



تأثیر خواص فیزیکی وابسته به دما در مدل‌سازی اجزای محدود جوشکاری لیزری آلیاژ تیتانیوم

فرید وکیلی تهامی^{1*}، حامد حلیمی خسروشاهی²، ابراهیم صفری³

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دکتری تخصصی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- دانشیار، فیزیک لیزر، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 51666-16471، f_vakili@tabrizu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش تأثیر استفاده از خواص حرارتی متغیر و همچنین ثابت نسبت به تغییرات دما، در دقت شبیه‌سازی عددی جوشکاری لیزری آلیاژ تیتانیوم Ti60، مورد مطالعه قرار گرفته است. یک مدل المان محدود از قطعه ورق آلیاژ Ti60 به ضخامت سه میلی‌متر ساخته شده و با استفاده از منبع حرارتی سه بعدی متحرک، تحت تأثیر پرتو لیزر قرار گرفته است. به منظور تأیید صحت مدل‌سازی المان محدود، نتایج حاصل با نتایج داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و همچنین تأثیر تعداد المان‌های مدل اجزای محدود نیز بر روی نتایج، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود نشان دادند که انجماد از ناحیه زیرین قطعه ورق شروع می‌شود و به طرف بالای ورق و در راستای درز جوش، پیشروی می‌کند. همچنین، در حالت استفاده از خواص چگالی، ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت متغیر با درجه حرارت، بهترین نتایج به دست می‌آید. استفاده از چگالی ثابت موجب کاهش کمی در مقادیر حداکثر درجه حرارت و ابعاد حوضچه جوش و استفاده از ظرفیت حرارتی ثابت موجب افزایش این مقادیر می‌شود ولی این تغییرات در حدی هستند (زیر 2%)، که می‌توان از چگالی و ظرفیت حرارتی ثابت در مدل‌سازی کل فرآیند جوشکاری لیزری، استفاده کرد. ولی استفاده از ضریب هدایت حرارتی ثابت خطای زیادی در مقادیر حداکثر درجه حرارت (حدود دو برابر در مقدار این پارامتر) و ابعاد حوضچه مذاب ایجاد می‌کند و نمی‌توان مقدار این پارامتر را در شبیه‌سازی جوشکاری لیزری، ثابت فرض کرد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 21 شهریور 1400
داوری اولیه: 31 شهریور 1400
پذیرش: 14 آذر 1400

کلیدواژه‌ها:

جوشکاری لیزری
اجزای محدود
حوضچه مذاب
آلیاژ تیتانیوم Ti60

Effect of temperature-dependent physical properties on finite element modeling of laser welding of titanium alloy

Farid Vakili Tahami^{1*}, Hamed Halimi Khosroshahi¹, Ebrahim Safari²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Department of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

* P.O.B. 51666-16471, Tabriz, Iran, f_vakili@tabrizu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 12 September 2021
First Decision: 22 September 2021
Accepted: 24 November 2021

Keywords:

Laser Welding
Finite Elements Method
Melt Pool
Ti60 Titanium Alloy

Abstract

This study investigates the effect of using temperature-dependent and constant thermophysical properties on the precision of numerical simulation in the laser welding of titanium Ti60 alloy. A finite element model is made for 3 mm thick Ti60 alloy sheet piece and is affected by the laser beam using a three-dimensional moving heat source. For verification of the finite element model, the numerical results are compared with the results of experimental data. Also, the influence of the number of elements on the results is investigated. The results of the finite element modelling showed that the solidification starts from the bottom of the melt pool and progresses to the top of the sheet and along the weld seam. Also, the best results are obtained with all the thermophysical properties of density, thermal capacity and conductivity were temperature-dependent. The use of constant density reduces the maximum values of the temperature and dimensions of the weld pool, and the use of constant heat capacity increases these values. Still, these changes are such that (less than 2%), constant density and thermal capacity can be used to model the whole laser welding process. However, the use of constant thermal conductivity causes a large error in the maximum values of the temperature (about twice the value of this parameter), and the dimensions of the melt pool, and this parameter cannot be assumed constant in the simulation of laser welding.

1- مقدمه

نیروگاه‌ها و حمل و نقل به کار می‌روند [1-3]. این آلیاژها به خصوص در ساخت سازه‌های صنایع هوافضا مورد استفاده وسیعی قرار می‌گیرند [4]. در هواپیماهای مدرن حدود 30 تا 50 درصد کل وزن سازه، از آلیاژهای پایه تیتانیوم تشکیل

آلیاژهای تیتانیوم به دلیل چگالی پایین، مقاومت بالا در مقابل خوردگی، استحکام و چقرمگی بالا و همچنین مقاومت در مقابل دماهای بالا به شکل گسترده‌ای در صنایع پزشکی، هوافضا،

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

F. Vakili Tahami, H. Halimi Khosroshahi, E. Safari, Effect of temperature-dependent physical properties on finite element modeling of laser welding of titanium alloy, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 10, pp. 16-27, 2022 (in Persian)

می‌شود [5، 6]. با توجه به اینکه این قطعات و مجموعه‌ها معمولاً به عنوان تحمل کننده‌های اصلی نیروهای وارده مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای الزامات مکانیکی و متالورژیکی سخت‌گیرانه‌ای هستند [7]. این الزامات باعث شده است که تا حد امکان از روش‌های پیشرفته اتصال قطعات که صدمه کمتری به ساختار ماده وارد می‌کنند استفاده شود.

یکی از روش‌های جوشکاری پیشرفته و کارآمد که برای اتصال دائمی آلیاژهای تیتانیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد جوشکاری لیزری است [8] که به خصوص در سه دهه اخیر، رشد بالایی داشته است [9]. پرتو لیزر به دلیل ماهیت متمرکز، پراثری و دقیق خود می‌تواند درز جوش‌های با کیفیت، مستحکم و با کمترین صدمه به ساختار آلیاژ پایه تولید کند [10]. پارامترهای مختلفی در جوشکاری لیزری دارای اهمیت هستند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به توان جوشکاری، سرعت جوشکاری و قطر پرتو لیزر، اشاره کرد. به منظور دستیابی به بهترین اتصال، بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر جوشکاری ضروری می‌باشد. به طور مثال یونگ¹ و همکارانش، با انجام آزمایش‌های تجربی، تأثیر میزان حرارت ورودی بر استحکام اتصال لیزری آلیاژ Ti6Al4V را مورد مطالعه قرار دادند [11]. با توجه به پرهزینه و زمان‌بر بودن انجام آزمایش‌های تجربی، می‌توان از روش‌های مدل‌سازی عددی به منظور دستیابی به حدود مناسب این پارامترها، استفاده کرد. علاوه بر این، انجام بررسی‌های تجربی با محدودیت‌های خاص خود نیز همراه است که به طور مثال می‌توان به دشواری اندازه‌گیری درجه حرارت بسیار بالای ناحیه مرکزی تحت تأثیر پرتو، در حین جوشکاری لیزری اشاره کرد. حداکثر درجه حرارت این ناحیه در میزان تنش‌های پسماند به وجود آمده مؤثر است و به همین دلیل دستیابی به مقدار آن دارای اهمیت کاربردی می‌باشد [12]. با توجه به اینکه در حین جوشکاری، مواد سازنده اتصال تا دماهای بسیار بالایی گرم می‌شوند، مدل‌سازی حرارتی ماده مورد استفاده، یکی از مهم‌ترین موارد در شبیه‌سازی اجزاء محدود² جوشکاری لیزری می‌باشد [13]. علاوه بر این، با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی عددی می‌توان موارد مانند تنش‌های پسماند را هم مورد بررسی و مطالعه، قرار داد [14].

در سال 1980، مازومدر³ و استین⁴، با استفاده از روش تفاضل محدود، یک مدل سه بعدی بر پایه توزیع گوسی⁵ انرژی،

برای شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری لیزری ارائه کردند [15]. در سال 1996، همودی⁶ و دوچارمه⁷ [16]، یک مدل جوشکاری حالت پایا بر اساس منابع خطی و نقطه‌ای ساختند و نورمن⁸ و همکارانش [17] با استفاده از این مدل، حوزه‌های درجه حرارت و گرادین آن‌ها را در آلیاژ آلومینیوم 2090 محاسبه کردند. با استفاده از این نتایج، آن‌ها نرخ خنک شوندگی در راستای درز جوش را به دست آوردند. لیتل⁹ و کامتکار¹⁰ از روش اجزاء محدود برای مدل‌سازی جوشکاری فولاد کربنی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که حوزه‌های درجه حرارت در نزدیکی ناحیه جوش به شدت به تغییرات ضریب هدایت حرارتی نسبت به دما، وابسته هستند [18]. بهاتی¹¹ و همکارانش جوشکاری¹² GMAW فولادهای S355 و S690 را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند توزیع درجه حرارت در آنالیز گذرا به ظرفیت گرمایی وابسته است و می‌توان در حین شبیه‌سازی، ضریب هدایت حرارتی و چگالی را ثابت فرض کرد [19]. با این وجود، بنور¹³ و همکارانش به این نتیجه رسیدند که برای جوشکاری لیزری آلیاژ منیزیم Z91، وابستگی دمایی ضریب هدایت حرارتی بر روی مدل‌سازی حوزه‌های درجه حرارت، تأثیر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد [20]. تسریکاس¹⁴ و همکارانش با استفاده از روش اجزاء محدود، جوشکاری لیزری فولاد AH36 که در ساخت کشتی کاربرد دارد را مطالعه کردند [21]. لیو¹⁵ و همکارانش، از منبع حرارتی با توزیع گوسی بر روی مخروط ناقص به منظور شبیه‌سازی حوزه‌های درجه حرارت و تنش‌های پسماند استفاده کردند [22]. در سال 2018، درخشان و همکارانش [23]، چهار روش مختلف جوشکاری¹⁶ ALW،¹⁷ CWLAW،¹⁸ HLAW و¹⁹ SAW را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها پیشنهاد کردند مدل‌های مناسب برای شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف به این صورت هستند؛ برای جوشکاری گوس (SAW) مدل دوبیضوی، برای دو روش لیزری (ALW و CWLAW) مدل مخروطی و برای جوشکاری هیبرید لیزر-گوس (HLAW) مدل ترکیبی دوبیضوی-مخروطی. کومار²⁰

⁶ Hamoudi⁷ Ducharme⁸ Norman⁹ Little¹⁰ Kamtekar¹¹ Bhatti¹² Gas Metal Arc Welding¹³ Bannour¹⁴ Tsirkas¹⁵ Liu¹⁶ Autogenous Laser Welding (ALW)¹⁷ Cold Wire Assisted Laser Welding (CWLAW)¹⁸ Hybrid Laser-Arc Welding (HLAW)¹⁹ Submerged Arc Welding (SAW)²⁰ Kumar¹ Yung² Finite Element³ Mazumder⁴ Steen⁵ Gaussian

جدول 1 خواص فیزیکی آلیاژ Ti60 [26]

مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	نقطه ذوب (K)
109	1194	1983

جدول 2 ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti60 (درصد وزنی) [27]

Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Nb	Ta	Si	C
بالانس	5/8	4	3/5	0/4	0/4	1/0	0/4	0/06

2- مدل سازی عددی

2-1- هندسه جوشکاری

تحلیل فرآیند جوشکاری لیزری در هندسه لب به لب² انجام گرفته است. هندسه جوش مورد استفاده، در شکل 1 نشان داده شده است، همان طور که دیده می شود، دو قطعه ورق آلیاژ تیتانیوم Ti60 به صورت لب به لب در کنار یکدیگر قرار گرفته و پرتو لیزر با تقارن کامل بر لبه تماس دو ورق اعمال شده است. هر قطعه ورق دارای طول 30 میلی متر، عرض 10 میلی متر و ضخامت سه میلی متر می باشد.

نقطه ای به فاصله یک میلی متر از لبه شروع جوشکاری، روی خط درز جوش و در سطح بالایی ورق به عنوان نقطه بررسی تغییرات درجه حرارت در نظر گرفته شده که این نقطه P در شکل 1 نشان داده شده است.

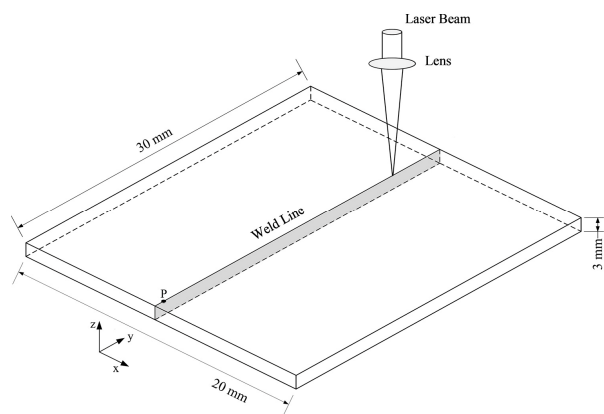


Fig. 1 Butt-welding geometry

شکل 1 هندسه جوشکاری لب به لب

هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر استفاده از خواص وابسته به دما و همچنین ساده سازی شده، بر حوزه های درجه حرارت و ناحیه مذاب حاصل می باشد که این فرآیند با مدل سازی عددی به روش اجزای محدود انجام گرفته است. با توجه به اینکه پرتو

همکارانش [24]، تأثیر حرارت ورودی بر پروفیل درز جوش را در جوشکاری لیزر پالسی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V و با استفاده از آزمایش های تجربی و مدل سازی عددی، مورد مطالعه قرار دادند. و¹ و همکارانش [25]، با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود Ansys، موقعیت پرتو لیزر بر شکل گیری سوراخ راهنما را در جوشکاری لیزری آلیاژ تیتانیوم TC4 بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از مدل سازی عددی می توان درک دقیق تری از فرآیند جوشکاری لیزری به دست آورد و پارامترهای مؤثر را بهینه سازی کرد.

امکان استفاده از خواص فیزیکی ثابت نسبت به دما را می توان با مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج مرجع، مورد بررسی قرار داد. نتایج مرجع را هم می توان با اندازه گیری تجربی و یا از مدل سازی با خواص فیزیکی متغیر نسبت به دما، به دست آورد [19]. دقت مدل سازی ساده شده برای مواد مختلف و فرآیندهای مختلف جوشکاری متفاوت است و به میزان تغییرات پارامتر ساده سازی شده در بازه دمای محیط تا دمای تبخیر، وابسته است.

با وجود اینکه جوشکاری لیزری تیتانیوم و آلیاژهای آن در مطالعات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است، این مطالعات بیشتر بر روی جنبه های متالورژیکی اتصال، تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل سرعت و جوشکاری بر حوزه های درجه حرارت متمرکز بوده اند و مطالعات بسیار کمی بر روی رابطه بین خواص ماده مدل سازی شده و حوزه های درجه حرارت گذرا انجام گرفته است. نوآوری مطالعه حاضر بررسی تأثیر خواص ثابت یا وابسته به دمای آلیاژ تیتانیوم Ti60، بر نتایج حاصل از مدل سازی اجزاء محدود حوزه های درجه حرارت گذرا، می باشد که در مطالعات پیشین مورد بررسی قرار نگرفته است. برای اولین بار در این پژوهش، تأثیر ساده سازی تغییرات خواص چگالی جرمی، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی بر درجه حرارت نواحی مختلف اتصال و همچنین شکل سه بعدی حوضچه مذاب حاصل، بررسی شده است. به این منظور یک مدل اجزاء محدود سه بعدی برای ورق آلیاژ Ti60 ساخته شده و با استفاده از منبع حرارتی متحرک سه بعدی مخروط ناقص با توزیع گوسی انرژی، تحت تأثیر پرتو لیزر قرار گرفته است. همچنین، روند شکل گیری حوضچه مذاب، شروع انجماد، تشکیل درز جوش و ساختار حوضچه مذاب متحرک، مورد مطالعه قرار گرفته است. خواص فیزیکی آلیاژ Ti60 در جدول 1 و ترکیب شیمیایی آن در جدول 2 آورده شده است.

² Butt Joint

¹ Wen

معمول‌ترین و بهترین منبع حرارتی برای مدل‌سازی عددی جوشکاری با استفاده از پرتو لیزر می‌باشد [23، 28]. مدل منبع حرارتی سه بعدی با توزیع گوسی که در این مطالعه نیز به کار رفته، در شکل 3 نشان داده شده است.

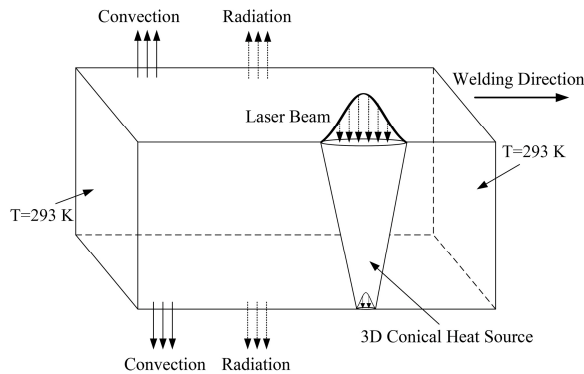


Fig. 2 Boundary conditions of the problem

شکل 2 شرایط مرزی مسئله

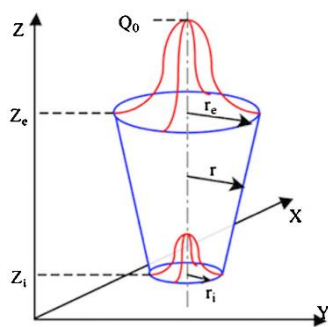


Fig. 3 3D Gaussian heat source [29]

شکل 3 منبع حرارتی سه بعدی گوسی [29]

در مدل سه بعدی با توزیع گوسی بر روی مخروط ناقص، شدت توان در سطح بالایی قطعه کار بیشینه و در سطح پایین آن کمینه است. شدت توان حرارتی در هر صفحه عمود بر محور z را می‌توان به صورت رابطه (4) نوشت [30].

$$Q_r = Q_0 \exp\left(\frac{-r^2}{r_0^2}\right) \quad (4)$$

که r و r_0 به ترتیب توسط روابط (5) و (6) تعریف می‌شوند.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

$$r_0 = r_e - \frac{(r_e - r_i)(z_e - z)}{(z_e - z_i)} \quad (6)$$

که در این روابط Q_r شدت توان منبع حرارتی، Q_0 حداکثر شدت، r_e شعاع مدل در صفحه $z = z_e$ و r_i شعاع مدل در صفحه $z = z_i$ هستند.

4-2- مدل المان محدود

به منظور مدل‌سازی عددی، یک مدل المان محدود سه بعدی از

لیزر در راستای محور y حرکت می‌کند، توزیع درجه حرارت و ناحیه مذاب در راستای y متقارن نخواهد بود، همچنین چون جذب پرتو لیزر در راستای عمق ماده کاهش می‌یابد در راستای محور z نیز تقارن وجود ندارد. به همین دلیل این مسئله، یک مسئله گذرای حرارتی سه بعدی می‌باشد. به منظور ساده‌سازی مدل‌سازی اجزاء محدود، فرآیندهای پیچیده تشکیل سوراخ کلیدی¹، در نظر گرفته نشده‌اند. فرض‌های زیر برای مدل‌سازی فرآیند در نظر گرفته شده‌اند:

- دمای اولیه نمونه برابر با 293 کلوین می‌باشد.
- محورهای مختصات و قطعه کار ثابت هستند.
- پرتو لیزر با سرعت ثابت در راستای محور y حرکت می‌کند.
- سطح حوضچه مذاب، مسطح باقی می‌ماند.

2-2- شرایط مرزی و معادلات حاکم

شرایط مرزی مسئله انتقال حرارت و تلفات گرما در حین جوشکاری لیزری در شکل 2 نشان داده شده است.

بخش عمده انتقال گرما از ناحیه مذاب به سایر قسمت‌های آلیاژ پایه، با هدایت حرارتی انجام می‌شود. رابطه هدایت حرارتی را می‌توان به صورت رابطه (1) نوشت.

$$\nabla(k\nabla T) + Q(x, y, z, t) = \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) \quad (1)$$

که در آن $Q(x, y, z, t)$ نرخ تولید حرارت حجمی، k ضریب هدایت حرارتی، ρ چگالی، C_p گرمای ویژه، T درجه حرارت گذرا و t زمان هستند.

اتلاف حرارت از قطعه کار به صورت جابجایی ناشی از هوای محیط و همچنین گاز محافظ جوشکاری و تشعشع، انجام می‌گیرد. اتلاف ناشی از جابجایی و تشعشع را می‌توان به ترتیب با قوانین سرمایش نیوتن² و تشعشع بولتزمن³، تعریف کرد. همچنین، روابط تعادل و معادله ساختاری ترمو-الاستو-پلاستیک را می‌توان با روابط (2 تا 3) نشان داد.

$$\sigma_{ij} + \rho b_i = 0 \quad (2)$$

$$[d\sigma] = ([D^e] + [D^p]) * [d\varepsilon] - [C_{th}]dT \quad (3)$$

که در آن‌ها σ_{ij} تانسور تنش، b_i نیروی حجمی، $[D^e]$ ماتریس سفتی الاستیک، $[D^p]$ ماتریس سفتی پلاستیک، $[C_{th}]$ ماتریس سفتی حرارتی، $d\varepsilon$ رشد کرنش و dT رشد دما، هستند.

3-2- منبع حرارتی

منبع حرارتی سه بعدی مخروط ناقص با توزیع گوسی،

¹ Keyhole

² Newton's Law of Cooling

³ Stefan-Boltzmann law

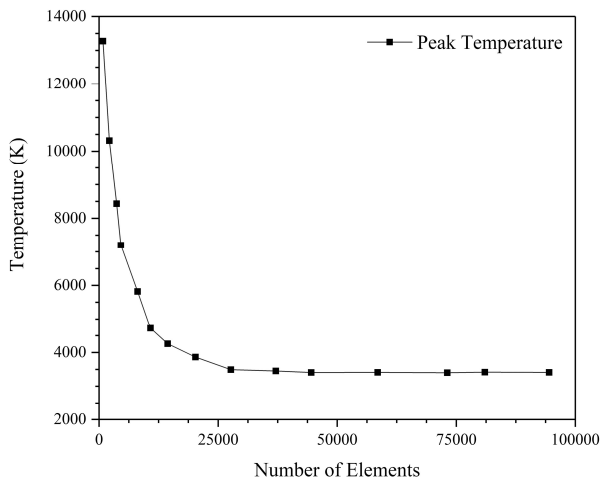


Fig. 5 Mesh convergence

شکل 5 همگرایی المان‌ها

2-5- صحنه سنجی مدل اجزای محدود

به منظور صحنه سنجی نتایج حاصل از مدل المان محدود ساخته شده، از نتایج تجربی موجود در پژوهش‌های پیشین، استفاده شده است. اکبری و همکارانش [32] فرآیند جوشکاری لیزری آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از ترموکوپل‌های نوع k، تاریخچه دمایی برخی نقاط را به دست آوردند. در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی انجام گرفته، مشابه با فرآیند جوشکاری تجربی انجام گرفته توسط اکبری و همکارانش [32] می‌باشد. از مدل المان محدود ساخته شده، برای شبیه‌سازی و مقایسه تاریخچه دمایی یک نقطه با موقعیت مکانی یکسان و با پارامترهای جوشکاری یکسان استفاده شده است. این نقطه مرجع در بالای ورق با فاصله 15 میلی‌متری از لبه شروع جوشکاری و 2 میلی‌متری از خط درز جوش، قرار دارد.

اکبری و همکارانش [32] از پرتو لیزر با توان 240 وات، قطر پرتو 700 میکرومتر و سرعت جوشکاری سه میلی‌متر بر ثانیه برای جوشکاری لب به لب دو قطعه ورق آلیاژ Ti6Al4V استفاده کرده‌اند که پارامترهای لیزر به کار رفته در پژوهش حاضر نیز به همین صورت هستند. مقایسه نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود و نتایج تجربی [32] در شکل 6 نشان داده شده است. برای صحنه سنجی این شبیه‌سازی، از مدل منبع حرارتی مخروط ناقص با توزیع گوسی و خواص (چگالی، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی) وابسته به دمای آلیاژ Ti6Al4V استفاده شده است. همان‌طور که از نتایج شکل 6 دیده می‌شود، تطابق خوبی میان نتایج حاصل از مدل المان محدود به کار رفته و نتایج تجربی حاصل از پژوهش اکبری و همکارانش [32] وجود

قطعه مورد نظر ساخته شده و به صورت گذرا، تحت تأثیر پرتو لیزر قرار گرفته است. مدل ساخته شده، برای پیش‌بینی توزیع درجه حرارت، شکل ناحیه مذاب و حداکثر درجه حرارت در نقاط مختلف و تأثیر استفاده از خواص وابسته به دما بر آن‌ها، به کار رفته است.

در طی جوشکاری لیزری، پرتو لیزر در ناحیه بسیار کوچکی متمرکز می‌شود و به همین دلیل ذوب و تبخیر سریع، اتفاق می‌افتد. به منظور مطالعه ذوب و تبخیر در این ناحیه کوچک، باید از ابعاد مش بسیار کوچک استفاده کرد، ولی اندازه مش بسیار ریز موجب افزایش حجم و زمان محاسبات می‌شود، به همین دلیل در ناحیه تحت تأثیر پرتو از مش ریز و در نواحی دورتر از ابعاد مش بزرگ‌تر استفاده شده. این ریز شدگی مش‌ها در ناحیه تحت تأثیر پرتو لیزر، در شکل 4 نشان داده شده است.

استقلال نتایج مدل اجزای محدود از تعداد المان‌ها، نقش مهمی در دقت شبیه‌سازی دارد [31]. به منظور دستیابی به استقلال نتایج و همچنین تعداد المان‌های بهینه، چندین مدل مختلف و با تعداد المان‌های متفاوت، ساخته شده و تحت تأثیر پرتو لیزر قرار گرفته است. حداکثر درجه حرارت حاصل از مدل‌های المان محدود مختلف برای نقطه‌ای در لبه شروع جوشکاری و در سطح بالایی ورق، در شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است با افزایش تعداد المان‌های سازنده مدل به تقریباً بیش از 30000 عدد، تغییر مهمی در حداکثر دمای نقطه شروع جوشکاری دیده نمی‌شود و به همین دلیل مدلی با بیش از 30 هزار المان مناسب می‌باشد. مدل اجزاء محدود نهایی ساخته شده، دارای 37125 المان و 41152 گره می‌باشد.

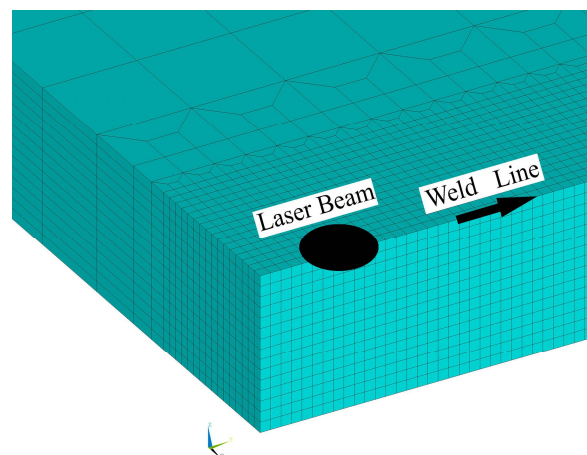


Fig. 4 Mesh refinement in the laser affected region

شکل 4 ریزشدگی المان‌ها در ناحیه تحت تأثیر پرتو لیزر

اعمال انرژی بیشتر، حوضچه مذاب با نفوذ کامل تشکیل می‌شود که این حوضچه در شکل 8 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 8 نیز دیده می‌شود به دلیل جذب غیر یکنواخت انرژی پرتو لیزر در راستای عمق، حوضچه مذاب در بالای نمونه دارای عرض بسیار بیشتری است.

جدول 3 خواص وابسته به دمای آلیاژ Ti60 [26]

Table 1 Ti60 alloy temperature dependent properties [26]

ظرفیت گرمایی	ضریب هدایت	چگالی	درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}$)
565	7/9	4647	293
565	8/5	4637	373
567	9/3	4624	473
574	10/1	4611	573
577	11/1	4596	673
579	11/9	4581	773
583	12/9	4565	873
595	13/4	4545	973
607	13/9	4521	1073
615	15/1	4495	1173
630	16/4	4495	1273
641	17/9	4468	1373
652	19/5	4449	1473
662	20/9	4429	1573
672	22/1	4408	1673
681	23/7	4386	1773
698	25/1	4364	1873
699	25/9	4349	1973
702	26/5	4120	1955
709	26/5	4114	1973
2509	25/2	4111	1983
713	23/9	4107	1993
722	23/9	4083	2073
729	23/9	4051	2173
741	23/9	4018	2273
750	23/9	4001	2323
752	23/9	4001	2373
767	23/9	4001	2473

پس از عبور پرتو لیزر از لبه شروع جوشکاری، به دلیل اینکه قسمت زیرین ورق کمتر تحت تأثیر انرژی پرتو قرار گرفته و کمتر ذوب شده است، سرمایه این ناحیه سریع‌تر اتفاق افتاده و درز جوش از ناحیه زیرین ورق شروع به تشکیل می‌کند که در شکل 9 نشان داده شده است.

دارد و این مطلب می‌تواند دال بر صحت نتایج عددی به دست آمده در پژوهش حاضر باشد.

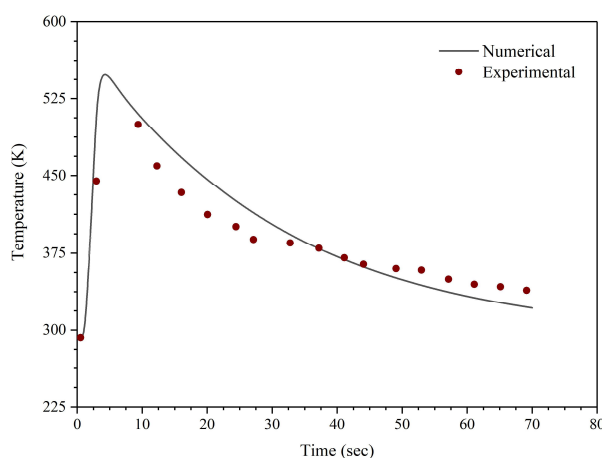


Fig. 6 Comparison between experimental [32] and simulated results

شکل 6 مقایسه نتایج تجربی [32] و شبیه‌سازی عددی

3- نتایج و بحث

3-1- تشکیل درز جوش

با توجه به اینکه نتایج نشان داده شده در شکل 6 با استفاده از خواص (ضریب هدایت حرارتی، چگالی و ظرفیت گرمایی) وابسته به دمای آلیاژ Ti6Al4V، به دست آمده است، به همین دلیل برای آلیاژ Ti60 نیز نتایج حالت تمام خواص متغیر با درجه حرارت، برای شبیه‌سازی تشکیل درز جوش و همچنین، به عنوان مرجع برای مقایسه با سایر نتایج، در نظر گرفته شده است. در این حالت از خواص چگالی، ضریب هدایت و ظرفیت گرمایی آورده شده در جدول 3 استفاده شده است.

فرض شده است که در زمان صفر، پرتو لیزر با قطر 700 میکرومتر در خارج از سطح ورق و در فاصله یک میلی‌متری از لبه جوشکاری، با سرعت سه میلی‌متر بر ثانیه شروع به حرکت کرده و کل طول ورق (30 میلی‌متر) را در راستای y می‌پیماید. کل زمان مدل‌سازی نیز 50 ثانیه در نظر گرفته شده است که شامل سرمایه‌ش ناشی از شرایط مرزی (جابجایی و تشعشع) در طول فرآیند جوشکاری و پس از اتمام جوشکاری و مرحله سرد شدن، نیز می‌شود.

با توجه به اینکه سرعت جوشکاری 3 میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد، در زمان 0/33 ثانیه مرکز پرتو لیزر در لبه کناری ورق قرار می‌گیرد، حوضچه مذاب تشکیل شده در این لحظه در شکل 7 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، به دلیل عدم اعمال انرژی کافی به لبه ورق، حوضچه مذاب با نفوذ کامل تشکیل نشده است. با پیشروی پرتو لیزر و

سطح بالایی ورق، با فاصله یک میلی‌متر از لبه شروع جوشکاری و در مرکز خط جوش (نقطه P در شکل 1)، انجام گرفته است.

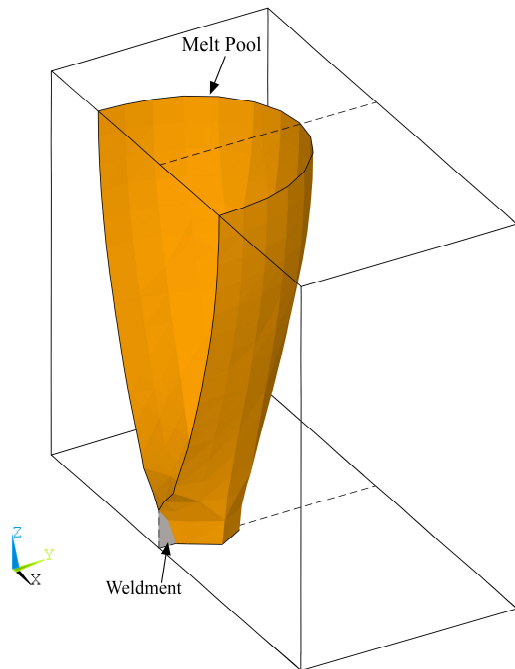


Fig. 9 Weld seam creation

شکل 9 تشکیل درز جوش

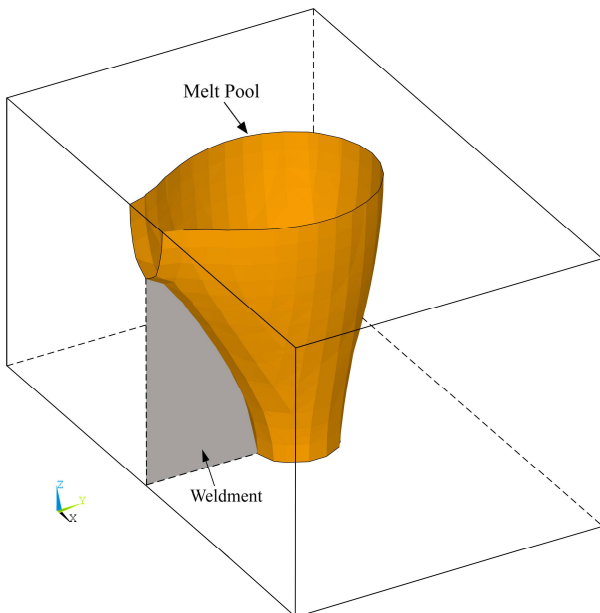


Fig. 10 weld seam development

شکل 10 رشد درز جوش

در شکل 11 تغییرات درجه حرارت نقطه P برای حالت مرجع که تمام خواص وابسته به دما هستند ($f(t)$ all) و در حالی که فقط ضریب هدایت حرارتی ثابت (برابر با $7/9$ وات بر متر-

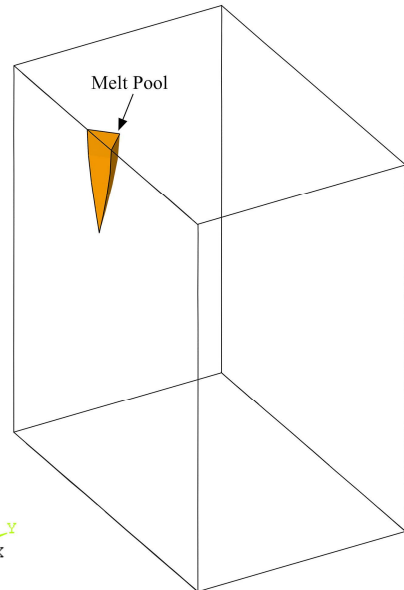


Fig. 7 Melt pool creation

شکل 7 تشکیل حوضچه مذاب

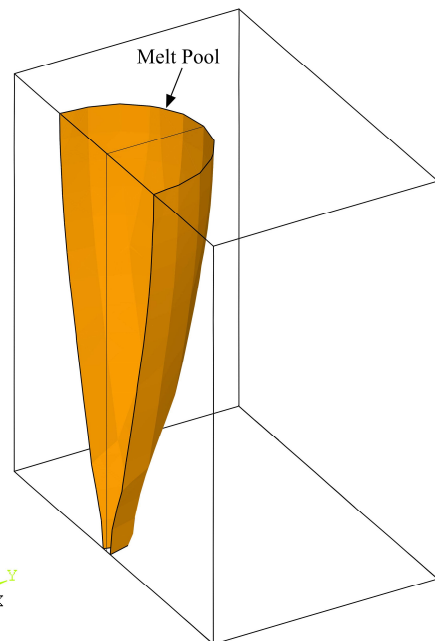


Fig. 8 Full penetration melt pool

شکل 8 حوضچه مذاب نفوذ کامل

روند افزایش ناحیه منجمد و رشد درز جوش در شکل 10 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، ناحیه منجمد از قسمت زیرین ورق، همزمان به سمت بالا و همین‌طور راستای حرکت پرتو پیشروی می‌کند و درز جوش را تشکیل می‌دهد.

2-3- توزیع دما در نواحی تحت تأثیر لیزر
بررسی تغییرات درجه حرارت نسبت به زمان، برای نقطه‌ای در

در شکل‌های 13 تا 16، حوزه‌های درجه حرارت برای حالت‌های مختلف مدل‌سازی در ناحیه نقطه P و در زمانی که دمای این نقطه بیشینه می‌شود (تقریباً 0/7 ثانیه پس از شروع جوشکاری)، نشان داده شده است. در زمان 0/7 ثانیه، مرکز پرتو لیزر تقریباً به فاصله 1/1 میلی‌متری از لبه شروع جوشکاری و 2/1 میلی‌متری از نقطه شروع پرتوافکنی، می‌رسد.

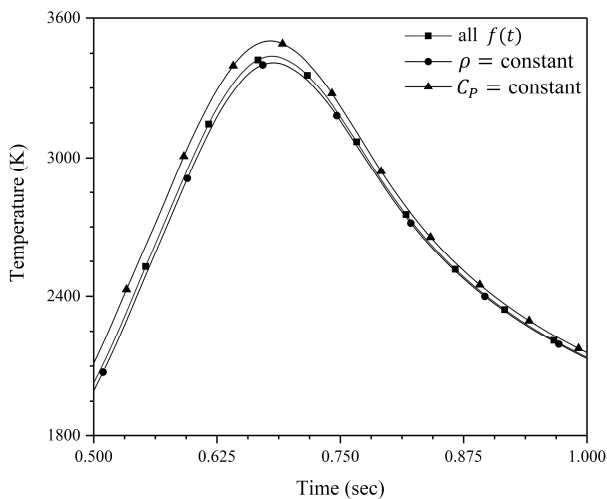


Fig. 12 Comparison of the point P temperature variations for constant density, constant specific heat and reference condition

شکل 12 مقایسه تغییرات دمای نقطه P برای سه حالت چگالی ثابت، ظرفیت گرمایی ثابت و حالت مرجع

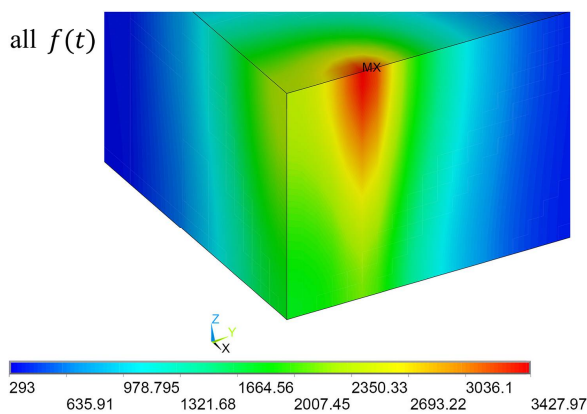


Fig. 13 Point P temperature fields for the reference condition (Temperature in Kelvin)

شکل 13 حوزه‌های درجه حرارت نقطه P برای حالت مرجع (دما بر حسب کلون)

همان‌طور در شکل 14 دیده می‌شود استفاده از ضریب انتقال حرارت ثابت در مدل‌سازی، منجر به افزایش بسیار زیادی در مقادیر درجه حرارت پیش بینی شده توسط مدل اجزاء محدود و ایجاد خطای قابل ملاحظه نسبت به حالت مرجع، می‌شود. همچنین، استفاده از چگالی ثابت (شکل 15) منجر به

کلون) فرض شده، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 11 دیده می‌شود حداکثر درجه حرارت در حالت ضریب هدایت ثابت به 6746 کلون می‌رسد که نسبت به حالت مرجع (همه خواص تابع دما) که درجه حرارت برابر با 3428 کلون می‌باشد، اختلاف بسیار زیادی دارد. این اختلاف نتایج به دلیل تغییرات زیاد ضریب هدایت حرارتی نسبت به درجه حرارت اتفاق افتاده است. همان‌طور که در جدول 3 نشان داده شده است، این ضریب از مقدار 7/9 وات بر متر-کلون در دمای 293 کلون تا 26/5 وات بر متر-کلون در دمای 1955 کلون تغییر می‌کند.

در شکل 12 تغییرات درجه حرارت نقطه P در طول زمان و برای حالت‌های تمام خواص متغیر با دما، چگالی ثابت و ظرفیت گرمایی ثابت، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 12 دیده می‌شود، استفاده از چگالی ثابت (4647 کیلوگرم بر مترمکعب) باعث کاهش کمی در مقادیر درجه حرارت نسبت به حالت مرجع می‌شود. در حالت چگالی ثابت حداکثر درجه حرارت نقطه P به 3400 کلون می‌رسد که نسبت به حالت مرجع (3428 کلون) کاهش کمی (در حدود یک درصد) را نشان می‌دهد. همچنین، همان‌طور که در شکل 12 دیده می‌شود استفاده از ظرفیت گرمایی ثابت (565 ژول بر کیلوگرم-کلون) منجر به افزایش کمی در مقادیر درجه حرارت نسبت به حالت مرجع می‌شود. در حالت ظرفیت گرمایی ثابت حداکثر درجه حرارت نقطه P به 3490 کلون می‌رسد که نسبت به حالت مرجع (3428 کلون) افزایش کمی (در حدود 2 درصد) را نشان می‌دهد.

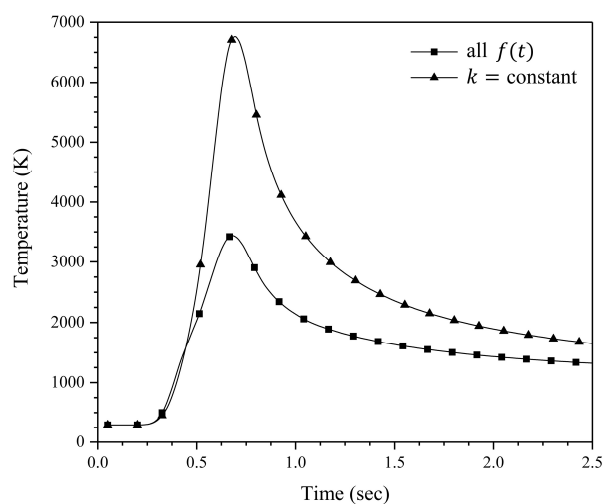


Fig. 11 Comparison of the point P temperature variations for constant thermal conductivity and reference condition

شکل 11 مقایسه تغییرات دمای نقطه P برای دو حالت ضریب هدایت حرارتی ثابت و حالت مرجع

3-3- حوضچه مذاب

در شکل‌های 17 تا 20 سطوح تشکیل دهنده حوضچه مذاب برای حالت‌های مختلف مدل‌سازی در نقطه P، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 17 دیده می‌شود، در حالت مرجع که از تمام خواص متغیر با درجه حرارت استفاده شده است یک حوضچه مذاب با نفوذ کامل و با ناحیه مذاب بزرگ‌تر در بالا و بسیار کوچک‌تر در پایین ورق، تشکیل شده است. در حالت استفاده از ضریب انتقال حرارت ثابت (شکل 18) ناحیه بسیار بزرگ‌تری هم در بالای ورق و هم در پایین آن ذوب شده است و این افزایش حجم مذاب، به خصوص در قسمت زیرین ورق مشهودتر است. در حالت استفاده از چگالی ثابت (شکل 19) کمی حوضچه مذاب کوچک‌تر شده و در حالت ظرفیت حرارتی ثابت (شکل 20) کمی حوضچه مذاب بزرگ‌تر شده است.

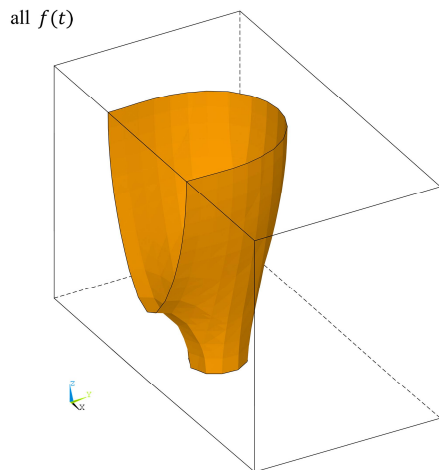


Fig. 17 Point P melt pool surfaces for the reference condition
شکل 17 سطوح حوضچه مذاب نقطه P برای حالت مرجع

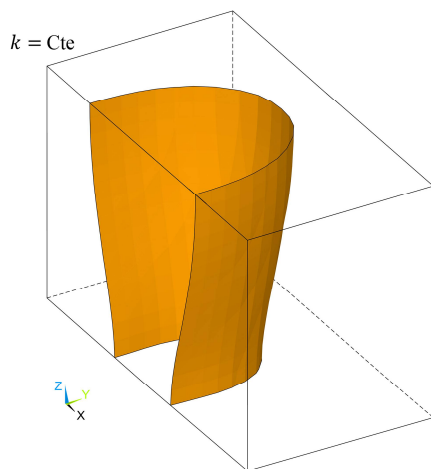


Fig. 18 Point P melt pool surfaces for constant heat transfer coefficient mode
شکل 18 سطوح حوضچه مذاب نقطه P برای حالت ضریب انتقال حرارت ثابت

کاهش کمی در مقادیر درجه حرارت پیش بینی شده و استفاده از ظرفیت گرمایی ثابت (شکل 16) منجر به افزایش کمی در مقادیر درجه حرارت پیش بینی شده می‌شود.

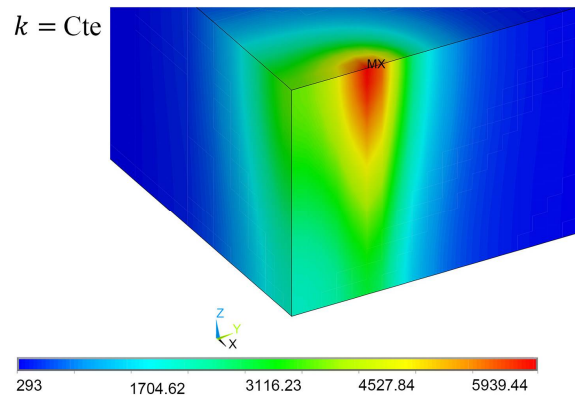


Fig. 14 Point P temperature fields for constant heat transfer coefficient mode (Temperature in Kelvin)

شکل 14 حوزه‌های درجه حرارت نقطه P برای حالت ضریب انتقال حرارت ثابت (دما بر حسب کلوین)

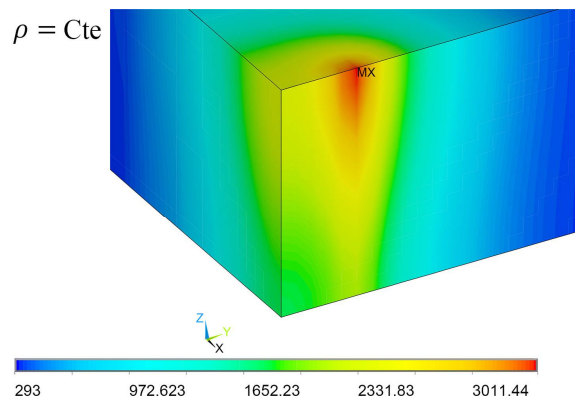


Fig. 15 Point P temperature fields for constant density mode (Temperature in Kelvin)

شکل 15 حوزه‌های درجه حرارت نقطه P برای حالت چگالی ثابت (دما بر حسب کلوین)

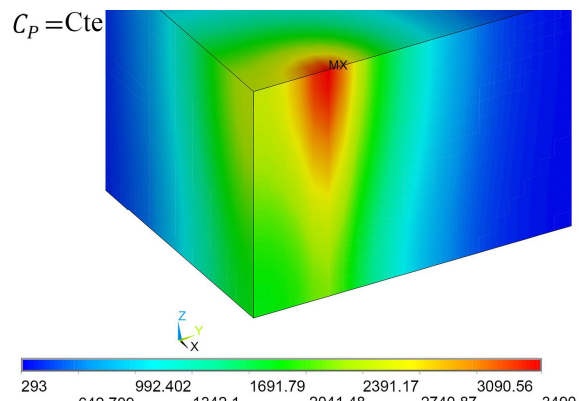


Fig. 16 Point P temperature fields for constant specific heat mode (Temperature in Kelvin)

شکل 16 حوزه‌های درجه حرارت نقطه P برای حالت ظرفیت گرمایی ثابت (دما بر حسب کلوین)

قسمت بالای ورق شروع به تشکیل کرده و به سمت پایین و در جهت حرکت پرتو لیزر پیشروی می‌کند، ولی ناحیه منجمد و درز جوش، از قسمت پایین ورق تشکیل شده و به سمت بالا و همینطور در راستای جوشکاری، حرکت می‌کند.

- استفاده از ضریب انتقال حرارت ثابت موجب ایجاد خطای زیادی در نتایج شبیه‌سازی می‌شود. به گونه‌ای که هم درجه حرارت‌های حاصل از مدل‌سازی المان محدود بسیار بالاتر از حالت مرجع به دست می‌آیند (تقریباً دو برابر) و هم ابعاد درز جوش حاصل بسیار بزرگ‌تر از حالت مرجع به دست می‌آید که با واقعیت تطابق ندارد. به همین دلیل، نباید در مدل‌سازی المان محدود جوشکاری آلیاژ Ti60 از ضریب انتقال حرارت ثابت استفاده کرد و این پارامتر باید به صورت متغیر نسبت به دما به کار رود.

- استفاده از چگالی ثابت در مدل‌سازی عددی جوشکاری لیزری آلیاژ Ti60 موجب می‌شود مقادیر درجه حرارت کمی کوچک‌تر از مقادیر مرجع (در حدود یک درصد) به دست آید و همچنین حوضچه مذاب نیز مقداری کوچک‌تر دیده می‌شود. پس حدود خطای استفاده از چگالی ثابت به اندازه‌ای نیست (تقریباً 1%) که لزوم استفاده از چگالی متغیر مطرح شود و می‌توان چگالی را در طی مدل‌سازی اجزاء محدود، ثابت فرض کرد.

- استفاده از ظرفیت حرارتی ثابت موجب افزایش کمی (در حدود دو درصد) در مقادیر درجه حرارت‌های حاصل از مدل‌سازی می‌شود. همچنین حوضچه مذاب حاصل نیز کمی بزرگ‌تر دیده می‌شود. بهتر است به منظور افزایش دقت مدل‌سازی المان محدود ظرفیت حرارتی ثابت فرض نشود و از مقادیر متغیر نسبت به دما استفاده شود.

5- فهرست علائم

$Q(x, y, z, t)$	نرخ تولید حرارت حجمی ($\text{Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
T	دما (K)
k	ضریب هدایت حرارتی ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$)
C_p	گرمای ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
t	زمان (sec)
b_i	نیروی حجمی (Nm^{-3})
$[D^e]$	ماتریس سفتی الاستیک
$[D^p]$	ماتریس سفتی پلاستیک
$[C_{th}]$	ماتریس سفتی حرارتی
r	شعاع (m)

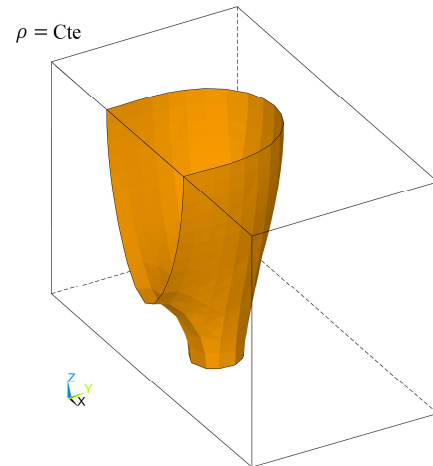


Fig. 19 Point P melt pool surfaces for constant density mode

شکل 19 سطوح حوضچه مذاب نقطه P برای حالت چگالی ثابت

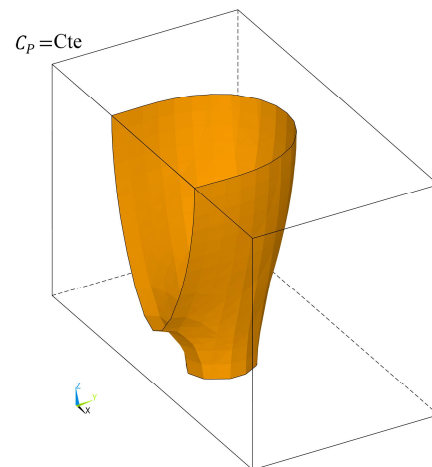


Fig. 20 Point P melt pool surfaces for constant specific heat mode

شکل 20 سطوح حوضچه مذاب نقطه P برای حالت ظرفیت گرمایی

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تأثیر استفاده از خواص (چگالی، ظرفیت گرمایی و ضریب انتقال حرارت) ثابت نسبت به درجه حرارت بر حوزه‌های درجه حرارت و ساختار حوضچه مذاب پیش بینی شده با روش المان محدود، مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی برای جوشکاری لیزری آلیاژ تیتانیوم مدرن Ti60 و با فرض توان جوشکاری 240 وات، سرعت جوشکاری 3 میلی‌متر بر ثانیه و قطر پرتو 700 میکرومتر انجام گرفت. از نتایج آزمایشگاهی موجود در پژوهش‌های پیشین به منظور صحت سنجی مدل المان محدود ساخته شده استفاده گردید و نتایج عددی حاصل، تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند. همچنین، فرآیند تشکیل حوضچه مذاب و پس از آن انجماد و تشکیل درز جوش نیز تشریح گردید و نتایج زیر به دست آمدند:

- با آغاز تأثیر پرتو لیزر بر روی نمونه، حوضچه مذاب از

Vol. 119, 2019.

علایم یونانی

[11] W. K. C. Yung, B. Ralph, W. B. Lee, R. Fenn, An investigation into welding parameters affecting the tensile properties of titanium welds, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, No. 1-3, pp. 759-764, 1997.

 σ_{ij} تانسور تنش (Nm^{-2}) ρ چگالی (kgm^{-3}) ε کرنش (%)

[12] S. Murugan, S. K. Rai, P. V. Kumar, T. Jayakumar, B. Raj, M. S. C. Bose, Temperature distribution and residual stresses due to multipass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, No. 4, pp. 307-317, 2001.

زیر نویس ها

 e در سطح بالای ورق i در سطح زیرین ورق

[13] X. K. Zhu, Y. J. Chao, Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation, *Computers and Structures*, Vol. 80, No. 11, pp. 967-976, 2002.

6- مراجع

[14] A. Araee, M. Jafari Vardanjani, *Fusion Welding And Thermal Analysis*, First Edition, pp. 1-266, Tehran: Iranian Students Booking Agency, 2020. (in Persian فارسی)

[15] J. Mazumder, W. M. Steen, Heat transfer model for cw laser material processing, *Journal of Applied Physics*, Vol. 51, No. 2, pp. 941-947, 1980.

[16] W. K. Hamoudi, R. Ducharme, Keyhole welding of C/Mn steel using a 10 kW CO2 laser, *International Journal for the Joining of Materials*, Vol. 8, No. 1, pp. 30-36, 1996.

[17] J. Dowden, P. Kapadia, A mathematical investigation of the penetration depth in keyhole welding with continuous CO2 lasers, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 28, No. 11, pp. 2252-2261, 1995.

[18] G. H. Little, A. G. Kamtekar, The effect of thermal properties and weld efficiency on transient temperatures during welding, *Computers and Structures*, Vol. 68, No. 1-3, pp. 157-165, 1998.

[19] A. A. Bhatti, Z. Barsoum, H. Murakawa, I. Barsoum, Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion, *Materials and Design*, Vol. 65, pp. 878-889, 2015.

[20] S. Bannour, K. Abderrazak, H. Mhiri, G. Le Palec, Effects of temperature-dependent material properties and shielding gas on molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy, *Optics and Laser Technology*, Vol. 44, No. 8, pp. 2459-2468, 2012.

[21] S. A. Tsirkas, P. Papanikos, T. Kermanidis, Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 134, No. 1, pp. 59-69, 2003.

[22] C. Liu, J. Zhang, J. Niu, Numerical and experimental analysis of residual stresses in full-penetration laser beam welding of Ti6Al4V alloy, *Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering*, Vol. 38, No. 8, pp. 1317-1320, 2009.

[23] E. D. Derakhshan, N. Yazdian, B. Craft, S. Smith, R. Kovacevic, Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin

[1] J. Liu, H. Liu, X. L. Gao, H. Yu, Microstructure and mechanical properties of laser welding of Ti6Al4V to Inconel 718 using Nb/Cu interlayer, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 277, 2020.

[2] P. Gao, M. Fu, M. Zhan, Z. Lei, Y. Li, Deformation behavior and microstructure evolution of titanium alloys with lamellar microstructure in hot working process: A review, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 39, pp. 56-73, 2020.

[3] M. Mashhadi, S. R. Hamzelo, J. Kadkhodapour, Study of the Electrochemical Corrosion Rate of Medical Implants of Titanium and Stainless Steel Made by Machining and selective laser melting under Different Surface Conditions, *Iranian Journal Of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 24-38, 2018. (in Persian فارسی)

[4] P. Nandwana, Y. Lee, Influence of scan strategy on porosity and microstructure of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam powder bed fusion, *Materials Today Communications*, Vol. 24, 2020.

[5] R. R. Boyer, An overview on the use of titanium in the aerospace industry, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 213, No. 1-2, pp. 103-114, 1996.

[6] L. Guo, X. Fan, G. Yu, H. Yang, Microstructure control techniques in primary hot working of titanium alloy bars: A review, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 29, No. 1, pp. 30-40, 2016.

[7] P. F. Gao, G. Qin, X. X. Wang, Y. X. Li, M. Zhan, G. J. Li, J. S. Li, Dependence of mechanical properties on the microstructural parameters of TA15 titanium alloy with tri-modal microstructure, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 739, pp. 203-213, 2019.

[8] D. Jiang, A. S. Alsagri, M. Akbari, M. Afrand, A. A. Alrobaian, Numerical and experimental studies on the effect of varied beam diameter, average power and pulse energy in Nd: YAG laser welding of Ti6Al4V, *Infrared Physics and Technology*, Vol. 101, pp. 180-188, 2019.

[9] S. Katayama, *Handbook of Laser Welding Technologies*, First Edition, pp. 3-16, Sawston: Woodhead Publishing, 2013.

[10] M. Bahrami Balajaddeh, H. Naffakh-Moosavy, Pulsed Nd:YAG laser welding of 17-4 PH stainless steel: Microstructure, mechanical properties, and weldability investigation, *Optics and Laser Technology*,

- [29] J. Xu, J. Chen, Y. Duan, C. Yu, J. Chen, H. Lu, Comparison of residual stress induced by TIG and LBW in girth weld of AISI 304 stainless steel pipes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 248, pp. 178-184, 2017.
- [30] J. Rahman Chukkan, M. Vasudevan, S. Muthukumaran, R. Ravi Kumar, N. Chandrasekhar, Simulation of laser butt welding of AISI 316L stainless steel sheet using various heat sources and experimental validation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 219, pp. 48-59, 2015.
- [31] J. Ma, F. Kong, R. Kovacevic, Finite-element thermal analysis of laser welding of galvanized high-strength steel in a zero-gap lap joint configuration and its experimental verification, *Materials and Design*, Vol. 36, pp. 348-358, 2012.
- [32] M. Akbari, S. Saedodin, D. Toghraie, R. Shoja-Razavi, F. Kowsari, Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy, *Optics and Laser Technology*, Vol. 59, pp. 52-59, 2014.
- structural steel plates in butt joint configuration, *Optics and Laser Technology*, Vol. 104, pp. 170-182, 2018.
- [24] B. Kumar, D. Kebede, S. Bag, Microstructure evolution in thin sheet laser welding of titanium alloy, *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, Vol. 11, No. 2-3, pp. 203-229, 2018.
- [25] P. Wen, D. Yelkenci, J. Chen, B. Chang, D. Du, J. Shan, Numerical analysis of the effect of welding positions on formation quality during laser welding of TC4 titanium alloy parts in aerospace industry, *Journal of Laser Applications*, Vol. 31, No. 2, 2019.
- [26] J. Lin, N. Ma, X. Liu, Y. Lei, Modification of residual stress distribution in welded joint of titanium alloy with multi electron beam heating, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 278, 2020.
- [27] W. Jia, W. Zeng, J. Liu, Y. Zhou, Q. Wang, Influence of thermal exposure on the tensile properties and microstructures of Ti60 titanium alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 530, pp. 511-518, 2011.
- [28] M. Behúlová, E. Babalová, M. Nagy, Simulation model of Al-Ti dissimilar laser welding-brazing and its experimental verification, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 179, pp. 012007, November 9-11, 2017.