

In-Situ Monitoring of Melt Pool Dynamics in Laser Cladding using Numerical Simulation and Spectral Diagnostics

Ebrahim Gholami¹, Saeed Batebi^{1*}, M.J. Torkamany²

¹ Department of Physics, University of Guilan, Rasht, Iran

² Iranian National Center for Laser Science and Technology, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: s_batebi@guilan.ac.ir

ABSTRACT

Online Monitoring and Control of melt pool dynamics play a crucial role in determining the quality of clad layers in laser additive manufacturing processes. This study presents a hybrid approach that combines numerical simulation using the Goldak model with real-time monitoring via Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) in the laser cladding process of Inconel 718 alloy on 304 stainless steel substrate. The precise modeling of the thermal dynamics of the melt pool was performed on 64 cladding samples, and the cross-sectional dimensions and dilution percentage were validated against experimental measurements. To minimize model error, spectral characterization was employed for real-time monitoring of melt pool variations, providing highly accurate data on local melt pool temperature and elemental composition. The plasma temperature extracted from chromium emission lines in the spectral window of 400 to 500 nm effectively tracked the melt pool temperature variations based on input parameters, while the intensity ratio of nickel (wavelength 361.93 nm) to iron (wavelength 382.94 nm) quantified the dilution of the clad layer. This approach enables dynamic calibration of process input parameters, ensuring uniform clad quality through real-time control of melt pool.

KEYWORDS

Online monitoring, Laser additive manufacturing, Laser cladding, Melt pool dynamics, Laser-induced breakdown spectroscopy.

1. Introduction

Monitoring melt pool dynamics is critical in laser-based processes such as laser cladding (LC). Both ex-situ and in-situ control methods are used to optimize melt pool stability, improve clad uniformity, and reduce defects. Numerical simulation, as an out-of-process method, can help in understanding and optimizing the effects of input parameters [1]. The Goldak heat source model is one of the most widely used thermal models in LC simulations due to its ability to accurately approximate heat distribution in the molten pool. Additionally, real-time monitoring techniques, [2], such as laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), provide instant and precise data on the molten pool's temperature, geometry and chemical composition. Combining accurate simulation using with real-time monitoring [3], allows for continuous calibration and real-time adjustment of process parameters, improving clad uniformity and quality while reducing errors. This integrated approach enhances additive manufacturing by enabling better process control and optimization.

2. Methodology

In this study, a laser cladding system (Figure 1) was used, consisting of a 2kW-CW fiber laser, to deposit Inconel 718 powder onto SS304 substrate samples. The LIBS system was based on a nanosecond Nd:YAG laser and was set with laser energy of 100 mJ, a pulse duration of 10 ns, and a repetition rate of 10 Hz.

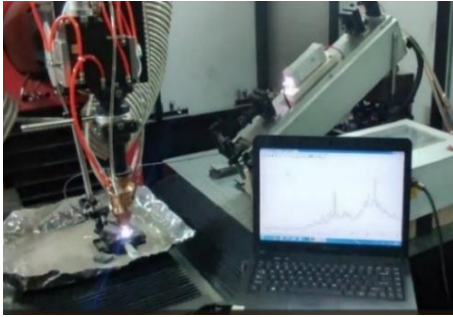


Fig. 1. Laser cladding system with LIBS setup

In the experimental design, the focus was on three key input parameters: laser power (LP), scan speed (SS), and powder feed rate (PFR). Each of these parameters was adjusted at four distinct levels, as detailed in Table 1.

Table 1. Input parameters and their variation levels.

Parameter	Level			
LP (W)	1000	1200	1400	1600
SS (mm/min)	500	800	1200	1500
PFR (gr/min)	7	10	13	16

3. Discussion and Results

A heat transfer model was developed in COMSOL software, incorporating a moving mesh feature to simulate melt pool dynamics and temperature distribution during the LC process. The simulation results are presented in Figure 2.

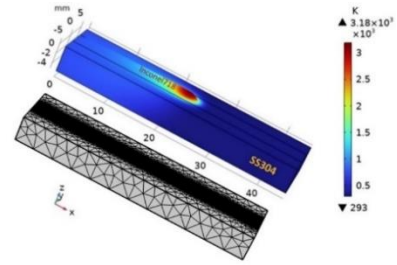


Fig 2. Simulation of the LC model with mesh geometry

In LC process, laser energy heats the powder and substrate, raising the temperature above 1723 K (melt point of substrate). As shown in Figure 3, increasing laser power enhances energy density, resulting in a higher process temperature and larger layer dimensions. In contrast, a higher scanning speed reduces clad layer dimensions and lowers the melt pool temperature. On the other hand, an increased powder feed rate raises the clad layer height and melt pool temperature. These factors play a crucial role in influencing melt pool dynamics, clad quality, and thermal stability.

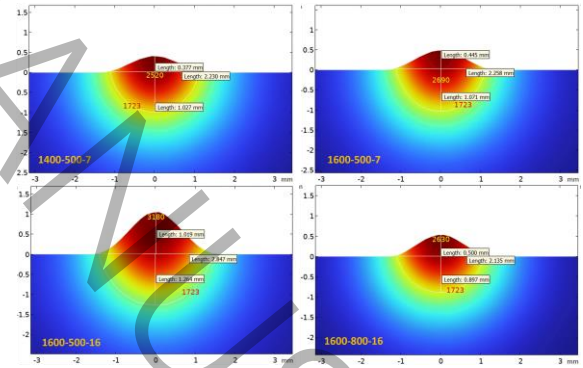


Fig. 3. Effect of input parameters on melt pool dynamics

Additionally, the simulation results show that increasing laser power or decreasing scanning speed which raises input energy density causes more energy to be absorbed by the powder and substrate, leading to a higher dilution rate. It is also observed that as the powder feed rate increases, both the temperature and the clad layer height rise. This results in reduced penetration into the substrate, thereby lowering the dilution percentage.

Figure 4 presents the cross-sectional image of a clad line sample, clearly demonstrating a strong correlation

between the simulation and experimental measurements. This agreement is evident in both the geometrical properties and the observed temperature distribution. The simulation results provide an accurate representation of the melt pool's geometry and temperature, as well as the variations in dilution ratio based on the process input parameters.

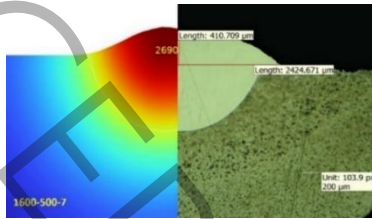


Fig.4. Comparison of a clad cross-section

The LC process of depositing Inconel 718 onto SS304 produces a composite material that combines the properties of both the substrate and the clad powder. In the provided spectrum (Figure 5), the emission lines corresponding to the substrate and the melt pool are shown separately. A comparison of these spectra indicates that the emission line intensity from the melt pool is higher than that from the substrate.

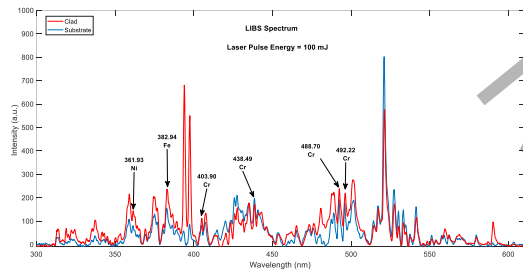


Fig. 5. LIBS spectrum of the substrate and clad layer

The plasma temperature derived from the Cr lines marked in Figure 5 can serve as an indicator of the local melt pool temperature at the sampling point. Consequently, LIBS at various locations within the melt pool can be utilized to understand the temperature distribution. This approach provides a more accurate estimation of the melt pool temperature, as it directly measures the high-temperature plasma and is validated against surface temperature measurements. By using the obtained spectral characterization, the intensity of elements present in the melt pool can be analyzed in real-time, providing indirect information about the geometry and dilution percentage of the clad layer based on their intensity ratio. The intensity ratio of nickel to iron in the spectrum directly reflects the relative amounts of these elements, and this ratio changes with input process parameters, such as laser power, scan speed, and powder

feed rate, which are key factors influencing temperature and clad layer geometry. Through spectral analysis, the ratio of nickel intensity at a wavelength of 361.92 nm to that of iron at 382.94 nm was used to monitor changes in the clad line with respect to dilution degree. The results, shown in Figure 6, demonstrate that variations in the ratio of selected line intensities are inversely related to changes in dilution rates. Monitoring these intensity ratios allows for real-time control of input parameters, ensuring the production of a high-quality clad layer with the desired dilution degree.

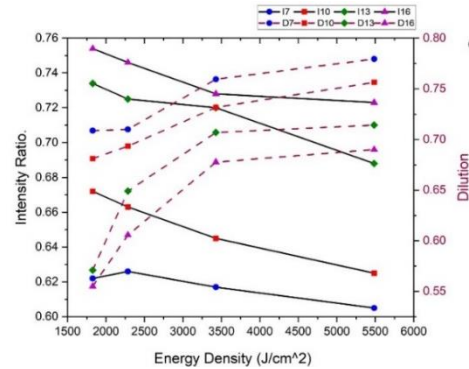


Fig. 6. Line intensity ratio and dilution vs. energy density

4. Conclusions

The combination of accurate simulation data for the laser cladding process and real-time spectroscopy offers a deeper understanding of the thermal behavior and heat distribution within the melt pool. This approach can also be applied to measure and monitor other qualitative and quantitative properties of the clad layer, such as hardness, residual stress, and microstructure, ultimately ensuring the production of a high-quality and uniform clad layers in laser additive manufacturing.

5. References

- [1] C. Kusuma, The effect of laser power and scan speed on melt pool characteristics of pure titanium and Ti-6Al-4V alloy for selective laser melting, (2016).
- [2] V. Lednev, P. Sdvizhenskii, A.Y. Stavertiy, M.Y. Grishin, R. Tretyakov, R. Asyutin, S. Pershin, Online and in situ laser-induced breakdown spectroscopy for laser welding monitoring, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 175 (2021) 106032.
- [3] T. Moges, Z. Yang, K. Jones, S. Feng, P. Witherell, Y. Lu, Hybrid modeling approach for melt-pool prediction in laser powder bed fusion additive manufacturing, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(5) (2021) 050902.

پایش برخط دینامیک حوضچه مذاب در روکش کاری لیزری

با استفاده از شبیه‌سازی عددی و مشخصه‌یابی طیفی

ابراهیم غلامی^۱، سعید باطبی^{۱*}، محمدجواد ترکمنی^۲

۱- گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران، ایران

*نویسنده عهده دار مکاتبات: s_batebi@guilan.ac.ir

چکیده

پایش برخط و کنترل دینامیک حوضچه مذاب، نقش کلیدی در تعیین کیفیت لایه‌های روکش شده در فرایندهای ساخت افزایشی لیزری ایفا می‌کند. این پژوهش رویکردی ترکیبی از شبیه‌سازی عددی با مدل گلداک و پایش لحظه‌ای با طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری را در فرایند روکش کاری لیزری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بر روی زیرلایه استیل ۳۰۴ ارائه می‌دهد. مدل‌سازی دقیق دینامیک حرارتی حوضچه مذاب در ۶۴ نمونه روکش انجام شده و ابعاد سطح مقطع روکش و درصد آمیختگی با اندازه‌گیری‌های تجربی اعتبارسنجی شده است. جهت کاهش خطای مدل، از مشخصه‌یابی طیفی برای پایش لحظه‌ای تغییرات حوضچه مذاب استفاده شد که اطلاعات دقیقی از دمای موضعی حوضچه مذاب و همچنین ترکیب عناصر آن را ارائه داد. دمای پلاسمای استخراج‌شده از خطوط کروم در پنجره طیفی ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر، بطور موثر تغییرات دمای حوضچه مذاب را بر اساس پارامترهای ورودی ردیابی کرده، درحالی‌که نسبت شدت نیکل (طول موج ۳۶۱/۹۳ نانومتر) به آهن (طول موج ۳۸۲/۹۴ نانومتر) آمیختگی لایه روکش را کمی‌سازی نمود. این رویکرد، امکان کالیبراسیون پویای پارامترهای ورودی فرایند را فراهم کرده و کیفیت یکنواخت لایه روکش را بر اساس کنترل لحظه‌ای تغییرات دمای حوضچه مذاب و درجه آمیختگی تضمین می‌کند.

کلمات کلیدی

پایش برخط، ساخت افزایشی لیزری، روکش کاری لیزری، دینامیک حوضچه مذاب، طیف‌سنجی.

روکش کاری لیزری یا رسوب گذاری فلز با لیزر یک فرایند ساخت افزایشی است که کنترل بهینه‌ای بر رسوب مواد در ایجاد ساختارهای پیچیده ارائه می‌دهد. در فرایند روکش کاری لیزری در اثر تابش لیزر، هر دو ماده زیرلایه و ماده افزودنی (به شکل پودر یا سیم) ذوب شده و حوضچه مذاب ایجاد می‌شود. حرارت ایجاد شده می‌تواند گازهای محیط را نیز یونیزه کرده و به تشکیل پلازما در بالای حوضچه مذاب منجر شود که می‌تواند بر دینامیک انتقال حرارت تأثیر بگذارد. روکش کاری لیزری به‌رغم مزایای متعدد، با چالش‌های مهمی روبه‌رو است که کیفیت و کارایی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. یکی از مسائل مهم، مدیریت حرارتی است، زیرا گرمای تولید شده می‌تواند منجر به تغییرات حرارتی و ایجاد تخلخل و ترک شود. پیچیدگی رفتار دینامیکی حوضچه مذاب یکی از مشکلات اساسی در کنترل حرارت تولید شده در فرایند روکش کاری لیزری است، زیرا این رفتار به شدت تحت تأثیر پارامترهای ورودی مختلف مانند توان لیزر، سرعت روبش، نرخ تغذیه پودر و گاز محافظ قرار داد. تغییرات این پارامترها می‌توانند منجر به تغییرات در ابعاد حوضچه مذاب، سرعت انجماد، و جریان سیال شوند که در نهایت بر یکنواختی و کیفیت لایه روکش تأثیر می‌گذارند.

شبیه‌سازی‌های عددی، از جمله تحلیل المان محدود و تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی، نقش بسیار مهمی در مطالعه دینامیک حوضچه مذاب ایفا می‌کنند. این شبیه‌سازی‌ها درک عمیقی از چگونگی تأثیر پارامترهای فرایند مانند توان لیزر، سرعت روبش و نرخ جریان پودر بر ویژگی‌های حوضچه مذاب را ارائه می‌دهند [۱]. در نهایت، این اطلاعات به بهینه‌سازی فرایند و افزایش کیفیت محصول کمک می‌کنند. این رویکردهای عددی نه تنها زمان و هزینه‌های آزمایشات تجربی را کاهش می‌دهند بلکه دقت نتایج را نیز افزایش می‌دهند. با این حال، مدل‌های عددی به دلیل فرضیات ساده شده و محدودیت‌های محاسباتی ممکن است در برخی موارد با نتایج تجربی فاصله داشته باشند. از این رو شبیه‌سازی با مدل‌های دقیق نقش مهمی در درک و کنترل فرایندهای حرارتی در روکش کاری لیزری ایفا می‌کند.

در میان مدل‌های عددی مختلف بکار برده شده [۲-۵]، مدل منبع حرارتی گلداک^۱ [۶] به‌عنوان یک مدل حرارتی بیضوی دوگانه، به طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی فرایندهای برهم‌کنش لیزر استفاده شده و اثربخشی آن در کاربردهای مختلف نشان داده شده است. کیک^۲ و همکاران [۷] از این مدل برای شبیه‌سازی جوشکاری لیزری استفاده کرده و بر پیش‌بینی پروفایل‌های حرارتی و ناحیه تحت تأثیر حرارت تمرکز کرده و به توافق بالایی با نتایج تجربی دست یافتند. در همین زمینه، لی^۳ و همکاران [۸] یک مطالعه مقایسه‌ای از مدل‌های منبع حرارتی در جوشکاری لیزری انجام دادند و نتیجه گرفتند که نمایش سه بعدی مدل گلداک تطابق بهتری با هندسه‌های جوش تجربی نسبت به مدل‌های منبع حرارتی گاوسی ارائه می‌دهد. در یک کاربرد مشابه، ژانگ^۴ و همکاران [۹] مدل گلداک را برای تحلیل حرارتی گذرا در سوراخکاری لیزری به کار بردند و بر دقت بالای آن در ثبت توزیع دما و آستانه‌های حذف ماده تأکید کردند. در زمینه ساخت افزایشی، میر کوهی و همکاران [۱۰] مدل مذکور را جهت شبیه‌سازی فرایند ذوب انتخابی بکار برده و در کاری مشابه، کیران^۵ و همکاران [۱۱] از مدل گلداک برای شبیه‌سازی منبع حرارتی و توزیع تنش پسماند ایجاد شده در فرایند رسوب مستقیم لیزری استفاده کردند و بینش‌هایی در مورد توزیع حرارت لایه به لایه ارائه دادند. به‌طور کلی، این مطالعات قابلیت انطباق و دقت مدل گلداک را در شبیه‌سازی برهم‌کنش پیچیده لیزر- ماده در ناحیه حوضچه مذاب در فرایندهایی همچون روکش کاری لیزری و ساخت افزایشی برجسته می‌کند.

در کنار مدل سازی فرایند که با چالش‌هایی مرتبط با پیچیدگی پارامترها، محدودیت‌های شبکه‌بندی (مش) و نیازهای اعتبارسنجی مواجه است، پایش تغییرات دینامیک حوضچه مذاب در زمان واقعی یا برخط به‌عنوان یکی از روش‌های کنترل فرایندی که به بهبود کیفیت و کارایی لایه‌های روکش شده منجر می‌شود، مطرح شده است. در کنار روش رایج تصویربرداری جهت پایش لحظه‌ای دما و میکروساختار و کنترل کیفی فرایند [۱۲، ۱۳]، یکی دیگر از تکنیک‌های پر کاربرد در این زمینه، طیف‌سنجی اپتیکی است که شامل طیف‌سنجی پلاسمای نشری^۶

¹ Goldak

² Kik

³ Li

⁴ Zhang

⁵ Kiran

⁶ Plasma Emission Spectroscopy (PES)

[۱۴] و طیف‌سنجی فرو شکست القایی لیزری^۷ [۱۵] است. ژانگ و همکاران [۱۶] از طیف‌سنجی پلاسما گسیلی برای پایش برخط دمای زمینه حرارتی و پلوم^۸ پلاسما استفاده کرده و آن را با پردازش تصویر ترکیب کردند تا به طور هم‌زمان دمای حوضچه مذاب و ابعاد روکش را پایش کنند. اشمیت و همکاران^۹ [۱۷] از طیف‌سنجی پلاسما گسیلی در فرایند رسوب مستقیم فلز لیزری بصورت داخل خطی جهت مشخص کردن تاثیر پارامترهای ورودی فرایند استفاده کردند و در تحقیقی دیگر، والدیان^{۱۰} و همکاران [۱۸] رویکرد جامعی را برای ارتباط تحلیل طیف گسیل شده با کیفیت لایه‌های پوشش داده شده در طی فرآیند رسوب‌گذاری فلز لیزری ارائه دادند. مزیت این نوع طیف‌سنجی، در توانایی آن برای نظارت بر رفتار نواحی با دمای بالا همچون ناحیه پلاسما است. اما این روش با چالش‌هایی مانند طیف‌های ضعیف پلاسما در چگالی توان‌های پایین لیزر مواجه است که مشخصه‌یابی طیف را بخصوص در تعیین ترکیب عناصر با مشکل مواجه می‌کند.

روش طیف‌سنجی فرو شکست القایی لیزری، به عنوان یک تکنیک پیشرفته در پایش برخط فرآیندهای ساخت افزایشی بر پایه لیزر، به دلیل توانایی آن در ارائه اطلاعات در لحظه و دقیق درباره ترکیب شیمیایی و وضعیت حوضچه مذاب، اهمیت زیادی دارد. لدف^{۱۱} و دیگران [۱۹] از این روش جهت پایش برخط جوشکاری لیزری و در پژوهشی دیگر [۲۰] آن را جهت بررسی فرایند ساخت افزایشی بکار بردند و تصویری جامع از وضعیت حرارتی و شیمیایی فرایند ارائه دادند. همچنين وانگ^{۱۲} و همکاران [۲۱] از این نوع طیف‌سنجی برای اندازه‌گیری دمای موضعی حوضچه مذاب و ترکیب عناصر آن استفاده کردند و دقت بالای آن را در تشخیص‌های برخط عیوب آشکار ساختند. این مطالعات تنوع و پتانسیل طیف‌سنجی را برای بهبود شناسایی عیوب و کنترل و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند جهت رسیدن به یک روکش باکیفیت در روکش کاری لیزری برجسته می‌کند.

در تحقیقات اخیر [۲۲-۲۴] محققان بر روی ترکیب روش‌های تحلیلی، شبیه‌سازی و تجربی در قالب روش‌های هیبریدی تمرکز کرده‌اند تا بتوانند مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تری از دینامیک حوضچه مذاب را بوجود آورند. ترکیب شبیه‌سازی دقیق فرایند و پایش برخط دینامیک آن، رویکردی تازه جهت کنترل و بهینه‌سازی فرایند روکش کاری لیزری است که دقت بالایی در پیش‌بینی رفتار حرارتی و شیمیایی حوضچه مذاب ارائه می‌دهد. مدل گلداک با شبیه‌سازی دقیق توزیع حرارت حوضچه مذاب، دما، ابعاد و درصد آمیختگی روکش را اندازه‌گیری می‌کند، درحالی‌که طیف‌سنجی به‌طور هم‌زمان دمای حوضچه مذاب، درصد آمیختگی و ترکیب شیمیایی را در زمان واقعی پایش می‌کند. این روش باعث کالیبراسیون مداوم مدل شبیه‌سازی بر اساس داده‌های واقعی ناشی از مشخصه‌یابی طیفی می‌شود، که در نتیجه دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش داده و تنظیم لحظه‌ای پارامترهای فرایند را برای بهبود کیفیت روکش امکان‌پذیر می‌سازد. این رویکرد جدید علاوه بر کاهش خطا، یکنواختی و کیفیت لایه روکش را بهبود داده و تولید قطعات پیشرفته را در صنایع ساخت افزایشی تسهیل می‌بخشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این تحقیق، پودر اینکونل ۷۱۸^{۱۳} بر روی زیرلایه‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴^{۱۴} پوشش داده شده است. این آلیاژ پایه نیکل به طور گسترده‌ای در کاربردهای مختلف با دمای بالا، نظیر توربین‌های گازی، ابزارآلات، نیرو و قطعات صنایع فرایندی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵]. شکل میکروسکوپی پودر اینکونل ۷۱۸ استفاده شده با اندازه دانه‌ای بین ۳۵ تا ۱۰۰ میکرون در شکل ۱ و مشخصات ترکیبی آن در جدول ۱ آورده شده است.

⁷ Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

⁸ Plume

⁹ Schmidt

¹⁰ Valdiande

¹¹ Lednev

¹² Wang

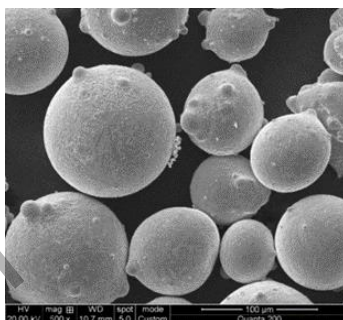
¹³ Inconel 718

¹⁴ SS304

جدول ۱. ترکیب پودر اینکونل ۷۱۸

Table 1. Composition of Inconel 718 powder

ماده	کربن	کروم	فسفر	نیتروژن	نیکل	آهن	منگنز	سولفور	نیبیدیوم	آلومینیوم	تیتانیوم
اینکونل ۷۱۸	۳/۸۸	۲۰/۱۰	۰/۲۲	۰/۰۱	۵۰/۱۲	۱۵/۸۶	۰/۴۱	۰/۴۶	۴/۰۵	۲/۵۰	۲/۳۹

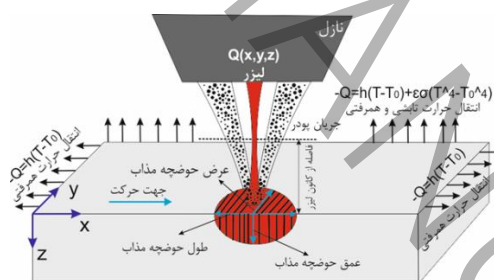


شکل ۱. مورفولوژی پودر اینکونل ۷۱۸

Fig 1. Morphology of Inconel 718 powder

۲-۲- مدل سازی میدان دما

بخش مهمی از مدل سازی فرایندهای تولید افزودنی، پیش بینی میدان دمایی است که توسط لیزر اعمال می شود. در فرایند روکش کاری لیزری، برهم کنش بین لیزر و مواد اتفاق افتاده و لیزر حرارت مورد نیاز برای ذوب پودرها را فراهم می کند. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، لیزر در جهت محور t حرکت کرده و پودر انرژی آن را در طول فرایند روکش کاری جذب می کند.



شکل ۲. نحوه انتقال گرما در فرایند روکش کاری لیزری [۲۶]

Fig 2. Heat transfer mechanism in the LC process [26]

در تجزیه و تحلیل حرارتی، میدان حرارتی گذرا ناحیه روکش فلزی توسط زمان اثر لیزر t و سیستم مختصات فضایی (x, y, z) تعیین می شود. معادله انتقال حرارت غیر خطی زیر توزیع گرما را در طول فرآیند تعریف می کند:

$$\frac{\partial u \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho h V}{\partial x} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} \quad (1)$$

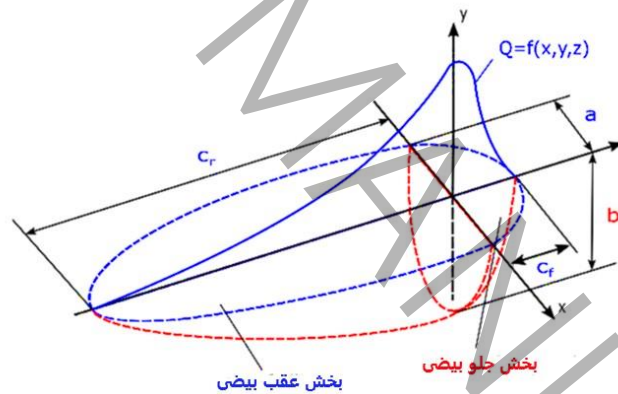
که در آن V, T, q, k, ρ, h, u به ترتیب انرژی داخلی، آنتالپی، چگالی، هدایت گرمایی، منبع حرارت حجمی، دما و سرعت منبع گرما را نشان می‌دهند. در تحلیل حرارتی که رسوب‌گذاری در آن انجام می‌شود، دمای منطقه‌ای تحت تأثیر زمان t و مختصات فضایی (x, y, z) سیستم قرار دارد. انتقال حرارت در فرآیند با استفاده از معادله غیرخطی زیر تعریف می‌شود [۲۷].

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q(r,t) + Q(r,t) \quad (2)$$

در اینجا T به دما (متغیر وابسته)، ρ به چگالی ماده، به C_p ظرفیت گرمایی ویژه و Q به شارش حرارتی منبع لیزر اشاره دارد. در معادله مذکور q به صورت زیر محاسبه می‌شود که $k(T)$ هدایت حرارتی ماده را نشان می‌دهد.

$$q = -k(T)\nabla T \quad (3)$$

معادله (۲) به بررسی انتقال حرارت گذرا در ناحیه روکش می‌پردازد، جایی که $\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t}$ نشان‌دهنده نرخ تغییر دما در طول زمان و $\nabla \cdot (k\nabla T)$ جریان حرارت ناشی از هدایت حرارتی را توصیف می‌کند. حل این معادله توزیع دمای گذرا را در طول زمان و فضا در فرآیند روکش کاری لیزری ارائه می‌دهد و این امکان را فراهم می‌سازد که پروفایل‌های دما و رفتار حرارتی در طول عملیات ساخت افزایشی تجزیه و تحلیل شوند.



شکل ۳. منبع حرارتی بیضوی دوگانه سه بعدی [۷]

Fig 3. Three-dimensional dual elliptical heat source [7]

در این پژوهش، برای توصیف منبع حرارتی لیزری، مدل منبع حرارتی سه‌بعدی بیضوی دوگانه که توسط گلداک به شرح زیر توسعه داده شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل یک منبع حرارت ترکیبی متشکل از دو منبع بیضی‌شکل را در نظر می‌گیرد (شکل ۳). گرما به روش گاوسی بر روی این مناطق نیمه بیضی که در یک سیستم مختصات محلی تعریف شده‌اند به شکل رابطه (۴) توزیع می‌شود. در رابطه مذکور، $q(x, y, z, t)$ به معنای چگالی توان لیزر (توان لیزر به ازای واحد سطح) در نقطه (x, y, z) در زمان t است. P توان لیزر، η جذب لیزر، V سرعت حرکت لیزر و a, b, c_f, c_r شعاع‌های مربوطه بیضی هستند که در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}\eta P}{ab\pi\sqrt{\pi}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_f}{c_f} e^{\left(\frac{3(x-Vt)^2}{c_f^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2} \right)} \text{ for } x \geq Vt \\ \frac{f_r}{c_r} e^{\left(\frac{3(x-Vt)^2}{c_r^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2} \right)} \text{ for } x < Vt \end{array} \right. \quad (4)$$

برخی از محققین [۲۸, ۲۹] سعی کردند متغیرهای معادله فوق را با اعمال محدودیتی به شکل زیر کاهش دهند:

$$\frac{f_f}{c_f} = \frac{f_r}{c_r} \quad (5)$$

زمانی که داده‌های تجربی کافی در دسترس نیست، مطابق پیشنهاد گلداک و همکارانش باید f_f برابر ۰/۱۶ به عنوان یک مقدار پیش فرض استفاده شود. جدول ۲ پارامترهای مورد نیاز و نحوه تعیین آن‌ها را برای شبیه سازی منبع لیزر مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۲. پارامترهای مدل سازی منبع لیزر

Table 2. Parameters for laser source modeling

۰/۷۵ میلی‌متر (شعاع باریکه لیزر در کانون)	a
متغیر بر اساس پارامترهای ورودی	b
۰/۱۶	f_f
۱/۴	f_r
۰/۹۳ میلی‌متر	c_r
۰/۴ میلی‌متر	c_f

با در نظر گرفتن تابش از لایه روکش و تبادل حرارت با محیط از طریق همرفت، می‌توان شرایط مرزی را به صورت زیر به دست آورد:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = q(x, y, t) - h(T - T_0) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (6)$$

در اینجا h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، T دمای سطح لایه روکش و T_0 دمای محیط را نشان می‌دهد. مدل حاضر می‌تواند برای شبیه‌سازی تغییر شکل حوضچه مذاب و هندسه نهایی لایه روکش به کار رود. در این مدل، اثر ذوب گرمای نهان محاسبه شده با ظرفیت گرمای ویژه اصلاح شده، مطابق معادله زیر به دست می‌آید:

$$C_p^m = C_p(T) + L_f \frac{\partial f}{\partial T_n} \quad (7)$$

که در آن $C_p(T)$ گرمای ویژه وابسته به دما، $L_f \frac{\partial f}{\partial T_n}$ گرمای نهان ذوب و f نسبت مایع است که می‌توان آن را از معادله زیر محاسبه کرد:

$$f = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s} & T_s < T < T_L \\ 1 & T > T_L \end{cases} \quad (8)$$

که T_L, T_s به ترتیب دمای جامد و مایع هستند. همچنین f_r, f_f به ترتیب بخشی از گرمای رسوب شده در بیضی عقب و جلو هستند که داریم:

$$f_r + f_f = 2 \quad (9)$$

به منظور تطبیق نتایج با داده‌های تجربی، کالیبراسیون مدل منبع حرارت بیضوی دوگانه نیاز به تنظیم پارامترها f_r, c_f, c_r, b, a دارد. لازم بذکر است، توزیع انتقال حرارت به دلیل جریان سیال حوضچه مذاب و تأثیر نیروهای مارانگونی¹⁵ متغیر است. برای در نظر گرفتن این اثر و اجتناب از پیچیدگی تحلیل، رسانایی حرارتی معادل برای توزیع انتقال حرارت مطابق معادله (۱۰) استفاده می‌شود.

$$k^*(T) = \begin{cases} k(T) & T < T_L \\ k(T) \times 2.5 & T \geq T_L \end{cases} \quad (10)$$

در ادامه جهت مدل سازی فرایند خصوصیات وابسته به دمای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در جدول ۳ آورده شده است.

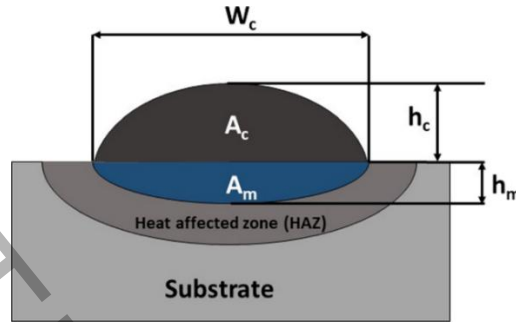
جدول ۳. خصوصیات وابسته به دمای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ [۳۱, ۳۰]

Table 3. Temperature-dependent properties of Inconel 718 alloy [30,31]

عبارت	پارامتر
$K^*(T) = \begin{cases} 0.0151T + 5.2465 & T < T_L \\ 2.5 \times (0.0151T + 5.2465) & T \geq T_L \end{cases}$	هدایت گرمایی (W/m °C)
$C(T) = \begin{cases} 0.362T + 2.118 \times 10^{-4} & T < T_s \\ -0.946 + 0.295 \times 10^{-2}T - 1.379 \times 10^{-6}T^2 & T_s \leq T \leq T_L \\ 0.639 - 3.355 \times 10^{-6}T & T_L < T \end{cases}$	ظرفیت گرمایی ویژه (J/Kg °C)
$E(T) = 205 - 0.055T$	مدول الاستیسیته (GPa)
$\alpha(T) = 12.8 + 0.0026T$	ضریب انبساط گرمایی ($\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)
$\nu(T) = 0.029 + 0.00005T$	ضریب پواسون
$\rho = 8190$	چگالی (Kg/m^3)

¹⁵ Marangoni

در مدل حاضر می‌توان از شبیه‌سازی توزیع دمای حوضچه مذاب، ابعاد و هندسه لایه روکش را اندازه‌گیری کرد. به‌طور کلی سطح مقطع عرضی لایه روکش دارای شکلی بیضوی است که عمق و عرض مشخصی دارد که در شکل ۴ قابل مشاهده است. پارامترهای کلیدی شامل عرض W_c ، ارتفاع h_c و نفوذ یا عمق روکش h_m و همچنین مساحت ناحیه روکش A_c و ناحیه آمیختگی A_m در شکل ۴ مشخص شده‌اند.



شکل ۴. سطح مقطع روکش و پارامترهای آن [۳۲]

Fig 4. Cross-section of the cladding and its parameters [32]

در روکش کاری لیزری، آمیختگی به میزان مخلوط‌شدن مواد زیرلایه با مواد روکش در طول فرایند اشاره دارد. معمولاً به‌صورت درصد بیان می‌شود و برای تعیین ویژگی‌های لایه روکش شده به‌دست‌آمده بسیار مهم است. باتوجه‌به شکل ۴، درصد آمیختگی را می‌توان از رابطه (۱۱) محاسبه کرد. درصد آمیختگی میزان درصد نفوذ لیزر در زیر لایه را نشان می‌دهد و اینکه چه مقدار از ماده زیرلایه با ماده روکش جهت ایجاد لایه روکش نهایی ترکیب شده است. این فاکتور تحت‌تأثیر پارامترهای ورودی مانند توان لیزر، سرعت روبش، نرخ تغذیه پودر، اندازه پودر و نوع گاز محافظ قرار دارد. تعیین درصد آمیختگی در روکش کاری لیزری از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا به‌طور مستقیم بر خواص مکانیکی و کیفیت روکش تأثیر می‌گذارد. آمیختگی بیش از حد می‌تواند خواص ماده روکش را تضعیف کرده و آن را به‌خواص زیرلایه نزدیک کند، درحالی‌که آمیختگی بسیار کم نیز ممکن است به‌اتصال ضعیف و چسبندگی ناکافی روکش منجر شود؛ بنابراین، کنترل و بهینه‌سازی درصد آمیختگی برای دستیابی به اتصالی قوی و خواص مطلوب در محصول نهایی ضروری است.

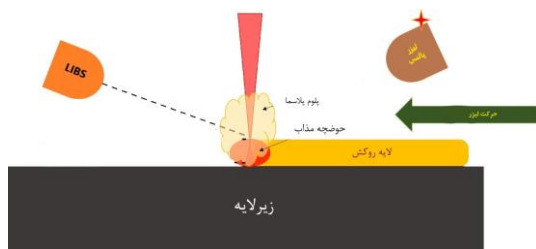
$$\gamma = \frac{h_m}{h_c + h_m} \equiv \frac{A_m}{A_c + A_m} \quad (11)$$

۳-۲- طیف سنجی حوضچه مذاب

در این تحقیق، جهت بررسی آزمایشگاهی دینامیک حوضچه مذاب از روش طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری استفاده می‌کنیم. در این روش از یک لیزر نانوژانیه پالسی برای ایجاد پلاسما در محل حوضچه مذاب کمک گرفته می‌شود. در این فرایند بعد از برخورد باریکه لیزر به سطح هدف، دمای سطحی به‌سرعت تا دمای بیش از دمای تبخیر بالا می‌رود. پیش از تبخیر لایه‌های سطحی، مواد زیرین سطح به دما و فشار بحرانی رسیده و باعث کندگی^{۱۶} سطح می‌شوند. سپس برهم‌کنش بخش‌های بعدی باریکه لیزر با مواد تبخیرشده در مجاورت سطح هدف، سبب یونش بخار و تشکیل پلاسما می‌شود. این روش این امکان را فراهم می‌کند که پلاسمای موضعی تشکیل شده در زمان انجام فرایند در محل حوضچه مذاب را تحلیل و بررسی کنیم و با استفاده از آن اطلاعاتی درباره ترکیب، دما و سایر ویژگی‌های حوضچه مذاب به دست آوریم [۳۳]. با توجه به توزیع ناهمگن دمای پلاسمای القایی لیزر و دمای بالای مرکز پلاسما و همچنین کوتاه بودن طول عمر آن، برای اندازه‌گیری دما، باید شرایط تعادل دمایی موضعی [۳۴] برقرار باشد که به‌طور معمول پس از تعداد کافی برخورد و به‌طور متوسط در زمان حدود

¹⁶ ablation

یک میکروثانه پس از تولید پلازما این شرایط رخ می‌دهد [۳۵]. شکلی شماتیک از سیستم موردنظر و موقعیت پروب آن نسبت به هد روکش و میز در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵. طیف سنجی پلاسمای گسیلی در فرایند روکش کاری لیزری

Fig 5. Emission plasma spectroscopy in the LC process

۴-۲- چیدمان آزمایشگاهی

در این فرایند، از یک سیستم روکش کاری لیزری ساخت مرکز ملی لیزر ایران (شکل ۶) که شامل یک لیزر فیبر پیوسته با توان ۲ کیلووات و قطر باریکه ۱/۵ میلی‌متر در کانون، برای رسوب‌گذاری پودر اینکونل ۷۱۸ بر روی نمونه‌های زیرلایه فولاد زنگ نزن ۳۰۴ استفاده گردید. برای دستیابی به توزیع یکنواخت پودر، از یک سیستم تغذیه پودر تک کاناله و نازل پودر هم محور و همچنین از گاز آرگون به عنوان گاز کمکی در این فرایند بهره گرفته شده است. هدروکش کاری لیزری به گونه‌ای طراحی شده است که پودر روکش را به صورت متقارن و یکنواخت، درست در امتداد محور پرتو لیزر به حوضچه مذاب هدایت کند. برای بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر نتایج روکش کاری، از یک میز سه محوره کارترین برای انجام روکش کاری با سرعت‌های روبش متفاوت استفاده شده است. تنظیم پارامترهای ورودی شامل توان لیزر، فاصله کانونی، سرعت روبش، نرخ تغذیه پودر و موقعیت قطعه کار بر عهده بخش کنترلر دستگاه است.

در طراحی آزمایش فرایند، بر روی سه پارامتر ورودی توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر تمرکز شده که بیشترین تأثیر را بر روی دینامیک حوضچه مذاب دارند. هر کدام از پارامترها در ۴ سطح مختلف طبق جدول ۴ تغییر می‌کنند. با در نظر گرفتن حالت فاکتوریل کامل، ۶۴ آزمایش در نظر گرفته شده تا تأثیرات متقابل این پارامترها با دقت بالایی بررسی شوند. با توجه به مواد استفاده شده و خطوط روکش اولیه، توان لیزر در محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰ وات در نظر گرفته شده که علاوه بر ذوب کامل پودر و نفوذ در زیرلایه از ذوب بیش از حد زیرلایه نیز جلوگیری شود. از طرف دیگر سرعت روبش تأثیر زیادی بر توزیع حرارت و زمان تماس لیزر با سطح دارد که بر طبق کالیبراسیون میز بکار برده شده سرعت روبش از ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شده است. با توجه به نوع پودرپاش مورد استفاده و اطمینان از رسیدن پودر کافی به محل حوضچه مذاب، نرخ تغذیه پودر نیز در محدوده ۷ تا ۱۶ گرم بر دقیقه در نظر گرفته شده است که خطوط روکش یکنواختی به دست آید.

جدول ۴. پارامترهای ورودی و سطوح تغییر آنها

Table 4. Input parameters and their variation levels

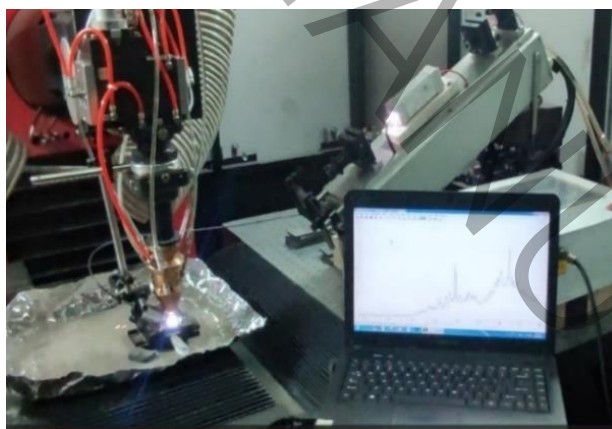
پارامتر	سطح تغییر			
	۱	۲	۳	۴
توان لیزر (وات)	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۱۶۰۰
سرعت روبش (میلی‌متر بر دقیقه)	۵۰۰	۸۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰
نرخ تغذیه پودر (گرم بر دقیقه)	۷	۱۰	۱۳	۱۶



شکل ۶. سیستم روکش کاری لیزری و اجزای اصلی آن با یک سری خطوط روکش

Fig 6. LC system and its main components with a clad lines set

سیستم طیف‌سنجی بر پایه یک لیزر پالسی نانو ثانیه طراحی شده است که در شکل ۷ به نمایش درآمده است. این لیزر به صورت پمپاژ لامپی و بانرژی ۱۰۰ میلی ژول، پهنای پالس ۱۰ نانو ثانیه و نرخ تکرار ۱۰ هرتز تنظیم شده است. باریکه لیزر به کمک یک عدسی ۳۰ سانتی‌متری به یک باریکه بیضوی در محل برهم‌کنش لیزر با ماده متمرکز می‌شود که اندازه تقریبی قطر باریکه لیزر در موقعیت قطعه ۵۰۰ در ۷۰۰ میکرومتر است. در این چیدمان جهت جمع‌آوری حداکثر نور منتشر شده، موازی‌ساز مربوط به طیف‌سنج در زاویه ۴۵ درجه نسبت به هد روکش قرار دارد. عرض ناحیه حوضچه مذاب به حدود ۳/۵ میلی‌متر در ناحیه برخورد لیزر با ماده می‌رسد و در نتیجه باریکه لیزر پالسی که دارای عرضی کمتر است در این ناحیه قرار می‌گیرد. لازمه این امر مستلزم تنظیم دقیق محل برخورد باریکه لیزر پالسی با منطقه حوضچه مذاب است..



شکل ۷. سیستم طیف‌سنجی جهت پایش برخط فرایند روکش کاری لیزری

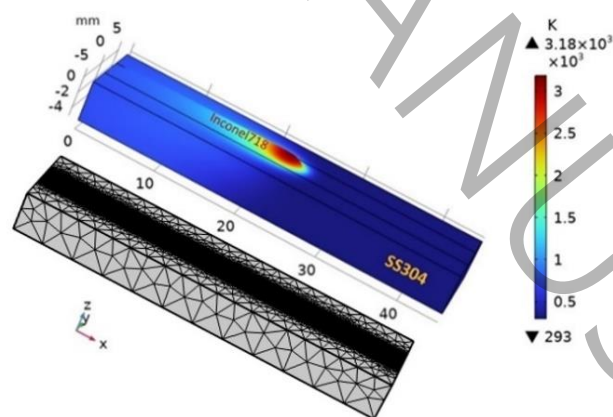
Fig 7. Spectroscopy system for real-time monitoring of the LC process

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شبیه‌سازی دینامیک حوضچه ذوب

شبیه‌سازی مدل حرارتی مقاله حاضر با بهره‌گیری از شبکه‌بندی متحرک در نرم‌افزار محاسباتی کامسول انجام گرفته است. حوزه محاسباتی در این پژوهش شامل یک رابط مایع یا جامد متحرک است که به طور صریح با استفاده از روش اویلری - لاگرانژی دلخواه^{۱۷} ردیابی می‌شود. در این روش، جابه‌جایی گره‌های مرزی توسط پدیده‌های مکانیک سیالات کنترل می‌شود و با توصیف لاگرانژی بیان می‌شود در حالی که گره‌های دامنه از توصیف اویلری پیروی می‌کنند. گره‌های داخلی با این وجود برای جلوگیری از ناپایداری‌های عددی هنگام محاسبه جابه‌جا می‌شوند. محاسبات ارائه شده در این پژوهش با استفاده از روش لاپلاس انجام شده است. این مدل‌سازی به طور خاص برای رسوب‌گذاری یک نوار تک‌لایه از اینکونل ۷۱۸ بر روی زیرلایه استیل ۳۰۴ طراحی شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، از دو نوع المان چهارگوش شش‌وجهی و سه‌گوش چهاروجهی استفاده می‌شود. از المان‌های چهارگوش شش‌وجهی برای روکش و المان‌های سه‌گوش چهاروجهی برای زیرلایه بهره گرفته شده است. با هدف افزایش دقت نتایج، شبکه‌بندی ریزتر در ناحیه اطراف پوشش و ناحیه متأثر از شار حرارتی ناشی از لیزر و برای کاهش زمان تحلیل، شبکه‌بندی درشت‌تر در بقیه نقاط به کار می‌رود. هندسه و جزئیات مدل به همراه توزیع دمای یک خط روکش در شکل ۸ آورده شده است.

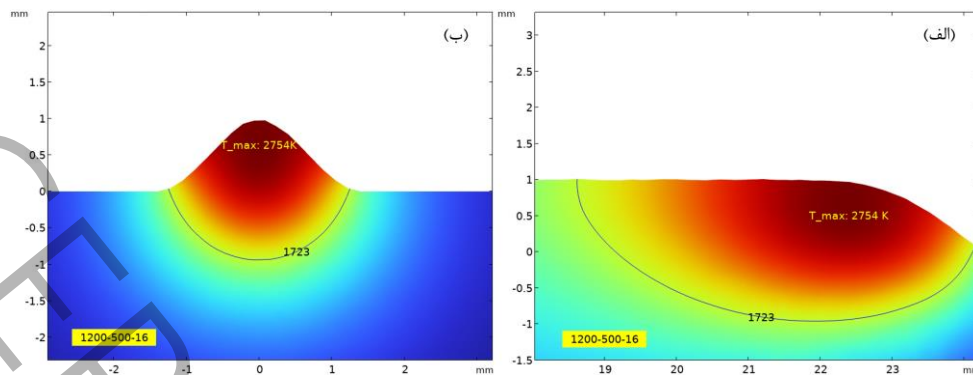
هنگامی که فرایند روکش کاری لیزری شروع می‌شود، انرژی لیزر توسط مواد پودر و زیرلایه جذب شده و دمای آن از دمای نقطه ذوب زیرلایه (۱۷۲۳ درجه کلوین) فراتر رفته و گرما تولید می‌شود. خط ذوب ۱۷۲۳ در شکل‌ها مرز بین منطقه مذاب و لایه روکش منجمد شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، برای حالت با توان ۱۲۰۰ وات، سرعت روبش ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و نرخ تغذیه پودر ۱۶ گرم بر دقیقه (شماره نمونه به شکل توان لیزر- سرعت روبش - نرخ تغذیه پودر نامگذاری شده است)، در جهت روکش گرما از مرکز حوضچه مذاب به سمت لبه‌ها منتقل می‌شود و مطابق با شکل ۹-ب، در حالت عمود بر آن، پروفایل حرارتی گاوسی متقارن در عرض روکش گسترش یافته و به عمق زیرلایه نفوذ می‌کند. تفاوت‌های موجود در خواص حرارتی مواد روکش و زیرلایه، تأثیر زیادی بر روی نحوه انتقال حرارت و کیفیت نهایی روکش دارد.



شکل ۸. شبیه‌سازی مدل روکش کاری لیزری و هندسه شبکه بندی آن

Fig 8. Simulation of the LC model and mesh geometry

¹⁷ Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE)

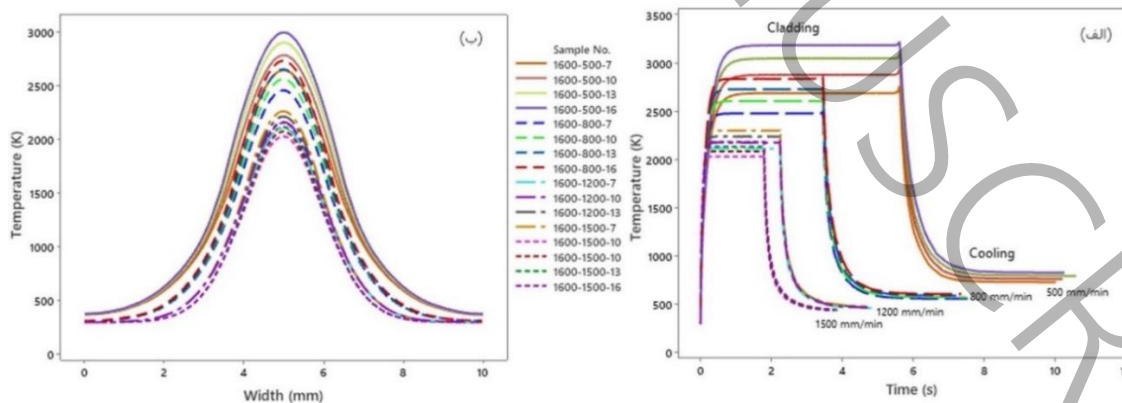


شکل ۹. نحوه توزیع گرما در سطح مقطع روکش (الف) در جهت حرکت لیزر (ب) در جهت عمود بر آن

Fig 9 Heat distribution in the clad cross-section: (a) along the direction of laser movement, and (b) across it perpendicular to the movement

نحوه توزیع گرما در شکل ۱۰-الف برای حالت‌های مربوط به توان ۱۶۰۰ وات در سرعت‌های رویش و نرخ تغذیه پودرهای مختلف در جهت روکش برحسب زمان نشان داده شده است. در این حالت برای هر نمونه مشاهده می‌شود که با شروع فرایند، دمای خط روکش بلافاصله بالا رفته و از دمای ذوب زیرلایه فراتر رفته و بعد از خاموشی لیزر و خنک شدن زیرلایه به تدریج دمای آن پایین می‌آید. شکل ۹-ب، تغییر دما برای این حالات را عمود بر جهت حرکت لیزر و سطح روکش نشان می‌دهد.

جهت بررسی همگرایی و اطمینان از پایداری نتایج به دست آمده، تغییرات نتایج را بر اساس تغییر اندازه شبکه (مش) بررسی می‌کنیم. همان‌طور که گفته شد، مدل شبکه‌بندی از دو اندازه مختلف تشکیل شده است: قسمت داخلی (نزدیک‌ترین محدوده به مسیر باریکه لیزر) و ناحیه بیرونی قطعه کار. برای هر یک از این دو قسمت چهار اندازه شبکه متفاوت مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شده و تجزیه و تحلیل نحوه انتقال حرارت برای هر یک انجام شده است. با استفاده از چهار آنالیز با اندازه شبکه‌بندی‌های مختلف و بررسی تغییرات دما و زمان، همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، یک مدل المان محدود مستقل از شبکه بندی به دست آمده است بطوریکه مدل‌های شماره ۳ و ۴ با شبکه بندی ریزتر مدل دقیق‌تری را به نمایش می‌گذارند. با توجه به نزدیکی نتایج نمونه ۳ و ۴ جهت کاهش تعداد شبکه و انجام محاسبات، مدل شبکه بندی ۳ انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که پس از این مرحله اندازه عناصر و تعداد گره‌ها در تمامی شبیه‌سازی‌ها یکسان و مطابق نمونه ۳ در نظر گرفته شده است.



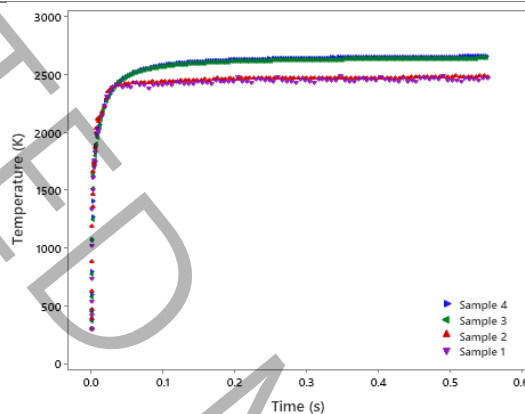
شکل ۱۰. (الف) - تغییر دما بر حسب زمان در طول خط روکش (ب) - تغییر دما در عرض روکش برای توان ۱۶۰۰ وات

Fig 10. (a) Temperature variation over time along the cladding, and (b) temperature fluctuations across the clad line

جدول ۵. آنالیز مربوط به اندازه‌های مختلف شبکه بندی

Table 5. Analysis of different mesh sizes

شماره آزمون	اندازه کوچک‌ترین عنصر (میلی‌متر)	اندازه بزرگ‌ترین عنصر (میلی‌متر)
۱	۳۰	۴۰۰
۲	۳۰	۳۰۰
۳	۱۰	۲۰۰
۴	۱۰	۱۰۰



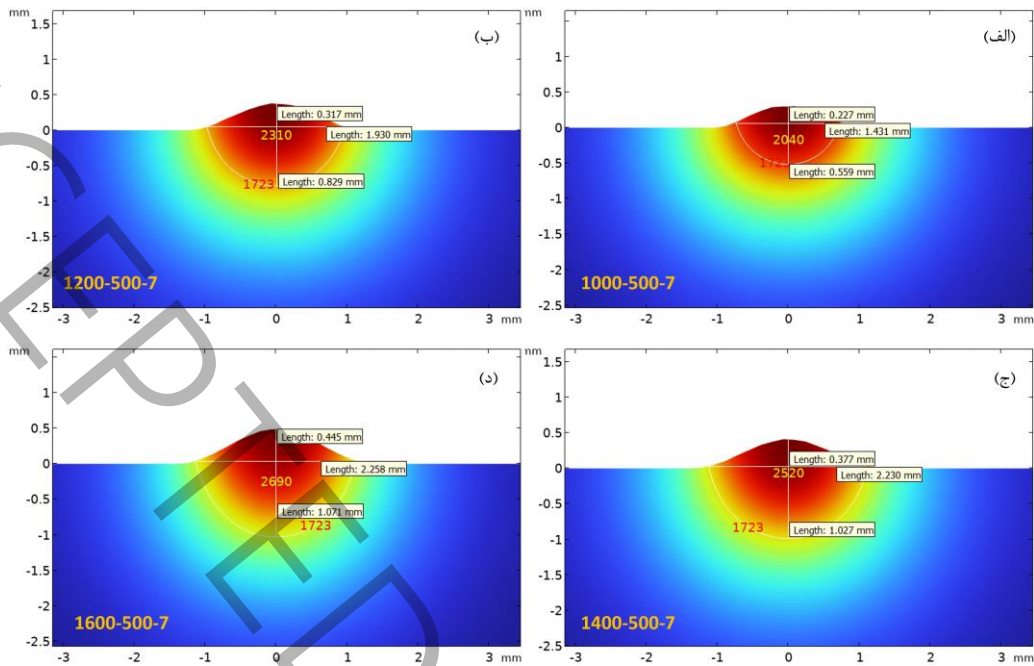
شکل ۱۱. دما بر حسب زمان در طول روکش برای شبکه بندی‌های مختلف

Fig 11. Temperature vs. time along the cladding for different mesh configurations

نمایه روکش برای پارامترهای ورودی مختلف، نشان می‌دهد که افزایش توان لیزر به طور مستقیم با افزایش چگالی انرژی لیزر مرتبط است؛ بنابراین دمای کلی فرایند در این حالت افزایش پیدا می‌کند. وقتی توان لیزر از ۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰ وات افزایش می‌یابد، عرض روکش به مقدار زیاد و ارتفاع آن به میزان کمتری افزایش می‌یابد. گسترش ابعاد حوضچه مذاب بر حسب توان لیزر ورودی را می‌توان در شکل ۱۲ مشاهده کرد؛ جایی که دمای حوضچه مذاب از ۲۰۴۰ درجه کلوین تا ۲۶۹۰ درجه کلوین افزایش پیدا می‌کند. برخلاف وضعیت قبلی، شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در توان لیزر و نرخ تغذیه پودر ثابت، افزایش سرعت روبش منجر به کاهش قابل توجهی در ابعاد لایه روکش می‌شود. این کاهش در ابعاد حوضچه مذاب همراه با کاهش دمای حوضچه مذاب است. این نتیجه قابل انتظار بود، زیرا افزایش سرعت برهم‌کنش لیزر با مواد باعث کاهش گرمای تولید شده در طول فرآیند روکش کاری می‌شود. علاوه بر نتایج فوق می‌توان مشاهده کرد، با افزایش نرخ تغذیه پودر، مقدار پودر فلز وارد شده به حوضچه مذاب افزایش می‌یابد؛ بنابراین ارتفاع لایه روکش به طور طبیعی افزایش پیدا می‌کند. این به نوبه خود باعث افزایش دمای حوضچه مذاب می‌شود. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که افزایش نرخ تغذیه پودر از ۷ گرم در دقیقه به ۱۶ گرم در دقیقه به طور قابل توجهی دمای حوضچه مذاب را از ۲۶۹۰ درجه کلوین به ۳۱۸۰ درجه کلوین می‌رساند. این افزایش در نرخ تغذیه پودر همچنین منجر به افزایش قابل توجه ارتفاع روکش و به مقدار کمتری عرض روکش می‌شود. همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است، پارامترهای ورودی فرایند بر دما و ابعاد حوضچه مذاب و همچنین میزان نفوذ آن در زیرلایه تأثیر می‌گذارند. برای درک بیشتر موضوع، تأثیر توان لیزر و سرعت روبش را در یک پارامتر به صورت چگالی انرژی که به صورت زیر تعریف می‌شود، خلاصه می‌کنیم که در آن LP توان لیزر، SS سرعت روبش و D قطر باریکه لیزر تعریف شده‌اند.

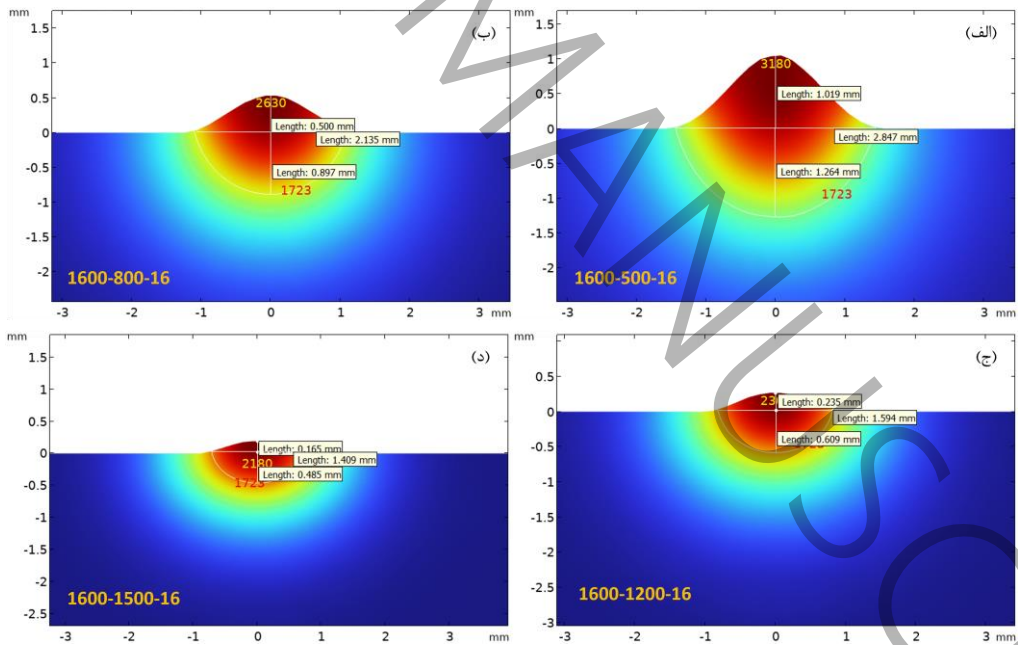
$$E.D. = \frac{LP}{SS * D}$$

(۱۲)



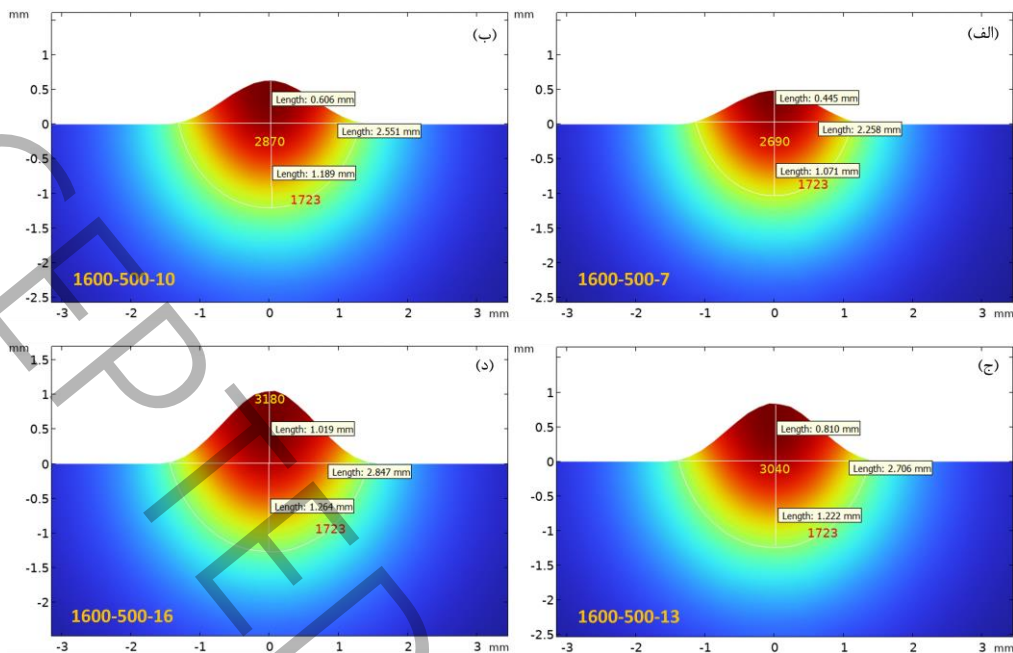
شکل ۱۲. سطح مقطع روکش برای توان لیزر (الف) ۱۰۰۰ (ب) ۱۲۰۰ (ج) ۱۴۰۰ (د) ۱۶۰۰ وات

Fig 12. Cross-section of the cladding for laser powers: (a) 1000, (b) 1200, (c) 1400, and (d) 1600 W



شکل ۱۳. سطح مقطع روکش برای سرعت روبش (الف) ۵۰۰ (ب) ۸۰۰ (ج) ۱۲۰۰ (د) ۱۵۰۰ میلی متر بر دقیقه

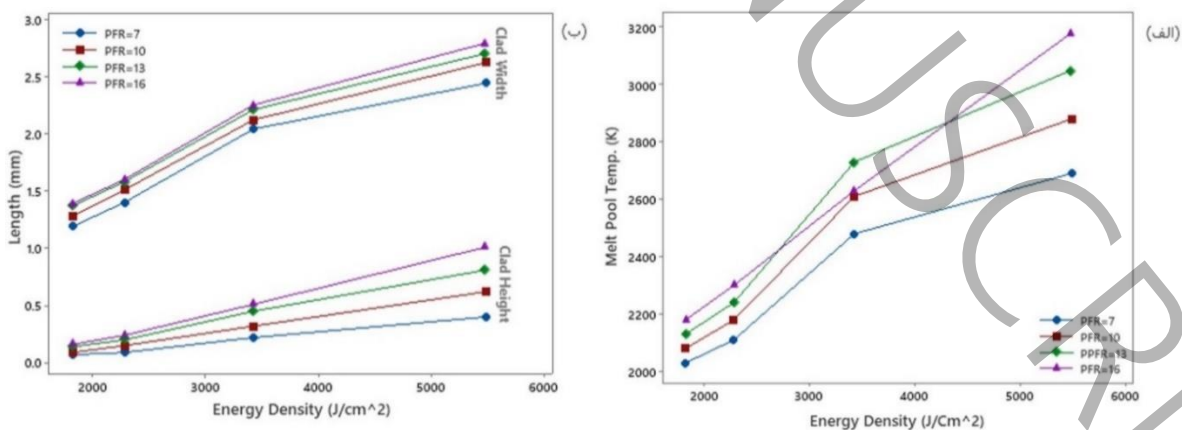
Fig 13. Cross-section of the cladding for scan speeds: (a) 500, (b) 800, (c) 1200, and (d) 1500 mm/min



شکل ۱۴. ابعاد و دمای سطح مقطع روکش برای نرخ تغذیه پودر (الف) ۷ (ب) ۱۰ (ج) ۱۳ (د) ۱۶ گرم بر دقیقه

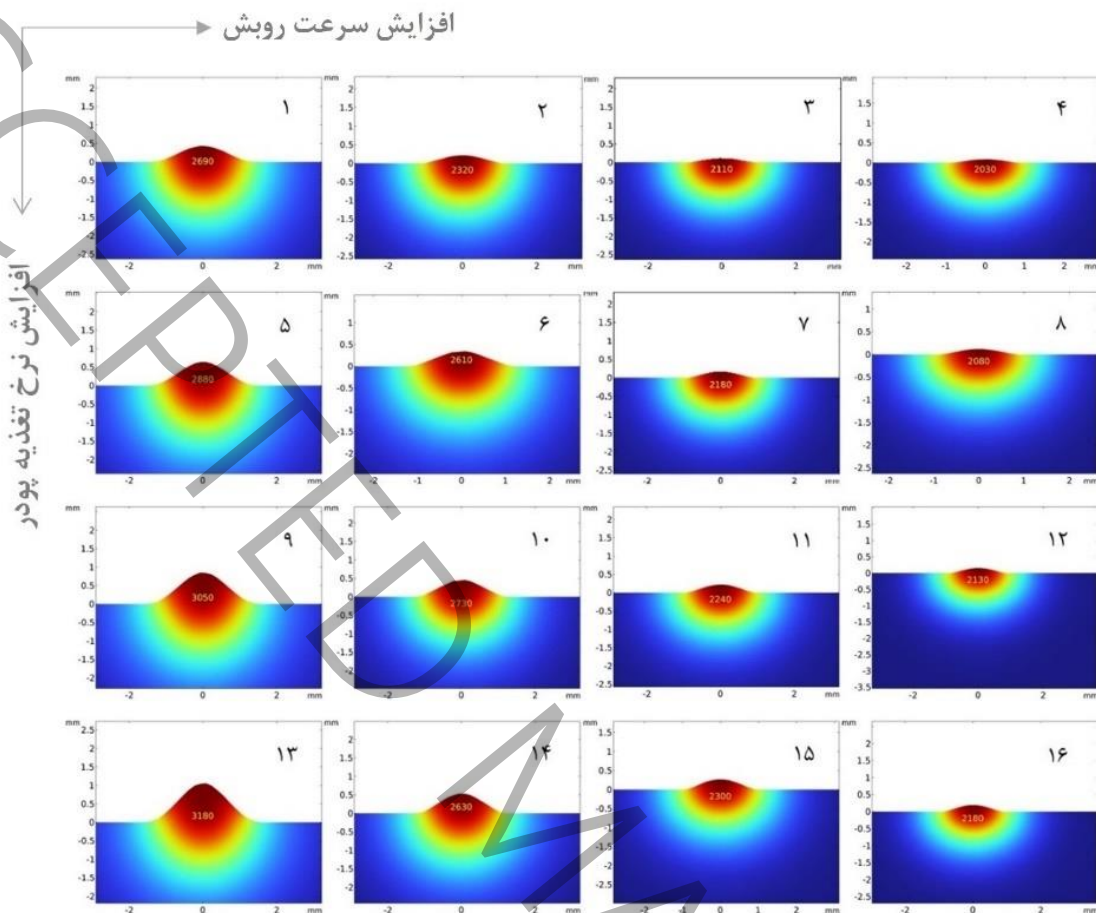
Fig 14. Cross-section of the cladding for powder feed rates (PFR): (a) 7, (b) 10, (c) 13, and (d) 16 gr/min

نتایج شبیه‌سازی مربوط به توان لیزر ۱۶۰۰ وات که در شکل ۱۵ آورده شده نشان می‌دهند که با کاهش سرعت روبش که منجر به افزایش چگالی انرژی ورودی شده، مقدار انرژی جذب شده توسط پودر و زیرلایه بیشتر شده و این باعث افزایش دما و افزایش عرض و ارتفاع روکش با نرخ‌های مختلف و نفوذ بیشتر در زیر لایه می‌شود. به بیان بهتر، در این حالت به دلیل انتقال بیشتر انرژی به زیر لایه، نرخ آمیختگی نیز بیشتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش نرخ تغذیه پودر علاوه بر افزایش دما، ارتفاع روکش به مقدار زیاد و عرض روکش به مقدار کمتر افزایش پیدا می‌کند. این افزایش ارتفاع روکش و نفوذ کمتر در زیر لایه منجر به کاهش درصد آمیختگی می‌شود. علت این است که در این حالت با ورود پودرهای بیشتر انرژی کمتری به زیرلایه رسیده و میزان نفوذ آن در زیرلایه کم شده و در نتیجه میزان آمیختگی کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۵. (الف) - تغییر دمای حوضچه مذاب (ب) - تغییر عرض و ارتفاع روکش بر حسب چگالی انرژی ورودی

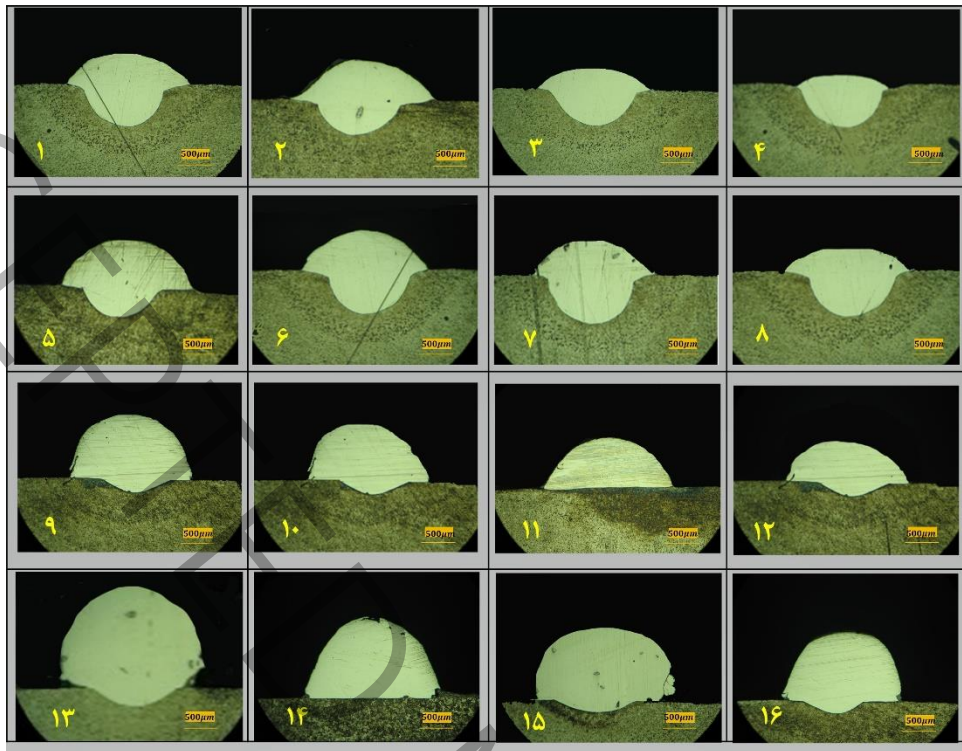
Fig 15. (a) Variation of melt pool temperature (b) variation of clad width & height vs. input energy density



شکل ۱۶. سطح مقطع روکش شبیه سازی شده برای توان لیزر ۱۶۰۰ وات

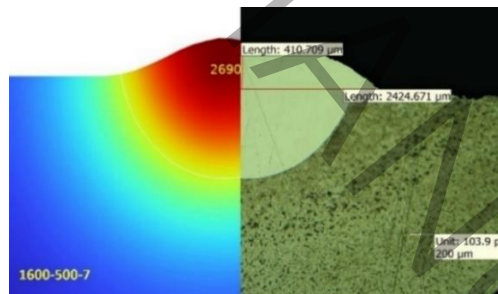
Fig 16. Cross-Section of the simulated clad for LP = 1600 W

پروفایل توزیع گرمای سطح مقطع حوضچه مذاب برای کلیه حالات مربوط به ۱۶۰۰ وات (۱۶ نمونه روکش) در شکل ۱۶ آورده شده است. در این اشکال، تغییر در ابعاد لایه روکش و حداکثر دمای حوضچه مذاب را می توان با تغییر در سرعت روبش در جهت (x) و تغییر در نرخ تغذیه پودر در جهت (y) مشاهده کرد. همانطور که مشاهده می شود تغییر سرعت روبش تاثیر زیادی بر ابعاد روکش داشته و تاثیر بیشتر نرخ تغذیه پودر بر ارتفاع روکش است. در روش تجربی، ابعاد لایه روکش (عرض و ارتفاع) با بررسی سطح مقطع آن تعیین می شود. هر نمونه خط روکش، مرحله آماده سازی را طی می کند که شامل برش، سنگ زنی و پرداخت سطح است. از تصاویر میکروسکوپی هر نمونه، عرض و ارتفاع لایه روکش اندازه گیری می شود. نتایج آزمایشگاهی سطح مقطع های اندازه گیری شده مربوط به نمونه های شبیه سازی شده شکل ۱۶ در شکل ۱۷ به نمایش درآمده است. این مقایسه به وضوح نمایانگر روند یکسان تغییر نتایج شبیه سازی و تجربی بر حسب پارامترهای ورودی است. برای مقایسه بهتر، نتایج شبیه سازی و تجربی یک نمونه خط روکش در شکل ۱۸ با ابعاد آن نشان داده شده است. مقدار خطای موجود بین نتایج در بعضی از نمونه ها به دلیل تغییر لحظه ای پارامترهای تنظیم شده ورودی و اجتناب ناپذیر است. بنابراین، بدون انجام فرایند اندازه گیری برای هر لایه روکش که فرایندی پرهزینه و زمان بر است، با شبیه سازی انجام شده می توان با دقت قابل قبولی هندسه روکش شامل عرض، ارتفاع و نفوذ روکش در زیر لایه را پیش بینی کرد.



شکل ۱۷. سطح مقطع روکش اندازه گیری شده برای توان ۱۶۰۰ وات

Fig 17. Measured cross-section of the clad for LP=1600 W



شکل ۱۸. مقایسه سطح مقطع روکش برای نمونه شماره ۱

Fig 18. Comparison of clad cross-section for the sample no.1

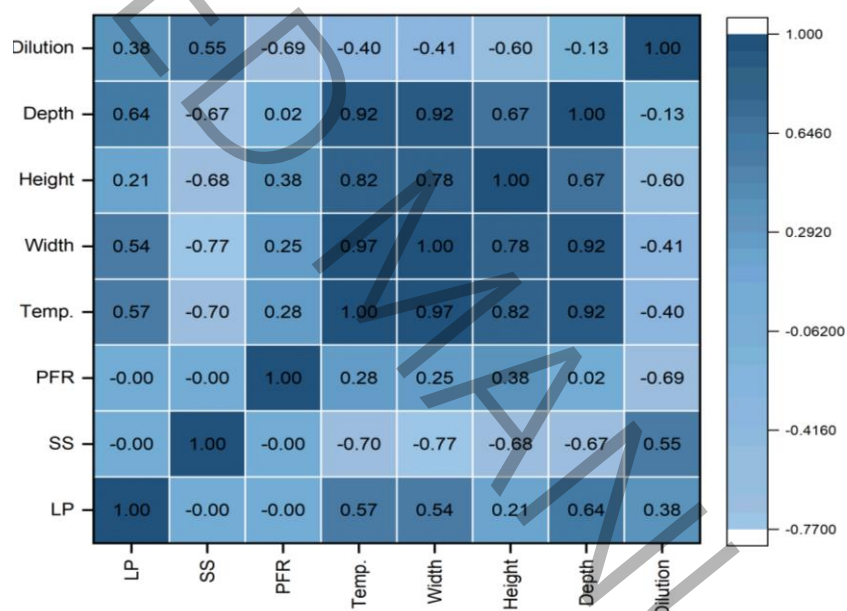
در ادامه جهت به دست آوردن ضرایب همبستگی بین پارامترهای مختلف از نمودار همبستگی پیرسون^{۱۸} کمک گرفته شده که با ضرایب آماری به دست آمده در جدول ۶، نمودار شکل ۱۹ حاصل می شود.

¹⁸ Pearson correlation

جدول ۶. ضرایب آماری مربوط به داده‌های ورودی و خروجی

Table 6. Statistical coefficients related to input and output data

عنوان متغیر	نماد	تعداد داده	میانگین	انحراف معیار	مجموع	حداقل	حداکثر
توان لیزر	LP	۶۴	۱۳۰۰	۲۲۵/۳۷	۸۳۲۰۰	۱۰۰۰	۱۶۰۰
سرعت روبش	SS	۶۴	۱۰۰۰	۳۸۳/۷۹	۶۴۰۰۰	۵۰۰	۱۵۰۰
نرخ تغذیه پودر	PFR	۶۴	۱۱/۵	۳/۳۸	۷۳۶	۷	۱۶
دما	Temp.	۶۴	۲۲۱۶/۴۰	۳۴۴/۴۱	۱۴۱۸۵۰	۱۷۳۰	۳۱۸۰
عرض روکش	Width	۶۴	۱/۴۷	۰/۶۵	۹۴/۳	۰/۳۲	۲/۷۹
ارتفاع روکش	Height	۶۴	-۰/۲۷	۰/۲۶	۱۷/۷۹	-۰/۰۲	۱/۰۲
نفوذ روکش	Depth	۶۴	۰/۴۷	۰/۳۲	۳۰/۱۷	۰/۰۷	۱/۲۶
آمیختگی	Dilution	۶۴	۰/۶۷	۰/۱۱	۴۳/۰۷	۰/۳۸	۰/۸۵



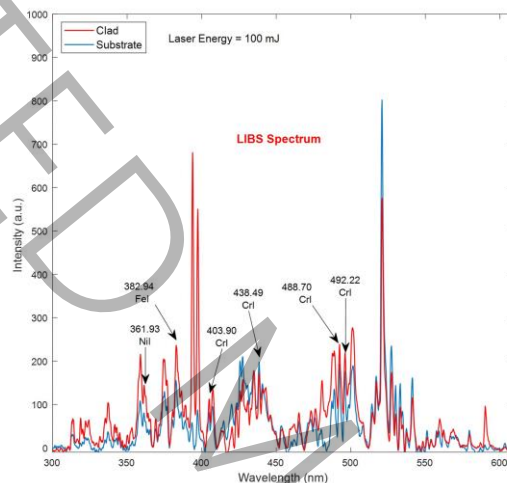
شکل ۱۹. نمودار همبستگی بین داده‌های ورودی و خروجی

Fig 19. Correlation chart between input and output data

با مشاهده نمودار شکل ۱۹ می‌توان مشاهده کرد که تاثیر توان لیزر بر روی عرض، ارتفاع و عمق نفوذ روکش به ترتیب دارای ضرایب همبستگی ۰/۵۴، ۰/۲۱، و ۰/۶۴ است که نشان دهنده تاثیر بیشتر توان لیزر بر عرض و نفوذ در زیرلایه نسبت به ارتفاع روکش است. از طرفی دیگر، سرعت روبش بر روی عرض، ارتفاع و عمق نفوذ روکش دارای ضرایب همبستگی منفی بوده که تاییدی بر تاثیر عکس آن است. لازم بذکر است نرخ تغذیه پودر دارای تاثیر زیاد بر روی ارتفاع روکش با ضریب همبستگی ۰/۳۸ است. در مورد درصد آمیختگی می‌توان گفت توان لیزر و سرعت روبش با ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۵۵ تاثیر مستقیم بر آن داشته در حالی نرخ تغذیه پودر با ضریب ۰/۶۹ بر روی درصد آمیختگی تاثیری معکوس دارد.

۲-۳- طیف سنجی حوضچه مذاب

در فرایند روکش کاری لیزری اینکونل ۷۱۸ بر روی استیل ۳۰۴، یک آلیاژ ترکیبی به وجود می‌آید که خواص هر دو زیرلایه و پودر روکش را داراست. در طیف ارائه شده (شکل ۲۰) خطوط تابش مربوط به زیرلایه و حوضچه مذاب به صورت مجزا نمایش داده شده‌اند. مقایسه این طیف‌ها نشان می‌دهد که شدت خطوط تابش ناشی از حوضچه مذاب بیشتر از زیرلایه است. از این رو پروب طیف‌سنج به نحوی تنظیم می‌شود که بتواند به صورت پیوسته از داخل ناحیه مذاب خط روکش، نمونه‌برداری کرده و طیف‌های پلاسما را با فرکانس ۱۰ هرتز به صورت خودکار ثبت کند. در طیف پلاسمای به دست آمده از روکش، خطوط اتم کروم نسبت به سایر عناصر دارای شدت بیشتری هستند. همچنین مشخص است که بعد از فرایند روکش کاری، شدت خطوط مربوط به نیکل در سطح روکش بیشتر از فلز زیرلایه شده، به همین دلیل، در طیف روکش برخی خطوط اتمی ظاهر می‌شوند که در طیف زیرلایه وجود ندارند.



شکل ۲۰. طیف پلاسمای زیر لایه و روکش در انرژی لیزر ۱۰۰ میلی ژول

Fig 20. Plasma spectrum of the substrate and clad at laser energy of 100 mJ

دمای پلاسما که به طور غیرمستقیم به دمای حوضچه مذاب مرتبط است، می‌تواند اطلاعات دقیقی در مورد وضعیت حرارتی فرایند و دمای منطقه مذاب به دست دهد. از آنجاکه این روش غیرتماسی است، قادر به اندازه‌گیری دما در لحظه و در محیط‌های متغیر و با دمای بالا همچون حوضچه مذاب، بدون آسیب‌زدن به سطح روکش است. به علاوه، داده‌های دمایی به دست آمده از مشخصه‌یابی طیفی، می‌توانند برای کالیبراسیون و بهبود شبیه‌سازی‌های عددی مورد استفاده قرار گیرند تا دقت مدل‌های پیش‌بینی افزایش یابد. در نتیجه، این روش به کاهش خطا، بهینه‌سازی پارامترهای فرایند و بهبود کیفیت لایه‌های روکش کمک می‌کند. روش نمودار بولتزمن، ابزاری برای تعیین دمای پلاسما به وسیله تحلیل طیف‌های تابشی آن در شرایط تعادل گرمایی موضعی است. برای اینکه تحلیل عناصر به طور دقیق و صحیح انجام شود، انتخاب خطوط طیفی شدید و غیر تشدید از منشأ اتمی یا یونی که با یکدیگر تداخل نداشته باشند، بسیار اهمیت دارد. با توجه به کمتر بودن انرژی یونیزاسیون کروم نسبت به نیکل که در جدول ۷ آورده شده، و همچنین چگالی توان نسبتاً پایین لیزر، خطوط طیفی کروم شدت بیشتری دارند؛ بنابراین، یک پنجره طیفی از ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر انتخاب شده که در شکل ۲۰ مشخص شده و مشخصات آنها در جدول ۸ آورده شده است. با استفاده از طیفی با قله‌های مشخص و معادله‌های (۱۳-۱۵)، با رسم $\ln\left(\frac{I_{mn}\lambda_{mn}}{g_m A_{mn}}\right)$ در برابر E_m و برازش این داده‌ها، دمای پلاسما برای هر حالت به دست می‌آید. دمای پلاسمای بدست آمده به انتشار مداوم نور از کل حوضچه مذاب، شامل اتم‌ها و یون‌های برانگیخته شده در ابر پلاسمای تشکیل شده وابسته است.

$$I_{mn} = N_m A_{mn} h\nu_{mn} \quad (13)$$

$$\frac{N_m}{N} = \frac{g_m}{Z(T)} \exp(-E_m/kT) \quad (14)$$

$$\ln\left(\frac{I_{mn}\lambda_{mn}}{g_m A_{mn}}\right) = \ln \frac{Nhc}{Z(T)} - \frac{1}{kT} E_m \quad (15)$$

جدول ۷. انرژی یونش برای عناصر نیکل و کروم

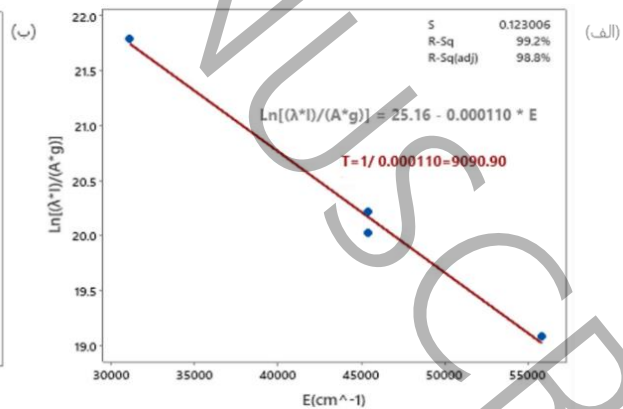
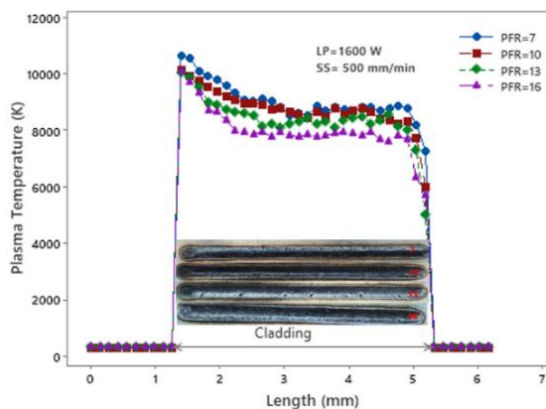
Table 7. Ionization energy for the Nickel and Chromium elements

عنصر	اولین انرژی یونش (کیلوژول بر مول)	دومین انرژی یونش (کیلوژول بر مول)
نیکل	۷۳۷/۱	۱۷۵۳
کروم	۶۵۲/۹	۱۵۹۰/۶

جدول ۸. مشخصات خطوط اتم کروم بر اساس پایگاه داده NIST [۳۶]

Table 8. Characteristics of Cr atomic lines based on NIST database [36]

اتم	طول موج (نانومتر)	احتمال گذار (یک بر ثانیه)	انرژی تراز بالایی	درجه تبهگنی
کروم	۴۰۳/۹۰	۱/۰ e۹	۵۵۷۹۹/۰۱	۱۵
کروم	۴۳۸/۴۹	۲/۴ e۷	۳۱۱۰۶/۳۱	۹
کروم	۴۸۸/۷۰	۳/۵ e۸	۴۵۳۵۴/۱۵	۱۱
کروم	۴۹۲/۲۲	۵/۲ e۸	۴۵۳۴۸/۶۷	۱۳

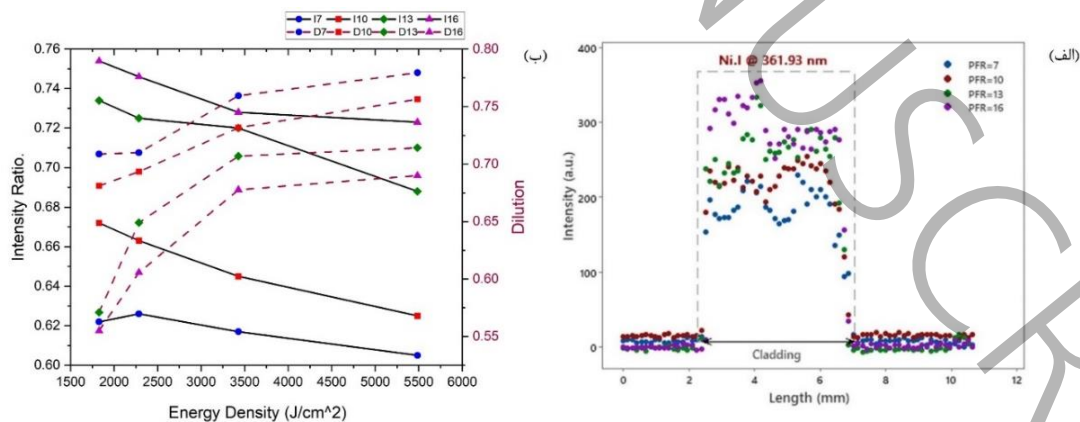


شکل ۲۱. (الف) - تابع برازش شده برای اندازه گیری دمای پلاسما (ب) - تغییر دمای پلاسما بر اساس نرخ تغذیه پودر

Fig 21. (a) The fitted function used to measure plasma temperature, and (b) The relationship between plasma temperature and powder feed rate.

دمای پلاسما اندازه‌گیری شده برای نمونه با توان ۱۶۰۰ وات، سرعت روبش ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و نرخ تغذیه پودر ۷ گرم بر دقیقه در شکل ۲۱-الف، به‌نمایش درآمده است. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که دمای پلاسما ناشی از حوضچه مذاب در برابر تغییر توان لیزر و سرعت روبش مانند دمای حوضچه مذاب رفتاری یکسان داشته؛ ولی در برابر تغییر نرخ تغذیه پودر همان‌طور که در شکل ۲۱-ب، نیز مشخص است، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. صورتی که با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش دمای حوضچه مذاب و پلاسما افزایش یافته ولی با افزایش نرخ تغذیه پودر با وجود اینکه دمای حوضچه مذاب افزایش پیدا کرده، دمای پلاسما کاهش پیدا می‌کند. علت این امر این است که با افزایش مقدار تحویل پودر در واحد زمان، درحالی‌که انرژی ورودی ثابت مانده، انرژی بیشتری صرف یونیزاسیون مقدار بیشتری پودر شده این باعث کاهش دمای پلاسما می‌شود. در واقع یک رابطه خطی معکوس بین دمای پلاسما و نرخ تغذیه پودر در اینجا وجود دارد. تغییرات کم‌دمای پلاسما در قسمت‌های میانی خطوط روکش شکل مذکور نشان‌دهنده پایداری پارامترهای روکش در این نواحی است.

با استفاده از مشخصه‌یابی طیف به‌دست‌آمده، می‌توان شدت عناصر موجود در حوضچه مذاب را به‌صورت برخط تحلیل کرده و از نسبت شدت‌های آنها به طور غیرمستقیم اطلاعاتی درباره هندسه و درصد آمیختگی روکش به دست آورد. عنصر اصلی در زیرلایه آهن و در پودر نیکل است. نسبت شدت عنصر نیکل به آهن در طیف می‌تواند مستقیماً مقدار نسبی نیکل را به آهن را منعکس کند. این نسبت با پارامترهای ورودی فرایند شامل توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر که پارامترهای تعیین‌کننده دما و هندسه روکش هستند، تغییر می‌کند. در میان طول‌موج‌های متعدد نمایان شده در طیف، طول‌موج‌هایی را باید در نظر گرفت که اولاً از شدت نسبتاً کافی برخوردار بوده و ثانیاً تا حد امکان به هم نزدیک باشند که اثرات ماتریسی را کاهش داده و رزولوشن طیفی خوبی را حاصل کنند. بر اساس شکل طیف‌های به‌دست‌آمده، طول‌موج ۳۶۱/۹۳ نانومتر برای نیکل و طول‌موج ۲۸۲/۹۴ نانومتر را برای آهن انتخاب شده است. طبق نتایج صورت‌گرفته مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی انرژی ورودی و روبش (افزایش توان لیزر و یا کاهش سرعت روبش)، درصد ترکیب آهن ناشی از زیرلایه در روکش بیشتر شده و از این‌رو نسبت نیکل به آهن کاهش پیدا می‌کند و بالعکس. این در حالی است که با افزایش نرخ تغذیه پودر در یک چگالی انرژی ورودی ثابت، همان‌طور که در شکل ۲۲-الف مشخص است مقدار نیکل بیشتری در حوضچه مذاب وارد شده و این باعث تغییر نسبت شدت نیکل به آهن می‌شود که در شکل ۲۲-ب به تصویر کشده شده است. لازم بذکر است، تغییر نسبت شدت خطوط طیفی بر حسب چگالی انرژی ورودی و نرخ تغذیه عکس تغییرات درصد آمیختگی است که قبلاً از شبیه‌سازی بدست آمده بود. از آنجاییکه درصد آمیختگی یکی از پارامترهای نشان‌دهنده کیفیت روکش است؛ نسبت شدت خطوط طیفی می‌تواند به‌عنوان یک نشانگر کیفیت روکش در حین فرایند عمل کند.



شکل ۲۲. (الف) - تغییر شدت عنصر نیکل در طول روکش (ب) - تغییر نسبت شدت خطوط و نرخ آمیختگی بر اساس چگالی انرژی

Fig 22. (a) Variation in nickel intensity along the length of the clad, and (b) Line intensity ratio and dilution compared to energy density

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، فرایند روکش کاری لیزری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بر روی زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در ۶۴ حالت مختلف توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تغذیه پودر انجام گرفته است. شبیه‌سازی فرایند روکش کاری لیزری بر اساس مدل گلداک و با استفاده از شبکه‌بندی متحرک در محیط نرم‌افزار کامسول انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد، ابعاد سطح مقطع روکش مدل‌سازی شده با اندازه‌گیری‌های واقعی تطابق نزدیکی داشته و تغییرهای مشابهی را بر اساس پارامترهای ورودی فرایند از خود به نمایش می‌گذارند. بنابراین، بدون انجام فرایند اندازه‌گیری برای هر لایه روکش که فرایندی پرهزینه و زمان‌بر است، با شبیه‌سازی انجام شده می‌توان بادقت قابل‌قبولی هندسه روکش شامل عرض، ارتفاع و نفوذ روکش در زیرلایه و همچنین نرخ آمیختگی را پیش‌بینی کرد.

جهت اندازه‌گیری و پایش دقیق‌تر حوضچه مذاب، سیستم طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری، به‌خوبی نحوه توزیع دما در ناحیه حوضچه مذاب را در زمان واقعی بدون تغییر در سطح روکش به نمایش گذاشته و استفاده از آن در نقاط مختلف درون حوضچه مذاب درک بهتری از توزیع دما را به‌صورت موضعی داده و پیش‌بینی دقیق‌تری از تغییرات دمای حوضچه مذاب را در زمان واقعی فرایند به نمایش می‌گذارد. با آنالیزطیفی، از شدت خط طیفی ۳۶۱/۹۳ نانومتر جهت پایش درصد عنصر نیکل درحین فرایند روکش کاری و نرخ وارد شدن آن به حوضچه مذاب و از نسبت شدت خط طیفی مذکور به خط طیفی آهن در طول موج ۳۸۲/۹۴ نانومتر جهت پایش تغییرات روکش از لحاظ درصد آمیختگی استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات نسبت شدت خطوط انتخابی برعکس تغییرات نرخ آمیختگی است. این نظارت بر نسبت شدت می‌تواند جهت کنترل لحظه‌ای پارامترهای ورودی فرایند برای رسیدن به یک روکش باکیفیت با درصد آمیختگی مناسب استفاده شود.

ازاینرو، ترکیب داده‌های شبیه‌سازی دقیق فرایند روکش کاری لیزری و طیف‌سنجی در حین فرایند، درک بهتری از رفتار حرارتی فرایند و نحوه توزیع گرما در ناحیه حوضچه مذاب را ایجاد می‌کند. رویکرد حاضر می‌تواند جهت اندازه‌گیری و پایش سایر خواص کیفی و کمی لایه روکش همانند سختی، تنش پسماند و میکروساختار جهت رسیدن به یک روکش باکیفیت و یکنواخت استفاده شود.

۵- فهرست علائم

LP	توان لیزر	a	شعاع باریکه لیزر	E_m	انرژی تراز m
SS	سرعت روبش	T_s	دمای جامد	D	قطر باریکه لیزر
PFR	نرخ تغذیه پودر	T_L	دمای مایع	I_{mn}	شدت گذاراز تراز m به n
T	دما	α	ضریب انبساط گرمایی	A_{mn}	احتمال گذاراز تراز m به n
u	انرژی داخلی	b	نفوذ باریکه لیزر	h	ثابت پلانک
f	نسبت مایع	h_c	ارتفاع روکش	ν_{mn}	فرکانس گذاراز تراز m به n
ρ	چگالی	h_m	نفوذ روکش	λ_{mn}	طول موج گذاراز تراز m به n
$K(T)$	هدایت گرمایی	W_c	عرض روکش	N_m	جمعیت تراز m
$C_p(T)$	ظرفیت گرمایی ویژه	A_c	مساحت روکش	g_m	تبهگنی تراز m
η	جذب لیزر	A_m	مساحت آمیختگی		
T_0	دمای محیط	γ	آمیختگی		
Q	شارش حرارتی	$E.D.$	چگالی انرژی		

- [1] C. Kusuma, The effect of laser power and scan speed on melt pool characteristics of pure titanium and Ti-6Al-4V alloy for selective laser melting, (2016).
- [2] S. Liao, S. Webster, D. Huang, R. Council, K. Ehmann, J. Cao, Simulation-guided variable laser power design for melt pool depth control in directed energy deposition, *Additive Manufacturing*, 56 (2022) 102912.
- [3] J. Trejos-Taborda, L. Reyes-Osorio, C. Garza, P. del Carmen Zambrano-Robledo, O. Lopez-Botello, Finite element modeling of melt pool dynamics in laser powder bed fusion of 316L stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(5) (2022) 3947-3961.
- [4] Y. Xu, D. Zhang, J. Deng, X. Wu, L. Li, Y. Xie, R. Poprawe, J.H. Schleifenbaum, S. Ziegler, Numerical simulation in the melt pool evolution of laser powder bed fusion process for Ti6Al4V, *Materials*, 15(21) (2022) 7585.
- [5] X. Kaikai, G. Yadong, Z. Qiang, Numerical simulation of dynamic analysis of molten pool in the process of direct energy deposition, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(7) (2023) 2451-2461.
- [6] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical transactions B*, 15 (1984) 299-305.
- [7] T. Kik, Computational techniques in numerical simulations of arc and laser welding processes, *Materials*, 13(3) (2020) 608.
- [8] P. Li, Y. Fan, C. Zhang, Z. Zhu, W. Tian, A. Liu, Research on heat source model and weld profile for fiber laser welding of A304 stainless steel thin sheet, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1) (2018) 5895027.
- [9] Y. Zhang, S. Li, G. Chen, J. Mazumder, Experimental observation and simulation of keyhole dynamics during laser drilling, *Optics & Laser Technology*, 48 (2013) 405-414.
- [10] E. Mirkoohi, D.E. Seivers, H. Garmestani, S.Y. Liang, Heat source modeling in selective laser melting, *Materials*, 12(13) (2019) 2052.
- [11] A. Kiran, Y. Li, J. Hodek, M. Brázda, M. Urbánek, J. Džugan, Heat source modeling and residual stress analysis for metal directed energy deposition additive manufacturing, *Materials*, 15(7) (2022) 2545.
- [12] M.H. Farshidianfar, A. Khajepour, A. Gerlich, Real-time control of microstructure in laser additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82 (2016) 1173-1186.
- [13] W.-W. Liu, Z.-J. Tang, X.-Y. Liu, H.-J. Wang, H.-C. Zhang, A review on in-situ monitoring and adaptive control technology for laser cladding remanufacturing, *Procedia Cirp*, 61 (2017) 235-240.
- [14] U. Fantz, Basics of plasma spectroscopy, *Plasma sources science and technology*, 15(4) (2006) S137.
- [15] D.W. Hahn, N. Omenetto, Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part II: review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields, *Applied spectroscopy*, 66(4) (2012) 347-419.
- [16] Y. Zhang, G.S. Hong, D. Ye, K. Zhu, J.Y. Fuh, Extraction and evaluation of melt pool, plume and spatter information for powder-bed fusion AM process monitoring, *Materials & Design*, 156 (2018) 458-469.
- [17] M. Schmidt, P. Huke, C. Gerhard, K. Partes, In-Line Observation of Laser Cladding Processes via Atomic Emission Spectroscopy, *Materials*, 14(16) (2021) 4401.
- [18] J.J. Valdiande, J. Mirapeix, J. Nin, E. Font, C. Seijas, J.M. Lopez-Higuera, Laser metal deposition on-line monitoring via plasma emission spectroscopy and spectral correlation techniques, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 27(6) (2021) 1-8.
- [19] V. Lednev, P. Sdvizhenskii, A.Y. Stavertiy, M.Y. Grishin, R. Tretyakov, R. Asyutin, S. Pershin, Online and in situ laser-induced breakdown spectroscopy for laser welding monitoring, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 175 (2021) 106032.
- [20] V.N. Lednev, P.A. Sdvizhenskii, R.D. Asyutin, R.S. Tretyakov, M.Y. Grishin, A.Y. Stavertiy, S.M. Pershin, In situ multi-elemental analysis by laser induced breakdown spectroscopy in additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 25 (2019) 64-70.

- [21] R. Wang, D. Garcia, R.R. Kamath, C. Dou, X. Ma, B. Shen, H. Choo, K. Fezzaa, H.Z. Yu, Z. Kong, In situ melt pool measurements for laser powder bed fusion using multi sensing and correlation analysis, *Scientific reports*, 12(1) (2022) 13716.
- [22] T. Moges, Z. Yang, K. Jones, S. Feng, P. Witherell, Y. Lu, Hybrid modeling approach for melt-pool prediction in laser powder bed fusion additive manufacturing, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(5) (2021) 050902.
- [23] S. Mondal, D. Gwynn, A. Ray, A. Basak, Investigation of melt pool geometry control in additive manufacturing using hybrid modeling, *Metals*, 10(5) (2020) 683.
- [24] P.K. Nalajam, R. Varadarajan, A hybrid deep learning model for layer-wise melt pool temperature forecasting in wire-arc additive manufacturing process, *IEEE Access*, 9 (2021) 100652-100664.
- [25] G. Fuchs, High temperature alloys, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, (2000).
- [26] J. Rafiei, A.R. Ghasemi, Development of thermo-mechanical simulation of WC/Inconel 625 metal matrix composites laser cladding and optimization of process parameters, *International Journal of Thermal Sciences*, 198 (2024) 108883.
- [27] M.I. Al Hamahmy, I. Deiab, Review and analysis of heat source models for additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106 (2020) 1223-1238.
- [28] N. Nguyen, Y. Mai, S. Simpson, A. Ohta, Analytical Approximate Solution for Double Ellipsoidal Heat Source in Finite Thick Plate, *Welding journal*, 83(3) (2004) 82.
- [29] A. Lundbäck, H. Alberg, P. Henrikson, Simulation and validation of TIG-welding and post weld heat treatment of an Inconel 718 plate, in: *International Seminar on Numerical Analysis of Weldability: 29/09/2003-01/10/2003*, Techn. Univ. TYG, 2005, pp. 683-696.
- [30] J. James, J. Spittle, S. Brown, R. Evans, A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures, *Measurement science and technology*, 12(3) (2001) R1.
- [31] A.H. Committee, Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials, in, *ASM international*, 1990.
- [32] D. Raj, S.R. Maity, B. Das, Optimization of process parameters of laser cladding on AISI 410 using MEREK integrated MABAC method, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(8) (2024) 10725-10739.
- [33] V.N. Lednev, P.A. Sdvizhenskii, R.D. Asyutin, R.S. Tretyakov, M.Y. Grishin, A.Y. Stavertiy, A.N. Fedorov, S.M. Pershin, In situ elemental analysis and failures detection during additive manufacturing process utilizing laser induced breakdown spectroscopy, *Optics Express*, 27(4) (2019) 4612-4628.
- [34] G. Cristoforetti, A. De Giacomo, M. Dell'Aglio, S. Legnaioli, E. Tognoni, V. Palleschi, N. Omenetto, Local thermodynamic equilibrium in laser-induced breakdown spectroscopy: beyond the McWhirter criterion, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 65(1) (2010) 86-95.
- [35] F. Anabitarte, A. Cobo, J.M. Lopez-Higuera, Laser-induced breakdown spectroscopy: fundamentals, applications, and challenges, *International Scholarly Research Notices*, 2012(1) (2012) 285240.
- [36] G. Dalton, R.A. Dragoset, J.R. Fuhr, D.E. Kelleher, S.A. Kotochigova, W.C. Martin, P.J. Mohr, A. Musgrove, K. Olsen Podobedova, NIST atomic spectra database, *NIST SPECIAL PUBLICATION SP*, (1998) 12-15.

In-Situ Monitoring of Melt Pool Dynamics in Laser Cladding using Numerical Simulation and Spectral Diagnostics

Ebrahim Gholami¹, Saeed Batebi^{1*}, M.J. Torkamany²

¹ Department of Physics, University of Guilan, Rasht, Iran

² Iranian National Center for Laser Science and Technology, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: s_batebi@guilan.ac.ir

Abstract

Online Monitoring and Control of melt pool dynamics play a crucial role in determining the quality of clad layers in laser additive manufacturing processes. This study presents a hybrid approach that combines numerical simulation using the Goldak model with real-time monitoring via Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) in the laser cladding process of Inconel 718 alloy on 304 stainless steel substrate. The precise modeling of the thermal dynamics of the melt pool was performed on 64 cladding samples, and the cross-sectional dimensions and dilution percentage were validated against experimental measurements. To minimize model error, spectral characterization was employed for real-time monitoring of melt pool variations, providing highly accurate data on local melt pool temperature and elemental composition. The plasma temperature extracted from chromium emission lines in the spectral window of 400 to 500 nm effectively tracked the melt pool temperature variations based on input parameters, while the intensity ratio of nickel (wavelength 361.93 nm) to iron (wavelength 382.94 nm) quantified the dilution of the clad layer. This approach enables dynamic calibration of process input parameters, ensuring uniform clad quality through real-time control of melt pool.

Keywords: Online monitoring, Laser additive manufacturing, Laser cladding, Melt pool dynamics, Laser-induced breakdown spectroscopy.