



Laser Cladding of TiC/316LSS and Analysis of Input Parameters using Response Surface Method

M. Faridzadeh, M. H. sadeghi*, A. Momeni

Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Laser cladding is an effective modification surface approach resulting in a surface with appropriate mechanical characteristics like high wear resistance, high resistance from oxidation in high temperature, suitable hardness, and high corrosion resistance. The effective parameters in this process include the power laser, relative laser speed, the type of coating material, the focal length of the laser, the diameter of the laser spot, the pulse width, etc. Here, the first three cases are considered to find optimum parameters to create proper cladding layer with excellent mechanical properties with high hardness and minimum porosity, dilution, and crack. In this research, the cladding of composite powder of *TiC/316LSS* with certain volume percentages (*TiC/316LSS*) 5, 10, 15 on steel 316LSS by using laser type Nd:YAG is investigated. Output parameters include the value of porosity in cladding, the value of transverse crack, and the value of dilution of cladding. With designing experiments and analyzing output results by using response surface method, the effect of input parameters on the quality of cladding surface is investigated. Besides, by obtaining the optimized value of input parameters for creating cladding surface with the lowest value of porosity and crack, cladding surface with hardness of 660 HV 0.1 is achieved, which is 4 times harder than substratum with hardness of 150 HV 0.1.

Review History:

Received: Nov. 21, 2017

Revised: Jul. 22, 2018

Accepted: Jul. 22, 2018

Available Online: May, 19, 2020

Keywords:

Laser Cladding

Pre-Placed

Dilution

Crack

1. INTRODUCTION

The laser cladding process is a new method in which ceramic particles can be matched with a homogeneous distribution over a matrix phase. Laser as a thermal source melts the cladding material which has been placed on the surface of the piece in the form of wire or powder. Spray using flame, plasma spray, arc welding, and so on are among the other methods for surface cladding. Some advantages of laser cladding compared with the other methods are controlling the required energy, the possibility of the localization of the process, non-contact being of the process, and the controllable dilution degree.

There has been extensive research on the history of laser industrial applications, especially laser cladding. Moradi et al. [1] considered the effect of gas pressure and the position of the focal point of laser on the geometric quality, surface roughness, and shear stress in laser cutting of injectable polycarbonate with 3.2 millimeters thickness using laser CO₂ continuously which is low-power. They found that positioning of the focal point of the laser in the depth of the piece leads to an increase in the quality of laser cutting. Reduction of the surface of the cutting groove and the angle of the cone groove respectively are attributed to the degradation of focal point and growth of the gas pressure. Li et al. [2] carried out laser cladding of *CNT/TiC* on titanium and as a result, the abrasion resistance of cladding was significantly increased by adding CNT while, friction coefficient to substratum was

reduced. Improvement of abrasion resistance can be due to the existence of titanium carbide phase because it has hardness and has improved abrasion resistance by its uniform distribution in cladding. Majumdar et al. [3] carried out a composite of *SiC/316LSS* with a volume percentage of 5 and *SiC* 20 using a laser cladding process with the power of 700 watts, the laser velocity of 7.5 mm/sec, and the powder feed rate of 60 mg/sec. In the research, hardness was increased for the composite including 5 volume percent of *SiC/316LSS* and 20 volume percent of 340 VHN *SiC/316LSS* and 800VHN. In addition, its abrasion resistance was improved compared to the initial mode by testing on diamond surface; it showed the highest value of abrasion resistance in 20 volume percent of *SiC*. It should be noted that the improvement of abrasion resistance is due to beads getting bigger. In 2018, Moradi and colleagues [4] investigated laser cladding of the AISI410 steel using the response surface method.

Here, the effects of the relative velocity laser, the volume percentage of titanium carbide in the composite of *TiC/316LSS*, and the laser power on the output of the surface are evaluated. In the present research, cladding of powder of *TiC* and *316LSS* with the specific volume percentage of *316LSS* by using preaddressing approach is studied. The effect of the mentioned input parameters on porosity and transverse crack and dilution are evaluated. Regarding the high coverage of test parameters with regression equation, the Response Surface Method (RSM) is a suitable method for analyzing output parameters.

*Corresponding author's email: sadeghim@modares.ac.ir



Table 1. Input parameters of laser with cladding

Variable	Symbol	Unit	1	0	-1
Laser Scanning Speed	V	mm/sec	3	5	7
Laser Power	P	W	100	150	200
Volume weigh of TiC in Tic/316LSS	W%	-	5	10	15

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

The main required materials are a substratum of AISI316L SS and powders of Titanium Carbide and 316LSS for pre-addressing. The powder size used from 316LSS is approximately medium 50 microns in an irregular shape. The medium size of titanium carbide powder is 60 microns with a spherical geometric shape. The experimental setup includes the laser apparatus, the equipment related to the preaddressing process, the cutting equipment, mounting, and metallography of samples. In the intended experiments, the static frequency is 35 Hz, the pulse width is 3 msec, the nozzle distance from the surface is 7 mm, the laser diameter is 1 mm, and the argon flow rate is 15 lit/min. The laser used in this research is Nd:YAG with a wavelength of 1064 nm and average power of 700 W, a frequency range from 1 to 1000 Hz, a pulse width from 0.25 to 25 milliseconds, an input power of 20 kW, a beam width of 0.4 mm and a peak power of 10 kW. Design of experiments based on Central Composite Design (CCD) 15 experiments were set by minitab.17. Outputs including the crack, porosity and melting have been determined.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this part, the effective input parameters using response surface method are determined, also the trend of their effect on porosity, dilution and crack are described.

3.1. Porosity

According to the analysis of variance for the values of the porosity of the cladding, it is observed that the laser velocity, the power, quadratic effect of laser power and the interaction of laser power-laser scanning speed are the contributing factor in the porosity. *R-Sq* (99.04%) indicates that the mathematical model matches the experimental data, that its proximity to 1 indicates the validity of this mathematical model on experimental data.

For The porosity decreases with the increase of laser power because the thermal energy forced to the work piece and the possibility to repel holes' increase.

3.2. Dilution

The effective factors on dilution value of cladding include the power, the laser velocity, the velocity-power interaction, the square of volume percentage, the square of power laser. As it is clear from the variance analysis, parameters with a *p-value* less than 0.05 are effective on output results.

3.3. Crack

There are different reasons for creation of a crack; the most important one is related to the residual stress that comes from three cases: thermal stress, stress of transferring phase- as a

Table 2. Optimal parameters to create the appropriate cladding layer

Optimization Parameters		
Volume weigh of TiC in Tic/316LSS	Power(w)	Scanning laser velocity (mm/sec)
8.7374	154.54	154.54

Table 3. Output parameters with the given optimum input parameters

	Dilution	Porosity	Crack
Prediction	8.76398	2.21857	2.5609
Test	7.81	2.6	2
Error (%)	10.88	-14.67	22

result of transferring phases in molten pool- and constrained stress -that is related to area of substratum and cladding layer. The formation of crack in cladding layers is mainly due to large thermal stresses caused by large thermal gradients from the cooling process and the difference between the thermal expansion coefficients of the powder and the substratum.

4. CREATING AN APPROPRIATE CLADDING

The final cladding layer was performed according to the optimization of the software and Table 3 show the optimization results along with the empirical test with the percentage of the error. Obviously, the percentage of error is acceptable for engineering applications.

5. CONCLUSIONS

In this paper, *TiC/316LSS* composite was cladded on 316L stainless steel using Nd:YAG laser with the maximum power of 700 Watts, and the surface quality parameters were analyzed with the response surface method using Minitab 17 software. The optimal values were obtained in order to have a coated layer with the least degree of imperfections and high hardness. Reviews of analysis of variance showed that all three variable inputs, scanning laser speed, laser power and volume percent *TiC* in the transverse cracks are effective. According to the analysis of variance, it was determined that scanning laser speed and laser power are two effective factors in porosity and dilution. Therefore, increasing the laser power and decreasing the scanning laser speed causes degradation of porosity and increment of the dilution rate.

In the optimum condition, hardness after the laser cladding process with a power of 155 W, the laser scanning speed 3 mm/sec and 8,7374% volume weigh of *TiC* reached to 606 HV0.1, which is about 4 times higher than substrate 150 HV0.1.

6. REFERENCES

[1] 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

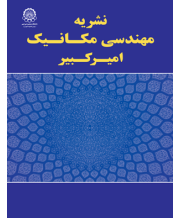
- molding, J. Modares Mech. Eng., 17(2) (2017) 93-100.
- [2] Q. Li, M. Savalani, Q. Zhang, L. Huo, High temperature wear characteristics of TiC composite coatings formed by laser cladding with CNT additives, Surface and Coatings Technology, 239 (2014) 206-211.
- [3] J.D. Majumdar, A. Kumar, L. Li, Direct laser cladding of SiC dispersed AISI 316L stainless steel, Tribology International, 42(5) (2009) 750-753.
- [4] M. Moradi, H. ARABI, Experimental modeling of laser surface hardening process of AISI410 by Response Surface Methodology, Modares Mechanical Engineering, 18(3) (2018) 179-188.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

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) 301-304.

DOI: [10.22060/mej.2020.13586.5701](https://doi.org/10.22060/mej.2020.13586.5701)





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 متأثر 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 تقویت کننده در پوشش با میزان رقیق شدگی کم کامپوزیت در زیرلایه مشاهده گردید. این پوشش عاری از هرگونه ترک با توزیع یکنواخت کروم کارباید با ۳۶٪ درصد حجمی می باشد. طبق آزمون فرسایش استاندارد سازمان بین المللی سنجش و مصالح ساختمانی آمریکا^۸ و مقایسه صورت گرفته میان پوشش فلزی اینکونل ۶۲۵^۹ و اینکونل ۶۲۵/ کروم کارباید^{۱۰} مشخص شد که در زوایای ۳۰° و ۹۰° مقاومت فرسایشی پوشش کامپوزیتی بالاتر از پوشش فلزی اینکونل ۶۲۵ می باشد. در سال ۲۰۱۸ مرادی و همکاران [۹] پوشش دهی 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 شده است. توان لیزر، سرعت روبشی لیزر و موقعیت کانونی لیزر، پارامترهای متغیر ورودی و خروجی آن سختی، عمق و عرض لایه سخت شده می باشد. نتایج نشان داد که با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت نسبی لیزر، سختی و عمق لایه سختی افزایش می یابد، عرض لایه سخت شده نیز با کاهش توان لیزر و افزایش صفحه کانونی لیزر افزایش می یابد. همچنین مدل سازی ریاضی با روش رویه پاسخ سطح صورت گرفت 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 رقیق شدگی

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

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

ضریب رقیق شدگی (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 می شود. رابطه (۱) میزان کمی رقیق شدگی را نشان می دهد، 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 کم شده با آزمون مقاومت سایشی حدود ۰/۷ میلی گرم است در حالیکه برای سطح زیرلایه بدون پوشش ۱۱/۹ میلی گرم بوده است. با بالا رفتن درصد تنگستن کارباید در این پوشش میزان ذرات ذوب نشده تنگستن کارباید افزایش یافته و سایشی از نوع چسبنده^۱ به ساینده^۲ تبدیل شده است. در سال ۲۰۱۶ آل مانگور و همکاران [۳]، اثر اندازه ذرات تیتانیوم کارباید و درصد حجمی آن را در خواص مکانیکی و ریزساختار حاصل شده از پوشش نانو کامپوزیت تیتانیوم کارباید- فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن بررسی کردند. در این پژوهش مشخص شد که درجه فشرده سازی با ذرات کوچکتر تیتانیوم کارباید افزایش می یابد که آن هم به دلیل افزایش ترشوندگی بین تیتانیوم کارباید و فاز ماتریس می باشد. با افزایش درصد حجمی تیتانیوم کارباید سختی افزایش می یابد ولی ضریب اصطکاک و نرخ سایش به دلیل اثرات ترکیبی تقویت دانه ها و استحکام مرز دانه ها کاهش می یابد؛ 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] پوشش دهی لیزری پودر آلیاژ آهن همراه با درصد متفاوتی از تیتانیوم را روی فولاد کم کربن انجام دادند و اثر تیتانیوم و میزان آن در خواص مکانیکی، ریزساختار، فازهای تشکیل دهنده پوشش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که تغییرات درصد تیتانیوم روی مورفولوژی و ریزساختار پوشش اثرگذار است. همچنین توزیع سختی در میان لایه های 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

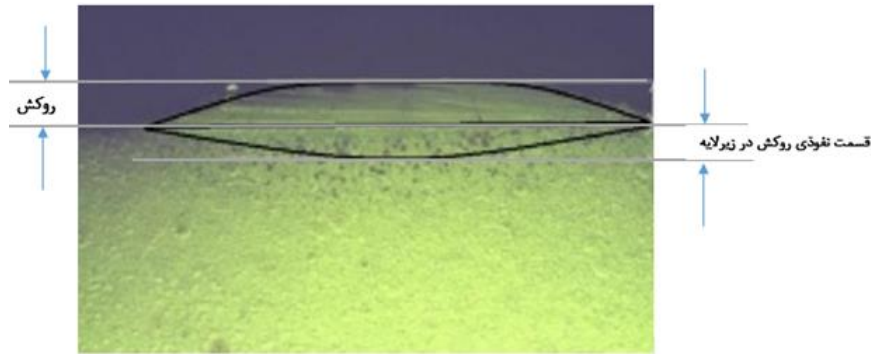


Fig. 1. Cross section of coated layer for evaluation of dilution with these parameters, the relative velocity 5 mm/sec, the laser power 150 W and the volume percentage of TiC in TiC/ 316 LSS 5%

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 کم‌کربن

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

تعریف میزان رقیق‌شدن را نشان می‌دهد.

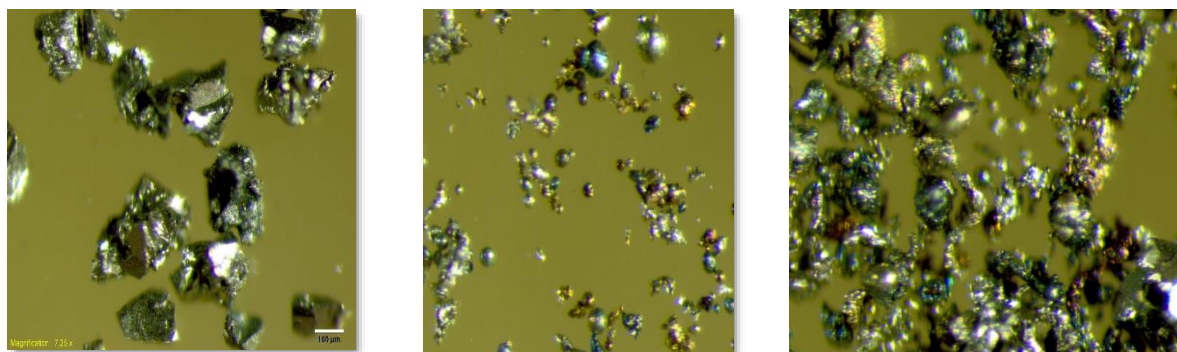
اتصال ماده پوشش در زیرلایه می‌شود. برای اجتناب از این نوع عیب بایستی نمونه‌ها قبل از انجام عمل پیش‌نشانی کاملاً تمیزکاری گردند. مورد دوم تخلخل هنگامی پدید می‌آید که پاس‌های دارای هم‌پوشانی کنار هم قرار گیرند. این نوع تخلخل بیشتر در مواردی است که میزان پودر مورد استفاده زیاد باشد [۱۱].

۱-۲ 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

۱-۳ ترک

منشأً 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



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

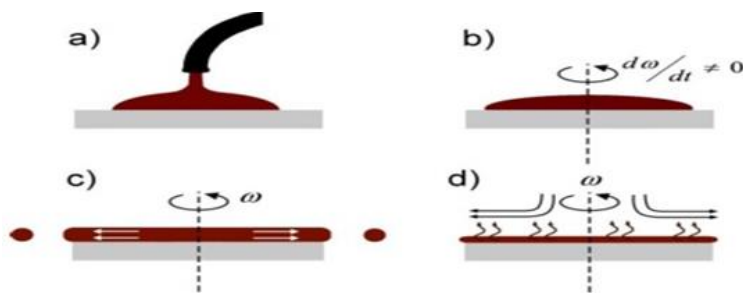


Fig. 3. A schematic of the pre-address process

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^۱ 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

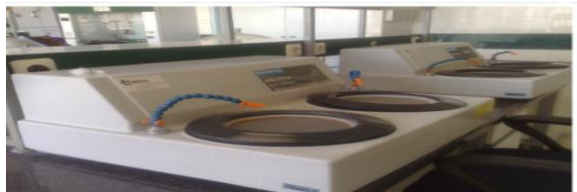
1 TiC/316LSS
2 TiC/316LSS



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 شکل 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 (سیلیکات سدیم) 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

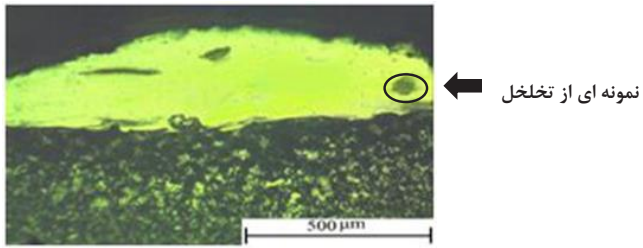


Fig. 6. The cross section of coated layer with the laser relative velocity 7 mm/sec and the laser power 100 W

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

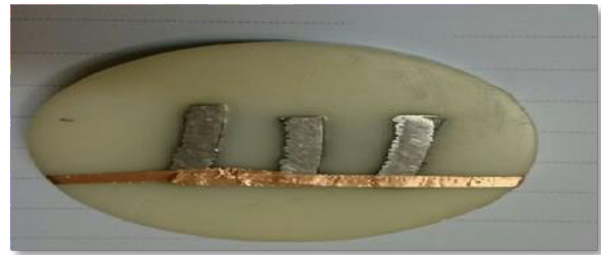


Fig. 5. The cross-section of mounted coated layer for evaluation of its quality

شکل ۵: سطح مقطع پوشش‌های مانت‌شده جهت بررسی خواص پوشش

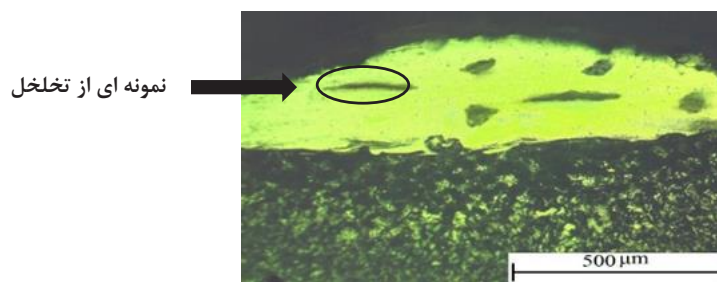


Fig. 7. The cross section of coated layer with the laser relative velocity 7 mm/sec and the laser power 200 W

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 نزدیک بودن 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)

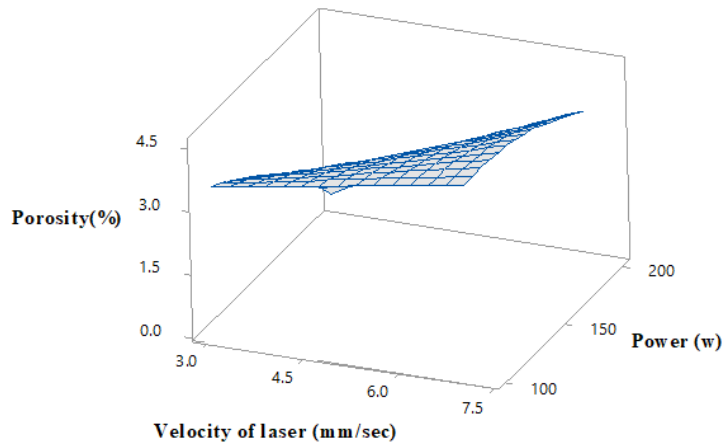
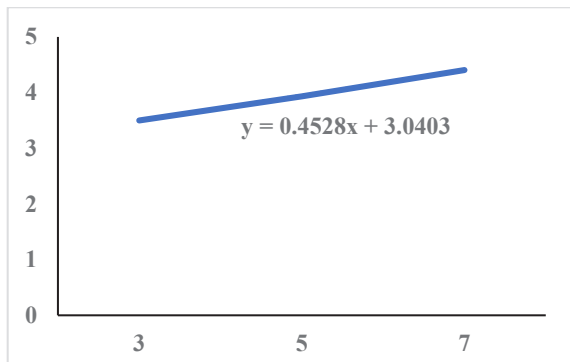


Fig. 8. The surface plot of laser relative velocity and laser power in porosity

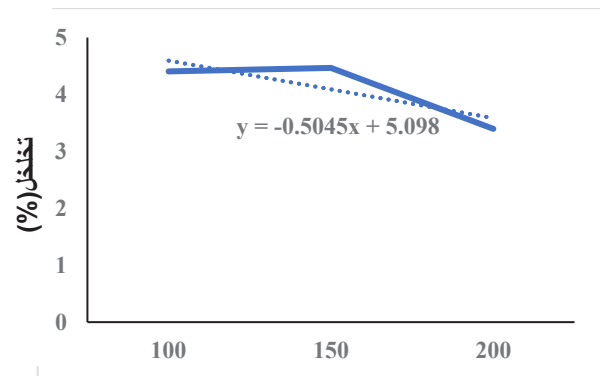
شکل ۸: منحنی سطح سرعت نسبی لیزر (میلی‌متر بر ثانیه) و توان متوسط لیزر (وات) در میزان درصد تخلخل



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 دو عبارت
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

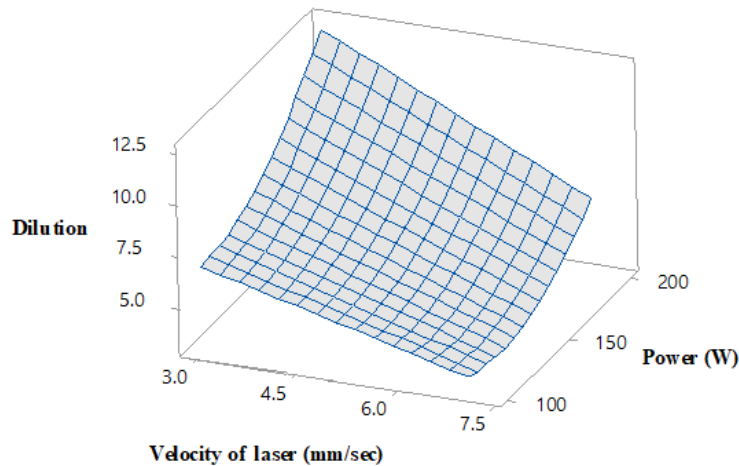
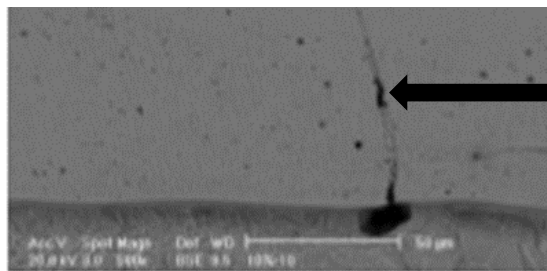


Fig. 11. The surface plot of laser relative velocity and laser power in dilution

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 کم 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 کم 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 کم 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 کم 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

جدول ۶: آنالیز واریانس برای ترک
 Table 6. The variance analysis of crack

عبارت‌ها	درجه آزادی	جمع مربع‌ها	میانگین مربع‌ها	مقدار F	مقدار P
مدل	۹	۵۶/۵۸۳۳	۶/۲۸۷۰	۲۲/۱۹	۰/۰۰۲
عبارت‌های خطی	۳	۴۶/۷۵۰۰	۱۵/۵۸۳۳	۵۵/۰۰	۰/۰۰۰
سرعت روبشی لیزر	۱	۲۸/۱۲۵۰	۲۸/۱۲۵۰	۹۹/۲۶	۰/۰۰۰
توان نسبی لیزر	۱	۶/۱۲۵۰	۶/۱۲۵۰	۲۱/۶۲	۰/۰۰۶
درصد حجمی تیتانیوم کارباید در تیتانیوم کارباید/فولاد ۳۱۶ کم کربن	۱	۱۲/۵۰۰۰	۱۲/۵۰۰۰	۴۴/۱۲	۰/۰۰۱
عبارت‌های توان دو	۳	۵/۵۸۳۳	۱/۸۶۱۱	۶/۵۷	۰/۰۳۵
توان * توان	۱	۲/۳۱۴۱	۲/۳۱۴۱	۸/۱۷	۰/۰۳۵
اثر متقابل دو عبارتی	۳	۴/۲۵۰۰	۱/۴۱۶۷	۵/۰۰۰۰	۰/۰۰۵
سرعت نسبی لیزر * درصد حجمی تیتانیوم کارباید در کامپوزیت	۱	۴/۰۰۰۰	۴/۰۰۰۰	۱۴/۱۲	۰/۰۱۳
خطا	۵	۱/۱۴۶۷	۰/۲۸۳۳		
عدم تطابق	۳	۰/۷۵۰۰	۰/۲۵۰۰	۰/۷۵	۰/۶۱۵
خطای خالص	۲	۰/۶۶۶۷	۰/۳۳۳۳		
کل	۱۴	۵۸/۰۰۰۰			
۹۳٪/۰.۱۶ ضریب تعیین تعدیل شده					۹۷٪/۰.۵۶ ضریب تعیین

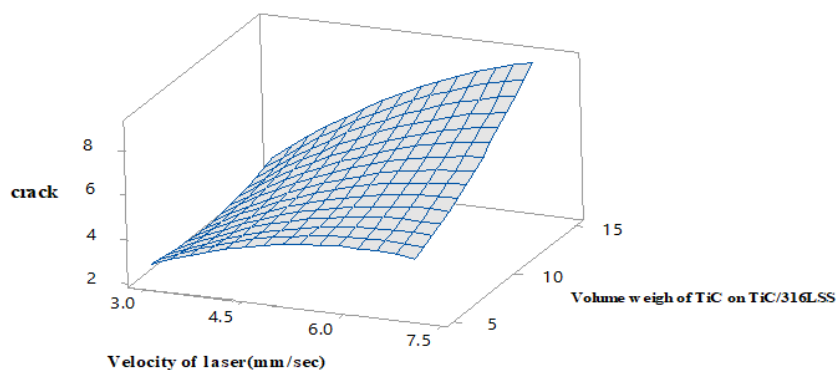


Fig. 13. The surface plot of the laser relative velocity and laser power in crack

شکل ۱۳: منحنی سطح میزان ترک بر حسب درصد حجمی تیتانیوم کارباید و سرعت نسبی لیزر میلی‌متر بر ثانیه

انتقال حرارت، تنش پسماند کاهش می‌یابد و احتمال تشکیل ترک کم می‌شود. همچنین با افزایش درصد حجمی تیتانیوم کارباید در کامپوزیت با اختلاف بالای ضرایب انبساط حرارتی‌اش با فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن مطابق شکل ۱۳ افزایش احتمال تشکیل ترک در پوشش را دارد چرا که پس از فرآیند لیزر و سرد شدن، گرادیان حرارتی بین فاز سخت تیتانیوم کارباید و فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن موجب

آن می‌توان گفت فازهای نرم‌تر نسبت به فاز سخت ایجاد می‌شود که موجب کاهش میزان ترک می‌گردد. شکل ۱۳ منحنی سطح تعداد ترک در سطح پوشش را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان حوزه مقادیر مناسب سرعت نسبی لیزر و درصد حجمی تیتانیوم کارباید را برای داشتن کمترین ترک عرضی مشخص کرد. همانطور که دیده می‌شود با کاهش سرعت نسبی لیزر و فراهم آوردن زمان مناسب جهت

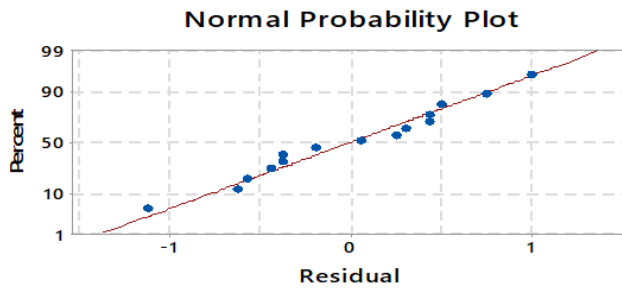


Fig. 15. The residual plot of crack

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

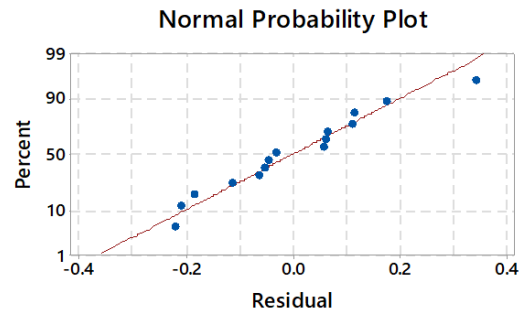


Fig. 14. The residual plot of dilution

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

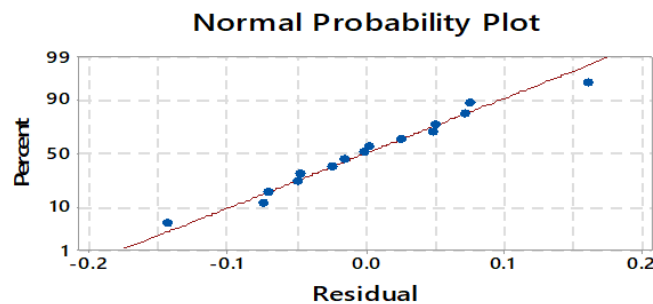


Fig. 16. The residual plot of porosity

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		

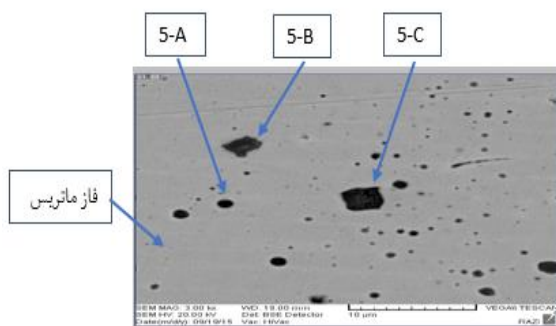


Fig. 17. The cross section of coated layer with optimal parameters. laser power 163 W, laser relative velocity 3 mm/sec and volume weigh of TiC 8.7374%

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



