نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، بهار و تابستان 1399، صفحه 156-147

تاثیر درصد هم پوشانی تک پاس‌های روکش بر ریزساختار و خواص مکانیکی روکش کاری با لیزر پودر اینکونل625 بر روی فولاد ASTM A592

پیمان شایان فر*، حبیب دانش منش، کمال جانقربان

دانشکده مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

(دریافت مقاله: 1399/03/08 ؛ پذیرش مقاله: 1399/05/19)

چکیده

در این تحقیق اثر درصد هم پوشانی تک پاس های روکش بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی روکش کاری با لیزر پودر اینکونل625 بر روی فولاد کوئنچ و تمپر ASTM A592 مورد بررسی قرار گرفت. جهت مشخصه‌یابی ساختاری، فاصله بین دندریتی ارزیابی شد و برای این منظـور از میکروسکوپ الکترونی روبشی و نرم افزار Digimizer استفاده گردید. جهت بررسی خواص مکانیکی، مدول الاستیک، چقرمگی و ریزسختی مورد ارزیابی قرار گرفت. در ارزیابی مدول الاستیک از روش فرو رونده نوپ و در ارزیابی چقرمگی از روش ایوانز استفاده شد. بعـد از بررسـی‌هـای انجام شده مشخص گردید که در هم پوشانی تک پاس های روکش 50 درصد، میزان حرارت ورودی کم تر از هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد است، همچنین دارای ساختار ریزتر و خواص مکانیکی به مراتب بالاتری می باشد، به طوری که فاصله بین دندریتی در هم پوشانی تک پاس های روکش 50 درصد، حدود 0/91 میکرومتر، قطر میانگین ستون های دندریتی حدود 0/32 میکرومتر، ریزسختی حدود 10 درصد، سختی نوپ حدود 9 واحد، مدول الاستیک حدود 37 گیگاپاسکال و چقرمگی حدود 9 مگاپاسکال در مجذور متر از هم پوشانی 75 درصد بیشتر است.

کلمات کلیدی: روکش کاری با لیزر، اینکونل 625، فولاد A592، ریزساختار، خواص مکانیکی.

The effect of overlapping percent on microstructure and mechanical properties of laser cladding of Inconel 625 powder on ASTM A592 steel

P. Shayanfar*, H. Daneshmanesh, K. Janghorban

Department of Materials Science and Engineering, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

(Received 28 May 2020 ; Accepted 9 August 2020)

Abstract

In this study, the effect of overlapping percentage on microstructure and mechanical properties of a single-pass coating by Inconel 625 powder laser has been investigated for quench-tempered ASTM A592 steel. In order to have a structural analysis, the inter dendritic distance was evaluated. For this purpose, scanning electron microscopy (FESEM) and Digimizer software were adopted. In order to investigate mechanical properties, elastic modulus, toughness, and micro hardness were evaluated. For the evaluation of elastic modulus, Noop indentation method was used, and for toughness

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: pay.shay@yahoo.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

studies, Evans method was applied. After the investigation, it was found that in the overlapping of single-pass 50% coatings, the heat input value is lower than overlapping in single-pass 75% coatings. It also contains a finer structure with much higher mechanical properties. This is in such a way that the inter dendritic distance in single-pass 50% coatings is about 0.91 µm. The average diameter of the dendritic columns is about 0.32 µm, hardness value is about 10%, Knoop hardness is about 9 units, elastic modulus is about 37 GPa, and toughness is about 9 MPa $m^{1/2}$ higher in comparison with the 75% overlapping case.

Keywords: Laser cladding, Inconel 625, A592 steel, Microstructure, Mechanical properties.

1- مقدمه

میزان هم پوشانی در روکش کاری لیزر از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. تحقیقات متعددی در سال های اخیر در این رابطه انجام شده است. به عنوان مثال، عرفان منش میزان تاثیر درصد هم پوشانی تک پاس های روکش کاربید-تنگستن را روی فولاد زنگ نزن 321 را مورد بررسی قرار داد و این نتیجه حاصل شد که تغییر در میزان درصد هم پوشانی‌های می تواند برروی خواص مکانیکی و متالورژیکی روکش ها تاثیر گذار باشد [1]. نکته مورد توجه در مورد روکش کاری فولادهای کوئنچ و تمپر، میزان حرارت ورودی می باشد، زیرا حرارت ورودی زیاد می تواند باعث ایجاد ترک در زیر لایه گردد [2]. حساسیت این نوع فولادها به حرارت ورودی حین روکش کاری و جوشکاری به حدی است که باید از بعضی روش های جوشکاری مانند ESW و SAW در مورد این فولادها اجتناب کرد [2و3]. جهت به حداقل رساندن آثار مخرب حرارت ورودی حین روکش کاری و جلوگیری از ایجاد ترک، از روش روکش کاری با لیزر دراین تحقیق استفاده شد. همان طور قبلا گفته شد، روکش کاری با لیزر دارای کمترین میزان حرارت ورودی و سرعت سرد کردن بالا می باشد که این امر میزان وجود ترک را در فولاد A592 را به حداقل می رساند [4]. حساسیت این فولاد به حرارت ورودی در جایی بیشتر خود را نشان می دهد که ابعاد قطعه روکش شده کوچک باشد به طوری که استفاده از روش های روکش کاری قوسی مانند GTAW و SMAW نیز می تواند باعث ایجاد حرارت ورودی زیادی گردد، در این مواقع استفاده از روش لیزر اهمیت دوچندان پیدا می کند [5و6]. از طرفی فولاد A592 دارای موارد کاربرد وسیعی می باشد که یکی از این موارد استفاده در محیط های دریایی است. این فولاد می تواند جهت ساخت دریچه خروج بر روی بدنه شناور استفاده گردد به طوری‌که در معرض آب دریا و تنش حاصل از بدنه شناور قرار می گیرد و با توجه به خورندگی زیاد آب دریا در مورد این فولاد، نیاز به روکش کاری با یک روکش مقاوم به خوردگی می‌باشد. به همین دلیل در این تحقیق سعی شده است برای مقاوم کردن این فولاد در برابر آب دریا و همچنین بهبود خواص مکانیکی به دلیل پایین بودن حرارت ورودی روش روکش کاری پودری با لیزر از این روش استفاده گردد [7]. نظر به این که اینکونل 625 دارای مقاومت خوبی در محیط های خورنده حتی در دمای بالا می باشد و همچنین دارای خواص مکانیکی بالاتر نسبت به فولاد زنگ نزن می باشد [8]، لذا جهت حصول این هدف از پودر اینکونل 625 استفاده شد. در سال های اخیر تحقیقات متعددی در رابطه با روکش کاری فلزات توسط آلیاژهای پایه نیکل روی فلزات غیر هم جنس انجام شده است [9-14]، اما با این حال در مورد روکش کاری فولاد A592 توسط پودر اینکونل625 از طریق روش لیزر، هیچ گونه تحقیق علمی یافت نشد و می توان این مقاله را اولین تحقیق علمی در این زمینه دانست.

2- مواد و روش انجام آزمایش

زیر لایه استفاده شده در این آزمایش از نوع فولاد ASTM A592 و به ابعاد 10×60×100 میلی متر می باشد. پودر اینکونل 625 استفاده شده ساخت شرکت Jiangwu boda با اندازه ذره 90-40 میکرومتر می باشد. ترکیب شیمیایی پودر اینکونل 625

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

که از شرکت سازنده اعلام شده و فولاد A592 در جدول (1) آمده است و نتایج آزمون آنالیز شیمیایی در جدول (2) نمایش داده شده است که بررسی میزان درصد عناصر نشان دهنده درستی اطلاعات داده شده از طرف کارخانه سازنده است. مورفولوژی ذرات پودر اینکونل 625 که از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی به دست آمده است و در شکل (1) نشان داده شده است.

لازم به ذکر است درصد هم پوشانی تک پاس های روکش 25 درصد نیز در این تحقیق انجام شد اما به دلیل کم بودن بیش از اندازه ارتفاع روکش امکان انجام آزمون مکانیکی بر روی روکش میسر نبود به همین دلیل از ارائه گزارش علمی در این تحقیق صرف نظرشد. در این تحقیق از لیزر (Nd YAG) پالسی استفاده شد. لیزر استفاده شده دارای توان 700 و قطر پرتو لیزر روی زیر لایه 1 میلی متر بود. گاز محافظ استفاده شده از نوع آرگون با نرخ تزریق 20 لیتر بر دقیقه می باشد. فرکانس لیزر 35 هرتز و زمان 3 میکروثانیه تنظیم شد. هم پوشانی تک پاس های روکش در حالت های 50 و 75 درصد در توان 300 وات، نرخ تزریق پودر 400 میلی گرم بر ثانیه و سرعت روبش 3 متر بر ثانیه بود. ابعاد نمونه ها به صورت دایره‌ای به شعاع حدود 2/5 سانتی متر درنظر گرفته شد. (شکل (2)).

سطح مقطع عرضی نمونه ها توسط محلولی از مقادیر مساوی از مخلوط اسیدهای کلریدریک ، نیتریک و استیک اچ شدند و سپس توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی عکس برداری شدند.

به منظور ارزیابی سختی نمونه ها پس از روکش کاری لیزری طبق استاندارد ASTM E384-99 با استفاده از دستگاه ریزسختی سنج لیتز ، ساخت آلمان استفاده شد. در آزمون ریزسختی از بار اعمالی 100 گرم استفاده شد. میکروسختی ها از مقاطع عرضی روکش ها انجام شد. جهت به دست آوردن مدول الاستیک از رابطه ایوانز (رابطه (1)) استفاده شد.

$$E = \frac{(-\alpha H_K)}{\left(\frac{b'}{a'}-\frac{b}{a}\right)} \qquad (۱)$$

در جایی که E مدول الاستیک (GPa)، H_K ریزسختی نوپ به دست آمده از فرورونده، $\frac{b'}{a'}$ نسبت قطر کوچک به بزرگ اثر فرورفتگی پس از بازگشت الاستیک، $\frac{b}{a}$ نسبت معین هندسه فرورونده نوپ (0/14) و α مقدار ثابت 0/45 است [25و26].

برای این منظور از دستگاه ریزسختی سنج لیتز مدل metallux 3 استفاده شد. دندانه‌گذاری در بار 100 gf (0/981 N) برای زمان 15 ثانیه، روی سطح مقطع عرضی پولیش شده پوشش انجام گرفت. و همچنین جهت محاسبه میزان چقرمگی از رابطه (2) استفاده گردید [26].

$$K_{IC} = 0.079\left(\frac{P}{a^{3/2}}\right)\log\left(4.5\,\frac{a}{c}\right) \qquad 0.6 \le \frac{c}{a} \le 4.5 \qquad (۲)$$

که در این رابطه K_{IC} چقرمگی شکست ($MPa\ m^{1/2}$)، P نیروی وارده از طرف فرورونده بر حسب نیوتن، a نصف قطر اثر فرورفتگی بر حسب میلی متر و c طول ترک از مرکز فرورفتگی بر حسب میلی متر است. این رابطه در محدوده‌ای قابل قبول است که نسبت c به a بین 0/6 تا 4/5 باشد. شکل (3) شماتیک آزمایش چقرمگی شکست پوشش با استفاده از رابطه (2) را نشان می‌دهد. برای مشخص سازی نیروی مناسب فرورونده برای استفاده در مدل ایوانز، نیروهای 20 تا 150 کیلوگرم (20، 50، 100 و 150 کیلوگرم) در سطح مقطع پوشش‌ها با استفاده از فرورونده‌ی ویکرز برای مدت 15 ثانیه اعمال شد.

3- نتایج و بحث

در شکل(4) تصویر میکروسکوپ روبشی از روکش 50 و 75 درصد نمایش داده شده است. همان طور که درتصویر مشخص است، ارتفاع روکش 75 درصد نسبت به پوشش 50 درصد بیشتر می باشد. میزان ارتفاع، رقت، درصد تخلخل، عمق نفوذ و وجود ترک در هر دو پوشش در جدول (3) آمده است. با توجه به اطلاعات جدول(3) و همچنین شکل(4-ج)، می توان به این نتیجه رسید که روکش با هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد دارای ارتفاع بیشتر است، اما دارای درصد تخلخل بیشتر و مهم تر از همه، دارای ترک نسبت به روکش با هم پوشانی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

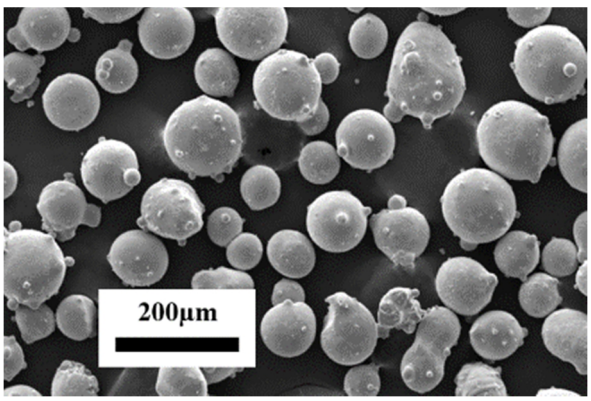
جدول 1- آنالیز شیمیایی پودر اینکونل 625 و فولاد A592

مواد	حالت	Elements wt(%)											
		دیگر عناصر	Fe	Nb	Si	Al	Mn	P	S	Mo	Co	C	Cr	Ni
اینکونل625	پودر	3<	1.6	5	-	2	-	-	-	11.8	1	-	22	Rem
فولادA592	ورق	0.5<	Rem	-	0.46	-	0.83	0.025	0.025	0.24	-	0.15	0.57	-

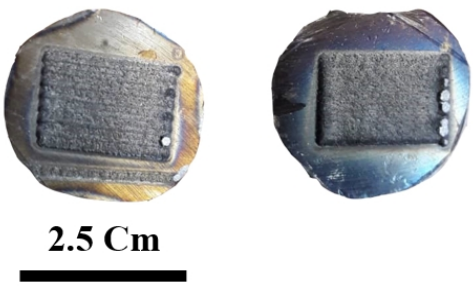
جدول 2- آنالیز شیمیایی پودر اینکونل 625 و فولاد A592

عناصر	Nb	Mo	Cr	Ni
درصد وزنی پودر اینکونل625	4.1	8.54	21.78	65.58

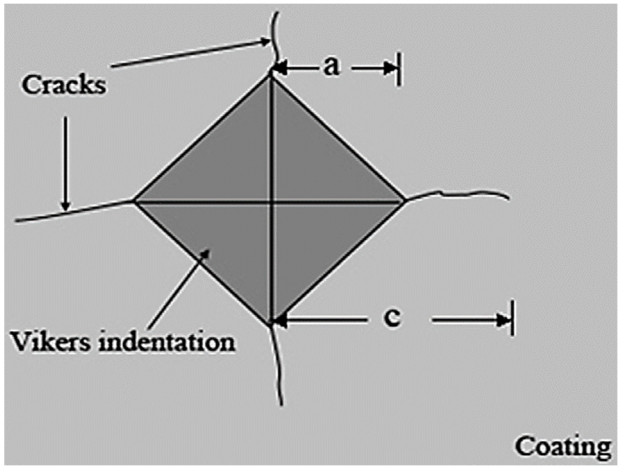
تک پاس‌های روکش 50 درصد می باشد. علاوه بر این، در هنگام روکش کاری در یک فاصله معین و مساوی، میزان پاس‌های روکش در نمونه 75 درصد نسبت به نمونه 50 درصد بیشتر است و در نتیجه میزان حرارت ورودی بیشتری به روکش وارد می گردد. وجود حرارت و ذوب مجدد بیشتر لایه های قبلی باعث ایجاد تخلخل و در نهایت ترک در ساختار نمونه 75 درصد شده است [15و16]. اثر حرارت ورودی بر ریزساختار در قسمت های بعد توضیح داده خواهد شد.



شکل 1- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات پودر اینکونل 625 در بزرگنمایی 400 برابر



شکل 2- تصویر نمونه های هم پوشانی تک پاس های روکش، نمونه سمت راست روکش 75 درصد و نمونه سمت چپ روکش 50 درصد.



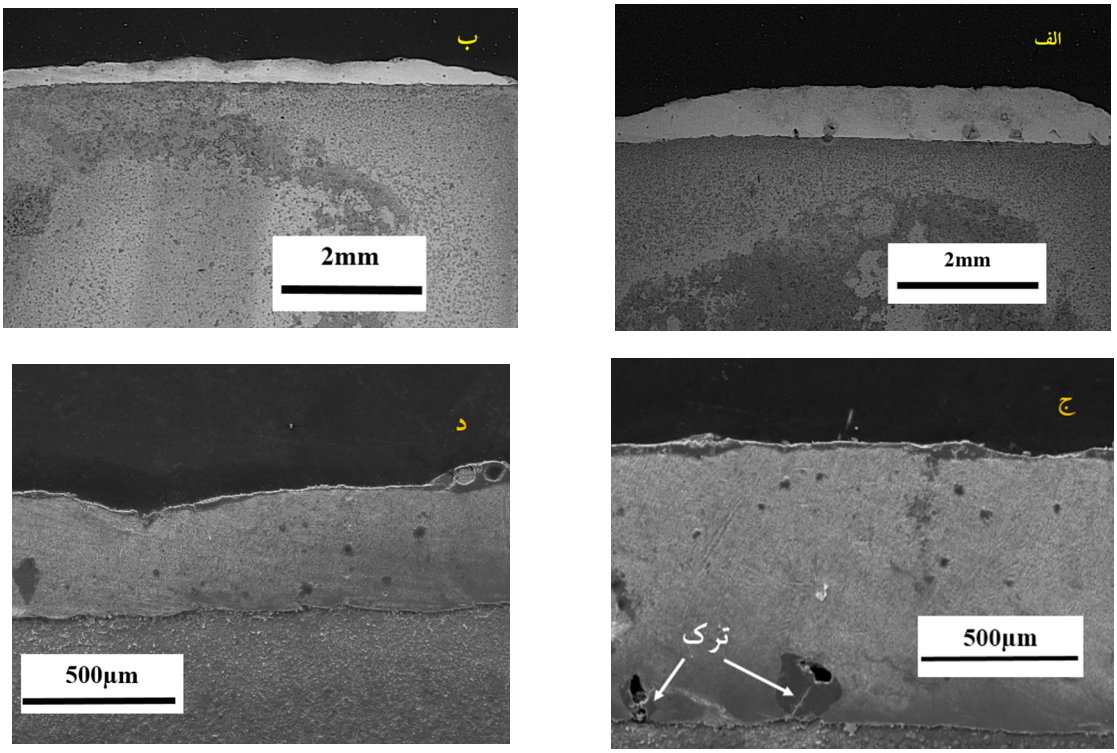
شکل 3- شماتیک آزمایش تافنس شکست (K_{IC}) [32]

3-1- تاثیر حرارت ورودی بر ریزساختار

در شکل (5)، ریزساختار هر نمونه نشان داده شده است. از تصاویر مشخص است که ساختار هر دو نمونه از نوع دندریتی ستونی می باشد. همچنین میانگین فاصله بین ستون های دندریت ها و میانگین ضخامت ستون های دندریت ها در پوشش 75 درصد نسبت به پوشش 50 درصد بیشتر است. این اختلاف میانگین در فاصله و ضخامت دندریت ها در شکل (6) به صورت نمودار نشان داده شده است.

برای توضیح اختلاف در فاصله میان دندریت ها و ضخامت آن‌ها باید به این نکته اشاره کرد که در این دو نوع پوشش هیچ یک از پارامترهای جوش لیزر اعم از توان، نرخ پاشش پودر و نرخ روبش تغییر نکرده است، ولی در پوشش با هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد، به علت این که در یک فاصله مشخص نسبت به پوشش با هم پوشانی تک پاس های روکش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 4- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی: الف) و ج) هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد، ب) و د) هم پوشانی تک پاس های روکش 50

50 درصد، تعداد پاس بیشتری وجود دارد، در نتیجه حرارت ورودی بیشتری در واحد طول نسبت به هم پوشانی تک پاس‌های روکش 50 درصد ایجاد می گردد [3و17]. با توجه به این که جنس زیر لایه و پودر در هر دو پوشش یکی است، در نتیجه افزایش حرارت ورودی در هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد باعث کاهش بیشتر ضریب (G*R) (گرادیان دما=G و نرخ رشد =R)، نسبت به هم پوشانی تک پاس های روکش 50 درصد است که این کاهش بیشتر باعث افزایش بیشتر فاصله بین ستون های دندریت و ضخامت ستون های دندریت‌ها می گردد [19و20]. با توجه به شکل (6)، مشخص می گردد که فاصله ستون های دندریت ها و ضخامت ستون ها در هم‌پوشانی تک پاس های روکش 50 درصد نسبت به پوشش 75 درصد، به طور میانگین حدود 23 و 35 درصد کاهش داشته است.

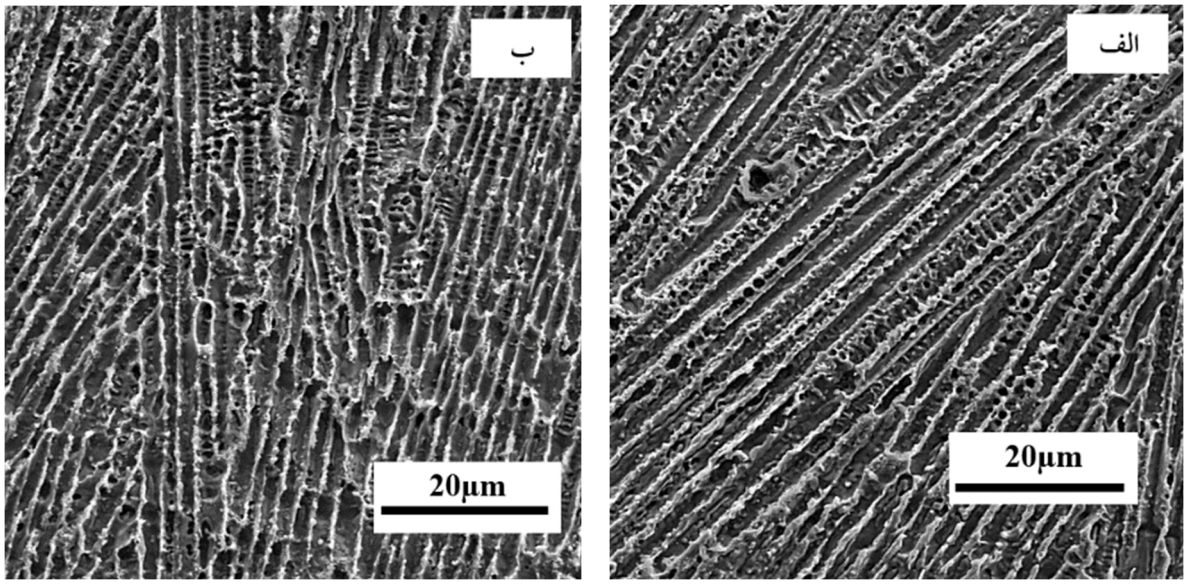
3-2- بررسی خواص مکانیکی

3-2-1- ریزسختی

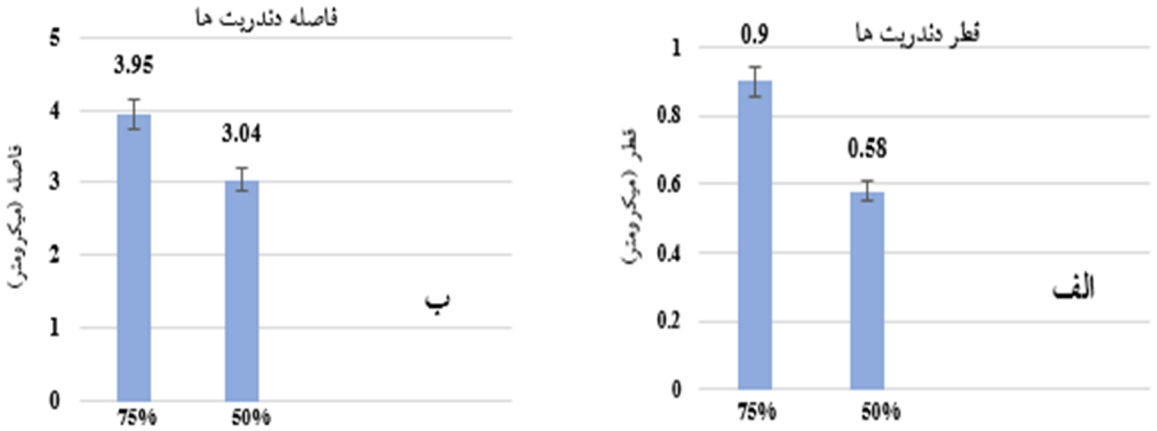
شکل(7)، نمودار ریزسختی دو هم پوشانی تک پاس‌های روکش مختلف را نشان می دهد. نمودار به چهار قسمت فلز پایه، ناحیه مجاور فلز پایه، میانی و مجاور روکش تقسیم شده است. در نمودار دیده می شود که در قسمت مجاور سطح بالایی روکش اختلاف سختی نسبت به قسمت های دیگر بیشتر است و این اختلاف در ناحیه میانی کمتر شده و در قسمت مجاور فلز پایه به حداقل خود رسیده است.اما همان طور که از نمودار سختی مشخص است، سختی هم‌پوشانی تک پاس های روکش 50 درصد تقریباً در تمام نقاط از هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد بیشتر است. این اختلاف در سختی در قسمت های بالا پوشش بیشتر است و در قسمت های پایین به حداقل می رسد. از آن جایی که کم شدن فاصله میانگین ستون های دندریت باعث ظریف شدن ریزساختار و در نهایت باعث افزایش استحکام می گردد [21-23]، کاهش سختی از مرز پوشش به طرف سطح پوشش قابل توجیه است. در اصل هر جا که اختلاف فاصله میانگین بین ستون های دندریتی و ضخامت ستون ها بیشتر شده است، اختلاف بین سختی در آن قسمت نیز بیشتر می گردد.

در کل بعد از بررسی نمودار ریزسختی، مشخص می گردد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 5- نمایش ریزساختار دندریتی: الف) هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد و ب) هم پوشانی تک پاس های روکش 50 درصد



شکل 6- الف) نمودار ضخامت ستون های دندریت ها نزدیک سطح پوشش در هم پوشانی تک پاس های روکش 50 و 75 درصد و ب) نمودار فاصله دندریت ها نزدیک سطح پوشش در هم پوشانی تک پاس های روکش های 50 و 75 درصد

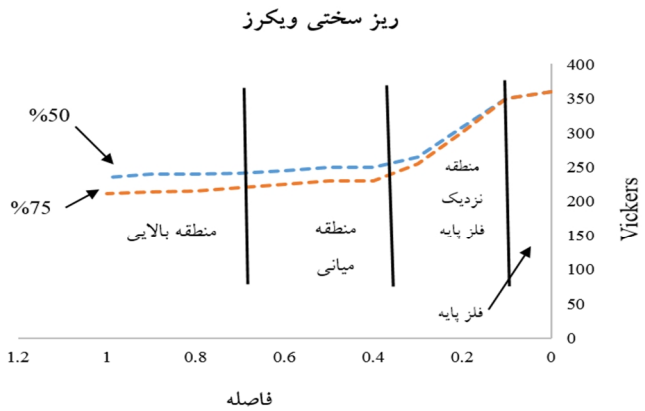
هم‌پوشانی تک پاس های روکش 50 در صد نسبت به هم پوشانی تک پاس های روکش با درصد 75 درصد دارای سختی بیشتری است.

3-2-2- ارزیابی مدول الاستیک

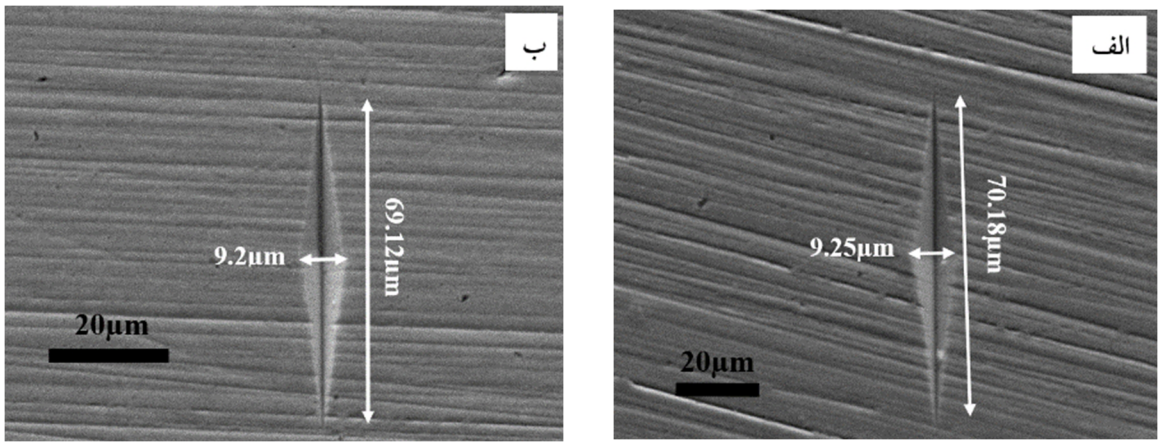
شکل (8)، تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فرورونده نوپ را بر روی پوشش نشان می دهد. شکل لوزی به وجود آمده، بر اثراعمال بار 100 گرم بر فرورونده ایجاد شده است. همان طور که در شکل نشان داده شده است، میزان فرورفتگی در هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد بیشتر است و این نشان دهنده ساختار نرم تر هم پوشانی تک پاس‌های روکش 75 درصد نسبت به 50 درصد و در نتیجه مدول الاستیک پایین تر می باشد [24]. با اندازه گیری قطرهای کوچک و بزرگ اثر لوزی شکل و قرار دادن در رابطه (1)، میزان سختی نوپ هر دو نمونه به دست می آید.

شکل (9-الف)، نمودار سختی نوپ هم پوشانی تک پاس های روکش 75 و 50 درصد را نشان می دهد. در این نمودار سختی نوپ هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد و 50 درصد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 7- نمودار ریزسختی پوشش با هم پوشانی تک پاس های روکش 50 و 75 درصد



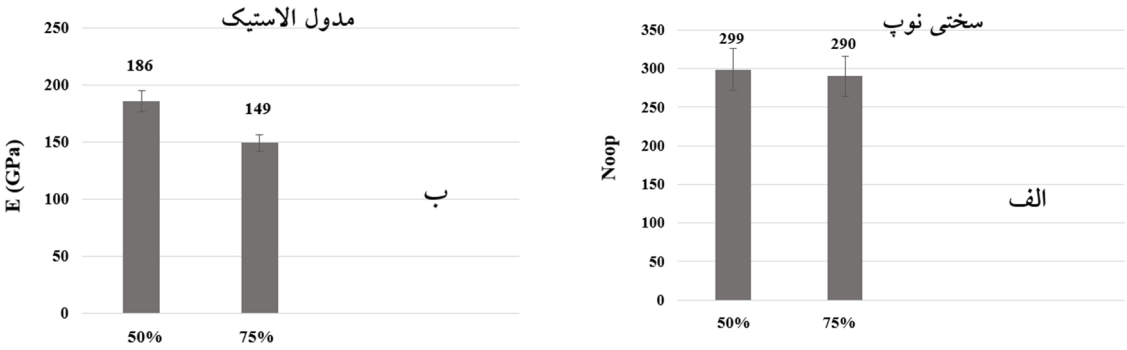
شکل 8- تصاویر میکروسکوپی الکترونی از اثر دندانه گذاری فرورونده ویکرز روی سطح مقطع پوشش:
الف) هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد و ب) هم پوشانی تک پاس های روکش 50 درصد

به ترتیب 290 و 299 می باشد که نشان دهنده سختی بالاتر هم پوشانی تک پاس های روکش ۵۰ درصد می باشد. اما به دست آوردن سختی نوپ پیش زمینه ای برای محاسبه مدول الاستیک می باشد. با قرار دادن مقدار سختی نوپ در رابطه (1)، میزان مدول الاستیک به دست می آید [27و28]. شکل (9-ب)، نمودار مدول الاستیک هم پوشانی تک پاس های روکش 75 و 50 درصد را نشان می دهد. میزان مدول الاستیک هم‌پوشانی تک پاس های روکش 75 و 50 درصد به ترتیب 149 و 186 مگاپاسکال می باشد. دلیل بالا بودن مدول الاستیک نمونه 50 درصد می تواند به علت وجود سختی بالاتر باشد که خود نتیجه وجود ریزساختار ظریف تر نسبت به هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد دانست [21و22]. نمودار سختی نوپ و مدول الاستیک با نمودار سختی ویکرز هم‌خوانی دارد، سختی از هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد زیرا در نمودار سختی ویکرز، در تمام نقاط پوشش 50 درصد، بیشتر است که دلیل آن در قسمت قبل توضیح داده شد. اما دلیل دیگر که باعث شده است سختی نوپ و مدول الاستیک هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد کمتر باشد و همان طور که در شکل (4-ج) نشان داده شد، این است که در این پوشش میزان تخلخل و ترک در ریزساختار نسبت به هم‌پوشانی تک پاس های روکش 50 درصد بیشتر می باشد. مطالعات نشان می دهد که تخلخل ها و ریزترک ها مدول الاستیک را کاهش می‌دهند [29].

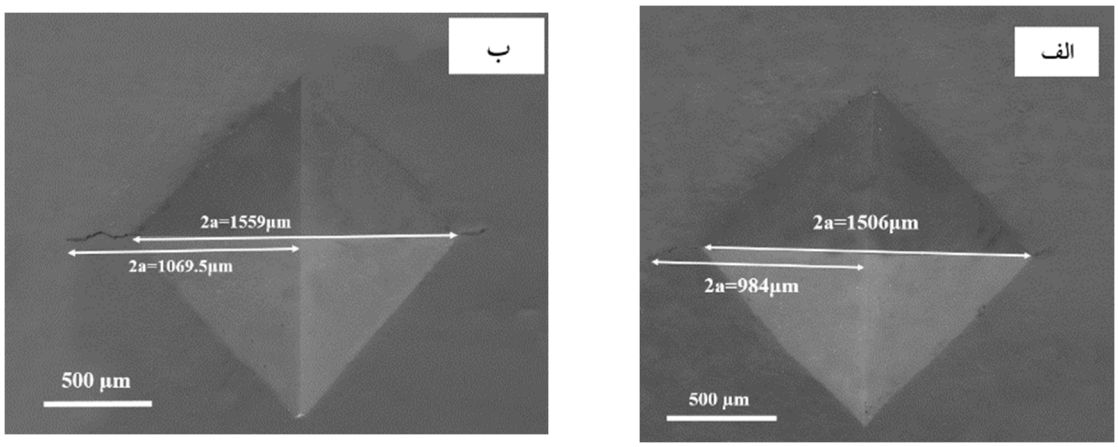
3-2-3- ارزیابی چقرمگی روکش ها با هم پوشانی تک پاس های روکش 50 و 75 درصد

جهت به دست آوردن چقرمگی شکست، از مدل ایوانز استفاده شد [30-32]. در این مدل می‌بایست نیروی وارد شده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل ۹- الف) نمودار سختی نوپ برای هم پوشانی تک پاس های روکش ۵۰ و ۷۵ درصد و ب) میزان مدول الاستیک برای هم پوشانی تک پاس های روکش ۵۰ و ۷۵ درصد

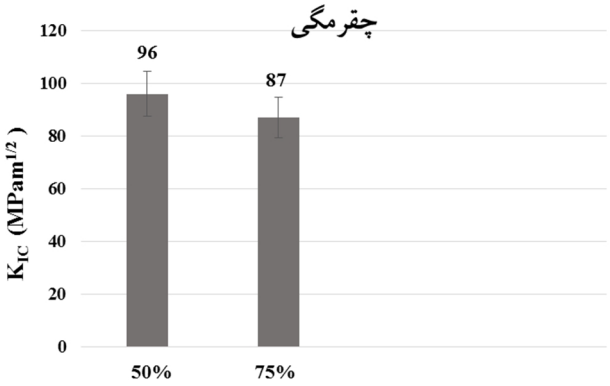


شکل 10- تصاویر میکروسکوپی الکترونی از اثر دندانه گذاری فرورونده ویکرز روی سطح مقطع پوشش جهت محاسبه چقرمگی شکست ازسطح مقطع پوشش در بار 150 کیلوگرم، الف) هم پوشانی تک پاس های روکش 50 درصد و ب) هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد روکش 50 و 75 درصد

بر فرورونده ویکرز به مقداری باشد تا بتواند در روکش ترک ایجاد کند. در این آزمون از نیرو های متعدد (20، 50، 100 و 150 کیلوگرم) جهت اعمال نیرو استفاده شد و در نهایت در بار 150 کیلوگرم آثار ترک در روکش پدیدار شد. شکل اثر فرورونده ویکرز و ترک بوجود آمده در شکل (10)، نشان داده شده است. ترک های ایجاد شده از گوشه فرورونده به سمت بیرون رشد کرده است که با تحقیقات دیگر محققان تطابق دارد [29]. با استفاده از نرم افزار Digimizer اندازه یکی از قطرها و طول ترک تا مرکز اثر فرورونده بر حسب میکرومتر اندازه گیری شد. دیده می شود که اندازه ترک در نمونه 75 درصد دارای قطر و طول ترک بیشتری است. با استفاده از رابطه 2 و قرار دادن مقـادیر انـدازه گیـــری شـــده در رابطـه، مقادیر چقرمگی شکست برای هر دو نمونه به دست آمد. در شکل (11)، نمودار میزان چقرمگی دو نمونه 50 و 75 درصد نمایش داده شده است. در این نمودار مشخص می باشد که چقرمگی نمونه 50 درصد حدود $9\ MPa.m^{1/2}$ بیشتر از نمونه 75 درصد است. وجود چقرمگی بیشتر نمونه 50 درصد دلیل بر مقاومت بیشتر این پوشش در مقابل رشد ترک می باشد [18]. همان طور که قبلاً گفته شد، نمونه 50 درصد دارای ریزساختار ظریف تر با فاصله میانگین دندریتی کمتر نسبت به ساختار نمونه 75 درصد می‌باشد. علاوه بر این دارای نمودار سختی بالاتر در همه مناطق پوشش و همچنین دارای سختی نوپ بیشتر و در نهایت مدول الاستیک بالاتر نسبت به نمونه 75 درصد می باشد.

تحقیقات قبلی نشان داده است که ساختار ظریف‌تر و ریزدانه‌تر،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 11- نمودار چقرمگی روکش ها با هم پوشانی تک پاس های روکش 50 و 75 درصد

مقاومت بالاتری نسبت به رشد ترک نسبت به ریزساختارهای خشن تر و درشت دانه تر از خود نشان می دهند [20]. در اصل می توان چنین استنباط کرد که ایجاد حرارت ورودی بیشتر در نمونه 75 درصد، باعث خشن شدن ساختار دندریتی و در نهایت افت چقرمگی شکست در این نمونه گردد. از طرفی وجود ترک های ریز در نمونه 75 درصد که قبلاً نشان داده شد و همچنین حفره های بیشتر نسبت به نمونه 50 درصد نیز می‌تواند باعث کاهش چقرمگی گردد [32].

4- نتیجه‌گیری

بعد از بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی روکش ها با هم پوشانی تک پاس های روکش 50 و 75 درصد، نتایج زیر حاصل شد:

- ریزساختار هر دو روکش با هم پوشانی تک پاس های روکش متفاوت، از نوع دندریتی ستونی می باشد.
- نمونه هم پوشانی تک پاس های روکش 50 درصد دارای ساختار ظریف تر با فاصله بین دندریتی حدود 0/91 میکرومتر و میانگین قطر دندریت حدود 0/32 میکرومتر کمتر است.
- در ریزساختار نمونه هم پوشانی تک پاس های روکش 75 درصد، میزان تخلخل بیشتر بود و علاوه بر این دارای ترک نیز می‌باشد.
- نمونه هم پوشانی تک پاس های روکش 50 درصد در ریزسختی حدود 10 درصد، سختی نوپ حدود 9 واحد، مدول الاستیک حدود 37 گیگاپاسکال و چقرمگی حدود 9 مگاپاسکال در مجذور متر از هم پوشانی 75 درصد بیشتر است.

منابع

[1] عرفان منش. م، توسعه پوش های کامپوزیتی WC-Co روکش کاری لیزری شده روی فولاد زنگ نزن 321 ، دانشگاه سمنان، سمنان، 1397.

[2] Kou. S, A simple index for predicting the susceptibility to solidification cracking, Weld. J. 94 (2015) 374s–388s.

[3] Kou. S, Welding Metallurgy, second ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.

[4] Toyserkani. E, Khajepour. A, S.F. Corbin, Laser cladding, CRC press 2004.

[5] Winsor. F .J, in ASM Handbook, Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering ASM International, Materials Park, 1993, p. 662.

[6] Inagaki, M., et al., Fusion Welding Processing, Seibundo Shinko Sha, Tokyo, 2005.

[7] Koch. G. H, Beavers. J. A, and Berry. W. E, Marine Corrosion, Columbus Division, Treatise on Materials Science and Technology, VOL. 28, 1998.

[8] Roberg. P, Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, 2000.

[9] Abioye.T .E, McCartney. D. G, A.T. Clare. A. T, Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection, Journal of Materials Processing Technology 217 (2015) 232–240.

[10] Naghiyan. M, Shoja-Razavi. R, Mansouri. H, Jamali. H, Microstructure investigation of Inconel 625 coating obtained by laser cladding and TIG cladding methods, Surface & Coatings Technology, 322 (2018) 177-184.

[11] Xu. X, Mi. G, Chen. L, Xiong. L, Jiang. P, Shoa. X, Wang. C, Research on microstructures and properties

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

of Inconel 625 coatings obtained by laser cladding with wire, Journal of Alloys and Compounds, 2017.
[12] Sandhu. S, Shahi. A. S, Metallurgical, wear and fatigue performance of Inconel 625 weld claddings, Journal of Materials Processing Technology, Journal of Materials Processing Technology 233 (2016) 1–8.
[13] Deng. P, Yao. C, Feng. F, Huanga. X, Li. Z, Lic. Y, Zhao. H, Enhanced wear resistance of laser cladded graphene nano platelets reinforced Inconel 625 super alloy composite coating, Surface & Coatings Technology 335 (2018) 334–344 .
[14] Verdi. D, Garrido. M. A, Munez. C. J, Poza. P, Mechanical properties of Inconel 625 laser cladded coatings. Depth sensing indentation analysis, Materials Science & Engineering A, S0921- 93(14) 00047-1.
[15] شجاع رضوی. ر، عرفان منش. م، فرآوری مواد با لیزر، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران،1393.
[16] شجاع رضوی. ر، روکش کاری با لیزر، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران،1395.
[17] Prasad. R, Tanaji. D, Waghmare. E, Kumar. K, Masanta. M, Effect of overlapping condition on large area NiTi layer deposited on Ti-6Al-4V alloy by TIG cladding technique, Surface & Coatings Technology 385 (2020) 125417.
[18] Dieter. G. E, Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition, University of Meryland, McGraw Hill Book Company, Third Edition, 2000.
[19] Jelvania. S, Shoja Razavi. R, Barekata. M, Dehnavi. M, Evaluation of solidification and microstructure in laser cladding Inconel 718 superalloy, Optics and Laser Technology 120 (2019) 105761.
[20] Saravanan. S, Sivagurumanikandan. N, Raghukandan. K, Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Nd: YAG laser welded super duplex stainless steel-Numerical and experimental approach, International joiurnal for light and electron optics, 4026(2019) 30447-4.
[21] Chena. B, Sua. Y, Xieb. Z, Tana. C, Fenga. J, Development and characterization of 316L/Inconel625 functionally graded material fabricated by laser direct metal deposition, Optics and Laser Technology 123 (2020) 105916.
[22] Naghiyan. M, Shoja-Razavi. R, Mansouri. H, Jamali. H, Microstructure investigation of Inconel 625 coating obtained by laser cladding and TIG cladding methods, 8972(18) 30886-7.
[23] Fenga. K, Chena. Y, Denga. P, Lic. Y, Zhaoc. H, Lua. F, Lid. F, Huanga. J, Lia. Z, Improved high-temperature hardness and wear resistance of Inconel625 coatings fabricated by laser cladding, Journal of Materials Processing Technology 243 (2017) 82–91.
[24] Harris. D. C, Materials for in fared windows and doms: properties and performance, SPIE press 1999.
[25] Ansari. M, Shoja Razavi. R, Barekat. M, An empirical-statistical model for coaxial laser cladding of NiCrAlY powder on Inconel 738 super alloy, Optics &Laser Technology 86(2016)136–144.
[26] Luo. X, Li. J, Effect of NiCrBSi content on microstructureal evolution, cracking susceptibility and wear behaviors oflaser cladding WC/Ni-NiCrBSi composite coating, Journal of Alloys and Compounent, 626 (2015) 102-111.
[27] Amir Alhaji. M. S, Salehi. M, Nahvi. S. M, Erfanmanesh. M, Electroless Nickel-Phosphorus Plating on WC-Co Powders using HVOF Feedstock Surface Engineering, (2018).
[28] A.C. E04, Test Methods for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings,E 2109 – 01, Annual Book of ASTM Standards, 2002.
[29] Jafari. M, Enayati. M, Salehi. M, Nahvi. S, Hosseini. S, Park. C, Influence of Nickel coated nanostructure WC-Co powders on microstructure and tribological properties of HVOF coatings, Journal of thermal spray technology, 23 (2014) 1456-1469.
[30] Tao. S, Liang. B, Ding. C, Liao. H, Coddet. C, Wear characteristics of plasma-sprayed nanostructured yttria partially stabilized zirconia coatings, Journal of thermal spray technology, 14 (2005) 518-523.
[31] Khor. K, Gu. Y, Pan. D, Cheang. P, Microstructure and mechanical properties of plasma sprayed HA/YSZ/Ti–6Al–4V composite coatings, Biomaterials, 25 (2004) 4009-4017.
[32] Zhu. D, Miller. R. A, Thermal conductivity and elastic modulus evolution of thermal barrier coatings under high heat flux conditions, Journal of Thermal Spray Technology, 9 (2000) 175-180.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]