



شبیه‌سازی المان محدود فرآیند جوش کاری اصطکاکی دورانی لوله‌های غیرهم‌جنس

جواد هاشمی خسروشاهی¹، محمدحسین صادقی^{2*}، امیر راستی³، سینا صبغی فرشی³

1- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

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

* صندوق پستی 14115-143 sadeghim@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 آبان 1396

پذیرش: 10 دی 1396

ارائه در سایت: 29 دی 1396

کلید واژگان:

شبیه‌سازی المان محدود

جوش کاری اصطکاکی دورانی

روش مش‌ریزی مجدد

چکیده

در این پژوهش شبیه‌سازی المان محدود فرآیند جوش کاری اصطکاکی دورانی دو لوله غیر هم‌جنس ASTM A106-B و AISI 4140 ارائه شد. با استفاده از طرح آزمایش کسری، تأثیر پارامترهای اصلی جوش کاری شامل سرعت دورانی، فشار اصطکاکی، زمان اصطکاکی، فشار آهنگری و زمان آهنگری بر میزان کوتاه‌شدگی نمونه‌های بعد از جوش کاری مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به وجود تغییر شکل شدید در این فرآیند و جلوگیری از ایجاد المان‌های اعوجاج یافته از تکنیک مش‌ریزی مجدد ابتکاری و اسکریپت‌نویسی در نرم‌افزار آباکوس استفاده گردید. در مجموع 27 مدل‌سازی المان محدود و 3 آزمون تجربی جهت اعتبارسنجی انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزایش تمامی پارامترهای فرآیند، کوتاه‌شدگی بیشتر اتصال را در پی دارد. پارامتر فشار اصطکاکی نیز با 33.9% بیشترین تأثیر را بر میزان کوتاه‌شدگی نمونه‌ها دارا بود. علاوه بر این افزایش فشار و زمان آهنگری تا مقدار محدودی کوتاه‌شدگی قطعات را افزایش داده و پس از آن بی‌تأثیر بودند. از سوی دیگر میزان دمای تعادلی در سطح اتصال در حدود 1250 درجه سانتی‌گراد بود که بعد از حدود 2 ثانیه از شروع فرآیند ایجاد می‌شد. نتایج آزمون‌های اعتبارسنجی نیز بیانگر وجود خطای شبیه‌سازی در حدود 5.6% بود که نشان از مطابقت بالای مدل المان محدود با شرایط تجربی فرآیند دارد.

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

Keywords:

Finite Element Modeling
Rotary Friction Welding
Remeshing method

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 حرارت² کوچک‌تر و اعوجاج کمتر قطعات می‌شود [1].

در فرآیند جوش کاری 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 می‌گردد. این افزایش دما، کاهش تنش سیلان قطعات در سطوح تماسی را به دنبال دارد و امکان امتزاج و برقراری اتصال بین دو قطعه را فراهم می‌کند. همچنین در اثر نیروی فشاری محوری، مقداری از ماده به سمت خارج جریان می‌یابد و سبب تشکیل فلش³ می‌شود [2].

جوش کاری اصطکاکی دورانی¹ نوعی فرآیند جوش کاری حالت جامد است که در آن حرارت مورد نیاز برای جوش کاری از تبدیل مستقیم انرژی مکانیکی به انرژی حرارتی ناشی از اصطکاک بالای بین سطوح مشترک قطعات ایجاد می‌شود. در این فرآیند، هیچ یک از قطعات ذوب نمی‌شوند. به همین دلیل، عیوب فرایندهای ذوبی مانند تخلخل، عدم نفوذ، آخال‌های سرباره و ... در این روش وجود ندارد. همچنین برخلاف روش جوش کاری با الکتروود، فلز پراکنده، فلاسک و گاز محافظ در فرآیند جوش کاری اصطکاکی استفاده نمی‌شود. برتری دیگر این روش نسبت به جوش کاری قوسی، گرادیان حرارتی کمتر در

² Heat Affected Zone (HAZ)

³ Flash

¹ Rotary Friction Welding

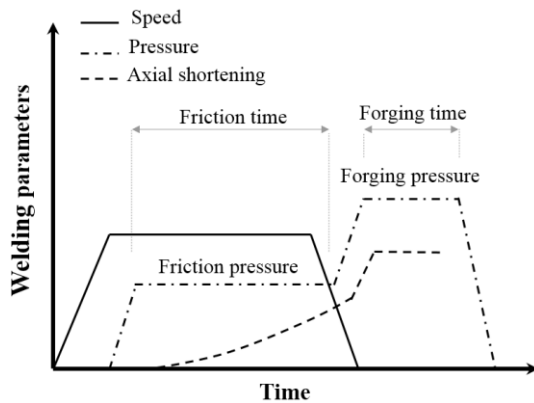


Figure 1 Schematic variation of welding parameters with time

شکل 1 شماتیک تغییرات پارامترهای جوش کاری با زمان

گرنه و همکاران [8] شبیه‌سازی عددی فرآیند جوش کاری اصطکاکی را با استفاده از نرم‌افزار دیفرم 8.2⁴ انجام دادند. آن‌ها مدل ایجادشده را با فشارهای مختلف مورد تحلیل قرار دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش فشار مقدار منطقه متأثر از حرارت کاهش می‌یابد، در حالی که دمای سطح مشترک و همچنین میزان کوتاه‌شدگی بیشتر می‌شود.

لیو و همکاران [9] با استفاده از شبیه‌سازی عددی فرآیند جوش کاری اصطکاکی اینرسی و ادغام نتایج آن با شبکه عصبی توانستند میزان کوتاه‌شدگی قطعات در جوش کاری 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 کوتاه‌شدگی محوری مورد بررسی قرار گرفت.

هندسه سطح مقطع قطعه‌کار 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 یکنواخت‌تر و با مقاومت بیشتر می‌شود.

تأثیر میزان انبساط حرارتی بر مساحت سطوح مشترک اتصال در فرآیند 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 دیفرم 10.2 شبیه‌سازی کرد. او با گردآوری داده‌های دمایی اندازه‌گیری شده در حین فرآیند و وارد کردن آن‌ها در شبیه‌سازی المان محدود توانست تغییرات متالورژیکی ایجاد شده در اثر فرآیند جوش کاری را پیش‌بینی کند. البته این روش نیاز به داده‌های گسترده و دقیقی از فرآیند داشت.

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 می‌گردد. 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 فرآیند در تولید لوله‌های حفاری

امروزه از فرآیند جوش کاری اصطکاکی دورانی به صورت گسترده در تولید اتصالات استوانه‌ای جهت انتقال نیرو و گشتار و همچنین اتصال فلزات غیر هم‌جنس استفاده می‌شود. اکسل خودروها، سوپاپ‌های دوجنسی، قطعات دوفلزی و شفت توربوشارژرها از جمله کاربردهای این فرآیند می‌باشند [3].

بسته به نحوه دوران اسپیندل (موتور درایو مستقیم و یا فلاپویل)، این فرآیند به دو روش تقسیم می‌شود؛ جوش کاری اصطکاکی درایو مستقیم¹ و جوش کاری اصطکاکی اینرسی². در فرآیند درایو مستقیم که در این مقاله نیز مورد بررسی قرار گرفته است، یکی از قطعات ثابت بوده و قطعه دیگر با سرعت ثابت دوران می‌کند. سپس فشاری اولیه (فشار اصطکاکی) به قطعات وارد می‌شود. هنگامی که مدت‌زمان تعیین‌شده 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 فرآیند جوش کاری درایو مستقیم عبارت‌اند از: سرعت دورانی، فشار اصطکاکی، زمان اصطکاکی، 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 جوش کاری نسبت به زمان را در فرآیند جوش کاری اصطکاکی درایو مستقیم نشان می‌دهد. در جوش کاری اصطکاکی اینرسی انرژی حاصل از دوران اسپیندل به فلاپویل منتقل می‌شود. با رسیدن میزان چرخش به مقدار مورد نظر فشار محوری به قطعات اعمال می‌گردد. سرعت دوران با افزایش فشار محوری به تدریج کم شده و فرآیند با توقف فلاپویل خاتمه می‌پذیرد. در این روش چرخش قطعه با تخلیه انرژی فلاپویل در اثر اعمال فشار و اصطکاک متوقف می‌گردد [4].

تغییر شکل شدید در نرخ کرنش‌های بالا و همچنین افزایش سریع دمای سطح اتصال امکان مطالعه تجربی این فرآیند 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 فرآیند روش حل المان محدود به طور فزاینده‌ای به کار گرفته شده است. یکی از اولین مطالعات انجام شده در زمینه تحلیل المان محدود فرآیند 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 کاری فولاد 20G را با تقریب خوبی پیش‌بینی کند.

موال و ماسونی [6] نیز مدلی حرارتی- مکانیکی برای حل المان محدود فرآیند جوش کاری اصطکاکی سوپرآلیاژ پایه نیکل ارائه کردند. در این تحقیق ضریب اصطکاک وابسته به سرعت و فشار محوری تعریف شد. به دلیل این‌که در مدل آن‌ها دمای سطح مشترک تا دمای ذوب بالا می‌رفت، میزان کوتاه‌شدگی پیش‌بینی‌شده در شبیه‌سازی بیشتر از آزمایش‌های تجربی بود. در ادامه دی‌الویز و همکاران [7] فرآیند جوش کاری اصطکاکی اینرسی را برای دو قطعه ناهم‌جنس با استفاده از روابط اصطکاکی موآل و ماسونی در نرم‌افزار فورج 3² مدل‌سازی کردند. تفاوت میزان دمای اندازه‌گیری شده در آزمایش تجربی و مدل‌سازی آن‌ها حدود 6% بود.

¹ Direct Drive Friction Welding

² Inertia Friction Welding

³ Forge 2

⁴ Deform 8.2

یافت نشد. به همین منظور در این پژوهش اتصال لوله‌های فولادی از جنس ASTM A106-B و AISI 4140 مورد بررسی قرار گرفته است. قطعات جوش کاری شده به دلیل ایجاد فلش در فرآیند جوش کاری اصطکاکی معمولاً کوتاه‌تر از حالت اولیه خود هستند. از این‌رو انتخاب طول قطعه اولیه برای دستیابی به محصولی با ابعاد مناسب و از پیش تعیین شده بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر نیز برای تخمین میزان کوتاه‌شدگی قطعات و تأثیر پارامترهای فرآیند بر این امر و همچنین بررسی دمای سطح اتصال در حین جوش کاری، مدل المان محدود فرآیند در نرم‌افزار آباکوس نسخه 6.14 ایجاد 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 پارامترهای فرآیند جوش کاری اصطکاکی دورانی بر میزان کوتاه‌شدگی قطعات و دمای سطح اتصال مورد بررسی قرار گرفت.

2- شبیه‌سازی المان محدود

دمای سطح اتصال در فرآیند 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 یا خواص موادی وابسته به دما رابطه (1) به عنوان معادله انتقال حرارت در جسم بیان می‌شود [14].

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

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 فرآیند است. \dot{S} نرخ تولید حرارت به دلیل تغییر شکل پلاستیکی 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 می‌شود [14].

$$\dot{S} = \alpha \sigma_e \dot{\epsilon} \quad (2)$$

در این رابطه σ_e تنش مؤثر، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش مؤثر و α ضریب مؤثر تغییر شکل پلاستیک که در این مسأله برابر 0.9 در نظر گرفته شده است.

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

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

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 τ باشد که این تنش بحرانی نیز توسط رابطه (4) با فشار در ارتباط است [14].

$$\tau = \mu p \quad (4)$$

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

$$q_g = \eta \tau \dot{s} = \eta \tau \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (5)$$

که در آن τ تنش اصطکاکی، Δs میزان لغزش لحظه‌ای و Δt مدت‌زمان لحظه‌ای است. همچنین تنش اصطکاکی نیز وابسته به فشار p ، 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 فرآیند 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 0.05%) و قابل صرف‌نظر کردن است. همچنین به منظور کاهش هزینه محاسبات، اندازه المان‌ها در فاصله 20 میلی‌متری 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 فرآیند سبب کاهش دقت و یا حتی توقف تحلیل می‌شود. بدین منظور در این پژوهش مدل المان محدود فرآیند جوش کاری 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.

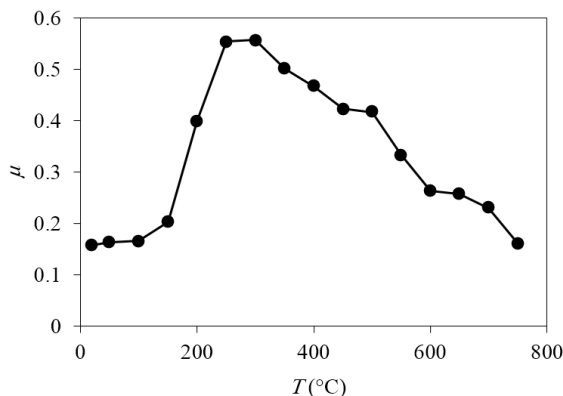


Figure 2 Friction coefficient at different temperatures [15]

شکل 2 مقادیر ضریب اصطکاک وابسته به دما [15]

¹ Abaqus CAE 6.14

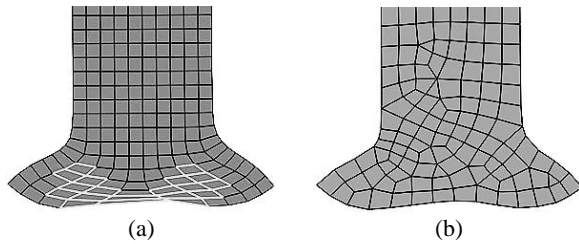


Fig. 6 Remeshing of the model a- distorted elements (white borders), b- new elements

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 پلاستیک مواد از 25 تا 1400 درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش 0.001 تا 1000 بر ثانیه با استفاده از نرم‌افزار جی‌مت‌پرو³ به دست آمد. شکل 7 رفتار پلاستیک فولادهای ASTM A106-B و AISI 4140 در نرخ کرنش 0.001 بر ثانیه و در دماهای بین 25 تا 1400 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. سایر خصوصیات وابسته به دما نیز توسط این نرم‌افزار تخمین زده شد که در شکل 8 آمده است.

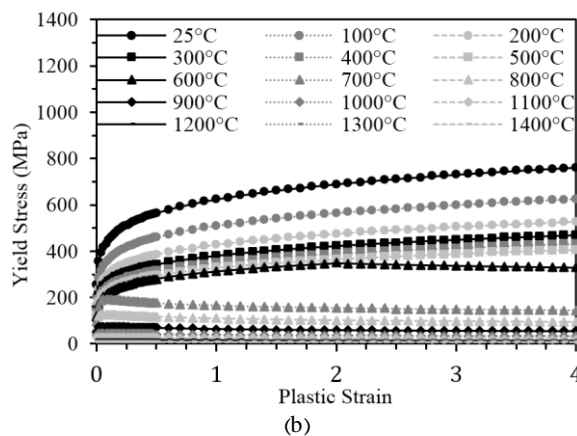
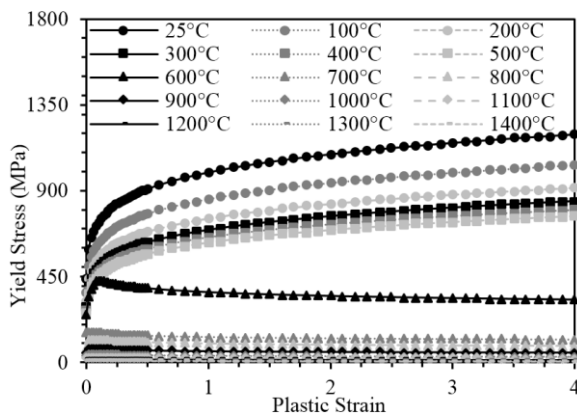


Fig. 7 Plastic behavior of a- AISI 4140, b- ASTM A106-B at different temperatures with strain rate of 0.001 s^{-1} from JMatPro 7

شکل 7 رفتار پلاستیک الف- فولاد AISI 4140، ب- ASTM A106-B در دماهای مختلف و نرخ کرنش 0.001 بر ثانیه مستخرج از جی‌مت‌پرو³

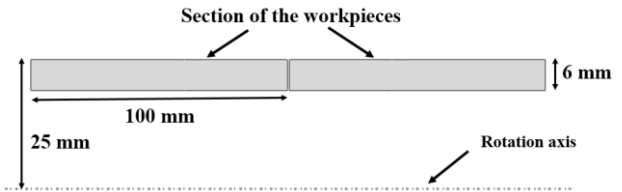


Fig. 3 Dimensions of the 2D axisymmetric model

شکل 3 ابعاد مدل دوبعدی تقارن محوری

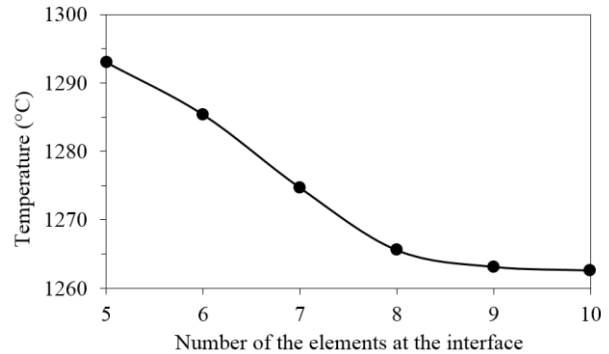


Fig. 4 Mesh sensitivity versus maximum temperature of the interface

شکل 4 نمودار حساسیت مش برحسب ماکزیمم دمای سطح مشترک جوش

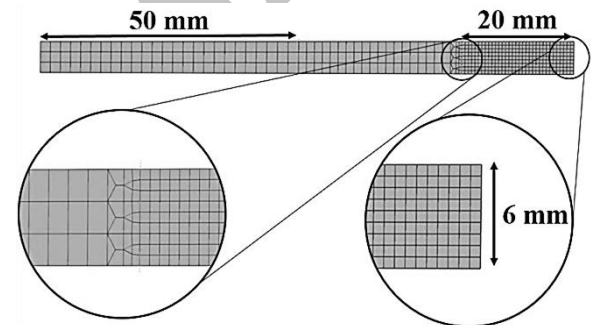


Fig. 5 Meshed model in FEM

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 ادامه می‌یابد. در غیر این صورت مدل تغییر شکل یافته در گام زمانی بعدی دوباره فراخوانی شده و مش‌بندی مجدد می‌شود، همچنین نتایج آخرین جزء تحلیل پیشین به مدل جدید منتقل می‌گردد. به همین صورت شبیه‌سازی تا اتمام زمان فرایند ادامه می‌یابد. به منظور پیاده‌سازی این روند اسکریپتی¹ با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون² 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

¹ Script
² Python

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

با توجه به نقش میزان کوتاه‌شدگی قطعات بعد از جوش کاری در تخمین مقدار ماده مورد نیاز، حجم ماشین‌کاری لازم جهت از بین بردن فلش‌ها و همچنین طول نمونه بعد از جوش کاری، نیاز است تا مدلی جهت تخمین دقیق این پارامتر و تعیین تأثیر پارامترهای فرآیند در جوش کاری اصطکاکی دورانی توسعه داده شود. بدین منظور طراحی آزمایشی به صورت طرح عاملی کسری¹ 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 در مجموع 27 تحلیل المان محدود صورت گرفت. جهت صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی المان محدود، 3 آزمایش تجربی براساس پارامترهای آزمایش‌هایی که سطوح تمامی پارامترها در آن‌ها 0، 1 و 1 بودند انجام گرفت، سپس میزان کوتاه‌شدگی محوری و ابعاد فلش‌های ایجادشده 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 اولیه 90 مگاپاسکال، زمان اصطکاکی 8 ثانیه، فشار آهنگری 140 مگاپاسکال و زمان آهنگری 6 ثانیه) بود، اندازه‌گیری شد.

آزمایش‌های تجربی توسط دستگاه جوش کاری اصطکاکی دورانی مدل BS-30 ساخت شرکت آدین صنعت فراسو انجام شد. شکل 10 چیدمان

اندازه‌گیری دما در حین جوش کاری نیز توسط ترموکوپل نوع K صورت گرفت. به منظور ثبت نتایج دمایی نیز از کنترلر دما مدل TK4 ساخت

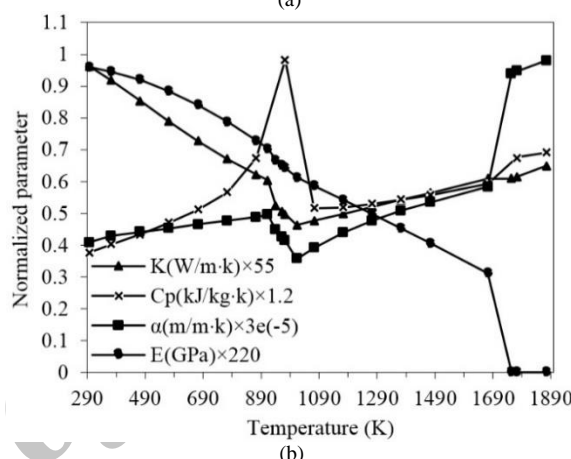
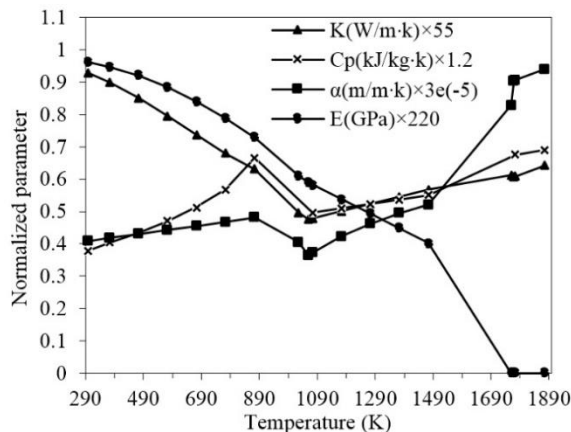


Fig. 8 material properties of a- ASTM A106, b- AISI 4140

شکل 8 خصوصیات موادی الف- فولاد ASTM A106، ب- AISI 4140

2-2- شرایط مرزی

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 دوار کویل 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 سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

3- مواد، تجهیزات و روش انجام آزمایش

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

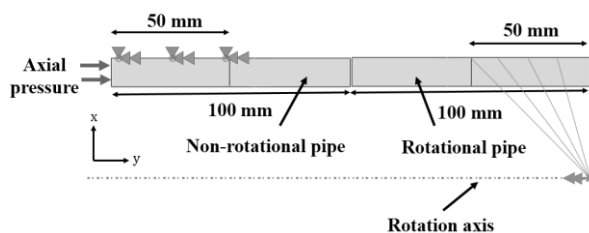


Fig. 9 Boundary condition of the model

شکل 9 شرایط مرزی مدل

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولادهای AISI 4140 و ASTM A106-B

عنصر	درصد وزنی (%)	
	ASTM A106-B	AISI 4140
کربن	0.289	0.412
سیلیسیم	0.224	0.248
منگنز	1.021	0.874
کروم	0.032	1.087
مولیبدن	0.128	0.236
نیکل	0.032	0.196
مس	0.031	0.279
آهن	پایه	پایه

جدول 2 پارامترهای فرآیند و سطوح تغییرات

پارامتر فرآیند	سطح		
	1	0	-1
سرعت دورانی (rpm) (n)	1000	750	500
فشار اصطکاکی (MPa) (P_1)	100	90	80
زمان اصطکاکی (s) (t_1)	10	8	6
فشار آهنگری (MPa) (P_2)	160	140	120
زمان آهنگری (s) (t_2)	8	6	4

¹ Fractional Factorial Design

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

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

شماره	N (rpm)	P_1 (MPa)	t_1 (s)	P_2 (MPa)	t_2 (s)	کوتاه‌شدگی محوری (mm)
1	500	80	6	120	8	1.7
2	1000	80	6	120	4	5.2
3	500	100	6	120	4	5.1
4	1000	100	6	120	8	10.2
5	500	80	10	120	4	5.2
6	1000	80	10	120	8	9.5
7	500	100	10	120	8	13.6
8	1000	100	10	120	4	16.4
9	500	80	6	160	4	4.6
10	1000	80	6	160	8	10.2
11	500	100	6	160	8	9.6
12	1000	100	6	160	4	12.5
13	500	80	10	160	8	5.2
14	1000	80	10	160	4	11.7
15	500	100	10	160	4	16.6
16	1000	100	10	160	8	22.3
17	500	90	8	140	6	7.9
18	1000	90	8	140	6	12.9
19	750	80	8	140	6	8.5
20	750	100	8	140	6	13.6
21	750	90	6	140	6	5.5
22	750	90	10	140	6	15.1
23	750	90	8	120	6	9.2
24	750	90	8	160	6	13.0
25	750	90	8	140	4	11.0
26	750	90	8	140	8	14.9
27	750	90	8	140	6	10.9

1-4- نتایج شبیه‌سازی

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 26.4% 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 می‌گردد. با توجه به رابطه (5) با افزایش سرعت دورانی نرخ تولید حرارت بیشتر شده (افزایش $\Delta S/\Delta t$) و در نتیجه مقدار ماده خمیری ایجاد شده افزایش می‌یابد. همین امر سبب کوتاه‌شدگی بیشتر در قطعات می‌شود.

شرکت اتونیکس¹ استفاده شد و نتایج توسط نرم‌افزار داکيومستر² ذخیره گردید. شکل 11 محل نصب ترموکوپل و نحوه اندازه‌گیری دما را در آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد.

4- نتایج و بحث

در مجموع 27 شبیه‌سازی با پارامترهای مختلف صورت گرفت که نتایج حاصل از آن‌ها در جدول 3 آمده است. در ادامه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی المان محدود و آزمایش‌های تجربی آمده است.

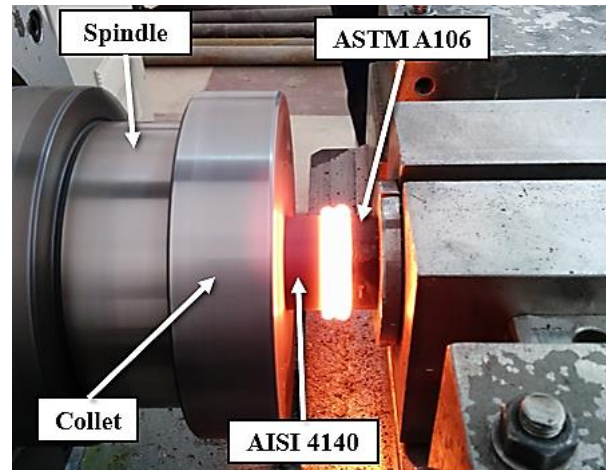


Fig. 10 Experimental setup of rotary friction welding

شکل 10 چیدمان آزمایش تجربی جوش کاری اصطکاکی دورانی

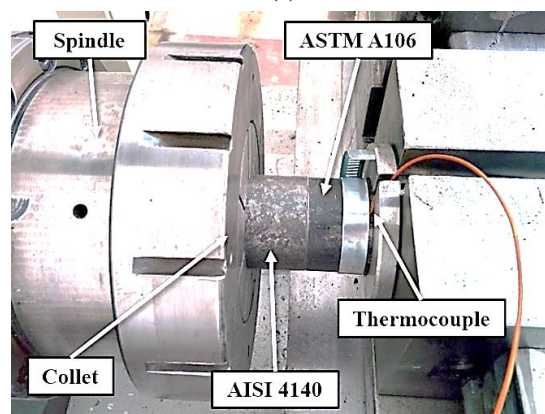
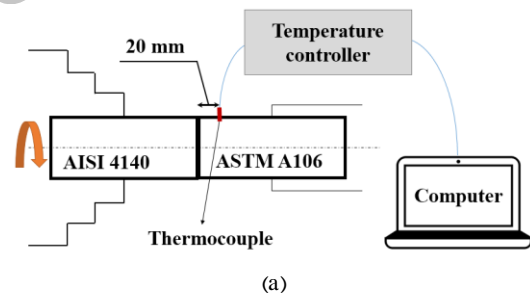


Fig. 11 a- A schematic of measuring the temperature, b- placement of the thermocouple

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

¹ Autonics

² DAQMaster

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.

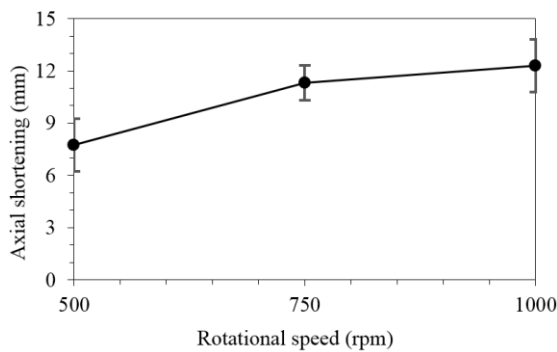


Fig. 12 Axial shortening changes with the rotational speed

شکل 12 تغییرات میزان کوتاه‌شدگی محوری در سرعت‌های دورانی مختلف

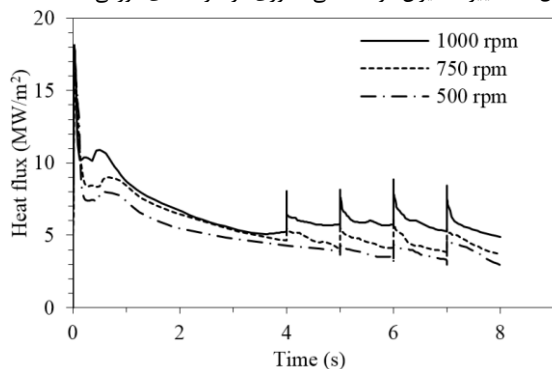


Fig. 13 Heat flux at the interface at different rotational speeds

شکل 13 شار حرارتی ایجاد شده در سطوح مشترک در سرعت‌های دورانی مختلف

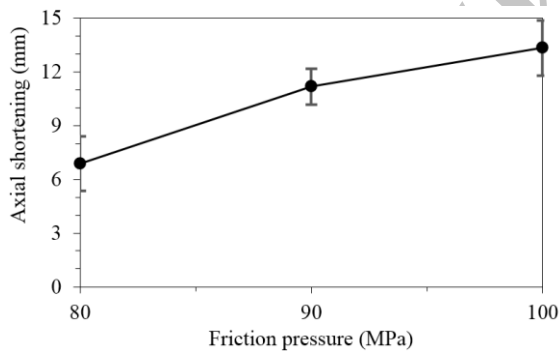


Fig. 14 Axial shortening changes with the friction pressure

شکل 14 تغییرات میزان کوتاه‌شدگی محوری در فشارهای اصطکاکی مختلف

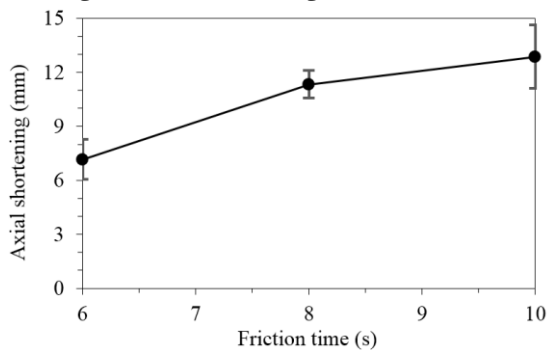


Fig. 15 Axial shortening changes with the friction time

شکل 15 تغییرات میزان کوتاه‌شدگی محوری در زمان‌های اصطکاکی مختلف

جدول 4 آنالیز واریانس مدل کوتاه‌شدگی محوری

Table 4 ANOVA of the axial shortening model

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

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 شکل یافته به گره‌های جدید و درون‌یابی این نتایج، این پرش‌ها ایجاد می‌شوند که با ادامه حل مسئله این پرش‌ها در کم‌تر از 0.1 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 در پی داشت. بیشتر شدن فشار اصطکاکی نیز باعث افزایش تنش اصطکاکی (رابطه 4) و در نهایت افزایش شار حرارتی ایجادشده در سطوح برخورد می‌شود.

شکل 16 نمودار تنش اصطکاکی در سطوح مشترک را نشان می‌دهد. 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 می‌شود با افزایش فشار اصطکاکی، شار حرارتی ایجادشده نیز افزایش می‌یابد. همچنین با بیشتر شدن فشار اصطکاکی، ماده خمیری بیشتری به صورت فلش به بیرون خارج می‌شود. افزایش زمان اصطکاکی نیز مدت‌زمان تولید گرما را افزایش داده و همین امر سبب افزایش حجم ماده خمیری شده که کوتاه‌شدگی بیشتری را در پی دارد.

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

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 می‌دهد. با توجه به این نمودار، دما در مدت‌زمانی بسیار کوتاه (حدود 2 ثانیه) به حدود 1250 درجه سانتی‌گراد می‌رسد و پس از آن متعادل می‌شود. پرش‌های موجود روی این نمودار ناشی از انتقال نتایج تحلیل پیشین به تحلیل جدید هستند. به عبارت دیگر در انتقال دمای گره‌های مدل تغییر شکل یافته به گره‌های مدل جدید و درون‌یابی این نتایج، این پرش‌ها ایجاد می‌شود که با ادامه حل مسأله دمای سطح مشترک فوراً (کمتر از 0.05 ثانیه) به حالت تعادلی برمی‌گردد. شکل 21 نیز توزیع دمایی محل اتصال این نمونه در پایان مرحله ایجاد حرارت (ثانیه 8) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که حداکثر دمای قطعات در محل برخورد و به میزان 1278 درجه سانتی‌گراد به دست آمده است.

2-4- صحنه‌گذاری شبیه‌سازی

به منظور صحنه‌گذاری 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 سانتی‌گراد به دست آمد. این اختلاف دما پس از رسیدن به حالت تعادل بسیار اندک و نزدیک به 7 درجه سانتی‌گراد است.

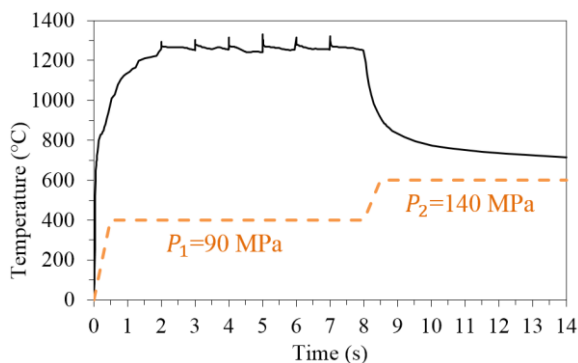


Figure 20 Interface temperature during the welding of the sample No. 27

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

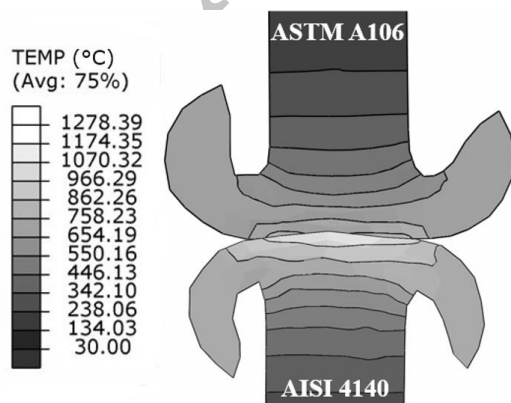


Fig. 21 Distribution of the temperature in sample No. 27

شکل 21 توزیع دما در محل اتصال نمونه شماره 27

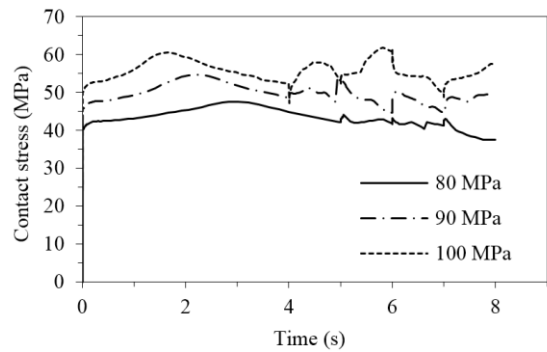


Fig. 16 Frictional stress at the interface at different friction pressures

شکل 16 تنش اصطکاکی در سطوح مشترک در فشارهای اصطکاکی مختلف

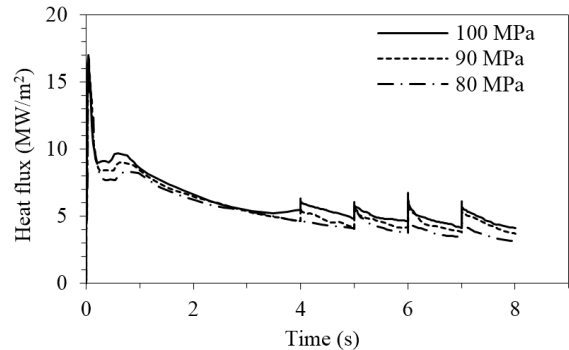


Fig. 17 Heat flux at the interface at different friction pressures

شکل 17 شار حرارتی ایجاد شده در سطوح مشترک در فشارهای اصطکاکی مختلف

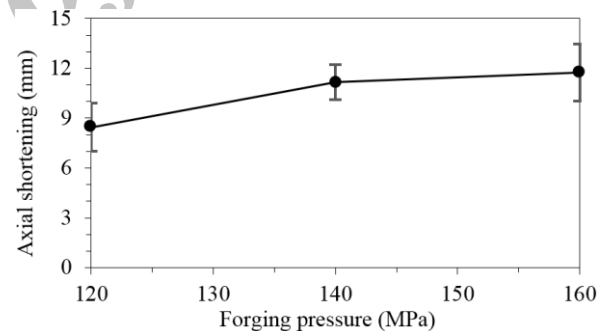


Fig. 18 Axial shortening changes with the forging pressure

شکل 18 تغییرات میزان کوتاه‌شدگی محوری در فشارهای آهنگری مختلف

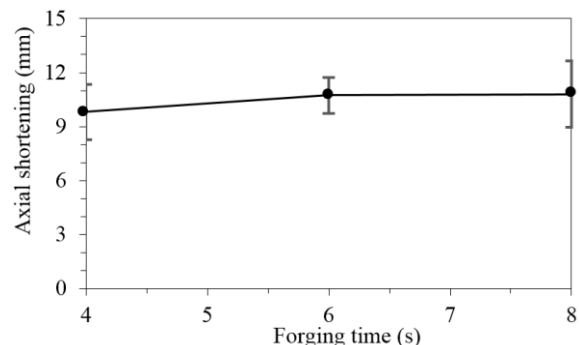


Fig. 19 Axial shortening changes with the forging time

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

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 جوش کاری شده با سطوح پارامتری 0 و 1 نیز به ترتیب 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.

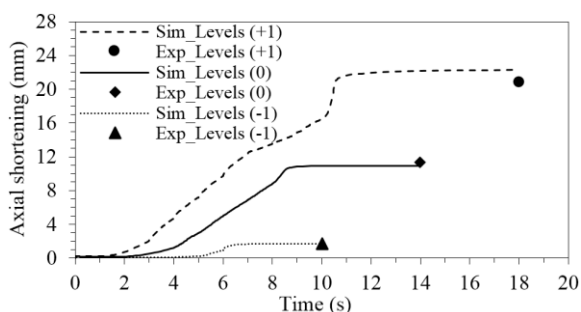


Fig. 23 Experimental and simulation results of the axial shortening of the workpieces after welding process
شکل 23 نتایج تجربی و شبیه‌سازی میزان کوتاه‌شدگی محوری قطعات پس از فرایند جوش کاری

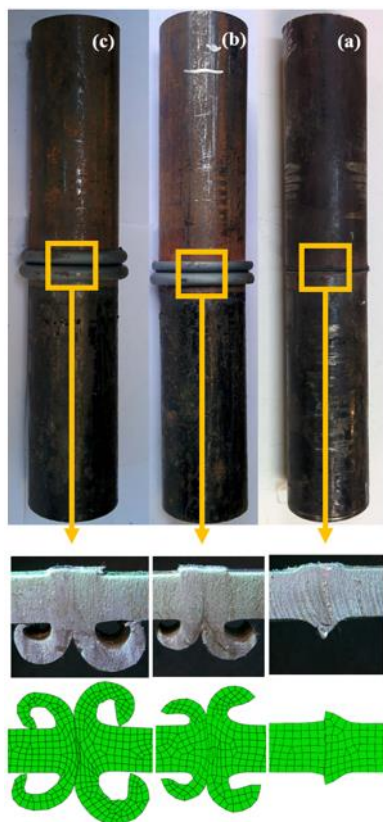


Fig. 24 A comparison of the experimental and simulation results of the deformed flashes of the samples with the parameter levels of a- -1, b- 0 and c- +1

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

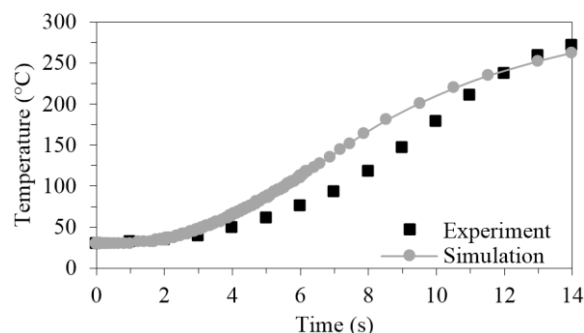


Fig. 22 Comparison of the measured and simulated temperature from 20 mm of the welding surfaces

شکل 22 دمای اندازه‌گیری شده به صورت تجربی و شبیه‌سازی در 20 میلی‌متری 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 اندازه‌گیری 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 تولید شده و دمای نهایی حین فرایند تأثیرگذار هستند. شکل 23 نمودار میزان کوتاه‌شدگی محوری قطعات پس از فرایند جوش کاری را در آزمایش‌های تجربی و در شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

مقایسه‌ای از شکل فلش‌های به دست آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی در شکل 24 نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود اندازه فلش‌های داخلی بیشتر از فلش‌های ایجاد شده در سطح خارجی لوله‌ها هستند. دلیل این امر را می‌توان 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 می‌گردد به طوری که فشار در سمت داخلی لوله (موضعی که انحراف کم‌تری دارد) بالاتر است؛ بنابراین این فشار محوری بالاتر سبب تشکیل فلش‌های بزرگ‌تری در مقایسه با فلش‌های ایجاد شده در سطح خارجی می‌گردد [12].

ملاحظه می‌شود که شکل و اندازه فلش‌ها به دلیل غیرهم‌جنس بودن قطعات با یکدیگر متمایز بوده و فولاد با استحکام کششی پایین‌تر (ASTM A106-B)، فلش‌های بزرگ‌تری نسبت به فولاد دیگر (AISI 4140) دارد. تغییر شکل المان‌ها و برگشت فلش‌ها به سمت خارج از محدوده خط جوش در شبیه‌سازی فرایند به خوبی در این شکل دیده می‌شود. جدول 5 نتایج تجربی و شبیه‌سازی میزان کوتاه‌شدگی و همچنین اندازه فلش‌های حاصل از جوش کاری را نشان می‌دهد. با بررسی میزان کوتاه‌شدگی در نتایج شبیه‌سازی و تجربی، مقدار خطای شبیه‌سازی برابر 5.6% به دست آمد که نشان از تطابق خوب مدل شبیه‌سازی 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 واژجت 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.

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

1- استفاده از تکنیک مش‌ریزی مجدد در شبیه‌سازی فرایند جوش کاری اصطکاکی از شکل‌گیری المان‌های با کیفیت کم جلوگیری کرده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری جهت شبیه‌سازی مناسب‌تر 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

- [1] 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. Słuzalec, 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 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. Rowson, 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 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.

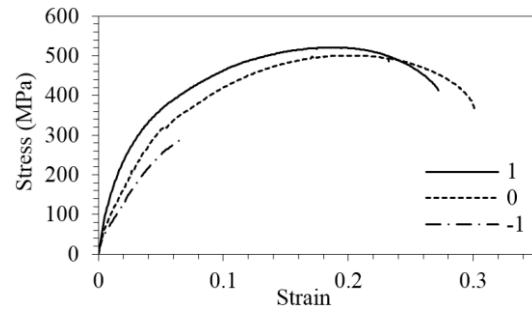


Fig. 25 Stress-strain diagram of the validation welded samples

شکل 25 نمودار تنش-کرنش نمونه‌های اعتبارسنجی جوش کاری شده

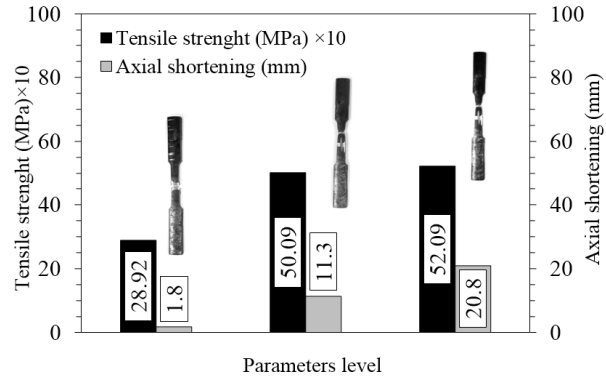


Fig. 26 Tensile strength and axial shortening of the welded samples

شکل 26 مقاومت کششی و میزان کوتاه‌شدگی نمونه‌های جوش کاری شده

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

Table 5 Experimental and simulation results of the axial shortening and size of the flashes after welding

سطوح پارامترها	نوع تحلیل	میزان کوتاه‌شدگی	طول فلش		عرض فلش	
			ASTM A106-B	AISI 4140	ASTM A106-B	AISI 4140
شبیه‌سازی	خطا (%)	1.7	3.9	2.5	2.0	0.4
			3.9	3.0	2.1	0.5
			0.2	16.7	3.3	10.7
تجربی	خطا (%)	11.3	7.1	6.3	5.2	3.7
			7.5	6.2	5.6	4.1
			5.2	1.3	6.8	9.5
شبیه‌سازی	خطا (%)	3.1	10.4	8.9	7.9	5.0
			9.6	6.8	7.7	5.4
			8.3	30.6	2.6	6.5

5- نتیجه‌گیری

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