نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۴۹، شماره ۲، سال ۱۳۹۶، صفحات ۴۲۳ تا ۴۳۱
DOI: 10.22060/mej.2016.752

بررسی عددی جریان مذاب و عمق نفوذ منطقه متأثر از حرارت در فرآیند جوشکاری لیزر ورق از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V

جابر ملکی نژاد، مجید قریشی*، علی خرم

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران

چکیده: در این مقاله توزیع دما، جریان مذاب و عمق نفوذ منطقه متأثر از حرارت در فرآیند جوشکاری لیزر آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V در ورق‌های به ضخامت ۱/۷ میلیمتر بررسی شده است. به علت هزینه بالای آزمایش‌های مربوط به جوشکاری لیزر، از روش حجم محدود به منظور پیش‌بینی رفتار جوش روی قطعه استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی از روش حجم محدود سیال و از نرم‌افزار اپن فوم استفاده است. برای صحه‌گذاری روش پیشنهادی، از نتایج تجربی حاصل شده در زمینه شکل هندسی جوش و توزیع دمای ناشی از فرآیند جوش استفاده می‌شود. شبیه‌سازی فرآیند مذکور با در نظر گرفتن نیروهای شناوری و مارانگونی و فرضیات بوزینسک انجام می‌پذیرد. خواص ترمودینامیکی مستقل از دما و خواص مکانیکی آلیاژ با منبع حرارت گوسین در نظر گرفته شده است. نتایج عددی و تجربی تطابق خوبی با یکدیگر داشته و مدل شبیه‌سازی شده برای این نوع فرآیند جوشکاری، پیش‌بینی خوبی از توزیع دما، جریان مذاب و همینطور عمق نفوذ مذاب در قسمت‌های مختلف قطعه را ارائه می‌دهد. برای همین مدل شبیه‌سازی شده قابل استفاده در طراحی و ارزیابی پارامترهای مختلف جوشکاری قطعات می‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۷ بهمن ۱۳۹۳
بازنگری: ۳۰ دی ۱۳۹۴
پذیرش: ۹ اسفند ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۱۸ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:
جوشکاری لیزر
جریان مذاب
روش حجم محدود
توزیع دما

۱- مقدمه

در صنعت جوشکاری بیشتر طراحی‌ها بر پایه تجربه و سعی و خطا استوار است. با توسعه مدل‌های محاسباتی و استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری فرآیندهای مختلف جوشکاری، می‌توان از صرف هزینه‌های کلان جهت آزمایش‌ها و تصحیح خطاهای پس از ساخت، جلوگیری نمود. در حیطه جوشکاری، کیفیت جوش به مشخصات مکانیکی فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت[1] بستگی داشته و تحت تأثیر ویژگی‌های متالورژیکی و ترکیب شیمیایی جوش می‌باشد. علاوه بر این شکل هندسی گرده جوش نیز از مهمترین عوامل تأثیرگذار روی کیفیت جوش است [۱]. بیشترین تلاش تولیدکنندگان برای رسیدن به ترکیبی درست از پارامترهای جوشکاری می‌باشد تا به وسیله آن بهترین اتصال جوش ایجاد شود. جوشکاری لیزر از جمله روش‌های نوین جوشکاری ذوبی می‌باشد. سرعت و دقت بالا، از جمله عواملی است که کاربرد این فرآیند جوشکاری را در صنایع مختلف گسترش داده است. با تابش پرتو پر انرژی لیزر به سطح مورد نظر، حرارت مورد نیاز برای ایجاد حوضچه مذاب و انجام فرآیند اتصال فراهم می‌گردد [۲]. مزایای اصلی روش جوشکاری لیزر، حرارت ورودی کم، اندازه ریزدانه‌ها در ناحیه منطقه متأثر از گرما و پیچیدگی حداقلی در قطعات، نسبت عمق به پهنای جوش زیاد مخصوصاً هنگام جوشکاری با تکنیک سوراخ کلیدی (تقریبا ۱۰ به ۱)، امکان جوشکاری قطعات تا ضخامت ۳۲ میلیمتر با یک پالس بدون نیازبه پخ‌سازی، باریک بودن دسته پرتوهای لیزر و تمرکز روی منطقه کوچک و امکان جوشکاری قطعات نازک وکوچک و فضاهای با دسترسی کم، امکان جوشکاری قطعات با جنس‌های متنوع می‌باشد [۳].

Ti6Al4V مهمترین و پرکاربردترین آلیاژ تیتانیوم است به طوری که بیش از ۵۰ ٪ مصرف کل تیتانیوم مختص این آلیاژ می‌باشد. استحکام این آلیاژ به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از تیتانیوم خالص است در حالی که سختی و ویژگی‌های حرارتی آن با تیتانیوم خالص یکسان می‌باشد. استحکام بالا نسبت به وزن، مقاومت خوردگی عالی، چقرمگی خوب و چگالی پایین تیتانیوم و آلیاژهای آن باعث شده است این ماده کاربرد فراوانی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، پتروشیمی و شیمیایی داشته باشد [۴].

برای تحلیل سرعت حرکت مذاب و میزان منطقه متأثر از حرارت باید تحلیل انتقال حرارت گذرا انجام شود تا تاریخچه دمایی قطعه به دست آید، اولین قدم برای تحلیل حرارتی جوش، بیان مدلی برای منبع حرارتی متحرک جوش است. در این راستا اولین بار روزنتال با استفاده از مدل منبع گرمای متحرک نقطه‌ای حل تحلیلی تقریبی برای توزیع دما در حین جوشکاری در ورق‌های نازک و ضخیم را به دست آورد. پس از آن مدل منبع گرمای متحرک خطی پیشنهاد شد که تولید گرما را به صورت یک خط در راستای ضخامت ورق در نظر می‌گیرد و بیشتر برای مدلسازی جوشکاری به روش لیزر و اشعه الکترونی مناسب است [۱]. کوک [۵] حرارت ورودی را به صورت توزیع چگالی توان توسط روش اختلاف محدود اعمال نمود. نیهاد [۶] یک

1 Heat Affected Zone (HAZ)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghoreishi@kntu.ac.ir

مسأله تغییر فاز انتقال حرارت دو بعدی گذرای غیرخطی با منبع گرمایی در حال حرکت را بررسی کرد. همچنین از روش‌های حجم کنترل و آنتالپی برای آنالیز توزیع دما در یک صفحه فولادی استفاده کرد. در این مدل قسمتی از گرمای جذب شده به وسیله جابجایی و تشعشع و بقیه آن به وسیله هدایت از طریق صفحه منتقل می‌شد و اثر تبخیر فلز در نظر گرفته نشد. با تغییر سرعت جوشکاری مشخص شد که در سرعت‌های پایین، زمان بیشتری لازم است تا توزیع دما در ناحیه جامد به حالت پایدار برسد. دو و همکاران [۷] یک مدل سه بعدی برای مطالعه انتقال حرارت در جوشکاری لیزری با عمق نفوذ بالا برای آلیاژ تیتانویم را بررسی نمودند. تغییر شکل در سطح آزاد حوضچه مذاب در نظر گرفته نشد و سطح حوضچه به صورت سطح صاف لحاظ گردید. رای و همکاران [۸] به جوشکاری سه فلز تانتالوم، فولاد ضد زنگ و Ti6Al4V توسط پرتو لیزر پرداختند. آنها هندسه سوراخ کلید جوش ایجاد شده را به دست آوردند. هان و همکاران [۹] اثر پارامترهای فرآیند جوشکاری پالسی لیزر را در جوشکاری لب به لب ورقه‌های آلیاژ زیرکونیوم مورد استفاده در محفظه‌های ذخیره سوخت هسته‌ای با روش المان محدود، توسط نرم‌افزار سیسولد بررسی کردند. کنینی و روبینسکی [۱۰] یک مدل المان محدود و حالت شبه‌پایدار برای محاسبه شکل حوضچه مذاب، جریان سیال و حالت شبه‌پایدار برای محاسبه شکل حوضچه مذاب، جریان سیال و میدان دما را در نظر گرفتند و شکل حفره را براساس نتایج آزمایشگاهی فرض کردند. در این مطالعه اثر متقابل بین حوضچه مذاب و حفره در نظر گرفته نشد. هی و همکاران [۱۱]، فرآیند جوشکاری لیزری را مطالعه کردند و میدان دمای گذرا، دمای حداکثر و نرخ گرم و سرد شدن را فراهم نمودند. یانگ و همکاران [۱۲]، مشخصه‌های حوضچه مذاب در طی فرآیند جوشکاری لیزری را بررسی نمودند. اثر هدایت حرارتی نیروی مارانگونی و شناوری روی فرآیند ذوب و شکل حوضچه مذاب را مورد تحلیل قرار دادند. مشخص شد خصوصیات حرارتی فلز نقش کلیدی روی پدیده انتقال و شکل حوضچه مذاب دارند. آکمان و همکاران [۱۳] نیز از جمله معدود پژوهشگرانی بودند که جوشکاری لیزر را بر روی آلیاژ Ti6Al4V انجام دادند. آنها به بررسی پارامترهای جوشکاری لیزر Nd:YAG در ورقی از آلیاژ فوق به ضخامت ۳ میلیمتر پرداختند [۱۳]. سیم و کیم [۱۴] شکل هندسی سطح حوضچه جوش در جوشکاری لیزری را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند شکل سطح حوضچه در رینولدزهای پایین به صورت یک برآمدگی پدید می‌آید و در رینولدزهای بالاتر دارای شکلی متفاوت خواهد بود.

تاکنون تعداد بسیار محدودی مقاله در زمینه جوشکاری لیزر و منطقه متأثر از دما و جریان مذاب منتشر شده است و عمدتاً به دلیل عدم در نظر گرفتن نیروهای موثر در زمینه حرکت مذاب از جمله نیروی گرانش، نیروی مارانگونی، کشش سطحی و ... و همچنین عدم استفاده از روش حجم محدود نتیجه جامعی برای تعمیم به سایر آلیاژها ارائه نشده است. در این مطالعه با استفاده از روش حجم محدود و تحلیل حرارتی برای آلیاژ تیتانیوم، توزیع حرارتی حوضچه مذاب و منطقه متأثر از حرارت و جریان مذاب، شبیه‌سازی انجام می‌شود. جهت صحت‌سنجی مدل حجم محدود شبیه‌سازی شده از روش‌های تجربی استفاده می‌شود. مدل حجم محدود فرآیند جوشکاری امکان مطالعه جزء به جزء و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر قطعه را فراهم نموده و در کاهش هزینه‌ها بسیار موثر است.

۲- نحوه انجام آزمایش‌ها

جهت جوشکاری نمونه‌ها از دستگاه لیزر گازی CO_2 شرکت ایتالیایی PRIMA Industrie مدل Optimo استفاده گردید. توان این دستگاه لیزر ۲۲۰۰ وات، و بیشترین سرعت کلگی لیزر ۶۰ متر بر دقیقه است. در ضمن با تعویض کلگی لیزر، دستگاه قابلیت برشکاری را نیز دارد. گاز آرگون با فشار ثابت ۰/۱ بار به عنوان گاز محافظ مورد استفاده قرار گرفت.

در این پژوهش از آلیاژ Ti6Al4V با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ به عنوان ماده قطعه کار استفاده گردید. اندازه طول هر ورق ۸۵ میلیمتر ، عرض ۳۵ میلیمتر وضخامت ۱/۷میلیمتر بود.

جدول ۱: ترکیب آلیاژ Ti6Al4V

Table 1. Chemical composition of Ti6Al4V alloy

عناصر	تیتانیوم	آلومینیوم	وانادیم
درصد وزنی	۹۰/۰۲٪	۶٪	۳/۹۸٪

برای متالوگرافی استاندارد هر مقطع عرضی ابتدا نمونه‌ها مانت شده سپس با استفاده از محلول اچ با ترکیب شیمیایی 2 ml HF+ 10 ml HNO_3+88 ml deionized H_2O آشکارسازی ابعاد هندسی صورت پذیرفت . پارامترهای هندسی جوش با استفاده از میکروسکوپ نوری و نرم افزار آنالیز تصویری اندازه‌گیری شدند.

۳- معادلات حاکم و جنبه‌های تئوری مدل

در مدلسازی فرآیند جوشکاری، تقابل بین حوزه‌های مختلف علوم مهندسی از قبیل انتقال حرارت، متالورژی و مکانیک وجود دارد در این مطالعه از نرم‌افزار اپن فوم برای تحلیل استفاده شده است. از جمله متغیرهای تعریف شده در این مطالعه، لزجت، فشار، دما، ضریب انتقال گرما، سرعت، شتاب گرانش و ... است. تعریف این پارامترها از طریق مشخص کردن نوع پارامتر (اسکالر یا برداری) و مشخص کردن بعد و مقداردهی اولیه یا ثانویه در هر یک از مرزها و صفحات مورد نیاز انجام می‌شود.

معادله انتقال حرارت حاکم در تحلیل حرارتی سه بعدی به صورت رابطه (۱) است.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho C_p T\right)+\nabla.\left(\rho C_p u T\right)=\nabla.\left(k\nabla T\right)-F+Q \qquad (۱)$$

که در آن ρ چگالی ماده، c_v ظرفیت گرمای ویژه، T دمای ماده در هر لحظه، k رسانایی حرارتی وابسته به دما و t زمان می‌باشد. F عبارت اضافی است که گرمای نهان ذوب را لحاظ کرده و به صورت رابطه (۲) تعریف می

شود.

$$F = \rho L\left(\nabla f\right) \quad (۲)$$

همچنین Q چشمه حرارتی بوده و به صورت رابطه (۳) بیان می‌گردد.

$$Q = \frac{fP}{\pi abd}\exp(-\frac{fx^2}{a^2})\exp(-\frac{fy^2}{b^2})\exp(-\frac{fz^2}{d^2}) \quad (۳)$$

که در آن Q بیانگر توزیع گوسی انتقال حرارت، P توان حرارتی لیزر، a و b و d ابعاد چشمه و f ضریب توزیع توان حرارتی می‌باشد. برای حفره کروی، a، b و d را می‌توان برابر با r در نظر گرفت. η راندمان منبع حرارتی می‌باشد. برای مدلسازی هر چه دقیق‌تر منبع حرارت، پرتو لیزر به صورت یک منبع حرارت حجمی سه بعدی تعریف می‌شود. در شکل ۱ منبع حرارتی سه بعدی مخروطی گاوسین نشان داده شده است.

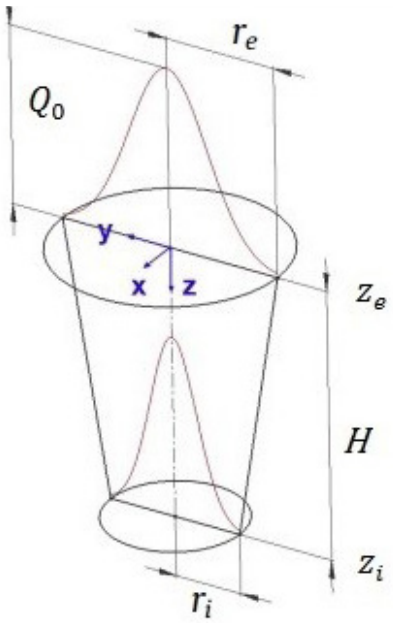


Fig. 1. Three dimensional Gaussian heat source

شکل ۱: منبع حرارتی سه بعدی مخروطی گاوسین [۱۵]

در رابطه (۴)، شدت جریان پرتو لیزر تعریف می‌گردد.

$$I = \frac{fp\eta}{\pi ab}\exp\left(-\frac{fx^2}{a^2}\right)\exp\left(-\frac{fy^2}{b^2}\right) \quad (۴)$$

برای تحلیل انتقال حرارت در نرم‌افزار اپن فوم، ابتدا معادله مربوط به کسر حجمی مایع[1] (رابطه (۵)) حل می‌گردد. در رابطه (۵)، f_L کسر حجمی مایع بوده و تابع دما است.

$$f_L = \begin{cases} 1 & T > T_L \\ \dfrac{T - T_s}{T_L - T_s} & T_s < T < T_L \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (۵)$$

که در آن T_s و T_l به ترتیب نقاط انجماد و ذوب قطعه می‌باشد و مقدار آنها وابسته به جنس ماده است. در حین جوشکاری منطقه متأثر از گرما، ذوب نمی‌شود، ولی تحت تغییرات پیچیده گرمایی و تنش قرار می‌گیرد. با تغییر حرارت اعمال شده در جوشکاری، مشخصات منطقه متأثر از گرما، نیز تغییر می‌کند. بعد از حل رابطه (۵)، معادلات پیوستگی و مومنتوم که به ترتیب با روابط (۶) و (۷) نشان داده می‌شود حل شده و برای سرعت مقداری به عنوان حدس اولیه در نظر گرفته می‌شود.

$$\nabla U = 0 \quad (۶)$$

فرض می‌شود که سیال غیر قابل تراکم باشد. با در نظر گرفتن فرضیه بوزینسک وابستگی کمی بین چگالی و دما لحاظ شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(u) + \nabla\cdot(u.u) = \frac{1}{\rho}\nabla p + \mu\nabla^2 u - \frac{\mu}{\rho K}(u - U_s) + g\beta(T - T_{ref}) \quad (۷)$$

که در آن β ضریب انبساط حرارتی قطعه، عبارت $g\beta(T\text{-}T_{ref})$ بیانگر تغییرات چگالی برحسب دما براساس فرضیه بوزینسک، U_s سرعت لیزر و k بیان‌گر نفوذپذیری قطعه است. عبارت $(\mu/\rho k)(u\text{-}U_s)$ مقاومت دارسی است [۱۶]. مقدار آن از طریق رابطه کوزنی–کارمن به دست می‌آید [۱۷]. q نیز عدد بسیار کوچکی است که مانع از صفر شدن مخرج کسر می‌شود.

$$\frac{1}{K} = \frac{D(1 - f_L)^2}{f_L^3 + q} \quad (۸)$$

ضریب D وابسته به ناحیه خمیری شکل است و مقدار آن 10^{7} m^{-2} در نظر گرفته می‌شود. پس از حل روابط (۷) و (۸)، معادله انرژی (رابطه (۱)) حل شده و دما به‌روزرسانی شده، سپس با استفاده از الگوریتم پیزو، معادله فشار (رابطه (۷)) حل شده و سرعت جریان مذاب تصحیح می‌شود.

رابطه (۹)، معادله انتقال حرارت همرفت در بالای حوضچه مذاب را نشان می‌دهد.

$$-K\nabla(T) = I - h_c(T - T_{amb}) \quad (۹)$$

که در آن h_c، ضریب انتقال حرارت همرفت محیط و T_{amb} دمای محیط است.

در این مطالعه از روش اویلر برای گسسته‌سازی عبارات زمانی و روش پادسو[2] برای گسسته‌سازی عبارات دیورژانس و روش خطی برای گسسته‌سازی

1 Liquid fraction index

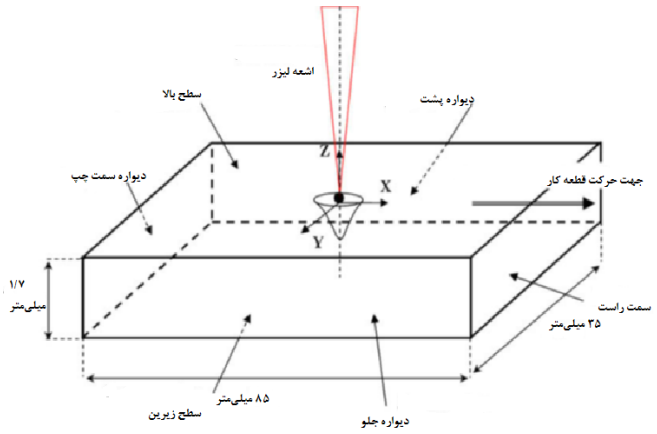
2 Upwind

ترم‌های لاپلاسین استفاده می‌شود. این ترم‌ها پس از گسسته‌سازی تبدیل به معادله جبری می‌شوند که توسط روش PCG[1] برای معادله فشار و روش PBICG[2] برای معادله انرژی و سرعت استفاده می‌شود [۱۸و ۱۹].

٤- هندسه مدل و خواص آن

۴- ۱- هندسه مدل

مدل ایجاد شده مکعبی با طول ۸۵ میلیمتر، عرض ۳۵ میلیمتر و ضخامت صفحه ۱/۷ میلیمتر می‌باشد و برای ایجاد شبکه از مش هگزاهدرال استفاده می‌شود. هندسه قطعه و شبکه‌بندی در شکل ۲ نشان داده شده است.



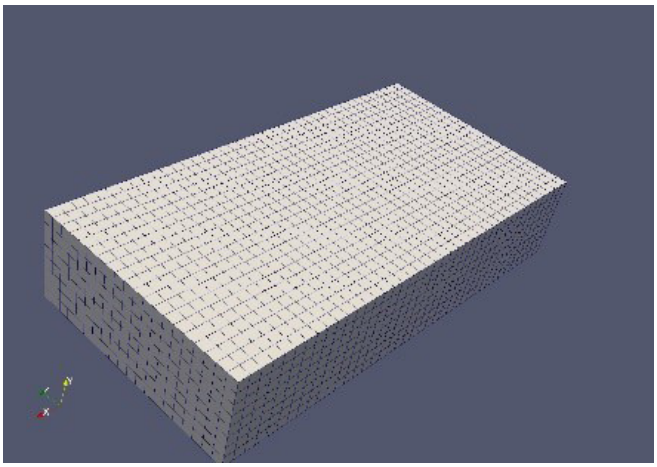


Fig. 2. Geometry and mesh of the model

شکل ۲: هندسه و شبکه‌بندی قطعه

۴- ۲- خواص مکانیکی و حرارتی قطعه

جدول ۲، خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ و جدول ۳، درصد عناصر آلیاژ را نشان می‌دهد.

۴- ۳- شرایط مرزی

جدول ۴، نشانگر شرایط مرزی برای شبیه‌سازی قطعه می‌باشد که در آن $\partial y/\partial T$، ضریب کشش سطحی می‌باشد.

1 Preconditioned Conjugate Gradient
2 Preconditioned Bi-Conjugate Gradient

جدول ۲: خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ و پارامترهای لیزر [۲۰]

Table 2. Thermal and mechanical properties of alloy and laser parameters

پارامتر	مقدار
هدایت گرمایی [W/m.K]	۶/۷
ظرفیت گرمای ویژه [J/kg.K]	۵۶۰
دمای انجماد [°C]	۱۶۰۴
دمای ذوب [°C]	۱۶۶۰
دمای محیط [°C]	۲۰
مدول یانگ [GPa]	۱۱۳/۸
چگالی [kg/mm^3]	۴۴۲۰
ضریب پواسون	۰/۳۳
توان لیزر [kW]	۱۷۰۰
سرعت حرکت لیزر [mm/s]	۱۳/۳۴

جدول ۳: درصد عناصر آلیاژ Ti6Al4V [۲۱]

Table 3. Weight percentage of Ti6Al4V alloy

عنصر	درصد
T_i	۹۰/۰۲
Va	۳/۹۸
Al	۶

۵- نتایج و بحث

به منظور ارزیابی مدل حجم محدود پیشنهادی، نتایج حاصله از این تحلیل توسط نتایج به دست آمده از فعالیت‌های تجربی مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. بدین منظور شکل حوضچه جوش شبیه‌سازی شده با نمونه تجربی آن مقایسه می‌شود.

۵- ۱- بررسی توزیع دما در قطعه

شکل‌های ۳ و ۴ توزیع دمای به دست آمده از نتایج حجم محدود را در حالت سه بعدی نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، ملاحظه می‌شود که در نواحی نزدیک به مرکز جوش، دما پس از ۱/۵۲ ثانیه تا حدود ۱۶۶۰ کلوین افزایش می‌یابد ولی در نواحی دورتر از مرکز جوش بیشینه دمایی در حدود ۳۰۰ درجه کلوین است. همانطور که مشخص است تغییرات دمایی در نقاط نزدیک به مرکز جوش بسیار بیشتر از نقاط دورتر نسبت به مرکز جوش می‌باشد. همچنین بر اساس شکل‌های ۳ و ۴، ناحیه خمیری در طول جوشکاری بسیار کوچک می‌باشد که دلیل آن گرادیان بزرگ دمایی در قطعه کار می‌باشد.

جدول ٤: شرایط مرزی شبیه‌سازی

Table 4. Boundary condition of simulation

	T [K]	U [m/s]	V [m/s]	W [m/s]
سطح بالا	Q	$\mu\frac{\partial U}{\partial z}=-\frac{\partial \gamma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial x}$	$\mu\frac{\partial V}{\partial z}=-\frac{\partial \gamma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial y}$	۰
سطح زیرین	$q=h(T-T_{amb})$	۰	۰	۰
منبع گرما	–	۴۰,۱۳/۳۴	۰	۰
دیواره راست	۲۹۳	۰	۰	۰
دیواره چپ	۲۹۳	۰	۰	۰
دیواره جلو	۲۹۳	۰	۰	۰
دیواره پشت	۲۹۳	۰	۰	۰

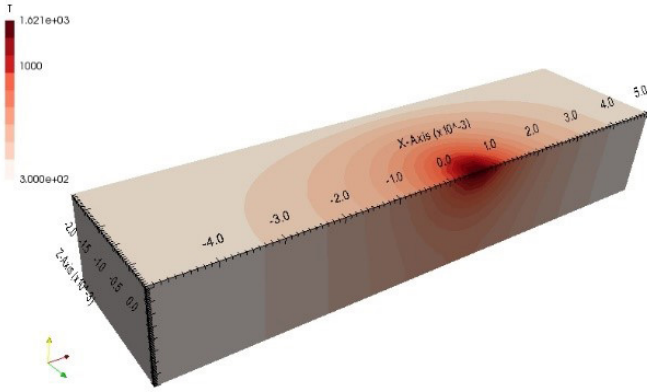


Fig. 3. Three-dimensional temperature distribution in longitudinal direction after 1.52 S

شکل ۳: توزیع دمایی قطعه در حالت سه بعدی بعد از گذشت ۱/۵۲ ثانیه در طول قطعه

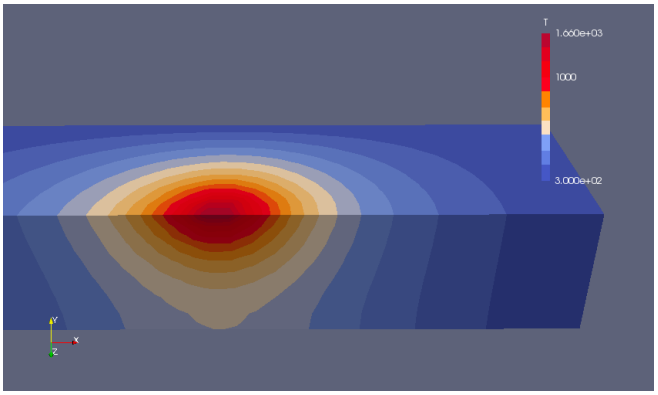


Fig. 4. Three-dimensional temperature distribution in depth direction of part after 1 s

شکل ٤: توزیع دمایی قطعه در حالت سه بعدی بعد از گذشت ۱ ثانیه در راستای عمق قطعه

در شکل ۵، روند تغییر دمای مرکز قطعه نسبت به زمان نشان داده شده است. همانطور که مشخص است بیشینه دمایی جوش در طی فرآیند، حدود ۴۲۰۰ کلوین می‌باشد که پس از گذشت حدود ۰/۲ ثانیه از شروع فرآیند به این دما رسیده و پس از آن طبق نمودار شکل ۵، با گذشت زمان، دما کاهش می‌یابد. صعود دما به دلیل اعمال حرارت ناشی از منبع حرارتی به نقطه مورد نظر است و از آن نقطه به بعد با توجه به حرکت منبع لیزر و سرد شدن ماده سیر نزولی به خود می‌گیرد.

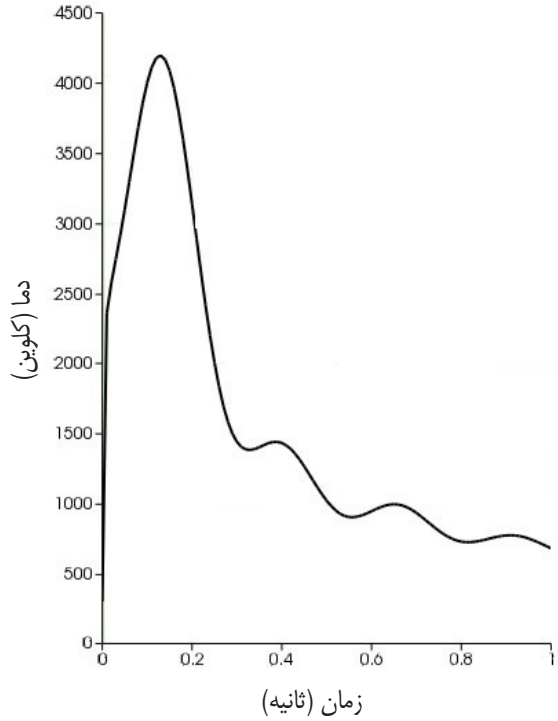


Fig. 5. Variation of temperature versus time in the center of part

شکل ٥: روند تغییر دمای مرکز قطعه نسبت به زمان

۵- ۲- درصد ماده مذاب

با استفاده از تابع f_L(رابطه (۵))، میزان ذوب قطعه در هر قسمت از عرض آن مشخص می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است در مرکز

جوش، قطعه کاملاً مذاب است و با فاصله گرفتن از مرکز جوش، میزان مذاب کاهش پیدا کرده و به مقدار جامد افزوده می‌شود. بر اساس این نمودار، در مرکز جوش مذاب به وجود آمده و با فاصله گرفتن از مرکز جوش، قطعه به دلیل انتقال حرارت به حالت جامد قبلی تبدیل می‌شود.

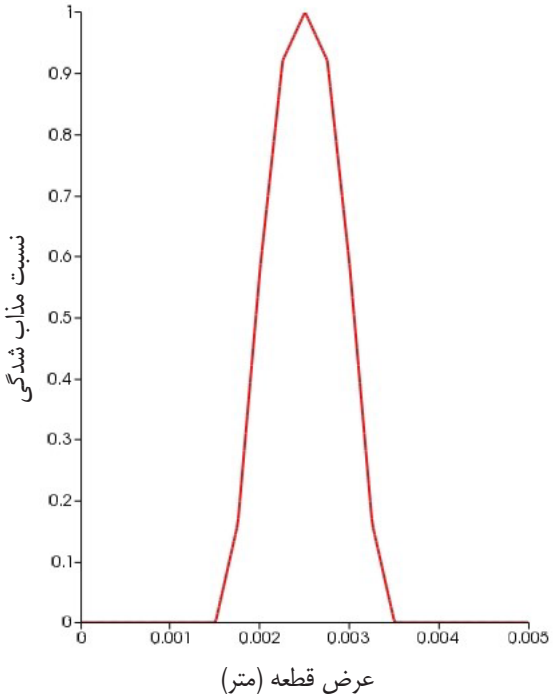


Fig. 6. Molten percent versus width of part

شکل ٦: میزان ذوب در قطعه در راستای عرض جوش

شکل ۷ روند تغییرات f_L را در راستای عمق قطعه نشان می‌دهد. قطعه پس از شروع فرآیند جوش‌کاری به حالت مذاب درآمده و مقدار f_L برابر با یک است سپس با حرکت به عمق قطعه از میزان درصد مذاب کاسته شده و در انتها f_L برابر صفر می‌گردد یعنی تمامی قطعه در حالت جامد قرار می‌گیرد.

نقطه‌ای که درصد مذاب و همینطور مقدار f_L از یک، رو به کاهش است، در شکل ۷، کاملاً مشخص گردیده است. با توجه به این نمودار، همانطور که انتظار می‌رفت، می‌توان نتیجه گرفت که نسبت مذاب‌شدگی غالباً با حرکت در راستای عمق، به دلیل کاهش قدرت ذوب لیزر در فاصله دورتر نسبت به سطح قطعه، کاهش می‌یابد. در سطح قطعه با افزایش شار حرارتی وارد شده گرادیان دما زیاد و زمان نفوذ جوش کمتر می‌شود.

۵- ۳- سرعت مذاب جوش

در فرآیند جوشکاری گرادیان دما باعث ایجاد دو نیروی شناوری و کشش سطحی می‌شود. نیروی شناوری وابسته به چگالی و گرادیان دما می‌باشد .

از طرفی چگالی خود وابسته به تغییرات دما است. این نیرو باعث حرکت جریان مذاب از مرکز به طرف محیط می‌شود. نیروی کشش سطحی که به نیروی مارانگونی نیز شناخته می‌شود، وابسته به ضریب دمای کشش سطحی

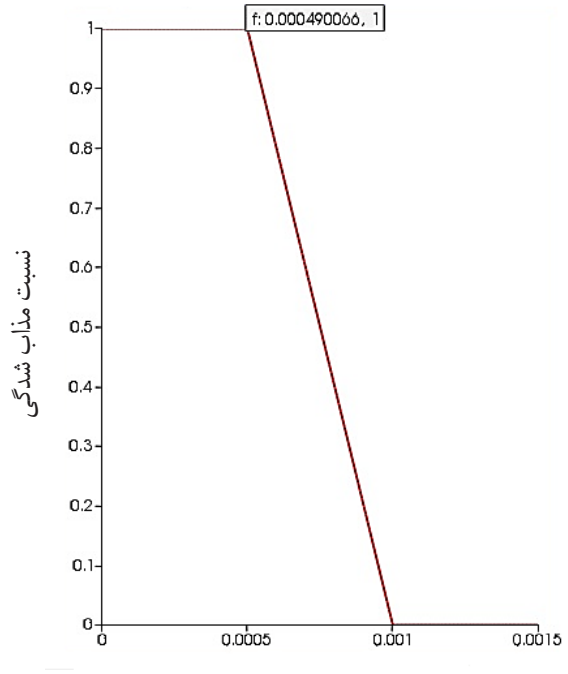


Fig. 7. Variation of f_L versus depth of part

شکل ۷: روند تغییرات f_L در راستای عمق قطعه

و گرادیان دما می‌باشد. از طرفی خود ضریب دمای کشش سطحی می‌تواند به عنوان تابعی از دما بیان شود.

سرعت مذاب در جوشکاری لیزر در سه راستا اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۸، تغییرات سرعت در راستای عرض قطعه را نشان می‌دهد.

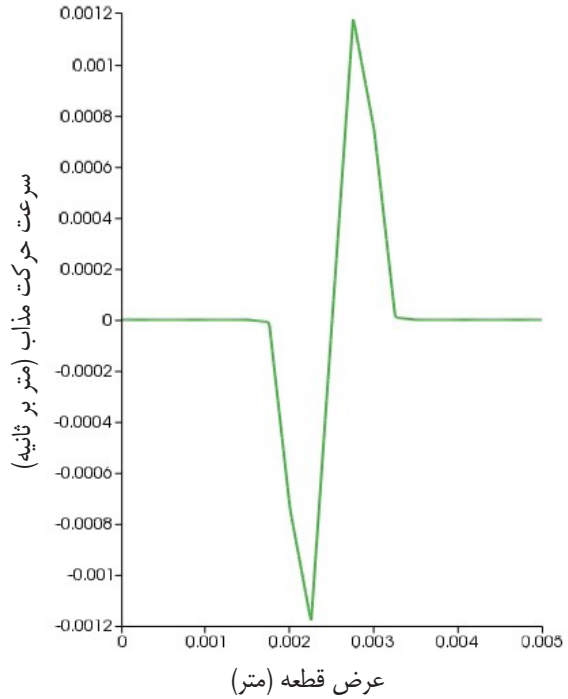


Fig. 8. Variation of speed versus width of part

شکل ۸: تغییرات سرعت در راستای عرض قطعه

با حرکت در راستای عرض قطعه و رسیدن به مرکز جوش، سرعت حرکت مذاب به بیشترین حد خود می‌رسد. گسترش اندازه حوضچه مذاب با گذشت زمان با سرعت یکنواخت انجام نمی‌شود و جریان فلز مذاب بیشتر و قوی‌تر می‌شود. وجود شیب تند در نمودار به علت تغییر جهت سرعت مذاب می‌باشد. در ادامه نیز اندازه سرعت حرکت کاهش می‌یابد تا به مقدار صفر برسد.

همچنین شکل ۹، سرعت در راستای عمق قطعه را نشان می‌دهد که با دورتر شدن از سطح قطعه، به دلیل کمتر شدن دمای توزیع شده، سرعت حرکت مذاب با شیب تندی کاهش می‌یابد.

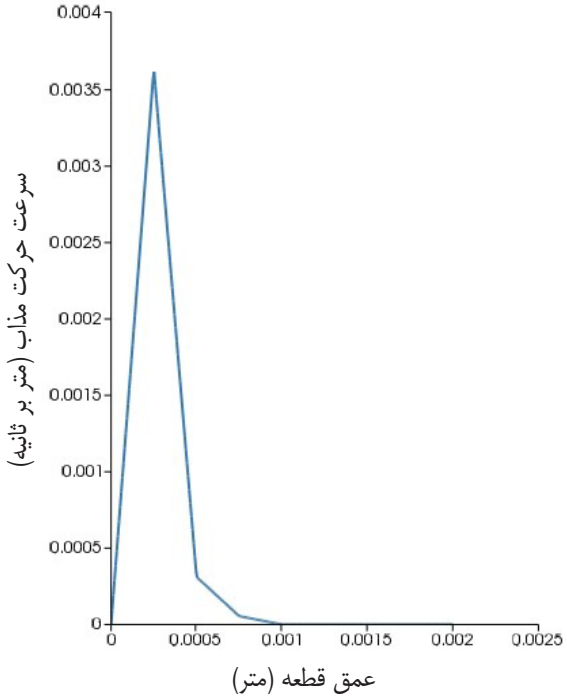


Fig. 9. Molten velocity versus depth of part

شکل ۹: سرعت حرکت مذاب در راستای عمق قطعه

شکل ۱۰، تغییرات سرعت در راستای عرض قطعه و در عمق ۰/۵ میلیمتری را نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های ۸ و ۱۰، نشان می‌دهد که در عمق ۰/۵ میلیمتری اندازه سرعت کاهش پیدا کرده است.

شکل ۱۱ تغییرات سرعت نسبت به زمان را نشان می‌دهد. مقادیر منفی سرعت به دلیل جهت منفی نسبت به محورهای مختصات انتخابی می‌باشد. حداکثر سرعت مذاب گزارش شده در حین شبیه‌سازی جوشکاری در حدود ۱۱/۸ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد.

۵- ۴- صحه‌گذاری مدل

حوضچه جوش به دست آمده از نتایج تجربی و توزیع دمایی آن به همراه تاریخچه دمایی مدل حجم محدود شبیه‌سازی شده در مختصات و زمان مشابه، در شکل ۱۲ مشخص شده است. خطای شبیه‌سازی به ترتیب

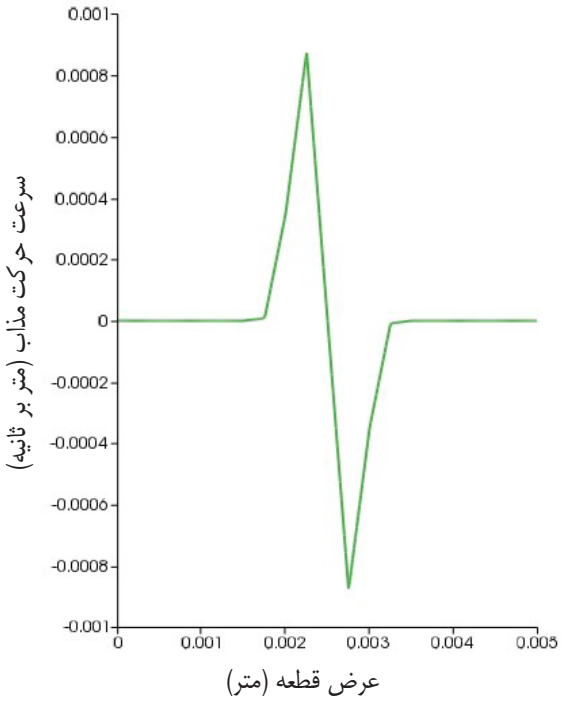


Fig. 10. Variation of speed versus width of part in depth of 0.5 mm

شکل ۱۰: تغییرات سرعت در راستای عرض قطعه در عمق ۰/۵ میلیمتری

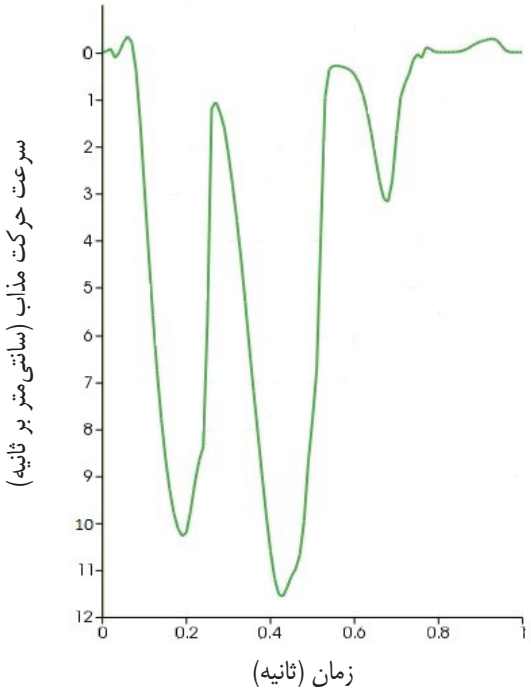


Fig. 11. Variation of molten speed for one node versus time

شکل ۱۱: تغییرات سرعت جریان مذاب در یک نقطه با زمان

برای عرض مذاب و عمق نفوذ، ۱۲/۵ و ۷ درصد می‌باشد که در جدول ۵، نشان داده شده است.

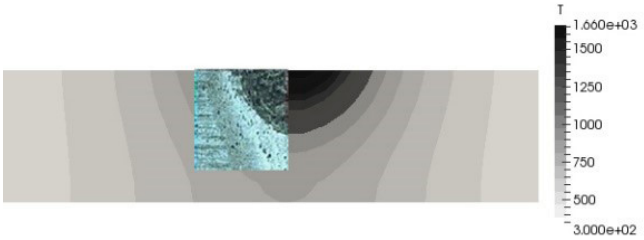


Fig. 12. Comparison of calculated and experimental weld geometry at laser power of 1700 W, speed of 13.43 mm/s and depth of 0.5 mm

شکل ۱۲: مقایسه منطقه متاثر از گرما در ۲ حالت تجربی و عددی در راستای عمق قطعه. توان لیزر ۱۷۰۰ وات، سرعت ۱۳/۳٤ میلیمتر بر ثانیه، عمق ۰/۵ میلیمتر

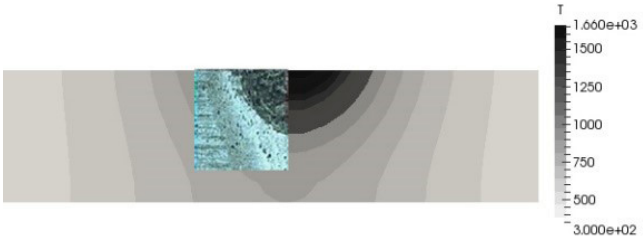


Fig. 13. Comparison of calculated and experimental weld geometry at laser power of 1700 W, speed of 40 mm/s and depth of 0.5 mm

شکل ۱۳: مقایسه منطقه متأثر از گرما در ۲ حالت تجربی و عددی بعد از ۱/۵۲ ثانیه در راستای عمق قطعه. توان لیزر ۱۷۰۰ وات، سرعت ٤۰ میلیمتر بر ثانیه، عمق ۰/۵ میلیمتر

جدول ۵: مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای هندسی جوش و میزان خطا در سرعت جوشکاری ۱۳/۳٤ میلیمتر بر ثانیه

Table 5. Measured values of geometrical welding parameters and error percentage at welding speed of 13.34 mm/s

پارامترهای هندسی جوش	مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی	مقادیر اندازه‌گیری شده عددی	درصد خطا
عمق نفوذ	۱۳۵	۱۴۵	۷
عرض جوش	۱۲۰	۱۳۵	۱۲/۵

همچنین شکل ۱۳، تاریخچه دمایی قطعه در ۲ حالت تجربی و عددی را برای سرعت ۴۰ میلیمتر بر ثانیه بعد از گذشت ۱/۵۲ ثانیه از شروع فرآیند نمایش می‌دهد، مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که نتایج عددی و تجربی تطابق خوبی با یکدیگر دارند. در روش جوشکاری لیزری مساحت و نسبت عمق به عرض مقطع عرضی جوش به ترتیب بیانگر حرارت جذب شده توسط قطعه‌کار و تمرکز پدیده لیزر است. خطای مشاهده شده در نمودارهای دمایی ناشی از نحوه مدلسازی منبع دمایی و شرایط انتقال حرارت با محیط اطراف می‌باشد. همچنین یکی از علت‌های خطا، به دلیل نادیده گرفتن اثر حفره ایجاد شده در حوضچه مذاب در جوشکاری می‌باشد. حفره ایجاد شده در حوضچه مذاب در بخش دما و نفوذ جوش قطعه‌کار اثر می‌گذارد که در این مطالعه از مدلسازی حفره صرفنظر شده است. خطای شبیه‌سازی به ترتیب برای عرض مذاب و عمق نفوذ،۲۰ و ۶ درصد می‌باشد. که در جدول ۵، نشان داده شده است.

٦- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عددی توزیع دما، سرعت حرکت مذاب و عمق نفوذ گرما در جوشکاری لیزر آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V پرداخته شده است. مدل عددی شامل یک تحلیل حجم محدود است که در آن پارامترهای فرآیند جوشکاری اعم از ابعاد قطعه، خواص آن، منبع حرارتی، شرایط مرزی و نیروهای موثر در فرآیند جوشکاری، شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج مدل

جدول ٦: مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای هندسی جوش و میزان خطا در سرعت جوشکاری ٤۰ میلیمتر بر ثانیه

Table 6. Measured values of geometrical welding parameters and error percentage at welding speed of 40 mm/s

پارامترهای هندسی جوش	مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی	مقادیر اندازه‌گیری شده عددی	درصد خطا
عمق نفوذ	۱۵۰	۱۸۰	۲۰
عرض جوش	۲۱۵	۲۳۰	۶

حجم محدود شبیه‌سازی شده با استفاده از نتایج تجربی اندازه‌گیری شده، صحه‌گذاری شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری لیزر آلیاژ تیتانوم Ti6Al4V به صورت ذیل خلاصه می‌گردد:

۱. تطابق خوب نتایج حرارتی به دست آمده از تحلیل حجم محدود و اندازه‌گیری تجربی آن، نشان می‌دهد که مدل شار حرارتی گوسی استفاده شده جهت شبیه‌سازی منبع حرارتی جوشکاری لیزر مناسب است.

۲. توزیع دما از لحاظ شکل هندسی، کمینه و بیشینه دمایی با نتایج تجربی تطابق دارد.

۳. توزیع دمایی در نقاط مختلف قطعه نشان می‌دهد که مقادیر دما در نزدیکی خط جوش در آلیاژ تیتانیوم خیلی بیشتر از نقاط دورتر از خط جوش می‌باشد. به‌گونه‌ای که در مرکز خط جوش دما۱۶۰۰ درجه و در اطراف حدود ۵۰۰ درجه می‌باشد. همچنین نقاط دورتر از مرکز جوش تغییرات دمایی بسیار پایینی دارند.

۴. سرعت جریان مذاب در راستای عرض قطعه به صورت صعودی افزایش می‌یابد و بعد از مرکز جوش به دلیل تغییر جهت سرعت حرکت مذاب، سرعت به شکل نزولی کاهش می‌یابد اما اندازه سرعت حرکت مذاب در مرکز جوش بیشترین است.

۵. درصد خمیری بودن یا مذاب در راستای عمق قطعه کاهش می‌یابد، که تابع f_L نشانگر منطقه متأثر از گرما می‌باشد.

منابع

[1] m. safian, m. akhlaghi, Determine the temperature distribution and residual stresses during welding with nonlinear finite element method with using a double ellipsoid heat source model in: *15th Annual Conference of Mechanical Engineering*, Amirkabir University of Technology, 1386.

[2] E. Abedini, H. Ajam, M. Yazdi, Three-dimensional simulation of fluid flow in the laser welding process, in: *16th Annual Conference of Mechanical Engineering*, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University, 1387.

[3] K. Abderrazak, W. Kriaa, W. Ben Salem, H. Mhiri, G. Lepalec, M. Autric, Numerical and experimental studies of molten pool formation during an interaction of a pulse laser (Nd: YAG) with a magnesium alloy, *Optics & Laser Technology*, 41(4) (2009) 470-480.

[4] F. Javidrad, H. Farghadani, M. Haydari, M. Mashayekhy, An investigation into the microstructure and mechanical properties of Ti-3Al -2.5V under micro-plasma arc welding, *Modares Mechanical Engineering*, 13(14) (2014) 199-209.

[5] R.D. Cook, *Concepts and applications of finite element analysis*, John Wiley & Sons, (2007).

[6] A.-K. Nehad, Enthalpy technique for solution of Stefan problems: application to the keyhole plasma arc welding process involving moving heat source, *International communications in heat and mass transfer*, 22(6) (1995) 779-790.

[7] H. Du, L. Hu, J. Liu, X. Hu, A study on the metal flow in full penetration laser beam welding for titanium alloy, *Computational materials science*, 29(4) (2004) 419-427.

[8] R. Rai, J. Elmer, T. Palmer, T. DebRoy, Heat transfer and fluid flow during keyhole mode laser welding of tantalum, Ti-6Al-4V, 304L stainless steel and vanadium, *Journal of physics D: Applied physics*, 40(18) (2007) 5753-5763.

[9] Q. Han, D. Kim, D. Kim, H. Lee, N. Kim, Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4, *Journal of Materials Processing Technology*, 212(5) (2012) 1116-1122.

[10] R. Keanini, B. Rubinsky, PLASMA-ARC WELDING UNDER NORMAL AND ZERO GRAVITY, *Welding Journal*, 69(6) (1990) 41-50.

[11] X. He, P. Fuerschbach, T. DebRoy, Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(12) (2003) 1388-1398.

[12] L. Yang, X. Peng, B. Wang, Numerical modeling and experimental investigation on the characteristics of molten pool during laser processing, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(23) (2001) 4465-4473.

[13] E. Akman, A. Demir, T. Canel, T. S?nmazçelik, Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys, *Journal of materials processing technology*, 209(8) (2009) 3705-3713.

[14] B.-C. Sim, W.-S. Kim, Melting and dynamic-surface deformation in laser surface heating, *International journal of heat and mass transfer*, 48(6) (2005) 1137-1144.

[15] M.D. H.Wangand, Tensile properties of LBW welds in Ti-6Al-4V alloy at evaluated temperatures below 450 °C, *Materials Letters*, 57(12) (2003) 1815- 1823.

[16] G.O. Brown, The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance, *Environmental and Water Resources History*, 38(7) (2002) 34-43.

[17] J.G. Berryman, S.C. Blair, Kozeny-Carman relations and image processing methods for estimating Darcy's constant, *Journal of Applied Physics*, 62(6) (1987) 2221-2228.

[18] T. Behrens, OpenFOAM's basic solvers for linear systems of equations, Solvers, preconditioners, *smoothers*, (2009).

[19] J. Nocedal, S.J. Wright, *Conjugate gradient methods*, Springer, 2006.

[20] X. Cao, M. Jahazi, Effect of welding speed on butt joint quality of Ti-6Al-4V alloy welded using a high-power Nd: YAG laser, *Optics and Lasers in Engineering*, 47(11) (2009) 1231-1241.

[21] A. Khorram, M. Ghoreishi, M.R.S. Yazdi, M. Moradi, Optimization of Bead Geometry in CO2 Laser Welding of Ti 6Al 4V Using Response Surface Methodology, *Engineering*, 3 (2011) 708-712.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

J. Maleki Nejad, M. Ghoreishi, A. Khorram, "Numerical Study of Melt Flow and Depth of HAZ in Laser Welding of Titanium Alloy Plate Ti6Al4V" *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(2) (2017) 423-431.

DOI: 10.22060/mej.2016.752