E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 7, Number 2, 2022



Laser cladding of Inconel 625 on ASTM A575 steel

M.H. Zakeri, A.R. Nasresfahani*, S.M. Barekat
Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

Received 12 Septemner 2021 ; Accepted 10 January 2022

Abstract
In this research, the microstructure of Inconel 625 cladded layer on ASTM A575 steel has been investigated. By examining different parameters, the optimal single-pass sample with the least amount of dilution, porosity and fusion and suitable wetting angle was determined. Then cladding process with the optimal parameter was performed. The microstructure of the cladding layer was evaluated from the base metal to the top. Due to different cooling rates, dendritic morphologies were observed at different distances. Also, the cladding layer was free of any cavities, porosity and cracks and its thickness was 0.9 mm (900 micrometers). The results of (XRD) and (EDS) analyzes indicate that the γ phase is formed and there is a relatively uniform distribution of elements in the cladding layer. These results also indicate that no change in the chemical composition of the substrate surface was achieved near the interface. The hardness test results also show that the hardness starts from 320 VHN at the top surface and reaches to 135 VHN in the base metal with a gentle slope. This slope of hardness can be attributed to the cooling or heating rates of the substrate.

Keywords: Laser Cladding, Inconel 625, A575 steel, microstructure, hardness, cladding parameters.

* Corresponding Author: nasr_alireza@yahoo.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.3.6]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هفتم، شماره2، پاییز و زمستان 1400



روکش کاری لیزری اینکونل 625 بر روی فولاد A575

محمدهادی ذاکری، علیرضا نصراصفهانی*، سیدمسعود برکت

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

دریافت مقاله: 1400/10/20؛ پذیرش مقاله: 1400/06/21

چکیده

در این پژوهش، ریزساختار لایه روکش‌شده اینکونل 625 با استفاده از لیزر فیبری بر روی فولاد ASTM A575 مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا پارامترهای مختلف فرایند روکش‌کاری لیزری از جمله دارا بودن کمترین میزان رقت، تخلخل و آمیختگی و نیز بهترین زاویه ترشوندگی برای یک نمونه بهینه تک پاس مشخص و سپس نسبت به انجام فرایند روکش‌کاری اقدام شد. ریز ساختار روکش از راس آن تا زیر لایه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد با توجه به نرخ سرد شدن متفاوت در فواصل مختلف، انواع ریخت دندریتی قابل مشاهده است. همچنین پوشش عاری از هرگونه حفره، تخلخل و ترک و ضخامت آن 0/9 میلی‌متر(900 میکرومتر) می‌باشد. نتایج حاصل از آنالیزهای فازی(XRD) و عنصری(EDS) نشان دهنده تشکیل فاز گاما و توزیع نسبتا یکنواخت عناصر در پوشش می‌باشد. این نتایج همچنین نشان دهنده آن است که تغییری در ترکیب شیمیایی سطح زیرلایه در نزدیک فصل مشترک حاصل نشده است. نتایج سختی سنجی نیز نشان دهنده آن است که سختی از 320VHN در سطح روکش شروع و با یک شیب ملایم به سختی 135VHN در زیر لایه رسیده است. این شیب سختی را می‌توان ناشی از سرعت‌های سرد شدن و یا گرم شدن زیر لایه دانست.

کلمات کلیدی: روکش‌کاری لیزری، اینکونل 625، فولاد ASTM A575، ریزساختار، سختی، پارامترهای لایه نشانی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: nasr_alireza@yahoo.com

1- مقدمه

سوپر آلیاژها، از جمله فلزات مقاوم در برابر حرارت، خوردگی و اکسیداسیون می‌باشند. این آلیاژها به لحاظ ترکیب شیمیایی شامل سه گروه پایه نیکل، نیکل-آهن و پایه کبالت هستند. آلیاژ اینکونل 625 جزو آن دسته از آلیاژهای پایه نیکل است که دارای مقدار قابل توجهی کرم و مولیبدن می‌باشد. این آلیاژ دارای مقاومت عالی در برابر خوردگی و اکسایش بوده و از خواص کششی و خستگی مناسبی تا دمای 980°C برخوردار است. استحکام بالای این آلیاژ ناشی از حضور مولیبدن و نیوبیم است. بنابراین برای افزایش استحکام نیازمند عملیات رسوب‌سختی نخواهد بود. حضور این عناصر در کنار هم سبب ایجاد مقاومت زیاد در برابر خوردگی شده و هم‌زمان مقاومت به اکسایش و کربوره شدن را نیز افزایش می‌دهد. همچنین با توجه به اینکه استحکام کششی این آلیاژ زیاد است، در نتیجه مقاومت به خوردگی-خستگی و مقاومت در برابر ترک‌های ناشی از خوردگی تنش‌های یون‌های کلریدی زیادی دارد که همین خاصیت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.3.6]

موجب به کارگیری گسترده آن در صنایع دریایی شده است. از جمله موارد کاربردهای دریایی این آلیاژ می‌توان به کابل‌های مهارکننده قایق، پره‌های موتورهای ناوها، سیستم‌های رانش اضطراری و اتصالات جداکننده زیردریایی‌ها، داکت‌های اگزوز قایق، محافظ کابل‌های ارتباطی زیر دریا و رابط کابل‌های الکتریکی اشاره کرد. همچنین به دلیل قابلیت جوشکاری و لحیم‌کاری بالا در صنایع هوایی و هسته‌ای نیز کاربردهای فراوانی دارد [1-3].

فولاد ASTM A575 یکی از فولادهای کربنی پر کاربرد است. جوش‌پذیری بسیار خوب این فولاد موجب شده است از آن در صنایع گوناگونی از قبیل نفت و گاز و پتروشیمی، صنایع حمل و نقل زمینی و دریایی و نیز صنایع ساختمانی کاربردهای فراوانی داشته باشد. به همین دلیل بسیاری از تحقیقات در زمینه متالورژی جوشکاری از جمله بررسی فرایند انجماد جوش، ریزساختار فلزجوش و منطقه تحت تاثیر حرارت، استحاله‌های فازی حالت جامد در حین جوشکاری و ناپیوستگی‌های جوشکاری بر روی این فولاد انجام شده است [4و5].

در روکش‌کاری لیزری از منبع حرارتی لیزر برای نشاندن لایه نازک روی فلزپایه استفاده می‌شود. در این روش قسمتی از انرژی پرتوان لیزر، جذب پودر شده و منجر به ذوب آن قبل از رسیدن به زیر لایه می‌شود. بخش دیگر آن نیز یک لایه سطحی نازک از زیرلایه را ذوب و موجب تشکیل یک پیوند متالورژیکی قوی با کمترین اختلاط بین زیرلایه و روکش می‌شود.

حرارت ورودی بسیار کم در این حالت باعث آمیختگی خیل کم رسوب با زیر لایه می‌شود. همچنین منجر به تشکیل ناحیه متاثر از حرارت بسیار باریک به همراه حداقل اعوجاج و پیچیدگی می‌شود. فرایند روکش کاری لیزری به دلیل سرعت انتقال حرارت بالا سبب ظریف شدن ساختار و یکنواخت شدن ترکیب شیمیایی در سطح پوشش می‌شود. در این روش از یک پرتو لیزر پرانرژی به جای قوس یا شعله گاز به عنوان منبع حرارتی استفاده می‌شود. پرتوهای لیزر امکان به وجود آوردن لایه‌هایی با ضخامت کم و دسترسی آسان‌تر به سطوح را نسبت به الکترود یا مشعل فراهم می‌سازند. از عمده کاربردهای روکش‌کاری لیزری می‌توان به بازسازی سطوح فرسوده توربین‌های هوایی و صنعتی، قطعات شناورهای دریایی، قطعات صنایع نفت و مجموعه‌های در معرض سایش اشاره کرد. پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر کیفیت روکش لیزری ایجاد شده شامل توان متوسط، سرعت روبش لیزری و نرخ تغذیه پودر می‌باشد. عمده مواد مورد استفاده در روکش‌کاری لیزری، شامل سیم، پودر وخمیر می‌باشند که پودر بیشترین مورد استفاده را دارد [6و7].

فولاد A517 یکی از فولادهایی است تحقیقات متعددی بر روی رفتار خوردگی و سایشی پوشش‌های اعمالی بر روی آن انجام شده است [8و9]. ولی تاکنون گزارشی مبنی بر تحقیق بر فولاد A575 و نحوه روکش کاری منتشر نشده است. در این تحقیق روکش اینکونل 625 به روش لیزر بر روی این فولاد انجام و پارامترهای موثر در مورد بررسی قرار گرفته است.

2- مواد وروش تحقیق

از پودر تجاری اینکونل 625 با ترکیب شیمیایی مطابق با جدول(1) و مورفولوژی و اندازه دانه نشان داده شده در شکل(1) به عنوان ماده اولیه جهت روکش‌کاری و از ورقه‌های فولاد ASTM A575 با ابعاد 14×4×1 سانتی‌متر و ترکیب شیمیایی جدول(2) به عنوان زیر لایه استفاده شد. قبل از انجام فرایند روکش‌کاری، ابتدا ورقه‌های فولادی تا زبری حدود یک میکرومتر سنباده‌زنی و پولیش شد.

آنگاه از دستگاه لیزر فیبری برای لایه نشانی استفاده گردید. به‌منظور یافتن پارامترهای بهینه، ابتدا روکش‌کاری لیزری به صورت تک پاس طی27 مرحله با پارامترهای مختلف انجام شد. جدول(3) پارامترهای مختلف روکش‌کاری لیزری تک پاس را نشان می‌دهد. شکل(2) طرح واره‌ای از سطح مقطع یک نمونه تک پاس را نشان می‌دهد که برای تعیین میزان آمیختگی از رابطه 1 قابل محاسبه است.

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

پس از انجام فرایند روکش‌کاری، کلیه نمونه‌ها به وسیله دستگاه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.3.6]

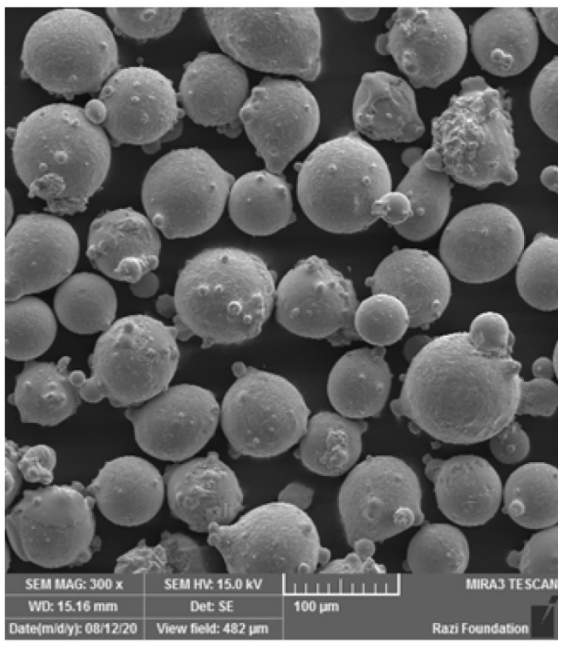
جدول 1- ترکیب شیمیایی و مشخصات پودر تجاری اینکونل625.

عنصر	Ni%	Nb%	Cr%	Mo%	Fe%	Si%	Al%
مقدار (درصد وزنی)	۶۱/۵	۳/۴۱	۲۰/۳۷	۱۱/۵۴	۱/۳۲	۰/۲۸	۱/۵
اندازه ذرات	۱۰۰-۱۰ میکرومتر						
مورفولوژی	کروی						

جدول 2- ترکیب شیمیایی فولاد ASTM A575 (درصد وزنی).

Fe%	C%	Mn%	S%	P%
مابقی	۰/۲	۰/۶	۰/۰۵	۰/۰۵

وایرکات برش وسطح آن‌ها سنباده‌زنی و پولیش شد. از محلول 1 گرم $FeCl_3$ و 10 میلی‌لیتر HCl و 5 میلی‌لیتر HNO_3 هم به عنوان محلول حکاکی استفاده شد.آنگاه به منظور انتخاب پارامترهای بهینه، 27 نمونه تک پاس فوق از نظر یکنواختی ضخامت و هندسه پوشش، تراکم بالا و عدم حضور عیوب از قبیل ترک و حفره مورد بررسی‌های اولیه قرار گرفتند. این بررسی‌ها نشان داد می‌توان نمونه شماره S3 را به عنوان نمونه بهینه جهت روکش‌کاری چند پاس انتخاب نمود.



شکل 1- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از ذرات پودر اینکونل 625.

با توجه به پارامترها و نتایج جدول(3)، مشخص شد که رفتار تغییر ارتفاع‌روکش‌های‌لیزری‌تابعی از هر سه پارامتراصلی فرایند یعنی، نرخ تزریق پودر (F)، سرعت روبش(S) و توان لیزر (P) می‌باشد که مقدار آن از 0/85 تا 1/65 میلی‌متر متغیر می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود، افزایش ارتفاع روکش با افزایش نرخ تغذیه پودر و کاهش سرعت روبش لیزری افزایش یافته است. مقدار پهنای روکش از 0/9 تا 1/4 میلی‌متر متغیر می‌باشد که با افزایش توان لیزر و کاهش سرعت روبش افزایش می‌یابد. و نرخ تزریق پودر نیز اثر کمی بر پهنای روکش دارد. زاویه ترشوندگی (θ)، برای نمونه‌های تک پاس 27 گانه اندازه‌گیری شد که مقدار آن از 37 تا 98 درجه متغیر بود. زاویه ترشوندگی (θ) نقش مهمی را در کیفیت روکش ایفا می‌کند و به خصوص برای هم‌پوشانی و جلوگیری از ایجاد تخلخل از اهمیت خاصی برخوردار است. مشخص شد که هر سه پارامتر اصلی فرایند روکش کاری بر زاویه ترشوندگی تاثیر دارد. با افزایش توان و سرعت روبش، زاویه ترشوندگی کاهش یافته و افزایش نرخ تغذیه پودر، سبب افزایش زاویه ترشوندگی می‌گردد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که هر سه پارامتر اصلی فرایند روکش کاری برروی عمق نفوذ و درصد آمیختگی موثر می‌باشند، که از بین سه عامل فوق، توان متوسط تاثیر بیشتری دارد. از روی اطلاعات‌خروجی‌از جدول(3) نتیجه می‌شود که درصد آمیختگی از 7% تا 20% متفاوت می‌باشد. که با افزایش توان، عمق نفوذ و درصد آمیختگی افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش انرژی ورودی با افزایش توان می‌باشد. در نتیجه در یک نرخ پاشش پودر و سرعت روبش ثابت انرژی بیشتری توسط زیر لایه جذب شده و عمق نفوذ افزایش می‌یابد. جهت تعیین ترکیب فازی پودر اینکونل 625، زیرلایه و روکش شماره1 از الگوی پراش پرتو ایکس حاصل از دستگاه پراش‌سنج فیلیپس باولتاژ40کیلوولت، تابش Cu(Kα) با طول موج0/15406 نانومتر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.3.6]

جدول 3- نحوه انتخاب پارامترهای روکش کاری لیزری تک پاس پوشش اینکونل 625

شماره نمونه	P	S	F	W(mm)	h(mm)	b(mm)	θ(degre)	٪D
S1	300	6	100	۱/۰	۰/۹۵	۰/۱۵	۵۲	۱۴/۱
S2	300	8	100	۰/۹	۰/۹	۰/۱۴	۴۵	۱۳/۴
S3	300	10	100	۰/۹۵	۰/۸۵	۰/۱۲	۳۷	۱۲/۳
S4	300	6	200	۱/۱	۱/۰	۰/۱۱	۶۹	۱۲
S5	300	8	200	۱/۰	۰/۹۵	۰/۱۲	۴۷	۱۱/۵
S6	300	10	200	۰/۹	۱	۰/۱	۳۹	۹
S7	300	6	300	۰/۹۵	۱/۱	۰/۱۲	۸۶	۱۰/۶
S8	300	8	300	۱/۱	۱	۰/۱۲	۶۲	۱۰/۷
S9	300	10	300	۱/۰	۱/۱	۰/۰۸	۶۵	۷
S10	400	6	100	۱/۱	۱	۰/۱۵	۴۳	۱۳
S11	400	8	100	۱/۰	۰/۹	۰/۳	۸۲	۲۴
S12	400	10	100	۱/۲	۱	۰/۱۸	۶۵	۱۵/۲
S13	400	6	200	۱/۱	۱/۱	۰/۱۳	۶۲	۱۰/۳
S14	400	8	200	۱/۰	۱/۰	۰/۱۷	۸۷	۱۴/۵
S15	400	10	200	۱/۳	۱/۲	۰/۱۴	۹۳	۱۱
S16	400	6	300	۱/۰	۱/۳۲	۰/۱۱	۹۰	۷/۸
S17	400	8	300	۱/۱	۱/۴	۰/۱۵	۷۵	۹/۶
S18	400	10	300	۱/۳۵	۱/۵	۰/۱۲	۹۵	۸
S19	500	6	100	۱/۲	۱/۴	۰/۲	۸۶	۱۲/۵
S20	500	8	100	۱/۲	۱/۴۲	۰/۳۵	۹۳	۲۰
S21	500	10	100	۱/۲۵	۱/۴۸	۰/۲۹	۶۱	۱۶/۳
S22	500	6	200	۱/۴	۱/۴۵	۰/۳	۸۸	۱۷/۱
S23	500	8	200	۱/۳	۱/۵	۰/۲۵	۹۵	۱۵/۸
S24	500	10	200	۱/۳	۱/۵۵	/۲۲	۸۵	۱۳
S25	500	6	300	۱/۲	۱/۵	۰/۲۵	۹۴	۱۴/۲
S26	500	8	300	۱/۲	۱/۶	۰/۲	۹۷	۱۳/۳
S27	500	10	300	۱/۴	۱/۶۵	۰/۲۱	۹۸	۱۲

و اندازه گام 0/05 درجه بر ثانیه استفاده شد.

الگوهای به‌دست‌آمده با استفاده از نرم افزار Xpert High Score مورد ارزیابی قرار گرفتند. از میکروسکوپ نوری جهت بررسی ریز ساختار و هندسه روکش استفاده و از نرم‌افزار Digimizer جهت تعیین زاویه ترشوندگی، میزان آمیختگی و ارتفاع روکش استفاده شد.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ریز ساختار

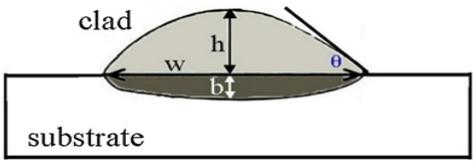
شکل (3) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع نمونه‌های تک پاس حاصل از روکش‌کاری لیزری را نشان می‌دهد.

نمونه S3 دارای ریز ساختار همگن شامل یک مرز واضح نسبتا صاف در فصل مشترک پوشش و زیر لایه با درصد کم آمیختگی را نشان می‌دهد.

این موضوع بیانگر پیوند متالورژیکی و چسبندگی مطلوب روکش به زیر لایه می‌باشد. همانطور که در شکل(3) مشاهده می‌شود، نواحی سیاه رنگ کوچک و نامنظم نشان‌دهنده حفرات گازی و ناخالصی‌ها است که با توجه به مقدارکم تاثیر زیادی بر خواص مکانیکی و کیفیت‌روکش ندارد. همچنین ارتفاع متوسط روکش 0/9 میلی‌متر و درصد آمیختگی 17/2 و مقدار تخلخل آن کمتر از1% و زاویه ترشوندگی متوسط 42/3 درجه می‌باشد. شکل(4) نشان‌دهنده تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با 50 درصد همپوشانی می‌باشد.

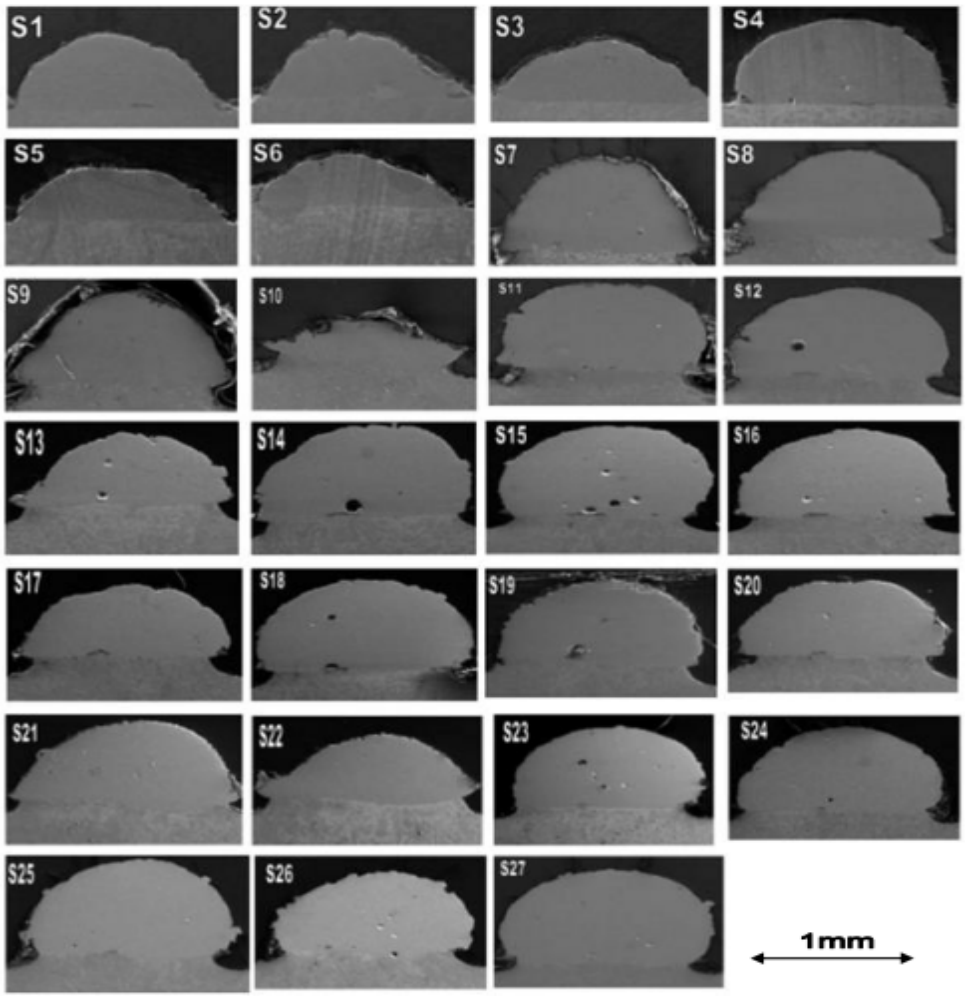
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.3.6]



D: درصد آمیختگی (رقت)
F : نرخ تزریق پودر (mg/s)
W: عرض روکش (mm)
h : ارتفاع روکش (mm)
P: توان اسمی (w)
S : سرعت روبش سطح (mm/s)
b: ارتفاع آمیختگی (رقت) (mm)
θ : زاویه ترشوندگی (deg)

شکل 2- طرح واره سطح مقطع یک نمونه تک پاس

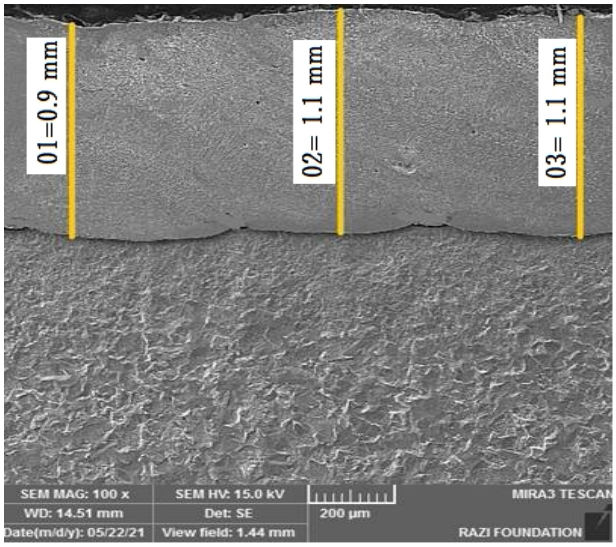


شکل 3- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع نمونه‌های تک پاس ایجاد شده با روکش کاری لیزری.

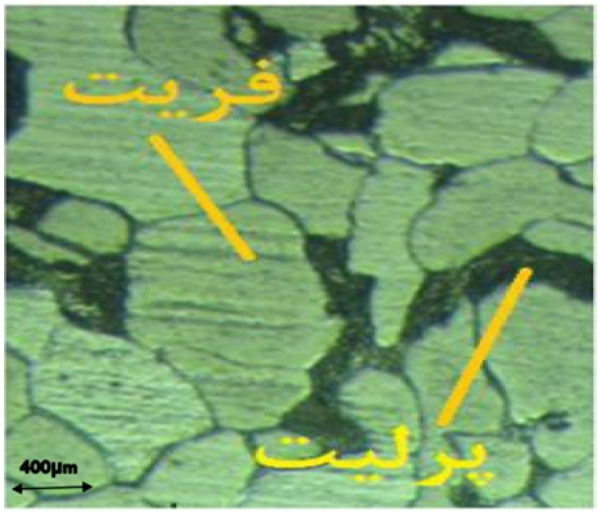
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود این پوشش که دارای ارتفاع 1 میلی‌متر می‌باشد تقریبا عاری از هرگونه تخلخل، حفره، ترک و متراکم می‌باشد شکل‌های(5تا7) به ترتیب ریزساختار فلزپایه، فصل مشترک روکش با فلزپایه و سطح روکش را نشان می‌دهند. ریزساختار فلزپایه شامل فریت و پرلیت ولی در ناحیه فصل مشترک فریت‌های سوزنی و ویدمن اشتاتن دیده می‌شود. این در حالی است که روکش شامل ترکیبی از کاربیدها و فاز لاوه می‌باشد. با توجه به شکل(8)، در ناحیه نزدیک فصل مشترک، گرادیان دمایی و نرخ سرد شدن بالا بوده و لذا جبهه انجماد به صورت مسطح می‌باشد. منطقه بعدی روکش شامل دندریت‌های ستونی ریز و ظریف بوده و در میانه روکش به علت کاهش هدایت حرارتی و کاهش نرخ سرد شدن جبهه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.3.6]

انجماد به‌صورت آشفته در آمده و شامل ترکیبی از کریستال‌های هم‌محور و ستونی در کنار هم بوده و در نواحی بالای روکش دندریت‌ها هم محور می‌باشد.



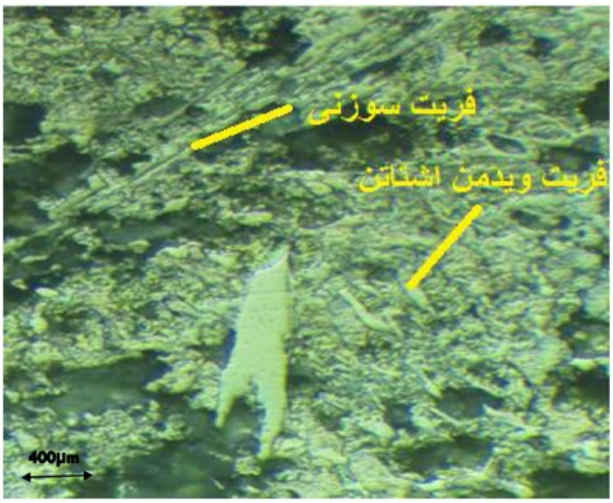
شکل 4- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ارتفاع روکش اینکونل 625 با 50 درصد همپوشانی.



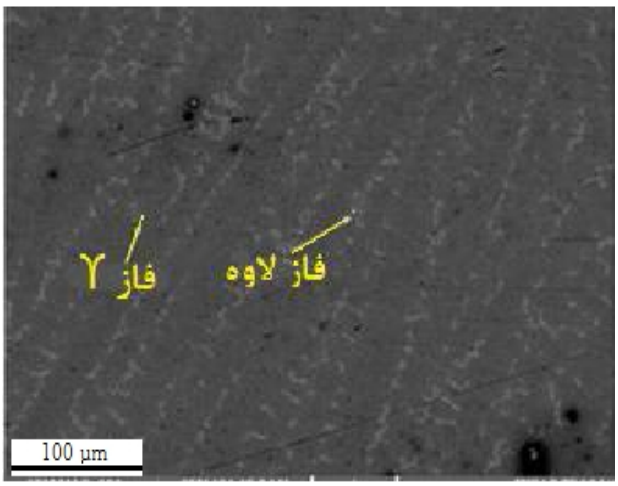
شکل 5- تصویر میکروسکوپی نوری با بزرگنمایی500 - ریز ساختار فلزپایه شامل فریت و پرلیت.

فاز گاما اولین فازی است که در حین سرد شدن مذاب اینکونل تشکیل می‌شود. این فاز طبق الگوی پراش پرتو ایکس نشان داده شده در شکل(9)، قابل مشاهده است[10 و 11].

ریزساختار آن شامل فازهای ثانویه یوتکتیکی گاما-لاوه به همراه رسوبات کاربیدی (کمپلکس غنی از نیوبیوم MC, M_6C) می‌باشد که در مراحل پایانی انجماد تشکیل شده است (جدول4). فاز یوتکتیک لاوه در دماهای بالا و یا در حین انجماد در اثر جدایش نیوبیوم در ساختار به وجود می‌آید (شکل7).



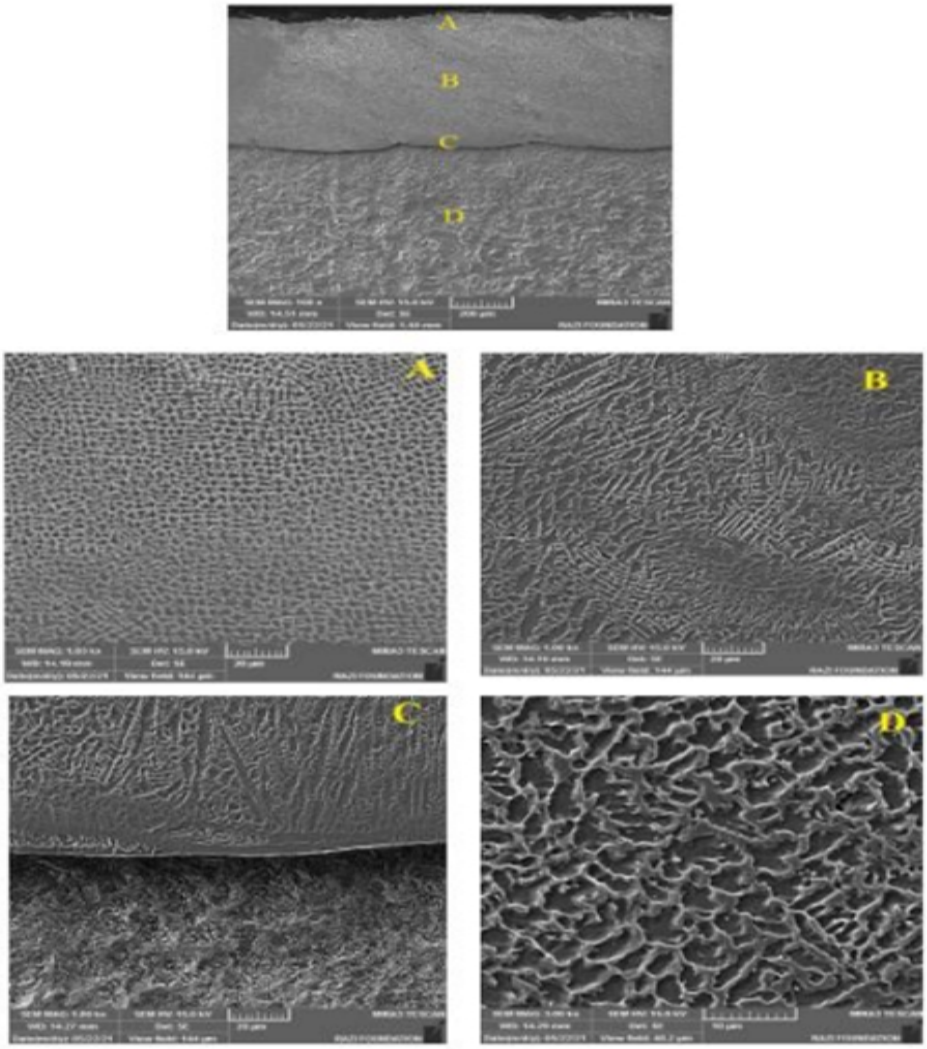
شکل6- تصویر میکروسکوپی نوری از ریز ساختار منطقه متأثر از حرارت شامل فریت ویدمن اشتاتن و فریت سوزنی.



شکل7- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختارروکش شامل فازهای لاوه و کاربیدهای آلیاژی.

پس از اعمال روکش روی زیر لایه ترکیب شیمیایی پوشش بررسی شده و با آنالیز اینکونل 625 ارایه شده در جدول (1) مقایسه شد، با توجه به شکل(10) آنالیز عنصری آهن، کروم، نیکل، مولیبدن، نیوبیم و سیلیسیم را به صورت خطی در مقطع روکش و فصل مشترک آن با فلزپایه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که مقدار نیکل وکروم به عنوان عناصر اصلی پوشش تغییر چندانی نکرده است. این موضوع نشان‌دهنده این واقعیت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.3.6]



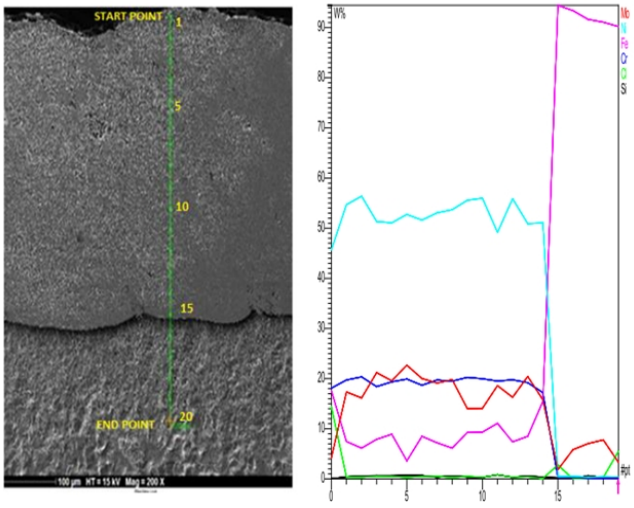
شکل8- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از روکش تا زیر لایه.

است که روکش‌کاری با پارامترهای بهینه انجام شده است. با حرکت از سطح روکش به طرف زیر لایه، آمیختگی آهن در روکش ثابت ولی در منطقه فصل مشترک افزایش یافته است. شکل(11) پروفیل ریزسختی روکش و فصل مشترک آن را با زیرلایه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سختی پوشش دارای بیشترین میزان در مقیاس ویکرز است. میانگین سختی در این قسمت 320 ویکرز است. این در حالی است که سختی فلزپایه حداکثر 135 ویکرز می‌باشد. ولی نکته قابل تامل سختی ناحیه متاثر از حرارت است. شکل(11) نشان دهنده آن است که سختی از منطقه روکش تا فلزپایه با یک شیب ملایم کاهش یافته است. علت این امر را می‌توان ناشی از دو پدیده دانست. اول اینکه مقداری از فلز پایه همراه با پودر اینکونل 625 ذوب و با آن مخلوط شده‌است. لذا درصد آهن در این قسمت افزایش و موجب کاهش سختی شده است. دوم اینکه قسمتی از فلزپایه تحت تاثیر حرارت قرار گرفته و فازهای ثانویه بوجود آمده در حین سرد شدن موجب شده است تا حدودی سختی این ناحیه را نسبت به فلزپایه افزایش دهد.

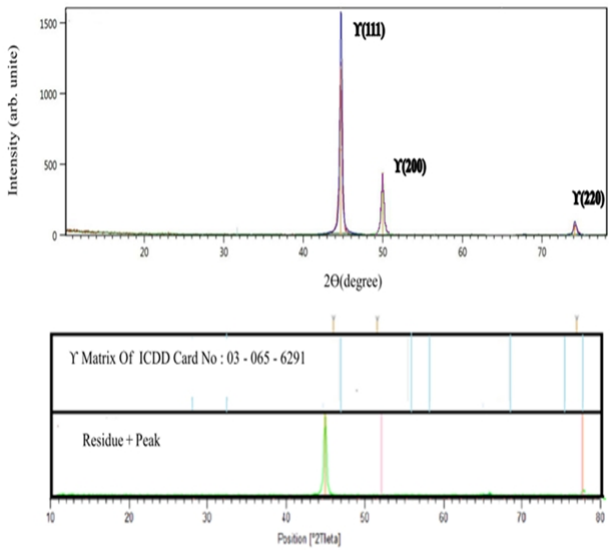
4- نتیجه‌گیری

پارامترهای مختلف روکش‌کاری بر میزان تخلخل، آمیختگی، زاویه ترشوندگی و ضخامت پوشش موثر و بهینه شدن پوشش تابع این پارامترهاست. ارتفاع روکش با افزایش نرخ تغذیه پودر و کاهش سرعت روبش لیزری افزایش می‌یابد در حالی‌که افزایش و یا کاهش توان لیزر اثر کمی روی ارتفاع روکش دارد. پهنای روکش با افزایش توان لیزر افزایش می‌یابد و با کاهش سرعت روبش پهنای روکش کاهش می‌یابد و نرخ پاشش پودر

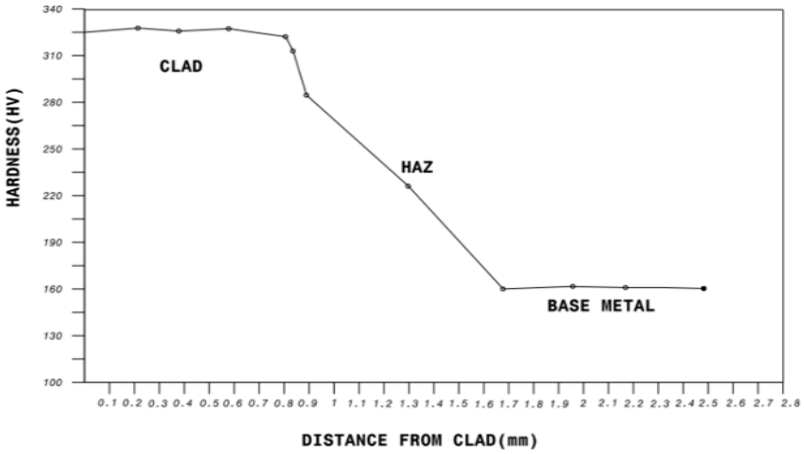
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.3.6]



شکل10- آنالیز عنصری از سطح روکش تا فلزپایه.



شکل9- الگوی پراش پرتو ایکس از سطح روکش.



شکل11- نمودار پروفیل سختی مقطع روکش از سطح آن تا زیرلایه.

جدول 4- ترکیب شیمیایی ریز ساختار روکش با 50 درصد هم پوشانی شامل فازهای Y و لاوه برحسب درصد وزنی.

نقاط	ترکیب شیمیایی بر حسب درصد وزنی				
	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe
فاز Y	۵۷/۵	۲۳/۵	۸/۵	۲/۶	۹/۹
فاز لاوه	۴۴/۵	۱۸/۷	۱۳/۹	۱۲/۳	۷/۲

اثر ناچیزی دارد. با افزایش توان لیزر عمق نفوذ و درصد آمیختگی افزایش می‌یابد. با افزایش توان لیزر و سرعت روبش، زاویه ترشوندگی کاهش می‌یابد و افزایش نرخ تغذیه پودر، سبب افزایش زاویه ترشوندگی می‌شود. روکشی از لحاظ خوردگی مطلوب می‌باشد که دارای کمترین میزان آمیختگی، زاویه ترشوندگی کم، ارتفاع بهینه و عاری از هرگونه عیب باشد. با توان W 300، سرعت روبش سطح 10 mm/s و نرخ تزریق‌پودر 20mg/s و آمیختگی 12%، پوشش عاری از تخلخل و مطلوب ایجاد گردید. درهنگام روکش‌کاری‌سطوح، همپوشانی پاس‌های مجاور به میزان 50% بهترین نتیجه از کاهش عیوب را ایجاد می‌کند. در فرایند روکش کاری لیزری بالا بودن سرعت انتقال حرارت سبب ظریف‌تر شدن ریزساختار و یکنواختی در ترکیب شیمیایی سطح پوشش خواهد شد. ریزساختار قسمت بالایی پوشش به صورت دندریتی هم محور و در نزدیک فصل مشترک‌به صورت‌ستونی می‌باشد. نتایج سختی‌سنجی نشان‌دهنده آن است که دو عامل ترکیب آلیاژی و ریزساختار در پروفیل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.3.6]

سختی موثر است. به همین جهت سختی فصل مشترک و ناحیه متاثر از حرارت با یک شیب ملایم از 320VHN در روکش به 150VHN در زیر لایه می‌رسد.

منابع

1- S.Eric, Supper alloys, WAILEY, 2012.

2- ک. زنگنه مدار، ا. فیضی، مقدمه ای بـر فلـزات و آلیاژهـای هوایی، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، 1387.

3- ASM specialty Handbook: Nickel, Cobalt and Their alloys.

4-J.R. Davis, ”Corrosion of Weldments”, ASM International, 2006.

5- ASM Handbook, Volume 20, pages 357-382.

6- ر. شجاع رضوی، روکش‌کاری لیزری، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، چاپ اول، 1395.

7- ر. شجاع رضوی، م. عرفان‌منش، فراوری مواد با لیزر، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، چاپ اول، 1393.

8- F. Ostovan, E. Hasanzadeh, M. Toozandehjani, E. Shafiei, K. R. J, A. Amrin, "Microstructure, Hardness and Corrosion Behavior of Gas Tungsten Arc Welding Clad Inconel 625 Super Alloy over A517 Carbon Steel Using ERNiCrMo3 Filler Metal", Journal of Materials Engineering and Performance. 29, 6919–6930 (2020)

9- M. Zarifi, M. Esmailzadeh, S. N. Hosseini, E. Shafiei, "Wear and Corrosion Behaviors of Inconel 625- Cladded Layer on P460N Steel in Different Environments", Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 52, Issue 4, p.1972-1984

10- D. Verdi, M.A. Garrido, C.J. Monez, P. Poza, "Cr3 C_2 incorporation into an Inconel 625 laser cladded coating: Effects on matrix microstructure, mechanical properties and local scratch resistance", Materials and Design 67- (2015) 20-27.

11-Yi-tong LONG, Pu-lin NIE, Zhu-guo LI, Jian HUANG, Xiang LI, Xin- mei XU, "Segregation of niobium in laser cladding Inconel 718 superalloy", Transactions Nonferrous Metals Society. China 26 (2016) 431- 456.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.3.6]