



Experimental study on Laser Cladding Process Parameters of Martensitic Stainless-Steel Powder on Plain Carbon Steel: Cladding Geometry, Dilution Ratio and Sample Hardness

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rafiei J¹,
Ghasemi A.R.^{1*}

How to cite this article

Rafiei J, Ghasemi A R. Experimental study on Laser Cladding Process Parameters of Martensitic Stainless-Steel Powder on Plain Carbon Steel: Cladding Geometry, Dilution Ratio and Sample Hardness. Modares Mechanical Engineering. 2022; 22(04):243-252.

¹Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

ghasemi@kashanu.ac.ir

Article History

Received: June 27, 2021

Accepted: October 06, 2021

ePublished: February 22, 2022

ABSTRACT

The laser cladding of industrial parts to improve their mechanical properties by metal alloys and composites has been a challenge for scientists and experts. The quality and properties of the cladding layer are determined by many factors such as cladding geometry, microstructure, dilution ratio, defects, distortion, surface smoothness, metallurgical changes in the substrate and process efficiency. In this paper, the effect of important parameters of the cladding process on the geometric shape, hardness and dilution ratio of the cladding layers of martensitic stainless steel (17-4 PH) on the substrate of plain carbon steel by solid-state continuous laser with maximum power 2 kW and the method of direct deposition of metal powder are discussed. Variable parameters of laser cladding including powder feed rate, laser scanning speed and laser power have been studied. The parameters of surface quality, geometric shape and absence of porosity have been evaluated and compared. The minimum dilution about 9% was obtained at a 10 mm/s scanning speed, 10 g/min powder feed rate and 330 watts laser power. The results have been showed, appropriate incorporation and uniform distribution of cladding powder has created a cladding surface without any crack and porosity. By studying the hardness of the samples, it has been concluded that the hardness of the substrate surface has increased after cladding.

Keywords Laser Cladding, Powder Feeding Rate, Continuous Laser, Laser Direct Metal Powder Deposition.

CITATION LINKS

[1] Recent research and development status of laser cladding: A review. [2] Microstructural evolution and wear behavior of laser-clad Stellite 6/NbC/h-BN self-lubricating coating. [3] laser cladding of iron-based erosion resistant metal matrix composite. [4] A physical modeling and predictive simulation of the laser cladding process. [5] Modeling the Influence of Process Parameters and Additional Heat Sources on Residual Stresses in Laser Cladding. [6] Laser cladding of Ni-base composite coating onto Ti-6Al-4V substrates with pre-placed B₄C+NiCrBSi powders. [7] Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. [8] The prediction of coating geometry from main processing parameters laser cladding. [9] An empirical-statistical model for coaxial laser cladding of NiCrAlY powder on Inconel 738 superalloy. [10] Laser surface treatment of biomedical alloys. [11] Optimization of process parameters, microstructure, and properties of laser cladding Fe-based alloy on 42CrMo steel roller. [12] Process parameter optimisation of laser clad iron based alloy: Predictive models of deposition efficiency, porosity and dilution. [13] FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding. [14] Laser cladding with scanning optics: Effect of power adjustment. [15] Metal additive manufacturing: A review. [16] Application of vibration in the laser powder deposition process. [17] Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process. [18] Preplaced laser cladding of WC powder on Inconel 718 by Nd:YAG laser. [19] Nd:YAG laser cladding of Co-Cr-Mo alloy on γ -TiAl substrate. [20] Advancement of the artificial amorphous-crystalline structure of laser clad FeCrMoCB on nickel-free stainless-steel for bone-implants. [21] Effect of laser scanning speed on microstructure, microhardness and corrosion behavior of laser cladding Ni45 coating. [22] Surface modification of Ti4Al6V alloy by laser cladding with 17-4PH stainless steel powder. [23] Dilution characteristics of ultrasonic assisted laser clad yttria-stabilized zirconia coating. [24] Geometry and dilution rate analysis and prediction of laser cladding.

مطالعه‌ی تجربی پارامترهای فرآیند روکش‌کاری لیزری پودر فولاد مارتنزیت بر روی فولاد ساده کربنی: هندسه‌ی روکش، نسبت آمیختگی و سختی نمونه

جواد رفیعی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

احمد رضا قاسمی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

چکیده

روکش‌کاری لیزری قطعات مختلف صنعتی برای مقاوم‌سازی و بهبود خواص مکانیکی آنها توسط آلیاژها و کامپوزیت‌های فلزی، مورد توجه محققان و صنعت بوده است. کیفیت و خصوصیات لایه‌ی روکشی توسط عوامل زیادی از قبیل هندسه‌ی روکش، ریزساختار، میزان آمیختگی، وجود نقص، اعوجاج، صافی سطح، تغییرات متالورژیکی در زیرلایه و بازدهی فرآیند مشخص و تعیین می‌شود. در این مقاله لایه روکشی پودر فولاد زنگ نزن مارتنزیتی (PH4-17) بر روی زیرلایه‌ی فولاد ساده کربنی توسط لیزر پیوسته‌ی حالت جامد با حداکثر توان ۲ کیلو وات و روش رسوب مستقیم پودر فلز ایجاد شد. مطلوب‌ترین پارامترهای مهم فرآیند در ایجاد سخت‌ترین لایه با کمترین میزان آمیختگی تعیین شد. اثر توان لیزر، نرخ تغذیه‌ی پودر، سرعت حرکت لیزر و فاصله محل برخورد لیزر با زیرلایه از کانون آن بر روی شکل هندسی، نسبت آمیختگی و سختی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. بهترین لایه با کمترین درصد آمیختگی حدود ۹ درصد در سرعت حرکت لیزر ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه، نرخ تغذیه‌ی پودر ۱۰ گرم بر دقیقه و توان لیزر ۳۳۰ وات به‌دست آمد. به‌دست آوردن پارامترهای مطلوب و توزیع یکنواخت پودر روکش‌کننده با بکار بردن این پارامترها، سبب ایجاد سطح روکشی یکنواخت شده است. مطالعه سختی نمونه‌ها، افزایش سختی سطح روکش شده به اندازه سه برابر مقدار اولیه، برای نمونه مطلوب را نشان می‌دهد. **کلیدواژه‌ها:** روکش‌کاری لیزری، نرخ تغذیه پودر، لیزر پیوسته، رسوب مستقیم پودر فلز.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۴

*نویسنده مسئول: ghasemi@kashanu.ac.ir

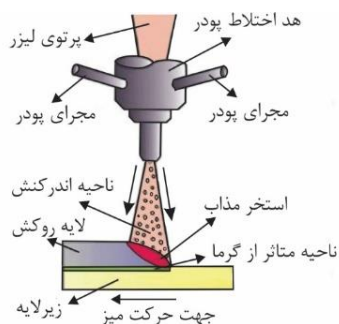
۱- مقدمه

روکش‌کاری لیزری، ذوب فلزی متفاوت بر روی یک زیرلایه‌ی فلزی است که در آن لایه‌ای محافظ با حداقل ذوب‌شدگی زیرلایه و حداکثر چسبندگی و پیوستگی ایجاد می‌شود^[1]. روش جدید لایه‌گذاری به روش روکش‌کاری لیزری نه تنها سطح فلز را نسبت به ساییش، خزش و خستگی مقاوم می‌کند، بلکه برای تغییر عیوب موضعی ماشین‌ها نیز استفاده می‌شود^[2]. مزایای این فناوری، رسوب روکشی نازک عاری از حفره، ترک و با ضخامت قابل کنترل بر روی سطح مورد نظر است^[3]. باند نفوذی کم لایه‌ی روکش در زیرلایه و داشتن آمیختگی کم با زیرلایه از ویژگی‌های اصلی و مهم روش روکش‌کاری لیزری است. کیفیت و خصوصیات لایه‌ی

روکشی توسط عوامل زیادی از قبیل هندسه‌ی روکش، ریزساختار، میزان آمیختگی، وجود نقص، اعوجاج، صافی سطح، تغییرات متالورژیکی در زیرلایه و بازدهی فرآیند می‌تواند مشخص و تعیین شود. این عوامل، بدون در نظر گرفتن درجه اهمیت‌شان، متأثر از پارامترهای فرآیند روکش‌دهی و پدیده فیزیکی که در طول فرآیند رخ می‌دهد، هستند^[4]. فرآیند روکش‌کاری لیزری به دو صورت تک مرحله و دو مرحله‌ای، قابل انجام است. در روش تک مرحله‌ای که در شکل ۱ نشان داده شده است، پودر مورد نظر بوسیله دستگاه تغذیه پودر به ناحیه تابش پرتو لیزر در سطح زیر لایه، تزریق می‌شود و با ذوب همزمان پودر و زیرلایه توسط لیزر، لایه روکشی ایجاد می‌شود^[5].

پژوهش‌ها بر روی پارامترهای موثر بر فرآیند روکش‌کاری لیزری و خواص لایه با تغییر یک و یا چند پارامتر و ثابت نگه‌داشتن تعدادی پارامتر دیگر توسط محققین مختلف صورت گرفته و نتایج مشابهی نیز گزارش گردیده است. منگ و همکاران به بررسی خصوصیات متالورژیکی، هندسی و ریزسختی لایه روکش‌شده کامپوزیت پایه نیکل بر زیرلایه آلیاژ تیتانیوم پرداختند و بهبود خواص مکانیکی زیرلایه را گزارش دادند^[6]. همچنین ایجاد لایه نیکل بر روی زیرلایه‌ی فولاد و رابطه پارامترهای فرآیند با خصوصیات هندسی لایه‌ی روکشی توسط الیویرا و همکاران گزارش شده است^[7]. ننادال و همکاران مدلی برای پیش‌بینی خصوصیات هندسی لایه‌ی روکش‌شده در ارتباط با پارامترهای اصلی فرآیند ارائه دادند^[8]. همچنین انصاری و همکاران مدل تجربی-آماری بین پارامترهای اصلی فرآیند و خصوصیات لایه روکشی اینکونل ۷۳۸ بر روی زیرلایه‌ی آلیاژ نیکل را ارائه نمودند^[9]. ویلار و همکاران کاهش جذب پرتوی لیزر توسط پودر روکش‌شونده و زیرلایه و در نتیجه کاهش عرض، عمق و ضخامت لایه‌ی روکش داده شده با افزایش سرعت حرکت لیزر را گزارش دادند^[10]. از طرف دیگر، افزایش چگالی انرژی ورودی و افزایش عمق روکش پس از انجماد سریع با افزایش شدت لیزر از نتایج پژوهش جو و همکاران بوده است^[11].

ردی و همکاران به بررسی روکش‌کاری لیزری پودر آهن بر روی زیرلایه‌ی Mo۳۱۵ پرداختند. آنها تأثیر پارامترهای روکش‌کاری بر روی هندسه‌ی روکش و شکل‌گیری تخلخل را بررسی کردند و مدل



شکل ۱) روکش‌کاری لیزری تک‌مرحله^[5].

روکشی با افزایش توان و عدم تاثیر معنی‌دار تغییر توان بر ریزسختی نمونه‌ها بوده است [22]. در این مقاله به بررسی تاثیر پارامترهای مهم فرآیند روکش‌کاری لیزری بر شکل هندسی، سختی و میزان آمیختگی لایه‌ی ایجاد شده از جنس فولاد زنگ نزن مارتنزیتی (PH4-17) بر روی زیرلایه‌ی فولاد ساده‌ی کربنی توسط لیزر پیوسته حالت جامد با حداکثر توان ۲ کیلووات و روش رسوب مستقیم پودر فلز، پرداخته شده است. پارامترهای متغیر روکش‌کاری لیزری شامل: نرخ تغذیه‌ی پودر، سرعت حرکت لیزر، توان لیزر و فاصله‌ی محل برخورد لیزر با زیرلایه از کانون آن، مورد مطالعه قرار گرفته است. با انجام آزمون‌های مختلف، پارامترهای کیفیت سطح، شکل هندسی و عدم وجود تخلخل مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. در پایان مطالعه سختی نمونه‌ها با آزمایش سختی‌سنجی ویکرز انجام شده است.

۲- طراحی آزمایش و ساخت نمونه

۲-۱- مواد و تجهیزات فرآیند

در این مقاله از فرآیند روکش‌کاری تک‌مرحله با استفاده از ذرات پودر فلز به عنوان ماده‌ی روکش‌کننده، که به روکش‌کاری به روش رسوب مستقیم پودر فلز نیز شناخته می‌شود استفاده شده است. در این روش، ذرات پودر توسط سامانه‌ی تغذیه‌کننده پودر در بستر گاز حامل به مجرای خروجی پودر منتقل شده و بر روی سطح زیرلایه همگرا می‌شوند. با تابش همزمان لیزر، پودر و قسمتی از زیرلایه ذوب شده و تشکیل حوضچه مذاب را می‌دهند بلافاصله با حرکت زیرلایه توسط سیستم موقعیت‌دهی، نواری از لایه‌ی روکشی بر روی زیرلایه ایجاد می‌شود. همپوشانی نوارهای متوالی در کنار هم، روکشی بر روی سطح زیرلایه ایجاد می‌کند. در مقاله‌ی حاضر، پودر فولاد (PH4-17) که آلیاژ فولاد رسوب سخت‌شونده با اندازه دانه ۴۰ تا ۱۰۰ میکرون است به‌عنوان ماده روکش‌کننده و فولاد ساده کربنی (St3۷) به‌عنوان زیرلایه انتخاب شده است. جدول ۱ ترکیبات پودر مورد استفاده به‌عنوان ماده روکش‌کننده را نشان می‌دهد.

جدول ۱) ترکیبات و مشخصات پودر فولاد PH4-17 مورد استفاده برای ماده‌ی روکش‌کننده.

۴-۱۷PH	C	Cr	Ni	Cu	Mn	Si	Nb	P	S
درصد وزنی	≤ ۰.۰۷	۱۵/۵-۱۷/۵	۳/۵-۶	۳-۴	≤ ۱/۰۰	≤ ۱/۰۰	۰/۳	۰/۳۵	۰/۰۳

فولاد PH4-17، فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی رسوب سخت‌شونده‌ای است که دارای خواص مکانیکی قابل توجه، از جمله ترکیب مناسبی از استحکام بالا، مقاومت به خوردگی خوب و سختی بالا است و بر این اساس کاربرد فراوانی در صنایع نوین از جمله صنایع دریایی، خودرویی، پالایشگاهی و پتروشیمی پیدا کرده است. دو گروه اصلی این فولاد، نوع نیمه‌آستنی‌تی و نوع مارتنزیتی است؛ نوع مارتنزیتی فولادهای رسوب‌سخت‌شونده، پرکاربردتر از انواع

ریاضی برای بهینه‌سازی روکش ایجاد شده پیشنهاد نمودند [12]. کیفیت لایه‌ی روکش‌شده با لیزر با نسبت آمیختگی تعریف می‌شود. کیفیت بهتر لایه‌ی روکش‌شده در نسبت آمیختگی پایین‌تر که نتیجه‌ی ذوب سطحی زیرلایه و کاهش ناحیه‌ی متأثر از حرارت است، ایجاد می‌شود [13]. افزایش قدرت لیزر و کاهش اندازه لکه‌ی پرتوی لیزر منجر به افزایش شدت لیزر ورودی و سپس افزایش نسبت آمیختگی می‌شود [14]. اتصال بین‌لایه‌ی روکش‌شده و زیرلایه و ریزساختار مناسب لایه‌ی روکش‌شده، به شکل و نرخ تغذیه‌ی پودر بستگی دارد. تغذیه‌ی پودر به شکل نامنظم باعث کاهش جریان‌پذیری شده و در نتیجه، پودرها ناقص ذوب می‌شوند و در سطح اتصال لایه‌ی روکش‌شده و زیرلایه حفره ظاهر می‌شود. علاوه بر این، در صورت تغذیه‌ی پودر با نرخ بالا، اتصال متالورژیکی بین لایه‌ی روکش‌شده و زیرلایه، به دلیل ذوب جزئی پودر، حاصل نمی‌شود [15].

فروزمهر و همکاران به بررسی اثر ارتعاش بر کاهش نقص‌های شکل‌گیری لایه‌ی روکش‌شده از جمله نفوذ ناقص یا ذرات ذوب نشده در سطح مشترک روکش و زیرلایه و شکل‌گیری حفره‌ها پرداختند، که نتایج تجربی آنها بیانگر ایجاد روکش با سختی یکپوخت و ریزساختار همگن از فولاد ابزار بر زیرلایه با استفاده از ارتعاش بوده است [16]. محاسبات انجام شده برای روکش‌های پودر فولاد L316 روی زیرلایه‌ی فولاد توسط آل‌شیخ و همکاران انجام شده است، که رابطه‌ی بین عمق نفوذ و پارامترهای فرآیند را نشان می‌دهد [17]. جاوید و همکاران روکش‌کاری اینکونل ۷۱۸ با پودرکاربید تنگستن به روش پیش‌نشانی با استفاده از لیزر را بررسی کردند و میزان آمیختگی روکش، عمق ذوب‌شدگی زیرلایه، میزان تخلخل روکش و تعداد ترک‌های عرضی ایجاد شده در روکش را به عنوان نتایج تحقیق گزارش دادند [18]. همچنین برکت و همکاران به تاثیر پارامترهای فرآیند روکش‌کاری بر تغییر ارتفاع ناحیه روکش‌کاری لیزری پرداختند، که نتایج آنها، افزایش ارتفاع روکش با افزایش نرخ تغذیه‌ی پودر و کاهش سرعت حرکت لیزر را نشان می‌دهد [19]. ابراهیم و همکاران، پودر FeCrMoCb را بر روی زیرلایه‌ی نیکل بدون فولاد با استفاده از سطوح مختلف انرژی لایه‌گذاری نمودند و خصوصیات مکانیکی و متالورژیکی ماده‌ی ساخته شده را مورد ارزیابی قرار دادند [20]. اثر سرعت حرکت لیزر بر ریزساختار، ریزسختی و رفتار سایشی روکش نیکل ۴۵ روی زیرلایه‌ی فولاد کربنی در مطالعه کپائو و همکاران گزارش شده است. نتایج ایشان مسیر کاهشی ریز سختی لایه‌ی روکشی با افزایش سرعت حرکت لیزر را نشان می‌دهد [21]. رسوب پودر آلیاژ فولاد PH4-17 بر روی زیرلایه‌ی آلیاژ تیتانیوم به روش روکش‌کاری لیزری توسط آکینلابی و همکاران گزارش شده است. آنها اثر تغییرات توان لیزر را بر خصوصیات مکانیکی نمونه ساخته شده بررسی نموده‌اند. نتایج آنها حاکی از افزایش کیفیت لایه‌ی

۲-۲- روش انجام فرآیند

فرآیند روکش کاری لیزری در دو مرحله انجام شده است. مرحله اول شامل، ایجاد نوارهای تکی روکشی با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی فرآیند و بررسی اثر متقابل آنها روی مشخصه‌های هندسی نوارها و مرحله دوم شامل، ایجاد روکش‌های جدید با توجه به نتایج مرحله اول برای به دست آوردن پارامترهای مطلوب در ایجاد مشخصه‌های هندسی مطلوب و همچنین بررسی سختی و توزیع آن در نمونه‌ها می‌شود. در مرحله اول بر اساس روش طراحی کامل عوامل، طراحی آزمایش‌ها بر اساس همه ترکیب‌های احتمالی سطح بالا/ سطح پایین و برای تمامی عامل‌ها، در ۱۴ گروه آزمایش طراحی شده است. در هر گروه چهار پارامتر توان لیزر در سه سطح، سرعت حرکت لیزر (سرعت خطی میز) در سه سطح، نرخ جرمی پودر فلز در سه سطح و فاصله محل برخورد لیزر با زیرلایه از کانون لیزر (فاصله از کانون لیزر) در دو سطح در نظر گرفته شده است. اثر تغییر پارامترهای دیگر موثر در فرآیند روکش کاری نادیده گرفته شده است. جدول ۲ پارامترهای در نظر گرفته شده برای آزمایش مرحله اول را نشان می‌دهد.

شکل ۴، نمونه‌های ساخته شده در آزمایش گروه اول در چهار نوار با پارامترهای فرآیند جدول ۲ و محل برش نمونه‌ها را نشان می‌دهد. وجود آمیختگی لایه‌ی روکش شده و زیرلایه، سبب ایجاد پیوند متالورژیکی بین لایه و زیرلایه می‌شود و لایه‌ای با چسبندگی بالا ایجاد می‌کند. در فرآیند روکش کاری لیزری مقدار ذوب زیرلایه از اهمیت فراوانی برخوردار است.

برای به دست آوردن نسبت آمیختگی γ از رابطه (۱) استفاده می‌شود [23].

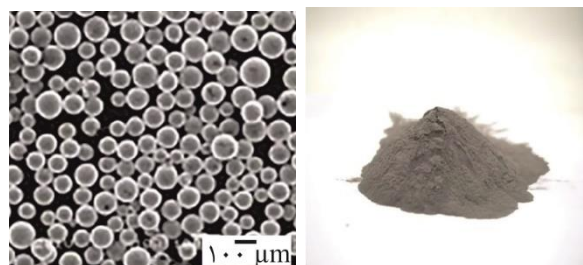
$$\gamma = \frac{b}{b+h} \quad (1)$$

جدول ۲) پارامترهای متغیر فرآیند در آزمایش مرحله اول ساخت نمونه‌ها

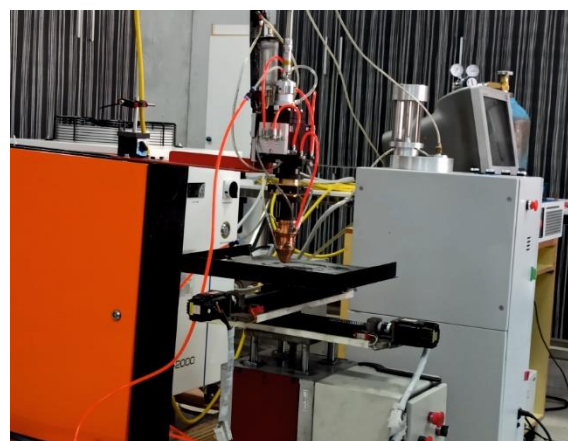
ردیف	توان	سرعت حرکت لیزر	نرخ تغذیه پودر	فاصله سطح زیرلایه از کانون لیزر	شماره گروه آزمایش
	(وات)	(میلیمتر بر ثانیه)	(گرم بر دقیقه)	(میلیمتر)	
۱	۴۵۰	۳	۵، ۴، ۳، ۲	۵۰	۱
۲	۴۵۰	۴	۵، ۴، ۳، ۲	۵۰	۲
۳	۴۵۰	۶	۵، ۴، ۳، ۲	۵۰	۳
۴	۳۷۵	۳	۵، ۴، ۳، ۲	۵۰	۴
۵	۳۷۵	۴	۵، ۴، ۳، ۲	۵۰	۵
۶	۳۷۵	۶	۵، ۴، ۳، ۲	۵۰	۶
۷	۲۵۰	۳	۵، ۴، ۳، ۲	۵۰	۷
۸	۲۵۰	۴	۵، ۴، ۳، ۲	۲۵	۸
۹	۲۵۰	۶	۵، ۴، ۳، ۲	۲۵	۹
۱۰	۲۵۰	۳	۵، ۴، ۳، ۲	۲۵	۱۰
۱۱	۳۷۵	۳	۵، ۴، ۳، ۲	۲۵	۱۱
۱۲	۳۷۵	۴	۵، ۴، ۳، ۲	۲۵	۱۲
۱۳	۳۷۵	۶	۵، ۴، ۳، ۲	۲۵	۱۳
۱۴	۲۵۰	۳	۵، ۴، ۳، ۲	۲۵	۱۴

دیگر آن است. فولاد زنگ‌نزن ۱۷- PH4، دارای ترکیب مناسبی از مقاومت به خوردگی، خواص مکانیکی مطلوب از جمله استحکام و سختی در دمای کاری زیر ۳۲۰ درجه سانتیگراد، چقرمگی مناسب، هم در حالت فلز پایه و هم در حالت روکش شده است. از سویی دیگر، این فولاد دارای زمان و دمای عملیات پیرسازی پایینی است که باعث به حداقل رسیدن اعوجاج و تاب برداشتن قطعات تولید شده و روکش شده از این آلیاژ می‌شود. شکل ۲ پودر و ریخت‌شناسی ذرات آن را نشان می‌دهد. زیرلایه از جنس فولاد ساده‌ی کربنی (St۳۷) است که دارای مقاومت سایش و سختی پایین بوده و کاربرد فراوان در ساخت ماشین‌های صنعتی دارد که با روکش کاری توسط آلیاژهای فولاد با سختی و مقاومت به سایش بالاتر، می‌توان عمر کاری آن را افزایش داد.

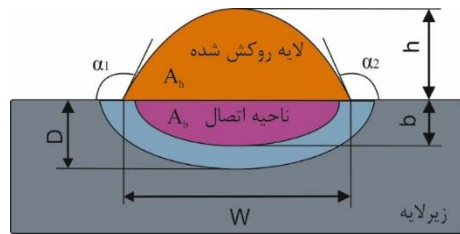
لیزر حالت جامد فیبری پیوسته با حداکثر توان ۲ کیلووات و طول موج ۱۰۸۰ نانومتر به عنوان منبع توان و سیستم موقعیت‌دهی سه‌محوره که دارای دقت ۰/۱ میلیمتر در هر سه جهت و نازل روکش کاری با سه مجرای خروجی پودر و سه مجرای خروجی گاز محافظ که در ۱۲ میلیمتری زیر نازل همگرا می‌شوند، استفاده شده است. گاز محافظ مورد استفاده گاز آرگون بوده است که برای جلوگیری از اکسیداسیون حوضچه مذاب استفاده می‌شود. سامانه تغذیه‌کننده پودر با طرز کار دیسک چرخان و با قابلیت تغییر در نرخ تغذیه پودر و گاز حامل آرگون برای انتقال پودر مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۳ دستگاه روکش‌دهی لیزری مورد استفاده در این مقاله را نشان می‌دهد.



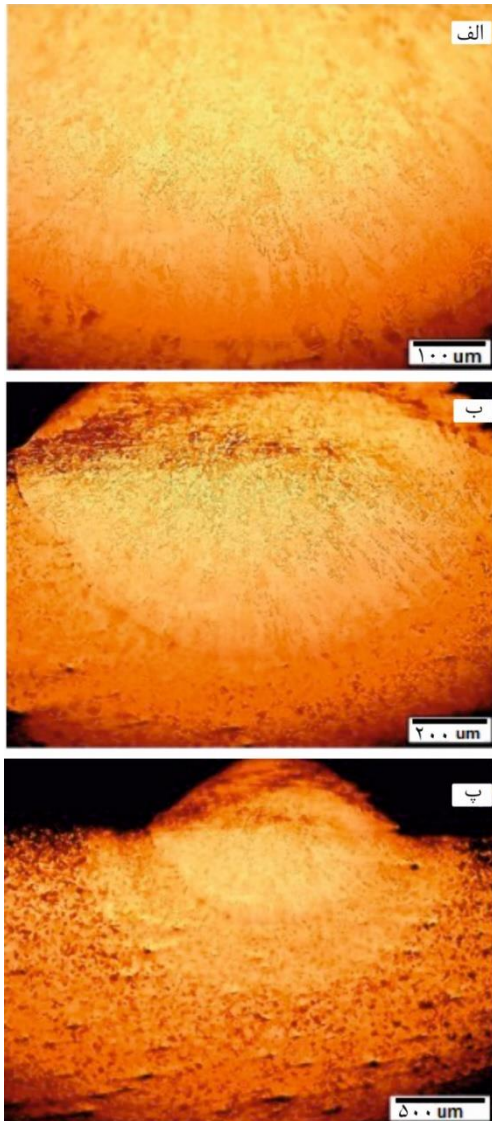
شکل ۲) پودر فولاد ۱۷- PH4 و ریخت‌شناسی ذرات آن



شکل ۳) دستگاه روکش‌دهی لیزری مورد استفاده.



شکل ۵) ترسیمه‌ای از هندسه لایه روکش‌شده در سطح مقطع عرضی



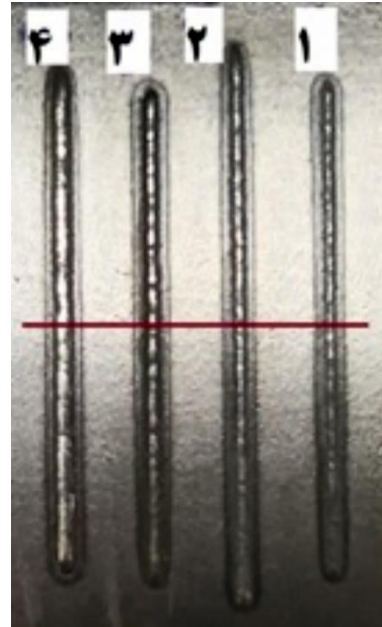
شکل ۶) تصاویر سطح مقطع عرضی نمونه شماره ۱ در سه بزرگنمایی: الف) x20، ب) x10، پ) x5.

بر اساس نتایج حاصل از پردازش تصاویر و ابعاد هندسه‌ی سطح مقطع لایه‌ی روکشی، پارامتر نسبت آمیختگی و زاویه‌ی ترشوندگی یا زاویه‌ی روکش به‌دست آمده است. ابعاد و مشخصات هندسی تصاویر توسط نرم افزار اتوکد به‌دست آمده و نمونه‌ای از آن در شکل ۷ نشان داده شده است.

از اهداف روکش‌کاری ایجاد لایه‌ای مقاوم به سایش و سخت بر روی سطح یک قطعه، برای افزایش مقاومت مواد در برابر سایش، ضربه، فرسایش، خوردگی و خستگی حرارتی است. به این دلیل

که در آن b ضخامت ذوب شده‌ی زیرلایه در حین روکش‌کاری و h ارتفاع روکش است. همچنین می‌توان از رابطه (۲) نیز برای به‌دست آوردن نسبت آمیختگی γ استفاده نمود [24].

$$\gamma = \frac{A_b}{A_b + A_h} \quad (2)$$



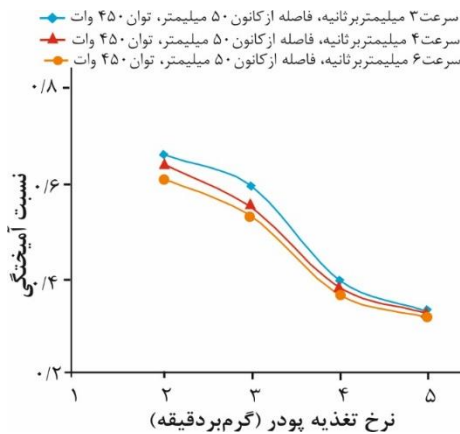
شکل ۴) نوارهای روکش‌شده آزمایش گروه اول و محل برش آنها.

که در آن A_b سطح نفوذ لایه در زیرلایه و A_h سطح مقطع لایه روکش بالای سطح زیرلایه است و $A = A_b + A_h$ سطح کل لایه روکش شده است. شکل ۵ مشخصات هندسی سطح مقطع عرضی یک لایه روکش‌شده را نشان می‌دهد.

برای مطالعه ریزسختی و هندسه روکش شامل مانند عرض، ارتفاع، عمق نفوذ در زیرلایه و زاویه ترشوندگی و محاسبه نسبت آمیختگی، فرآیند متالوگرافی انجام شده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها که شامل برش عرضی نمونه‌ها با دستگاه برش آزمایشگاهی، سمباده‌زنی و اچ کردن سطح مقطع عرضی نمونه‌ها می‌شود، تصاویر سطح مقطع عرضی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری گرفته شده است.

شکل ۶ نمونه‌ای که با مشخصات سرعت حرکت ۳ میلی‌متر بر ثانیه، نرخ تغذیه پودر ۲ گرم بر دقیقه، توان لیزر ۴۵۰ وات و فاصله از کانون لیزر ۵۰ میلی‌متر ساخته شده است را نشان می‌دهد، که مربوط به ردیف اول جدول ۲ است.

بر اساس نتایج حاصل از پردازش تصاویر و ابعاد هندسه‌ی سطح مقطع لایه‌ی روکشی، پارامتر نسبت آمیختگی و زاویه‌ی ترشوندگی یا زاویه‌ی روکش به‌دست آمده است. ابعاد و مشخصات هندسی تصاویر توسط نرم افزار اتوکد به‌دست آمده و نمونه‌ای از آن در شکل ۷ نشان داده شده است.

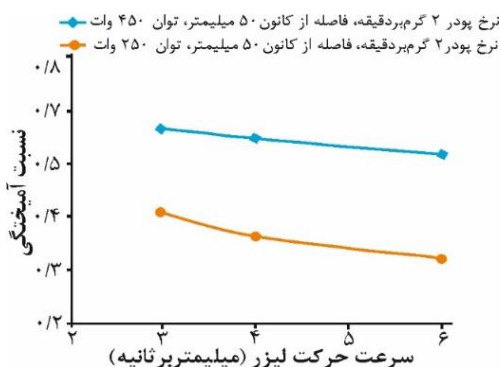


شکل ۹) نمودار اثر تغییر نرخ تغذیه پودر بر روی نسبت آمیختگی در سه سطح سرعت حرکت لیزر ۳، ۴ و ۶ میلیمتر بر ثانیه در توان ثابت ۴۵۰ وات لیزر و فاصله ۵۰ میلیمتری زیرکانون لیزر.

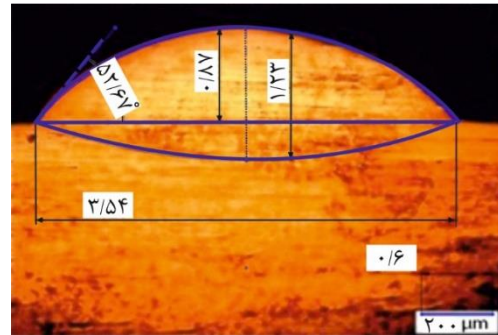
ذوب‌شدگی سطح زیرلایه کاهش می‌یابد. کاهش ضخامت ذوب‌شده زیرلایه (b) و از طرف دیگر افزایش ارتفاع روکش (h) به دلیل افزایش حجم پودر منتقل شده به حوضچه مذاب، باعث کاهش نسبت آمیختگی می‌شود. شکل ۱۰ نشان دهنده نمودار اثر تغییر سرعت حرکت لیزر بر روی نسبت آمیختگی در سه سطح سرعت ۳، ۴ و ۶ میلیمتر بر ثانیه، توان ۲۵۰ و ۴۵۰ وات لیزر، نرخ تغذیه پودر ۲ گرم بر دقیقه و فاصله ۲۵ و ۵۰ میلیمتری محل برخورد لیزر با پودر و زیرلایه از کانون آن است.

همانطور که از نمودارهای شکل ۱۰ مشخص است در یک نرخ تغذیه پودر ثابت، افزایش سرعت حرکت لیزر منجر به کاهش نسبت آمیختگی شده است. دلیل آن را می‌توان کاهش زمان تابش لیزر روی سطح زیرلایه بیان کرد که منجر به کاهش جذب انرژی لیزر توسط زیرلایه و در نهایت کاهش نسبت آمیختگی می‌شود. تغییر در پارامترهای فرآیند، به علت وابستگی آنها به یکدیگر، تا حدی قابل قبول است که پیوند متالورژیکی مستحکم بین روکش و زیرلایه ایجاد شود.

آزمایش‌ها نشان داد در شرایط آزمایش با توان ثابت ۳۷۵ وات و فاصله ۵۰ میلیمتر زیرکانون لیزر، با افزایش سرعت حرکت لیزر به ۶ میلیمتر بر ثانیه پیوند متالورژیکی مناسبی بین روکش و زیرلایه

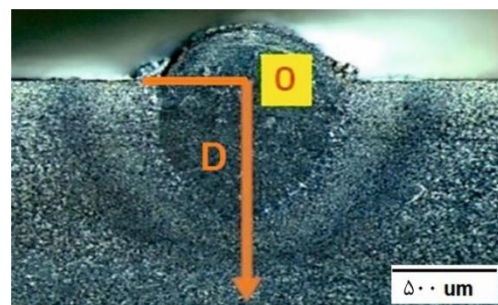


شکل ۱۰) نمودار اثر تغییر سرعت حرکت لیزر بر روی نسبت آمیختگی در سه سطح سرعت ۳، ۴ و ۶ میلیمتر بر ثانیه.



شکل ۷) تصویر ابعاد هندسی لایه‌ی ایجاد شده در نرم افزار اتوکد.

سختی و خواص سایشی از خواص مهم مکانیکی هستند، که معمولاً برای تمام قطعات حاصل از فرآیند روکش‌کاری ارزیابی می‌شود. به همین دلیل، نمونه‌ها برای ارزیابی تغییر خواص مکانیکی آنها از جمله سختی تحت آزمایش سختی‌سنجی ویکرز با جرم ۱۰۰ گرم در مسیر خط عمقی از سطح زیرلایه (عمود بر نوارهای روکش‌شده) که در شکل ۸ نشان داده شده است قرار گرفته‌اند.



شکل ۸) راستای در نظر گرفته شده برای ارزیابی توزیع سختی

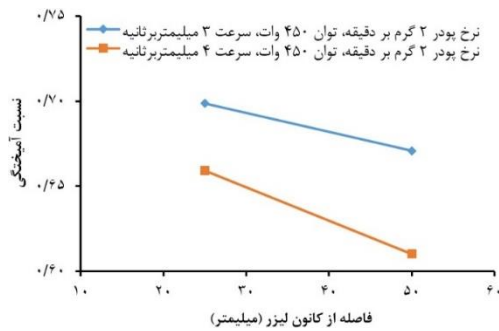
۳- نتایج و بحث

به دست آوردن تاثیر پارامترهای مختلف فرآیند بر روی هندسه‌ی روکش از جمله پارامترهای سرعت حرکت لیزر، نرخ تغذیه پودر، توان لیزر و فاصله نقطه کانون لیزر از سطح زیرلایه و همچنین خواص مکانیکی از جمله سختی نمونه‌ها، توزیع آن و تعیین پارامترهای مطلوب فرآیند از اهداف این مقاله است، که در ادامه به شرح آنها پرداخته شده است.

۳-۱- نسبت آمیختگی و هندسه روکش

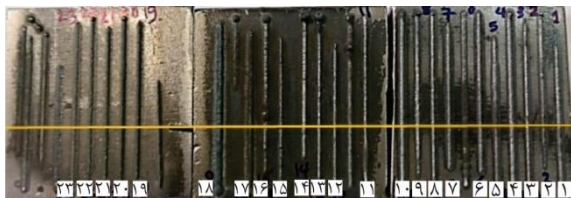
شکل ۹ نشان دهنده نمودار اثر تغییر نرخ تغذیه‌ی پودر بر روی نسبت آمیختگی در سه سطح سرعت حرکت لیزر ۳، ۴ و ۶ میلیمتر بر ثانیه با توان ثابت ۴۵۰ وات و فاصله ثابت ۵۰ میلیمتری نقطه کانون لیزر از سطح زیرلایه است، که با استفاده از پردازش تصاویر سطح مقطع عرضی روکش ایجاد شده، به دست آمده است.

همانطور که از شکل ۹ مشخص است در سرعت ثابت حرکت لیزر، با افزایش نرخ تغذیه پودر نسبت آمیختگی کاهش می‌یابد، که به دلیل ثابت بودن توان لیزر، افزایش در نرخ تغذیه‌ی پودر باعث کاهش میزان جذب انرژی توسط زیرلایه شده و در نتیجه میزان



شکل ۱۲) نمودار اثر تغییر فاصله محل برخورد لیزر با زیرلایه از کانون لیزر بر روی نسبت آمیختگی.

لیزر، واگرایی لیزر افزایش می‌یابد. در نتیجه قطر ناحیه لیزر بر روی زیرلایه افزایش یافته و موجب کاهش چگالی انرژی مصرفی و از کلیه نمودارها، کمترین درصد آمیختگی، با ایجاد پیوند متالورژیکی قابل مشاهده در تصاویر میکروسکوپی، مربوط به سطح سرعت حرکت لیزر ۶ میلی‌متر بر ثانیه در توان ثابت ۲۵۰ وات لیزر و فاصله ۲۵ میلی‌متر زیرکانون لیزر است، که عدد آن ۲۱ درصد است. از آنجائیکه کمترین آمیختگی، مطلوب فرآیند روکش‌کاری است و این میزان بر اساس گزارش‌ها، کمتر از ۱۰ درصد است [8, 12] به همین دلیل نمونه‌های دیگری با توجه به نتایج آزمایش‌های مرحله‌ی اول در راستای به‌دست آوردن کمترین نسبت آمیختگی، متشکل از ۲۳ نوار روکشی با پارامترهای متغیر، ساخته شده است و مطابق با مراحل قبلی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۳ تصویر نمونه‌های ساخته شده در مرحله‌ی دوم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳) تصویر نمونه‌های مرحله دوم برای به‌دست آوردن کمترین نسبت آمیختگی.

پس از بررسی تصاویر میکروسکوپی نتایج به‌دست آمده در جدول ۳ نشان داده شده است.

نتایج آزمایش‌های مرحله دوم نشان داد که نمونه‌های شماره ۳، ۸ و ۹ به ترتیب با ۰/۰۹، ۰/۰۹۵ و ۰/۰۹۹، نسبت آمیختگی کمتر از ۰/۱ را داشتند که پارامترهای فرآیند آنها در جدول ۴ نشان داده شده است.

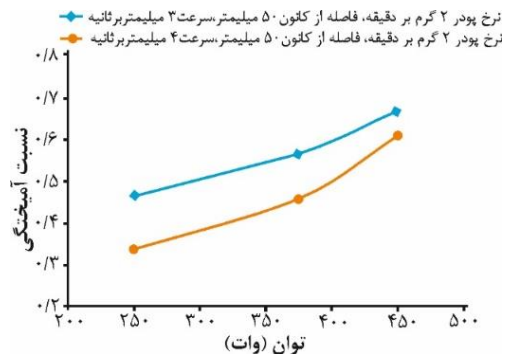
۳-۲- بررسی معادلات بنیادین

نتایج آزمایش سنجی در مسیر نشان داده شده در شکل ۶ برای نوارهای مختلف به‌دست آمده است که نمودار شکل ۱۴ نشان دهنده توزیع سختی در هشت نمونه اول است.

نمودارهای سختی‌سنجی خطوط روکش شده نشانگر کاهش سختی در مسیر عمود بر نوار روکش است و نشان می‌دهد که هر چه فاصله

ایجاد نمی‌شود، زیرا کاهش بیش از حد جذب انرژی لیزر توسط زیرلایه در اثر افزایش سرعت و کاهش توان، منجر به تشکیل نشدن حوضچه مذاب در زیرلایه می‌شود و پیوند بین روکش و زیرلایه چسبندگی لازم را ندارد. در نتیجه آمیختگی معنی‌داری بین لایه روکش و زیرلایه ایجاد نمی‌شود.

شکل ۱۱ نشان دهنده نمودار اثر تغییر توان لیزر بر روی نسبت آمیختگی در دو سطح سرعت حرکت لیزر ۳ و ۴ میلی‌متر بر ثانیه، نرخ تغذیه پودر ۲ گرم بر دقیقه و فاصله ثابت ۵۰ میلی‌متری محل برخورد لیزر با پودر و زیرلایه از کانون آن است.



شکل ۱۱) نمودار اثر تغییر توان لیزر بر روی نسبت آمیختگی در سرعت حرکت لیزر ۳ و ۴ میلی‌متر بر ثانیه.

با کاهش توان لیزر، انرژی جذب شده توسط ماده روکش‌کننده و زیرلایه نیز کاهش می‌یابد، لیکن به نظر می‌رسد کاهش توان تاثیر چندانی در کاهش و یا افزایش نسبت آمیختگی نداشته باشد. نتایج نشان می‌دهد نسبت آمیختگی در سرعت حرکت برابر، با کاهش توان، کاهش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان اینطور بیان کرد که در زمان ایجاد روکش، ابتدا لیزر به ماده روکش‌کننده برخورد کرده سپس زیرلایه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هرچند این اتفاق در زمان بسیار کوتاه اتفاق می‌افتد، ولی با این حال سهم ماده روکش‌کننده از جذب انرژی بیشتر از زیرلایه بوده و در نتیجه ضخامت ذوب‌شده‌ی زیرلایه کاهش یافته و نسبت آمیختگی نیز کاهش می‌یابد.

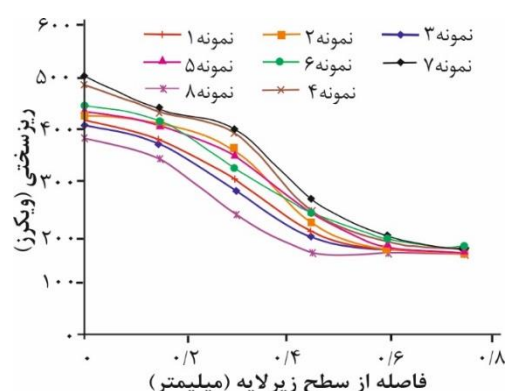
شکل ۱۲ نمودار اثر تغییر فاصله محل برخورد لیزر با زیرلایه از کانون لیزر بر روی نسبت آمیختگی در دو سطح سرعت حرکت لیزر در توان ثابت ۴۵۰ وات و نرخ تغذیه پودر ۲ گرم بر دقیقه را نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که با تغییر در فاصله نقطه کانون لیزر از سطح زیرلایه (محل برخورد لیزر با ماده روکش‌کننده و زیرلایه) نسبت آمیختگی در سرعت حرکت لیزر، توان لیزر و نرخ تغذیه پودر برابر، تغییر می‌کند و با افزایش فاصله سطح کار از کانون لیزر، نسبت کاهش ذوب ذرات در ناحیه تابش می‌گردد. همچنین انرژی ورودی به زیرلایه نیز کاهش یافته و ضخامت ذوب‌شده‌ی زیرلایه کاهش می‌یابد، که کاهش ضخامت ذوب‌شده‌ی زیرلایه، کاهش نسبت آمیختگی را باعث می‌شود. با توجه به داده‌های به‌دست آمده آمیختگی کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش فاصله سطح کار از کانون

جدول ۳) نتایج به دست آمده از اندازه گیری های مرحله دوم آزمایش ها.

نمونه	سطح لایه روکش A_p میلیمتر مربع	سطح نفوذ A_n میلیمتر مربع	سطح کل A میلیمتر مربع	عرض لایه W میلیمتر	ارتفاع لایه h میلیمتر	عمق نفوذ b میلیمتر	نسبت آمیختگی
۱	۰/۲۶۷	۰/۰۵۷	۰/۳۲۳	۰/۸۴۰	۰/۱۵۳	۰/۰۳۷	۰/۱۷۵
۲	۰/۲۸۷	۰/۰۹۷	۰/۳۸۳	۰/۷۸۳	۰/۱۷۷	۰/۰۶۳	۰/۲۵۲
۳	۰/۳۵۰	۰/۰۳۴	۰/۳۸۴	۰/۷۸۷	۰/۲۰۳	۰/۰۲۴	۰/۰۸۹
۴	۰/۷۲۰	۰/۲۸۰	۱/۰۰۰	۱/۱۸۰	۰/۲۹۰	۰/۱۲۰	۰/۲۸۰
۵	۰/۵۶۷	۰/۵۲۷	۱/۰۹۳	۱/۱۷۰	۰/۲۳۳	۰/۲۲۰	۰/۴۸۲
۶	۱/۱۹۰	۰/۵۶۷	۱/۷۵۷	۱/۲۶۷	۰/۴۳۳	۰/۲۱۷	۰/۳۲۰
۷	۰/۶۲۰	۰/۲۶۰	۰/۸۸۰	۱/۱۶۷	۰/۴۷۳	۰/۲۲۰	۰/۲۹۵
۸	۰/۳۷۳	۰/۰۳۹	۰/۴۱۳	۱/۰۰۰	۰/۳۵۰	۰/۰۳۷	۰/۰۹۵
۹	۰/۴۱۳	۰/۰۴۷	۰/۴۶۰	۱/۰۵۳	۰/۳۴۷	۰/۰۳۹	۰/۱۰۱
۱۰	۰/۶۶۰	۰/۲۲۰	۰/۸۸۰	۱/۲۸۰	۰/۴۶۷	۰/۱۷۳	۰/۲۵۰
۱۱	۰/۴۸۰	۰/۲۵۳	۰/۷۳۳	۱/۱۳۳	۰/۳۸۷	۰/۲۲۰	۰/۳۴۵
۱۲	۰/۴۸۰	۰/۲۲۷	۰/۷۰۷	۱/۰۴۷	۰/۴۱۳	۰/۲۰۷	۰/۳۲۱
۱۳	۰/۳۴۷	۰/۱۶۷	۰/۵۱۳	۰/۹۶۰	۰/۳۲۷	۰/۱۷۳	۰/۳۲۵
۱۴	۰/۴۲۰	۰/۲۳۳	۰/۶۵۳	۰/۹۳۳	۰/۴۰۰	۰/۲۳۳	۰/۳۵۷
۱۵	۰/۵۶۷	۰/۵۴۰	۱/۱۰۷	۱/۲۸۷	۰/۴۰۷	۰/۳۹۳	۰/۴۸۸
۱۶	۰/۶۰۷	۰/۸۷۳	۱/۴۸۰	۱/۴۸۷	۰/۳۸۷	۰/۵۲۰	۰/۵۹۰
۱۷	۱/۰۴۰	۰/۴۶۰	۱/۵۰۰	۱/۳۶۷	۰/۶۵۳	۰/۳۲۰	۰/۳۰۷
۱۸	۰/۵۴۷	۱/۸۲۰	۱/۳۶۷	۱/۳۵۳	۰/۳۸۰	۱/۱۱۳	۰/۷۶۹
۱۹	۰/۲۶۰	۰/۰۴۹	۰/۳۰۹	۱/۰۹۱	۰/۵۰۵	۰/۱۱۴	۰/۱۵۸
۲۰	۰/۲۴۴	۰/۰۴۹	۰/۲۹۳	۰/۹۶۰	۰/۵۰۵	۰/۰۹۸	۰/۱۶۷
۲۱	۰/۱۷۹	۰/۰۳۳	۰/۲۱۲	۰/۹۶۰	۰/۴۰۷	۰/۰۸۱	۰/۱۵۴
۲۲	۰/۰۹۸	۰/۰۳۳	۰/۱۳۰	۱/۰۴۲	۰/۲۲۸	۰/۰۸۱	۰/۲۵۰
۲۳	۰/۱۷۳	۰/۰۷۰	۰/۲۴۳	۰/۷۴۳	۰/۱۱۰	۰/۰۴۳	۰/۲۸۸

جدول ۴) پارامترهای فرآیند در ساخت نمونه ها با نسبت آمیختگی کمتر از ۱/۱

شماره نمونه	توان لیزر (وات)	سرعت حرکت لیزر (میلیمتر بر ثانیه)	نرخ تغذیه پودر (گرم بر دقیقه)	فاصله از کانون لیزر (میلیمتر)
۳	۳۳۰	۱۰	۸	۲۵
۸	۳۳۰	۸	۱۰	۲۵
۹	۴۰۰	۱۰	۱۲	۲۵



شکل ۱۴) نمودار توزیع سختی در امتداد عمود بر نوار روکش شده برای هشت نمونه اول.

زیرلایه و حداقل تخلخل و عدم مشاهده ترک در روش نفوذ مایع، به ۲ تا ۳ برابر سختی اولیه خود رسید، که نشان دهنده ی بهبود سختی سطحی ماده زیرلایه است. با توجه به تفاوت اندک در سختی نمونه هایی که حداقل نسبت آمیختگی را داشتند، به نظر می رسد بهترین نمونه از نظر پارامترهای عملکردی نمونه شماره ۳ با پارامترهای سرعت حرکت ۱۰ میلیمتر بر ثانیه، نرخ تغذیه پودر ۸ گرم بر دقیقه و توان ۳۳۰ وات لیزر است که سختی آن حدود ۴۰۰ ویکرز اندازه گیری شده است.

۴- نتایج

۱) نمونه های روکش کاری لیزری با در نظر گرفتن تاثیرگذارترین عوامل بر روی فرآیند روکش کاری لیزری با پودر فولاد مارتنزیتی PH4-17، با کیفیت سطح و شکل هندسی خوب ساخته شد. تصاویر میکروسکوپی از سطح مقطع نمونه ها حاکی از پیوند متالورژیکی خوب با زیرلایه، نبودن ترک و یا نبود انباشتگی در اکثر نمونه ها است.

۲) میزان آمیختگی با افزایش سرعت حرکت لیزر در یک توان ثابت و فاصله مشخص ایجاد نوارها از کانون لیزر، کاهش می یابد. همچنین میزان آمیختگی با کاهش توان در سرعت حرکت برابر کاهش می یابد. میزان آمیختگی در سرعت، توان و نرخ تغذیه برابر ولی در فاصله ی متفاوت ایجاد لایه از کانون لیزر، متفاوت بوده و

از سطح زیرلایه به داخل آن در منطقه حوضچه مذاب و منطقه آمیختگی بیشتر می شود، به دلیل کاهش غلظت ماده ی روکشی، میزان سختی کاهش می یابد. همچنین سختی زیرلایه با روکشی مناسب از نظر کیفی، با حداقل نسبت آمیختگی، عدم تخریب

- 7- De Oliveira U, Ocelik V, De Hosson JT. Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. *Surface and Coatings Technology*. 2005 Jul; 197(2-3):127-36.
- 8- Nenadl O, Ocelik V, Palavra A, De Hosson JT. The prediction of coating geometry from main processing parameters in laser cladding. *Physics Procedia*. 2014 Jan; 56:220-7.
- 9- Ansari M, Razavi RS, Barekat M. An empirical-statistical model for coaxial laser cladding of NiCrAlY powder on Inconel 738 superalloy. *Optics & Laser Technology*. 2016 Dec; 86:136-44.
- 10- Vilar R, Almeida A. Laser surface treatment of biomedical alloys. In *Laser Surface Modification of Biomaterials* 2016 Jan; (pp. 35-75). Woodhead Publishing.
- 11- Ju J, Zhou Y, Kang M, Wang J. Optimization of process parameters, microstructure, and properties of laser cladding Fe-based alloy on 42CrMo steel roller. *Materials*. 2018 Oct; 11(10):2061.
- 12- Reddy L, Preston SP, Shipway PH, Davis C, Hussain T. Process parameter optimisation of laser clad iron based alloy: Predictive models of deposition efficiency, porosity and dilution. *Surface and Coatings Technology*. 2018 Sep; 349:198-207.
- 13- Hofman JT, De Lange DF, Pathiraj B, Meijer J. FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011 Feb; 211(2):187-96.
- 14- Pekkarinen J, Kujanpää V, Salminen A. Laser cladding with scanning optics: Effect of power adjustment. *Journal of Laser Applications*. 2012 Aug; 24(3):032003.
- 15- Frazier WE. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*. 2014 Jun; 23(6):1917-28.
- 16- Foroozmehr E, Lin D, Kovacevic R. Application of vibration in the laser powder deposition process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2009 Jan; 11(1):38-44.
- 17- El Cheikh H, Courant B, Branchu S, Hascoët JY, Guillén R. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process. *Optics and Lasers in Engineering*. 2012 Mar; 50(3):413-22.
- 18- Javid Y, Ghoreishi M, Torkamany MJ. Preplaced laser cladding of WC powder on Inconel 718 by laser. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 Sep; 15(7):98-106.
- 19- Barekat M, Razavi RS, Ghasemi A. Nd: YAG laser cladding of Co-Cr-Mo alloy on γ -TiAl substrate. *Optics & Laser Technology*. 2016 Jun; 80:145-52.
- 20- Ibrahim MZ, Sarhan AA, Kuo TY, Hamdi M, Yusof F, Chien CS, Chang CP, Lee TM. Advancement of the artificial amorphous-crystalline structure of laser clad FeCrMoCB on nickel-free stainless-steel for bone-implants. *Materials Chemistry and Physics*. 2019 Apr; 227:358-67.
- 21- Qiao Y, Huang J, Huang D, Chen J, Liu W, Wang Z, Zhibin Z. Effects of laser scanning speed on microstructure, microhardness, and corrosion behavior of laser cladding Ni45 coatings. *Journal of Chemistry*. 2020 Aug; 2020.

با افزایش میزان فاصله سطح کار از کانون لیزر، نسبت آمیختگی کاهش می‌یابد.

۳) سختی در مسیر عمود بر نوار روکش کاهش می‌یابد که نشانگر این موضوع است که هر چه فاصله از سطح زیرلایه به داخل آن در منطقه حوضچه مذاب و منطقه آمیختگی بیشتر شود، به دلیل کاهش غلظت ماده‌ی روکشی، میزان سختی کاهش می‌یابد. همچنین سختی زیرلایه با روکشی مناسب از نظر کیفی، با حداقل نسبت آمیختگی، عدم تخریب زیرلایه و حداقل تخلخل و عدم مشاهده ترک، به ۲ تا ۳ برابر مقدار اولیه خود می‌رسد.

۴) باتوجه به تفاوت اندک در سختی نمونه‌هایی که حداقل آمیختگی را داشتند به نظر می‌رسد بهترین نمونه از نظر پارامترهای عملکردی نمونه شماره ۳ با پارامترهای سرعت حرکت ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه، نرخ تغذیه پودر ۸ گرم بر دقیقه و توان لیزر ۳۳۰ وات است، که درصد آمیختگی آن حدود ۹ درصد و سختی آن برابر ۴۰۰ ویکرز است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این تحقیق، از "مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران" برای همکاری در ساخت نمونه‌های آزمایشی و "دانشگاه کاشان" برای حمایت‌های مادی و معنوی تشکر می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و محتوای ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله برعهده نویسندگان مقاله است.

تعارض منافع: نویسندگان این تحقیق، هیچگونه تعارض منافع ندارند.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: منابع مالی از پژوهانه اساتید تأمین شده است.

منابع

- 1- Zhu L, Xue P, Lan Q, Meng G, Ren Y, Yang Z, Xu P, Liu Z. Recent research and development status of laser cladding: A review. *Optics & Laser Technology*. 2021; 138:106915.
- 2- Chen Z, Yan H, Zhang P, Yu Z, Lu Q, Guo J. Microstructural evolution and wear behaviors of laser-clad Stellite 6/NbC/h-BN self-lubricating coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2019 Aug; 372:218-28.
- 3- Zhang Z, Kovacevic R. Laser cladding of iron-based erosion resistant metal matrix composites. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019 Feb; 38:63-75.
- 4- Wirth F, Wegener K. A physical modeling and predictive simulation of the laser cladding process. *Additive Manufacturing*. 2018 Aug; 22:307-19.
- 5- Brückner F, Lepski D, Beyer E. Modeling the influence of process parameters and additional heat sources on residual stresses in laser cladding. *Journal of thermal spray technology*. 2007 Sep; 16(3):355-73.
- 6- Meng QW, Geng L, Zhang BY. Laser cladding of Ni-base composite coatings onto Ti-6Al-4V substrates with pre-placed B4C+ NiCrBSi powders. *Surface and Coatings Technology*. 2006 Apr; 200(16-17):4923-8.

- 22- Akinlabi ET, Bayode A. Surface modification of Ti4Al6V alloy by laser cladding with 17-4PH stainless steel powder. In *Advances in Material Sciences and Engineering 2020* (pp. 465-471). Springer, Singapore.
- 23- Wu D, Guo M, Ma G, Niu F. Dilution characteristics of ultrasonic assisted laser clad yttria-stabilized zirconia coating. *Materials Letters*. 2015 Feb; 141:207-9.
- 24- Xi W, Song B, Zhao Y, Yu T, Wang J. Geometry and dilution rate analysis and prediction of laser cladding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Aug; 103(9):4695-702.