ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدر س

mme.modares.ac.ir

شبیهسازی المان محدود فرآیند جوش کاری اصطکاکی دورانی لولههای غیرهمجنس

جواد هاشمي خسر وشاهي 1 ، محمدحسين صادقي 2* ، امير راستي 8 ، سينا صياغيفرشي 3

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستى sadeghim@modares.ac.ir 14115-143

ت مقاله چکیده	اطلاعاه
شی کامل 1 آبان 1396 1 در این پژوهش شبیه سازی المان محدود فرایند جوش کاری اصطکاکی دورانی دو لوله غیر همجنس ASTM A106-B و AISI A ارائه 1 مند. با استفاده از طرح آزمایش کسری، تأثیر پارامترهای اصلی جوش کاری شامل سرعت دورانی، فشار اصطکاکی، زمان اصطکاکی، فشار 1 دی 1396	مقاله پژوه دريافت: 7 پذيرش: 0
بت: 29 دی 1396 اهنگری و زمان اهنگری بر میزان گوتاهشدگی نمونههای بعد از جوش گاری مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به وجود تغییر شکل شدید در این فیارند مجامگری از ایجاد الماد های اعمام بافته از تکنیک مشرینی محد دانگایی ماسکی پیتنمیس در نیمافنا، آباکس استفاده گیدید در	ارائه در سا
ے: المان محدود است کی مجموع 27 مدل سازی المان محدود و 3 آزمون تجربی جهت اعتبارسنجی انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزایش تمامی پارامترهای فرایند.	ک <i>لید واژ کا</i> ، شبیهسازی
، اصطکاکی دورانی کوتاه شدگی بیشتر اتصال را درپی دارد. پارامتر فشار اصطکاکی نیز با %33.9 بیشترین تأثیر را بر میزان کوتاه شدگی نمونه ها دارا بود. علاوهبر	جوش کار ی
^{ریزی مجدد} این افزایش دهشار و زمان آهنگری تا مقدار محدودی کوتاهشدگی قطعات را افزایش داده و پس از آن بی تأثیر بودند. از سوی دیگر میزان دمای	روش مش
تعادلی در سطح اتصال در حدود 1250 درجه سانتی گراد بود که بعد از حدود 2 ثانیه از شروع فرایند ایجاد میشد. نتایج آزمون های اعتبارسنجی در انگریم در نیاله شریبانه در در در ۵۰% 5 دری نشانه از سالت سالام سرا ال این مرد داشا با ترم سفان داد.	

Finite element modeling of rotary friction welding of dissimilar pipes

Javad Hashemi Khosrowshahi, Mohammad Hossein Sadeghi^{*}, Amir Rasti, Sina Sabbaghi Farshi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran * P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, sadeghim@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Finite Element Modeling

Rotary Friction Welding Remeshing method

Keywords:

Received 08 November 2017 Accepted 31 December 2017 Available Online 19 January 2018

ABSTRACT

In this paper, finite element modeling of friction welding of two ASTM A106-B and AISI 4140 dissimilar pipes is investigated. The effect of the friction welding parameters including rotation speed, friction pressure, friction time, forging pressure and forging time on the axial shortening are investigated using a fractional factorial design method. Because of the extreme material deformation, an innovative remeshing technique was scripted in Abaqus CAE to prevent the creation of distorted elements. 27 models were solved and 3 validation experimental tests were carried out. Results showed that increasing the all parameters cause larger axial shortening. Friction pressure with 33.9% had the most effect on the axial shortening. Moreover, an increase in forging pressure and forging time has a limited effect on the axial shortening. After about 2 seconds from the beginning of the welding, the temperature of the interface becomes steady at about 1250°C. The validation tests revealed that the simulation error was about 5.6% which shows a good agreement between the finite element results and the experimental data.

1 – مقدمه

محل اتصال است که باعث ایجاد منطقه متأثر از حرارت کوچکتر و اعوجاج

كمتر قطعات مى شود [1].

در فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی، با حرکت چرخشی یکی از قطعات، سطح تماس دو قطعه به یکدیگر مالیده شده و در اثر اصطکاک، حرارت بالایی بین دو قطعه ایجاد می گردد. این افزایش دما، کاهش تنش سیلان قطعات در سطوح تماسی را بهدنبال دارد و امکان امتزاج و برقراری اتصال بین دو قطعه را فراهم می کند. همچنین در اثر نیروی فشاری محوری، مقداری از ماده به سمت خارج جریان مییابد و سبب تشکیل فلش^۳ می شود .[2]

جوش کاری اصطکاکی دورانی نوعی فرایند جوش کاری حالتجامد است که در آن حرارت مورد نیاز برای جوشکاری از تبدیل مستقیم انرژی مکانیکی به انرژی حرارتی ناشی از اصطکاک بالای بین سطوح مشترک قطعات ایجاد می شود. در این فرایند، هیچ یک از قطعات ذوب نمی شوند. به همین دلیل، عیوب فرایندهای ذوبی مانند تخلخل، عدم نفوذ، آخالهای سرباره و ... در این روش وجود ندارد. همچنین برخلاف روش جوش کاری با الکترود، فلز پر کننده، فلاکس و گاز محافظ در فرایند جوشکاری اصطکاکی استفاده نمی شود. برتری دیگر این روش نسبت به جوشکاری قوسی، گرادیان حرارتی کمتر در

1 Rotary Friction Welding

J. Hashemi Khosrowshahi, M. H. Sadeghi, A. Rasti, S. Sabbaghi Farshi, Finite element modeling of rotary friction welding of dissimilar pipes, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 01, pp. 423-432, 2018 (in Persian)



² Heat Affected Zone (HAZ) 3 Flash

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

امروزه از فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی به صورت گسترده در توليد اتصالات استوانهای جهت انتقال نيرو و گشتار و همچنين اتصال فلزات غير همجنس استفاده مىشود. اكسل خودروها، سوپاپهاى دوجنسى، قطعات دوفلزی و شفت توربوشارژرها ازجمله کاربردهای این فرایند میباشند[3].

بسته به نحوه دوران اسپیندل (موتور درایو مستقیم و یا فلایویل)، این فرایند به دو روش تقسیم می شود؛ جوش کاری اصطکاکی درایو مستقیم و جوشکاری اصطکاکی اینرسی۲. در فرایند درایو مستقیم که در این مقاله نیز مورد بررسی قرار گرفته است، یکی از قطعات ثابت بوده و قطعه دیگر با سرعت ثابت دوران می کند. سپس فشاری اولیه (فشار اصطکاکی) به قطعات وارد می شود. هنگامی که مدت زمان تعیین شده جهت اعمال فشار اصطکاکی (زمان اصطکاکی) سپری شد، قطعه در حال دوران متوقف گردیده و فشار محوری (فشار آهنگری) تا مدتزمان مشخصی (زمان آهنگری) افزایش مییابد تا اتصال کامل گردد. بنابراین متغیرهای اصلی در فرایند جوش کاری درايو مستقيم عبارتاند از: سرعت دوراني، فشار اصطكاكي، زمان اصطكاكي، فشار آهنگری و زمان آهنگری. این متغیرها میزان انرژی ورودی به جوش و میزان حرارت تولیدشده در سطح مشترک قطعات را مشخص میکنند [4]. شکل 1 تغییرات پارامترهای جوشکاری نسبت به زمان را در فرایند جوش کاری اصطکاکی درایو مستقیم نشان میدهد.

در جوش کاری اصطکاکی اینرسی انرژی حاصل از دوران اسپیندل به فلایویل منتقل میشود. با رسیدن میزان چرخش به مقدار مورد نظر فشار محوری به قطعات اعمال می گردد. سرعت دوران با افزایش فشار محوری به تدریج کم شده و فرایند با توقف فلایویل خاتمه می پذیرد. در این روش چرخش قطعه با تخلیه انرژی فلایویل در اثر اعمال فشار و اصطکاک متوقف می گردد [4].

تغییر شکل شدید در نرخ کرنشهای بالا و همچنین افزایش سریع دمای سطح اتصال امکان مطالعه تجربی این فرایند را بسیار مشکل کرده است، به طوری که عملاً امکان ثبت پیوسته دادههای دمایی در سطوح اتصال با خطاهای بسیاری نظیر جابهجایی ترموکوپل و کوتاهشدگی قطعات همراه است. بدین سبب در سالهای اخیر به منظور مطالعه دقیق اثرات پارامترهای این فرایند روش حل المان محدود به طور فزاینده ای به کار گرفته شده است.

یکی از اولین مطالعات انجام شده در زمینه تحلیل المان محدود فرایند جوش کاری اصطکاکی توسط اسلوزالک [5] صورت گرفته است. او با در نظر گرفتن خواص مکانیکی متغیر با دما توانست شکل فلشهای ایجاد شده در جوش كارى فولاد 20G را با تقريب خوبى پيشبينى كند.

موآل و ماسونی [6] نیز مدلی حرارتی- مکانیکی برای حل المان محدود فرایند جوشکاری اصطکاکی سوپرآلیاژ پایه نیکل ارائه کردند. در این تحقیق ضریب اصطکاک وابسته به سرعت و فشار محوری تعریف شد. به دلیل این که در مدل آنها دمای سطح مشترک تا دمای ذوب بالا می رفت، میزان کوتاه شدگی پیش بینی شده در شبیه سازی بیشتر از آزمایش های تجربی بود.

در ادامه دیآلویز و همکاران [7] فرایند جوشکاری اصطکاکی اینرسی را برای دو قطعه ناهمجنس با استفاده از روابط اصطکاکی موآل و ماسونی در نرمافزار فورج ³2 مدلسازی کردند. تفاوت میزان دمای اندازه گیری شده در آزمایش تجربی و مدلسازی آنها حدود %6 بود.

Figure 1 Schematic variation of welding parameters with time شکل 1 شماتیک تغییرات پارامترهای جوش کاری با زمان

گرنت و همکاران [8] شبیهسازی عددی فرایند جوش کاری اصطکاکی را با استفاده از نرمافزار ديفرم 8.2 أنجام دادند. آنها مدل ايجادشده را با فشارهای مختلف مورد تحلیل قرار دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش فشار مقدار منطقه متأثر از حرارت کاهش می یابد، در حالی که دمای سطح مشترک و همچنین میزان کوتاه شدگی بیشتر می شود.

ليو و همكاران [9] با استفاده از شبيهسازى عددى فرايند جوشكارى صطکاکی اینرسی و ادغام نتایج آن با شبکه عصبی توانستند میزان کوتاهشدگی قطعات در جوشکاری اصطکاکی دورانی را با خطای %8 پیشبینی کنند. در ادامه لی و همکاران [10] یک مدل المان محدود جوش کاری اصطکاکی درایو مستقیم از جنس فولاد نرم طراحی کردند. نتایج این شبیهسازی با دادههای تجربی مقایسه شد و تأثیرات فشار محوری و سرعت دورانی روی دمای سطح مشترک و کوتاه شدگی محوری مورد بررسی قرار گرفت.

هندسه سطح مقطع قطعه کار در جوش کاری دو میله آلومینیومی توسط ظهور و همکاران [11] مورد بررسی قرار گرفت. آنها با اجرای آزمایشهای تجربی و شبیهسازی المان محدود نتیجه گرفتند که توزیع تنش یکنواختتر در اتصال نمونه پیندار سبب ایجاد اتصالی یکنواخت تر و با مقاومت بیشتر مىشود.

تأثیر میزان انبساط حرارتی بر مساحت سطوح مشترک اتصال در فرایند جوش کاری اصطکاکی اینرسی با استفاده از روش المان محدود توسط بنت و همکاران [12] مطالعه شد. آنها در این پژوهش فشار محوری را مهمترین پارامتر در میزان مساحت سطوح مشترک دانستند. بنت همچنین در پژوهشی دیگر [13] جوش کاری اصطکاکی اینرسی دو لوله آلیاژ کروم را با استفاده از نرمافزار ديفرم 10.2 شبيهسازي كرد. او با گردآوري دادههاي دمايي اندازه گیری شده در حین فرایند و وارد کردن آن ها در شبیه سازی المان محدود توانست تغییرات متالورژیکی ایجاد شده در اثر فرایند جوشکاری را پیشبینی کند. البته این روش نیاز به دادههای گسترده و دقیقی از فرایند

در تولید لولههای حفاری مورد نیاز در صنایع معدنی و ساختمانسازی نیز از این روش به منظور اتصال پین و باکس به بدنه لوله حفاری استفاده می گردد. جنس بدنه لولههای حفاری از فولادهای کربنی ساده مانند لولههای ASTM A106-B و جنس پین و باکس اتصال، فولاد AISI 4140 است. با این حال پژوهشی در زمینه استفاده از این فرایند در تولید لولههای حفاری

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.41.8

¹ Direct Drive Friction Welding

² Inertia Friction Welding ³ Forge 2

Speed _._. Pressure --- Axial shortening Welding parameters Friction time Forging time Forging pressure Friction pressure Time

⁴ Deform 8.2

یافت نشد. به همین منظور در این پژوهش اتصال لولههای فولادی از جنس ASTM A106-B و AISI A140 مورد بررسی قرار گرفته است. قطعات جوشکاری شده به دلیل ایجاد فلش در فرایند جوشکاری اصطکاکی معمولاً کوتاهتر از حالت اولیه خود هستند. از اینرو انتخاب طول قطعه اولیه برای دستیابی به محصولی با ابعاد مناسب و از پیش تعیینشده بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر نیز برای تخمین میزان کوتاهشدگی قطعات و تأثیر پارامترهای فرایند بر این امر و همچنین بررسی دمای سطح اتصال در حین شد. الگوریتمی به منظور بررسی المانهای اعوجاج یافته و مشریزی مجدد مدل طراحی گردید. ضریب اصطکاک و همچنین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد برای هر دو آلیاژ وابسته به دما در نظر گرفته شدند. سرانجام با استفاده از مدل المان محدود ایجادشده، شکل فلشهای تولیدشده، تأثیر و دمای سطح اتصال موردبررسی قرار گرفته شدند. سرانجام با

2- شبیهسازی المان محدود

(2)

(4)

دمای سطح اتصال در فرایند جوش کاری اصطکاکی به دلیل اصطکاک و تغییر شکل پلاستیکی به صورت ناگهانی افزایش مییابد. براساس قانون بقای انرژی برای یک جسم متقارن محوری در راستای y با خواص موادی وابسته به دما رابطه (1) به عنوان معادله انتقال حرارت در جسم بیان میشود [14].

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho C_P u \frac{\partial T}{\partial y} + \dot{S}$$
(1)

در آن ρ چگالی ماده، C_p گرمای ویژه، k ضریب هدایت حرارتی، T دما و t زمان است. ترم همرفتی در سمت راست معادله نیز به منظور در نظر گرفتن مقدار کوتاهشدگی قطعات با سرعت u در حین فرایند است. \hat{c} نرخ تولید حرارت به دلیل تغییر شکل پلاستیک در قطعات است و دور از سطح مشترک جوش قرار دارد. مقدار حرارت تولیدی توسط تغییر شکل پلاستیک نسبت به حرارت تولیدشده توسط اصطکاک بسیار کمتر است. این مقدار به صورت رابطه (2) تعریف می شود [14].

$$= \alpha \sigma_e \dot{\varepsilon}$$

در این رابطه σ_e تنش مؤثر، غ نرخ کرنش مؤثر و α ضریب مؤثر تغییر شکل پلاستیک که در این مسأله برابر 0.9 در نظرگرفته شده است.

تولید حرارت توسط اصطکاک قسمت اصلی شرایط مرزی حرارتی و در سطح مشترک قطعات پ که برابر با رابطه (3) است [14].

$$-k\frac{\partial T}{\partial x} = q(t) \tag{3}$$

در آن q(t) شار حرارتی تولید شده توسط اصطکاک است.

در این پژوهش به منظور تولید گرما در سطوح سایش از مدل کلمب استفاده شد. در مدل استاندارد اصطکاکی کلمب فرض بر این است که هیچ حرکت نسبی بین دو جسم در حال برخورد ایجاد نمیشود، مگر تنش اصطکاکی معادل کمتر از تنش بحرانی *۲* باشد که این تنش بحرانی نیز توسط رابطه (4) با فشار در ارتباط است [14].

$$\tau = \mu p$$

Ś

در این رابطه μ ضریب اصطکاک است که میتواند به صورت مقداری ثابت و یا تابعی از فشار، نرخ سرخوردگی، دمای متوسط سطوح برخورد و متوسط متغیرهای میدانی در محل برخورد بیان شود. در تحقیق حاضر مقدار ضریب اصطکاک وابسته به دما تعریف شد. شکل 2 مقدار ضریب اصطکاک

بین دو فولاد را در دماهای مختلف را نشان میدهد [15]. چگالی شار حرارتی تولیدشده توسط المان سطحی ناشی از حرارت اصطکاکی تولیدشده توسط رابطه (5) محاسبه میشود [16].

$$q_g = \eta \tau \dot{s} = \eta \tau \frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{5}$$

که در آن τ تنش اصطکاکی، s میزان لغزش لحظهای و Δt مدتزمان لحظهای است. همچنین تنش اصطکاکی نیز وابسته به فشار q ضریب اصطکاک μ و دمای هر دو سطح تحت لغزش است. ضریب η نیز نسبت گرمای تولیدشده در اثر سایش به مقدار کار اصطکاکی انجامشده را نشان میدهد. در این پژوهش فرض بر این شد که تمام کار اصطکاکی به گرما تبدیل میشود و این مقدار برابر 1 در نظر گرفته شد.

با توجه به ماهیت فرایند جوش کاری اصطکاکی دورانی و سادهسازی شبیهسازی، مدل به صورت دوبعدی و با تقارن محوری ایجاد شد. بدین منظور لولهها به صورت دوبعدی و با ضخامت 6 میلیمتر، طول 100 میلیمتر و قطر خارجی 50 میلیمتر مطابق شکل 3 در نظر گرفته شدند.

المانهای انتخابی از نوع چهاروجهی کوپل جابهجایی- حرارت با تقارن محوری و دارای درجه آزادی پیچش بودند. به منظور دستیابی به تعداد المانهای بهینه، آنالیز حساسیت مش با در نظر گرفتن حداکثر دمای سطح مشترک جوش به عنوان پارامتر تعیینکننده صورت گرفت. شکل 4 نتایج آنالیز حساسیت مش را نشان میدهد که در آن محور افقی تعداد المانها در سطح مشترک قطعات و محور افقی ماکزیمم دمای سطح مشترک جوش است. با توجه به شکل مشخص است که پس از در نظر گرفتن 9 المان در سطح مشترک، تغییرات دما جزئی (کمتر از %0.0) و قابل صرفنظر کردن است. همچنین به منظور کاهش هزینه محاسبات، اندازه المانها در فاصله 20 میلی متری از سطح مشترک توسط مشهای گذرا افزایش یافتند. استفاده از این روش تنها سبب تغییر %0.01 در مقدار ماکزیمم دمای سطح مشترک شد، ولی در کاهش زمان محاسبه بسیار مؤثر بود. شکل 5 نحوه مشریزی مدل و المانهای گذرای مورد استفاده را نشان میدهد.

ایجاد المانهای اعوجاج یافته به دلیل تغییر شکل شدید در این فرایند سبب کاهش دقت و یا حتی توقف تحلیل میشود. بدین منظور در این پژوهش مدل المان محدود فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی درایو مستقیم با استفاده از تکنیک مشریزی دوباره ایجاد شد.

ساختار حل بدین صورت طرحریزی شد که مدل در ابتدا توسط حل ضمنی نرمافزار تا مدتزمان تعیینشده یک ثانیهای حل میشود، سپس المانهای مدل تغییر شکل یافته، از نظر اعوجاج مورد بررسی قرار میگیرند.



i**gure 2** Friction coefficient at different temperatures [15] **شکل 2** مقادیر ضریب اصطکاک وابسته به دما [15]

¹ Abaqus CAE 6.14



Fig. 6 Remeshing of the model a- distorted elements (white borders), b- new elements

شکل 6 مشریزی مجدد المانها الف- المانهای اعوجاج یافته (مرزبندی سفید)، ب- المانهای جدید

در این فرایند نیاز به دادههای رفتار پلاستیک ماده در دما و نرخ کرنش بالا است. بدین منظور رفتار پلاستیکی مواد از 25 تا 1400 درجه سانتی گراد و نرخ کرنش 0.001 تا 1000 بر ثانیه با استفاده از نرمافزار جیمت پرو ³⁷ به دست آمد. شکل 7 رفتار پلاستیک فولادهای B-ASTM A106-B و AISI 4140 در نرخ کرنش 0.001 بر ثانیه و در دماهای بین 25 تا 1400 درجه سانتی گراد را نشان میدهد. سایر خصوصیات وابسته به دما نیز توسط این نرمافزار تخمین زده شد که در شکل 8 آمده است.



 Fig. 7 Plastic behavior of a- AISI 4140, b- ASTM A106-B at different temperatures with strain rate of 0.001 s⁻¹ from JMatPro 7

 م رفتار پلاستیک الف- فولاد ASTM A106-B، ب- AISI 4140, در 7

 دماهای مختلف و نرخ کرنش 0.001, ثانیه مستخرج از جیمت پرو 7



شکل 5 نحوه شبکهبندی مدل المان محدود

معیار بررسی اعوجاج المانها براساس زاویه گوشه المانهاست. اگر زاویه گوشه یک المان چهارضلعی کمتر از 10 درجه و یا بیشتر از 160 درجه باشد، به عنوان المان اعوجاج یافته و با کیفیت پایین معرفی میشود. بدین ترتیب اگر مدل دارای المان اعوجاج یافته نباشد حل به مدت زمان یک ثانیه دیگر دوباره فراخوانی شده و مش,بندی مجدد میشود، همچنین نتایج آخرین جزء تحلیل پیشین به مدل جدید منتقل میگردد. به همین صورت شبیه سازی تا اتمام زمان فرایند ادامه مییابد. به منظور پیاده سازی این روند اسکریپتی^۱ با استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون^۲ در نرمافزار آباکوس نوشته شد و انتقال نتایج مدل تغییر شکل یافته، مشریزی مجدد و ادامه حل آن با اجرای همین کد صورت پذیرفت.

6 نیز مدل تغییر شکل یافته را پیش و پس از مشریزی مجدد نشان میدهد. در این شکل المانهای اعوجاج یافته و با کیفیت پایین با خطوط مرزی سفید مشخص شدهاند.

1-2- خواص مکانیکی مواد

به دلیل حرارت بالای ایجاد شده و تغییر شکل شدید در نرخ کرنشهای بالا

³ JMatPro 7



شکل 8 خصوصیات موادی الف- فولاد ASTM ATOO, ۵- AISI 4140، ب- ASTM AIO

2-2- شرايط مرزى

با توجه به شرایط آزمایش فولاد AISI 4140 به عنوان قطعه تحت دوران قرار گرفت. شکل 9 شرایط مرزی مسأله را به صورت شماتیک نشان میدهد. 50 میلیمتر از طول هرکدام از قطعات خارج از اسپیندل و بست قرار گرفتند که این مورد در شرایط شبیهسازی نیز رعایت شد. 50 میلیمتر از طول قطعه دوار به نقطهای روی محور دوران کوپل شد که تنها قابلیت دوران در راستای محور y را دارد. 50 میلیمتر از طول قطعه تحت فشار محوری نیز با تنها قابلیت حرکت در راستای y را داراست. دمای اولیه شروع شبیهسازی برابر 31 درجه سانتی گراد درنظر گرفته شد.

3- مواد، تجهيزات و روش انجام آزمايش

قطعاتی از جنس فولاد ASTM A106-B و AISI 4140 به صورت لولههایی با طول 100 میلیمتر، قطر خارجی 50 میلیمتر و ضخامت 6 میلیمتر



شکل 9 شرایط مرزی مدل

ماشین کاری شدند. ترکیب شیمیایی فولادهای به کاررفته در جدول 1 ارائه شده است. استحکام نهایی قطعات اولیه ASTM A106-B و AISI 4140 و 952 براساس نتایج تست کشش استاندارد انجام گرفته به ترتیب برابر 526 و 952 مگاپاسکال بهدست آمد.

با توجه به نقش میزان کوتاه شدگی قطعات بعد از جوش کاری در تخمین مقدار ماده مورد نیاز، حجم ماشین کاری لازم جهت از بین بردن فلشها و همچنین طول نمونه بعد از جوشکاری، نیاز است تا مدلی جهت تخمین دقیق این پارامتر و تعیین تأثیر پارامترهای فرایند در جوشکاری اصطکاکی دورانی توسعه داده شود. بدین منظور طراحی آزمایشی به صورت طرح عاملی کسری^۱ صورت گرفت و سرعت دورانی، فشار اصطکاکی، زمان اصطکاکی، فشار آهنگری و زمان آهنگری هر کدام در سه سطح تغییر داده شدند. جدول 2 پارامترهای مورد بررسی و سطوح آنها را نشان میدهد. بر این اساس درمجموع 27 تحليل المان محدود صورت گرفت. جهت صحه گذاری نتايج شبیهسازی المان محدود، 3 آزمایش تجربی براساس پارامترهای آزمایشهایی که سطوح تمامی پارامترها در آنها 1-، 0 و 1 بودند انجام گرفت، سپس میزان کوتاه شدگی محوری و ابعاد فلش های ایجاد شده و استحکام کششی در نمونههای تجربی بررسی گردید. همچنین دمای سطح قطعهکار ASTM A106 در فاصله 20 میلیمتری از محل اتصال در یکی از آزمایشهای تجربی که سطوح تمامی پارامترها در آن 0 (سرعت دورانی 750 دور بر دقیقه، فشار اوليه 90 مگاپاسكال، زمان اصطكاكي 8 ثانيه، فشار آهنگري 140 مگاپاسكال و زمان آهنگری 6 ثانیه) بود، اندازه گیری شد.

آزمایشهای تجربی توسط دستگاه جوشکاری اصطکاکی دورانی مدل BS-30 ساخت شرکت آذین صنعت فراسو انجام شد. شکل 10 چیدمان آزمایش تجربی و انجام جوشکاری اصطکاکی دورانی را نشان میدهد.

اندازه گیری دما در حین جوش کاری نیز توسط ترمو کوپل نوع K صورت گرفت. به منظور ثبت نتایج دمایی نیز از کنترلر دما مدل TK4 ساخت

جدول 1 ترکيب شيميايی فولادهای AISI 4140 و ASTM A106-B Table 1 Chemical compositions of AISI 4140 and ASTM A106-B

STWAT00-D	Ions of AISI 4140 and P	able I Chemical composit
	درصد	وزنی (%)
	AISI 4140	ASTM A106-B
كربن	0.412	0.289
سيليسيوم	0.248	0.224
منگنز	0.874	1.021
كروم	1.087	0.032
موليبدن	0.236	0.128
نيكل	0.196	0.032
مس	0.279	0.031
آهن	پايە	پايە

ييرات	سطوح تغ	فرايند و ،	امترهای	2 پار	ول
eters and variati	on leve	ls			

Fable 2 Process parameters and variation levels					
	سطح		بارامت فرابند		
1	0	-1			
1000	750	500	سرعت دورانی (n) (rpm)		
100	90	80	فشار اصطکاکی (<i>P</i> ₁) (MPa)		
10	8	6	زمان اصطکاکی (s) (t)		
160	140	120	فشار آهنگری (MPa) (P ₂)		
8	6	4	زمان آهنگری (s) (t ₂)		

¹ Fractional Factorial Design

شرکت آتونیکس^۱ استفاده شد و نتایج توسط نرمافزار داکیومستر^۲ ذخیره گردید. شکل 11 محل نصب ترموکوپل و نحوه اندازهگیری دما را در آزمایشهای تجربی نشان میدهد.

4- نتايج و بحث

درمجموع 27 شبیه سازی با پارامترهای مختلف صورت گرفت که نتایج حاصل از آنها در جدول 3 آمده است. در ادامه نتایج به دست آمده از شبیه سازی المان محدود و آزمایش های تجربی آمده است.



Fig. 10 Experimental setup of rotary friction welding شکل 10 چیدمان آزمایش تجربی جوشکاری اصطکاکی دورانی





Fig. 11 a- A schematic of measuring the temperature, b- placement of the thermocouple

شکل 11 الف- شماتیک نحوه اندازه گیری دما، ب- محل نصب ترموکوپل

 Table 3 process parameters and the results of axial shortening obtained by finite element simulation

كوتاەشدگى	,	D	,	D	N	
محورى	l_2 (s)	P_2 (MPa)	l_1 (s)	(MPa)	(rpm)	شماره
(mm)						
1.7	8	120	6	80	500	1
5.2	4	120	6	80	1000	2
5.1	4	120	6	100	500	3
10.2	8	120	6	100	1000	4
5.2	4	120	10	80	500	5
9.5	8	120	10	80	1000	6
13.6	8	120	10	100	500	7
16.4	4	120	10	100	1000	8
4.6	4	160	6	80	500	9
10.2	8	160	6	80	1000	10
9.6	8	160	6	100	500	11
12.5	4	160	6	100	1000	12
5.2	8	160	10	80	500	13
11.7	4	160	10	80	1000	14
16.6	4	160	10	100	500	15
22.3	8	160	10	100	1000	16
7.9	6	140	8	90	500	17
12.9	6	140	8	90	1000	18
8.5	6	140	8	80	750	19
13.6	6	140	8	100	750	20
5.5	6	140	6	90	750	21
15.1	6	140	10	90	750	22
9.2	6	120	8	90	750	23
13.0	6	160	8	90	750	24
11.0	4	140	8	90	750	25
14.9	8	140	8	90	750	26
10.9	6	140	8	90	750	27

4-1- نتايج شبيهسازى

جدول 4 آنالیز واریانس مدل میزان کوتاهشدگی محوری را نشان میدهد. مقدار R_{adj} مدل برابر %89.6 حاصل شد. نتایج حکایت از معنیدار بودن تأثیر چهار پارامتر سرعت دورانی، فشار اصطکاکی، زمان اصطکاکی و فشار آهنگری دارد، همچنین برهمکنش فشار اصطکاکی و زمان اصطکاکی نیز در نتایج تأثیرگذار است. تحلیل آماری نشان داد که فشار اصطکاکی با %33.9 زمان اصطکاکی با %4.64 و سرعت دورانی با %17 به ترتیب بیشترین تأثیر را روی میزان کوتاهشدگی دارا هستند.

شکل 12 تغییرات میزان کوتاهشدگی محوری را در سرعتهای دورانی مختلف نشان میدهد. با توجه به شکل مشاهده میشود که با افزایش سرعت دورانی از 500 دور بر دقیقه به 1000 دور بر دقیقه، کوتاهشدگی به میزان حدود 37% بیشتر می گردد. با توجه به رابطه (5) با افزایش سرعت دورانی نرخ تولید حرارت بیشتر شده (افزایش Δs/Δt) و در نتیجه مقدار ماده خمیری ایجاد شده افزایش میابد. همین امر سبب کوتاهشدگی بیشتر در قطعات می شود.

¹ Autonics ² DAQMaster

جدول 3 مقادیر پارامترهای فرایند و میزان کوتاهشدگی محوری بهدستآمده از شبیهسازی

شبیهسازی المان محدود فرآیند جوش کاری اصطکاکی دورانی لولههای غیرهمجنس

جدول 4 آنالیز واریانس مدل کوتاهشدگی محوری Table 4 ANOVA of the axial shortening model

سهم تأثير (%)	مقدار P	مقدار F	درجه آزادی	مجموع مربعات	عامل
16.97	< 0.0001	42.269	1	93.982	п
33.88	< 0.0001	84.415	1	187.689	P_1
26.37	< 0.0001	65.693	1	146.062	t_1
8.76	0.0001	21.826	1	48.527	P_2
0.79	0.1758	1.970	1	4.380	t_2
5.21	0.0018	12.983	1	28.866	$P_{1*} t_1$
8.03	-	-	20	44.468	خطا
100.00	-	-	26	553.975	كل

شکل 13 نیز میزان شار حرارتی ایجاد شده در سطوح مشترک جوش را در سرعتهای دورانی مختلف (سطوح صفر در سایر پارامترها) نشان میدهد. با توجه به نمودار مشخص است با افزایش سرعت دورانی، میزان شار حرارتی ایجاد شده نیز بیشتر شده است، همچنین در این شکل مشاهده میشود در زمانهای 4، 5، 6 و 7 ثانیه پرشهایی در نمودار دیده میشود. این پرشها ناشی از انتقال نتایج تحلیل پیشین به تحلیل جدید است. به عبارت دیگر در انتقال نتایج شار حرارتی مدل تغییر شکلیافته به گرههای جدید و درونیابی این نتایج، این پرشها ایجاد میشوند که با ادامه حل مسأله این پرشها در کمتر از 10 ثانیه از بین میروند.

شکلهای 14 و 15 تغییرات میزان کوتاهشدگی را به ترتیب در فشار و زمانهای اصطکاکی مختلف نشان میدهد. افزایش فشار اصطکاکی از 80 مگاپاسکال به 100 مگاپاسکال سبب افزایش 48% میزان کوتاهشدگی محوری شده است. افزایش زمان اصطکاکی نیز از 6 ثانیه تا 10 ثانیه افزایش 44% مقدار کوتاهشدگی محوری را درپی داشت. بیشتر شدن فشار اصطکاکی نیز باعث افزایش تنش اصطکاکی (رابطه (4)) و در نهایت افزایش شار حرارتی ایجادشده در سطوح برخورد می شود.

شکل 16 نمودار تنش اصطکاکی در سطوح مشتر ک را نشان می دهد. در این نمودار فشار اصطکاکی به ترتیب برابر 80، 90 و 100 مگاپاسکال است و سایر پارامترها در سطوح صفر قرار دارند. با توجه به شکل، میزان تنش اصطکاکی در فشارهای بالا بیشتر است. افزایش میزان شار حرارتی تولید شده در سطوح مشترک نیز در شکل 17 آمده است. ملاحظه می شود با افزایش فشار اصطکاکی، شار حرارتی ایجادشده نیز افزایش می یابد. همچنین با بیشتر شدن فشار اصطکاکی، ماده خمیری بیشتری به صورت فلش به بیرون خارج می شود. افزایش زمان اصطکاکی نیز مدتزمان تولید گرما را افزایش داده و همین امر سبب افزایش حجم ماده خمیری شده که کوتاه شدگی بیشتری را درپی دارد.

شکلهای 18 و 19 نیز به ترتیب تأثیر فشار و زمان آهنگری را بر میزان کوتاه شدگی محوری نشان می دهد. با افزایش فشار آهنگری از 120 مگاپاسکال به 140 مگاپاسکال، میزان کوتاه شدگی در حدود %24 بیشتر می شود. این در حالی است که با افزایش فشار آهنگری از 140 مگاپاسکال به 160 مگاپاسکال، میزان کوتاه شدگی محوری تغییر محسوسی ندارد. با طولانی شدن زمان آهنگری از 4 ثانیه به 6 ثانیه، قطعات %9 بیشتر کوتاه می شوند و پس از آن تغییر محسوسی مشاهده نشد. این روند تغییرات ناشی از

تأثیرگذاری ناچیز پارامترهای مذکور بر میزان حرارت تولیدشده در سطوح برخورد است و افزایش فشار و زمان آهنگری فقط باعث خروج بیشتر مواد خمیری به خارج از محل جوش میشود.



Fig. 12 Axial shortening changes with the rotational speed



Fig. 13 Heat flux at the interface at different rotational speeds شکل 13 شار حرارتی ایجاد شده در سطوح مشترک در سرعتهای دورانی مختلف



Fig. 15 Axial shortening changes with the friction time شکل 15 تغییرات میزان کوتاهشدگی محوری در زمانهای اصطکاکی مختلف



Fig. 16 Frictional stress at the interface at different friction pressures









Fig. 18 Axial shortening changes with the forging pressure





شکل 19 تغییرات میزان کوتاهشدگی محوری در زمانهای آهنگری مختلف

کمتر شدن میزان تغییرات کوتاهشدگی در فشار و زمانهای آهنگری بالاتر نشاندهنده آن است که این دو پارامتر تا مقدار محدودی بر میزان کوتاهشدگی قطعات تأثیرگذارند و افزایش بیشتر این پارامترها به دلیل خروج

کامل ماده خمیری از منطقه جوش، تأثیری بر طول اتصال ندارند.

شکل 20 دمای سطح اتصال نمونه شماره 27 (سطوح پارامتری 0) را طی فرایند جوش کاری اصطکاکی به همراه تغییرات فشار محوری نشان می دهد. با توجه به این نمودار، دما در مدتزمانی بسیار کوتاه (حدود 2 ثانیه) به حدود 1250 درجه سانتی گراد می رسد و پس از آن متعادل می شود. پرش های موجود روی این نمودار ناشی از انتقال نتایج تحلیل پیشین به تحلیل جدید گرههای مدل جدید و درونیابی این نتایج، این پرش ها ایجاد می شود که با ادامه حل مسأله دمای سطح مشترک فوراً (کم تر از 200 ثانیه) به حالت تعادلی برمی گردد. شکل 21 نیز توزیع دمایی محل اتصال این نمونه در پایان مرحله ایجاد حرارت (ثانیه 8) را نشان می دهد. با توجه به شکل ملاحظه می شود که حداکثر دمای قطعات در محل برخورد و به میزان 1278 درجه سانتی گراد به دست آمده است.

2-4- صحەگذارى شبيەسازى

به منظور صحهگذاری نتایج مدل المان محدود، 3 آزمون تجربی با شرایط ذکرشده در بخش 3 صورت گرفت. شکل 22 نمودار دمای سطح قطعه ASTM A106-B حاصل از نتایج تجربی و شبیهسازی به دست آمده نمونه با سطوح پارامتری 0 را نشان میدهد. با توجه به این نمودار در مرحله افزایش دما، بیشترین اختلاف بین نتایج تجربی و شبیهسازی به میزان 88 درجه سانتی گراد به دست آمد. این اختلاف دما پس از رسیدن به حالت تعادل بسیار اندک و نزدیک به 7 درجه سانتی گراد است.



Figure 20 Interface temperature during the welding of the sample No. 27

شکل 20 مقادیر دمای سطوح اتصال در نمونه شماره 27 حین فرایند جوش کاری



شکل 21 توزیع دما در محل اتصال نمونه شماره 27



Fig. 22 Comparison of the measured and simulated temperature from 20 mm of the welding surfaces شکل 22 دمای اندازه گیری شده بهصورت تجربی و شبیهسازی در 20 میلی متری

محل اتصال

عمده حرارت تولیدی در این مسأله بر اثر اصطکاک، سرعت و فشار دو قطعه در نظر گرفته شد. این در حالی است که به دلیل ماهیت پیچیده تولید حرارت در شرایط واقعی فرایند نمیتوان تخمین دقیقی از میزان نرخ تولید حرارت داشت. دشوار بودن اندازه گیری ضریب اصطکاک، ناهمواریهای موجود در سطح قطعات، تأثیر جنسهای مختلف فلزات بر همدیگر در مقیاس ماکرو و میکرو و سایر عوامل محیطی نیز بر میزان شار حرارتی تولیدشده و دمای نهایی حین فرایند تأثیر گذار هستند. شکل 23 نمودار میزان کوتاه شدگی محوری قطعات پس از فرایند جوشکاری را در آزمایشهای تجربی و در شبیه سازی نشان می دهد.

مقایسهای از شکل فلشهای به دست آمده از آزمایشهای تجربی و شبیهسازی در شکل 24 نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می شود اندازه فلشهای داخلی بیشتر از فلشهای ایجاد شده در سطح خارجی لولهها هستند. دلیل این امر را می توان به انحراف ناشی از انبساط حرارتی لولهها در اولین لحظات تماس بین آنها مرتبط دانست. این پدیده باعث غیریکنواختی فشار محوری وارده به دو لوله می گردد به طوری که فشار در سمت داخلی لوله (موضعی که انحراف کم تری دارد) بالاتر است؛ بنابراین این فشار محوری بالاتر سبب تشکیل فلشهای بزرگ تری در مقایسه با فلشهای ایجاد شده در سطح خارجی می گردد [1].

ملاحظه میشود که شکل و اندازه فلشها به دلیل غیرهم جنس بودن قطعات با یکدیگر متمایز بوده و فولاد با استحکام کششی پایین ر (ASTM ASTM)، فلشهای بزرگ تری نسبت به فولاد دیگر (A106 4140) دارد. تغییر شکل المانها و برگشت فلشها به سمت خارج از محدوده خط جوش در شبیه سازی فرایند به خوبی در این شکل دیده می شود. جدول 5 نتایج تجربی و شبیه سازی میزان کوتاه شدگی و همچنین اندازه فلشهای حاصل از جوش کاری را نشان می دهد. با بررسی میزان کوتاه شدگی در نتایج شبیه سازی و تجربی، مقدار خطای شبیه سازی برابر %5.6 به دست آمد که نشان از تطابق خوب مدل شبیه سازی با حالت تجربی دارد.

به منظور بررسی مقاومت کششی قطعات جوش کاری شده، نمونههای تست کشش از آزمایشهای اعتبارسنجی، مطابق با استاندارد ASTM E8 توسط دستگاه واترجت بریده شدند. فلشهای اتصال سنگ زده شد و نمونهها تحت آزمون کشش با سرعت 20 میلیمتر بر دقیقه قرار گرفتند. نمودارهای تنش-کرنش نمونههای آزمایش شده در شکل 25 آمده است. شکل 26 نیز نتایج آزمون کشش نمونههای جوش کاری شده و همچنین میزان کوتاهشدگی آنها را در سطوح مختلف پارامترهای فرایند نشان میدهد.

نتایج نشان میدهند که نمونه جوش داده شده در سطوح پارامتری 1-(کمترین مقدار کوتاهشدگی محوری) با شکست در محل جوش، کمترین مقاومت کششی را از خود نشان داد. این موضوع نشاندهنده اتصال ناقص میان دو لوله بوده که با توجه به عدم تشکیل پلیسه نیز قابل تشخیص است. نمونههای جوشکاری شده با سطوح پارامتری 0 و 1 نیز بهترتیب تحت تنش نهایی 500.9 و 520.9 مگاپاسکال و از سمت فولاد ASTM A106-B دچار گسیختگی شدند. این موضوع نیز بیانگر برقراری بهتر اتصال و کوتاهشدگی بیشتر در سطوح بالاتر پارامترهای فرایند (به ویژه سرعت دورانی و فشار اصطکاکی) است.



Fig. 23 Experimental and simulation results of the axial shortening of the workpieces after welding process

شکل 23 نتایج تجربی و شبیهسازی میزان کوتاهشدگی محوری قطعات پس از فرایند جوشکاری



Fig. 24 A comparison of the experimental and simulation results of the deformed flashes of the samples with the parameter levels of a - 1, b - 0 and c - +1

شکل 24 مقایسه نتایج آزمایشهای تجربی و شبیهسازی فلشهای ایجادشده در نمونههای با سطوح پارامتری الف- 1-، ب- 0 و ج- 1+







Fig. 26 Tensile strength and axial shortening of the welded samples شکل 26 مقاومت کششی و میزان کوتاهشدگی نمونههای جوشکاری شده

جدول 5 نتایج تجربی و شبیهسازی میزان کوتاهشدگی و شکل فلشهای ایجاد شده پس از جوشکاری

Table 5	Experimental	and simulation	n results	of the	axial	shortening	and
size of th	ne flashes after	r welding					

، فلش	عرض فلش		طول فلش		.ə	سطو
AISI 4140	ASTM A106-B	AISI 4140	ASTM A106-B	میزان نامشد گی	ع تحليل	ح پارامترها
0.4	2.0	2.5	3.9	1.7	شبيەسازى	
0.5	2.1	3.0	3.9	1.8	تجربى	-1
10.7	3.3	16.7	0.2	6.6	خطا (%)	
3.7	5.2	6.3	7.1	10.9	شبيەسازى	
4.1	5.6	6.2	7.5	11.3	تجربى	0
9.5	6.8	1.3	5.2	3.1	خطا (%)	
5.0	7.9	8.9	10.4	22.3	شبيەسازى	
5.4	7.7	6.8	9.6	20.8	تجربى	1
6.5	2.6	30.6	8.3	7.1	خطا (%)	

5- نتیجه گیری

در این پژوهش شبیهسازی المان محدود جوش کاری اصطکاکی دورانی دو لوله غیرهمجنس ارائه شد. تأثیر سرعت دورانی، فشار اصطکاکی، زمان اصطکاکی، فشار آهنگری و زمان آهنگری بر میزان کوتاهشدگی نمونههای بعد

از جوش کاری تعیین گردید و در ادامه دمای سطوح اتصال نیز مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج در ادامه آمده است.

۱- استفاده از تکنیک مشریزی مجدد در شبیهسازی فرایند جوش کاری اصطکاکی از شکل گیری المانهای با کیفیت کم جلوگیری کرده و میتواند بهعنوان ابزاری جهت شبیهسازی مناسب تر مسائل دارای تغییر شکل شدید مورد استفاده قرار گیرد.

2- با مقایسه میزان کوتاهشدگی قطعات در مدل المان محدود ایجادشده با نتایج تجربی، میزان متوسط خطای شبیهسازی برابر %5.6 به دست آمد که نشان از مطابقت بالای مدل المان محدود با شرایط تجربی فرایند دارد.

3- بیشتر شدن سرعت دورانی، فشار اصطکاکی با افزایش مقدار شار حرارتی و بیشتر شدن زمان اصطکاکی با بالا بردن زمان اعمال حرارت، مقدار کوتاهشدگی محوری نمونهها را افزایش دادند.

4- افزایش میزان فشار و زمان آهنگری تا مقدار محدودی توانست سبب بیشتر شدن میزان کوتاهشدگی قطعات باشد و افزایش بیشتر این پارامترها به دلیل خروج بیشتر ماده خمیری از منطقه جوش، تأثیر کمتری بر کوتاهشدگی محوری داشت.

6- مراجع

- AWS, Recommended Practices for Friction Welding, American Welding Society, 2009, pp. 1-2.
- [2] M. Maalekian, Friction welding-critical assessment of literature, Science and Technology of Welding & Joining, Vol. 12, No. 8, pp. 738-759, 2007.
- [3] M. C. Chaturvedi, *Welding and Joining of Aerospace Materials*, pp. 25-33, Cambridge, UK: Elsevier, 2011.
- [4] C. L. Jenney, A. O'Brien, Welding Handbook, Volume 1–Welding Science and Technology, 9 ed., pp. 23-24, Miami: American Welding Society, 2001.
 [5] A. Służalec, Thermal effects in friction welding, Mechanical Sciences, Vol.
- 32, No. 6, pp. 467-478, 1990.
 [6] A. Moal, E. Massoni, Finite element simulation of the inertia welding of two
- similar parts, *Engineering Computations*, Vol. 12, No. 6, pp. 497-512, 1995. [7] L. D'Alvise, E. Massoni, S. Walloe, Finite element modelling of the inertia
- [7] L. D'Alvise, E. Massoni, S. Walløe, Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials, *Materials Processing Technology*, Vol. 125, No. 1, pp. 387-391, 2002.
- [8] B. Grant, M. Preuss, P. Withers, G. Baxter, M. Rowlson, Finite element process modelling of inertia friction welding advanced nickel-based superalloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 513, No. 1, pp. 366-375, 2009.
- [9] W. Liu, F. Wang, X. Yang, W. Li, Upset Prediction in Friction Welding Using Radial Basis Function Neural Network, Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2013, No. 1, pp. 9, 2013.
- [10] W. Li, F. Wang, Modeling of continuous drive friction welding of mild steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 18, pp. 5921-5926, 2011.
- [11] Zohoor, S. Amirkhani, Investigation of cross sectional geometry on temperature and properties of welded area in the rotational friction welding process for AL-7075-T6, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 13-20, 2016.
 [12] C. Bennett, T. Hyde, P. Shipway, A transient finite element analysis of
- [12] C. Bennett, T. Hyde, P. Shipway, A transient finite element analysis of thermoelastic effects during inertia friction welding, *Computational Materials Science*, Vol. 50, No. 9, pp. 2592-2598, 2011.
- [13] C. Bennett, Finite element modelling of the inertia friction welding of a CrMoV alloy steel including the effects of solid-state phase transformations, *Manufacturing Processes*, Vol. 18, No. 1, pp. 84-91, 2015.
- [14] M. Maalekian, E. Kozeschnik, H. Brantner, H. Cerjak, Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars, *Acta Materialia*, Vol. 56, No. 12, pp. 2843-2855, 2008.
- [15] E. O. Bouarroudj, S. Chikh, S. Abdi, D. Miroud, Thermal analysis during a rotational friction welding, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 110, No. 1, pp. 1543-1553, 2017.
- [16] W. Li, F. Wang, S. Shi, T. Ma, Numerical simulation of linear friction welding based on ABAQUS environment: Challenges and perspectives, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 2, pp. 384-390, 2014.