



پوشش دهی لیزری تیتانیوم کارباید / فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن به کمک روش سطح پاسخ

مریم فریدزاده، محمد حسین صادقی*، عارف مومنی

دانشکده مهندسی مکانیک، تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۳۰

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۳۱

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۳۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۳۰

کلمات کلیدی:

پوشش دهی لیزری

پیش‌نشانی

رقیق شدگی پوشش

تخلخل پوشش

خلاصه: پوشش دهی لیزری یکی از روش‌های اصلاح سطحی است که لیزر به عنوان منبع حرارتی موجب ذوب ماده روی سطح قطعه می‌گردد. با توجه به موضعی بودن حرارت ایجاد شده و به تبع آن کم‌شدن اعوجاج، کوچک‌بودن ناحیه متأثر از حرارت و استحکام مناسب زیرلایه با پوشش این روش کاربرد فراوانی دارد. پارامترهای موثر در این فرآیند شامل توان لیزر، سرعت روبشی لیزر، نوع ماده پوششی، فاصله کانونی لیزر، قطر لکه لیزر، عرض پالس و... می‌باشد که در اینجا سه مورد اول مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با انتخاب پارامترهای ورودی مناسب منجر به ایجاد سطحی با خواص مکانیکی مطلوب از جمله بالابودن مقاومت سایشی، مقاومت خوردگی، مقاومت در برابر اکسیداسیون در دمای بالا و سختی مناسب همراه با کمترین عیوبی مثل تخلخل، ترک می‌گردد. خروجی‌های فرآیند در اینجا شامل تخلخل، میزان ترک‌های عرضی و رقیق‌شدگی پوشش است. رویه سطح پاسخ به عنوان روشی جهت تحلیل خروجی‌های فرآیند پوشش دهی پودر کامپوزیتی تیتانیوم کارباید/ فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن بکارگرفته شد. در نهایت با یافتن مقادیر بهینه پارامترهای ورودی با استفاده از نرم‌افزار آماری مینی‌تب سطحی با کمترین میزان تخلخل، ترک عرضی و رقیق‌شدگی مناسب ایجاد می‌گردد. پوشش نهایی دارای کمترین عیوب با سختی ۶۰۶ ویکرز ۰/۱ که نسبت به زیرلایه با سختی ۱۵۰ ویکرز ۰/۱ حدود چهار برابر افزایش یافته است، می‌باشد.

۱- مقدمه

موادی با ابعاد کوچکتر است [۱]. فرآیند پوشش دهی لیزری روشی نوین است که در آن ذرات سرامیکی می‌تواند با توزیع همگونی روی فاز ماتریس قرار گیرد. لیزر به عنوان منبع حرارتی موجب ذوب ماده پوششی که بصورت سیم یا پودر روی سطح قطعه قرار گرفته است، می‌شود. از مزایای پوشش دهی لیزری می‌توان به سرعت بالای فرآیند، کنترل انرژی مورد نیاز، سرعت بالای حرارت دهی/خنک‌شدگی، غیرتماسی بودن فرآیند، امکان ارتباط موضعی با نواحی مختلفی از قطعه مورد نظر و میزان رقیق‌شدگی قابل کنترل آن اشاره کرد. از جمله لیزرهای رایج در پوشش دهی کربن‌دی‌اکسید و اندی‌یگ^۱ می‌باشد که در کاربردهای اولیه، نوع لیزر کربن‌دی‌اکسید و سپس

فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و در حوزه پالایشگاه‌ها کاربرد فراوانی دارد. مقاومت در برابر خوردگی بالا و استحکام مناسبی دارد اما خواص تریبولوژیکی پایین آن (مقاومت در برابر اصطکاک، سایش و روانکاری) موجب اختلال در برنامه‌های کاربردی صنعتی درازمدت آن شده است. پراکندگی ذرات سخت سرامیکی باعث بهبود مقاومت سایشی ماتریس می‌گردد. به طور معمول، پراکندگی سرامیک در ماتریس فلزی با استفاده از ذوب، ریخته‌گری یا متالورژی پودر است. توزیع غیرهمگون سرامیک جز مشکلات ذوب و ریخته‌گری معمول و متالورژی پودر نیز تنها برای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sadeghim@modares.ac.ir

1 Nd:YAG



با پیشرفت تکنولوژی لیزر، نوع ان‌دی‌یگ با توان بالای دیودی مورد توجه قرار گرفت؛ در این پژوهش نیز از لیزر ان‌دی‌یگ استفاده شده است.

تیتانیوم کارباید به عنوان ذرات سخت‌سرامیکی در فاز ماتریس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن در نظر گرفته شده است زیرا تیتانیوم کارباید دارای خواص تریبولوژیکی عالی، سختی بالا، نقطه ذوب بالا و پایداری ترمودینامیکی مناسب می‌باشد. تیتانیوم کارباید- فولاد جزء کامپوزیت‌های زمینه فلزی است که دارای سختی و چقرمگی بالا عالی است. با در نظر گرفتن دمای ذوب تیتانیوم کارباید (3067°C) و بالاتر بودن دمای آن نسبت به دمای بخار فولاد (2000°C) انتخاب پارامترهای لیزر بسیار حائز اهمیت است بگونه‌ای که ذرات تیتانیوم کارباید بتواند درون حوضچه مذاب به صورت ذوب‌نشده و همگون جهت افزایش سختی ایفای نقش کند. پارامترهای مختلف مانند سرعت لیزر، توان لیزر و ... با اثر گذاشتن روی میزان حرارت ورودی در حین فرآیند پوشش‌دهی لیزری، کیفیت خروجی متفاوتی را از سطح پوشش می‌دهد.

بطور کلی دو روش متفاوت برای پوشش‌دهی لیزری موجود است: فرآیند دو مرحله‌ای (پیش‌نشانی) که ابتدا ماده پوشش روی سطح قرار گرفته سپس لیزر تابیده شده تا ذوب صورت گیرد. فرآیند تک‌مرحله‌ای که همزمان با تابش اشعه لیزر، پودر به کمک نازل خروجی روی سطح پاشیده می‌شود. پوشش‌دهی لیزری به روش پیش‌نشانی دارای مزایایی است که آن را برای بسیاری از کاربردها مناسب می‌سازد. اولاً پوشش‌دهی لیزری با روش پیش‌نشانی ساده‌تر بوده و نیاز به تجهیزات جانبی در دستگاه لیزر ندارد، ثانیاً اینکه در هنگام تابش پرتوی لیزر، لایه‌ی پیش‌نشانی حرارت حاصل از اشعه‌ی لیزر را به مقدار زیادی جذب می‌کند و مانع ذوب بیش از حد زیرلایه می‌گردد [۲].

لیزر در بخش‌های مختلف صنعتی از جمله سوراخکاری، برشکاری، جوشکاری، تغییر شکل فلزات و پوشش‌دهی نقش بسزایی دارد [۳]. در مورد تاریخچه‌ی کاربردهای صنعتی لیزر مخصوصاً پوشش‌دهی لیزری تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است. مرادی و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۴] تاثیر فشار گاز و موقعیت نقطه کانونی لیزر بر کیفیت هندسی، صافی سطح و شیار برش در برشکاری لیزری قطعات تزریقی پلی‌کربنات به ضخامت $3/2$ میلی‌متر را با استفاده از لیزر کربن‌دی‌اکسید پیوسته‌ی کم‌توان بررسی کردند و دریافتند که

قرار گرفتن موقعیت نقطه کانونی لیزر در عمق قطعه، افزایش کیفیت برش لیزری را در پی دارد. کاهش موقعیت نقطه کانونی باعث کاهش سطح شیار برش و افزایش فشار گاز باعث کاهش زاویه مخروطی شیار برش می‌شود. در سال ۲۰۱۷ فرجی و همکاران [۵] مقایسه‌ای میان جوشکاری لیزری و هیبریدی لیزری- قوس الکتریکی انجام دادند. از لیزر ان‌دی‌یگ پیوسته با بیشترین توان ۲۰۰۰ وات و قوس الکتریکی با جریان ۳۵۰ آمپر استفاده شده است. علاوه بر آزمون جوشکاری لیزر، دو استراتژی برای جوشکاری هیبریدی بکار گرفته شد؛ اولین استراتژی توان پایین (۱۰۰ وات) به همراه قوس الکتریکی انرژی بالا و دومین استراتژی توان بالای لیزر (۲۰۰ وات) با قوس الکتریکی انرژی پایین در نظر گرفته شد. دومین استراتژی بهتر از اولی می‌باشد زیرا انرژی ورودی پایین‌تری برای نفوذ و جوش کامل مورد نیاز است که منطقه متاثر از حرارت^۱ کمتری ایجاد گردد. در جوشکاری لیزر به تنهایی، عمق نفوذ حتی در سرعت جوش پایین بسیار کم می‌باشد و جوش بخوبی شکل نمی‌گیرد.

لی و همکارانش [۶] در سال ۲۰۱۴ پوشش‌دهی لیزری نانو لوله کربنی- تیتانیوم کارباید را روی تیتانیوم انجام دادند و مقاومت سایشی پوشش با افزودن نانو لوله کربنی به صورت قابل توجهی افزایش یافت، همچنین ضریب اصطکاک نسبت به زیرلایه کاهش یافت. دلیل بهبود مقاومت سایشی را می‌توان به وجود فاز تیتانیوم کارباید نسبت داد چرا که افزایش سختی را دربردارد و با توزیع یکنواخت آن در پوشش، مقاومت سایشی بهبود یافته است. ماجومدار و همکارانش [۱] کامپوزیت سیلسیم کارباید- فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن با درصد حجمی سیلسیم کارباید ۵ و ۲۰ را به کمک فرآیند پوشش‌دهی با لیزر با توان ۷۰۰ وات، سرعت لیزر $7/5$ میلی‌متر بر ثانیه، نرخ تغذیه پودر ۶۰ میلی‌گرم بر ثانیه انجام دادند. در این پژوهش سختی به ترتیب برای کامپوزیت ۵ و ۲۰ درصد حجمی تیتانیوم کارباید- فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن به ترتیب ۳۴۰ و ۸۰۰ ویکرز افزایش یافت. همچنین بهبود مقاومت سایشی آن با آزمون روی سطح الماس دیده می‌شود؛ پوشش ۲۰ درصد حجمی سیلسیم کارباید بالاترین مقدار مقاومت سایشی را دارد که می‌توان دلیل آن را به درشت‌شدن دانه‌ها تعمیم داد. سانگ و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۶ روی پوشش‌دهی تنگستن کارباید- فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن روی فولاد زنگ

در این پژوهش نفوذ کامل ساختار متخلخل کروم کارباید^۷ به عنوان فاز تقویت‌کننده در پوشش با میزان رقیق‌شدگی کم کامپوزیت در زیرلایه مشاهده گردید. این پوشش عاری از هرگونه ترک با توزیع یکنواخت کروم کارباید با ۳۶٪ درصد حجمی می‌باشد. طبق آزمون فرسایش استاندارد سازمان بین‌المللی سنجش و مصالح ساختمانی آمریکا^۸ و مقایسه صورت‌گرفته میان پوشش فلزی اینکونل ۶۲۵^۹ و اینکونل ۱۶۲۵/ کروم کارباید^{۱۰} مشخص شد که در زوایای ۳۰° و ۹۰° مقاومت فرسایشی پوشش کامپوزیتی بالاتر از پوشش فلزی اینکونل ۶۲۵ می‌باشد. در سال ۲۰۱۸ مرادی و همکاران [۹] پوشش‌دهی لیزری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی^{۱۱} را به کمک روش سطح پاسخ^{۱۲} بررسی کردند. جنس زیرلایه فولاد مارتنزیت زنگ نزن با لیزر دیودی با بیشترین توان ۱۶۰۰ وات بکارگرفته شده‌است. توان لیزر، سرعت روبشی لیزر و موقعیت کانونی لیزر، پارامترهای متغیر ورودی و خروجی آن سختی، عمق و عرض لایه سخت‌شده می‌باشد. نتایج نشان داد که با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت نسبی لیزر، سختی و عمق لایه سختی افزایش می‌یابد، عرض لایه سخت‌شده نیز با کاهش توان لیزر و افزایش صفحه کانونی لیزر افزایش می‌یابد. همچنین مدل‌سازی ریاضی با روش رویه پاسخ سطح صورت‌گرفت و مشخص شد که اثر توان لیزر روی سختی، عمق و عرض لایه سختی بالاتر از سرعت روبشی لیزر و موقعیت صفحه کانونی آن است.

۱-۱ رقیق‌شدگی

کمترین میزان رقیق‌شدگی توسط پارامتری تحت عنوان d معرفی می‌گردد. از حیث ایجاد اتصال متالورژیکی مناسب میان پوشش و فلز پایه، حائز اهمیت است [۱۰].

$$d = \frac{a}{a+b} \quad (1)$$

ضریب رقیق‌شدگی (d) نسبت حجم قسمت نفوذی روکش در زیرلایه (a) به حجم کل حوضچه مذاب، که شامل روکش و قسمت نفوذی روکش در زیرلایه است، تعریف می‌شود. رابطه (۱) میزان کمی رقیق‌شدگی را نشان می‌دهد، شکل ۱ پارامترهای مورد استفاده در

نزن ۳۰۴ تحقیق کردند که در این آزمایش پوششی با ضخامت ۵۱۰ میکرومتر با کمترین عبوب حاصل گردید. در این پوشش کامپوزیتی با بالاترین درصد تنگستن کارباید (۲۴/۴٪) و بالاترین سختی ۵۵۰ ویکرز ۰/۵ که برابر سختی زیرلایه ۲۱۵/۱۸ ویکرز ۰/۵ را بدست آورد. همچنین میزان جرم کم‌شده با آزمون مقاومت سایشی حدود ۰/۷ میلی‌گرم است در حالیکه برای سطح زیرلایه بدون پوشش ۱۱/۹ میلی‌گرم بوده است. با بالا رفتن درصد تنگستن کارباید در این پوشش میزان ذرات ذوب‌نشده تنگستن کارباید افزایش یافته و سایشی از نوع چسبنده^۱ به ساینده^۲ تبدیل شده‌است. در سال ۲۰۱۶ آل مانگور و همکاران [۳]، اثر اندازه ذرات تیتانیوم کارباید و درصد حجمی آن را در خواص مکانیکی و ریزساختار حاصل‌شده از پوشش نانو کامپوزیت تیتانیوم کارباید- فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم‌کربن بررسی کردند. در این پژوهش مشخص شد که درجه فشرده‌سازی با ذرات کوچکتر تیتانیوم کارباید افزایش می‌یابد که آن هم به دلیل افزایش ترشوندگی بین تیتانیوم کارباید و فاز ماتریس می‌باشد. با افزایش درصد حجمی تیتانیوم کارباید سختی افزایش می‌یابد ولی ضریب اصطکاک و نرخ سایش به دلیل اثرات ترکیبی تقویت دانه‌ها و استحکام مرز دانه‌ها کاهش می‌یابد؛ اگرچه مقاومت سایشی ذرات کوچکتر تیتانیوم کارباید با درصد حجمی تیتانیوم کارباید ۱۵-۱۰٪ مقاومت سایشی بالاتری دارد. در سال ۲۰۱۶ گو و همکارانش [۷] پوشش‌دهی لیزری پودر آلیاژ آهن همراه با درصد متفاوتی از تیتانیوم را روی فولاد کم‌کربن انجام دادند و اثر تیتانیوم و میزان آن در خواص مکانیکی، ریزساختار، فازهای تشکیل‌دهنده پوشش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات درصد تیتانیوم روی مورفولوژی و ریزساختار پوشش اثرگذار است. همچنین توزیع سختی در میان لایه‌های پوششی بسیار پایدار است. جانیکی در سال ۲۰۱۷ [۸] پوشش کامپوزیت اینکونل ۶۲۵/ کروم کارباید^۳ روی اینکونل ۶۲۵^۴ با لیزر دیودی با پرتوی لیزر مستطیلی شکل به کمک نازل تزریق پودر خارج از محور ایجاد شد. مشخصات ریزساختار پوشش به کمک میکروسکوپ الکترونی^۵ و دستگاه پراش اشعه ایکس^۶ بررسی گردید.

7 Cr_3C_2
8 ASTM G76
9 Inconel625
10 Inconel625/ Cr_3C_2
11 AISI410
12 Response Surface Method

1 adhesive
2 abrasive
3 Inconel625/ Cr_3C_2
4 Inconel625
5 Scanning Electron Microscope
6 XRD

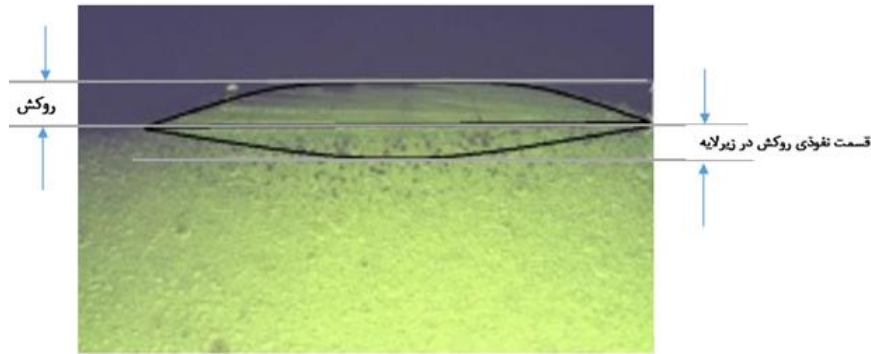


Fig. 1. Cross section of coated layer for evaluation of dilution with these parameters, the relative velocity 5 mm/sec, the laser power 150 W and the volume percentage of TiC in TiC/ 316 LSS 5%

شکل ۱: سطح مقطع لایه پوششی جهت سنجش رقیق‌شدگی با پارامترهای فرآیند پوشش‌دهی لیزری. سرعت نسبی لیزر ۵ میلی‌متر بر ثانیه، توان ۱۵۰ وات با ۵ درصد تیتانیوم کارباید در پوشش

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن

Table 1. Chemical composition of 316 L Stainless Steel

کربن (%)	کروم (%)	نیکل (%)	مولیبدن (%)	سیلیسیم (%)	منگنز (%)	گوگرد (%)	فسفر (%)
۰/۰۳	۱۸-۱۶	۱۴-۱۰	۳-۲	۱	۲	۰/۰۳	۰/۰۴۵

اتصال ماده پوشش در زیرلایه می‌شود. برای اجتناب از این نوع عیب بایستی نمونه‌ها قبل از انجام عمل پیش‌نشانی کاملاً تمیزکاری گردند. مورد دوم تخلخل هنگامی پدید می‌آید که پاس‌های دارای هم‌پوشانی کنار هم قرار گیرند. این نوع تخلخل بیشتر در مواردی است که میزان پودر مورد استفاده زیاد باشد [۱۱].

۱-۳ ترک

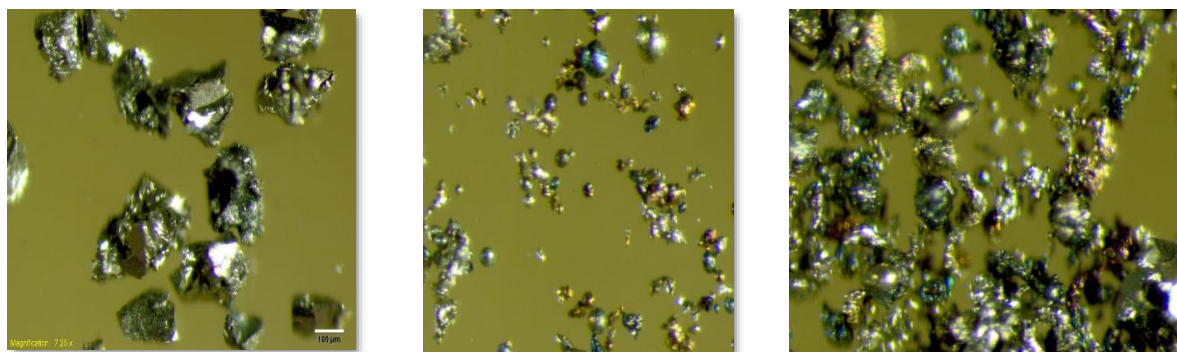
منشأ ایجاد ترک‌ها عبارت از تنش‌های حرارتی حاصل از گرادیان‌های حرارتی بالای ایجاد شده در اثر سرد شدن سریع قطعه می‌باشد. این نوع ترک‌ها را می‌توان با پیش‌گرم‌نمودن ماده‌ی زیرلایه کاهش داد. اختلاف در ضریب انبساط حرارتی ماده‌ی پوشش ایجاد شده و ماده‌ی زیرلایه نیز می‌تواند منجر به وقوع ترک گردد. مخصوصاً لایه‌هایی که دارای ذرات سخت و شکننده می‌باشند، مستعد برای ترک هستند. لایه‌های سرامیکی نیز در مورد ترک آسیب‌پذیر می‌باشند. دلیل این امر انعطاف‌پذیری محدود به همراه اختلاف بالای ضریب انبساط حرارتی آن در مقایسه با فلزات است.

با توجه به بررسی پژوهش‌های انجام شده تاکنون هیچ‌گونه بررسی

تعریف میزان رقیق‌شدن را نشان می‌دهد.

۱-۲ تخلخل

عوامل مختلفی می‌تواند موجب بروز تخلخل گردد. وجود حباب‌های گازی در حین فرآیند بر اثر حرارت وارد شده و محبوس شدن آن در لایه‌های منجمد شده تخلخل ایجاد می‌کند. این مسئله به علت بخارشدن چسب مورد استفاده در روش پیش‌نشانی ایجاد می‌شود. شایان ذکر است که اگر چسب مورد استفاده در حین فرآیند کاملاً تبخیر نگردد منجر به ایجاد ناخالصی در پوشش می‌گردد. همچنین بوجود آمدن این تخلخل و ناخالصی‌ها منجر به افزایش تنش‌های داخلی و ترک می‌گردد. اغلب ترک‌های داخلی از محل تخلخل آغاز می‌گردد. هنگام پیشروی عمل انجماد در جهت‌های مختلف برخی مناطق مذاب در میان این نواحی منجمد شده می‌مانند و بر اثر انقباض تنش کششی در لایه پوششی ایجاد می‌شود. دو نوع تخلخل دیگر نیز مربوط به منطقه فصل مشترک پوشش با زمینه است. اولین مورد وجود عیوب ریز مثل روغن یا آلودگی دیگر بر روی سطح زیرلایه است که تنش سطحی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و موجب اختلال در



تیتانیوم کارباید

فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم‌کربن

ترکیب تیتانیوم کارباید- فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم‌کربن

Fig. 2. The geometric shape of the powders applied in the experiments

شکل ۲: شکل هندسی پودر مورد استفاده در آزمایش

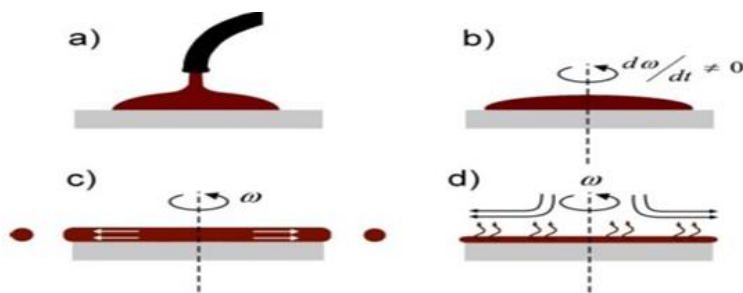


Fig. 3. A schematic of the pre-address process

شکل ۳: شماتیکی از فرآیند پیش‌نشانی

عرض پالس و فرکانس ثابت است؛ پس به عنوان پارامتر ورودی موثر در روند خروجی داده‌های سطح، اثرگذار نمی‌باشد. پارامترهای ورودی مورد نظر شامل سرعت روبشی لیزر، توان نسبی لیزر و میزان درصد حجمی تیتانیوم کارباید در کامپوزیت تیتانیوم کارباید- فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم‌کربن است. به کمک روش پاسخ سطح، پارامترهای موثر، چگونگی اثر آنها، تحلیل جدول آنالیز واریانس^۱ و تحلیل نمودارهای سطحی مشخص می‌شود. با توجه به درصد بالای پوشش‌دهی پارامترهای آزمایش با معادلات رگرسیون، رویه پاسخ سطح، روشی مناسب جهت تحلیل نتایج خروجی می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش دستاورد خوبی برای صنعت است چرا که اغلب قطعات صنعتی که در شرایط سایشی استفاده می‌شوند پس از مدتی کارکرد، خواص مکانیکی خود را از دست می‌دهند، بنابراین سالانه هزینه زیادی صرف

روی پوشش‌دهی لیزری تیتانیوم کارباید/ فولاد ۳۱۶ کم‌کربن^۲ روی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم‌کربن به روش پیش‌نشانی انجام نشده است. همچنین نحوه نشان دادن لایه پوشش از حیث یکنواختی روی زیرلایه نیز روشی نو و قابل اطمینان جهت لایه‌نشانی است. هدف از ایجاد پوشش کامپوزیتی تیتانیوم کارباید/ فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم‌کربن^۲، داشتن سطحی با کمترین میزان عیوب شامل ترک و تخلخل، استحکام کافی با زیرلایه و کمترین میزان رقیق‌شدگی است.

لذا یافتن بهینه پارامترهای ورودی در پوشش‌دهی لیزری مورد اهمیت می‌باشد که این پارامترها شامل توان لیزر، سرعت روبشی لیزر، فاصله نقطه کانونی از سطح قطعه کار، قطر پرتو لیزر و متغیرهای پیش‌نشانی و... است. از آنجایی که در این پژوهش، پارامترهایی نظیر

3 ANOVA

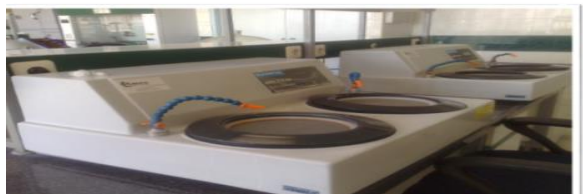
1 TiC/316LSS
2 TiC/316LSS



لایه پیش‌نشانی شده در زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن



زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن



دستگاه پولیش



هد لیزر نوع ان‌دی‌یگ^۱

^۱ Nd:Yag

Fig. 4. The required equipment for pre-placed laser cladding process. substrate of 316 LSS; pre-placed layer of 316 L SS; the head of Nd.Yag apparatus; polishing machine

شکل ۴: تجهیزات و مواد موردنیاز جهت پوشش‌دهی لیزری

جدول ۲: پارامترهای مستقل فرآیند پوشش‌دهی لیزری با سطوح طراحی

Table 2. The independent input parameters of laser cladding

متغیر	نماد	واحد	۱	۰	-۱
سرعت روبشی	V	mm/sec	۳	۵	۷
توان لیزری	P	W	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
درصد حجمی تیتانیوم کاربرد در تیتانیوم کاربرد/فولاد ۳۱۶ کم‌کربن	w%	-	۵	۱۰	۱۵

شکل هندسی کروی است، شکل ۲ هندسی پودرهای تیتانیوم کاربرد و فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن را نشان می‌دهد. چسب برای ایجاد لایه پیش‌نشانی نیز بکار می‌رود. مقدار ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱ میلی‌لیتر چسب شیشه (سیلیکات‌سدیم) در دمای حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد در دستگاه همزن مغناطیسی مخلوط می‌شوند تا بحالت همگون برسند. سپس ۲ گرم مخلوط دو پودر با درصد حجمی مشخص به داخل بشر اضافه می‌شود و دمای دستگاه تا حدود ۸۰ افزایش می‌یابد و عمل هم‌زدن ادامه می‌یابد تا مخلوط بصورت یکنواخت دربیاید. بلافاصله محلول توسط پیپت^۱ روی سطح زیرلایه

تعویض و جایگزینی قطعات فرسوده می‌شود، اصلاح سطحی موضعی یکی از روش‌های مناسب جهت ترمیم قطعات می‌باشد.

۲- آزمون تجربی

مواد اصلی مورد نیاز، زیرلایه‌ای از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن و پودرهای تیتانیوم کاربرد و فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن ماده پوشش است. ترکیب شیمیایی فولاد فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن در جدول ۱ گزارش شده است. اندازه پودر مورد استفاده از فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم‌کربن حدود متوسط ۵۰ میکرون به شکل نامنظم است. اندازه متوسط پودر تیتانیوم کاربرد ۶۰ میکرون با

1 pipettes

جدول ۳: تنظیمات آزمایشگاهی پارامترهای ورودی و خروجی پوشش‌دهی لیزری

Table 3. The experimental setting of input and output parameters in this laser cladding

شماره نمونه	توان (وات)	سرعت نسبی لیزر (میلی متر بر ثانیه)	درصد حجمی تیتانیوم کارباید در تیتانیوم کارباید/ فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن (%)	تخلخل (%)	ترک	میزان رقیق‌شدگی
۱	۱۰۰	۳	۱۰	۳/۴۹۹۵	۴	۶/۹۹۰۰
۲	۱۰۰	۷	۱۰	۴/۴۰۵۰	۷	۳/۵۹۲۰
۳	۲۰۰	۳	۱۰	۰/۵۸۷۵	۲	۱۲/۸۶۵
۴	۲۰۰	۷	۱۰	۳/۳۹۶۰	۶	۶/۱۳۷۵
۵	۱۵۰	۳	۵	۲/۳۲۱۰	۲	۸/۵۲۷۰
۶	۱۵۰	۷	۵	۴/۴۳۲۰	۴	۴/۲۵۱۰
۷	۱۵۰	۳	۱۵	۲/۳۷۷۰	۳	۸/۷۶۷۰
۸	۱۵۰	۷	۱۵	۴/۴۶۶۰	۹	۳/۸۱۳۰
۹	۱۰۰	۵	۵	۳/۹۳۳۰	۶	۵/۳۲۷۰
۱۰	۲۰۰	۵	۵	۲/۱۴۸۰	۴	۹/۸۵۳۰
۱۱	۱۰۰	۵	۱۵	۴/۱۴۴۵	۸	۵/۵۲۹۵
۱۲	۲۰۰	۵	۱۵	۱/۹۲۰۰	۶	۹/۶۸۵۰
۱۳	۱۵۰	۵	۱۰	۳/۱۲۶۰	۴	۶/۱۵۶۰
۱۴	۱۵۰	۵	۱۰	۳/۲۵۴۰	۵	۵/۸۳۲۰
۱۵	۱۵۰	۵	۱۰	۳/۴۳۲۰	۵	۶/۰۰۹

پوشش‌دهی از گاز محافظ بی‌اثر آرگون در اطراف قطعه کار استفاده می‌شود. پس از این مرحله نمونه پوشش داده شده بمدت ۲۴ ساعت در هوای محیط خنک می‌گردد. جهت جلوگیری از ایجاد تخلخل به منظور خارج نمودن مواد فرار از قبیل چسب و آب در دمای 90°C بمدت شش ساعت در کوره حرارت داده می‌شود. شکل ۳ شماتیکی از مراحل فرآیند پیش‌نشست مخلوط پودری را نشان می‌دهد.

از تجهیزات موردنیاز می‌توان به دستگاه لیزر، تجهیزات مربوط به فرآیند پیش‌نشانی، تجهیزات برش، مانت‌کردن و متالوگرافی نمونه‌ها اشاره کرد. لیزر مورد استفاده در اینجا نوع جامد ان‌دی‌یگ^۱ با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و توان متوسط ۷۰۰ وات، بازه فرکانسی ۱ تا ۱۰۰۰ هرتز^۲، عرض پالس ۲۵-۲۵ میلی‌ثانیه، توان ورودی ۲۰ کیلو وات، عرض باریک ۰/۴ میلی‌متر، توان قله ۱۰ کیلو وات و موقعیت نقطه کانونی ۵ میلی‌متر است. دستگاه لیزر دارای میز متحرکی با ۴ درجه آزادی با دقت ۱ میکرومتر است که از آن برای کنترل حرکت قطعه کار و سرعت فرآیند پوشش‌دهی استفاده شده است. برای جلوگیری از ورود گازهای فعال مانند اکسیژن موجود در هوا هنگام فرآیند

که در حال چرخش است، ریخته می‌شود تا ضخامت موردنظر حاصل شود. پس از این مرحله نمونه پوشش داده شده بمدت ۲۴ ساعت در هوای محیط خنک می‌گردد. جهت جلوگیری از ایجاد تخلخل به منظور خارج نمودن مواد فرار از قبیل چسب و آب در دمای 90°C بمدت شش ساعت در کوره حرارت داده می‌شود. شکل ۳ شماتیکی از مراحل فرآیند پیش‌نشست مخلوط پودری را نشان می‌دهد.

از تجهیزات موردنیاز می‌توان به دستگاه لیزر، تجهیزات مربوط به فرآیند پیش‌نشانی، تجهیزات برش، مانت‌کردن و متالوگرافی نمونه‌ها اشاره کرد. لیزر مورد استفاده در اینجا نوع جامد ان‌دی‌یگ^۱ با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و توان متوسط ۷۰۰ وات، بازه فرکانسی ۱ تا ۱۰۰۰ هرتز^۲، عرض پالس ۲۵-۲۵ میلی‌ثانیه، توان ورودی ۲۰ کیلو وات، عرض باریک ۰/۴ میلی‌متر، توان قله ۱۰ کیلو وات و موقعیت نقطه کانونی ۵ میلی‌متر است. دستگاه لیزر دارای میز متحرکی با ۴ درجه آزادی با دقت ۱ میکرومتر است که از آن برای کنترل حرکت قطعه کار و سرعت فرآیند پوشش‌دهی استفاده شده است. برای جلوگیری از ورود گازهای فعال مانند اکسیژن موجود در هوا هنگام فرآیند

1 Nd:YAG

2 Hz

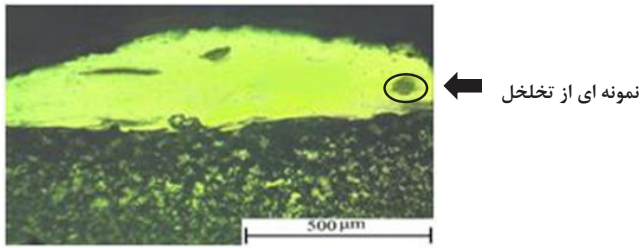


Fig. 6. The cross section of coated layer with the laser relative velocity 7 mm/sec and the laser power 100 W

شکل ۶: سطح مقطع پوشش کامپوزیت با سرعت ۷ میلی‌متر بر ثانیه و توان ۱۰۰ وات

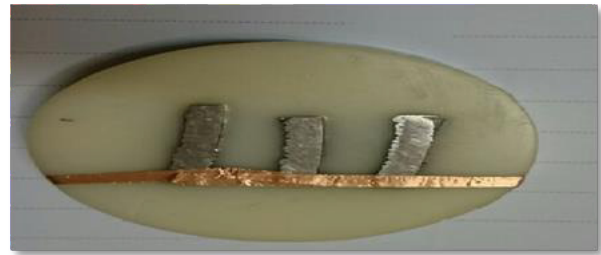


Fig. 5. The cross-section of mounted coated layer for evaluation of its quality

شکل ۵: سطح مقطع پوشش‌های مانت‌شده جهت بررسی خواص پوشش

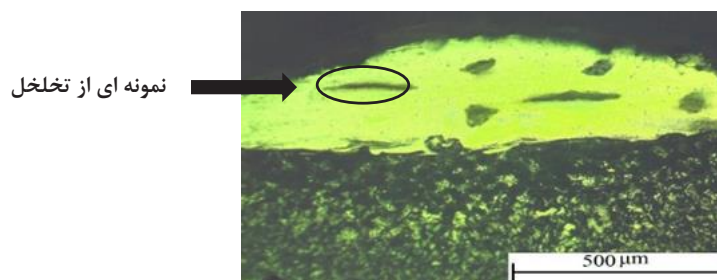


Fig. 7. The cross section of coated layer with the laser relative velocity 7 mm/sec and the laser power 200 W

شکل ۷: سطح مقطع پوشش کامپوزیت با سرعت ۷ میلی‌متر بر ثانیه و توان ۲۰۰ وات

آنالیز واریانس مقادیر احتمال^۳ معیاری بر میزان حساسیت آن متغیر در نتایج خروجی می‌باشد. در مفهوم آماری مقدار احتمال هر چقدر کمتر باشد اثرگذاری آن بالاتر است؛ متغیرهای ورودی موثر دارای مقادیر احتمال کمتر از ۰/۰۵ می‌باشند. میزان تفاوت ضریب تعیین^۴ نیز دقت انطباق مدل ریاضی در معادلات رگرسیون بر آزمون‌های تجربی را نشان می‌دهد، معیار قبولی آزمایش ۰/۷۵ است و هر چه به نزدیکتر باشد مدل رگرسیون دقت بالاتری دارد. با تجزیه و تحلیل آماری داده‌های بدست آمده می‌توان روابط منطقی میان متغیرهای ورودی و خروجی یافت. به کمک ماژول طراحی آزمایش^۵ و گزینه بهینه‌سازی در مینی‌تب ۱۷ پارامترهای ورودی مناسبی برای ایجاد پوششی مطلوب انتخاب می‌گردد [۱۲].

۳-۲ تخلخل

میزان تخلخل پوشش از روی تحلیل تصاویر متالورژیکی

نمونه‌ها توسط خمیر الماسه‌ی سیلیکون کارباید. شکل ۵ نمونه‌ای از سطح مقطع پوشش کامپوزیتی متالوگرافی شده جهت مشاهده ساختار میکروسکوپی به کمک میکروسکوپ‌های نوری الیمپوس^۱ می‌باشد. جدول ۲ متغیرهای ورودی فرآیند را با مقادیر در نظر گرفته شده و جدول ۳ تنظیمات آزمایشگاهی پارامترهای ورودی و خروجی برای تحلیل در نرم افزار مینی‌تب ۱۷ را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ آنالیز واریانس

ترک‌های عرضی، میزان تخلخل و رقیق‌شدگی پوشش به عنوان پارامترهای ارزیابی کیفیت سطح می‌باشند. آنالیز واریانس^۲ به کمک نرم‌افزار آماری مینی‌تب ۱۷ جهت تحلیل کمی متغیرهای ورودی موثر، بکار گرفته شد. با کنترل پارامترهای ورودی می‌توان پوشش مناسبی برای داشتن کیفیت سطح مطلوب ایجاد کرد. در جداول

3 P- Value
4 R-Sq
5 DOE(Design Of Experiment)

1 OLYMPUS
2 ANOVA(Analysis Of Variance)

جدول ۴: آنالیز واریانس برای میزان تخلخل
Table 4. The variance analysis of porosity

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات	درجه آزادی	عبارت‌ها
۰/۰۰۰	۱۲۰/۱۰	۱/۹۰۱۴۰	۱۷/۱۱۲۶	۹	مدل
۰/۰۰۰	۳۳۰/۳۹	۵/۲۳۰۴۰	۱۵/۶۹۱۲	۳	عبارت‌های خطی
۰/۰۰۰	۴۹۴/۵۳	۷/۸۲۸۹۲	۷/۸۲۸۹	۱	سرعت روبشی لیزر
۰/۰۰۰	۴۹۶/۵۹	۷/۸۶۱۶۰	۷/۸۶۱۶	۱	توان نسبی لیزر
۰/۰۱۵	۹/۸۵	۰/۱۵۵۸۷	۰/۴۶۷۶	۳	عبارت‌های توان دو
۰/۰۰۴	۲۵/۵۰	۰/۴۰۳۶۷	۰/۴۰۳۷	۱	توان *توان
۰/۰۰۳	۲۰/۰۸	۰/۳۱۷۹۲	۰/۹۵۳۸	۳	اثر متقابل دو عبارت
۰/۰۰۱	۵۷/۱۹	۰/۹۰۵۳۵	۰/۹۰۵۴	۱	سرعت نسبی لیزر * توان
		۰/۰۱۵۸۳	۰/۰۷۹۲	۵	خطا
۰/۷۴۴	۰/۴۵	۰/۰۱۰۶۴	۰/۰۳۱۹	۳	عدم تطابق
		۰/۰۲۳۶۲	۰/۰۴۷۲	۲	خطای خالص
			۱۷/۱۹۱۷	۱۴	کل
۹۹/۰۴٪ ضریب تعیین		۹۸/۶۶٪ ضریب تعیین تعدیل شده			

داشته شده است. همانطور که در شکل مشهود است، میزان تخلخل با افزایش توان لیزر کاهش می‌یابد زیرا انرژی حرارتی وارد شده به قطعه کار بیشتر می‌شود و امکان دفع حفره‌ها بیشتر می‌شود. از طرف دیگر با کاهش سرعت نسبی لیزر فرصت بیشتری در اختیار تخلخل و حفره‌ها قرار می‌گیرد تا از حوضچه مذاب خارج شوند و موجب کم‌شدن میزان تخلخل می‌گردد. اما بازدهی فرآیند با کاهش سرعت نسبی لیزر کاهش می‌یابد. همچنین بالا بودن مقادیر توان لیزر باعث شکسته‌شدن و ذوب‌شدن ذرات تیتانیوم کارباید می‌شود که این موضوع باعث افت مقاومت سایشی می‌شود لذا با بررسی شکل ۸ که نمودار برهم کنش توان و سرعت لیزر است می‌توان مقادیر مناسب جهت افزایش بهره‌وری فرآیند را دریافت کرد. لازم به ذکر است که پارامتر سوم (درصد حجمی تیتانیوم کارباید در پوشش) در حالت متوسط قرار دارد.

شایان ذکر است در شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات کمی درصد تخلخل با توان و سرعت نسبی لیزر مختلف فارغ از درصد تیتانیوم کارباید در کامپوزیت نشان داده شده است؛ چرا که طبق جدول آنالیز واریانس

گرفته‌شده از میکروسکوپ نوری به کمک نرم‌افزار آنالیز تصویری فتولاین با محاسبه درصد تخلخل سطح مقطع پوشش بدست می‌آید. طبق جدول ۴، آنالیز واریانس میزان تخلخل پوشش سرعت، توان، اثر مرتبه دو توان لیزر و برهم کنش توان و سرعت روبشی لیزر از عوامل موثر در میزان تخلخل می‌باشد. تفاوت ضریب‌تعیین تعدیل‌شده^۱ نشان‌دهنده تطابق مدل ریاضی بر داده‌های تجربی می‌باشد که نزدیک‌بودن آن به ۱، نشان‌دهنده صحت این مدل ریاضی روی داده‌های تجربی است.

میزان تخلخل ایجادشده در ترکیب‌های مختلف پارامترهای فرآیند مورد ارزیابی قرارگرفت. پارامترهای مورد ارزیابی در این پژوهش، سرعت نسبی لیزر، توان لیزر و درصد حجمی تیتانیوم کارباید در تیتانیوم کارباید/ فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم‌کربن است. جهت بررسی اثر توان لیزر روی میزان تخلخل در شکل ۶ و ۷، سرعت نسبی لیزر ۷ میلی‌متر بر ثانیه، ۱۰ درصد حجمی تیتانیوم کارباید در پوشش با دو توان ۱۰۰، ۲۰۰ وات بوده و پارامترهای دیگر ثابت نگه

1 R-Sq(adj)

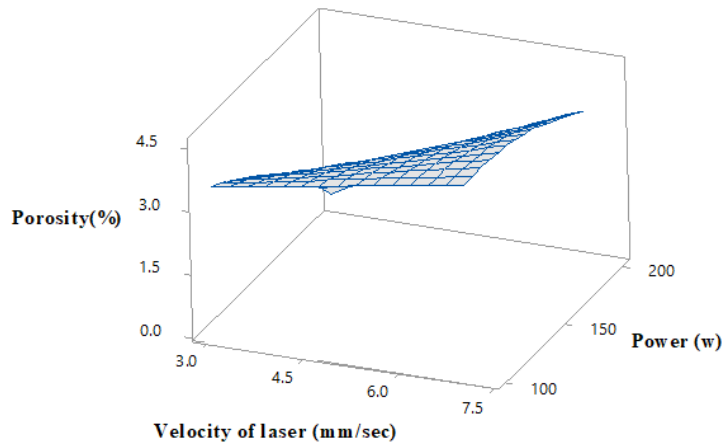
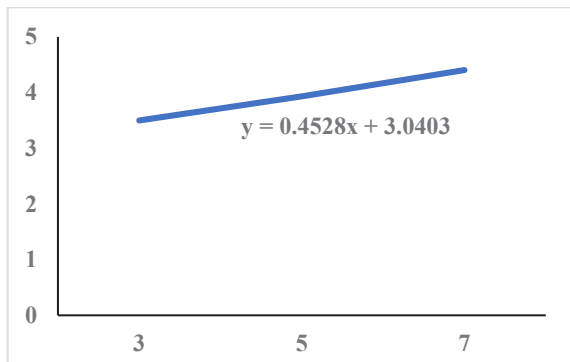


Fig. 8. The surface plot of laser relative velocity and laser power in porosity

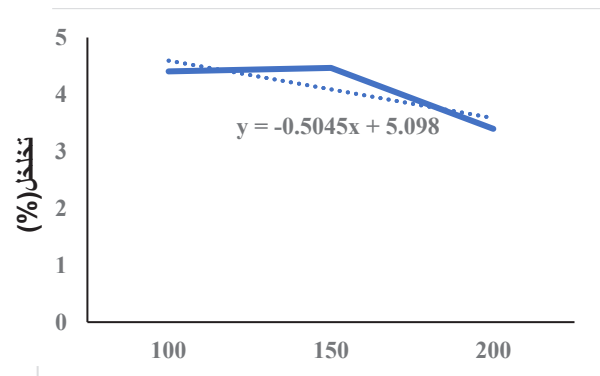
شکل ۸: منحنی سطح سرعت نسبی لیزر (میلی‌متر بر ثانیه) و توان متوسط لیزر (وات) در میزان درصد تخلخل



سرعت نسبی لیزر (میلی‌متر بر ثانیه)

Fig. 10. The quantitative variation of porosity based on laser relative velocity with having the laser power 100 W

شکل ۱۰: درصد تغییرات کمی تخلخل بر حسب تغییرات سرعت نسبی لیزر با توان متوسط ثابت ۱۰۰ وات



توان لیزر (وات)

Fig. 9. The quantitative variation of porosity based on the laser power with having the laser relative velocity 7 mm/sec

شکل ۹: تغییرات کمی درصد تخلخل در پوشش بر حسب توان لیزر با سرعت نسبی ثابت لیزر ۷ میلی‌متر بر ثانیه

فرآیند پوشش‌دهی لیزری است. رقیق‌شدن ماده پوشش همانند واردشدن ماده‌ی زمینه در پوشش ایجاد شده می‌باشد که موجب افت خواص مکانیکی مطلوب می‌گردد. بنابراین کنترل رقیق‌شدگی امری ضروری است. برای اثر پارامترهای فرآیند پوشش‌دهی با لیزر بر روی میزان رقیق‌شدگی پوشش جدول ۵ آنالیز واریانس آن بررسی می‌گردد.

توان و سرعت لیزر پارامترهای موثر در میزان رقیق‌شدگی پوشش هستند. همانطور که در آنالیز واریانس مشخص است پارامترهایی با

میزان تخلخل درصد حجمی تیتانیوم کاربرد تأثیری در میزان تخلخل ندارد. همانطور که دیده می‌شود کاهش تخلخل در هنگام افزایش توان لیزر تا یک حدی ادامه خواهد داشت. همچنین توان بالا منجر به افزایش میزان ذوب از زیرلایه و در نتیجه منجر به افزایش میزان رقیق‌شدن پوشش می‌گردد که همین امر افت خواص مکانیکی پوشش را دربردارد.

۳-۲ رقیق‌شدگی پوشش

میزان رقیق‌شدن پوشش از پارامترهای مهم در تعیین کیفیت

جدول ۵: آنالیز واریانس برای میزان رقیق‌شدگی
Table 5. The variance analysis of dilution

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات	درجه آزادی	عبارت‌ها
۰/۰۰۰	۳۲۹/۹۶	۹/۷۴۶۸	۸۷/۷۲۱۳	۹	مدل
۰/۰۰۰	۸۹۴/۸۷	۲۶/۴۳۳۹	۷۹/۳۰۱۷	۳	عبارت‌های خطی
۰/۰۰۰	۱۵۱۱/۷۴	۴۴/۶۵۶۰	۴۴/۶۵۶۰	۱	سرعت روبشی لیزر
۰/۰۰۰	۱۱۷۲/۷۵	۳۴/۶۴۲۴	۳۴/۶۴۲۴	۱	توان نسبی لیزر
۰/۷۵۰	۰/۱۱	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱	درصد حجمی تیتانیوم کارباید در تیتانیوم کارباید/ فولاد ۳۱۶ کم‌کربن
۰/۰۰۰	۷۰/۰۱	۲/۰۶۸۰	۶/۲۰۳۹	۳	عبارت‌های توان دو
۰/۰۰۰	۲۰۲/۰۲	۵/۹۶۷۶	۵/۹۶۷۶	۱	توان * توان
۰/۰۱۴	۱۳/۴۷	۰/۳۹۸۰	۰/۳۹۸۰	۱	درصد حجمی تیتانیوم کارباید * تیتانیوم کارباید
۰/۰۰۲	۲۵/۰۰	۰/۷۳۸۵	۲/۲۱۵۶	۳	اثر متقابل دوعبارتی
۰/۰۰۰	۶۹/۹۵	۲/۰۶۶۴	۲/۰۶۶۴	۱	سرعت نسبی لیزر * توان
		۰/۰۲۹۵	۰/۱۴۷۷	۵	خطا
۰/۴۸۴	۱/۲۰	۰/۰۳۱۷	۰/۰۹۵۱	۳	عدم تطابق
		۰/۰۲۶۳	۰/۰۵۲۶	۲	خطای خالص
			۸۷/۸۶۹۰	۱۴	کل
ضریب تعیین ۹۹/۶۶%		ضریب تعیین تعدیل شده ۹۹/۴۱%			

افزایش می‌یابد و منجر به رقیق‌شدگی بیشتر می‌شود. همچنین با کاهش سرعت نسبی لیزر، زمان تعامل لیزر با سطح پوشش بیشتر شده و این سطح در معرض حرارت بیشتری قرار می‌گیرد؛ بنابراین میزان ذوب‌شدگی افزایش یافته و رقیق‌شدگی افزایش می‌یابد.

۳-۳ ترک

میزان انرژی حرارتی دریافت‌شده توسط قطعه‌کار در روکش‌کاری لیزری ارتباطی مستقیم با تعداد ترک‌های ایجادشده دارد. پارامترهای لیزری که بر روی میزان انرژی دریافتی قطعه تأثیر دارند عبارتند از توان متوسط لیزر، سرعت حرکت لیزر. تشکیل ترک در لایه‌های پوشش عمدتاً بدلیل تنش‌های حرارتی بالای ایجادشده در اثر گرادیان حرارتی بالای حاصل از فرآیند سرد شدن و تفاوت بین ضرایب انبساط حرارتی پودر و زیرلایه می‌باشد. با توجه به اینکه تیتانیوم کارباید

مقدار احتمال^۱ کمتر از ۰/۰۵ در نتایج خروجی موثر است. مقدار تفاوت ضریب‌تعیین^۲ نشان‌دهنده تطابق مدل ریاضی با داده‌های تجربی است و هر چه به ۱ نزدیک باشد این مدل ریاضی قابلیت پوشش‌دهی بهتری از داده‌های تجربی را دارد که در اینجا برابر با ۹۹/۰۹۸ می‌باشد. در شکل ۱۱ می‌توان حوزه مناسب سرعت نسبی لیزر، توان لیزر در کامپوزیت تیتانیوم کارباید فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم‌کربن را برای داشتن کمترین رقیق‌شدگی یافت. همانطور که دیده می‌شود با افزایش توان لیزر، میزان انرژی دریافتی توسط سطح قطعه کار افزایش می‌یابد و عمق نواحی ذوب‌شده در زیرلایه افزایش می‌یابد که این امر افزایش میزان رقیق‌شدن پوشش را در پی دارد؛ دلیل این امر را به این صورت می‌توان توجیه کرد که با حرارت‌دهی مواد، میزان جذب پرتوی لیزر افزایش می‌یابد در نتیجه گرمای ایجادشده در قطعه

1 P-value
2 R-Sq

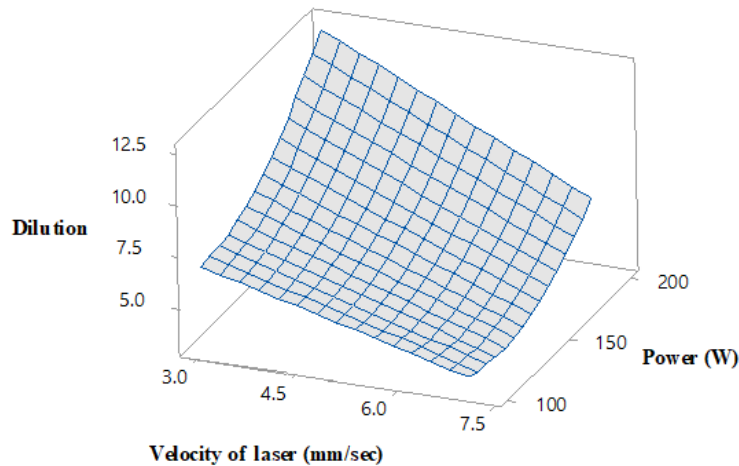
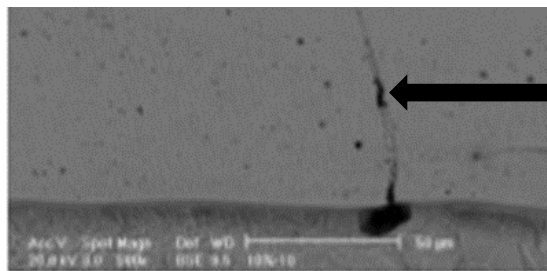


Fig. 11. The surface plot of laser relative velocity and laser power in dilution

شکل ۱۱: منحنی سطح سرعت نسبی لیزر (میلی‌متر بر ثانیه) و توان متوسط لیزر (وات) در میزان درصد تخلخل



ترک

Fig. 12. The cross section of coated layer of TiC/ 316 LSS with the laser relative velocity 5 mm/sec, 5% volume weight of TiC and laser power 150 W with the magnitude of 500

شکل ۱۲: سطح مقطع پوشش کامپوزیتی تیتانیوم کارباید- فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن با مقادیر سرعت نسبی لیزر ۵ میلی‌متر بر ثانیه، ۵ درصد حجمی تیتانیوم کارباید در کامپوزیت و توان ۱۵۰ وات با بزرگنمایی ۵۰۰

پوشش ایجاد شده شمارش می‌شود. جدول ۶ آنالیز واریانس مربوط به میزان ترک را نشان می‌دهد.

کاهش تعداد ترک‌ها در اثر تغییر پارامترهای ورودی به دو دلیل اصلی می‌باشد: کاهش سرعت سرد شدن و افزایش رقیق شدن پوشش توسط مواد زیرلایه. کاهش سرعت سرد شدن باعث کاهش تنش‌های پسماند ایجاد شده در لایه‌ی پوشش می‌شود و از این رو باعث کاهش میزان ترک‌ها می‌شود. همانطور که در جدول ۶ دیده می‌شود سرعت، توان و درصد حجمی تیتانیوم کارباید در کامپوزیت جزء پارامترهای موثر در میزان ترک می‌باشند. با افزایش توان متوسط لیزر، سطح در معرض حرارت بیشتری قرار می‌گیرد و این حرارت ممکن است در برخی جاها موجب ذوب تیتانیوم کارباید گردد. لذا یکی از عوامل موثر در ایجاد ترک وجود فاز سخت تیتانیوم کارباید است و با کاهش

دارای ضریب انبساط حرارتی $\frac{1}{C} \cdot 0.7$ و ضریب انبساط حرارتی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن در محدوده $\frac{1}{C} \cdot 1/8 - 1/6$ است لذا با افزایش درجه حرارت، تیتانیوم کارباید قابلیت انبساط به اندازه فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن را ندارد بنابراین ایجاد ترک در حین فرآیند طبیعی است لذا می‌توان با انتخاب پارامترهای ورودی مناسب این ترک‌ها را به حداقل رساند. شکل ۱۲ نمونه‌ای از ترک ایجاد شده را روی سطح پوشش کامپوزیتی تیتانیوم کارباید- فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن نشان می‌دهد.

جهت بررسی اثر پارامترهای لیزری بر روی تعداد ترک‌های بوجود آمده در پوشش، سطح مقطع پوشش را زیر میکروسکوپ قرار داده و تعداد ترک‌های عرضی ایجاد شده در طول ۳۰ میلی‌متر از

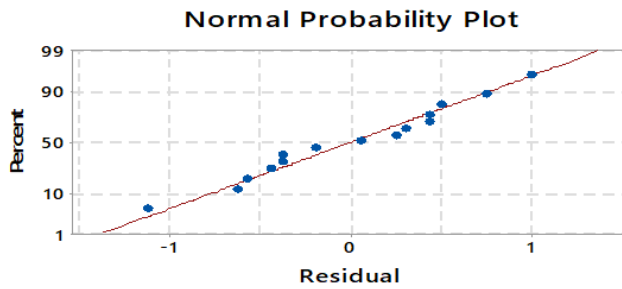


Fig. 15. The residual plot of crack

شکل ۱۵: نمودار باقیمانده (نرمال) برای تعداد ترک پوشش

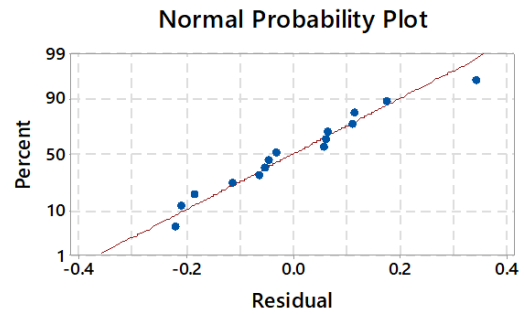


Fig. 14. The residual plot of dilution

شکل ۱۴: نمودار باقیمانده (نرمال) برای میزان رقیق‌شدگی پوشش

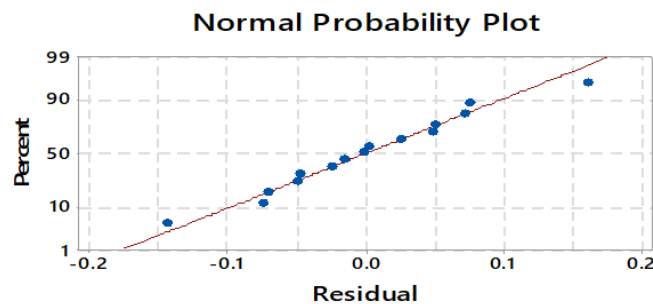


Fig. 16. The residual plot of porosity

شکل ۱۶: نمودار باقیمانده (نرمال) برای تخلخل پوشش

جدول ۷: پارامترهای بهینه جهت ایجاد پوشش مناسب

Table 7. The optimal parameters for the final coated layer

میزان رقیق‌شدگی	تخلخل	ترک	نتیجه	پارامترهای بهینه	سرعت نسبی لیزر (میلی‌متر بر ثانیه)
۸/۷۶۳۹۸	۲/۲۱۸۵۷	۱/۵۶۰۹ ۲	پیش‌بینی	درصد حجمی تیتانیوم کارباید در تیتانیوم کارباید/ فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم‌کربن	توان (وات)
۷/۸۱	۲/۶	۲	آزمایش	۸/۷۳۷۴	۱۵۴/۵۴
۱۰/۸۸	-۱۴/۶۷	۲۲	خطا (/.)		

می‌دهد؛ بنابراین مدل رگرسیون استخراج نهایی، مدلی مناسب برای پیش‌بینی و بررسی اثرات پارامتر نیز می‌باشد.

۳-۵ ایجاد پوشش مناسب

پوشش نهایی طبق بهینه‌سازی موجود در نرم‌افزار انجام شد و جدول ۷ نتایج بهینه‌سازی همراه با آزمون تجربی با درصد خطای

ایجاد ترک در پوشش می‌گردد.

۳-۴ نمودار باقیمانده

نمودار باقیمانده برای سه خروجی کیفیت سطح که شامل تخلخل، رقیق‌شدگی و ترک است در شکل ۱۴، ۱۵، و ۱۶ نشان داده شده است. طبق این نمودارها در مفاهیم آماری مشخص می‌شود که باقیمانده در اطراف خط مورب پراکنده و یک توزیع نرمال را نمایش

جدول ۸: آنالیز شیمیایی فاز ماتریس پوشش

Table 8. The chemical composition of matrix phase of coated layer

عناصر موجود	سری	غلظت غیرمعمول در درصد وزنی (%)	غلظت معمول در درصد وزنی (%)	درصد وزنی اتمی (%)
کربن	کا	۱/۵۶	۱/۵۲	۶/۷۰
سیلیکون	کا	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۸۲
کروم	کا	۷/۹۸	۷/۷۶	۷/۹۲
آهن	کا	۸۹/۶۷	۸۲/۳۳	۷۸/۲۴
نیکل	کا	۵/۶۱	۵/۴۶	۴/۹۳
مولیبدن	ال	۲/۵۷	۲/۵۰	۱/۳۸
	درصد کلی	۱۰۰/۸		

جدول ۱۰: آنالیز عناصر شیمیایی ناحیه ۵-B نشان داده شده در شکل ۱۲

Table 10. The chemical composition of 5-B area in Fig. 12

عناصر موجود	سری	غلظت غیرمعمول در درصد وزنی (%)	غلظت معمول در درصد وزنی (%)	درصد وزنی اتمی (%)
کربن	کا	۵/۳۲	۵/۳۳	۸/۵۰
سیلیکون	کا	۴/۷۷	۴/۸۳	۸/۵۳
تیتانیوم	کا	۴/۹۳	۴/۹۹	۵/۱۷
کروم	کا	۲۷/۵۳	۲۷/۸۵	۲۶/۵۷
منگنز	کا	۲/۳۳	۲/۳۶	۲/۱۳
آهن	کا	۵۷/۹۹	۵۸/۶۵	۵۲/۱۰
	درصد کلی	۹۸/۹		

جدول ۹: آنالیز عناصر شیمیایی ناحیه ۵-A نشان داده شده در شکل ۱۲

Table 9. The chemical composition of 5-A area in Fig. 12

عناصر موجود	سری	غلظت غیرمعمول در درصد وزنی (%)	غلظت معمول در درصد وزنی (%)	درصد وزنی اتمی (%)
کربن	کا	۳/۷۱	۳/۰۱	۱۰/۹۲
سیلیکون	کا	۱۰/۶۷	۱۱/۸۵	۱۸/۴۱
کروم	کا	۴/۶۰	۴/۵۵	۷/۹۲
آهن	کا	۵۷/۱۴	۶۳/۴۵	۷۸/۲۴
نیکل	کا	۸/۶۲	۹/۵۷	۴/۹۳
مولیبدن	کا	۸/۶۲	۹/۵۷	۱/۳۸
	درصد کلی	۱۰۰/۰		

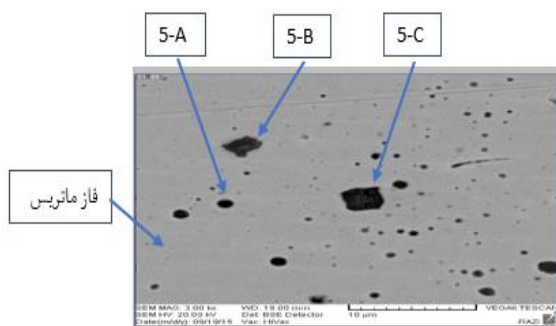


Fig. 17. The cross section of coated layer with optimal parameters. laser power 163 W, laser relative velocity 3 mm/sec and volume weigh of TiC 8.7374%

شکل ۱۷: سطح مقطع پوشش با پارامترهای بهینه (توان ۱۵۵ وات، سرعت نسبی لیزر ۳ میلی متر بر ثانیه با ۸/۷۳۷۴ درصد حجمی تیتانیوم کارباید در کامپوزیت تیتانیوم کارباید- فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن)

۴- نتیجه گیری

در این مقاله پوشش دهی لیزری کامپوزیت تیتانیوم کارباید/ فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن روی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن به کمک لیزر ان دی یگ^۲ با بیشترین توان ۷۰۰ وات انجام و پارامترهای ارزیابی کیفیت خروجی سطح با نرم افزار مینی تب ۱۷ با روش پاسخ سطح تحلیل شد و مقادیر بهینه‌ای بدست آمد تا پوششی با کمترین میزان عیوب و سختی بالا حاصل گردد.

بررسی‌های جدول آنالیز واریانس نشان می‌دهد که هر سه متغیر ورودی توان، سرعت روبشی و درصد حجمی تیتانیوم کارباید در میزان ترک‌های عرضی در پوشش موثر می‌باشند. با افزایش توان لیزر، کاهش سرعت روبشی لیزر و درصد حجمی تیتانیوم کارباید در پوشش، ترک کاهش می‌یابد. با کاهش سرعت روبشی لیزر و فراهم آمدن زمان مناسب جهت انتقال حرارت، تنش پسماند کاهش می‌یابد؛ در نتیجه یکی از دلایل ایجاد ترک برطرف می‌شود. همچنین افزایش توان لیزر موجب انحلال ذرات تیتانیوم کارباید و به تبع آن کاهش درصد تیتانیوم کارباید در کامپوزیت می‌شود. در این حالت، ذرات با اختلاف بالای ضرایب انبساطی، کمتر به چشم می‌خورد در نتیجه ترک کمتر می‌شود. در مورد کاهش درصد حجمی تیتانیوم کارباید در کامپوزیت می‌توان گفت که تیتانیوم کارباید هرچه کمتر باشد درصد فاز سخت کمتر و احتمال تشکیل ترک نیز کم می‌شود. طبق بررسی‌های آنالیز واریانس در مورد تخلخل مشخص شد که توان و سرعت روبشی لیزر دو عامل موثر در میزان تخلخل و رقیق‌شدگی پوشش است لذا با افزایش توان و کاهش سرعت روبشی لیزر میزان تخلخل کاهش و میزان رقیق‌شدگی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که بازدهی فرآیند با کاهش سرعت لیزر کم می‌شود اما زمان کافی برای خروج از گاز در مذاب ایجاد می‌شود که منجر به کاهش تخلخل شده و از طرفی حرارت بیشتری به سطح قطعه کار می‌رسد، در نتیجه‌ی این کار لایه پوششی به اندازه کافی ذوب می‌شود و میزان رقیق‌شدگی افزایش می‌یابد.

با توجه به مقادیر تفاوت ضریب تعیین جداول، انطباق آنالیز واریانس با نمودارهای باقیمانده، روش سطح پاسخ مدلی مناسب برای بررسی اثر پارامترهای ورودی پوشش دهی لیزری تیتانیوم کارباید/ فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن روی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن می‌باشد.

جدول ۱۱: آنالیز عناصر شیمیایی ناحیه ۵-C نشان داده شده در شکل ۱۲
Table 11. The chemical composition of 5-C area in Fig. 12

عناصر موجود	سری	غلظت غیرمعمول در درصد وزنی (%)	غلظت معمول در درصد وزنی (%)	درصد
کربن	کا	۶/۶۰	۶/۳۷	۱۵/۹۵
سیلیکون	کا	۷/۷۲	۹/۳۸	۱۴/۶۳
تیتانیوم	کا	۴/۰۱	۴/۴۴	۴/۲۳
کروم	کا	۲۱/۰۵	۲۵/۵۸	۲۱/۵۶
منگنز	کا	۳/۹۱	۴/۷۵	۳/۷۹
آهن	کا	۴۱/۶۲	۵۰/۵۸	۳۹/۶۸
نیکل	کا	۲/۳۸	۲/۸۹	۲/۱۶
	درصد کلی	۹۸/۹		

موجود را نشان می‌دهد. واضح است که درصد خطای موجود میزان قابل قبولی برای کاربردهای مهندسی می‌باشد.

طبق مشاهدات انجام شده از طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس که با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ نوع توسان انجام شد، در جداول ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ دیده می‌شود که مقادیر کربن، تیتانیوم و کروم در نواحی تیره رنگ نسبت به فاز ماتریس بیشتر است که با توجه به نوع شکل هندسی این نواحی می‌توان آن را به تیتانیوم کارباید و کروم کارباید نسبت داد. شکل ۱۷ سطح مقطع پوشش کامپوزیتی تیتانیوم کارباید- فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن حاصله از پارامترهای بهینه را نشان می‌دهد که کاربیدهای تیتانیوم و کروم در آن مشاهده می‌شود. جهت سختی‌سنجی از دستگاه میکروسختی دیجیتال که میزان بار اعمالی آن ۱۰ گرم تا ۲ کیلوگرم بود، استفاده شد. نتایج با سه مرتبه تکرار و میانگین‌گیری انجام شد و سختی زیرلایه از ۱۵۰ ویکرز ۰/۱ به میانگین ۶۰۶ ویکرز ۰/۱ رسید که این افزایش چشمگیر بدلیل وجود ذرات کروم کارباید و تیتانیوم کارباید در پوشش می‌باشد.

- Optics and Lasers in Engineering, 6-1 (2017) 96.
- [6] Q. Li, M. Savalani, Q. Zhang, L. Huo, High temperature wear characteristics of TiC composite coatings formed by laser cladding with CNT additives, Surface and Coatings Technology, 211-206 (2014) 239.
- [7] W. Gao, Z. Zhang, S. Zhao, Y. Wang, H. Chen, X. Lin, Effect of a small addition of Ti on the Fe-based coating by laser cladding, Surface and Coatings Technology, 291 429-423 (2016).
- [8] D. Janicki, Laser cladding of Inconel -625based composite coatings reinforced by porous chromium carbide particles, Optics & Laser Technology, 14-6 (2017) 94.
- [9] M. Moradi, H. ARABI, Experimental modeling of laser surface hardening process of AISI410 by Response Surface Methodology, Modares Mechanical Engineering, (3)18 188-179 (2018).
- [10] M. Schneider, M.F. Schneider, Laser cladding with powder, (1998).
- [11] Y. Javid, M. Ghoreishi, Thermo-mechanical analysis in pulsed laser cladding of WC powder on Inconel 718, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 79-69 (2017) (4-1)92.
- [12] M. Ghoreishi, D. Low, L. Li, Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 995-985 (2002) (9)42.

در حالت بهینه در آزمایش‌های انجام‌شده، سختی پوشش بعد از انجام فرآیند پوشش‌دهی لیزری با توان ۱۵۵ وات، سرعت روبشی لیزر ۳ میلی‌متر بر ثانیه و ۸/۷۳۷۴ درصد حجمی تیتانیوم کارباید در پوشش به ۶۰۶ ویکرز ۰/۱^۱ رسید که نسبت به حالت اول ۱۵۰ ویکرز ۰/۱ حدود ۴ برابر افزایش یافت.

مراجع

- [1] J.D. Majumdar, A. Kumar, L. Li, Direct laser cladding of SiC dispersed AISI 316L stainless steel, Tribology International, 753-750 (2009) (5)42.
- [2] E. Toyserkani, A. Khajepour, S.F. Corbin, Laser cladding, CRC press, 2004.
- [3] B. AlMangour, D. Grzesiak, Selective laser melting of TiC reinforced 316L stainless steel matrix nanocomposites: Influence of starting TiC particle size and volume content, Materials & Design, 151-141 (2016) 104.
- [4] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K.Y. Benyounis, The effect of low power co2 laser cutting process parameters on polycarbonate cut quality produced by injection molding, J. Modares Mech. Eng., 100-93 (2017) (2)17.
- [5] A.H. Faraji, M. Moradi, M. Goodarzi, P. Colucci, C. Maletta, An investigation on capability of hybrid Nd: YAG laser-TIG welding technology for AA2198 Al-Li alloy,

1 HV0.1

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Faridzadeh, M.H. Sadeghi, A. Momeni, Laser Cladding of TiC/316LSS and Analysis of Input Parameters using Response Surface Method. AmirKabir J. Mech Eng., 53(special issue 2) (2021) 1269-1286.

DOI: 10.22060/mej.2020.13586.5701



