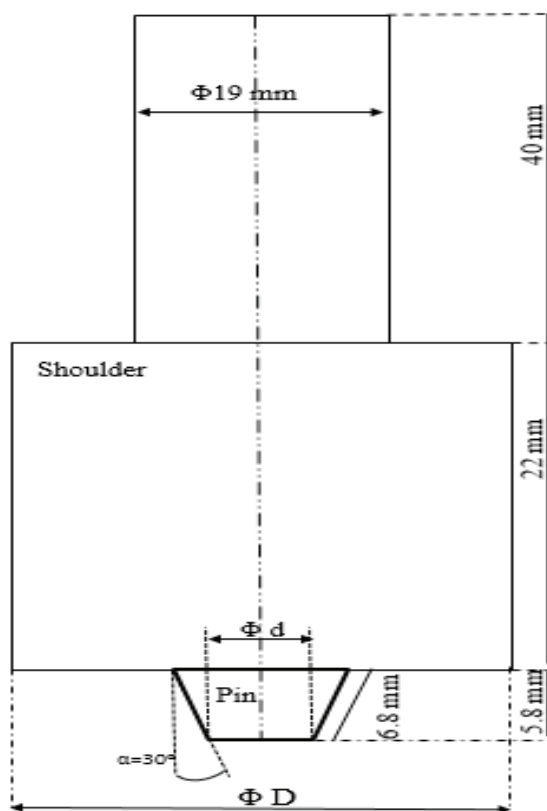
به منظور ساده‌سازی شبیه‌سازی، فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به ۳ دوره تقسیم می‌شود؛ دوره نفوذ: از زمانی که ابزار به سطح قطعه کار برسد تا زمانی که شانه ابزار با سطح قطعه کار تماس پیدا کند. دوره جوشکاری: از زمانی که شانه ابزار با قطعه کار تماس پیدا می‌کند تا زمانی که ابزار متوقف می‌شود. این دوره، دوره اصلی جوشکاری است. دوره جداشدن ابزار از قطعه کار: از زمانی که ابزار شروع به بالا رفتن می‌کند تا زمانی که پین به‌طور کامل از قطعه کار جدا می‌شود. فرضیاتی به منظور ساده‌سازی در مدل مدنظر گرفته شده است که عبارتند از: تمام انرژی‌های اصطکاکی به حرارت تبدیل شده و به قطعه کار وارد می‌شود، تغییر فرم مواد در سطح قطعه کار در خلال جوشکاری نادیده گرفته می‌شود، گرمای ناشی از اصطکاک بر روی ابزار در خلال جوشکاری نادیده گرفته می‌شود، پین و شانه ابزار هر دو به صورت استوانه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

در این پژوهش قطعه کار از جنس آلیاژ AA-۲۰۲۴ می‌باشد که ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و حرارتی آن

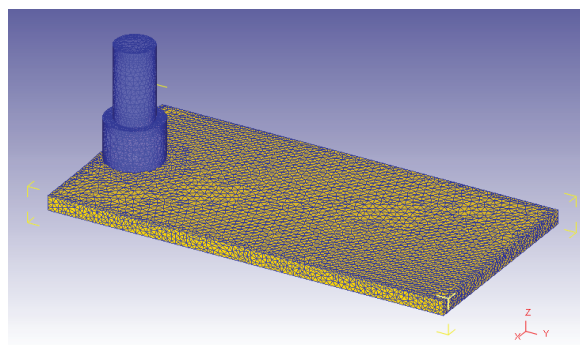
جدول ۳. خواص حرارتی آلیاژ آلومینیوم AA-2024 [۱۹].

مقادیر	واحد	خواص ماده
۵۸۰	°C	نقطه ذوب
۹۰۰	J/kg-k	ظرفیت حرارتی ویژه
۱۷۰	W/m-k	هدایت حرارتی
۷۰	m ² /s	انتشار حرارتی
۲۳	μm/m-k	انبساط حرارتی

حرکت می‌کند. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود قطعه‌کار به صورت مش‌بندی چهار وجهی با ۶۰۰۰۰ المان و ابزار با ۲۰۰۰۰ المان در نظر گرفته می‌شود. فرآیند اول دارای ۱۰۰ مرحله و فرآیند دوم دارای ۲۰۵۰ مرحله به ترتیب با بازه ۰/۰۲ و ۰/۰۴ برای هر مرحله می‌باشد. موقعیت قرارگیری ابزار به صورت کاملاً عمود بر قطعه کار بوده و ابزار در راستای محور X فاقد درجه آزادی بوده و در راستای محور Y و Z قابلیت تحرک دارد. انتقال حرارت به صورت تماسی بین قطعه کار و ابزار و همچنین قطعه کار با محیط صورت می‌گیرد. دمای محیط برابر ۲۵ درجه سانتیگراد به عبارتی در تماس با هوا در نظر گرفته شده است.

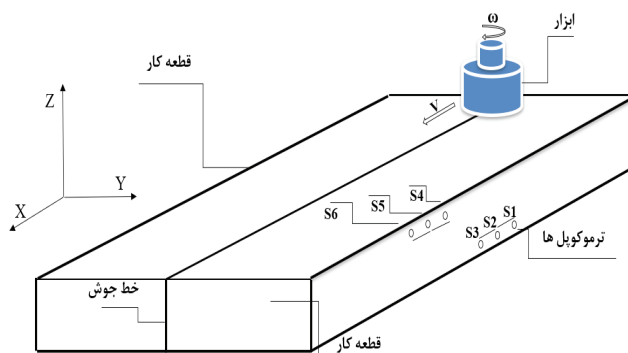


شکل ۲. نمای دو بعدی ابزار و ابعاد آن.



شکل ۳. نمای سه بعدی ابزار و قطعه کار در حالت مش‌بندی شده.

این مسئله ابزار به صورت غیرقابل تغییر فرم (صلب) و قطعه کار به صورت یک ورق یک پارچه و قابل تغییر فرم در نظر گرفته شده است و ابزار به صورت عمود بر قطعه کار در نظر گرفته شده که علت این امر بررسی و صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مشابه بوده است. در ادامه تأثیر عواملی از قبیل سرعت چرخشی، نرخ سرد شدن، عمق نفوذ ابزار، سرعت خطی، ضریب اصطکاک و هندسه ابزار بر نحوه توزیع دما و دانه‌بندی بوجود آمده در حین جوشکاری مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱. نمای شماتیک قطعه کار و ابزار و محل قرارگیری ترموکوپل‌ها.

روش حل مسأله

برای انجام این نوع شبیه‌سازی از تحلیل گر گرادیان درهم آمیخته^۴ که مسائل المان محدود را با تقریب تکراری حل می‌کند، استفاده می‌شود. مزیت‌های این حل‌کننده این است که در مسائل خیلی بزرگ زمان حل را تا ۵ برابر کاهش می‌دهد و توانایی در نظر گرفتن تعداد المان زیاد در زمان و حافظه به نسبت کم دارد. این حل‌کننده معمولاً برای مسائلی که قطعه‌کار تماس زیادی با قالب دارد مورد استفاده واقع می‌شود [۲۲].

در این پژوهش فرآیند اصلی جوشکاری را به صورت دو عملیات در نظر می‌گیریم. در ابتدا ابزار وارد قطعه‌کار شده و نهایتاً در راستای خط جوش به صورت خطی و چرخشی

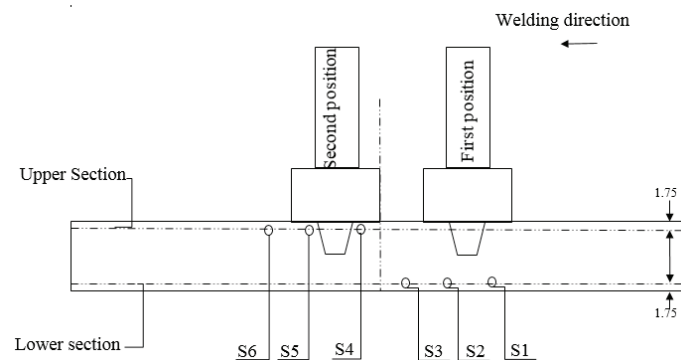
4. Conjugate-Gradient

جدول ۴. نحوه تغییرات متغیرهای فرآیند.

متغیر	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
سرعت چرخشی (rpm)	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰
سرعت خطی (mm/s)	۱	۲	۳	۴
نرخ سرد شدن (N/sec/mm/C)	هوا (۰/۰۲)	روغن (۶/۶)	آب (۱۵)	سدیم هیدروکسید (۳۰/۹)
ضریب اصطکاک	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	۰/۴
نسبت قطر پین به شانه	۰	۰/۱۱۵	۰/۲۳۱	۰/۳۶۶
عمق نفوذ ابزار (mm)	۱	۱/۲	۱/۴	۱/۶

جدول ۵. مختصات محل ترموکوپل‌ها.

X	Y	Z	
۱۲	۲۱/۲۵	۱/۷۵	S۱
۲۲	۱۲/۷۵	۱/۷۵	S۲
۲۷	۴/۲۵	۱/۷۵	S۳
۷	-۴/۲۵	۶/۰۵	S۴
۱۷	-۱۲/۷۵	۶/۰۵	S۵
۲۷	-۲۱/۲۵	۶/۰۵	S۶



شکل ۴. نمای محل قرارگیری ترموکوپل‌ها و موقعیت ابزار.

دقیقه، قطر پین ۵/۹۲ میلی‌متر، قطر شانه ۲۶/۴۶ میلی‌متر و عملیات سرد شدن در اتمسفر محیط یا به عبارتی در هوا صورت می‌گیرد.

مدل تبلور مجدد دینامیکی

در این پژوهش به منظور اندازه‌گیری توزیع دانه بندی در اطراف خط جوش و تأثیر پارامترهای مختلف بر نحوه توزیع در ابتدا به توضیح معادلات مورد استفاده در نرم افزار به اختصار پرداخته شده و این معادلات صرفاً جهت آشنایی با نحوه محاسبه اندازه دانه در نرم افزار Deform 3D آورده شده است و هیچگونه حل عددی در این پژوهش صورت نپذیرفته

متغیرهای فرآیند همانطور که پیش‌تر اشاره شد عبارتند از: عمق نفوذ ابزار، سرعت چرخش، سرعت خطی، ضریب اصطکاک و نرخ سرد شدن. جدول ۴ نحوه تغییر متغیرها و به نحوی عملیات‌های مختلف را نشان می‌دهد. مختصات محل ترموکوپل‌ها به صورت جدول ۵ می‌باشد که در این پژوهش دمای حاصل از فرآیند را در ۶ نقطه مطابق شکل ۱ با دو محل قرارگیری ابزار که در شکل ۴ قابل مشاهده است اندازه‌گیری می‌کنیم. این ۶ نقطه برای اندازه‌گیری و مقایسه دما با نتایج تجربی به دست‌آمده توسط سیبالیک و همکاران [۲۳] مورد مقایسه و صحه‌گذاری قرار گرفته است. در این حالت سرعت چرخشی ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت جوش ۱۲۵ میلی‌متر بر

در این صورت اندازه دانه تبلور مجدد به صورت تابعی از اندازه اولیه دانه، کرنش، نرخ کرنش و درجه حرارت برای تمام فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی اعم از دورانی و اغتشاشی که هر دو دارای کرنش و نرخ کرنش می‌باشد به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود.

(۶)

$$d_{DRX} = a_8 d_0^{h_5} \dot{\epsilon}^{n_5} \dot{\epsilon}^{m_5} \exp\left(\frac{Q_8}{RT}\right) + c_8$$

برای ماده مورد آزمایش در این پژوهش یعنی Al-2024 ضرایب مورد استفاده در رابطه بنیادی و مدل اورامی مطابق با جدول ۶ می‌باشد. به منظور شبیه سازی تبلور مجدد در نرم افزار Deform 3D این مقادیر و ثوابت به عنوان متغیرها و مقادیر ثابت مدل سازی در نرم افزار وارد شده و اساس تمام محاسبات نرم افزار بر پایه مدل اورامی تعیین شده است این ضرایب به صورت پیش فرض برای آلیاژهای مختلف در دیتابیس نرم افزار آورده شده است.

جدول ۶. داده‌های مدل اورامی و معادله بنیادین ماده اولیه [۲۲].

واحد	داده‌های ماده (Al-2024)	ضرایب
	$5/62 e 18$	A
	$0/13$	α
	$7/598$	n
(J/mol)	$2/680.6 e5$	Q
	$2/693$	β_d
	2	K_d
(J/mol)	$5/335$	Q_5
(J/mol)	$-1900.2/72$	Q_8
	$1/214 e -5$	a_5
	$78/60.22$	a_8
	$0/8$	a_{10}
	$0/13$	h_5
	$0/04$	m_5
	$-0/3722$	m_8
	$0/06$	m_1
	$0/06$	n_1
	$3/107 e -4$	a_1
	$0/8$	a_2

۳. نتایج و بحث

به منظور صحت‌گذاری شبیه‌سازی مقایسه‌ای بین داده‌های شبیه‌سازی و نتایج تجربی بدست آمده توسط سیبالیک و همکارانش برای شش ترموکوپل با مختصات مختلف که بر روی قطعه کار قرار گرفته‌اند صورت گرفته است [۲۳]. در

و تبلور مجدد به طور کامل توسط نرم افزار شبیه سازی، انجام شده است. یک معادله بنیادی آرنیوسی بطور گسترده رابطه بین نرخ کرنش، تنش تسلیم و دما را در دماهای بالا بیان می‌کند. به منظور مطابقت بیشتر این معادله با شرایط مختلف تنش، یک ضریب سینوس هیپربولیک با آن مخلوط شده و رابطه نهایی به صورت رابطه (۱) استخراج شده است [۱۶ و ۲۴].

رابطه ۱

$$\dot{\epsilon} = A \left[\sinh(\alpha \sigma^p) \right]^n \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

در این معادله α ، A و n ضرایبی ثابت و نسبت به دما مستقل بوده و σ^p تنش ماکزیمم و $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش، Q (J/mol) انرژی فعال‌سازی و R (J/K.mol) ثابت جهانی گازها و T (K) دما می‌باشد [۱۶]. زمانی که چگالی نابجایی‌ها و یا کرنش به یک مقدار بحرانی برسد تبلور مجدد دینامیکی در حین تغییر شکل رخ خواهد داد. از آنجاییکه چگالی نابجایی‌ها به طور مستقیم با دما و نرخ کرنش در ارتباط است و همچنین بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهد که در دمای بالا هسته‌گذاری و رشد دانه‌ها صورت می‌گیرد، بنابراین معیار فعال‌سازی پدیده تبلور مجدد دینامیکی معمولاً یک کرنش بحرانی (ϵ_c) می‌باشد که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود و مقدار ϵ_p را نیز می‌توان از رابطه (۳) بدست آورد [۱۶ و ۲۴].

(۲)

$$\epsilon_c = a_2 \dot{\epsilon}_p$$

(۳)

$$\epsilon_p = a_1 d_0^{n_1} \dot{\epsilon}^{m_1} \exp\left(\frac{Q_1}{RT}\right) + c_1$$

در این معادله Q_1 انرژی فعال‌سازی و a_1 ضریب تجربی و m_1 توان تجربی بین اندازه دانه و نرخ کرنش می‌باشد. رابطه اورامی برای توصیف رابطه بین کسر حجمی تبلور مجدد (X) و کرنش مؤثر (ϵ_p) مطابق رابطه (۴) مورد استفاده واقع می‌شود [۱۶ و ۲۳].

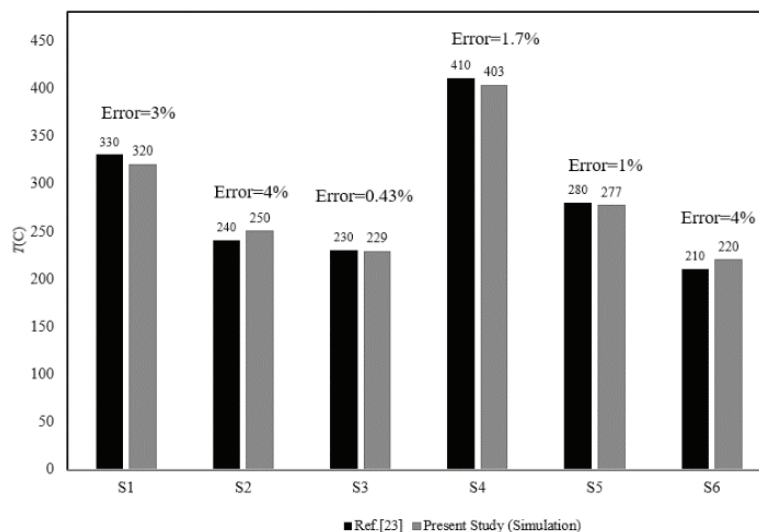
(۴)

$$X_{DRX} = 1 - \exp\left[-\beta_d \left(\frac{\epsilon - a_{10} \epsilon_p}{\epsilon_{0.5}}\right)^{k_d}\right]$$

در این رابطه β_d و k_d ضرایب ماده هستند که از آزمایشات تجربی بدست می‌آیند. مقدار $\epsilon_{0.5}$ نشان‌دهنده کرنش برای ۵۰ درصد تبلور مجدد است که با استفاده از رابطه (۵) بدست می‌آید.

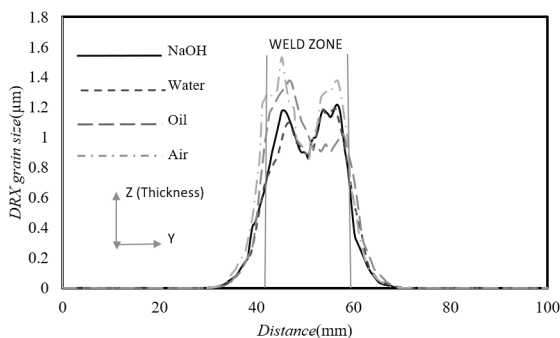
(۵)

$$\epsilon_{0.5} = a_5 d_0^{h_5} \dot{\epsilon}^{n_5} \dot{\epsilon}^{m_5} \exp\left(\frac{Q_5}{RT}\right) + c_5$$



شکل ۵. دماهای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در ترموکوپل‌های S۱ الی S۶.

اندازه دانه تبلور مجدد کاهش می‌یابد. هرچقدر تعداد دانه‌های ریز و هم‌محور بیشتر باشد، افزایش استحکام و انعطاف‌پذیری بهتری را در خط جوش در پی خواهد داشت. بنابراین به منظور بهبود خواص مکانیکی این ناحیه بهتر است که نرخ سرد شدن در این ناحیه را افزایش داد.



شکل ۶. تأثیر نرخ سرد شدن بر اندازه دانه تبلور مجدد یافته.

تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر دما و اندازه دانه تبلور مجدد

با افزایش سرعت چرخشی ابزار مقدار ماده‌ای که در زیر ابزار جابجا می‌شود افزایش می‌یابد و همین امر موجب افزایش گرمای ناشی از تغییر فرم می‌شود [۲۷-۲۶ و ۱۷]. از سوی دیگر با افزایش سرعت چرخشی، گرمای ناشی از اصطکاک نیز افزایش یافته که در نتیجه دمای منطقه متأثر از حرارت و منطقه متأثر از حرارت-کارمکانیکی افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۷ قابل مشاهده است شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخشی به دلیل افزایش نرخ کرنش و تغییر فرم بیشتر در زمان کمتر دمای قطعه کار

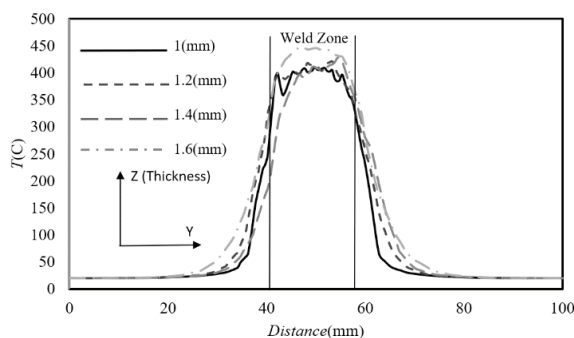
شکل ۵ دمای حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی در شش نقطه مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار دمای بدست آمده از شبیه‌سازی فرآیند به مقدار آزمایشگاهی آن بسیار نزدیک می‌باشد و کمترین مقدار خطا عبارتست از ۰/۴۳٪ برای ترموکوپل S۳ و بیشترین مقدار خطا مربوط به S۲ و S۶ می‌باشد که برابر ۴ درصد اندازه‌گیری شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی فرآیند به صورت صحیح و با تقریب معتبری می‌تواند دمای حاصل از فرآیند جوشکاری را تخمین زند. در این پژوهش از داده‌های دمایی در ادامه اثر کمی و کیفی عوامل مختلف بر تبلور مجدد بررسی خواهد شد تا در صورت امکان مؤثرترین عامل شناسایی شود.

اثر نرخ سرد شدن

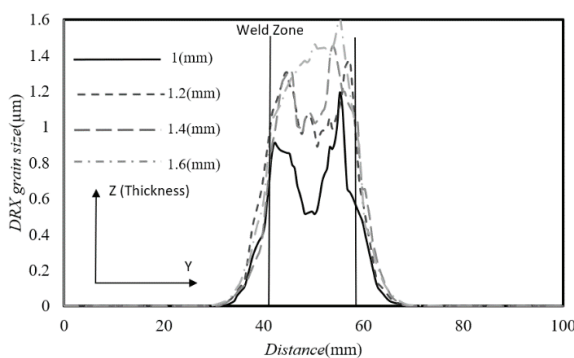
آنچه مسلم است این است که با افزایش نرخ سردکنندگی محیط عبارتی با تغییر محیط سردکننده بعنوان مثال از هوا به آب، دمای سطوح آزاد جسم که با محیط در تماس است کاهش می‌یابد که این کاهش دما موجب افت دمای منطقه اغتشاشی خواهد شد لذا با تغییر محیط سردکنندگی می‌توان به اندازه دانه‌های متفاوتی دست یافت [۲۵ و ۷]. به منظور مطالعه اثر نرخ سرد شدن، سایر متغیرها ثابت در نظر گرفته شده و اثر نرخ سرد شدن در حین جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته است. همانطوری که در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تغییر محیط سردکنندگی از محیط با نرخ سردکنندگی بیشتر به محیط با نرخ کمتر اندازه دانه افزایش یافته است. با افزایش نرخ سردکنندگی فرصت کافی برای توزیع دما در اطراف خط جوش وجود ندارد و دما به سرعت افت می‌کند لذا با افزایش نرخ سرد شدن، رشد دانه به ندرت اتفاق افتاده و

تأثیر عمق نفوذ ابزار بر دما و اندازه دانه تبلور مجدد

همانطور که در جدول ۲ اشاره شد در این پژوهش بازه تغییرات عمق نفوذ شانه ابزار در قطعه کار از ۱/۶-۱ میلی‌متر می‌باشد. اگرچه این تغییرات جزئی به نظر می‌رسد اما تغییرات عمده‌ای در دما و میزان کرنش ایجاد می‌کند. تغییرات دمای حاصل از شبیه‌سازی، در شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش عمق نفوذ هم دما و هم منطقه متأثر از کار مکانیکی - حرارتی افزایش یافته‌اند. لذا انتظار می‌رود که تغییرات اندازه دانه در این مناطق با افزایش عمق نفوذ افزایش یابد [۲۴ و ۲۸]. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود هرچقدر ابزار بیشتر در قطعه کار نفوذ کند موجب تحت تأثیر قرار گرفتن مقادیر بیشتری از دانه‌ها می‌شود. بعبارت دیگر جابجایی این دانه‌ها از مقابل ابزار به پشت آن موجب ایجاد حرارت بیشتر و تغییرات بیشتری در اندازه دانه خواهد شد [۴]. بنابراین عمق نفوذ کمتر شانه ابزار استحکام بیشتری را در سطح قطعه کار در منطقه جوش موجب می‌شود.



شکل ۹. تأثیر عمق نفوذ شانه ابزار بر دما.



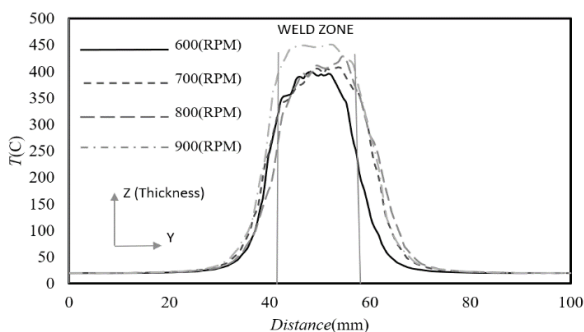
شکل ۱۰. تأثیر عمق نفوذ شانه ابزار بر اندازه دانه تبلور مجدد یافته.

تأثیر ضریب اصطکاک ابزار بر دما و اندازه دانه تبلور مجدد

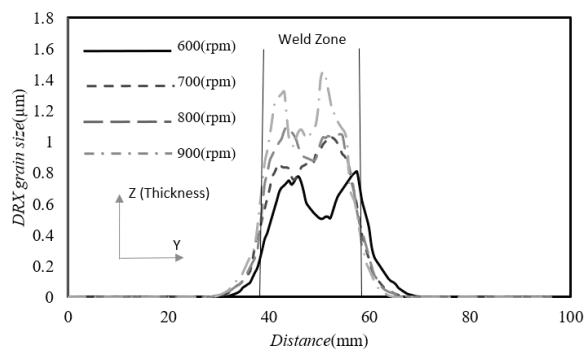
با افزایش ضریب اصطکاک چسبندگی ماده قطعه کار به ابزار بیشتر شده و لذا موجب افزایش کرنش و مقدار ماده جابجا شده می‌شود [۳]. همانطور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده می‌باشد با افزایش ضریب اصطکاک دما افزایش می‌یابد. در

افزایش یافته و از سوی دیگر منطقه متأثر از حرارت گسترش می‌یابد [۱۶].

اثر تغییرات سرعت چرخشی ابزار بر تغییرات اندازه دانه در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود بر اساس شبیه‌سازی صورت گرفته، با افزایش سرعت چرخشی اندازه دانه تبلور مجدد یافته افزایش می‌یابد که علت این امر را می‌توان به افزایش کرنش پلاستیک بیشتر و افزایش دما در مناطق متأثر از کار مکانیکی و حرارتی و همچنین منطقه متأثر از حرارت نسبت داد [۱۳ و ۱۰]. بررسی تغییرات اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی نشان می‌دهد که در این ناحیه اندازه دانه تبلور مجدد یافته به صورت نوسانی ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است که با توجه به اینکه دما با اندازه دانه تبلور مجدد یافته رابطه مستقیم دارد لذا با تغییرات نامنظم دما در این ناحیه اندازه دانه نیز به صورت نامنظم افزایش و کاهش داشته است. از سوی دیگر با افزایش سرعت چرخشی منطقه متأثر از حرارت گسترش یافته و تعداد بیشتری از دانه‌های اولیه تحت تغییرات در اندازه دانه قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود افزایش سرعت چرخشی تغییری در گسترش محدوده تبلور مجدد دینامیکی بعبارتی توزیع دانه بندی نداشته لذا به منظور افزایش استحکام و چقرمگی می‌باید سرعت چرخشی ابزار تا حد ممکن کاهش یابد چراکه افزایش سرعت خطی موجب دانه بندی درشت تر خواهد شد.

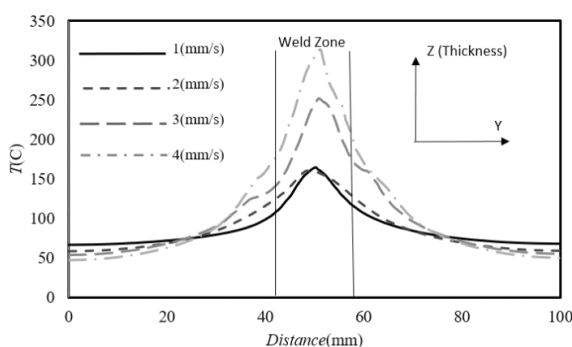


شکل ۷. تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر دما.

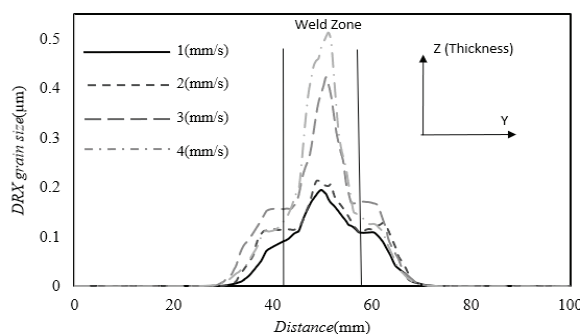


شکل ۸. تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر تغییرات اندازه دانه.

افزایش سرعت موجب می‌شود که زمان کافی برای توزیع دما در مقطع عرضی نمونه قابل مشاهده می‌باشد. روند تغییرات اندازه دانه با ضریب اصطکاک مانند دما می‌باشد و هر چقدر ضریب اصطکاک افزایش یابد تغییرات اندازه دانه بیشتر بوده و منطقه متأثر از حرارت نیز گسترده‌تر خواهد شد. این امر موجب ایجاد دانه‌بندی درشت‌تر در اطراف خط جوش می‌شود که کاهش خواص مکانیکی را در بر خواهد داشت لذا تا حد ممکن می‌باید ضریب اصطکاک را در این ناحیه کاهش داد. کاهش ضریب اصطکاک نیز محدودیتی از قبیل جنس روانکار دارد. در این نوع جوشکاری معمولاً از روانکار استفاده نمی‌کنند چرا که روانکار وارد منطقه جوش شده و موجب نقص در این ناحیه می‌شود. بنابراین به منظور کاهش اصطکاک باید از روش‌های دیگری مثل تغییرات صافی سطوح استفاده کرد به عبارتی با افزایش صافی سطح ضریب اصطکاک را کاهش داد [۳].



شکل ۱۳. تأثیر سرعت خطی ابزار بر دما

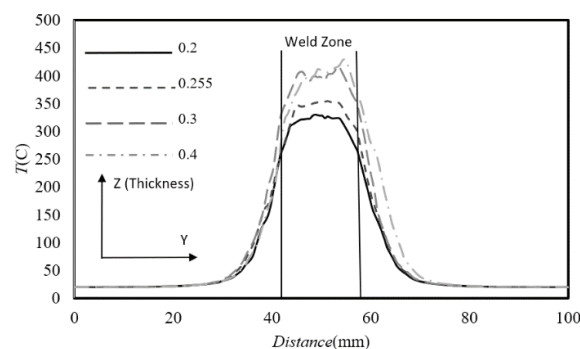


شکل ۱۴. تأثیر سرعت خطی ابزار بر اندازه دانه تبلور مجدد.

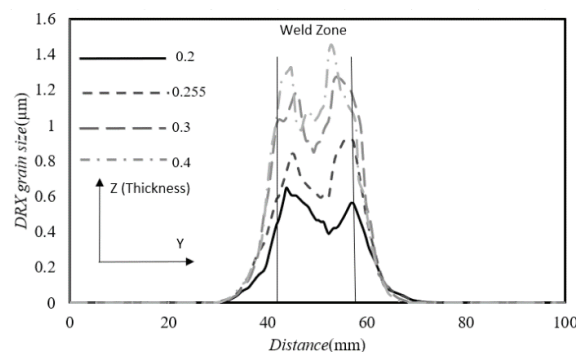
تأثیر هندسه ابزار بر توزیع دما و اندازه دانه تبلور مجدد

در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قطر پین تعیین‌کننده مقداری از فلز است که پلاستیکی شده و اختلاط می‌یابد. اگر قطر پین بزرگ باشد مقدار فلز اغتشاش یافته بیشتر می‌شود به عبارتی منطقه اغتشاشی گسترده‌تر می‌شود و بر عکس [۲۸ و ۲۴]. قطر پین کوچک باعث می‌شود حرارت بالایی به حجم کوچکی از فلز برسد که این باعث ایجاد جریان متلاطمی از مواد و ریز دانه شدن در قسمت محدود و نامنظمی از خط جوش می‌شود و همچنین باعث جریان نامناسب و ناکافی مواد می‌گردد [۳]. در این پژوهش برای نسبت قطر پین به قطر شانه ابزار چهار مقدار ۰/۳۶۶ و ۰/۲۳۱ و

شکل ۱۲ تغییرات اندازه دانه با ضریب اصطکاک در مقطع عرضی نمونه قابل مشاهده می‌باشد. روند تغییرات اندازه دانه با ضریب اصطکاک مانند دما می‌باشد و هر چقدر ضریب اصطکاک افزایش یابد تغییرات اندازه دانه بیشتر بوده و منطقه متأثر از حرارت نیز گسترده‌تر خواهد شد. این امر موجب ایجاد دانه‌بندی درشت‌تر در اطراف خط جوش می‌شود که کاهش خواص مکانیکی را در بر خواهد داشت لذا تا حد ممکن می‌باید ضریب اصطکاک را در این ناحیه کاهش داد. کاهش ضریب اصطکاک نیز محدودیتی از قبیل جنس روانکار دارد. در این نوع جوشکاری معمولاً از روانکار استفاده نمی‌کنند چرا که روانکار وارد منطقه جوش شده و موجب نقص در این ناحیه می‌شود. بنابراین به منظور کاهش اصطکاک باید از روش‌های دیگری مثل تغییرات صافی سطوح استفاده کرد به عبارتی با افزایش صافی سطح ضریب اصطکاک را کاهش داد [۳].



شکل ۱۱. تأثیر ضریب اصطکاک بر دما.

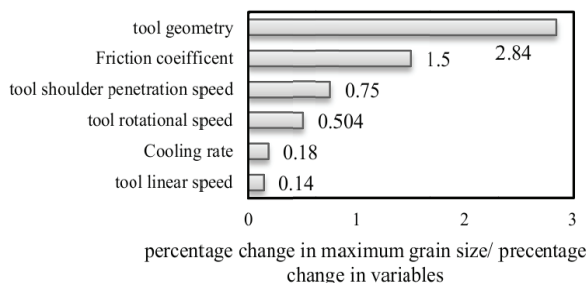


شکل ۱۲. تأثیر ضریب اصطکاک بر اندازه دانه تبلور مجدد یافته.

تأثیر سرعت خطی ابزار بر توزیع دما و اندازه دانه تبلور مجدد

سرعت خطی ابزار یا به عبارتی سرعت جوشکاری یک عامل بسیار موثر بر نحوه توزیع دما و دانه‌بندی می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۳ قابل مشاهده می‌باشد با افزایش سرعت خطی ماکزیمم دمای جوشکاری کاهش یافته است. این

سازی انجام شده در این پژوهش مشخص شد که برای داشتن دانه‌بندی ریز و هم‌محور در خط جوش باید نرخ سردکنندگی و سرعت خطی ابزار را افزایش و سایر عوامل از جمله ضریب اصطکاک، عمق نفوذ شانه ابزار، سرعت چرخشی و نسبت قطر پین به قطر شانه ابزار را کاهش داد. همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، مؤثرترین عوامل بر شرایط انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد مطالعه در این پژوهش به ترتیب هندسه ابزار، ضریب اصطکاک، عمق نفوذ شانه ابزار، سرعت چرخشی، نرخ سرد شدن و سرعت خطی می‌باشند.



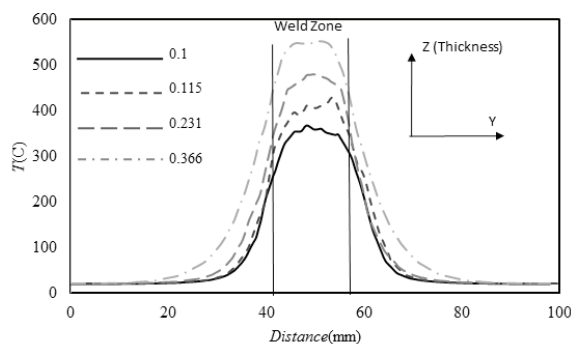
شکل ۱۷. عوامل مؤثر بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

۴. نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار Deform 3D بر پایه روش لاگرانژین، انجام شده و شبیه‌سازی توانست دما را با موفقیت با خطای حداکثر ۴٪ پیش‌بینی کند. توزیع دما در اطراف ابزار به صورت نامتقارن بوده و بیشینه دمای فرآیند ۵۴۳ درجه سانتیگراد در فصل مشترک ابزار و قطعه کار ظاهر شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که:

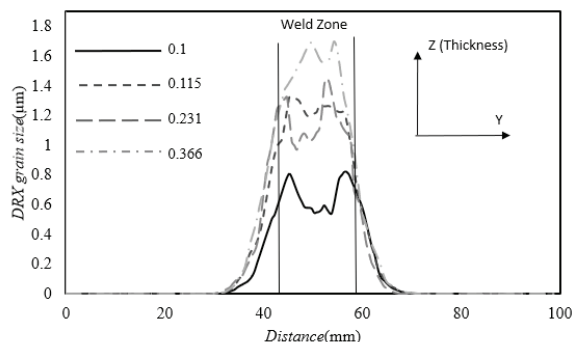
- با افزایش نرخ سردکنندگی اندازه دانه کاهش یافته و منطقه متأثر از حرارت و منطقه متأثر از حرارت - کارمکانیکی کوچکتر شده است. به نحوی که با تغییر محیط سردکنندگی از هوا به سدیم هیدروکسید ۲۰٪ اندازه دانه تبلور مجدد یافته کاهش می‌یابد.
- افزایش سرعت چرخشی اندازه دانه تبلور مجدد یافته افزایش، و منطقه متأثر از حرارت را گسترش داده لذا تعداد بیشتری از دانه‌های اولیه تحت تغییرات در اندازه دانه قرار گرفته‌اند.
- با افزایش عمق نفوذ هم دما و هم منطقه متأثر از کار مکانیکی - حرارتی افزایش یافتند. با محاسبه تغییرات اندازه دانه ماکزیمم به ازای ۱۶٪ افزایش عمق نفوذ شانه ابزار ماکزیمم اندازه دانه ۱۲٪ افزایش می‌یابد.
- با افزایش سرعت چرخشی ابزار گرمای ناشی از تغییر فرم افزایش، و لذا دمای منطقه متأثر از حرارت و منطقه متأثر از حرارت - کارمکانیکی افزایش می‌یابد.
- اندازه دانه با افزایش ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد و

۰/۱ و ۰/۱۱۵ در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۱۵ قابل مشاهده می‌باشد با افزایش قطر پین مقدار کرنشی که به قطعه کار اعمال می‌شود افزایش می‌یابد لذا دما در منطقه اغتشاشی افزایش یافته است.



شکل ۱۵. تأثیر نسبت قطر پین بر قطر شانه بر روی دما.

از سوی دیگر تغییرات اندازه دانه با تغییرات قطر پین نسبت به قطر شانه در شکل ۱۶ نشان می‌دهد آنچه مسلم است این است که با افزایش نسبت قطر پین به قطر شانه، اندازه دانه بزرگتر شده و منطقه متأثر از حرارت افزایش می‌یابد. لذا به منظور افزایش استحکام و چقرمگی به طور همزمان می‌بایست این نسبت تا حدی که اختلالی در جوش بوجود نیارد کاهش یابد. این کاهش می‌تواند به وسیله افزایش قطر شانه و یا کاهش قطر پین حاصل شود.



شکل ۱۶. تأثیر نسبت قطر پین بر قطر شانه بر روی اندازه دانه تبلور مجدد یافته.

مؤثرترین عامل برای شرایط مطلوب جوشکاری

از میان عوامل بررسی شده در این پژوهش به منظور شناخت مؤثرترین عامل، درصد تغییرات اندازه دانه محاسبه و بر درصد تغییرات هر پارامتر تقسیم شده و با این روش تأثیر هر پارامتر با پارامتر دیگر مقایسه شده است. این مهم از این جهت بررسی می‌شود که بتوان شرایط مطلوب را جهت جوشکاری با خواص مکانیکی مطلوب یعنی داشتن همزمان استحکام و چقرمگی تعیین کرد. با استفاده از نتایج حاصل از شبیه

References

[1] A Chandrashekar, Ajay Kumar BS, Reddappa HN, "Friction Stir Welding Tool Material and Geometry", *Akgec International Journal Of Technology*, Vol. 6, No.1, pp.16-20, 2003.

[2] H. Wu, Y.-C. Chen, D. Strong, P. Prangnell, Stationary shoulder FSW for joining high strength aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 221, pp. 187-196, 2015.

[3] M. Assidi, L. Fourment, S. Guerdoux, T. Nelson, Friction model for friction stir welding process simulation: Calibrations from welding experiments, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 2, pp. 143-155, 2010.

[4] A. Hasan, C. Bennett, P. Shipway, A numerical comparison of the flow behaviour in Friction Stir Welding (FSW) using unworn and worn tool geometries, *Materials & Design*, Vol. 87, pp. 1037-1046, 2015.

[5] M. M. Shtrikman, A. P. Kornevich, A. V. Pinskiy, "Friction stir welding of ribbed panels of aircraft airframes" *Welding International*, Vol. 32, No. 3, 2018.

[6] G. Singh, A. S. Kang, K. Singh, J. Singh, Experimental comparison of friction stir welding process and TIG welding process for 6082-T6 Aluminium alloy, *Materials Today Proceedings*, Vol. 4, No. 2, pp. 3590-3600, 2017.

[7] N. Jalili, H. B. Tabrizi, M. M. Hosseini, Experimental and numerical study of simultaneous cooling with CO₂ gas during friction stir welding of Al-5052, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 237, pp. 243-253, 2016.

[8] J. Teimurnezhad, H. Pashazadeh, A. Masumi, Effect of shoulder plunge depth on the weld morphology, macrograph and microstructure of copper FSW joints, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 22, pp. 254-259, 2016.

[9] K. Gök, and M. Aydin, Investigations of friction stir welding process using finite element method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, No. 4, pp. 775-780, 2013.

[10] Z. Gao, J. Niu, F. Krumphals, N. Enzinger, S. Mitsche, C. Sommitsch, FE modelling of microstructure evolution during friction stir spot welding in AA6082-T6, *Welding in the World*, Vol. 57, No. 6, pp. 895-902, 2013.

[11] G.E Dieter, and D.J. Bacon, Mechanical metallurgy. *McGraw-hill New York*, pp. 475-523, 1986.

[12] R.W. Hertzberg, Deformation and fracture mechanics of engineering materials. *New York*, pp. 462-552, 1989.

[13] M.S Rao, B.R. Kumar, and M.M. Hussain, Experimental study on the effect of welding parameters and tool pin profiles on the IS: 65032 aluminum alloy FSW joints. *Materials Today Proceedings*. Vol. 57, pp. 1394-1404, 2017.

[14] G. D'Urso, et al., The influence of process parameters on mechanical properties and corrosion behaviour of friction stir welded aluminum joints. *Procedia Engineering*, Vol. 2, pp. 591-596, 2017.

[15] Q. Zheng et al, Effect of plunge depth on microstructure and mechanical properties of FSW lap joint between aluminum alloy and nickel-base alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 695, pp. 952-961, 2017.

[16] A. Khalkhali, M. Saranjam, Finite element simulation of microstructure evolution during friction stir welding of automotive aluminum parts, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol. 5, No 1, pp.932-938, 2015.

منطقه متأثر از حرارت نیز گسترده تر خواهد شد. افزایش ۲۰٪ ضریب اصطکاک باعث افزایش ۳۰٪ ماکزیمم اندازه دانه تبلور مجدد یافته شده است.

- با افزایش سرعت خطی، ماکزیمم دمای جوشکاری کاهش یافته است.
- با افزایش سرعت خطی مقدار کرنش کمتری به منطقه متأثر از کار مکانیکی- حرارتی اعمال شد که موجب کاهش تغییرات اندازه دانه در این مناطق نسبت به سایر مناطق شده است.
- بیشترین حرارت ناشی از تغییر فرم پلاستیکی و غیرخطی مواد و اصطکاک ناشی از درگیری شانه و پین ابزار با قطعه کار در ناحیه مرکزی پین ابزار ایجاد می شود.
- با افزایش قطر پین مقدار کرنشی که به قطعه کار اعمال می شود افزایش می یابد لذا دما در منطقه بهم خورد، افزایش یافته است.
- افزایش قطر پین نسبت به قطر شانه اندازه دانه را افزایش و منطقه متأثر از حرارت را گسترده تر می کند. این تغییرات به این صورت است که با افزایش ۱۳٪ نسبت قطر پین به قطر شانه ۳۷٪ ماکزیمم اندازه دانه تبلور مجدد یافته افزایش می یابد.

فهرست علائم و نشانه ها

d ₀	اندازه دانه اولیه (μm)
R	ثابت گازها (j/mol K)
Q	انرژی فعال سازی (j/mol)
T	دما (C)

علائم یونانی

σ	تنش (MPa)
μ	ضریب اصطکاک
ρ	چگالی (kg/m ³)
ε	کرنش
ε̇	نرخ کرنش (s/1)

- [17] L. Donati, A. Segatori, M. El Mehtedi, L. Tomesani, Grain evolution analysis and experimental validation in the extrusion of 6XXX alloys by use of a lagrangian FE code, *International Journal of Plasticity*, pp. 70-81, 2013.
- [18] J.R Davis, ASM specialty handbook: heat-resistant materials, *Asm International*, 1997.
- [19] J. G. Kaufman, Introduction to aluminum alloys and tempers, *ASM international*, 2000.
- [20] G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri, L. Fratini, Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 419, No. 1, pp. 381-388, 2006.
- [21] G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri, L. Fratini, A continuum based fem model for friction stir welding – model development, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 419, No. 1, pp. 389-396, 2006.
- [22] S. DEFORM-3D™ V10.2 User's manual, Columbus, Ohio, USA.2010.
- [23] N. Sibalic, M. Vukcevic, M. Janjic, S. Savicevic, A study on friction stir welding of AlSi1MgMn aluminium alloy plates/ Studija zavarivanja trenjem lima od aluminijске legure Al-Si1MgMn, *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, Vol. 23, No. 3, pp. 653-661, 2016.
- [24] R. A. Behnagh, M. Besharati Givi, M. Akbari, Mechanical properties, corrosion resistance, and microstructural changes during friction stir processing of 5083 aluminum rolled plates, *Materials and manufacturing processes*, Vol. 27, No. 6, pp. 636-640, 2012.
- [25] L. Fratini, G. Buffa, and R. Shivpuri, Mechanical and metallurgical effects of in process cooling during friction stir welding of AA7075-T6 butt joints. *Acta Materialia*, Vol. 56, No 6, pp. 2056-2067, 2010.
- [26] P. Asadi, M. Akbari, H. Karimi-Nemch, Simulation of friction stir welding and processing, *Advances in friction stir welding and processing*. Woodhead Publishing Limited, Elsevier, pp. 499-542, 2014.
- [27] L. Fratini, F. Micari, G. Buffa, V. Ruisi, A new fixture for FSW processes of titanium alloys, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 271-274, 2010.
- [28] J. Zhang, Y. Shen, B. Li, H. Xu, X. Yao, B. Kuang, J. Gao, Numerical simulation and experimental investigation on friction stir welding of 6061-T6 aluminum alloy, *Materials & Design*, Vol. 60, pp. 94-101, 2014.