



پژوهش نامه ریخته گری

شبیه سازی حرارتی فرایند روکش کاری لیزری پوشش آلیاژ آنتروپی بالا $TiNiCrMoW-ZrB_2$ روی سوپر آلیاژ IN738

حسن درگی^۱، رضا تقی آبادی^{۲*}، مرتضی ثقفی یزدی^{۳*}، مرتضی طاهری^۳، وایرا ویگنش^۴

۱- دانشجوی دکترای تخصصی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- دکترای مهندسی مواد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۴- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی آمیرتا، آمیرتا ویشوا ویدیاپیتهم، کویمباتور ۶۴۱۱۱۲، هندوستان

نویسنده مسئول: taghiabadi@ikiu.ac.ir و msaghafi@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، فرآیند روکش کاری لیزری پوشش از جنس آلیاژ آنتروپی بالای $TiNiCrMoW-ZrB_2$ روی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸ (IN738) به صورت عددی و با استفاده از نرم افزار Sysweld شبیه سازی شده است. هدف از این مطالعه، پیش بینی دقیق میدان دما، گرادیان های دمایی، ابعاد حوضچه مذاب و بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند مانند توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر است. مدل اجزای محدود سه بعدی طراحی شده با در نظر گرفتن انتقال حرارت رسانشی، همرفتی و تابشی، توانست رفتار حرارتی فرآیند را با دقت بالا بازتولید کند. در مدل سازی عددی، از منبع حرارتی گاوسی با توزیع توان بیضوی برای بازنمایی دقیق پرتو لیزر استفاده شد و شرایط مرزی شامل رسانش در زیرلایه، همرفت سطحی و تابش حرارتی به محیط اعمال گردید تا رفتار واقعی انتقال حرارت در فرآیند شبیه سازی بازتولید شود. نتایج شبیه سازی نشان داد افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش منجر به افزایش دمای حوضچه مذاب، بهبود ذوب و چسبندگی متالورژیکی می شود. مقایسه ی داده های عددی با نتایج تجربی حاصل از اندازه گیری ترموکوپل ها همخوانی بسیار خوبی داشت که صحت مدل را تأیید می کند. در مجموع، استفاده از شبیه سازی حرارتی روشی مؤثر برای بهینه سازی پارامترهای فرآیند، کاهش هزینه ها و درک عمیق تر از رفتار حرارتی و ریزساختاری آلیاژهای آنتروپی بالا در روکش کاری لیزری به شمار می رود.

کلمات کلیدی: روکش کاری لیزری، شبیه سازی، آلیاژ آنتروپی بالا، $TiNiCrMoW-ZrB_2$ ، سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸

Thermal Simulation of Laser Cladding Process of High Entropy Alloy TiNiCrMoW-ZrB₂ Coating on IN738 Superalloy

H. Dargi¹, R. Taghiabadi^{2*}, M. Saghafi Yazdi^{2*}, M. Taheri³, V. Vignesh⁴

1- PhD Student, Department of Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Associate Professor, Department of Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3- PhD in Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

4- Department of Mechanical Engineering, Amirta University of Engineering, Amrita Vishwa Vidyapeetham, Coimbatore 641112, India

Corresponding authors: taghiabadi@ikiu.ac.ir and msaghafi@eng.ikiu.ac.ir

Abstract

In this paper, the laser cladding of high entropy alloy TiNiCrMoW-ZrB₂ coating on Inconel 738 (IN738) superalloy was numerically simulated using Sysweld software. The aim was to accurately predict the temperature field, temperature gradients, molten pool dimensions, and investigate the effect of process parameters such as laser power, scanning speed, and powder feed rate. The 3D finite element model designed by considering conductive, convective, and radiative heat transfer was able to reproduce the thermal behavior of the process with high accuracy. In numerical modeling, a Gaussian heat source with an elliptical power distribution was used to accurately represent the laser beam, and boundary conditions including conduction in the substrate, surface convection, and thermal radiation to the environment were applied to reproduce the real heat transfer behavior in the simulation process. The simulation results showed that increasing the laser power and decreasing the scanning speed led to an increase in the molten pool temperature, improved melting, and metallurgical bonding to the substrate. Comparison of numerical data with experimental results obtained from thermocouple measurements showed very good agreement, which confirms the accuracy of the model. Overall, the use of thermal simulation is an effective method to optimize process parameters, reduce costs, and gain a deeper understanding of the thermal and microstructural behavior of high-entropy alloys in laser cladding.

Keywords: Laser cladding, simulation, high entropy alloy, TiNiCrMoW-ZrB₂, Inconel 738 superalloy

۱- مقدمه

پره‌های مورد استفاده در ساخت توربین‌های گازی غالباً به علت بروز پدیده‌هایی مانند فرسایش^۱، خوردگی و اکسیداسیون و در نتیجه افت کیفیت سطحی و کارایی، بعد از مدتی کارکرد نیاز به تعویض دارند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سالانه هزینه‌ی بسیار زیادی صرف ترمیم و/یا تعویض و جایگزینی پره‌های فرسوده می‌شود. بر این اساس، محققان در صدد یافتن روش‌هایی برای تولید پره‌های توربین گازی با خواص سطحی برتر شده‌اند. یکی از این روش‌ها، اعمال روکش‌های مقاوم در برابر پدیده‌های مخرب سطحی به روش روکش کاری لیزری است که استفاده صحیح از آن باعث افزایش طول عمر پره، کاهش هزینه‌های تولید و کاهش زمان توقفات توربین خواهد شد. در واقع با استفاده از این روش می‌توان بدون صرف هزینه بالا در انتخاب مواد پره، خواص مورد نظر را در محل‌های مورد نیاز (سطح) به صورت موضعی ایجاد کرد [۱ و ۲].

مروری بر منابع مطالعاتی نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه توسعه پوشش‌های فلزی، کامپوزیتی و سرمته روی پره‌های توربین صورت پذیرفته است که از جمله می‌توان به پوشش‌های سد حرارتی^۲، پوشش‌های آلومینایدی، پوشش‌های تولید شده به روش پاشش حرارتی پر سرعت سوخت (HVOF^۳)، اسپری حرارتی^۴ و روکش کاری لیزری^۵ اشاره نمود [۳ و ۴]. با این حال، سهم تحقیقات انجام شده در زمینه روکش کاری لیزری پره‌های توربین نسبت به سایر روش‌ها بسیار کمتر است. بررسی دقیق منابع مطالعاتی همچنین حاکی از آن است که علی‌رغم ویژگی‌های مثبت و خواص برتر و منحصر به فرد آلیاژهای آنتروپی بالا^۶، تاکنون تحقیقات محدودی در زمینه توسعه روکش‌های لیزری از جنس این آلیاژها به ویژه از نوع سرمته انجام شده است.

در طراحی آلیاژهای آنتروپی بالا از چندین عنصر اصلی (حداقل پنج و حداکثر سیزده عنصر با درصدهای اتمی مشابه یا تقریباً مشابه، معمولاً بین ۵ تا ۳۵ درصد) استفاده می‌شود. اساس این آلیاژها، آنتروپی وضعیتی عناصر است که در ترکیب با نسبت‌های اتمی برابر به حداکثر مقدار خود رسیده، با افزایش تعداد عناصر در سیستم افزایش یافته و از تشکیل ترکیبات بین فلزی جلوگیری می‌کند. همچنین، ساختارهای نهایی تشکیل شده در محلول جامد می‌تواند به صورت‌های مختلف مکعب مرکزدار (BCC)، مکعب وجوه مرکزدار (FCC) و یا ترکیبی از هر دو باشند [۵ و ۶]. از جمله ویژگی‌های بارز این آلیاژها، اعوجاج شدید شبکه به علت متفاوت بودن شعاع اتمی عناصر و همچنین سرعت نفوذ کم در آنها است و به دلیل داشتن خواص منحصر به فرد همچون استحکام بالا، مقاومت به سایش زیاد، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون

¹ Erosion

² Thermal barrier coatings

³ High-velocity oxygen fuel

⁴ Thermal spray

⁵ Laser cladding

⁶ High entropy alloys

مناسب و ... کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مهندسی پیدا کرده‌اند [۶-۸]. بنابراین در راستای افزایش راندمان کاری پره‌های توربین گازی، ضرورت افزایش راندمان توربین‌های گازی از طریق افزایش دمای گازهای ورودی و کاهش زیان‌های مالی و اقتصادی ناشی از اعمال پوشش‌های نامناسب به لحاظ چسبندگی، ریزساختار و خصوصیات فیزیکی-شیمیایی، انجام تحقیق در خصوص بهینه‌سازی پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری و توسعه آلیاژهای دیرگداز آنتروپی بالا به عنوان پوشش‌های مقاوم به سایش و خوردگی بسیار حائز اهمیت است.

فرآیند روکش کاری لیزری مشتمل بر بیش از ۱۹ پارامتر فرآیند پیچیده و غیرخطی است اما سه پارامتر توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر بیشترین تأثیر را بر کیفیت لایه روکش کاری دارند [۹ و ۱۰]. برای تولید پوشش‌های با کیفیت بالا، محققان روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند روکش کاری لیزری ارائه نموده‌اند. یک رویکرد، بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر خواص لایه روکش با استفاده از مدل‌های تجربی-آماری و تحلیلی، مانند روش سطح پاسخ^۱، روش رگرسیون خطی^۲ و روش تاگوچی^۳ [۱۱]، برای یافتن پارامترهای بهینه فرآیند است. روش دیگر، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند مانند یادگیری ماشینی^۴ برای ایجاد یک مدل پیش‌بینی‌کننده از رابطه نگاشت بین پارامترهای فرآیند و لایه روکش، برای دستیابی به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند است [۱۳ و ۱۲]. شبیه‌سازی فرایند برای پیش‌بینی نتایج، بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند و کاهش آزمایش‌های پرهزینه توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است [۱۸-۱۴]. بهره‌گیری از فرایند شبیه‌سازی در تحلیل فرایند روکش کاری لیزری به ویژه پوشش‌های ساخته شده از آلیاژهای پیچیده آنتروپی بالا با مزیت‌هایی همراه است که به صورت خلاصه در جدول (۱) مورد اشاره قرار گرفته‌اند.

جدول ۱- برخی از مهمترین مزایای شبیه‌سازی فرایند روکش کاری لیزری آلیاژهای آنتروپی بالا [۱۹]

کاهش هزینه‌های آزمایش	روش‌های تجربی، به ویژه برای آلیاژهای پیچیده آنتروپی بالا غالباً گران و بعضاً ناکارآمد هستند. شبیه‌سازی با پیش‌بینی نتایج نیاز به آزمایش‌های فیزیکی متعدد و هزینه‌های مرتبط با مواد و نیروی کار را به طور قابل توجهی کاهش دهد.
بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند	روکش کاری لیزری شامل پارامترهای زیادی مانند توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر است که تأثیر زیادی بر کیفیت پوشش دارند. شبیه‌سازی به محققان این امکان را می‌دهد که به سرعت اثرات پارامترهای مختلف را بررسی کنند تا تنظیمات بهینه برای کسب خواص مورد نظر حاصل شود.
پیش‌بینی تکامل ریزساختاری	ریزساختار آلیاژهای پیچیده آنتروپی بالا به شدت به شرایط پردازش وابسته است. با انجام شبیه‌سازی، امکان پیش‌بینی ریزساختار تحت چرخه‌های حرارتی مختلف وجود دارد.

¹ Response surface methodology

² Linear regression

³ Taguchi method

⁴ Machine learning

<p>علیرغم اهمیت موضوع، کنترل گرادیان‌های دمایی شدید در فرآیند روکش کاری لیزری دشوار است. بنابراین، شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی دقیق میدان دما، انتقال حرارت و تنش‌های پسماند توسعه یافته طی فرایند بسیار حائز اهمیت است.</p>	<p>درک رفتار حرارتی پیچیده</p>
<p>شبیه‌سازی به عنوان یک ابزار طراحی قدرتمند با مدل‌سازی چگونگی رفتار ترکیبات مختلف تحت شرایط روکش لیزری، محققان را در کشف و طراحی آلیاژهای آنتروپی بالای جدید با خواص برتر برای کاربردهای خاص کمک می‌کند.</p>	<p>تسهیل طراحی مواد</p>

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند روکش کاری لیزری آلیاژهای آنتروپی بالا انجام شده است. برای مثال، چن^۱ و همکاران [۲۰] به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرایند پوشش AICoCrFeNi با استفاده از نرم‌افزار COMSOL پرداختند و تطابق بالای نتایج مدل با داده‌های تجربی را گزارش کردند. همچنین گائو^۲ و همکاران [۲۱] با بهره‌گیری از مدل اجزای محدود، میدان دمایی روکش آلیاژ آنتروپی بالا بر پایه Cr12MoV را شبیه‌سازی و تأیید آزمایشگاهی نمودند. افزون بر آن، کائو^۳ و همکاران [۲۲] و وو^۴ و همکاران [۲۳] از مدل‌سازی عددی و روش پاسخ سطحی برای بهینه‌سازی پارامترهای توان لیزر و سرعت رویش در سیستم‌های آلیاژهای آنتروپی بالا استفاده کردند که هر یک بر نقش شبیه‌سازی در کاهش هزینه‌های تجربی تأکید کردند. در مقایسه با پوشش‌های مرسوم نظیر NiCrAlY که در دماهای بالا مستعد اکسیداسیون و جدایش لایه‌ای هستند، روکش‌های آنتروپی بالای TiNiCrMoW-ZrB₂ با بهره‌گیری از ترکیب چندعنصری و استحکام محلول جامد، پایداری حرارتی و چسبندگی به‌مراتب بهتری نسبت به زیرلایه فراهم می‌سازند، از این‌رو استفاده از این سیستم پوششی می‌تواند جایگزین مؤثرتری برای افزایش طول عمر پره‌های توربین گازی باشد.

با توجه مطاب فوق، در تحقیق حاضر سعی شده است از شبیه‌سازی حرارتی سیس‌ولد^۵ به‌عنوان ابزاری مکمل برای پیش‌بینی دقیق توزیع دما، گرادیان‌های حرارتی و ابعاد حوضچه مذاب و تحلیل بهتر نقش پارامترهای فرآیند بر ریزساختار و خواص نهایی پوشش استفاده شود. این رویکرد علاوه بر کاهش هزینه و زمان آزمایش‌ها، امکان درک عمیق‌تری از مکانیزم‌های حاکم بر فرآیند روکش کاری لیزری فراهم می‌آورد.

¹ Chen

² Gao

³ Cao

⁴ Wu

⁵ Sysweld

۲- روش تحقیق

در تحقیق حاضر از یک مدل المان محدود سه بعدی^۱ برای شبیه سازی فرآیند روکش کاری لیزری در محیط نرم افزار سیس ولد استفاده شد. در این مدل، برهم کنش پرتو لیزر با جریان پودر و زیرلایه به صورت دقیق در نظر گرفته شد و شرایط مرزی حرارتی شامل انتقال حرارت از طریق رسانش^۲ در زیرلایه، همرفت سطحی^۳ و تابش^۴ به محیط اعمال گردید. پس از محاسبه توزیع دما و شیب های دمایی حاصل از فرآیند، نتایج حرارتی به دست آمده برای تحلیل های ریزساختاری و بررسی اثر پارامترهای فرآیندی بر مورفولوژی دانه ها و خواص نهایی پوشش مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد امکان بررسی هم زمان رفتار حرارتی و پیش بینی تغییرات ریزساختاری را فراهم می سازد و درک بهتری از رابطه میان پارامترهای لیزر و کیفیت لایه روکش ارائه می دهد. جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده برای شبیه سازی روکش کاری پوشش ها را نشان می دهد. به منظور اطمینان از دقت نتایج و استقلال آنها از اندازه شبکه، آزمون همگرایی عددی انجام شد. اندازه المان ها به گونه ای تنظیم شد که با نصف کردن اندازه شبکه، تغییرات دمای بیشینه در نقطه حرارتی بحرانی کمتر از ۲ درصد باقی بماند. همچنین گام زمانی به گونه ای انتخاب گردید که نسبت تغییر دما در هر گام از ۵ درجه سانتیگراد تجاوز نکند تا پایداری حرارتی مدل حفظ شود.

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده برای بررسی شبیه سازی روکش لیزری نمونه ها

کد نمونه	توان (W)	سرعت روبش (mm/s)	نرخ تغذیه پودر (mg/s)
P100	۱۰۰	۵	۳۰۰
P150	۱۵۰	۵	۳۰۰
P200	۲۰۰	۵	۳۰۰
P250	۲۵۰	۵	۳۰۰
S3	۲۰۰	۳	۳۰۰
S4	۲۰۰	۴	۳۰۰
S5	۲۰۰	۵	۳۰۰
S6	۲۰۰	۶	۳۰۰
F200	۲۰۰	۵	۲۰۰
F250	۲۰۰	۵	۲۵۰
F300	۲۰۰	۵	۳۰۰
F350	۲۰۰	۵	۳۵۰

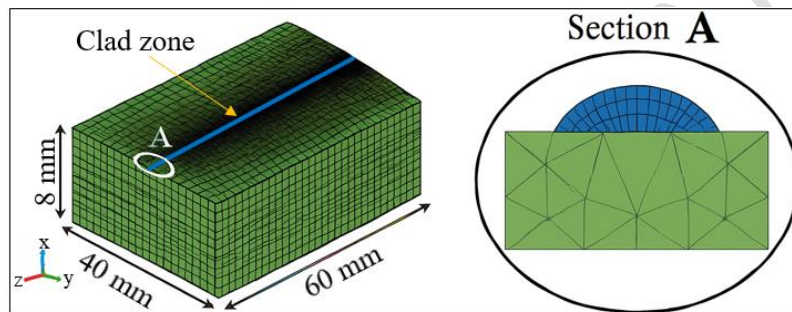
¹ Three-dimensional finite element

² Conduction

³ Surface convection

⁴ Radiation

مدل اجزای محدود فرآیند روکش کاری لیزری در شکل ۱-الف و بزرگنمایی بالاتر ناحیه A (برای مشاهده جزئیات مش بندی عناصر) در شکل ۱-ب نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، به دلیل انعطاف پذیری زیاد در شبیه سازی هندسه های پیچیده، در تحقیق حاضر از عناصر چهاروجهی برای شبکه بندی مدل استفاده شده است. همچنین خواص ترموفیزیکی آلیاژ $TiNiCrMoW-ZrB_2$ در جدول ۳ ارائه شده است. شبکه مدل شامل حدود ۲/۴ میلیون المان چهار وجهی و ۲/۷ میلیون گره بود. ناحیه مجاور سطح تماس لیزر و زیرلایه با تراکم بالاتر شبکه مش بندی شد تا گرادیان های دمایی شدید به صورت دقیق شبیه سازی شوند، در حالی که در نواحی دور از محل تابش، اندازه المانها به صورت تدریجی افزایش یافت تا ضمن کاهش زمان محاسباتی، دقت کلی مدل حفظ شود. آزمون همگرایی نشان داد که با افزایش دو برابری تعداد المانها، تغییرات دمایی بیش از ۲ درصد مشاهده نمی شود که بیانگر کفایت مش فعلی است.



شکل ۱- هندسه مدل المان محدود برای فرآیند روکش کاری لیزری.

جدول ۳- خواص ترموفیزیکی پوشش $TiNiCrMoW-ZrB_2$ مورد بررسی [۲۴-۲۶]

چگالی ρ (kg/m^3)	گرمای ویژه C_p ($J/kg \cdot K$)	رسانایی حرارتی k ($W/m \cdot K$)	دما ($^{\circ}C$)
۷۸۰۰	۴۶۰	۲۲/۵	۲۵
۷۷۵۰	۴۸۰	۲۵/۸	۲۵۰
۷۷۰۰	۵۲۵	۲۹/۱	۵۰۰
۷۶۵۰	۵۸۰	۳۲/۵	۷۵۰
۷۶۰۰	۶۴۰	۳۵/۸	۱۰۰۰
۷۵۵۰	۷۰۰	۳۸/۹	۱۲۵۰
۷۵۰۰	۷۴۰	۴۱/۵	۱۵۰۰
۷۴۵۰	۷۸۰	۴۳/۸	۱۷۵۰
۷۴۰۰	۸۲۰	۴۶/۰	۲۰۰۰

در فرآیند روکش کاری لیزری، به دلیل بالا بودن نرخ گرمایش و سرمایش، شیب‌های دمایی شدیدی در لایه پوشش ایجاد می‌شود. حرکت منبع حرارتی در طول سطح نیز منجر به تغییرات مداوم در خواص فیزیکی ماده از جمله خواص حرارتی وابسته به دما می‌شود. در این شرایط، پدیده انتقال حرارت گذرای غیرخطی بر رفتار حرارتی سامانه غالب است. معادله حاکم بر انتقال حرارت در این فرآیند بر اساس قانون بقای انرژی به صورت معادله (۱) بیان می‌شود [۱۳ و ۱۴]:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

در این رابطه T دما، t زمان، $c(T)$ گرمای ویژه تعیین شده توسط دما، ρ چگالی، Q منبع گرما و λ تغییرات رسانش گرما با دما است. برای حل معادله (۱)، شرایط مرزی اولیه به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۵]:

$$\begin{cases} T(x, y, z, t = 0) = T_0 \\ T(x, y, z, t = \infty) = T_0 \end{cases} \quad (2)$$

که در آن T_0 دمای محیط است. شرایط مرزی انتقال حرارت از طریق تابش و همرفت نیز باید تعیین شود. در بین این دو مکانیزم انتقال حرارت، نقش تابش به دلیل دمای بالای حوضچه مذاب بسیار قابل توجه تر است. شرایط مرزی انتقال حرارت از طریق تابش و رسانش با روابط (۳ و ۴) بیان می‌شوند [۱۶]:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_s = \sigma_0 \varepsilon (T_s^4 - T_e^4) \quad (3)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_s = h_f (T_s - T_e) \quad (4)$$

که در آن T_e دمای اتاق، T_s دمای مرزی قطعه، h_f ضریب انتقال حرارت جابجایی، s سطح مرزی، $\frac{\partial T}{\partial \vec{n}}$ گرادیان دما در راستای عمود بر سطح مرز، σ_0 ثابت استفان-بولتزمن، و ε ضریب نشر (تابش) سطح می‌باشند [۱۷]. در این پژوهش، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی (h_f) با توجه به شرایط جریان گاز محافظ و توزیع حرارتی سطح، برابر با $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ در نظر گرفته شد. همچنین ضریب نشر سطح (ε) با توجه به جنس آلیاژ تقویت شده TiNiCrMoW-ZrB_2 و مقادیر گزارش شده در منابع مشابه برابر 0.7 انتخاب شد. این ضرایب در معادلات (۳) و (۴) اعمال شده‌اند تا تبادل حرارتی بین حوضچه مذاب و محیط با دقت واقعی تری بازتولید شود.

به منظور شبیه‌سازی دقیق منبع گرما، از یک مدل استوانه‌ای بیضوی^۱ (منبع گرمای گاوسی^۲) استفاده شده است.

شار^۳ سطحی با رابطه ۵ بیان می‌شود [۱۸]:

¹ Ellipsoidal heat source

² Gaussian

³ Flux

$$q = \frac{2Q_p \eta_p}{\pi r^2} \times e^{-\frac{2R^2}{r^2}} \quad (5)$$

در این معادله، r نشان دهنده حداکثر شعاع پرتو لیزر، Q_p توان لیزر، R فاصله از نقطه انتخاب شده تا مرکز پرتو لیزر و η_p پرتو لیزر جذب شده توسط زیرلایه است. جذب انرژی لیزر نقش مهمی در روکش لیزر ایفا می کند. این ضریب با دما، مقاومت الکتریکی و ترکیب شیمیایی ماده تغییر می کند. همچنین با کاهش طول موج افزایش می یابد و می توان آن را بر اساس مقاومت الکتریکی به صورت معادله ۶ تخمین زد [۱۹]:

$$\varepsilon_\lambda(T) = 0.365 \sqrt{\frac{\rho_r}{\lambda}} - \frac{0.0667 \rho_r}{\lambda} + 0.006 \left(\frac{\rho_r}{\lambda}\right)^3 \quad (6)$$

که در آن $\varepsilon_\lambda(T)$ ضریب نفوذ زیرلایه در دمای K ، ρ_r مقاومت الکتریکی زیرلایه در دمای K و λ طول موج پرتو لیزر است.

برخورد ذرات پودر پیش گرم شده با حوضچه مذاب از مهم ترین مراحل در فرآیند شبیه سازی روکش کاری لیزری است. اولین مشکل مهمی که باید ارزیابی شود، کاهش توان لیزر و دومین مشکل، افزایش دمای ذرات پودر قبل از برخورد با حوضچه مذاب است. توزیع پودر در خروجی نازل تغییر نمی کند، زیرا جریان گازهای حامل و محافظ ثابت است. بنابراین، در شبیه سازی روکش کاری لیزری، توزیع ذرات پودر در خروجی نازل را می توان به عنوان یک پارامتر ثابت در نظر گرفت. به منظور پیش بینی دمای ذرات پودر در حین تزریق به حوضچه مذاب، فرض می شود، سرعت ذرات پودر برابر با سرعت گاز حامل است، ذرات پودر هنگام خروج از نازل سرعت یکسانی دارند، جرم ورودی به صورت یک جریان سیال پیوسته در نظر گرفته شده است و مدت زمان برهمکنش بین پرتو لیزر و ذرات پودر برای تعیین دمای جرم ورودی به حوضچه مذاب محاسبه می شود که می توان آن را به صورت معادلات ۷ تا ۹ به دست آورد:

$$t_{int} = \frac{L_{nozzle}}{V_{inlet}} \quad (7)$$

$$\Delta T = \frac{\alpha P t_{int}}{\pi R^2} \times \frac{\pi r_p^2}{m_p C_p} \quad (8)$$

$$T_{inlet} = T_{initial} + \Delta T \quad (9)$$

در معادله ۷، نماد t مدت زمان برهمکنش بین پرتو لیزر و جرم ورودی را نشان می دهد، V_{inlet} سرعت جرم ورودی است و L_{nozzle} فاصله بین نوک نازل و سطح زیرلایه می باشد. در معادله ۸، α ضریب جذب تابش لیزر توسط ذرات پودر است، P توان لیزر، m_p جرم هر ذره پودر (برابر با حاصل ضرب حجم ذره در چگالی آن در دمای محیط)، I_p شعاع ذره پودر، C_p ظرفیت گرمایی ویژه جرم ورودی و R شعاع پرتو لیزر می باشند. در معادله ۹، $T_{initial}$ نشان دهنده دمای اولیه ذرات

پودر در لحظه ورود به مسیر تابش لیزر است [۲۰].

بازده برخورد پودر به صورت کسر ذرات پودر که با ناحیه ذوب شده روی زیرلایه برخورد می کنند، محاسبه می شود. هنگامی که یک لایه روکش در روکش لیزری تک گذر در نظر گرفته می شود، می توان فرض کرد که ذراتی که با ناحیه ذوب شده برخورد می کنند، بخشی از لایه روکش می شوند. با توجه به این فرض و اینکه ناحیه برخورد جریان پودر بزرگ تر از ناحیه ذوب شده روی زیرلایه است، بازده برخورد پودر را می توان به صورت نسبت ناحیه حوضچه مذاب و ناحیه زیرلایه که با جریان پودر برخورد می کنند، بیان کرد [۲۰].

$$\eta = \frac{S_{jet}^{liq}}{S_{jet}} \quad (10)$$

فرضیات اصلی مدل شبیه سازی به شرح زیر در نظر گرفته شدند:

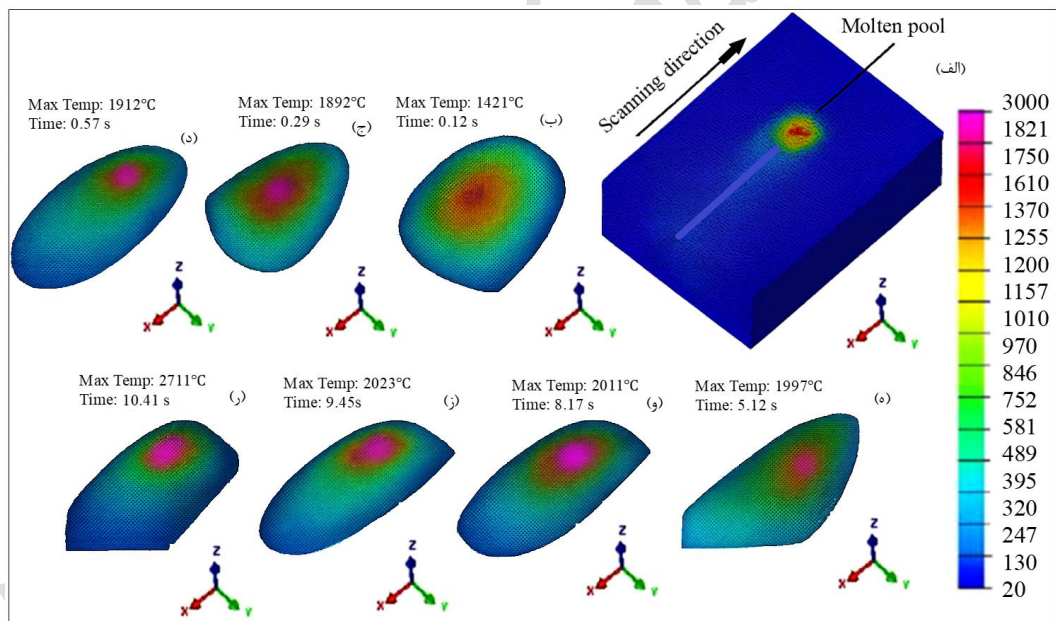
- فرآیند در مقیاس ماکرو و به صورت سه بعدی مدل سازی شده و تأثیر جابجایی مذاب در حوضچه لحاظ نشده است.
- خواص ترموفیزیکی مواد به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شده و تغییرات فاز به شکل ضمنی در مدل اعمال گردیده است.
- سطح تماس بین پوشش و زیرلایه کاملاً چسبیده و مقاومت حرارتی مرزی ناچیز فرض شده است.
- تابش و همرفت تنها مکانیزم های دفع گرما در سطح آزاد قطعه بوده و شار ورودی لیزر بر اساس مدل گاوسی بیضوی تعریف شده است.
- تأثیر تلاطم گاز حامل و تغییرات فضایی نرخ تغذیه پودر در محدوده نازل ثابت فرض شده است
- اتلاف گرما از اضلاع جانبی نمونه به دلیل نسبت ابعاد هندسی ناچیز در مقیاس مدل در نظر گرفته نشده است.

۳- نتایج و بحث

در طول فرآیند روکش کاری لیزری، شکل حوضچه مذاب تحت تأثیر کشش سطحی بین لایه منجمد شده و پودر در حال ذوب شدن است. گرادیان دمایی ایجاد شده در این شرایط نقش کلیدی در کنترل ریزساختار و خواص مکانیکی پوشش دارد به گونه ای که با افزایش توان لیزر (افزایش انرژی خطی) و کاهش سرعت روبش (افزایش چگالی تغذیه پودر)، شدت گرادیان دمایی بیشتر شده و منجر به تغییرات چشمگیر در توزیع دما و رفتار حوضچه مذاب می شود. با وجود این، الگوی کلی توزیع دما در نمونه های مختلف مشابه است و تغییر پارامترهای فرآیندی بیشتر باعث تفاوت در ابعاد ناحیه ی تحت تأثیر حرارتی، دمای حوضچه و میزان نفوذ حرارت به زیرلایه می شود. بنابراین، برای تحلیل دقیق تر، نمونه P250 به عنوان نماینده انتخاب و توزیع حرارتی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۲- الف توزیع گرما و نمای سه بعدی نواحی تحت تأثیر فرآیند را نشان می دهد که در آن مساحت حوضچه مذاب نیز

مشخص است. با توجه به طول کل روکش (۶۰ میلی متر) و سرعت روبش (۶ میلی متر بر ثانیه)، موقعیت لحظه‌ای پرتو لیزر در هر زمان محاسبه شد. در شروع فرآیند، وقتی روبش از لبه نمونه آغاز می‌شود، انرژی ورودی روی ناحیه‌ی کوچکی متمرکز شده و در نتیجه گرادیان دمایی در اطراف حوضچه به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در این شرایط، به علت پایین بودن دمای اولیه زیرلایه، بخش عمده‌ای از انرژی لیزر صرف افزایش دمای زیرلایه می‌شود و ذوب کامل در فصل مشترک با تأخیر شکل می‌گیرد. به همین دلیل، احتمال تشکیل پیوند متالورژیکی ضعیف در لحظات ابتدایی افزایش می‌یابد (شکل ۲-الف). در زمان ۰/۱۲ ثانیه و فاصله حدود ۰/۶۵ میلی متر از مبدأ (شکل ۲-ب) دمای حوضچه در محدوده ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتی گراد قرار می‌گیرد که نزدیک به آستانه ذوب زمینه است. با ادامه روبش و رسیدن به فاصله ۱/۲۴ میلی متر و زمان ۰/۲۹ ثانیه (شکل ۲-ج)، دما افزایش قابل توجهی پیدا کرده و به حدود ۱۸۰۰ تا ۱۹۰۰ درجه سانتی گراد می‌رسد. در این مرحله؛ ذوب پودر کامل شده و پیوند متالورژیکی مناسبی در فصل مشترک برقرار می‌گردد. دلیل این افزایش دما، تمرکز گرما در لبه نمونه و محدود شدن انتقال حرارت در جهت مخالف حرکت لیزر است.

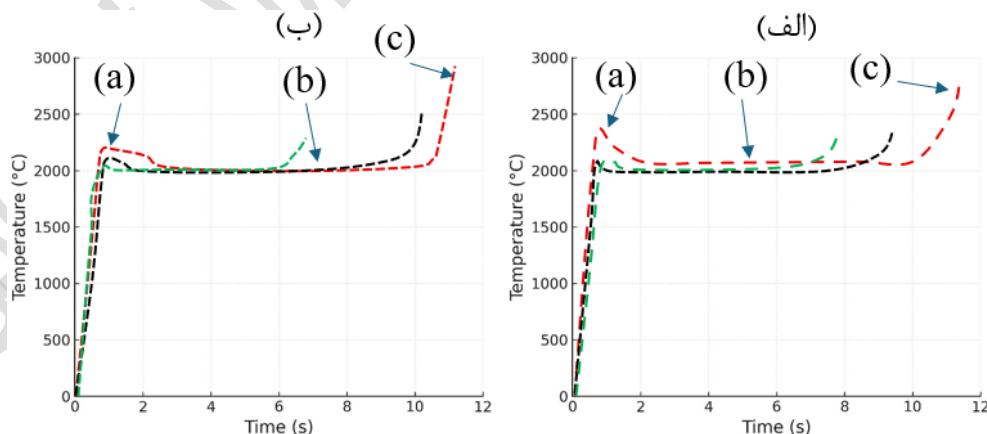


شکل ۲- گرادیان دمایی در طول روکش لیزری نمونه P250.

در زمان ۰/۵۷ ثانیه و فاصله ۴ میلی متر از مبدأ (شکل ۲-د)، خطوط ایزوترم بسته شدند و شرایط به حالت پایدار نزدیک شد. در این وضعیت، دمای حوضچه در بازه ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتی گراد قرار دارد که حدود حالت پیشین است. ثابت بودن دما در این مرحله را می‌توان ناشی از انتقال حرارت همزمان در جهات مختلف و تبادل گرما با محیط اطراف دانست. این روند پایدار تا حدود ۵/۱۲ ثانیه و فاصله ۲۵/۹ میلی متر ادامه داشت (شکل ۲-ه) که در آن دمای حوضچه حدود ۲۰۰۰ درجه سانتی گراد است. با پیشروی پرتو لیزر و رسیدن به فاصله ۳۵/۲ میلی متر از مبدأ در زمان ۸/۱۷ ثانیه (شکل ۲-و)،

خطوط ایزوترم به انتهای نمونه نزدیک شده و گرما در طول قطعه توزیع می گردد. در این شرایط، گرادیان دمایی در راستای روبش کاهش یافته و دمای حوضچه به حدود ۲۰۱۱ درجه سانتی گراد افزایش پیدا می کند. پس از این مرحله (شکل های ۲-۲ و ۲-۳)، خطوط ایزوترم در امتداد مسیر روبش باز شده و این پدیده موجب کاهش شدید گرادیان دمایی محوری و افزایش قابل توجه دمای حوضچه می شود، به گونه ای که بیشینه دمای ثبت شده در این شرایط به حدود ۲۸۰۰ درجه سانتی گراد می رسد. این مقدار اگرچه نسبت به سیستم های پایه ای مانند IN718 پایین تر است، اما برای ذوب کامل زمینه TiNiCrMoW کافی بوده و در عین حال به دلیل پایین تر بودن از نقطه ذوب ZrB_2 ، مانع از ذوب این ذرات و حفظ نقش تقویتی آن ها می شود.

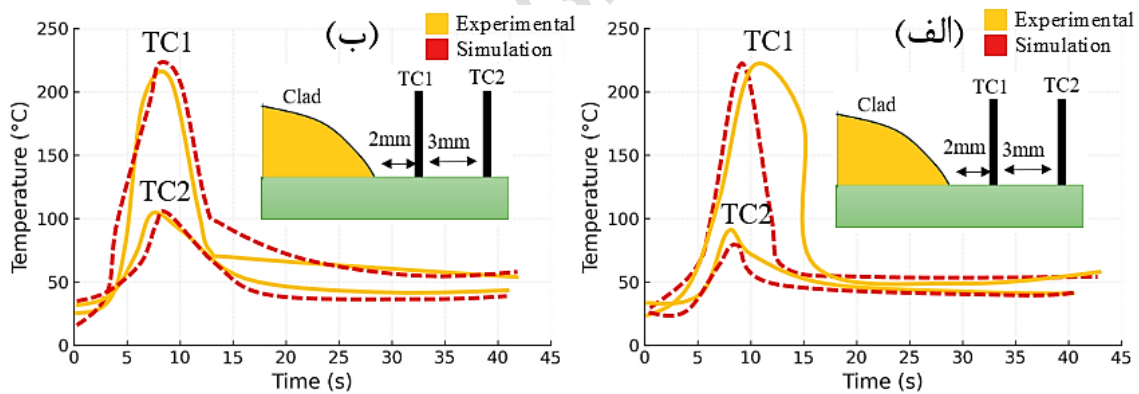
شکل ۳ تغییرات دمای حوضچه مذاب را در طول فرآیند روکش کاری لیزری برای نمونه های P100-P200 و S3-S6 نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، نمودارهای حرارتی را می توان به سه ناحیه اصلی تقسیم کرد: ناحیه a (شروع فرآیند)، ناحیه b (مرحله پایدار در طول فرآیند) و ناحیه c (پایان فرآیند). بررسی این نتایج نشان می دهد که با کاهش سرعت روبش و افزایش توان لیزر، که منجر به افزایش انرژی خطی و همچنین چگالی تغذیه پودر می شود، دمای حوضچه مذاب به طور محسوسی افزایش می یابد. به عنوان نمونه، در شرایط نمونه P200 (توان لیزر ۲۰۰ وات، سرعت روبش ۵ میلی متر بر ثانیه) در مقایسه با نمونه P100 (توان لیزر ۱۵۰ وات، سرعت روبش ۵ میلی متر بر ثانیه)، زمان کل روبش از حدود ۱۱ ثانیه به ۹ ثانیه کاهش یافته است. در نتیجه، به دلیل انرژی ورودی بیشتر در نمونه P200، دمای زیرلایه و حوضچه مذاب بالاتر بوده و ذوب کامل تری حاصل شده است. در مقابل، در نمونه P100 به دلیل انرژی ورودی کمتر، دمای حوضچه و زیرلایه پایین تر بوده و ذوب و پیوند متالورژیکی با شدت کمتری صورت گرفته است.



شکل ۳- تغییرات دمای حوضچه مذاب در طول روکش لیزری برای نمونه های مختلف. (الف) تاثیر توان لیزر (رنگ قرمز، مشکی و سبز به ترتیب مربوط به نمونه های P200، P150 و P100 است)، (ب) تاثیر سرعت روبش (رنگ قرمز، مشکی و سبز به ترتیب مربوط به نمونه های S3، S4 و S6 است).

تغییرات دما در طول فرآیند روکش کاری لیزری به صورت تجربی توسط ترموکوپل‌ها ثبت شد. موقعیت نصب ترموکوپل‌ها و مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای دو نمونه P200 (توان لیزر ۲۰۰ وات، نرخ تزریق پودر ۳۰۰ میلی‌گرم بر ثانیه، سرعت روبش ۵ میلی‌متر بر ثانیه) و P250 (توان لیزر ۲۵۰ وات، نرخ تزریق پودر ۳۰۰ میلی‌گرم بر ثانیه، سرعت روبش ۵ میلی‌متر بر ثانیه) در شکل ۴ ارائه شده است. در این شکل، TC1 و TC2 به ترتیب معرف ترموکوپل‌های شماره ۱ و ۲ هستند. برای ارزیابی دقت مدل عددی، میزان انحراف میان نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی با استفاده از شاخص میانگین خطای نسبی (MRE) و ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE) محاسبه شد. مقادیر پایین این شاخص‌ها (شاخص میانگین خطای نسبی کمتر از ۵ درصد و ریشه میانگین مجذور خطا کمتر از ۲۰ درجه سانتیگراد) بیانگر هم‌خوانی مناسب مدل عددی با نتایج تجربی است.

تحلیل مقایسه‌ای داده‌های دمایی حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های تجربی بیانگر تطابق بسیار مناسب بین دو روش است. برای ارزیابی کمی این تطابق، میزان خطای نسبی بین بیشینه دمای شبیه‌سازی و مقدار متناظر تجربی در نمونه‌های P200 و P250 محاسبه شد که مقدار آن به ترتیب ۴/۵ و ۴/۸ درصد به دست آمد. همچنین فاصله زمانی بین وقوع پیک‌های حرارتی ثبت شده در دو روش کمتر از ۰/۲ ثانیه بود. این نتایج صحت مدل توسعه‌یافته را تأیید و قابلیت اعتماد آن در پیش‌بینی دقیق میدان دما را نشان می‌دهد.

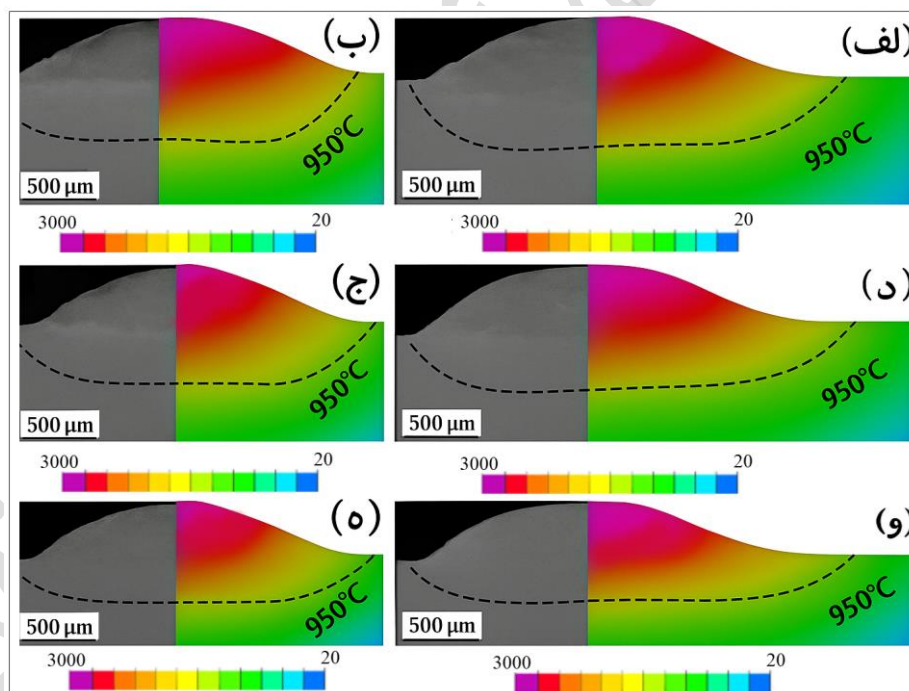


شکل ۴- مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی در نمونه‌های (الف) P200 و (ب) P250.

خط چین‌های قرمز در این نمودارها نتایج حاصل از شبیه‌سازی و خطوط ممتد زرد رنگ، داده‌های ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها را نمایش می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دما در لحظه رسیدن پرتو لیزر به موقعیت ترموکوپل با شیب تندی افزایش یافته و پس از عبور منع حرارتی، با شیب ملایم‌تری کاهش پیدا می‌کند. پیک حرارتی ثبت شده در نمونه P250 بالاتر از نمونه P200 است که علت آن را می‌توان بیشتر لیزر و در نتیجه انرژی ورودی و ذخیره‌ی حرارتی بالاتر در ناحیه پوشش عنوان نمود. همچنین، دمای ثبت شده توسط TC2 در هر دو نمونه کمتر از TC1 است، زیرا فاصله این

ترموکوپل از مسیر روبش بیشتر بوده و میزان انرژی جذب شده توسط آن کمتر است. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی نشان‌دهنده‌ی تطابق بسیار خوب میان دو روش است، به گونه‌ای که روند تغییرات دما و مقادیر بیشینه به‌خوبی بازتولید شده‌اند. این هم‌خوانی صحت مدل شبیه‌سازی حرارتی را تأیید می‌کند و بیانگر آن است که مدل عددی قادر به پیش‌بینی دقیق رفتار دمایی پوشش تحت شرایط مختلف فرآیندی می‌باشد.

شکل ۵ مقایسه‌ای بین سطح مقطع روکش ساخته شده (سمت چپ) و روکش شبیه‌سازی شده (سمت راست) را نشان می‌دهد. هنگامی که دمای روکش به نقطه ذوب (۱۴۶۰ درجه سانتیگراد) می‌رسد، چسبندگی بین ذرات پودر افزایش یافته و پوشش به سمت بالا حرکت می‌کند. در این شکل، مناطقی که دما به بیش از دمای بحرانی $TiNiCrMoW-ZrB_{212}\%$ رسیده است، با خط چین سیاه مشخص شده‌اند. این مناطق با نواحی متأثر از حرارت (HAZ) نشان داده شده‌اند. مواد در این نواحی ذوب نشده اما ریزساختار آنها به دلیل تولید گرمای زیاد در طول فرآیند و افزایش دما تا مقادیر بحرانی، تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، یک چرخه کامل عملیات حرارتی در این ناحیه اتفاق می‌افتد. دقت نتایج مدل شبیه‌سازی را می‌توان از شکل ۵ استنباط کرد.

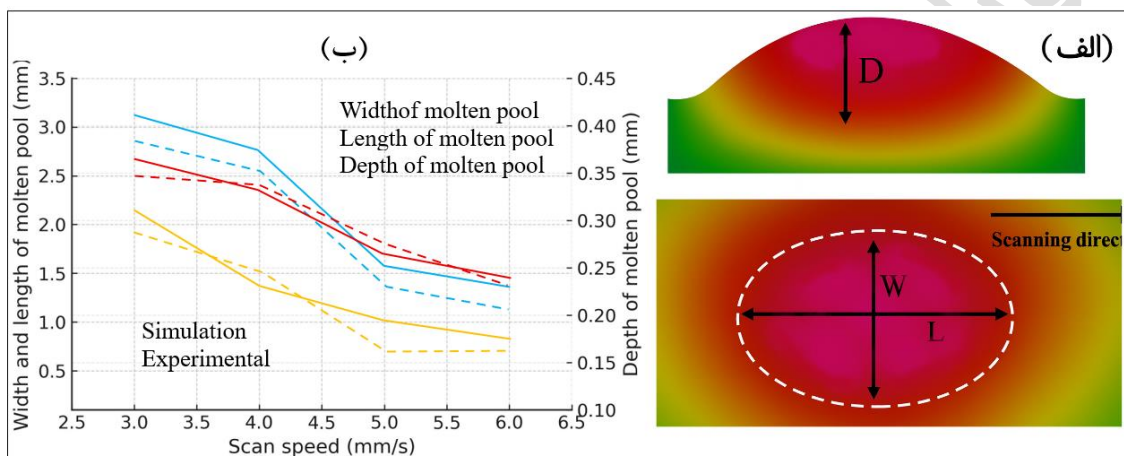


شکل ۵- مقایسه هندسه نمونه‌های تجربی و شبیه‌سازی شده برای (الف) P250، (ب) P200، (ج) P150، (د) S3، (ه) S4، (و) S6.

یکی از مراحل کلیدی در تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی فرآیند روکش کاری لیزری، مدل‌سازی هندسه حوضچه مذاب است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی (سرعت روبش) بر ابعاد حوضچه مذاب، توان لیزر در سطح ۲۰۰ وات در نظر گرفته شد. شکل ۶- الف اجزا و ابعاد حوضچه مذاب مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد، به طوری که طول، عرض و عمق

حوضچه به ترتیب در راستای محورهای X (جهت روبش نمونه)، Y و Z تعریف شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، ابعاد ناحیه ذوب شده به شرایط فرآیندی وابسته است.

شکل ۶-ب اثر سرعت روبش را بر ابعاد حوضچه مذاب نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که سرعت روبش نسبت به توان لیزر تأثیر بیشتری بر ابعاد حوضچه دارد. به‌طور مشخص، در توان لیزر ۲۰۰ وات، افزایش سرعت روبش از ۳ به ۶ میلی‌متر بر ثانیه موجب کاهش طول، عرض و عمق حوضچه مذاب شد. مقایسه این نتایج با داده‌های تجربی حاصل از نرم‌افزار MIP4 که ابعاد حوضچه را به روش آزمایشگاهی تعیین کرده است، همخوانی مناسبی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۸- (الف) شبیه‌سازی حوضچه مذاب و (ب) تأثیر سرعت روبش بر ابعاد حوضچه مذاب در توان لیزر ۲۰۰ وات. یکی از نکات قابل توجه آن است که عرض حوضچه مذاب در مقایسه با عمق و طول آن حساسیت کمتری به تغییرات توان لیزر و سرعت روبش دارد. این موضوع به دلیل ماهیت انتقال حرارت در حوضچه مذاب و نیز اثر محدودکننده‌ی کشش سطحی در جهت جانبی است. به بیان دیگر، افزایش سرعت روبش باعث کاهش زمان برهمکنش پرتو لیزر با سطح و در نتیجه کاهش انرژی ورودی در واحد طول می‌شود؛ در نتیجه ابعاد حوضچه مذاب کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش توان لیزر، میزان انرژی ورودی به سیستم بیشتر شده و بخشی از آن صرف ذوب ذرات پودر و افزایش دمای زیرلایه می‌شود، که این امر به افزایش ابعاد حوضچه منجر می‌گردد.

نتیجه گیری

هدف این پژوهش، شبیه‌سازی حرارتی فرآیند روکش کاری لیزری پوشش آلیاژ آنترابی بالای $TiNiCrMoW-ZrB_2$ روی سوپرآلیاژ IN738 به منظور پیش‌بینی توزیع دما، گرادینان‌های حرارتی و ابعاد حوضچه مذاب، و همچنین تحلیل اثر پارامترهای فرآیندی (توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر) بر ریزساختار و کیفیت نهایی پوشش بود تا زمینه‌ای برای بهینه‌سازی پارامترها، افزایش چسبندگی و بهبود خواص مکانیکی و حرارتی فراهم شود. با توجه به این موارد، نتایج پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- شبیه سازی عددی با نرم افزار سیس ولد توانست توزیع دما و گرادیان های دمایی را با دقت بالا بازتولید کند و تطابق نتایج با داده های تجربی صحت مدل را تأیید نمود.
- ۲- افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش سبب افزایش انرژی ورودی، دمای حوضچه مذاب و در نتیجه بهبود ذوب و پیوند متالورژیکی بین پوشش و زیرلایه شد.
- ۳- مدل سازی نشان داد که سرعت روبش نسبت به توان لیزر تأثیر بیشتری بر ابعاد حوضچه مذاب دارد و افزایش سرعت موجب کاهش عمق و عرض حوضچه می شود.
- ۴- تحلیل کمی مقایسه میان نتایج شبیه سازی و داده های تجربی نشان داد که بیشترین اختلاف دمای پیش بینی شده نسبت به اندازه گیری شده کمتر از ۴/۸ درصد بوده و اختلاف زمانی میان پیک های حرارتی ثبت شده و شبیه سازی شده حدود ۰/۲ ثانیه است. این مقادیر نشان دهنده دقت مناسب مدل عددی در بازتولید رفتار حرارتی پوشش در فرآیند روکش کاری لیزری می باشند.
- ۵- در مجموع، استفاده از شبیه سازی حرارتی روشی کارآمد برای بهینه سازی فرآیند روکش کاری لیزری، کاهش هزینه های آزمایشگاهی و طراحی مؤثر پوشش های مقاوم از جنس آلیاژهای آنترویی بالا به شمار می رود.
- ۶- بر اساس نتایج به دست آمده از مدل سازی و آزمایش های تجربی، ترکیب بهینه پارامترهای فرآیندی برای دستیابی به حداکثر کیفیت و چسبندگی پوشش آلیاژ آنترویی بالای $TiNiCrMoW-ZrB_2$ در محدوده توان لیزر ۲۰۰ تا ۲۵۰ وات و سرعت روبش ۴ تا ۵ میلی متر بر ثانیه به دست آمد. در این محدوده، تعادل مناسبی میان اندازه ی حوضچه مذاب، گرادیان دمایی و نرخ انجماد برقرار شده است؛ به گونه ای که ذوب کامل در فصل مشترک حاصل و ضخامت ناحیه ی تحت تأثیر حرارتی در حداقل مقدار خود قرار می گیرد. به این ترتیب، ترکیب پارامتری یاد شده می تواند به عنوان بازه ی پیشنهادی برای تولید پوشش های آنترویی بالای مشابه با چسبندگی و پایداری حرارتی مطلوب مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- 1- Kermani, F., Momeni, H., ShojaRazavi, R. and Borhani, M., 2025. Laser Cladding of IN625 on Rene125 Superalloy: Effect of Tailored Post-Heat Treatments on Interfacial Properties. Results in Engineering, p.107345.
- 2- Najmi, M., Mirbagheri, S.M.H. and Salehi, A., 2022. Microstructure Characterization and Creep Behavior on the Casting CMM88Y Super Alloy Turbine Blade. Founding Research Journal, 6(2), pp.113-124.
- 3- Tan, Q., Liu, K., Li, J., Geng, S., Sun, L. and Skuratov, V., 2024. A review on cracking mechanism and suppression strategy of nickel-based superalloys during laser cladding. Journal of Alloys and Compounds, 1001, p.175164.

- 4- Samiee, M., Shajari, Y., Razavi, S.H. and Seyedraoufi, Z.S., 2019. The Effect of Cryogenic Treatment on the Rejuvenation of Exposed IN738LC Gas Turbine Blade. *Founding Research Journal*, 3(3), pp.163-174.
- 5- Nahavandi, H. and Khorsand, H., 2024. Investigating the microstructure, mechanical and thermal properties of CuNiAlCrFe high entropy alloy made by VAR method. *Founding Research Journal*, 8(2).
- 6- Wu, Z., Taheri, M., Shirvani, K., Raji, E., Torkamany, M.J. and Jelodar, R.T., 2024. Development of NiCrFeCoBX eutectic high entropy alloy coating by laser cladding: investigation of microstructural, solidification, corrosion, and wear properties. *Materials Chemistry and Physics*, 320, p.129428.
- 7- Pourmorad Kaleybar, S. and Khorsand, H., 2024. Investigating the microstructure and phase analysis of high entropy alloy CoCuFeMnNi made by vacuum induction furnace. *Founding Research Journal*, 8(2), pp.117-124.
- 8- Oketola, A.M., Adegbola, T.A., Jamiru, T., Ogunbiyi, O. and Salifu, S., 2025. Advances in High-Entropy Alloy Research: Unraveling Fabrication Techniques, Microstructural Transformations, and Mechanical Properties. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 11(3), p.79.
- 9- Muvvala, G., Karmakar, D.P. and Nath, A.K., 2017. Online monitoring of thermo-cycles and its correlation with microstructure in laser cladding of nickel based super alloy. *Optics and Lasers in Engineering*, 88, pp.139-152.
- 10- Urbanic, R.J., Saqib, S.M. and Aggarwal, K., 2016. Using predictive modeling and classification methods for single and overlapping bead laser cladding to understand bead geometry to process parameter relationships. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(5), p.051012.
- 11- Pinkerton, A.J., 2015. Advances in the modeling of laser direct metal deposition. *Journal of laser applications*, 27(S1).
- 12- Bakhtiyari, A.N., Wang, Z., Wang, L. and Zheng, H., 2021. A review on applications of artificial intelligence in modeling and optimization of laser beam machining. *Optics & Laser Technology*, 135, p.106721.
- 13- Gao, J., Wang, C., Hao, Y., Liang, X. and Zhao, K., 2022. Prediction of TC11 single-track geometry in laser metal deposition based on back propagation neural network and random forest. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(3), pp.1417-1425.
- 14- Chen, B., Zhao, Y., Yang, H. and Zhao, J., 2024. Process parameters optimization and numerical simulation of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating via laser cladding. *Materials*, 17(17), p.4243.
- 15- Cao, Y., Yuan, C., Zhang, Y. and Ma, J., 2024. Laser Cladding Performance and Process Parameter Optimization for Fe90 Alloy. *Metals* (2075-4701), 14(12).
- 16- Wu, D., Ding, C. and Jean, M., 2025. Optimisation of Response Surface Methodology Based on Finite Element Analysis for Laser Cladding of Highly Hardened WC (Co, Ni) Coatings. *Materials*, 18(15), p.3658.
- 17- Xiang, D., Wang, D., Wang, S., Yan, L. and Chen, Y., 2024. Analysis and optimization of laser cladding Ti-B4C composite coatings based on the interaction and GABP-NSGAI algorithm. *Surface and Coatings Technology*, 493, p.131186.
- 18- Li, C., Jia, T., Han, X. and Jiang, X., 2023. Study on parameter optimization of laser cladding Fe60 based on GA-BP neural network. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 37(18), pp.2556-2586.

- 19- Gao, Y., Jiang, S., Tong, Y., Bai, S. and Lu, P., 2024. Temperature Field Simulation and Experimental Confirmation of Laser Cladding High-Entropy Alloy Coating on Cr12MoV. *Processes*, 12(2), p.257.
- 20- Chen, B., Zhao, Y., Yang, H., & Zhao, J. (2024). Process parameters optimization and numerical simulation of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating via laser cladding. *Materials*, 17(17), 4243.
- 21- Gao, Y., Jiang, S., Tong, Y., Bai, S., & Lu, P. (2024). Temperature Field Simulation and Experimental Confirmation of Laser Cladding High-Entropy Alloy Coating on Cr12MoV. *Processes*, 12(2), 257.
- 22- Cao, Y., Yuan, C., Zhang, Y., & Ma, J. (2024). Laser Cladding Performance and Process Parameter Optimization for Fe90 Alloy. *Metals*, 14(12).
- 23- Wu, D., Ding, C., & Jean, M. (2025). Optimisation of Response Surface Methodology Based on Finite Element Analysis for Laser Cladding of Highly Hardened WC (Co, Ni) Coatings. *Materials*, 18(15), 3658.
- 24- Berger, A., Benito, S., Konchits, A., Laplanche, G., Shanina, B., & Weber, S. (2024). Thermophysical properties of equiatomic CrMnFeCoNi, CrFeCoNi, CrCoNi, and CrFeNi high- and medium-entropy alloys. *Materials Today Communications*, 39, 109341.
- 25- Sun, Z., Shi, C., Gao, L., Lin, S., & Li, W. (2022). Thermal physical properties of high entropy alloy Al_{0.3}CoCrFeNi at elevated temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 901, 163554.
- 26- Cantor, B. (2025). The thermodynamics of multicomponent high-entropy materials. *Journal of Materials Science*, 60(3), 1750-1764.