



Experimental-statistical analysis for laser cladding of 2507 duplex steel wire on VCN200 steel by response surface methodology

B. Agharazi, S. R. Shoja Razavi*, S.M. Barekat, M. R. Borhani, M. Erfanmanesh
Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

Received 10 February 2025 ; Accepted 24 May 2025

Abstract

This experimental-statistical study investigates the influence of laser cladding parameters—laser power (700–900 W), scanning speed (6–8 mm/s), and wire feed rate (70–80 mm/min)—on the geometric characteristics of single-pass coatings of 2507 duplex stainless steel on a VCN200 substrate. Experimental data were analyzed using Response Surface Methodology (RSM) with a three-factor, four-level design matrix. Measurements including clad width (W), height (H), penetration depth (b), wettability angle (Z), and dilution percentage (D) were obtained via ImageJ software. Results indicated that increasing laser power from 700 to 900 W led to a 14% increase in clad width (from 1417 to 1744 μm), a 33% rise in clad height (from 450 to 594 μm), a 6% increase in penetration depth (from 88 to 93 μm), and a 3% improvement in wettability angle (from 71° to 69°). In contrast, increasing scanning speed from 6 to 8 mm/s reduced clad width by 12% (from 1513 to 1787 μm), clad height by 31% (from 650 to 573 μm), and wettability angle by 15% (from 67° to 78°), while enhancing penetration depth by 4% (from 85 to 84 μm) and dilution by 19% (from 58% to 53%). Moreover, raising the wire feed rate from 70 to 80 mm/min increased clad height by 13% (from 502 to 747 μm) and wettability angle by 4% (from 75° to 78°), but decreased dilution by 19% (from 59% to 48%).

Keywords: Laser Cladding, 2507 Duplex stainless steel, Process optimization, Response surface methodology, Geometric properties.

 *Corresponding Author: S.R Shoja Razavi: shoja_r@yahoo.com



تحلیل تجربی - آماری برای روکش کاری لیزری سیم فولاد دوفازی 2507 روی فولاد VCN200 به روش سطح پاسخ

بهراد آقارضی، سید رضا شجاع رضوی^{*}، سید مسعود برکت، محمدرضا برهانی، محمد عرفان منش
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت.

دریافت مقاله: 1403/11/22؛ پذیرش مقاله: 1404/03/03

چکیده

این مطالعه به صورت تجربی - آماری به بررسی تأثیر پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری شامل توان لیزر (700 تا 900 وات)، سرعت روبش لیزر (6 تا 8 میلی متر بر ثانیه) و نرخ تغذیه سیم (70 تا 80 میلی متر بر دقیقه) بر خواص هندسی روکش تک پاس از جنس فولاد داپلکس 2507 روی زیرلایه VCN200 پرداخته است. در این راستا، آزمایش ها براساس روش سطح پاسخ (RSM) با طرح سه عاملی و در چهار سطح انجام شد و در ادامه، داده های حاصل از اندازه گیری های تجربی شامل عرض روکش (W)، ارتفاع روکش (H)، عمق نفوذ (b)، زاویه ترشوندگی (Z) و درصد آمیختگی (D) با استفاده از نرم افزار ImageJ استخراج شد. نتایج نشان داد که افزایش توان لیزر از 700 به 900 وات منجر به افزایش 14 درصدی در عرض روکش (از 1417 به 1744 میکرومتر)، 33% در ارتفاع روکش (از 450 به 594 میکرومتر)، 6% در عمق نفوذ (از 88 به 93 میکرومتر) و 3% در زاویه ترشوندگی (از 71 به 69 درجه) شد. در مقابل، افزایش سرعت روبش از 6 به 8 میلی متر بر ثانیه سبب کاهش 12% در عرض روکش (از 1513 به 1787 میکرومتر)، 31% در ارتفاع (از 650 به 573 میکرومتر) و 15% در زاویه ترشوندگی (از 67 به 78 درجه) شد؛ در حالی که عمق نفوذ 4% (از 85 به 84 میکرومتر) و درصد آمیختگی 19% افزایش یافت. همچنین، افزایش نرخ تغذیه سیم از 70 به 80 میلی متر بر دقیقه باعث افزایش 13 درصدی در ارتفاع روکش (از 502 به 747 میکرومتر)، 4% در زاویه ترشوندگی (از 75 به 78 درجه) و همچنین کاهش 19 درصدی میزان آمیختگی شد.

کلمات کلیدی: روکش کاری لیزری، فولاد داپلکس 2507، بهینه سازی فرایند، روش سطح پاسخ، خواص هندسی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: سیدرضا شجاع رضوی، shoja_r@yahoo.com

1- مقدمه

خواص، ریزساختار لایه ایجادشده اثرگذارند [5-7]. این پارامترهای فرایند با مقادیر مختلف می توانند لایه هایی با ویژگی های هندسی و ریزساختارهای متفاوت ایجاد کنند؛ لذا بهینه سازی پارامترهای فرایند و پیش بینی خواص و هندسه پوشش چالش برانگیز است [8-9]. در سال های اخیر تحقیقات بسیاری جهت بررسی اثر پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری بر ویژگی های هندسی لایه انجام شده است.

روکش کاری لیزری، یک فناوری بین رشته ای است که از فناوری لیزر، طراحی و تولید به کمک رایانه، ربات و حسگرها بهره گیری می کند. این فرایند از منبع حرارتی لیزر برای نشان دادن لایه ای نازک روی فلز پایه بهره می گیرد [1-4]. توان لیزر، سرعت روبش لیزر و نرخ تغذیه از پارامترهای اصلی فرایند روکش کاری لیزری هستند که بر

ارتفاع عیوب و تخلخل‌ها افزایش می‌یابد و رقت و عمق حوضچه مذاب نیز به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ابعاد فریت به‌تدریج از درشت به باریک و درنهایت به یک شکل ناپیوسته تبدیل می‌شود. مشخص شده است که پوشش حاصل از روکش‌کاری لیزری با توان $2/3$ کیلووات دارای ریزسختی بالاتری است و مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به نمونه‌های دیگر (در حدود 20 برابر بهتر از زیرلایه فولاد کربنی) با پتانسیل خوردگی و چگالی جریان خوردگی آن نشان داد.

وانگ و همکاران [11] آنالیز فازی، ریزساختار، مقاومت در برابر خوردگی الکتروشیمیایی، اصطکاک و مقاومت در برابر سایش لایه‌های روکش لیزری را موردبررسی قرار دادند. با تغییر پارامترهای اصلی لیزر، تغییراتی در ویژگی‌های هندسی لایه ایجاد شده مشاهده شد. لایه‌های روکش لیزری چند پاسی شامل فازهای γ -Fe و α -Fe بودند. با توجه به توان لیزر بهینه در $2/3$ کیلووات، ریزساختار لایه روکش‌کاری شده با لیزر از تعداد زیادی کریستال هم‌محور و تعداد کمی کریستال سلولی آماده شده تشکیل شده است که به مقاومت در برابر خوردگی خوب آن کمک می‌کند. این پژوهش با بررسی تاثیر پارامترهای کلیدی فرایند روکش‌کاری لیزری، نوآوری اساسی را معرفی می‌کند. تحلیل جامع از تاثیرات متقابل توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تزریق سیم بر ویژگی‌های هندسی روکش (ارتفاع، عرض، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی) که به بهینه‌سازی کیفیت روکش در ترکیب فولاد داپلکس 2507 و VCN200 کمک می‌کند. این یافته‌ها، چارچوبی نوین برای طراحی پارامترهای فرایندی در کاربردهای صنعتی را فراهم می‌کند.

2- مواد و روش تحقیق

در آزمایش حاضر از یک دستگاه رسوب‌نشانی مستقیم لیزری فیبری پیوسته با طول موج 1084 نانومتر، حداکثر توان لیزر یک کیلووات، سیستم تزریق سیم و سیستم خنک‌کننده آبی استفاده شد. طرح‌واره فرایند روکش‌کاری لیزری در شکل (1) نشان داده شده است در شکل (2) نمای از دستگاه رسوب‌نشانی و هم‌چنین تزریق‌کننده سیم و هد دستگاه مشخص است. آرگون به‌عنوان گاز محافظ و حامل استفاده شد. زیرلایه مورد استفاده در این مطالعه فولاد VCN200 سیم فولادی داپلکس 2507 به قطر 0/9 میلی‌متر به‌عنوان ماده پوشش استفاده شد. ابتدا سطح زیرلایه با سمباده پرداخت شده و سپس سطح با استون تمیز شد. ترکیب شیمیایی زیرلایه و سیم در جدول (1 و 2)

باین‌حال این فرایند شامل فعل‌وانفعالات فیزیکی میان پرتو لیزر، سیم، زیرلایه است که یافتن اثر هم‌افزایی در فرایند روکش‌کاری لیزری را بسیار پیچیده می‌کند. بنابراین با انجام تست‌های روی فولاد داپلکس 2507 به‌عنوان ماده پوششی و زیرلایه VCN200 یکسری نتایج درباره تأثیر پارامترهای مختلف بر ویژگی‌های هندسی به دست آمد. فولاد آلیاژی VCN 200 دارای عناصر وانادیم، کروم، نیتروژن و کربن است و ازجمله فولادهای آلیاژی پرکاربرد در شاسی اتومبیل، شافت لوکوموتیو و زیردریایی به‌حساب می‌آید.

این فولادها قابلیت بالای ماشین‌کاری، مقاومت در برابر نیروهای خمشی، پیچشی و کششی، انعطاف‌پذیری بالا، مقاومت به شکست و ضربه و همچنین مقاومت سایشی مطلوب دارند. در صنعت قطعه‌سازی جهت ساخت میل‌لنگ‌ها، محورها، غیر هم‌مرکز، اجزاء و قطعات دندانه‌دار، شاسی اتومبیل، صفحه دیسک، شافت لوکوموتیوها و به‌خصوص در شافت‌های زیردریایی استفاده می‌شود. گستردگی استفاده، عدم دسترسی و گران بودن تعویض این قطعات باعث شده است تا در صورت معیوب شدن قطعه، هزینه تعمیر آن‌ها به صرفه‌تر از جایگزینی باشد. به همین دلیل، تحقیقات مختلفی روی پوشش‌دهی و بازسازی قطعات معیوب از جنس آلیاژ مذکور متمرکز شده است. به‌منظور جلوگیری و یا کاهش صدمات قطعات فولادی مذکور می‌توان آن‌ها را با پوشش‌های مقاوم به خوردگی بالا همچون فولاد داپلکس 2507 پوشش‌دهی نمود.

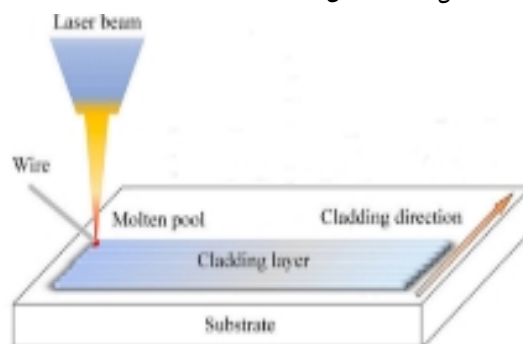
این فولاد زنگ‌نزن دوفازی دارای ساختار ترکیبی آستنیت- فریتی است. ساختار دوفازی بلوری فولاد 2507 سبب آن شده است که علاوه بر دارا بودن مقاومت به خوردگی مناسب فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، از استحکام مکانیکی فولادهای زنگ‌نزن فریتی نیز برخوردار باشد. علاوه بر درصد کروم بالا، وجود عناصر آلیاژی مولیبدن و نیتروژن در ساختار آلیاژی این فولاد داپلکس، منجر به ایجاد مقاومت به خوردگی عالی در مقایسه با سایر فولادهای زنگ‌نزن شده است. از همین رو گزینه‌ای کاربردی جهت استفاده در محیط‌های خورنده کلریدی و سولفیدی مطرح می‌شود. فرایند روکش‌کاری لیزری به‌دلیل منطقه متأثر از حرارت پایین‌تر نسبت به سایر فرایندها گزینه مناسبی جهت پوشش‌دهی این ماده می‌باشد. حال تأثیر پارامترهای روکش‌کاری لیزری بر فولاد داپلکس 2507 روی فولاد VCN200 مورد بررسی قرار گرفته است. لیاو و همکاران [10] به بررسی تک‌پاس فولاد داپلکس بر روی سطح فولاد Q235 پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش توان لیزر، عرض و

بررسی هندسه روکش تک پاس و اثر پارامترهای فرایند بر آن برای بررسی تأثیر پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری بر ویژگی های هندسی روکش تک پاس، بر اساس روش سطح پاسخ، توان لیزر (P)، سرعت روبش (V) و نرخ تغذیه پودر (F) به عنوان متغیرهای مستقل و عرض لایه (W)، ارتفاع لایه (H)، عمق نفوذ (b) و درصد آمیختگی (D) به عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شدند؛ بنابراین از نرم افزار طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ برای ایجاد یک ماتریس سه عاملی و چهار سطحی با دوازده نقطه محوری و یک نقطه مرکزی استفاده شد. در مجموع سیزده گروه آزمایشی براساس پارامترهای مستقل و پاسخ طراحی شد. بر همین اساس روکش کاری لیزری سیم فولادی داپلکس 2507 روی زیرلایه فولادی VCN200 به صورت تک پاس انجام شد. در مرحله بعد، 13 نمونه تک پاس پس از مقطع زنی براساس استاندارد ASTM E3-17 آماده سازی و با محلول نایتال 5% به صورت شیمیایی اچ شد. به دلیل نوین بودن این روش روکش کاری لیزری که با تزریق سیم انجام می شد و به دلیل این که نمونه های در مقالات و پایان نامه ها برای شناسایی بهتر پارامترها نبود و آشنایی بهتر با عوامل مختلف تاثیرگذار روی نتایج بدست آمده، آزمون های قبل از انجام بهینه سازی پارامترها انجام شد. توان دستگاه لیزر 100 تا 1000 وات می باشد. به همین دلیل در توان های مختلف آزمون های انجام شد. که نشان داد از توان 100 تا 700 وات کیفیت ذوب، چسبندگی و امتداد ذوب وجود نداشت و سبب کنار گذاشتن این توان ها شد. روی دو پارامتر دیگر یعنی سرعت روبش و نرخ تزریق سیم هم به همین شکل آزمون های انجام شد. که نشان داد در سرعت های پایین تر از 5 و بالاتر از 7mm/s، ذوب سطحی کامل انجام نمی شود همچنین باعث نازک شدن عرض پاس می شود. همچنین در نرخ تزریق های کمتر از 70 و بیشتر از 80 میلی متر بر دقیقه، باعث گلوله گلوله شدن سیم هنگام ذوب می شد. گاز محافظ هم جزء عوامل تاثیرگذار روی کیفیت ذوب و چسبندگی سیم روی زیرلایه داشت، مقدار تزریق گاز محافظ در آزمون های مختلف بررسی شد، که در نتیجه بهترین دبی 20 لیتر بر دقیقه محاسبه شد. انجام این آزمون ها سبب شد که برای بهینه سازی بهتر داده های استفاده شود که نتایج بهتری داشته باشند.

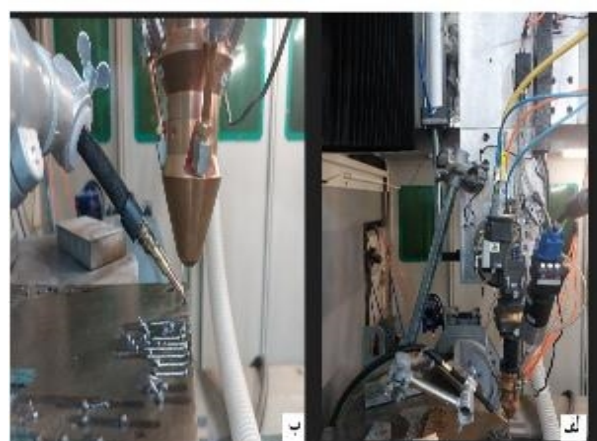
3- نتایج و بحث

پارامترهای پاسخ (عرض، ارتفاع، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی) با استفاده از نرم افزار Image J اندازه گیری شد (جدول 3). ویژگی های

ارائه شده است. همچنین نمودارهای EDS پوشش فولاد داپلکس 2507 و زیرلایه VCN200 به همراه تصویر SEM تک پاس بهینه در شکل (3) مشخص هستند.



شکل 1- طرحواره فرایند روکش کاری لیزری مورد استفاده در این تحقیق.



شکل 2- الف - نمایی کلی از دستگاه رسوب نشانی مستقیم لیزری و ب - سامانه تزریق سیم و هد دستگاه

جدول 1- ترکیب شیمیایی VCN200

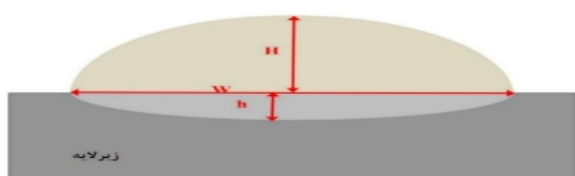
عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
کربن	0/34	کروم	2/2
منگنز	0/8	نیکل	2/2
فسفر	0/25	مولیبدن	0/5
سیلیسیم	0/40	نیتروژن	0/35

جدول 2- ترکیب شیمیایی فولاد 2507

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
کربن	0/03	کروم	24-26
منگنز	1/2	نیکل	6-8
فسفر	0/035	مولیبدن	3-5
سیلیسیم	0/8	نیتروژن	0/24-0/32

ارتفاع روکش (h)، پهنای روکش (w)، نرخ نفوذ روکش در زیرلایه (b)، درصد آمیختگی (D) و زاویه ترشوندگی (θ) با پارامترهای روکش کاری لیزری تغییر یافتند. قابل مشاهده است که افزایش در توان لیزر سبب افزایش در ارتفاع روکش، پهنای روکش، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی شده است. همچنین نرخ روبش سطح توسط لیزر روی مشخصات هندسی اثرات مختلفی داشته است.

افزایش نرخ روبش سطح سبب کاهش در ارتفاع روکش، افزایش عمق نفوذ در زیرلایه، افزایش آمیختگی روکش با زیرلایه و کاهش زاویه ترشوندگی شده است. به همین ترتیب نرخ تزریق فیلر نیز اثرات متفاوتی را روی مشخصات هندسی روکش از خود نشان داد. اثر پارامترها روی مشخصات هندسی نمونه های تک پاس به طور کلی در مباحث پیشرو مورد بررسی قرار گرفته است.

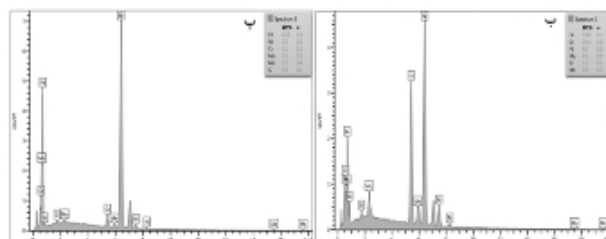
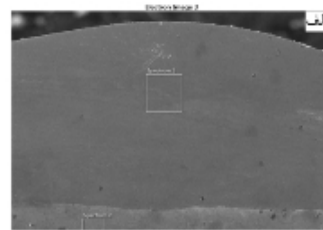


شکل 4- ویژگی های هندسی برای یک روکش تک پاس.

3-1- عرض روکش های تک پاس

میزان تغییرات عرض پاس رابطه مستقیم با تغییر توان لیزر دارد. بررسی ها نشان می دهد که در نتیجه افزایش سرعت روبش، عرض پاس کاهش یافته است. بنابراین سرعت روبش دارای تأثیر معکوس بر عرض پاس است. افزایش سرعت روبش باعث کاهش زمان تأثیر لیزر بر ماده می شود. همچنین با افزایش سرعت روبش، میزان انرژی ورودی در واحد سطح کاهش می یابد. لذا عرض پاس کاهش می یابد. روی هم قرار گرفتن و یا فاصله گرفتن نقاط با سرعت روبش در یک توان ثابت، تعیین کننده تأثیر پارامتر فرایندی سوم یعنی نرخ تزریق سیم است. با توجه به همپوشانی نقاط در سرعت روبش و توان ثابت می توان نتیجه گرفت که نرخ تزریق سیم، کمترین تأثیر را بر عرض پاس داشته است. شکل (6) میزان تأثیر سه پارامتر اصلی توان (A)، سرعت (B) و نرخ تزریق سیم (C) بر عرض تک پاس را نشان می دهد مطابق شکل توان بیشترین تأثیر و نرخ تزریق سیم ورودی کمترین اثر را در تغییر عرض تک پاس دارد. شکل (7) تصویر سه بعدی تمامی پارامترها را با نرخ ثابت 75 میلی متر بر دقیقه نشان می دهد. طبق شکل با افزایش توان و کاهش سرعت، سطح پاسخ مربوط به عرض افزایش می یابد.

هندسی در شکل (4) برای یک روکش تک پاس و تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع نمونه های تک پاس در شکل (5) نشان داده شده است.



شکل 3- الف- تصویر میکروسکوپی الکترونی از تک پاس بهینه

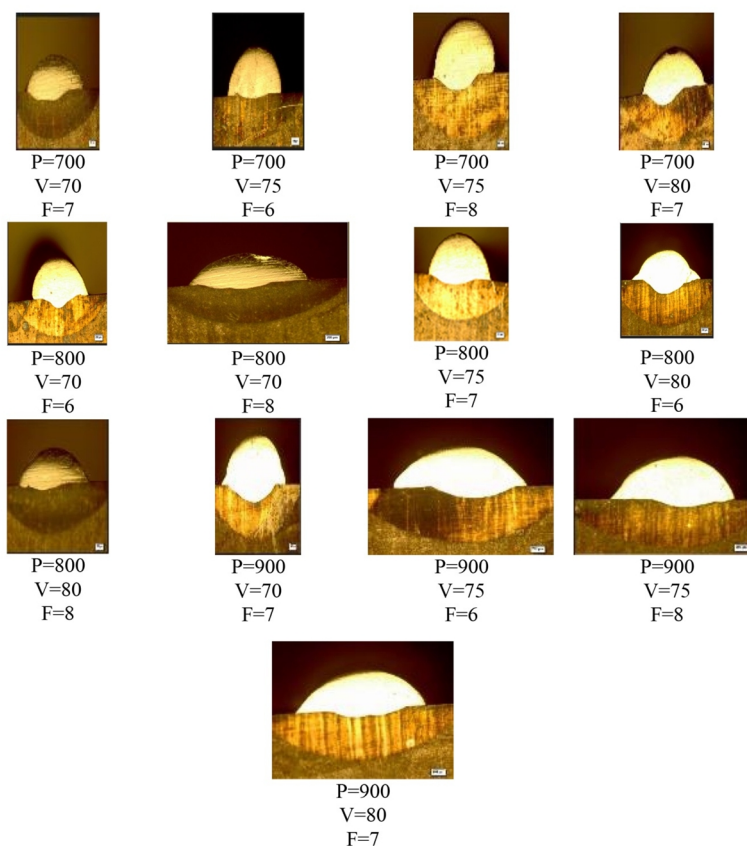
ب- ترکیب شیمیایی سیم فولاد داپلکس 2507 و پ- ترکیب شیمیایی زیرلایه فولاد VCN 200 مورد استفاده در این تحقیق.

افزایش نرخ روبش سطح توسط لیزر سبب افزایش زمان برهمکنش بین زیرلایه و لیزر می شود. حداقل توانی که برای ذوب زیرلایه به دست آمده است، با مجذور زمان برهمکنش بین زیرلایه و پرتو لیزر رابطه عکس دارد. پس حداقل توان لازم برای ذوب زیرلایه نیز افزایش می یابد و از آنجاکه توان به نسبت پایین است، در توان های کمتر از 500 وات هیچ روکشی ایجاد نشده است. از طرف دیگر، حداقل توان برای ذوب فیلر نیز در مدل فوق محاسبه شده است.

افزایش نرخ تزریق فیلر سبب می شود، که انرژی بیشتری برای ذوب فیلر و در نهایت تشکیل روکش مورد نیاز باشد. به نظر می رسد که در این توان و با افزایش هم زمان نرخ تزریق فیلر و نرخ روبش سطح، توان مورد نیاز برای ذوب فیلر نیز مانند توان مورد نیاز برای ذوب زیرلایه فراهم نشده است. در توان های دیگر به نظر می رسد. با وجود افزایش زمان برهمکنش بین زیرلایه و لیزر، حداقل توان برای ذوب زیرلایه نیز فراهم شده است. از طرفی با افزایش نرخ تزریق فیلر، مقدار فیلر بیشتری وارد نازل لیزر می شود و در نتیجه ذرات بیشتری ذوب می شوند. پس حداقل توان لازم برای ذوب فیلر نیز در این توان ها ایجاد می شود. همان طور که از شکل (4) قابل مشاهده است، پارامترهای اصلی روکش کاری لیزری از جمله توان لیزر، نرخ روبش سطح و نرخ تزریق فیلر روی مشخصات هندسی روکش اثر بسیار قابل توجهی دارند.

جدول 3- مقادیر اندازه‌گیری شده (تجربی) ویژگی‌های هندسی نمونه‌های تک‌پاس

پارامترهای پاسخ				پارامترهای مستقل				
Z(°)	D(%)	b(μm)	H(μm)	W(μm)	V(mm/s)	F(mm/min)	P(w)	کد نمونه
78	53	83	502	1869	7	70	700	1
67	58	85	650	1513	6	75	700	2
78	53	84	573	1787	8	75	700	3
75	59	84	747	1612	7	80	700	4
71	50	88	622	1417	6	70	800	5
79	52	90	450	1685	8	70	800	6
70	43	90	501	1805	7	75	800	7
76	47	89	731	1697	6	80	800	8
70	57	92	507	1916	8	80	800	9
69	54	93	594	1744	7	70	900	10
73	49	91	507	2017	6	75	900	11
68	59	98	713	1926	8	75	900	12
69	48	95	546	1822	7	80	900	13



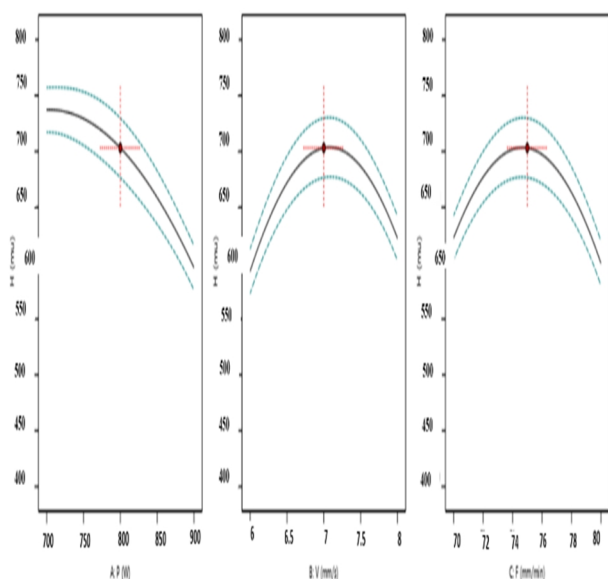
شکل 5- تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع نمونه‌های تک‌پاس

می‌توان معادله (1) را معادله رگرسیون برای رابطه بین عرض روکش و پارامترهای فرایند روکش‌کاری لیزری تعریف کرد.

$$W = 65387.0 + (-31.11750 P) + (1007.60V) + (-866.0F) + 0.513500P*V + (-3.47750P*F) + (-26.650V*F) + (0.013013P^2) + (4.845V^2) + (568.125F^2) \quad (1)$$

شکل (8) میزان تأثیرگذاری توان لیزر، سرعت روبش و نرخ تزریق سیم را بر ارتفاع تک پاس را نشان می دهد. مطابق این شکل در نتیجه تغییر توان، تغییر قابل توجهی در ارتفاع پاس رخ نمی دهد، که این امر نشان دهنده تأثیر بسیار کم توان بر ارتفاع پوشش است. شکل (9) تصویر سه بعدی تمامی پارامترها با توان ثابت 800 وات را نشان می دهد. طبق شکل با افزایش نرخ تزریق سیم و کاهش سرعت روبش سطح پاسخ مربوط به ارتفاع افزایش می یابد. می توان معادله (2) را معادله رگرسیون برای رابطه بین ارتفاع روکش و پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری تعریف کرد.

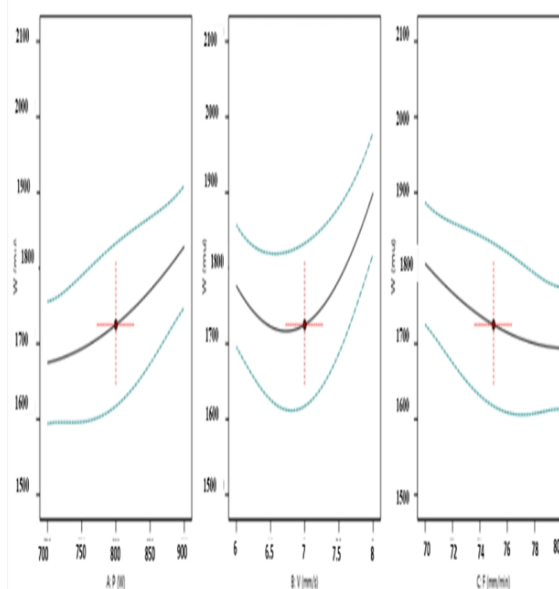
$$H = -73401.8 + (4.70 * P) + (1723.98 * V) + (3070.75 * F) + (0.266 P * V) + (-0.5775 P * F) + (37.45 V * F) + (-0.01465 * P^2) + (-14.72 * V^2) + (-382.75 * F^2) \quad (2)$$



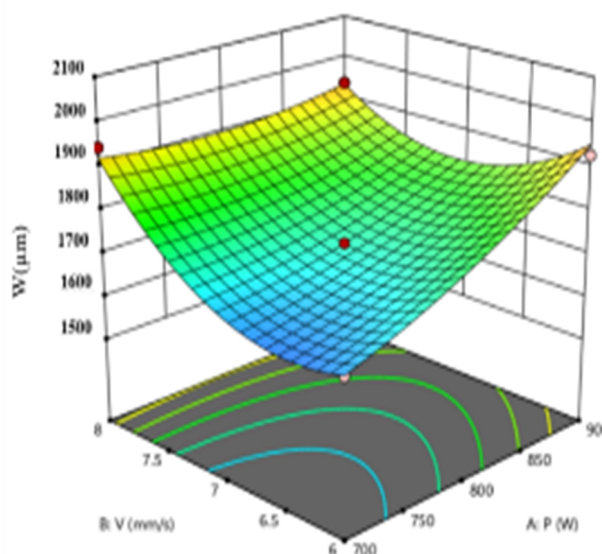
شکل 8- رابطه پارامترهای اصلی با ارتفاع تک پاس.

3-3- بررسی زاویه ترشوندگی روکش تک پاس

با افزایش نرخ تزریق سیم و کاهش سرعت روبش، زاویه ترشوندگی افزایش می یابد. همچنین افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش باعث افزایش اندک زاویه ترشوندگی خواهد شد. افزایش نرخ تزریق سیم منجر به تأثیر بیشتر لیزر بر سیم و در نتیجه منجر به افزایش ارتفاع می شود و این مسئله باعث افزایش زاویه ترشوندگی خواهد شد. همچنین در نرخ تزریق سیم ثابت، کاهش سرعت تأثیر مشابهی دارد و زاویه ترشوندگی را افزایش می دهد. شکل (10) میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر زاویه ترشوندگی را نشان می دهد. با توجه به



شکل 6- رابطه پارامترهای اصلی با میزان تغییرات عرض تک پاس.



شکل 7- نمایش سه بعدی سطح پاسخ عرض تک پاس با تغییرات توان لیزر و سرعت روبش.

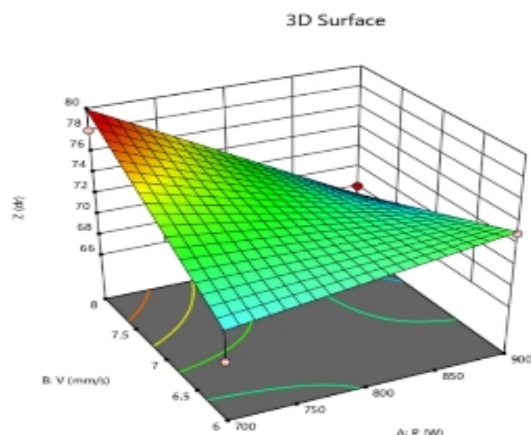
2-2- بررسی ارتفاع روکش تک پاس

با افزایش نرخ تزریق سیم، ارتفاع تک پاس افزایش می یابد. با افزایش نرخ تزریق سیم، میزان سیم وارد شده به حوضچه مذاب در واحد سطح افزایش می یابد و باعث صرف انرژی بیشتر لیزر جهت ذوب سیم و ایجاد رسوب می شود؛ همچنین با توجه به این که در این حالت انرژی کمتری به زیرلایه می رسد، ذوب کمتری در زیرلایه اتفاق خواهد افتاد.

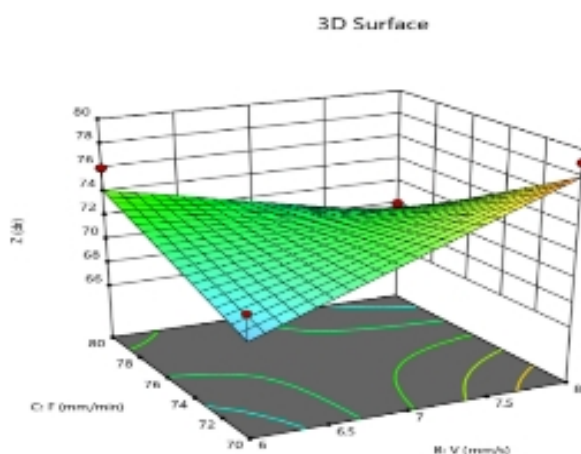
3-4- بررسی آمیختگی روکش تک پاس

با افزایش نرخ تزریق سیم و کاهش سرعت، آمیختگی کاهش می‌یابد. افزایش نرخ تزریق سیم باعث کاهش میزان برهم‌کنش با زیرلایه می‌شود. در نتیجه کاهش میزان برهم‌کنش لیزر آمیختگی کاهش خواهد یافت. شکل (13) میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر آمیختگی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل نرخ تزریق سیم بیشترین تأثیر و توان کمترین تأثیر را بر میزان آمیختگی دارد. شکل (14) تصویر سه‌بعدی تمامی پارامترها با توان ثابت 800 وات را نشان می‌دهد. طبق شکل با کاهش سرعت و افزایش نرخ تزریق سیم سطح پاسخ مربوط به آمیختگی کاهش می‌یابد. می‌توان معادله (4) را معادله رگرسیون برای رابطه بین آمیختگی روکش و پارامترهای فرایند روکش‌کاری لیزری تعریف کرد.

$$D = 1591 + (-0.928 * P) + (-19.7 * V) + (-126.125 * F) + (-0.006 * P * V) + (0.0375 * P * F) + (0.4 * V * F) + (0.0006875 * P^2) + (0.145 * V^2) + (4.875 * F^2) \quad (4)$$



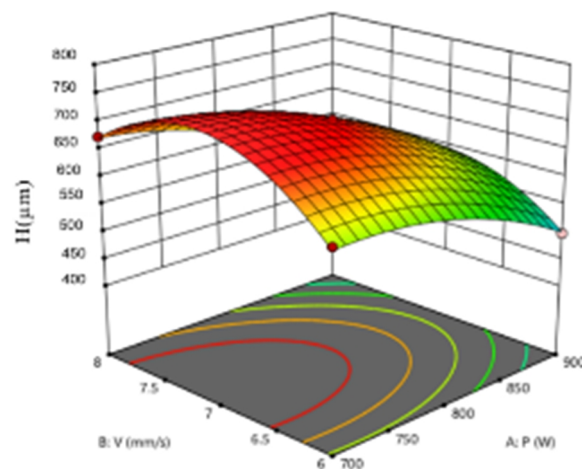
شکل 11- نمایش سه‌بعدی سطح پاسخ زاویه ترشوندگی با تغییرات در توان و سرعت روبش در نرخ تزریق سیم ثابت 75 میلی‌متر بر دقیقه.



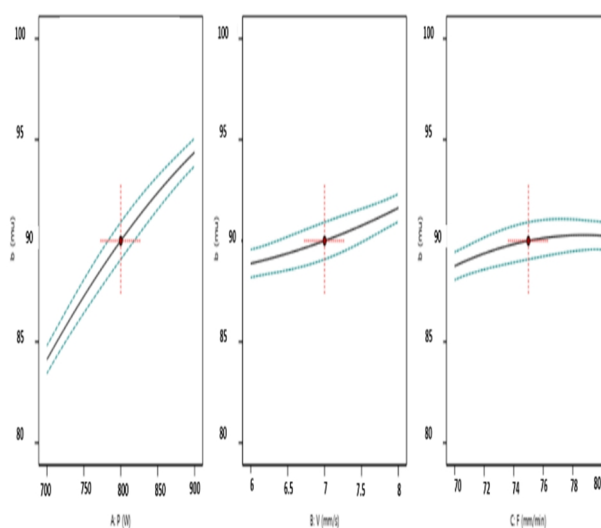
شکل 12- نمایش سه‌بعدی سطح پاسخ زاویه ترشوندگی برحسب نرخ تزریق و سرعت روبش در توان ثابت 800 وات.

شکل، سرعت روبش، بیشترین تأثیر و توان کمترین تأثیر را بر میزان زاویه ترشوندگی دارد. شکل (11) تصویر سه‌بعدی تمامی پارامترها با نرخ تزریق ثابت 75 میلی‌متر بر دقیقه را نشان می‌دهد. طبق شکل با کاهش سرعت روبش، سطح پاسخ مربوط به زاویه ترشوندگی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل تأثیر توان بر زاویه ترشوندگی ناچیز و قابل صرف‌نظر است. شکل (12) تصویر سه‌بعدی تمامی پارامترها با توان ثابت 800 وات را نشان می‌دهد. طبق شکل با افزایش نرخ تزریق سیم و کاهش سرعت روبش سطح پاسخ مربوط به زاویه ترشوندگی افزایش می‌یابد. می‌توان معادله (3) را معادله رگرسیون برای رابطه بین ارتفاع روکش و پارامترهای فرایند روکش‌کاری لیزری تعریف کرد.

$$Z = (-403.83) + (0.143 * P) + (3.525 * V) + (85.5 * F) + (0.0015 * P * V) + (-0.04 * P * F) + (-0.7 * V * F) \quad (3)$$



شکل 9- نمایش سه‌بعدی سطح پاسخ ارتفاع تک پاس



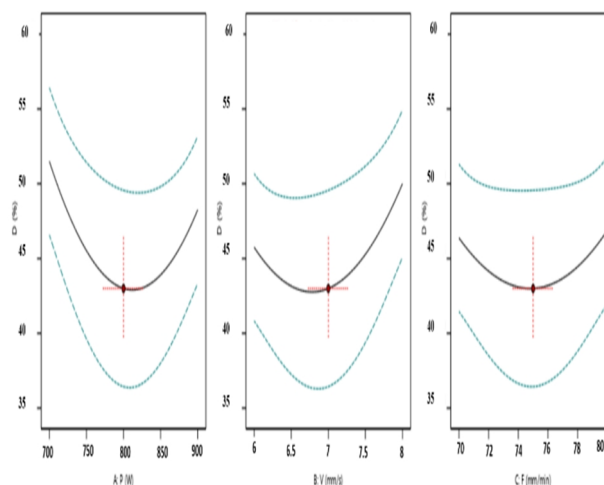
شکل 10- رابطه پارامترهای اصلی و زاویه ترشوندگی.

سرعت روبش منجر به افزایش انرژی ورودی به واحد سطح و افزایش عمق نفوذ در زیرلایه و افزایش آمیختگی روکش با زیرلایه می‌شود. سرعت روبش تأثیر معکوس بر عرض پاس دارد.

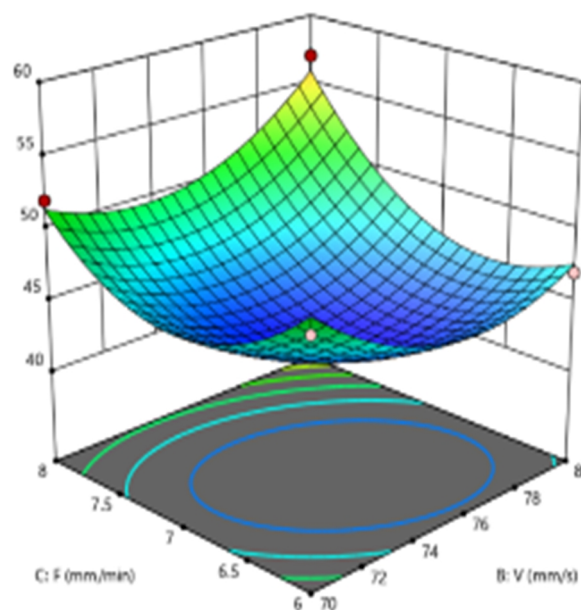
- تأثیر نرخ تغذیه سیم: افزایش نرخ تغذیه از 70 به 80 میلی‌متر بر دقیقه باعث افزایش 13% در ارتفاع و 4% در زاویه ترشوندگی، اما آمیختگی 19% کاهش یافت. افزایش نرخ تزریق سیم منجر به افزایش ارتفاع روکش و زاویه ترشوندگی می‌شود. این پارامتر کمترین تأثیر را بر عرض پاس دارد، اما بیشترین تأثیر را بر آمیختگی دارد.

منابع

- 1 - Zhu L, Xue P, Lan Q, Meng G, Ren Y, Yang Z, Xu P, Liu 7. " Recent research and development status of laser cladding A review. " Optics & Laser Technology. 2023.
- 2- Toyserkani, E., Khajepour, A. and Corbin, S.F., Laser cladding CRC press. 2024.
- 3- Silvello A, Perrone A. " Laser Cladding of Metals. " Cavaliere P, editor. Springer; 2022.
- 4-Borhani M, Shoja Razavi S, Kermani F, Erfan Manesh M, Barekat S, Naderi Samani H et al . Investigating the microstructure and hardness of 17-4PH steel and Stellite cladded by direct laser deposition process on 17-4PH steel substrate. JWSTI 2023; 8 (2) :69-81.
- 5-Shoja Razavi, S.R."Laser Cladding", Malek-Ashtar University of Technology Publications, 2019.
- 6-Hashemi S H, Vafaei R, Shoja-Razavi R. Microstructural characterization of the effect of energy density on direct laser deposition of stellite 6 on 316 stainless steel. JWSTI 2024; 9 (2) :129-141.
- 7- Chai Q, Wang Z, Fang C, Xing Y, Qiu X, Zhou Z " Numerical and experimental study on the profile of metal alloys formed on the inclined substrate by laser cladding. " Surface and Claddings Technology 2022 Sep 25.
- 8- Nabhani M, Razavi RS. Barekat M. " An empirical - statistical model for laser cladding of Ti - 6Al - 4V powder on Ti - 6Al - 4V substrate. " Optics & Laser Technology, 2022 Mar1.
- 9 - Zhang J, Zhang Q. Chen Z, Li D, Tong W, Yao J, Kovalenko V. " Experimental and statistical analyses of geometry characteristics of Inconel 718 laser clad layer with response surface methodology. " Journal of Laser Applications 2021.



شکل 13- رابطه پارامترهای اصلی با میزان آمیختگی تک پاس.



شکل 14- نمایش سه بعدی سطح پاسخ آمیختگی با تغییرات نرخ تزریق سیم و سرعت روبش.

4- نتیجه گیری

- تأثیر توان لیزر، افزایش توان از 700 به 900 وات منجر به افزایش 14% در عرض، 33% در ارتفاع و 3% در زاویه ترشوندگی شد. افزایش توان لیزر باعث افزایش ارتفاع، پهنای روکش، عمق نفوذ و زاویه ترشوندگی شد.

- تأثیر سرعت روبش: افزایش سرعت از 6 به 8 میلی‌متر بر ثانیه سبب کاهش 12% در عرض، 31% در ارتفاع و 15% در زاویه ترشوندگی، در حالی که عمق نفوذ 4% و آمیختگی 16% افزایش یافت. کاهش

YAG laser cladding of Co Cr - Mo alloy on y - TiAl substrate . " Journal of Optics and Laser Technology, 80, 145-152, 2016.

14- M. Ansari a, R. Shoja Razavi, M. Barekat, " An empirical - statistical model for coaxial laser cladding of NiCrAlY powder on Inconel 738 superalloy. " Journal of Optics and Laser Technology, 86,136- 144, 2016.

15-M.Erfanmanesh,H.Abdollah-Pour,H. Mohammadian -Semnani, R.Shoja - Razavi," An empirical- statistical model for laser cladding of WC - 12Co powder on AISI 321 stainless steel . " Journal of Optics and Laser Technology,97,180-186,2017.

16- Mohammadian - Semnani , R.Shoja - Razavi , " An empirical- statistical model for laser cladding of WC - 12Co powder on AISI 321 stainless steel . " Journal of Optics and Laser Technology, 97, 180-186, 2017.

10- Javid Y. " Multi - response optimization in laser cladding process of WC powder on Inconel 718. " CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2020 Nov 1; 31: 406-17.

11- E.Liu, Dr.F. Huang, F.Bao, Dr. Y. Xue, Dr. H. Wang, Prof. Y. Jin. "Microstructure and Electrochemical Corrosion Behaviors of Laser-Cladded 2205 Duplex Stainless Steel" National Center for Materials Service Safety University of Science and Technology Beijing 2020.

12-F. Huang, E. Liu, Y. Qin, Wang, Q. Jin, Y.; Wen, L. Chang, H. "A Study of Multi-Pass Laser-Cladding 2205 Duplex Stainless Steel Cladding: Microstructure, Electrochemical Corrosion Behavior, and Wear-Resistance", Properties Journal of Materials and Design, 2022.

13-M.Barekat , R.ShojaRazavi , A.Ghasemi , " Nd :