



Thermomechanical and microstructural simulation of rotary friction welding process of Inconel718 alloy using the finite element method

Hossein Mani¹, Abuzar Taheri Zade^{1*} and Mohammad Silani²

1-Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Abstract: Rotary friction welding is one of the most important techniques for joining different parts in advanced industries. Measuring the history of thermomechanical and microstructural parameters can be challenging and costly. To address these challenges, the finite element method was used to simulate thermomechanical and microstructural aspects of the welding of identical superalloy Inconel718 tubes. Therefore, in this research, thermomechanical and microstructural simulations were developed to calculate essential mechanical and metallurgical parameters such as temperature, strain, strain rate, volume fraction of dynamic recrystallization, and grain size distribution. Some of these parameters were then used to be verified with experimental test results. In the microstructural simulation, the Johnson-Avrami model was applied to convert thermomechanical parameters to metallurgical factors by using a FORTRAN subroutine. By employing the dynamic recrystallization kinetics model, the thickness of the recrystallization zone in the wall thickness was calculated to be 480 and 850 micrometers at the center and edge of the tube wall, respectively. These values were reported in the experimental measurements as 500 and 800 micrometers, respectively. Additionally, the grain size change from the center to the edge of the wall thickness, close to the weld interface, were predicted from 2.07 to 2.15 micrometers by simulations, which was comparable with the experimental measurements of 1.9 to 2.2 micrometers. Also, different types of curves were represented to investigate the correlation between thermomechanical and microstructural parameters. Predictable results were concluded from microstructure evolutions with changes by thermomechanical results.

Keywords: Rotary friction welding, Finite element method, Inconel718, Microstructural simulation, Johnson-Avrami model, subroutine.

Received: Aug. 08, 2023; Revised: Oct. 01, 2023; Accepted: Oct. 02, 2023; Published Online: March 05, 2024.

* Corresponding Author: a.taheri@iut.ac.ir

How to Cite: Mani Hossein, Taheri Zade Abuzar and Silani Mohammad, Thermomechanical and microstructural simulation of rotary friction welding process of Inconel718 alloy using the finite element method, Journal of Computational Methods in Engineering; 2024, 42(2), 135-153; DOI: 10.47176/jcme.42.2.1009.





شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی و ریزساختاری فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با استفاده از روش اجزای محدود

حسین مانی^۱، ابوذر طاهری‌زاده^{۱*} و محمد سیلانی^۲

۱- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده- جوشکاری اصطکاکی دورانی یکی از روش‌های مهم اتصال قطعات مختلف جهت استفاده در صنایع پیشرفته به شمار می‌رود. با توجه به مشکلات اندازه‌گیری متغیرها در حین آزمون عملی و به منظور کاهش هزینه‌ها، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی عددی یک امکان بسیار موثر در تحقیقات علمی به شمار می‌رود. در این مقاله روش شبیه‌سازی عددی اجزای محدود برای شبیه‌سازی پیوسته مکانیکی-حرارتی و سپس معادلات مشخصه برای شبیه‌سازی ریزساختاری اتصال دو لوله مشابه از جنس آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش جوشکاری اصطکاکی دورانی مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا با انجام شبیه‌سازی عددی مکانیکی-حرارتی پارامترهای مهم مؤثر بر تحولات متالورژیکی مثل توزیع دما، تنش و کرنش بدست آمد و سپس تحولات ریزساختاری مانند کسر حجمی تبلور مجدد و اندازه دانه ساختار نهایی محاسبه و به منظور صحت‌سنجی با نتایج آزمون عملی مقایسه شد. در شبیه‌سازی ریزساختاری با بهره‌گیری از الگوی جانسون-آورامی و زیرروال‌نویسی این الگو به زبان فرترن، خروجی‌های حاصل از حل مکانیکی-حرارتی به متغیرهای متالورژیکی تبدیل شدند. با استفاده از این الگو ضخامت ناحیه متأثر از تبلور مجدد برای مرکز و دیواره ضخامت لوله به ترتیب ۴۸۰ و ۸۵۰ میکرومتر در شبیه‌سازی محاسبه شد. این مقادیر در آزمون عملی به ترتیب ۵۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر گزارش شدند. همچنین تغییرات اندازه دانه از مرکز لوله و مجاور فصل مشترک جوش تا دیواره لوله در شبیه‌سازی از ۲/۰۷ تا ۲/۱۵ میکرومتر پیش‌بینی شد که این روند در آزمون عملی از ۱/۹ تا ۲/۲ میکرومتر گزارش شده بود. نهایتاً در این مقاله تلاش شد تا با رسم منحنی‌های مختلف ارتباط بین متغیرهای مکانیکی-حرارتی و ریزساختاری بررسی و نتایج قابل‌انتظاری از توزیع متغیرهای ریزساختاری با تغییر متغیرهای مکانیکی-حرارتی حاصل گردد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی دورانی، شبیه‌سازی اجزای محدود، اینکونل ۷۱۸، شبیه‌سازی ریزساختاری، الگوی جانسون آورامی، زیرروال‌نویسی.

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰، اولین انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

* نویسنده مسئول، رایانامه: a.taheri@iut.ac.ir



فهرست علائم

D_0	اندازه دانه اولیه (میکرومتر(μm))	Q_f	گرمای تولیدی ناشی از اصطکاک (ژول(J))
PEEQR	نرخ کرنش (S^{-1})	Q_p	گرمای تولیدی ناشی از تغییر شکل پلاستیک (J)
PEEQ	نرخ کرنش	P	فشار محوری (پاسکال(pa))
S,Mises	تنش موثر (مگاپاسکال (MPa))	r	شعاع دوران (متر(m))
μ	ضریب اصطکاک	V	حجم ماده (m^3)
ω	سرعت دورانی (دور بر دقیقه (rpm))	c	ظرفیت حرارتی ($\text{J/Kgr}\times\text{K}$)
η	کسر حرارت پلاستیک	K'	ضریب انتقال حرارت ($\text{W}/(\text{m}^2\times\text{K})$)
σ	تنش (MPa)	t	زمان (ثانیه (s))
$\dot{\epsilon}^{pl}$	نرخ کرنش پلاستیک (S^{-1})	T	دما (C)
ρ	چگالی (Kg.m^{-3})	Q	انرژی منبع داخلی تولید گرما (J)
∂	مشق جزئی	X_{DRX}	کسر حجمی تبلور مجدد
τ_f	تنش برشی تماسی (MPa)	n_D, k_D	ثوابت معادله کسر حجمی تبلور مجدد
ϵ_c	کرنش بحرانی	Z	پارامتر زبر هولمان (S^{-1})
$\epsilon_{0.5}$	کرنش لازم جهت ۵۰ درصد تبلور مجدد	Q_{def}	انرژی لازم برای شروع تغییر شکل پلاستیک (J)
ϵ_p	کرنش پیک	R	ثابت گازها ($\text{J. K}^{-1}. \text{mol}^{-1}$)
$\dot{\epsilon}$	نرخ کرنش (S^{-1})	D_{DRX}	اندازه دانه حاصل از تبلور مجدد (میکرومتر(μm))
		D_{avg}	میانگین اندازه دانه (میکرومتر(μm))

۱- مقدمه

ایجاد اتصال با بالاترین خواص مکانیکی با استفاده از روش‌های جوشکاری رایج که در آن‌ها ذوب موضعی اتفاق می‌افتد به علت تشکیل حفرات و آخال‌های غیرقابل کنترل بسیار مشکل بوده و یا امکان‌پذیر نخواهد بود. به همین دلیل تلاش شده است تا از روش‌های جوشکاری حالت جامد مثل جوشکاری اصطکاکی دورانی جهت اتصال قطعات پیشرفته با خواص مکانیکی جوش بالاتر استفاده شود [۱]. این نوع اتصال حالت جامد بر پایه تولید گرمای موضعی بر اثر اصطکاک حاصل از چرخش دورانی بالا در فصل مشترک و اعمال فشار محوری بر ناحیه جوش انجام می‌شود [۲].

امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی و اهمیت کاهش هزینه‌ها امکان مطالعه فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی از

طریق روش‌های عددی جهت دستیابی به بهترین خواص جوشکاری جهت اتصال قطعات مختلف فراهم شده است [۳ و ۴]. در همین راستا برای اولین بار در سال ۲۰۰۳ فو و دوان [۵] به بررسی شبیه‌سازی پیوسته مکانیکی-حرارتی برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی پرداختند [۶]. در این تحقیق دما، تنش، کرنش و شکل نهایی ناحیه جوش به عنوان پارامترهای خروجی شبیه‌سازی جهت بهینه‌سازی و بهبود طراحی ساخت دستگاه‌های جوش محاسبه و ارائه شدند [۵]. در پژوهشی دیگر توسط یانگ و همکاران [۷] با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس^۱ شبیه‌سازی پیوسته مکانیکی-حرارتی فرآیند جوشکاری اصطکاکی خطی برای آلیاژ تیتانیوم انجام شد [۷]. در پژوهش یانگ با ارائه نتایج توزیع یکنواخت دمایی حاصل از شبیه‌سازی، توزیع یکنواخت ریزساختار در منطقه فصل مشترک

ریزساختاری فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با استفاده از روش اجزای محدود و روابط ریزساختاری جانسون آورامی انجام و نتایج آن با نتایج آزمون تجربی پژوهش نلسون مقایسه شده است [۱۰]. با اندازه‌گیری متغیرهای ریزساختاری و مکانیکی-حرارتی، امکان پیش‌بینی وابستگی هر کدام از این متغیرها به یکدیگر فراهم شده است.

به منظور برطرف کردن شکاف موجود در مقالات پیشین بین مدل‌سازی ترمومکانیکی و ریزساختاری، در این مقاله با استفاده از روش اجزای محدود یک شبیه‌سازی ترمومکانیکی انجام شد. با توجه به تغییر شکل زیاد المان‌ها در حین این فرآیند و به منظور جلوگیری از کاهش دقت شبیه‌سازی از تکنیک مش‌ریزی مجدد بهره گرفته شد. صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی ترمومکانیکی با استفاده از اطلاعات مناسب آزمون عملی به طور کامل انجام شد. با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود تغییرات تنش، کرنش، دما و نرخ کرنش برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ محاسبه شد. در ادامه با اطمینان از مقادیر حاصل از شبیه‌سازی ترمومکانیکی و با استفاده از معادلات سینتیکی جانسون آورامی، شبیه‌سازی ریزساختاری با استفاده از زیرروال آباکوس برای رسیدن به تغییرات اندازه دانه و کسر حجمی تبلور مجدد دینامیکی طراحی شد. صحت سنجی شبیه‌سازی ریزساختاری نیز انجام و نتایج حاصل از آن در راستای بررسی تأثیر تغییرات ترمومکانیکی بر روی تغییرات ریزساختاری ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفت.

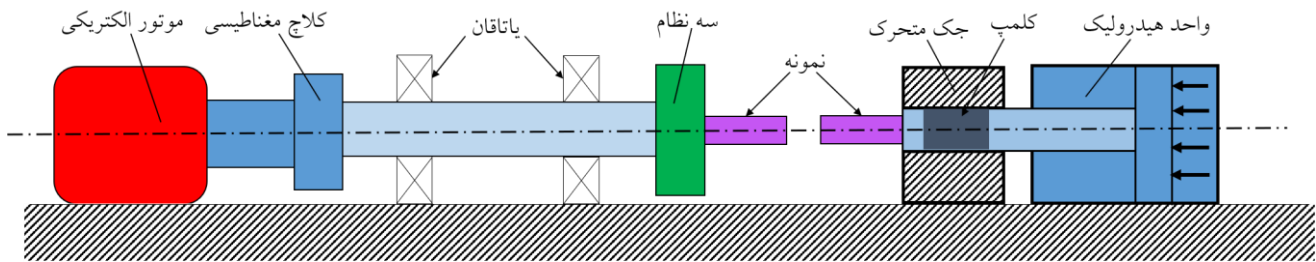
۲- شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند جوشکاری

اصطکاکی دورانی

تصویر شماتیک جزئیات دستگاه مورد استفاده برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی در شکل (۱) قابل مشاهده است. دستگاه جوشکاری اصطکاکی دورانی شامل بخش‌های موتور الکتریکی، کلاچ، یاتاقان و تجهیزات گیرش نمونه‌ها یا سه‌نظام می‌باشد. وظیفه ایجاد چرخش با دور موتور متغیر و قابل تنظیم

جوش پیش‌بینی شد که با اندازه‌گیری‌های تجربی مطابقت داشت [۷]. در گزارش یانگ چگونگی تغییرات ریزساختار در نواحی غیر از فصل مشترک جوش بررسی نشد. در جهت اطمینان از صحت روش‌های عددی استفاده شده در شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی، خسروشاهی و همکاران [۸] از سه روش مختلف جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده کردند. در این گزارش برای مقایسه از پارامترهای کوتاه شدگی محوری، ابعاد زائده‌های ایجاد شده و دمای اندازه‌گیری شده با ترموکوپل استفاده شد. در پژوهش خسروشاهی تحولات ریزساختاری فرآیند بررسی نشد و بیشترین میزان اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی $1/18/6$ بود [۸]. سویر و همکاران [۹] به بررسی شبیه‌سازی پیوسته مکانیکی-حرارتی و ریزساختاری فرآیند جوشکاری اصطکاکی خطی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداختند. در شبیه‌سازی ریزساختاری سویر، روابط جانسون آورامی جهت محاسبه تغییرات اندازه دانه و کسر حجمی تبلور مجدد دینامیکی مورد استفاده قرار گرفتند. در پژوهش سویر برای جوشکاری اصطکاکی خطی، توزیع اندازه دانه حاصل از تبلور مجدد دینامیکی و تغییرات کسر حجمی تبلور مجدد برای نقاط مختلف میله محاسبه شدند [۹]. در پژوهش‌های ذکر شده پیشین مطالعه‌ای در مورد تأثیر تغییرات پارامترهای مکانیکی-حرارتی بر روی خواص ریزساختاری با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی دیده نشد.

تحقیقات تجربی جامعی جهت مشاهده تغییرات اندازه دانه و تحولات ریزساختار در نقاط مختلف لوله از جنس آلیاژ اینکونل ۷۱۸ جوشکاری شده توسط فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی توسط نلسون و همکاران [۱۰] انجام شد. با استفاده از تصاویر میکروسکوپی اندازه دانه حاصل از تبلور مجدد در طول و عمق فصل مشترک جوش اندازه‌گیری شد [۱۰]. در گزارش نلسون از شبیه‌سازی و یا استفاده از معادلات جانسون آورامی جهت اندازه‌گیری متغیرهای ریزساختاری در تمام نقاط لوله جوشکاری شده صرف نظر شده است. به همین دلیل در پژوهش حاضر شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی و



شکل ۱- شماتیک جزئیات دستگاه جوشکاری اصطکاکی دورانی

مت پرو^۲ استفاده شد. اعتبارسنجی نتایج در این نرم‌افزار برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با استفاده از داده‌های آزمون‌های عملی توسط خود نرم‌افزار انجام شده است [۱۷-۱۵]. تغییرات تنش سیلان از دمای محیط تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش 10^{-5} تا 10^{-1} بر ثانیه برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در نرم‌افزار آباکوس تعریف شد. در منحنی‌های شکل (۲) تغییرات تنش سیلان برای نرخ کرنش $0/001$ و ۱ در دماهای مختلف قابل مشاهده است. جهت انجام شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی سایر متغیرهای وابسته به دما مانند ضریب انتقال حرارت، مدول یانگ، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نیز با استفاده از نرم‌افزار جی مت پرو مطابق شکل (۳) شبیه‌سازی شد.

۲-۲ شرایط اولیه شبیه‌سازی

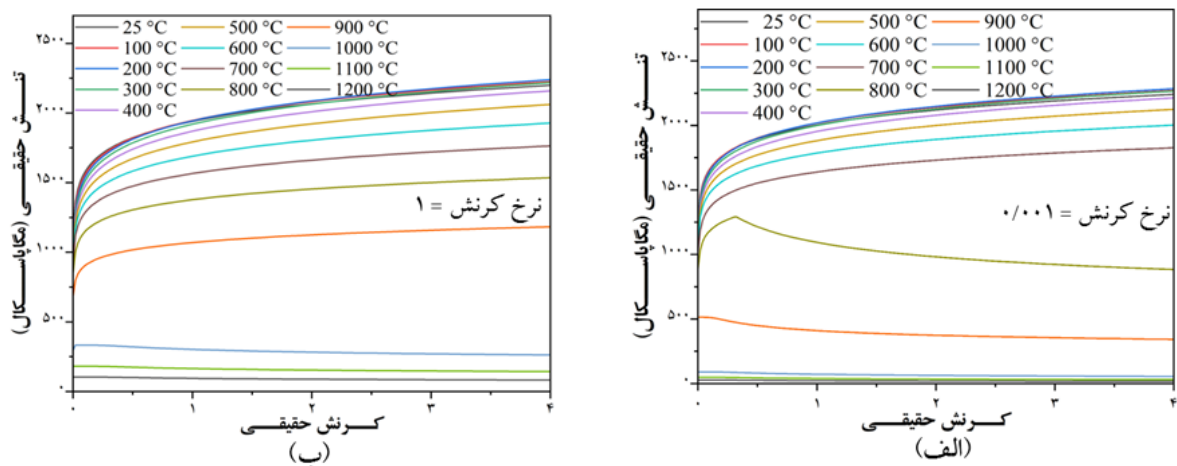
در این مقاله به منظور انجام صحت‌سنجی شبیه‌سازی، شرایط اولیه مسئله مطابق با مقاله نلسون و همکاران [۱۰] تعریف شد. با توجه به وجود تقارن در هندسه و بارگذاری فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی، ابعاد لوله‌های اینکونل استفاده شده در آزمون عملی در حالت تقارن محوری مطابق شکل (۴) با ابعاد $10/15$ و $24/7$ میلیمتر به ترتیب برای شعاع داخلی و خارجی تعریف شد. جهت جلوگیری از اعوجاج المان‌ها، ساختار حل در چهار مرحله طرح‌ریزی شد که در پایان هر مرحله به کمک برنامه‌نویسی به زبان پایتون شبیه‌سازی جدیدی انجام شد. شبیه‌سازی جدید با وارد کردن شکل نهایی حل قبلی، شرایط مرزی حل قبلی، مش‌ریزی مجدد و اضافه کردن خروجی‌های حل قبلی صورت پذیرفت. انجام این تغییرات در روند حل با اضافه کردن برخی کلمات کلیدی به فایل ورودی نرم‌افزار

برای نمونه ثابت بر عهده این تجهیزات است (سمت چپ شکل (۱)). علاوه بر این بخش‌های واحد هیدرولیک، کلمپ و جک متحرک باعث ایجاد فشار یکنواخت به صورت عمود بر نمونه دیگر می‌شوند (سمت راست شکل (۱)).

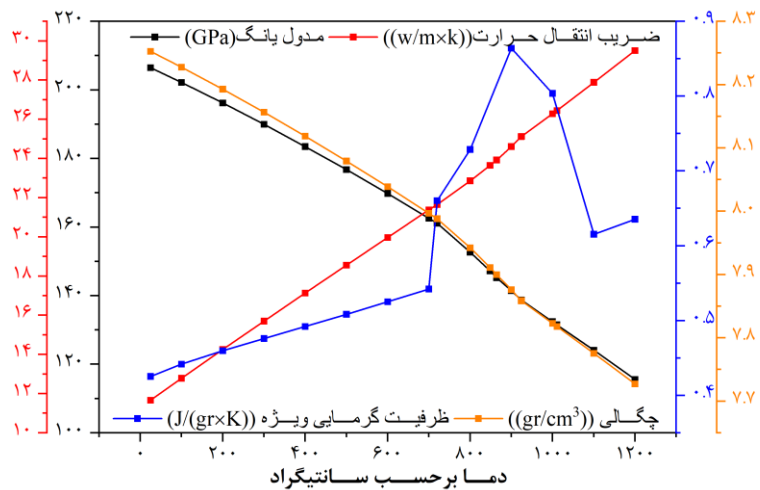
در ادامه این بخش اطلاعات لازم جهت شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی دو لوله اینکونل ۷۱۸ در نرم‌افزار آباکوس بیان می‌شود. با توجه به یکسان بودن خواص ماده در تمام جهات، اعمال چرخش متقارن، اعمال یکنواخت فشار به صورت عمودی و همچنین شکل متقارن قطعات (لوله) شبیه‌سازی این فرآیند به صورت تقارن محوری مشابه سایر پژوهش‌ها [۸، ۹ و ۱۱-۱۴] انجام شد. با در نظر گرفتن انجام شبیه‌سازی به صورت تقارن محوری هزینه‌های انجام شبیه‌سازی بدون تاثیرگذاری روی دقت و کیفیت نتایج به شدت کاهش یافت. با توجه به وجود همزمان تغییر شکل و افزایش دما در این فرآیند، از حلگر کوپل دما-جابجایی جهت محاسبه پارامترهای این فرآیند ترمومکانیکی استفاده شد. جهت تکمیل شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، ابتدا نحوه استخراج خواص حرارتی، الاستیک و پلاستیک ماده بیان و سپس شرایط مرزی و برخی تنظیمات تعریف مسئله در نرم‌افزار عنوان می‌شود.

۱-۲ تعریف خواص ماده و الگوی شبیه‌سازی

با توجه به وجود تغییر شکل پلاستیک در دما و نرخ‌های کرنش متفاوت لازم است تا خواص پلاستیک ماده به درستی برای دماها، کرنش‌ها و نرخ‌های کرنش مختلف مشخص شود. جهت دستیابی به اطلاعات کامل در این شبیه‌سازی از نرم‌افزار جی



شکل ۲- نتایج تنش سیلان بدست آمده از نرم افزار جی مت پرو در نرخ کرنش‌های الف) ۰/۰۰۱ و ب) ۱ ثانیه برای دماهای ۲۵-۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد.

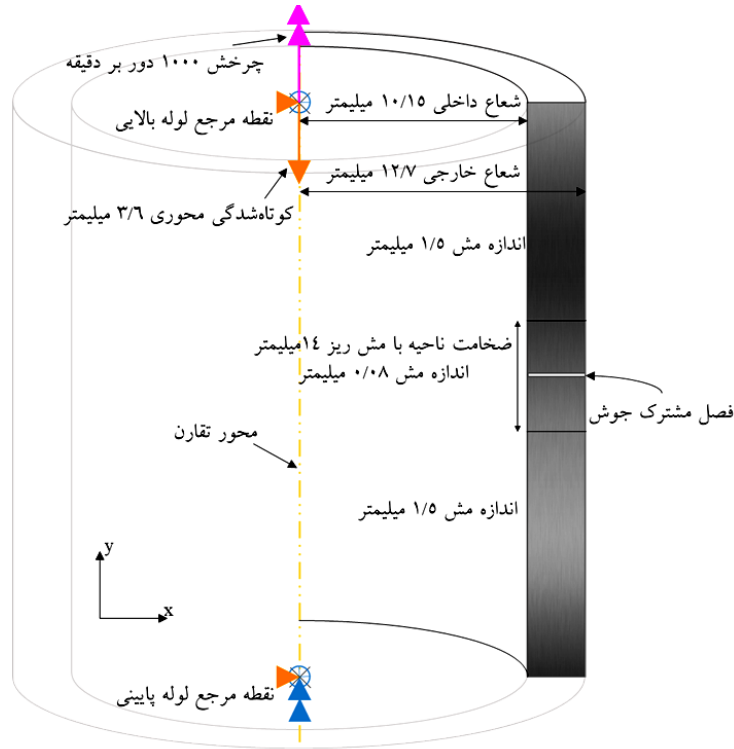


شکل ۳- منحنی تغییرات چگالی، ضریب انتقال حرارت، ظرفیت گرمایی ویژه و مدول یانگ آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در دماهای مختلف.

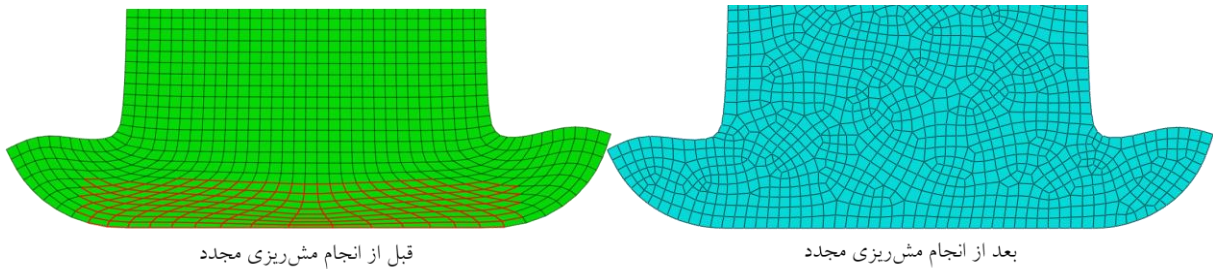
انجام مش‌ریزی مناسب، هر قطعه مطابق شکل (۴) به دو ناحیه تقسیم‌بندی شد و دو قسمت نزدیک به فصل مشترک با تغییر شکل بیشتر با اندازه ۰/۰۸ میلیمتر و قسمت دیگر با اندازه ۱/۵ میلیمتر مش‌ریزی شد. اندازه المان ۰/۰۸ میلیمتر با انجام آزمون حساسیت به مش انتخاب شد. شکل المان‌ها چهارگوش-مثلثی و از تکنیک حالت آزاد برای مش‌ریزی استفاده شد. در این شبیه‌سازی از المان‌های پیوسته کاهش‌یافته با مرتبه یک بهره گرفته شده که انتخاب مناسبی برای حل‌های تقارن محوری و کوپل دما-جابجایی معرفی می‌شوند [۴، ۸، ۱۲-۱۴ و ۱۹].

آباکوس انجام شد. این کلمات کلیدی با توجه به نوع شبیه‌سازی و نوع حل طرح‌ریزی و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت [۱۱ و ۱۸]. تأثیر انجام مش‌ریزی مجدد بر بهبود شکل المان‌ها در شکل (۵) قابل مشاهده است. به علت خارج شدن المان‌ها از شکل اولیه (المان‌های قرمز)، دقت حل کاهش پیدا می‌کند اما با ایجاد حل جدید و مش‌ریزی مجدد دقت نتایج شبیه‌سازی حفظ می‌شود.

در تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده قطعه پایینی در تمامی جهات ثابت و قطعه بالایی تحت کوتاه‌شدگی عمودی به میزان ۳/۶ میلیمتر و چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت. به منظور



شکل ۴- ابعاد و شرایط مرزی لوله در شبیه‌سازی.



شکل ۵- تغییر شکل المان‌ها در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی قبل و بعد از مش‌ریزی مجدد (المان‌های اعوجاج یافته با قرمز مشخص شده‌اند)

گرمای تولیدی در این فرآیند) مطابق رابطه (۲) قابل محاسبه است [۱۹-۲۱].

$$Q_f = \mu P \omega r \quad (1)$$

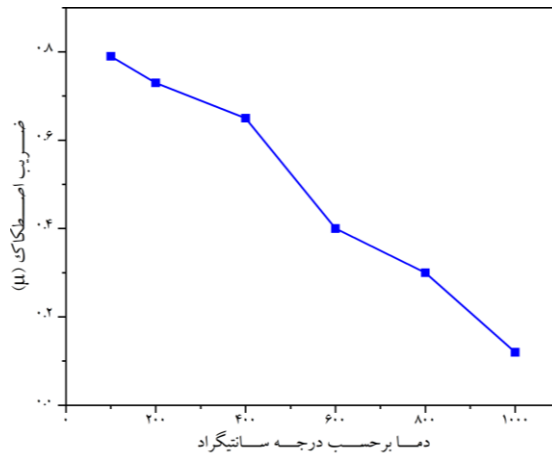
$$Q_p = \eta \sigma \dot{\epsilon}^{pl} V \quad (2)$$

در این روابط کسر حرارت پلاستیک با η ، نرخ کرنش پلاستیک با $\dot{\epsilon}^{pl}$ ، حجم ماده با V ، فشار محوری با P ، سرعت دورانی با ω ، ضریب اصطکاک با μ ، شعاع دورانی با r و تنش با σ مشخص شده‌اند [۲۱]. ثابت کسر حرارت پلاستیک در این شبیه‌سازی ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

۳- روابط ساختاری حاکم بر شبیه‌سازی

۱-۳ روابط شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی

جهت محاسبه گرمای تولید شده در فصل مشترک جوش در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی، باید گرمای تولید شده ناشی از اصطکاک (۸۵ تا ۹۰ درصد گرمای تولیدی در این فرآیند) محاسبه شود [۲۰]. برای این منظور از قانون آمونتون مطابق رابطه (۱) استفاده شد [۶ و ۲۰]. در این شبیه‌سازی گرمای تولید شده ناشی از تغییر شکل پلاستیک (۱۰-۱۵ درصد



شکل ۶- منحنی تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب دما [۲۳].

استفاده شده در این شبیه‌سازی با انتخاب حلگر کوپل دما-جابجایی و با توجه به خواص ماده و ضریب اصطکاک، توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مورد استفاده قرار می‌گیرد. سایر معادلات در توضیحات بخش حلگر کوپل دما جابجایی نرم‌افزار آباکوس قابل مشاهده هستند [۱۱].

۲-۳ روابط تحولات ریزساختاری

جهت مطالعه تحولات ریزساختاری مرتبط با جوانه‌زنی و تبلور مجدد در تغییر شکل‌های دما بالا در فرایندهای مختلف از معادلات سینتیکی جانسون آوارمی به طور گسترده استفاده شده است [۹ و ۲۴-۲۸]. تبلور مجدد دینامیکی با رسیدن مقدار کرنش به میزان کرنش بحرانی آغاز می‌شود و میزان پیشروی تبلور مجدد با استفاده از تغییرات کرنش در هر گام زمانی و هر المان قابل محاسبه است. طبق مطالعات انجام شده تغییرات کسر حجمی تبلور مجدد با استفاده از رابطه (۵) برای فولادها بیان می‌شود [۲۷].

$$X_{DRX} = 1 - \exp\left(-K_D \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0.5}}\right)^{n_D}\right) \quad (\varepsilon \geq \varepsilon_c) \quad (5)$$

در این رابطه کسر حجمی تبلور مجدد با X_{DRX} مشخص می‌شود و مقدار آن همواره بین ۰-۱ خواهد بود. در این رابطه ثوابت K_D و n_D برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به ترتیب ۰/۸۶۷۶- و ۱/۹ هستند [۲۷]. در رابطه (۵)، کرنش پلاستیک (ε) از طریق شبیه‌سازی مکانیکی - حرارتی به طور مستقیم محاسبه می‌شود.

در انجام شبیه‌سازی حرارتی محاسبه تغییرات دمایی با گذشت زمان در لوله جوشکاری اصطکاکی دورانی شده حائز اهمیت است. به همین دلیل براساس قانون غیرتعادلی رسانایی گرمایی فوریه، تغییرات دما در لوله جوشکاری اصطکاکی دورانی شده در دستگاه مختصات کارتزین به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود [۲۰ و ۲۱].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = Q + K' \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

در این روابط ضریب هدایت حرارتی با K' ، چگالی با ρ ، ظرفیت حرارتی با C ، زمان با t و دما با T مشخص شده است [۲۰].

با توجه به رابطه (۱) جهت محاسبه گرمای تولید شده در فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی لازم است تا شرایط لغزش بین دو سطح تعریف شود به همین منظور در این شبیه‌سازی از قانون کلمب به شکل رابطه (۴) استفاده شد [۸، ۱۸ و ۲۲].

$$\tau_f = \mu P \quad (4)$$

براساس قانون کولمب μ ضریب اصطکاک، P فشار محوری و τ_f تنش برشی تماسی نامیده می‌شود. در گزارش بای و همکاران [۲۳] ضریب اصطکاک در دماهای مختلف در آزمون‌های عملی برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ اندازه‌گیری شد و نتایج آن مطابق شکل (۶) در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

روابط (۱) تا (۴) و سایر معادلات حرارتی و مکانیکی

۴- نتایج و بحث

۴-۱ اعتبار سنجی شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی

در انجام شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی تعریف صحیح شرایط اولیه از اهمیت بالایی برخوردار است [۹] به همین دلیل در بسیاری از پژوهش‌ها [۴، ۷، ۸، ۱۳، ۱۴، ۱۹، ۳۴ و ۳۵] با بررسی و مقایسه نتایج برخی از متغیرهای آزمون عملی و شبیه‌سازی، اعتبار متغیرهای بدست آمده از شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی بررسی شد. اولین راه برای اطمینان از دقت شبیه‌سازی مقایسه ناحیه تغییرشکل یافته در آزمون عملی و شبیه‌سازی است [۴، ۷، ۸، ۱۴ و ۳۵]. شکل ناحیه تغییر شکل یافته وابسته به تعریف صحیح خواص ماده، شرایط مرزی و شرایط اصطکاکی تعریف شده در شبیه‌سازی می‌باشد. بر همین اساس مقایسه شکل نهایی ناحیه تغییرشکل یافته در آزمون عملی و شبیه‌سازی در شکل (۷) انجام شد. در شکل (۷) علاوه بر برگشت زانده‌ها به سمت خارج از محدوده خط جوش، عدم اعوجاج شدید المان‌ها در شبیه‌سازی فرآیند به دلیل استفاده از تکنیک مش‌ریزی مجدد با وجود تغییر شکل پلاستیک شدید قابل مشاهده است. در شبیه‌سازی مشابه آزمون عملی ضخامت حدود یک میلیمتر از هر قطعه تحت تغییر شکل پلاستیک قرار گرفت.

جهت اطمینان از محاسبه تغییرات دمایی در شبیه‌سازی، از اندازه‌گیری دما با ترموکوپل استفاده می‌شود [۸، ۹، ۱۳ و ۱۴]. اندازه‌گیری دما در آزمون عملی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی با استفاده از چهار ترموکوپل در فواصل مختلف از فصل مشترک جوش انجام شد [۱۰] و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی این پژوهش در شکل (۸) مقایسه شده است. کاهش دما با فاصله گرفتن از فصل مشترک جوش قابل پیش‌بینی است و با مقایسه منحنی‌های قرمز و سیاه در شکل (۸) دقت انجام شبیه‌سازی حرارتی قابل نتیجه‌گیری است.

۴-۲ نتایج شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی

با وجود تغییر شکل زیاد در اثر نرم‌شدگی حاصل از افزایش دما

روابط لازم جهت محاسبه متغیرهای ϵ_c و $\epsilon_{0.5}$ که به ترتیب کرنش بحرانی و کرنش لازم جهت انجام ۵۰٪ تبلور مجدد می‌باشند، با استفاده از محاسبات عددی منحنی تنش-کرنش در سایر گزارش‌ها قابل مشاهده هستند [۲۵، ۲۹ و ۳۰] و مقدار آن‌ها معمولاً وابسته به پارامتر زهر هولمان بوده که به صورت روابط (۶) تا (۸) گزارش می‌شوند [۲۷]. رابطه (۹) جهت محاسبه پارامتر زهر هولمان به طور گسترده در اندازه‌گیری سینتیک تبلور مجدد دینامیکی در فرایندهای تغییر شکل گرم مورد استفاده قرار گرفته است [۲۷، ۲۵ و ۳۰-۳۲].

$$\epsilon_p = 0.0032 \times (Z)^{0.11376} \quad (6)$$

$$\epsilon_c = 0.8 \times \epsilon_p \quad (7)$$

$$\epsilon_{0.5} = 0.1343 \times (Z)^{0.0515} \quad (8)$$

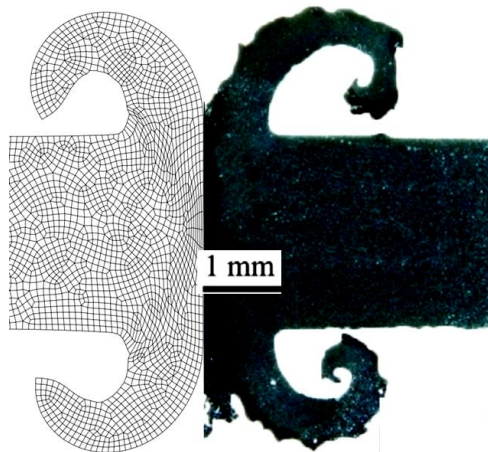
$$Z = \dot{\epsilon} \times \exp\left(\frac{Q_{\text{def}}}{RT}\right) \quad Q_{\text{def}} = 437000 \text{ (J / mol.K)} \quad (9)$$

در این روابط ϵ_p کرنش پیک، Z معرف پارامتر زهر هولمان، Q انرژی لازم جهت فعال‌سازی شروع تغییر شکل پلاستیک و $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش ماده هستند. با توجه به مشخصه‌های سینتیک تبلور مجدد دینامیکی، اندازه دانه کاملاً تبلور مجدد یافته به اندازه دانه اولیه قبل از تغییر شکل ماده وابسته نیست و به دما و نرخ کرنش فرآیند تغییر شکل گرم بستگی دارد [۳۱]. ارتباط اندازه دانه حاصل از تبلور مجدد دینامیکی مطابق رابطه (۱۰) برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با اندازه‌گیری پارامتر زهر هولمان قابل محاسبه است [۳۳].

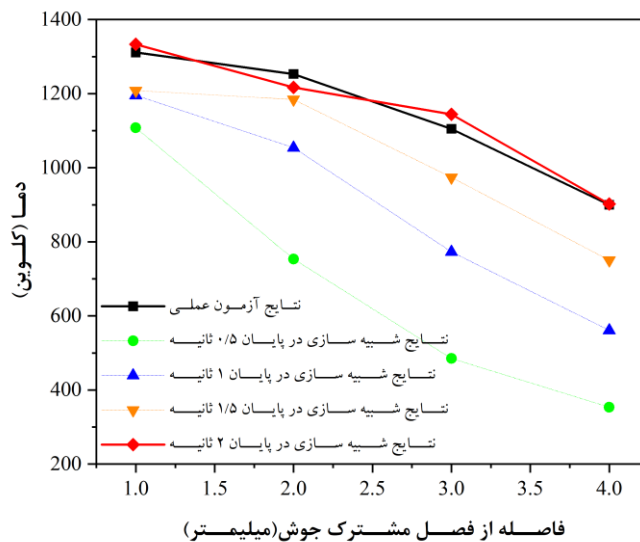
$$D_{\text{DRX}} = 12736723 \times (Z)^{-0.4215} \quad (10)$$

با استفاده از رابطه (۱۱) میانگین اندازه دانه که ترکیبی از دانه‌های تبلور مجدد یافته و نیافته است در هر گام زمانی محاسبه خواهد شد [۹]. در رابطه (۱۱) پارانتر اول مشخص کننده دانه‌های تبلور مجدد یافته و پارانتر دوم مربوط به دانه‌های بدون تغییر است که با همان اندازه دانه‌های اولیه مقدار آن مشخص می‌شود [۹ و ۱۰]. با توجه به آزمون عملی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی [۱۰] در این رابطه D_0 (اندازه دانه اولیه) $4/5$ میکرومتر در نظر گرفته شد [۱۰].

$$D_{\text{avg}} = (D_{\text{DRX}} \times X_{\text{DRX}}) + (D_0 \times (1 - X_{\text{DRX}})) \quad (11)$$



شکل ۷- مقایسه شکل نهایی ناحیه تغییر شکل یافته حاصل از شبیه سازی و آزمون عملی [۱۰] فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی آلیاژ اینکونل ۷۱۸.



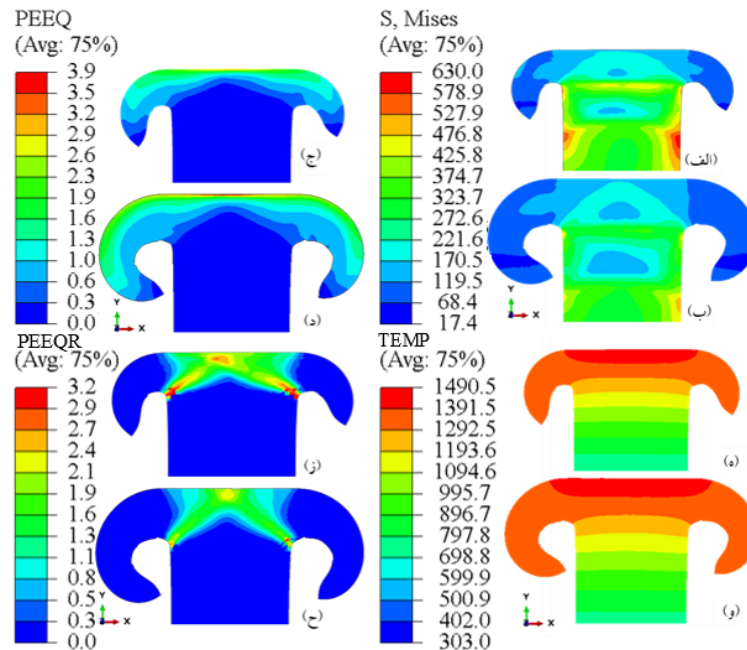
شکل ۸- مقایسه تغییرات دمایی در آزمون عملی [۱۰] و شبیه سازی برای فواصل مختلف از فصل مشترک جوش.

می کند به همین دلیل مقدار تنش در مرکز ضخامت لوله نسبت به زائده در دیواره لوله (شکل ۹-ب و ح) بیشتر است. کاهش شدید تنش در ناحیه نزدیک به فصل مشترک با دمای بالا سبب تشکیل زائده و خروج مواد از فصل مشترک جوش به سمت سطوح آزاد می شود. عدم افزایش مطلوب دما و کاهش مورد نیاز مقدار تنش در مجاورت فصل مشترک جوش منجر به عدم تغییر شکل پلاستیک در این ناحیه و خم شدگی نامطلوب لوله در فواصل دور از فصل مشترک می شود.

میزان تغییر شکل پلاستیک به عنوان معیاری برای بررسی

در ناحیه نزدیک به فصل مشترک جوش، لزوم بررسی تحولات مکانیکی-حرارتی در فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی از طریق شبیه سازی احساس شد. نتایج حاصل از شبیه سازی پارامترهای مکانیکی-حرارتی مثل تنش موثر، کرنش پلاستیک معادل، دما و نرخ کرنش معادل در شکل (۹) ارائه شده است.

با توجه به شکل (۹) کمترین میزان تنش در ناحیه نزدیک به فصل مشترک جوش با بیشترین دما محاسبه شد و با فاصله گرفتن از فصل مشترک مقدار تنش با کاهش دما افزایش یافت. مقدار تنش سیلان با افزایش نرخ کرنش در ماده افزایش پیدا



شکل ۹- توزیع تنش موثر بر حسب مگاپاسکال (الف و ب)، توزیع کرنش پلاستیک معادل (ج و د)، توزیع دما بر حسب کلونین (ه و و) و توزیع نرخ کرنش معادل (ز و ح) در زمان‌های ۱ و ۲ ثانیه پس از شروع فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی.

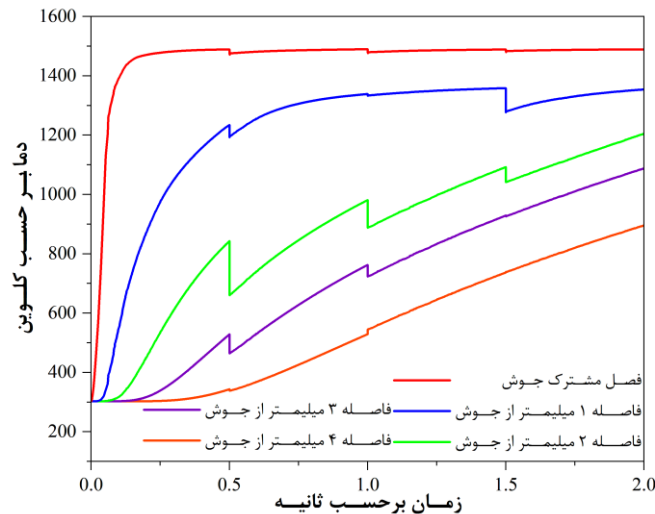
کیفیت جوش معرفی می‌شود به همین دلیل تشکیل زائده و تغییر شکل پلاستیک کافی معیاری از با کیفیت بودن جوش تشکیل شده در فصل مشترک است [۳۶]. ایجاد اتصال جوش تمیز اتمی در فصل مشترک جوش در این فرایند با خروج مواد به سمت خارج از قطعه که با خروج اکسیدها و آلودگی‌های سطحی نیز همراه است امکان‌پذیر شده است [۱]. مطابق انتظار بیشترین مقدار کرنش در نواحی با بیشترین دما، جایی که خروج بیشتر مواد در آن‌ها انجام شده است، محاسبه شد.

با توجه به مشکلات اندازه‌گیری دما در حین آزمون عملی، شبیه‌سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی به عنوان بهترین روش برای مطالعه تغییرات دمایی معرفی می‌شود [۳۵ و ۳۷]. همانگونه که بیان شد ۹۰٪ گرمای تولیدی در این فرایند از اصطکاک بین دو سطح تولید می‌شود [۲۰] بنابراین افزایش دما به صورت لایه لایه با نزدیک شدن به فصل مشترک اصطکاک قابل انتظار است. توزیع دما حاصل از شبیه‌سازی فرایند در شکل (۹ ه- و) ارائه شد. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده بیشترین میزان دما در فصل مشترک تماسی برابر با ۱۲۱۷ درجه

محاسبه تغییرات دما با زمان در فواصل مختلف از فصل مشترک جوش در شکل (۱۰) ارائه شده است. در این شکل مطابق انتظار با فاصله گرفتن از فصل مشترک جوش دما دیرتر شروع به افزایش می‌کند و شیب افزایش دما و دمای نهایی نیز مقدار کمتری دارد. در این شبیه‌سازی زمان شروع تغییر شکل پلاستیک در فصل مشترک جوش حدود ۰/۱۲ ثانیه در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد محاسبه شد.

در این قسمت با توجه به تأثیر متغیر نرخ کرنش بر روی پارامتر زنده‌ولمان و متغیرهای تبلور مجدد دینامیکی، تغییرات نرخ کرنش پلاستیک با انجام شبیه‌سازی برای قسمت‌های مختلف لوله جوشکاری شده بیان می‌شود. با توجه به روابط (۵) تا (۱۱) با محاسبه تغییرات نرخ کرنش امکان محاسبه پارامتر زنده‌ولمان، کسر حجمی تبلور مجدد و اندازه دانه جهت شبیه‌سازی ریزساختار فراهم می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی

روش‌های عددی در مهندسی، سال ۴۲، شماره ۲، ۱۴۰۲



شکل ۱۰- نتایج شبیه‌سازی دما برحسب زمان برای فواصل مختلف از فصل مشترک جوش در فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی (بریدگی منحنی‌ها به دلیل مش‌ریزی مجدد است).

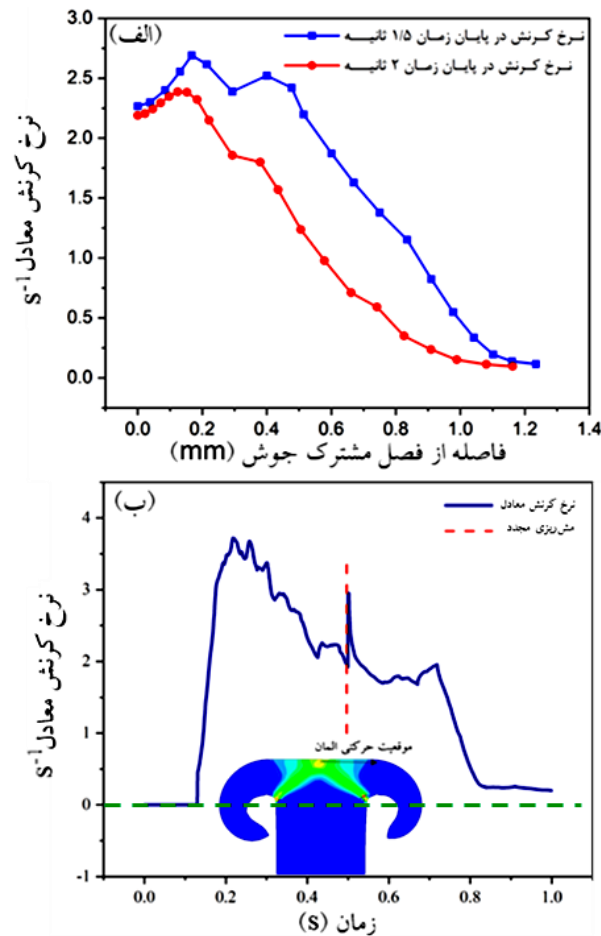
انرژی سیستم سبب ناپایداری ساختار می‌شود. با توجه به تمایل هر ساختار ناپایدار به پایداری در سیستم، شرایط برای کاهش انرژی از طریق تغییر ریزساختار فراهم می‌شود. نیروی محرکه برای پدیده‌های بازیابی و تبلور مجدد نتیجه کاهش همین انرژی به دلیل تحولات ریزساختاری است که مهم‌ترین آن‌ها جوانه‌زنی در ساختار تغییر شکل یافته است [۳۱]. در فرایند جوشکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ تغییر شکل دانه‌ها، افزایش مساحت مرز دانه و پیدایش ساختار داخلی درون دانه‌ها در نتیجه تجمع نابجایی‌ها در ساختار باعث تغییرات ریزساختار این فلز در حین تغییر شکل در دمای بالا می‌شود [۳۸]. جهت مطالعه تحولات ریزساختاری مرتبط با جوانه‌زنی و تبلور مجدد در فرایندهای مختلف تغییر شکل گرم از معادلات سینتیکی جانسون آواری می‌به‌طور گسترده استفاده شده است [۲۴، ۲۵، ۲۸ و ۳۲].

به منظور اطمینان از شبیه‌سازی ریزساختاری مقایسه مقادیر حاصل از شبیه‌سازی و آزمون عملی در این بخش انجام شد. در آزمون عملی این فرایند ضخامت ناحیه تبلور مجدد یافته در مرکز ضخامت لوله و دیواره لوله به ترتیب ۵۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر گزارش شد [۱۰]. در شبیه‌سازی انجام شده با محاسبه ضخامت ناحیه تبلور مجدد یافته این عدد ۴۸۰ میکرومتر برای مرکز ضخامت لوله و ۸۰۰ الی ۹۰۰ میکرومتر در دیواره‌ها به دست آمد که از تطابق مناسبی با

تغییرات نرخ کرنش با فاصله گرفتن از فصل مشترک جوش در مرکز ضخامت لوله برای زمان‌های ۱/۵ و ۲ ثانیه در شکل (۱۱-الف) ارائه شده است. دلیل کاهش نرخ کرنش در فصل مشترک جوش و فواصل دور از آن به ترتیب چسبندگی مواد در فصل مشترک و افزایش استحکام ماده به دلیل کاهش دما است. در شکل (۱۱-ب) منحنی تغییرات نرخ کرنش معادل در عرض فصل مشترک جوش در زمان‌های مختلف ارائه شده است. مطابق این شکل نرخ کرنش معادل با حرکت المان به سمت زائده در حال کاهش است اما مقدار آن صفر نمی‌شود که این روند کاهشی در شکل (۹-ح) نیز قابل مشاهده است.

۴-۳- اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی ریزساختاری

در صورت آگاهی از چگونگی توزیع پارامترهای ریزساختاری، امکان شناخت بیشتر خواص مکانیکی مانند سختی و استحکام نهایی برای قطعه تولیدی به روش جوشکاری اصطکاکی دورانی فراهم خواهد شد [۱۰]. به همین دلیل پس از انجام شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی، شبیه‌سازی متغیرهای ریزساختاری نیز در این مقاله مورد توجه قرار گرفت. در فرایندهای تغییر شکل گرم افزایش نابجایی، افزایش مساحت مرز و افزایش جاهای خالی باعث افزایش انرژی آزاد یک آلیاژ (سیستم) می‌شود و بالا بودن



شکل ۱۱- توزیع نرخ کرنش معادل الف) با فاصله گرفتن از فصل مشترک جوش و ب) در عرض فصل مشترک جوش با گذشت زمان.

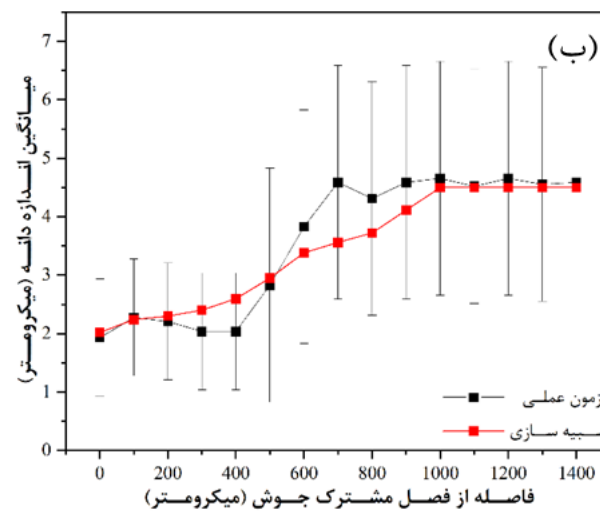
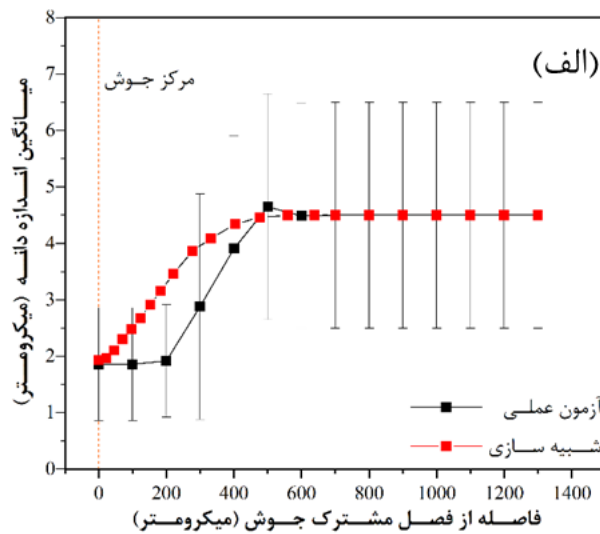
متالورژیکی مثل مهاجرت مرزدانه، لغزش نابجایی و جریان نفوذ می‌شود [۳۱]. فعال شدن این مکانیزم‌ها سبب وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی و تشکیل دانه‌ها با اندازه دانه کوچک‌تر نسبت به اندازه دانه اولیه در ساختار می‌شود. به طور کلی با توجه به اعتبارسنجی انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که با بکارگیری خروجی‌های شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی به عنوان ورودی در شبیه‌سازی ریزساختاری، امکان پیش‌بینی تغییرات اندازه دانه در فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی فراهم می‌شود.

۴-۴ نتایج شبیه‌سازی ریزساختاری

پس از انجام شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی و محاسبه مقادیر توزیع کرنش، نرخ کرنش و دما امکان استفاده از روابط جانسون آوامی و مطالعه پارامترهای متالورژیکی ناشی از تغییر شکل

نتایج آزمون عملی برخوردار است. علاوه بر این مقایسه تغییرات اندازه دانه با فاصله گرفتن از فصل مشترک جوش در مرکز و دیواره ضخامت لوله به عنوان بهترین روش برای اعتبارسنجی نتایج آزمون عملی و شبیه‌سازی در شکل (۱۲) انجام شده است.

از دلایل انحراف این دو نمودار علاوه بر خطاهای شبیه‌سازی می‌توان به خطاهای احتمالی در روش‌های اندازه‌گیری میانگین اندازه دانه در آزمون عملی نیز اشاره کرد و به همین دلیل نتایج این آزمون به صورت بازه تعریف شده است [۱۰]. با انجام شبیه‌سازی صحیح، بیشتر دو منحنی حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۱۲) در بازه نتایج آزمون عملی قرار گرفته است. با انجام شبیه‌سازی، ریزدانه شدن ساختار با نزدیک شدن به فصل مشترک جوش با توجه به افزایش دما قابل پیش‌بینی است. دمای بالا باعث فعال شدن مکانیزم‌های

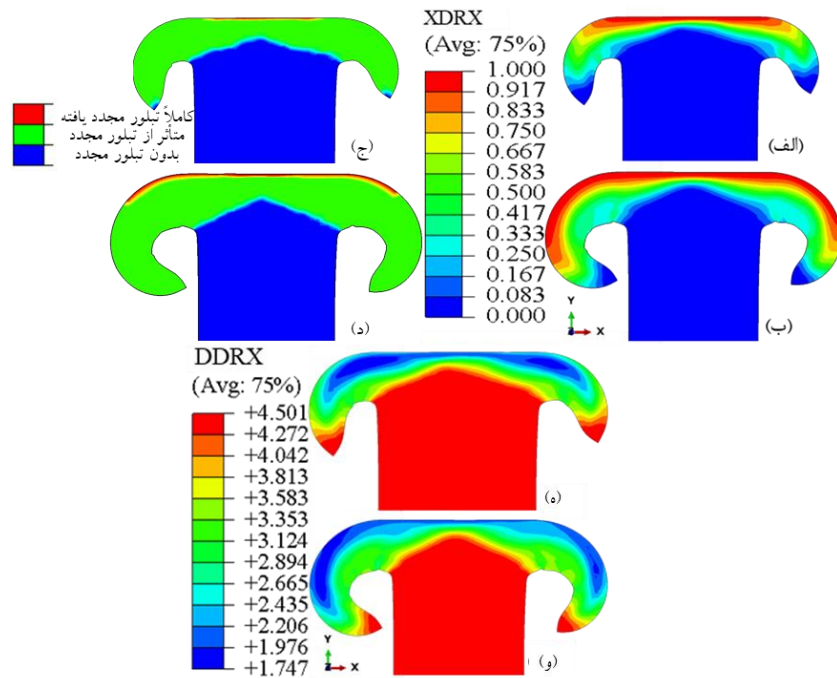


شکل ۱۲- مقایسه تغییرات اندازه دانه برحسب میکرومتر در آزمون عملی [۱۰] و شبیه‌سازی در پایان فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی (الف) در مرکز و (ب) در دیواره ضخامت لوله.

پلاستیک محاسبه شد. محدوده کاملاً تبلور مجدد یافته (نواحی قرمز در شکل (۱۳-ج و د) با تبلور مجدد بیش از ۹۵ درصد) در عمق سطح جوش با توجه به افزایش دما با گذشت زمان گسترش یافت. ضخامت ناحیه کاملاً تبلور مجدد یافته در پایان فرایند (ناحیه قرمز رنگ در شکل (۱۳-د) در حدود ۰/۱-۰/۲ میکرومتر برای هر قطعه در شبیه‌سازی بدست آمد. در توزیع نواحی مختلف حاصل از تبلور مجدد در شکل (۱۳) اولین تشکیل نواحی کاملاً تبلور مجدد یافته (قرمز رنگ) در مرکز ضخامت لوله در زمان حدود ۰/۷ ثانیه محاسبه شد. در نواحی

گرم فراهم شد. به همین منظور در این مقاله با استفاده از روابط (۷) تا (۱۳) شبیه‌سازی ریزساختار با استفاده از زیرروال آباکوس^۳ انجام شد. نتایج شبیه‌سازی مدل سینتیکی تبلور مجدد جانسون آورامی برای زمان‌های ۱ و ۲ ثانیه در شکل (۱۳) قابل مشاهده است.

در شکل (۱۳) مطابق انتظار بیشترین مقدار کسر حجمی تبلور مجدد در مجاورت فصل مشترک جوش با بیشترین دما و تغییر شکل پلاستیک محاسبه شد. با توجه به رابطه (۵) مطابق انتظار توزیع کسر حجمی تبلور مجدد مشابه توزیع کرنش



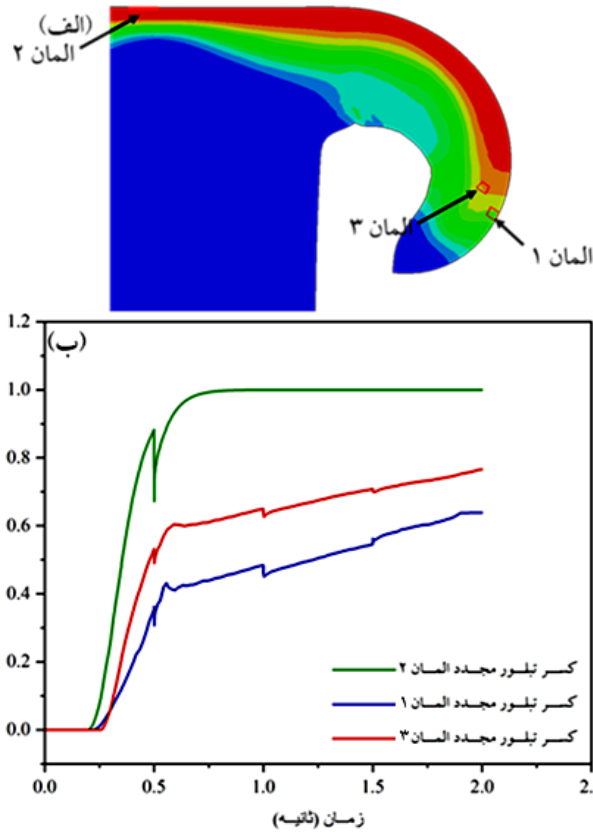
شکل ۱۳- (الف و ب) توزیع کسر حجمی تبلور مجدد، (ج و د) توزیع نواحی مختلف حاصل از تبلور مجدد و (ه و و) توزیع میانگین اندازه دانه در زمان‌های ۱ و ۲ ثانیه پس از شروع فرآیند در لوله جوشکاری اصطکاکی دورانی شده.

ناحیه با نرخ کرنش بیشتر نسبت به المان ۱ قرار گرفته است بنابراین نرخ کرنش بیشتر در المان ۳ سبب ایجاد کسرحجمی تبلور مجدد بیشتر نسبت به المان ۱ می‌شود. بیشترین دما و نرخ کرنش در کل زمان فرآیند در المان ۲ در مرکز ضخامت لوله بدست آمد، به همین دلیل کامل شدن تبلور مجدد در کمترین زمان و بیشترین سرعت در این ناحیه قابل پیش‌بینی است.

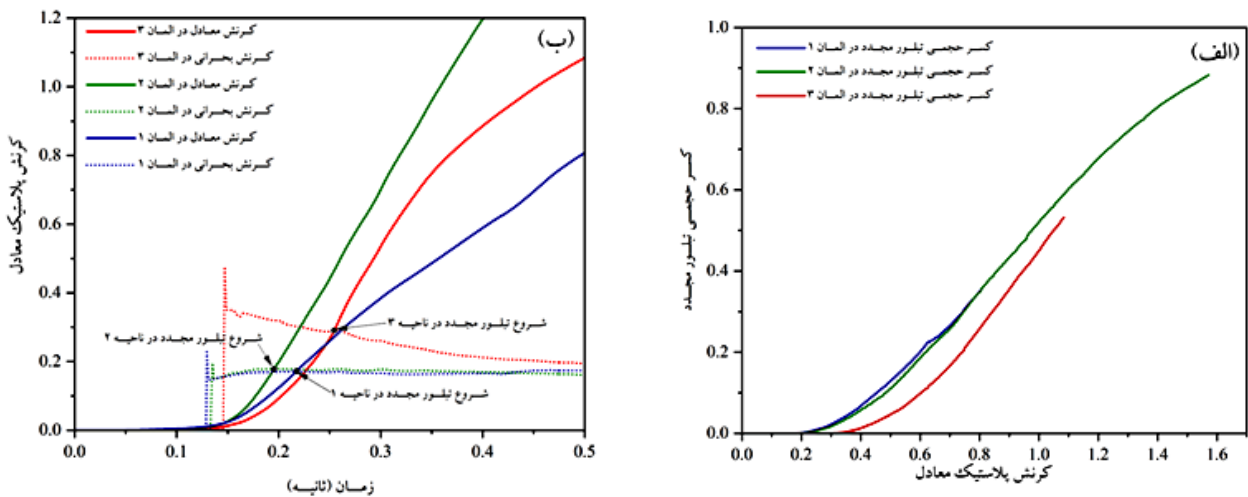
با توجه به نتایج شبیه‌سازی مکانیکی حرارتی، بیشترین مقدار دما و نرخ کرنش در مرکز ضخامت لوله (شکل (۹)) پیش‌بینی شد و مطابق انتظار طبق نتایج شبیه‌سازی بر پایه معادلات ریزساختاری، بیشترین مقدار کسر حجمی تبلور مجدد در مرکز ضخامت لوله (شکل (۱۴-المان ۲)) محاسبه شد. با تشکیل زائده و ورود مواد به زائده جوش کاهش شدید نرخ کرنش در منحنی شکل (۱۱-ب) حاصل شد که این کاهش نرخ کرنش با کاهش شیب کسر حجمی تبلور مجدد در المان‌های ۱ و ۳ در شکل (۱۴) همراه شد. با توجه به منحنی‌های شکل (۱۱-الف) نرخ کرنش با فاصله گرفتن از فصل مشترک جوش ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد شکل (۱۱-الف) به همین دلیل المان ۳ در

کاملاً تبلور مجدد یافته ریزساختار به طور کامل به اندازه دانه حاصل از تبلور مجدد بستگی دارد. جهت بررسی نحوه تغییرات تبلور مجدد، منحنی‌های کسرحجمی تبلور مجدد با گذشت زمان برای سه المان در فصل مشترک جوش (المان ۱)، مرکز ضخامت لوله (المان ۲) و المانی با فاصله از فصل مشترک جوش (المان ۳) در شکل (۱۴) ارائه شد.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی مکانیکی حرارتی، بیشترین مقدار دما و نرخ کرنش در مرکز ضخامت لوله (شکل (۹)) پیش‌بینی شد و مطابق انتظار طبق نتایج شبیه‌سازی بر پایه معادلات ریزساختاری، بیشترین مقدار کسر حجمی تبلور مجدد در مرکز ضخامت لوله (شکل (۱۴-المان ۲)) محاسبه شد. با تشکیل زائده و ورود مواد به زائده جوش کاهش شدید نرخ کرنش در منحنی شکل (۱۱-ب) حاصل شد که این کاهش نرخ کرنش با کاهش شیب کسر حجمی تبلور مجدد در المان‌های ۱ و ۳ در شکل (۱۴) همراه شد. با توجه به منحنی‌های شکل (۱۱-الف) نرخ کرنش با فاصله گرفتن از فصل مشترک جوش ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد شکل (۱۱-الف) به همین دلیل المان ۳ در



شکل ۱۴- موقعیت سه المان مورد بررسی در شبیه سازی ریزساختاری. (ب) منحنی کسر حجمی تبلور مجدد بر حسب زمان برای سه المان مشخص شده.



شکل ۱۵- الف) تغییرات کسر حجمی تبلور مجدد نسبت به کرنش پلاستیک معادل و ب) تغییرات کرنش پلاستیک معادل نسبت به زمان برای سه المان شکل ۱۴.

افزایش می کند و این دما همواره نسبت به این دو المان مقدار کمتری دارد بنابراین به درستی آغاز تبلور مجدد در زمان دیرتر

حجمی تبلور مجدد بر حسب کرنش معادل نمایش داده شد. در المان ۳ در زمان دیرتری نسبت به المان های ۱ و ۲ دما شروع به

در المان ۳ پیش بینی شد. با وجود آنکه تبلور مجدد در المان ۳ نسبت به المان ۱ دیرتر آغاز می‌شود اما به دلیل نرخ کرنش بیشتر المان ۳ مقدار کسر تبلور مجدد در این المان به سرعت بیشتر از المان ۱ می‌شود به طوری که در پایان مطابق شکل (۱۴-ب) کسرتبلور در المان ۳ بیشتر از المان ۱ محاسبه می‌شود. در شکل (۱۴-ب) زمان شروع تبلور مجدد به ترتیب المان ۲، ۱ و ۳ محاسبه شد. این ترتیب در شکل (۱۵-ب) نیز با مقایسه محل‌های برخورد منحنی‌های کرنش پلاستیک و کرنش بحرانی به عنوان زمان شروع تبلور مجدد قابل پیش‌بینی است.

در پایان برای هر المان مقدار اندازه دانه تبلور مجدد یافته محاسبه شد و کمترین مقدار اندازه دانه میانگین در نقاط با بیشترین کسر حجمی تبلور مجدد در نزدیکی فصل مشترک جوش حاصل شد (شکل (۱۳)). با توجه به رابطه (۱۰) بین اندازه دانه و پارامتر زرن هولمان رابط مستقیم وجود دارد و با توجه به رابطه (۹) افزایش دما باعث کاهش پارامتر زرن هولمان به صورت نمایی خواهد شد. بنابراین بین دما و اندازه دانه تبلور مجدد یافته در هر ناحیه ارتباط معکوس وجود دارد (شکل ۱۳ ه-و). کمترین مقدار اندازه دانه در مجاورت فصل مشترک جوش با بیشترین دما با انجام شبیه‌سازی ریزساختاری محاسبه شد. مشابه آزمون عملی [۱۰]، مطابق منحنی شکل (۱۶) توزیع یکنواخت اندازه دانه در طول فصل مشترک جوش با انجام شبیه‌سازی نیز قابل پیش‌بینی است. ریزساختار یکنواخت در نتیجه توزیع یکنواخت دما در فصل مشترک جوش از ویژگی‌های تشکیل کیفیت بالای جوش در فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی شناخته می‌شود [۷].

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی پیوسته ترمومکانیکی و ریزساختاری فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ انجام شد. محاسبات مربوط به انتقال حرارت، تغییر شکل الاستیک و پلاستیک و تبلور مجدد دینامیکی حاصل از فرایند جوشکاری به طور همزمان انجام شد. نتایج شبیه‌سازی شامل تغییرات

کرنش پلاستیک، دما، نرخ کرنش، تنش، کسر حجمی تبلور مجدد و اندازه دانه نهایی ساختار اینکونل ۷۱۸ ارائه شد. صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی ترمومکانیکی و ریزساختاری جهت اطمینان از صحت شبیه‌سازی صورت گرفت. علاوه بر ارائه پیش‌بینی متغیرهای ترمومکانیکی و ریزساختاری، تأثیر تغییرات متغیرهای ترمومکانیکی بر روی متغیرهای ریزساختاری و بالعکس مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج این مقاله در ادامه آورده شده‌است.

۱- هدف از انجام شبیه‌سازی عددی مکانیکی-حرارتی فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی اندازه‌گیری تغییرات پارامترهای مختلف مورد نیاز جهت انجام شبیه‌سازی ریزساختاری بود. در این شبیه‌سازی متغیرهای دما، کرنش و نرخ کرنش در روابط جانسون آورامی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲- با انجام شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی، کرنش پلاستیک موثر در این فرایند در بیشترین حالت مقدار $3/86$ اندازه‌گیری شد و در اثر اصطکاک بین فصل مشترک جوش دمای ناحیه فصل مشترک تا مقدار 1217 درجه سانتیگراد افزایش یافت.

۲- تغییر شکل پلاستیک بالا در فصل مشترک جوش به دلیل کاهش تنش سیلان ماده در نتیجه افزایش دما در فصل مشترک جوش با انجام شبیه‌سازی به خوبی پیش‌بینی شد. پیش‌بینی تغییرات نرخ کرنش در نواحی مختلف لوله جوشکاری اصطکاکی دورانی شده اطلاعات مناسبی از نحوه تغییرات پارامترهای ریزساختاری فراهم کرد.

۳- توزیع کسر حجمی تبلور مجدد با استفاده از روابط جانسون آورامی بر اساس تغییرات کرنش پلاستیک محاسبه شد بر همین اساس شکل کلی این دو متغیر به صورت یکسان به دست آمد و بیشترین مقدار کسر حجمی تبلور مجدد در مرکز دیواره لوله و در مجاورت فصل مشترک جوش محاسبه شد.

۴- ضخامت ناحیه متأثر از فرایند تبلور مجدد دینامیکی در این شبیه‌سازی با محاسبه کسر حجمی تبلور مجدد در نقاط مختلف قابل محاسبه است. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده این مقدار برای مرکز ضخامت لوله و دیواره لوله به ترتیب 480 و 850

حاصل شد.

در نهایت با شبیه‌سازی عددی ترمومکانیکی و ریزساختاری فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی، می‌توان طراحی فرایند موثرتر و نیز بهینه‌سازی پارامترهای فرایند را به منظور افزایش کیفیت محصولات نهایی، کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری کلی انجام داد.

میکرومتر پیش‌بینی شد. در گزارش آزمون عملی این مقادیر به ترتیب ۵۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر گزارش شدند.

۵- اندازه دانه‌های تشکیل شده در مجاورت فصل مشترک جوش در آزمون عملی فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی در محدوده ۱/۹-۲/۲ میکرومتر محاسبه شد. مقدار میانگین اندازه دانه از شبیه‌سازی در فصل مشترک جوش حدود ۲ میکرومتر

واژه‌نامه

1. Abaqus

2. JMatPro

3. USDFLD

References

1. Maalekian, M., "Friction Welding – Critical Assessment of Literature", *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007. 12(8): pp. 738-759.
2. Yang, Y. C., Chen, W. L., and Lee, H. L., "A Nonlinear Inverse Problem in Estimating the Heat Generation in Rotary Friction Welding", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2011. 59(2): pp. 130-149.
3. Mousavi, S. and Kelishami, A. R., "Experimental and Numerical Analysis of the Friction Welding Process for the 4340 Steel and Mild Steel Combinations", *Welding Journal-New York-*, 2008. 87(7): pp. 178.
4. Li, W., Shi, S., Wang, F., Zhang, Z., Ma, T. and Li, J., "Numerical Simulation of Friction Welding Processes Based on ABAQUS Environment", *Journal of Engineering Science & Technology Review*, Vol. 5, 2012.
5. Fu, L., Duan, L., and Du, S., "Numerical Simulation of Inertia Friction Welding Process by Finite Element Method", *Welding Journal-New York*, Vol. 82, pp. 65-S, 2003.
6. Zhang, Q., Zhang, L., Liu, W., Zhang, X., Zhu, W., and Qu, S., "3D Rigid Viscoplastic FE Modelling of Continuous Drive Friction Welding Process", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 11, pp. 737-743, 2006.
7. Yang, X., Li, W., Fu, Y., Ye, Q., Xu, Y., Dong, X., Hu, K., Zou, Y., "Finite Element Modelling for Temperature, Stresses and Strains Calculation in Linear Friction Welding of TB9 Titanium Alloy", *Journal of Materials research and Technology*, Vol. 8, pp. 4797-4818, 2019.
8. Khosrowshahi, J. H., Sadeghi, M., and Rasti, A., "Numerical Simulation of Plastic Deformation in Direct-Drive Friction Welding of AISI 4140 and ASTM A106 Steel Tubes", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 20, pp. 1-13, 2020.

منابع

9. Okeke, S. I., Harrison, N. M., and Tong, M., "Computational Modelling of Dynamic Recrystallisation of Ni-Based Superalloy During Linear Friction Welding", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-24, 2022.
10. Liu, F. and Nelson, T., "Grain Structure Evolution, Grain Boundary Sliding and Material Flow Resistance in Friction Welding of Alloy 718", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 710, pp. 280-288, 2018.
11. Dassault, "Systèmes (2020) Abaqus 2020 analysis user's guide volume II: analysis", Accessed 14th May 2020.
12. Bennett, C., Hyde, T., and Williams, E., "Modelling and Simulation of the Inertia Friction Welding of Shafts", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 221, pp. 275-284, 2007.
13. Jin, F., Li, J., Du, Y., Nan, X., Shi, J., Xiong, J., Zhang, F., "Numerical Simulation Based Upon Friction Coefficient Model on Thermo-Mechanical Coupling in Rotary Friction Welding Corresponding with Corona-Bond Evolution", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 45, pp. 595-602, 2019.
14. Geng, P., Qin, G., and Zhou, J., "Numerical and Experimental Investigation on Friction Welding of Austenite Stainless Steel and Middle Carbon Steel", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 47, pp. 83-97, 2019.
15. Saunders, N., Guo, Z., Miodownik, A., and Schillé, J. P., "Modelling High Temperature Mechanical Properties and Microstructure Evolution in Ni-Based Superalloys", *Sente, Softw, Intern, Rep.*, Vol. 9, 2008.
16. Superalloys, O. N. B., "Modelling The Material Properties and Behaviour".

17. Guo, Z. L., Saunders, N., Miodownik, A. P., and Schille, J. P., "Quantification of High Temperature Strength of Nickel-Based Superalloys", *In Materials Science Forum*, 2007, pp. 1319-1326.
18. Clas, T. H., Ringius, "FE Modeling of Friction Welding Thermo-Mechanical Simulations Using Abaqus, in Department of Applied Mechanics", Chalmers University of Technology, 2017.
19. Wang, F., Li, W., Li, J., and Vairis, A., "Process Parameter Analysis of Inertia Friction Welding Nickel-Based Superalloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, pp. 1909-1918, 2014.
20. Seli, H., Awang, M., Ismail, A. I. M., Rachman, E., and Ahmad, Z. A., "Evaluation of Properties and FEM Model of the Friction Welded Mild Steel-Al6061-Alumina", *Materials Research*, Vol. 16, pp. 453-467, 2013.
21. Uday, M., Ahmad Fauzi, M., Zuhailawati, H., and Ismail, A., "Advances in Friction Welding Process: A Review", *Science and technology of Welding and Joining*, Vol. 15, pp. 534-558, 2010.
22. Singh, S. K., Chattopadhyay, K., Phanikumar, G., and Dutta, P., "Experimental and Numerical Studies on Friction Welding of Thixocast A356 Aluminum Alloy", *Acta Materialia*, Vol. 73, pp. 177-185, 2014.
23. Bai, L., Wan, S., Yi, G., Shan, Y., Pham, S. T., Tieu, A. K., Li, Y., Wang, R., "Temperature-Mediated Tribological Characteristics of 40CrNiMoA Steel and Inconel 718 Alloy During Sliding Against Si 3 N 4 Counterparts", *Friction*, Vol. 9, pp. 1175-1197, 2021.
24. Chen, L., Sun, W., Lin, J., Zhao, G., and Wang, G., "Modelling of Constitutive Relationship, Dynamic Recrystallization and Grain Size of 40Cr Steel During Hot Deformation Process", *Results in Physics*, Vol. 12, pp. 784-792, 2019.
25. Quan, G. Z., Mao, Y. P., Li, G. S., Lv, W. Q., Wang, Y., and Zhou, J., "A Characterization for the Dynamic Recrystallization Kinetics of As-Extruded 7075 Aluminum Alloy Based on True Stress-Strain Curves", *Computational Materials Science*, Vol. 55, pp. 65-72, 2012.
26. Yang, Q., Ji, C., and Zhu, M., "Modeling of the Dynamic Recrystallization Kinetics of A Continuous Casting Slab under Heavy Reduction", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 50, pp. 357-376, 2019.
27. Li, C., Tan, Y., and Zhao, F., "Finite Element Simulation and Process Optimization of Microstructure Evolution in the Formation of Inconel 718 Alloy Bolts", *Materials Research Express*, Vol. 6, pp. 026578, 2018.
28. Razali, M. K., and Joun, M. S., "A New Approach of Predicting Dynamic Recrystallization Using Directly A Flow Stress Model and It's Application to Medium Mn Steel", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 11, pp. 1881-1894, 2021.
29. Guo-Zheng, Q., "Characterization for Dynamic Recrystallization Kinetics Based on Stress-Strain Curves", *Recent developments in the study of recrystallization*, pp. 61-64, 2013.
30. Xu, Y., Chen, C., Zhang, X., Dai, H., Jia, J., and Bai, Z., "Dynamic Recrystallization Kinetics and Microstructure Evolution of An AZ91D Magnesium Alloy During Hot Compression", *Materials Characterization*, Vol. 145, pp. 39-52, 2018.
31. Humphreys, F. J. and Hatherly, M., "Recrystallization and Related Annealing Phenomena",: elsevier, 2012.
32. Lv, Y. P., Li, S. J., Zhang, X. Y., Li, Z. Y., and Zhou, K. C., "Modeling and Finite Element Analysis for the Dynamic Recrystallization Behavior of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr Near β Titanium Alloy During Hot Deformation", *High Temperature Materials and Processes*, Vol. 37, pp. 445-454, 2018.
33. Lenard, J.G., Pietrzyk, M., and Cser, L., "Chapter 6 - Microstructure Evolution and Mechanical Properties of the Final Product, in Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products, J.G. Lenard, M. Pietrzyk, and L. Cser, Editors. Elsevier Science Ltd: Oxford", pp. 151-236, 1999.
34. My Nu, H. T., Minh, L. P., and Loc, N. H., "A Study on Rotary Friction Welding of Titanium Alloy (Ti6Al4V) ", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2019.
35. Kessler, M., Hartl, R., Fuchs, A., and Zaeh, M., "Simulation of Rotary Friction Welding Using A Viscoelastic Maxwell Model", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 26, pp. 68-74, 2021.
36. Maalekian, M., and Cerjak, H., "Thermal-Phase Transformation Modelling and Neural Network Analysis of Friction Welding of Non-Circular Eutectoid Steel Components", *Welding in the World*, Vol. 53, pp. R44-R51, 2009.
37. Tang, T., Shi, Q., Lei, B., Zhou, J., Gao, Y., Li, Y., Zhang, G., Chen, G., "Transition of Interfacial Friction Regime and Its Influence on Thermal Responses in Rotary Friction Welding of SUS304 Stainless Steel: A Fully Coupled Transient Thermomechanical Analysis", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 82, pp. 403-414, 2022.
38. Damodaram, R., Raman, S. G. S., and Rao, K. P., "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Welded Alloy 718", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 560, pp. 781-786, 2013.