

شبیهسازی مکانیکی–حرارتی و ریزساختاری فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی آلیاژ اینکونل۷۱۸ با استفاده از روش اجزای محدود

حسین مانی'، ابوذر طاهریزاده^{ا*} و محمد سیلانی^۲ ۱- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران ۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷ – دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰)

چکیده- جوشکاری اصطکاکی دورانی یکی از روشهای مهم اتصال قطعات مختلف جهت استفاده در صنایع پیشرفته به شمار میرود. با توجه به مشکلات اندازه گیری متغیرها در حین آزمون عملی و به منظور کاهش هزینه ها، استفاده از روش های شبیه سازی عددی یک امکان بسیار موثر در تحقیقات علمی به شمار میرود. در این مقاله روش شبیه سازی عددی اجزای محدود برای شبیه سازی پیوسته مکانیکی-حرارتی و سپس معادلات مشخصه برای شبیه سازی ریز ساختاری اتصال دو لوله مشابه از جنس آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش جوشکاری اصطکاکی دورانی مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا با انجام شبیه سازی ریز ساختاری اتصال دو لوله مشابه از جنس آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش جوشکاری اصطکاکی دورانی مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا با انجام شبیه سازی عددی مکانیکی-حرارتی پارامترهای مهم مؤثر بر تحولات متالورژیکی مثل توزیع دما، تنش و کرنش بدست آمد و سپس تحولات ریز ساختاری مانند کسر حجمی تبلور مجدد و اندازه دانه ساختار نهایی محاسبه و به منظور صحت سنجی با نتایج آزمون عملی مقایسه شد. در شبیه سازی ریز ساختاری با بهره گیری از الگوی جانسون-آورامی و زیر روال نویسی این الگو به زبان فرترن، خروجی های 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 ۲۰۸ و مکاری میکرومتر در شبیه سازی محاسبه شد. این مقادی در آزمون عملی به ترتیب ۵۰۰ و ۵۰۰ میکرومتر گزارش شدند. همچنین تغییرات اندازه دانه از مرکز لوله و مجاور فصل مشترک جوش تا دیواره لوله در شبیه سازی از ۲۰۷۷ تا ۲۱/۵ میکرومتر گزارش شدند. همچنین تغیرات اندازه دانه از مرکز لوله و مجاور فصل بود. نهایتاً در چش ما دیواره لوله در شبیه سازی از ۲۰۷۷ میکرومتر پیش بینی شد که این روند در آزمون عملی از مرکز لوله و مجاور فصل بود. نهایتاً در چن مقاله تلاش شد تا با رسم منحنی های مخلف ارتباط بین متغیرهای مکانیکی-حرارتی و زیار تمردی و نتایج قابل انتظاری از ورزیع منغیرهای ریز ساختاری با تغییر منه می می مینیکی حران می مکانیکی-حرارتی و ریز ساختاری بردسی و نتایج قابل انتظاری از

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

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

H. Mani¹, A. Taheri Zade^{1*} and M. Silani²

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

* : مسئول مكاتبات، پست الكترونيكي:a.taheri@iut.ac.ir

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.

			هرست علائم
اندازه دانه اولیه (میکرومتر(µm))	D_{\circ}	گرمای تولیدی ناشی از اصطکاک (ژول(J))	Q _f
نرخ کرنش (S -1)	PEEQR	گرمای تولیدی ناشی از تغییر شکل پلاستیک (J)	Q_p
نرخ کرنش	PEEQ	فشار محوري (پاسکال(pa))	Р
تنش موثر (مگاپاسکال (MPa))	S,Mises	شعاع دوران (متر(m))	r
ضريب اصطكاك	μ	حجم ماده (m ^r)	V
سرعت دورانی (دور بر دقیقه (rpm))	ω	ظرفیت حرارتی (J/Kgr×K)	с
کسر حرارت پلاستیک	η	ضريب انتقال حرارت ((W/(m ² ×K))	Κ′
تنش (MPa)	σ	زمان (ثانیه (s))	t
نرخ کرنش پلاستیک (S ⁻¹)	$\dot{\epsilon}^{\rm pl}$	دما (C)	Т
چگالی (Kg.m ⁻³)	ρ	انرژی منبع داخلی تولید گرما (J)	Q
مشتق جزئي	∂	كسر حجمي تبلور مجدد	$\mathbf{X}_{\mathrm{DRX}}$
تنش برشی تماسی (MPa)	$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{f}}$	ثوابت معادله كسر حجمي تبلور مجدد	$n_{\rm D} \cdot k_{\rm D}$
كرنش بحراني	ε _c	پارامتر زنر هولمان (S ⁻¹)	Z
کرنش لازم جهت ۵۰ درصد تبلور مجدد	ε _{0.5}	انرژی لازم برای شروع تغییر شکل پلاستیک (J)	$\mathbf{Q}_{\mathrm{def}}$
کرنش پیک	ε _p	ثابت گازها (J. K ⁻¹ . mol ⁻¹)	R
نرخ کرنش (S ⁻¹)	ż	اندازه دانه حاصل از تبلور مجدد (میکرومتر(μm))	D _{DRX}
		میانگین اندازه دانه (میکرومتر(µm))	$\mathbf{D}_{\mathrm{avg}}$

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 می شود [۲].

امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی و اهمیت کاهش هزينهها امكان مطالعه فرأيند جوشكارى اصطكاكي دوراني از طريق روشهاي عددي جهت دستيابي به بهترين 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 فرایند جوشکاری اصطکاکی پرداختند [۶]. در این تحقیق دما، تنش، کرنش و شکل نهایی ناحیه جوش به عنوان پارامترهای خروجی شبيهسازي جهت بهينهسازي و بهبود طراحي ساخت دستگاههای جوش محاسبه و ارائه شدند [۵]. در پژوهشی دیگر توسط یانگ و همکاران [۷] با استفاده از نرمافزار اجزای محدود آباكوس' شبيهسازى پيوسته مكانيكى-حرارتى فرآيند 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 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 شبیه سازی 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 ۱۸/۶٪ بود [۸]. سویر و همکاران [۹] به بررسی شبیهسازی پیوسته مکانیکی-

حرارتی و ریزساختاری فرآیند جوشکاری اصطکاکی خطی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداختند. در شبیه سازی ریز ساختاری 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 پژوهش های ذکر شده پیشین مطالعه ای در مورد تأثیر تغییرات پارامترهای مکانیکی – حرارتی بر روی خواص ریز ساختاری با استفاده از روش های شبیه سازی دیده نشد.

تحقيقات تجربي جامعي جهت مشاهده تغييرات اندازه دانه و تحولات ريزساختار در نقاط مختلف لوله از جنس آلياژ 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 اندازه گیری 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 ريزساختارى فرأيند جوشكارى اصطكاكي دوراني ألياژ اينكونل 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 پیش بینی 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

شبیه سازی ترمومکانیکی با استفاده از اطلاعات مناسب آزمون عملی به طور کامل انجام شد. با انجام شبیه سازی اجزای محدود تغییرات تنش، کرنش، دما و نرخ کرنش برای فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ محاسبه شد. در ادامه با اطمینان از مقادیر حاصل از شبیه سازی ترمومکانیکی و با استفاده از معادلات سینتیکی جانسون آورامی، شبیه سازی ریز ساختاری با استفاده از زیر روال آباکوس برای رسیدن به تغییرات اندازه دانه و کسر حجمی تبلور مجدد دینامیکی طراحی شد. صحت سنجی شبیه سازی ریز ساختاری نیز انجام و نتایج حاصل از آن در راستای بررسی تأثیر تغییرات ارزیابی قرار گرفت.

۲- شبیهسازی اجزای محدود فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی

تصویر شماتیک جزئیات دستگاه مورد استفاده برای فرایند 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 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 می شوند (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 شبیه سازی بدون تاثیر گذاری 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 شبیه سازی 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 می شود.

۲–۱ 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 شبیه سازی از نرم افزار برای مت پرو⁷ استفاده شد. اعتبار سنجی نتایج در این نرم افزار برای آلیاژ اینکونل ۲۱۸ با استفاده از داده های آزمون های عملی تو سط خود نرم افزار انجام شده است [۲۵–۱۷]. تغییرات تنش سیلان از دمای محیط تا دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش م⁻⁰ تا ۱۰ بر ثانیه برای آلیاژ اینکونل ۲۱۸ در نرم افزار آباکوس نرخ کرنش ۲۰۰۱ و ۱ در دماهای مختلف قابل مشاهده است. سایر متغیرهای وابسته به دما مانند ضریب انتقال حرارت، مدول یانگ، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نیز با استفاده از نرم افزار یانگ، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نیز با استفاده از نرم افزار یانگ، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نیز با استفاده از نرم افزار

۲-۲ شرایط اولیه شبیهسازی

در این مقاله به منظور انجام صحت سنجی 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 ۱۰/۱۵ و ۲۴/۷ میلیمتر به ترتیب برای شعاع داخلی و خارجی تعریف شد.



شکل ۱- شماتیک جزئیات دستگاه جوشکاری اصطکاکی دورانی



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 سانتی گراد.

جهت جلوگیری از اعوجاج المانها، ساختار حل در چهار برنامهنویسی به زبان پایتون شبیهسازی جدیدی انجام شد. شبيهسازي جديد با وارد كردن شكل نهايي حل قبلي،

مرحله طرحریزی شد که در پایان هر مرحله به کمک



شکل ۳– منحنی تغییرات چگالی، ضریب انتقال حرارت، ظرفیت گرمایی ویژه و مدول یانگ آلیاژ اینکونل۷۱۸ در دماهای مختلف.



شکل ۴– ابعاد و شرایط مرزی لوله در شبیهسازی.

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 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 می شود.



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

$$Q_p = \eta \sigma \dot{\epsilon}^{pl} V$$
 (۲)

 $R_p = \eta \sigma \dot{\epsilon}^{pl} V$
 (۲)

 R_p
 R_p

در انجام شبیه سازی 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 می شود [۲۰ و ۲۱].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = Q + K' \left[\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z} \right]$$
(7)

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]. $\tau_{\rm f} = \mu P$ (۴)

براساس قانون کولمب µ ضریب اصطکاک، P فشار محوری و ۲_f تنش برشی تماسی نامیده میشود. در گزارش بای و همکاران در تمام شبیه سازی های انجام شده قطعه پایینی در تمامی جهات ثابت و قطعه بالایی تحت کوتاه شدگی عمودی به میزان ۳/۶ میلیمتر و چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت. به منظور انجام مشریزی مناسب، هر قطعه مطابق شکل (۴) به دو ناحیه تقسیم بندی شد و دو قسمت نزدیک به فصل مشترک با تغییر شکل بیشتر با اندازه ۸۰/۰ میلیمتر و قسمت دیگر با اندازه ۱/۵ میلیمتر مشریزی شد. اندازه المان ۸۰/۰ ملیمتر با انجام آزمون حساسیت به مش انتخاب شد. شکل المان ها چهار گوش مثلثی و از تکنیک حالت آزاد برای مشریزی استفاده شد. در این شبیه سازی از المان های پیوسته کاهشیافته با مرتبه یک بهره گرفته شده که انتخاب مناسبی برای حل های تقارن محوری و کوپل دما–جابجایی معرفی می شوند [۴، ۸، ۲۱–۱۴ و ۱۹].

۳- روابط ساختاری حاکم بر شبیه سازی
۳-۱ روابط شبیه سازی 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 [۰۰]. برای این منظور از قانون آمونتون مطابق رابطه (۱) استفاده شد [۶ و ۲۰]. در این شبیه سازی گرمای تولیدی در این فرآیند) مطابق رابطه (۲) قابل محاسبه گرمای تولیدی در این فرآیند) مطابق رابطه (۲) قابل محاسبه گرمای تولیدی در این شریس از این این فرآیند) مطابق رابطه (۲) قابل محاسبه گرمای تولیدی در این فرآیند) مطابق رابطه (۲) قابل محاسبه گرمای تولیدی در این فرآیند) مطابق رابطه (۲) قابل محاسبه است [۱۹–۲۱].

$$\mathbf{Q}_{\mathrm{f}} = \boldsymbol{\mu} \mathbf{P} \boldsymbol{\omega} \mathbf{r} \tag{1}$$

[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 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].

۲–۲ روابط تحولات ریزساختاری

جهت مطالعه تحولات ریزساختاری مرتبط با جوانهزنی و تبلورمجدد 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 می شود 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 می شود [۲۷].

$$X_{DRX} = 1 - \exp\left(-K_{D}\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{c}}{\varepsilon_{0.5}}\right)^{n_{D}}\right) \qquad \left(\varepsilon \ge \varepsilon_{c}\right) \tag{(a)}$$

در این رابطه کسر حجمی تبلور مجدد با X_{DRX} مشخص می شود و مقدار آن همواره بین -1 خواهد بود. در این رابطه ثوابت K_D و m_D برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به ترتیب ۸۶۷۶, - و ۱/۹ هستند [۲۷]. در رابطه (۵)، کرنش پلاستیک (٤) از طریق شبیه سازی مکانیکی – حرارتی به طور مستقیم محاسبه می شود. روابط لازم جهت محاسبه متغیرهای $_3$ و $_{0.5}$ که به ترتیب کرنش بحرانی و کرنش لازم جهت انجام ۵۰٪ تبلور مجدد می باشند، با استفاده از محاسبات عددی منحنی تنش –کرنش در سایر گزارش ها قابل مشاهده هستند [۲۵، ۲۹ و ۳۰] و مقدار آنها معمولا وابسته به پارامتر زنر هولمان بوده که به صورت روابط (۶) تا (۸) گزارش می شوند [۲۷]. رابطه (۹) جهت

محاسبه پارامتر زنر هولمان به طور گسترده در اندازهگیری سینتیک تبلور مجدد دینامیکی در فرایندهای تغییر شکل گرم مورد استفاده قرار گرفته است [۲۵، ۲۷ و ۳۰–۳۲].

 $\varepsilon_{\rm p} = 0.0032 \times \left(Z\right)^{0.11376} \tag{(\$)}$

 $\boldsymbol{\epsilon}_{_{\mathrm{c}}}=0.8\times\boldsymbol{\epsilon}_{_{\mathrm{p}}}\tag{V}$

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

$$Z = \dot{\epsilon} \times \exp\left(\frac{Q_{def}}{RT}\right) \qquad Q_{def} = 437000 \left(J / \text{mol.K}\right) \qquad (4)$$

در این روابط _وع کرنش پیک، Z معرف پارامتر زنرهولمان، Q انرژی لازم جهت فعالسازی شروع تغییر شکل پلاستیک و غ نرخ کرنش ماده هستند. با توجه به مشخصههای سینتیک تبلور مجدد دینامیکی، اندازه دانه کاملا تبلور مجدد یافته به اندازه دانه اولیه قبل از تغییر شکل ماده وابسته نیست و به دما و نرخ کرنش فرایند تغییر شکل گرم بستگی دارد [۳۱]. ارتباط اندازه دانه حاصل از تبلور مجدد دینامیکی مطابق رابطه (۱۰) برای آلیاژ اینکونل۷۱۸ با اندازه گیری پارامتر زنرهولمان قابل محاسبه است [۳۳].

D_{DRX} = 12736723×(Z)^{-0.4215} (۱۰) 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) پرانتز اول مشخص کننده دانههای تبلور مجدد یافته و پرانتز دوم مربوط به دانههای بدون تغییر است که با همان اندازه دانههای اولیه مقدار آن مشخص می شود [۹ و ۱۰]. با توجه به آزمون عملی فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی [۱۰] در این رابطه D(اندازه دانه اولیه) ۴/۵ میکرومتر در نظر گرفته شد [۱۰].

 $\mathbf{D}_{avg} = \left(\mathbf{D}_{DRX} \times \mathbf{X}_{DRX}\right) + \left(\mathbf{D}_{\circ} \times \left(1 - \mathbf{X}_{DRX}\right)\right) \tag{11}$





شکل ۷– مقایسه شکل نهایی ناحیه تغییرشکلیافته حاصل از شبیهسازی و آزمون عملی [۱۰] فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی آلیاژ اینکونل ۷۱۸.

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 اندازه گیری دما با ترمو کوپل استفاده می شود [۸ ۹، ۱۳ و ۱۴]. اندازه گیری دما در آزمون عملی فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی با استفاده از چهار ترمو کوپل 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 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) علاوهبر برگشت زائدهها به سمت خارج از محدوده خط جوش، عدم اعوجاج شدید المانها در شبیهسازی فرایند به

مقایسه منحنیهای قرمز و سیاه در شکل (۸) دقت انجام شبیهسازی حرارتی قابل نتیجهگیری است.

۲-۴ نتایج شبیهسازی مکانیکی-حرارتی

با وجود تغییر شکل زیاد در اثر نرمشدگی حاصل از افزایش دما در ناحیه نزدیک به فصل مشترک جوش، لزوم بررسی تحولات مکانیکی-حرارتی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی از طریق شبیهسازی احساس شد. نتایج حاصل از شبیهسازی 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 میکند 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 تغییرشکل پلاستیک به عنوان معیاری برای بررسی کیفی کیفیت جوش معرفی میشود به همین دلیل تشکیل زائده و تغییرشکل پلاستیک کافی معیاری از با کیفت 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،

شبیه سازی فرایند جو شکاری اصطکاکی دورانی به عنوان بهترین روش برای مطالعه تغییرات دمایی معرفی می شود [۳۵ و ۳۷]. همانگونه که بیان شد ۹۰٪ گرمای تولیدی در این فرایند از اصطکاک بین دو سطح تولید می شود [۲۰] بنابراین افزایش دما به صورت لایه لایه با نزدیک شدن به فصل مشترک اصطکاک قابل انتظار است. توزیع دما حاصل از شبیه سازی فرایند در شکل (۹ ه- و) ارائه شد. با توجه به شبیه سازی انجام شده سانتیگراد اندازه گیری شد. مقدار این دما نسبت به نقطه ذوب سانتیگراد اندازه گیری شد. مقدار این دما نسبت به نقطه ذوب بنابراین فرض حالت جامد بودن فرایند جو شکاری اصطکاکی بنابراین فرض حالت جامد بودن فرایند جو شکاری اصطکاکی دورانی در شبیه سازی رعایت شده است.

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 ۱۲/۰ ثانیه در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد محاسبه شد.

در این قسمت با توجه به تأثیر متغیر نرخ کرنش بر روی پارامتر زنرهولمان 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 زنرهولمان، کسرحجمی تبلور مجدد و اندازه دانه جهت شبیهسازی ریزساختار فراهم میشود. نتایج حاصل از شبیهسازی 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 مشترک و افزایش استحکام ماده به دلیل کاهش دما است. در شکل (۱۱–ب) منحنی تغییرات نرخ کرنش معادل



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



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

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).

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

باعث افزایش انرژی آزاد یک آلیاژ (سیستم) می شود و بالا بودن انرژی سیستم سبب ناپایداری ساختار می شود. با توجه به تمایل هر ساختار ناپایدار به پایداری در سیستم، شرایط برای کاهش انرژی از طریق تغییر ریزساختار فراهم می شود. نیروی محرکه برای پدیده های بازیابی و تبلور مجدد نتیجه کاهش همین انرژی به دلیل تحولات ریزساختاری است که مهم ترین آنها جوانهزنی به دلیل تحولات ریزساختاری است که مهم ترین آنها جوانهزنی در ساختار تغییر شکل یافته است [۳۱]. در فرایند جو شکاری آلیاژ اینکونل ۲۱۸ تغییر شکل دانه ها، افزایش مساحت مرزدانه و پیدایش ساختار داخلی درون دانه ها در نتیجه تجمع نابجایی ها شکل در دمای بالا می شود [۳۸]. جهت مطالعه تحولات ریزساختاری مرتبط با جوانهزنی و تبلورمجدد در فرایندهای مختلف تغییر شکل گرم از معادلات سینتیکی جانسون آوارمی 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 نمی شود 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

به طور 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 ۵۰۰ میکرومتر گزارش شد [۱۰]. در شبیهسازی انجام شده با محاسبه ضخامت ناحیه تبلور مجدد یافته این عدد ۴۸۰ میکرومتر برای مرکز ضخامت لوله و ۵۰۰ الی ۵۰۰ میکرومتر در دیوارهها به دست آمد که از تطابق مناسبی با 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 پیش بینی است. دمای بالا باعث فعال شدن مکانیزمهای 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 می شود. به طور کلی با توجه به اعتبارسنجي انجام شده مي توان نتيجه گرفت که با بکارگيري خروجیهای شبیهسازی مکانیکی–حرارتی به عنوان ورودی در شبیهسازی ریزساختاری، امکان پیشبینی تغییرات اندازه دانه در فرايند جوشكاري اصطكاكي دوراني فراهم ميشود.

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 آورامی و مطالعه پارامترهای متالورژیکی ناشی از تغییر شکل 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 سیتیکی 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 توزيع كسر حجمي تبلور مجدد مشابه توزيع كرنش پلاستیک محاسبه شد. محدوده کاملا 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 ۰/۱–۲/۰ 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 ٧/٠ ثانیه محاسبه شد. در نواحی كاملاً تبلور مجدد يافته ريزساختار به طور كامل به اندازه دانه حاصل از تبلور مجدد بستگی دارد. جهت بررسی نحوه تغییرات تبلور مجدد، منحنی های کسر حجمی 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)) پیش بینی 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

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.

بدست آمد، به همین دلیل کامل شدن تبلور مجدد در کمترین زمان و بیشترین سرعت در این ناحیه قابل پیش بینی است. کرنش بحرانی و کرنش لازم جهت ۵۰ درصد تبلور مجدد با توجه به روابط (۷) و (۸) با پارامتر زنر هولمان رابطه معکوس دارند به همین دلیل انتظار می رود در نقاط با دمای بالا و نرخ کرنش کم مقدار این پارامترها کمتر باشد. به همین منظور تغییرات کرنش بحرانی با گذشت زمان در شکل (۱۵-ب) به صورت منحنی های خط چین برای المان های شکل (۱۴) ارائه شده است. در المان های ۱ و ۲ با بیشترین دما که در فصل 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 ناحیه با نرخ کرنش بیشتر نسبت به المان ۱ قرار گرفته است بنابراین نرخ کرنش بیشتر در المان ۳ سبب ایجاد کسر حجمی تبلور مجدد بیشتر نسبت به المان ۱ میشود. بیشترین دما و نرخ کرنش در کل زمان فرایند در المان ۲ در مرکز ضخامت لوله

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 فرایند در لوله جوشکاری اصطکاکی دورانی شده.

شکل ۱۴- موقعیت سه المان مورد بررسی در شبیهسازی 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.

در المان ۳ پیش بینی شد. با وجود آنکه تبلور مجدد در المان ۳ نسبت به المان ۱ دیرتر آغاز می شود اما به دلیل نرخ کرنش بیشتر المان ۳ مقدار کسر تبلور مجدد در این المان به سرعت بیشتر از المان ۱ می شود به طوری که در پایان مطابق شکل (۱۴-ب) کسرتبلور در المان ۳ بیشتر از المان ۱ محاسبه می شود. 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 محل های بر خورد منحنی های کرنش پلاستیک و کرنش مشترک جوش قرار دارند کمترین مقدار کرنش بحرانی محاسبه شد. پایین بودن کرنش بحرانی در این المانها نسبت به المان ۳ بدین معنا است که تبلور مجدد زودتر آغاز می شود که وقوع صحیح این پدیده در شکل (۱۵–الف) با رسم منحنی های کسر حجمی تبلور مجدد بر حسب کرنش معادل نمایش داده شد. در المان ۳ در زمان دیرتری نسبت به المانهای ۱ و ۲ دما شروع به افزایش می کند و این دما همواره نسبت به این دو المان مقدار کمتری دارد بنابراین به درستی آغاز تبلور مجدد در زمان دیرتر

بحرانی به عنوان زمان شروع تبلور مجدد قابل پیشربینی 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 زنر هولمان رابط مستقیم وجود دارد و با توجه به رابطه (۹) افزایش دما باعث کاهش پارامتر زنر 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). كمترين مقدار اندازه دانه در مجاورت فصل مشترك جوش با بیشترین دما با انجام شبیهسازی ریزساختاری محاسبه شد. مشابه آزمون عملي [١٠]، مطابق منحني شكل (١۶) توزيع یکنواخت اندازه دانه در طول فصل مشترک جوش با انجام شبیهسازی نیز قابل پیش بینی است. ریزساختار یکنواخت در نتيجه توزيع يكنواخت دما در فصل مشترك جوش از ویژگیهای تشکیل کیفیت بالای جوش در فرایند جوشکاری اصطكاكي دوراني شناخته مي شود [٧].

۵- نتیجه گیری

در این مقاله شبیه سازی پیوسته ترمومکانیکی و ریز ساختاری 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 شبیه سازی شامل تغییرات کرنش پلاستیک، دما، نرخ کرنش، تنش، کسر حجمی تبلور مجدد و اندازه دانه نهایی ساختار اینکونل ۷۱۸ ارائه شد. صحت سنجی نتایج شبیه سازی ترمومکانیکی و ریز ساختاری جهت اطمینان از صحت شبیه سازی صورت گرفت. علاوه بر ارائه پیش بینی متغیرهای ترمومکانیکی و ریز ساختاری تغییرات منغیرهای ترمومکانیکی بر روی متغیرهای ریز ساختاری ادامه آورده شده است.

۱- هدف از انجام شبیه سازی عددی مکانیکی - حرارتی فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی اندازه گیری تغییرات پارامترهای مختلف مورد نیاز جهت انجام شبیه سازی ریز ساختاری بود. در این شبیه سازی متغیرهای دما، کرنش و نرخ کرنش در روابط جانسون آورامی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲- با انجام شبیه سازی مکانیکی-حرارتی، کرنش پلاستیک موثر در این فرایند در بیشترین حالت مقدار ۳/۸۶ اندازه گیری شد و در اثر اصطکاک بین فصل مشترک جوش دمای ناحیه فصل مشترک تا مقدار ۱۲۱۷ 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 ۴۸۰ و ۸۵۰ میکرومتر پیشینی 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 شبیه سازی در فصل مشترک جوش حدود ۲ میکرومتر حاصل شد.

در نهایت با شبیهسازی عددی ترمومکانیکی و ریزساختاری

واژەنامە

مراجع

فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی، میتوان طراحی فرایند 🦳 کیفیت محصولات نهایی، کاهش هزینههای تولید و افزایش

موثرتر و نیز بهینهسازی پارامترهای فرایند را به منظور افزایش ... بهرهوری کلی انجام داد.

3. USDFLD

1. Abaqus

2. JMatPro

- 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.
- 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.

- 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.