



تحلیل آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای فیزیکی بر ضخامت روکش حاصل از فرایند لیزری پره توربین بخار

سعید مرندی^۱، سیده فاطمه نبوی^۲، محمدحسین فرشیدیان فر^{۳*}، انوشیروان فرشیدیان فر^۴، جواد جهانپور^۵، بهروز بیدختی^۶، محمد شجاعتی^۷

- ۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - ۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه فردوسی مشهد
 - ۴- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد
 - ۵- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد
 - ۶- دانشیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه فردوسی مشهد
 - ۷- دانشجوی دکتری، مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران
- ایمیل نویسنده مسئول: farshidianfar@um.ac.ir

چکیده

در مطالعه حاضر، از فرایند روکش کاری لیزری به منظور بهبود خواص سطحی پره‌های توربین بخار که یکی از سیستم‌های پرکاربرد در صنایع نیروگاهی است، استفاده شد. پره توربین مورد مطالعه از جنس فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی GTD450 بود که در فرایند لیزری با پودر مقاوم به خوردگی استلایت ۶ روکش کاری شد. در عمده مطالعات پیشین، تاثیر پارامترهای فرایندی بر خواص روکش بررسی شد. دقت شود که از تحلیل نتایج بر مبنای پارامترهای فرایندی درک فیزیکی حاصل نمی‌شود. به علاوه امکان پیش‌بینی فرایند در شرایط خارج از محدوده وجود ندارد. در راستای رفع این چالش، در مطالعه حاضر چهار پارامتر فیزیکی حرارت ورودی، انرژی جرم رسوب‌دهی، جرم تزریق شده واحد طول و سهم انرژی معرفی شدند. پارامترهای فیزیکی مذکور در واقع ترکیبی از سه پارامتر موثر بر فرایند روکش کاری لیزری یعنی توان، سرعت پیمایش و نرخ تغذیه پودر هستند. در تحقیق حاضر، تاثیر هر یک از پارامترهای فیزیکی معرفی شده بر ضخامت روکش حاصل بررسی شد. در انتها نیز خواص متالورژیکی فلز پایه و روکش حاصل ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: روکش کاری لیزری، فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی، آلایژ استلایت ۶، ضخامت روکش، پارامتر فیزیکی.

مقدمه

مطابق آمار جهانی، نیاز دنیا به انرژی با سرعت قابل توجهی روبه رشد است. به طوری که گزارش‌ها حاکی از آن است که تا سال ۲۰۳۰، انرژی مورد نیاز تقریباً دو برابر انرژی فعلی خواهد بود. بخش قابل توجهی از این انرژی توسط سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود. به منظور ذخیره‌سازی و کاهش استفاده از این انرژی‌های تجدیدناپذیر، همواره نیاز به نیروگاه‌های با بازدهی بیشینه احساس می‌شود. در این میان، نیروگاه بخار به دلیل بازدهی بالا در سال‌های

اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در صده اخیر، از توربین‌های بخار به طور گسترده در صنایع نیروگاهی استفاده شده است. دلیل این امر بازدهی بالا این سیستم‌ها در عین هزینه به صرفه است. در این میان به دلیل شرایط کاری ویژه توربین‌های بخار نظیر دمای کاری بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار کاری بیش از ۱۳۰ بار منجر به بروز آسیب‌هایی در قطعات و اجزای توربین‌های بخار می‌شود [۱]. بنابراین نیاز است که این اجزا به گونه‌ای طراحی شوند که بتوان از بروز آسیب آن‌ها جلوگیری کرد.

در توربین‌های بخار، تقریباً آسیب‌پذیرترین جز پره‌ها^۱ هستند. توضیح اینکه در آغاز کار، در اثر حرکت جریان لایه‌های اکسید در فضای داخل توربین شکل می‌گیرد. جریان حاوی ذرات اکسیدی است که باعث سایش پره می‌شود. همچنین در نتیجه برخورد ذرات اکسیدی با پره‌هایی که در حال حرکت با سرعت بالا هستند، وقوع پدیده خستگی^۲ امکان‌پذیر و در نتیجه ترک در پره‌ها شکل خواهد گرفت. همچنین، در اثر نیروهای گریز از مرکز شدید، پره‌ها ممکن است دچار خزش^۳ شوند. بنابراین مشاهده می‌شود که دو چالش تهدیدآمیز پره‌ها، پدیده‌های خستگی و خزش هستند [۲].

به تناسب شرایط کاری پره‌ها، فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی^۴، به ویژه فولاد زنگ‌نزن GTD 450 در دمای بالا از استحکام، مقاومت به خزش و خوردگی^۵ مطلوبی برخوردار هستند. همچنین این آلایژ در مقایسه با سایر فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی، از مقاومت به ترک ناشی از تنش و خستگی بالاتری برخوردار است. این ویژگی‌ها سبب شدند که در ساخت پره‌های توربین بخار، از این آلایژ به عنوان فلز پایه استفاده شود.

با وجود خواص منحصر به فرد فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی GTD 450، اما همچنان پره‌های توربین‌های بخار (به خصوص در ناحیه حمله) به دلیل پدیده‌های سایش و خوردگی دچار نقصان و آسیب‌دیدگی می‌شوند. علاوه بر هزینه تعمیر پره آسیب‌دیده، هزینه توقف توربین‌ها و راه‌اندازی مجدد آن‌ها به حدی زیاد بوده است که مطالعات متمرکز بر ارائه راه‌حل دیگری برای این

⁴ Martensite stainless steel

⁵ Corrosion resistant

¹ Blades

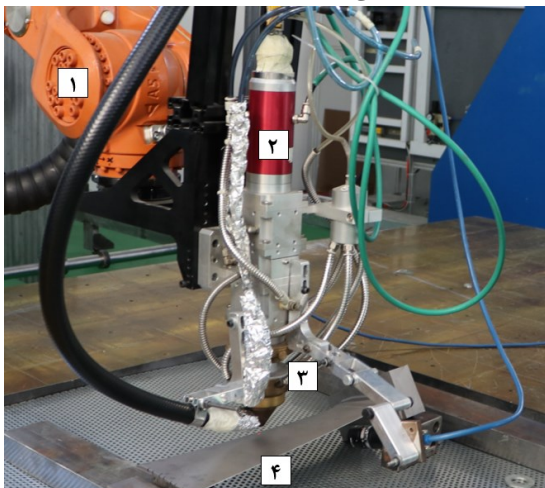
² Fatigue

³ Creep

مطابق آنچه در قسمت قبل بیان شد، تاثیر پارامترهایی موثر (نظیر نرخ تغذیه، سرعت پیمایش و توان) بر ضخامت روکش حاصل در لیزر پیوسته در شرایطی که فلز پایه و ثانویه به ترتیب فولادزنگ‌نزن مارتنزیتی و استلایت ۶ باشد، بررسی نشده‌است. همچنین عمده نتایج ارائه شده بر مبنای پارامترهای فرایند هستند. از تحلیل نتایج بر مبنای پارامترهای فرایندی درک فیزیکی حاصل نمی‌شود. به علاوه امکان پیش‌بینی فرایند در شرایط خارج از محدوده وجود ندارد. در راستای رفع این چالش، در مطالعه حاضر نتایج بر مبنای پارامترهای فیزیکی بررسی شدند. برای این منظور چهار پارامتر فیزیکی معرفی شدند. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در واقع تلفیقی از سه پارامتر فرایند موثر لیزری، سرعت پیمایش و نرخ تغذیه پودر بودند. در ادامه مطالعه حاضر تاثیر فرایندهای فیزیکی ارائه شده بر ضخامت روکش بررسی خواهد شد. همچنین، تحلیل متالورژیکی ریزساختار روکش و فلز پایه نیز در بخشی جداگانه بررسی می‌شود.

روش تحقیق

در مطالعه حاضر، از دستگاه لیزر فیبری^{۱۳} ۲ کیلووات پیوسته متصل به ربات ۶ درجه آزادی کوکا^{۱۴} دارای هد پرسیتک^{۱۵} مجهز به نازل پودرپاش هم‌مرکز^{۱۶} برای روکش کاری لیزری استفاده شده‌است (شکل ۱). از پودر استلایت ۶ به ابعاد ۹۰-۲۰۰μm و فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی GTD 450 با مشخصات موجود در جدول ۱، در فرایند روکش کاری لیزری استفاده شده‌است. دقت شود در مطالعه حاضر، هندسه قطعه پایه، مطابق مدل پره توربین بخار انتخاب شد. دلیل این امر تعیین پارامترهای فرایند در نزدیک‌ترین حالت ممکن به قطعه واقعی بود.



شکل ۱- ربات لیزر مورد استفاده در فرایند روکش کاری لیزری؛ ۱- ربات کوکا ۲- هد لیزر ۳- نازل هم‌مرکز ۴- پره توربین.

جدول ۱- درصد عناصر سازنده آلیاژهای مورد استفاده

درصد عناصر سازنده							نام آلیاژ
Co	Cr	W	Fe	C	Mo	Ni	
-	۱۵/۵	-	۷۶/۳	۰/۰۳	۰/۸	۶/۳	فولاد زنگ‌نزن GTD 450

چالش شده‌است. یکی از راه‌حل‌های ارائه شده در مطالعات اخیر، روکش کاری نواحی حساس پره با استفاده از مواد مقاوم به سایش و خوردگی است. افزودن روکش محافظت‌کننده از سطح از لحاظ از هزینه به صرفه بوده، چراکه مواد مورد نیاز در این فرایند به مراتب کمتر از مواد مورد نیاز در تولید مجدد قطعه است [۳]. در این میان فرایند روکش کاری لیزری^۶ به دلیل مزایایی نظیر دقت و سرعت بالا در عین اعوجاج حداقلی مورد توجه مطالعات بسیاری قرار گرفته‌است. از جمله موادی که به عنوان فلز ثانویه در روکش کاری لیزری پرها استفاده می‌شود، می‌توان آلیاژ پایه کبالت^۷ استلایت ۶^۸ را نامبرد. استفاده از استلایت ۶ در تعمیر پره‌های توربین به دلیل ویژگی‌هایی نظیر مقاومت به سایش و خوردگی (به دلیل سختی بالا و اتصال محکم آن با فلز پایه) کاربرد دارد [۴، ۵]. در این راستا در مطالعه حاضر از روش روکش کاری لیزری از آلیاژ استلایت ۶ به عنوان فلز ثانویه در روکش کاری بر فولاد زنگ‌نزن GTD450 استفاده خواهد شد.

مطالعات مختلفی بر رفتار هندسی و متالورژیکی آلیاژهای فولادی روکش کاری شده با فرایند لیزری پرداخته‌اند. در مطالعه‌ای تاثیر پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری پالسی Nd:YAG بر ضخامت روکش حاصل بررسی شد [۶]. در پژوهش مذکور، پودر استلایت ۶ بر قطعه کار از جنس فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۲۰ به ضخامت 10mm روکش کاری شد. در نتیجه این مطالعه مشاهده شد که افزایش نرخ تزریق پودر منجر به افزایش ضخامت روکش حاصل می‌شود. دقت شود که در مطالعه مذکور از لیزر پالسی به منظور روکش کاری لیزری استفاده شده بود که از جمله چالش‌های این فرایند افزایش احتمال بروز تخلخل در روکش حاصل است. همچنین تاثیر پارامترهایی نظیر توان ورودی و سرعت پیمایش لیزر^۹ بر روکش حاصل بررسی نشد. به علاوه بیشینه ضخامت روکش حاصل از مطالعه مذکور 0.1mm گزارش شد که ضخامت کمی برای روکش کاری پره‌های توربین محسوب می‌شود. برنت^{۱۰} و همکاران در مطالعه‌ای تاثیر توان لیزری در فرایند روکش کاری لیزری از جنس فلز پایه فولادزنگ‌نزن ۴۲۰ به ضخامت 10mm و پودر استلایت ۶ بررسی کردند [۷]. بیشینه ضخامت حاصل با لیزر Nd:YAG در توان ۱۵۰۰ وات به مقدار 0.7mm بود. در پژوهش مذکور تاثیر سرعت پیمایش لیزری بر روکش حاصل بررسی نشد. در پژوهشی دیگر، لین^{۱۱}، تاثیر پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری نظیر نرخ تغذیه فلز ثانویه، توان و سرعت پیمایش لیزری بر نرخ رقت^{۱۲}، سختی و ریزدانه‌ها بررسی شد [۸]. در مطالعه مذکور فلز پایه و پودر فلز ثانویه هر دو از جنس فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۲۲ و لیزر مورد استفاده فایبر ۵ کیلووات بودند. دقت شود که در مطالعه مذکور تاثیر پارامترهای فرایند بر ضخامت روکش حاصل بررسی نشد. همچنین، مقاومت به خوردگی استلایت ۶ به مراتب بیشتر از فولادزنگ‌نزن مارتنزیتی است [۹]. بنابراین خلاء بررسی تاثیر پارامترهای فرایندی نظیر توان، نرخ تغذیه و سرعت پیمایش لیزری در روکش کاری لیزری استلایت ۶ بر فولاد مارتنزیتی احساس می‌شود.

بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

¹² Dilution

¹³ Fiber

¹⁴ Kuka

¹⁵ Precitec Head

¹⁶ Powder Coaxial Nozzle

⁶ Laser coating

⁷ Cobalt-based alloy

⁸ Stellite 6

⁹ Scanning Laser Velocity

¹⁰ Brandt

¹¹ Lin



شکل ۳- خطوط روکش کاری شده حاصل از آزمایش‌های شماره ۱ تا ۶.

به منظور انجام آزمون متالوگرافی، نمونه‌ها در گرانول برای مانع قرار داده شده‌اند. سپس، سطوح نمونه‌ها با سمباده‌های شماره‌های ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ به ترتیب پولیشکاری شدند. در مرحله بعد برای اچ کردن نمونه‌ها، قسمت فلز پایه و فلز ثانویه به ترتیب در محلول‌های کالینگ شماره ۱^{۱۷} و اسید کرومیک^{۱۸} قرار داده شده‌اند. همچنین از میکروسکوپ صایران مدل XJL-17 با بزرگنمایی ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ استفاده شد.

ارائه نتایج و بحث

به منظور تحلیل و تاثیر نتایج، در مطالعه حاضر چهار پارامتر فیزیکی «حرارت ورودی^{۱۹}»، «انرژی جرم رسوب‌دهی^{۲۰}»، «جرم تزریق شده واحد طول^{۲۱}» و «سهم انرژی^{۲۲}» به ترتیب در روابط (۱) تا (۴) معرفی شده‌اند.

$$HI = \frac{P}{v} [J/mm] \quad (1)$$

$$MDE = \frac{P}{f} [J/g] \quad (2)$$

$$MDL = \frac{f}{v} [g/mm] \quad (3)$$

$$EP = \frac{P}{v \times f} \left[\frac{J.s}{mm.g} \right] \quad (4)$$

دقت شود که حرارت ورودی به صورت میزان حرارت وارد شده بر واحد طول تعریف می‌شود. از طرفی، میزان انرژی مورد نیاز به ازای واحد نرخ تغذیه وارد شده به حوضچه مذاب با پارامتر انرژی جرم رسوب‌دهی تعریف می‌شود. منظور از جرم تزریق شده واحد طول، میزان جرم تزریق شده به ازای طول واحد حوضچه مذاب است. همچنین، پارامتر فیزیکی سهم انرژی به صورت میزان انرژی موردنیاز به ازای طول واحد و جرم تزریق شده واحد تعریف می‌شود. به منظور درک بیشتر، در ادامه تاثیر هر یک از پارامترهای مذکور بر ضخامت روکش حاصل بررسی خواهد شد.

تحلیل هندسی

در نمودار شکل ۴ تاثیر حرارت ورودی بر ضخامت روکش حاصل از فرایند روکش کاری لیزری در دو نرخ تغذیه 0.25g/s و 0.33 g/s نشان داده شده‌است.

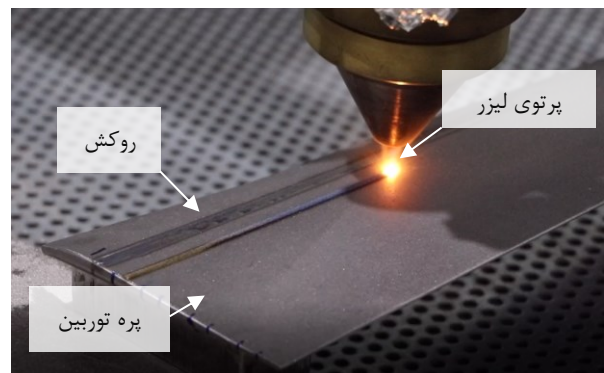
استلایت ۶	-	-	۱/۱	۲	۴/۵	۲۸	۶۲/۸
-----------	---	---	-----	---	-----	----	------

طراحی آزمایش با هدف بررسی اثر تاثیر پارامترهای توان لیزر (P)، نرخ تغذیه پودر (f) و سرعت پیمایش لیزر (v) بر ضخامت روکش حاصل به عنوان پارامترهای متغیر انتخاب شدند. در این راستا، بازه سرعت روکش کاری، نرخ تغذیه پودر و توان لیزر به ترتیب بین ۱۰ تا ۱۴ میلی‌متر بر ثانیه، ۰/۲۲ تا ۰/۳۳ گرم بر ثانیه و ۱۱۵۰ تا ۱۳۰۰ وات در نظر گرفته شدند. آزمایش‌های انتخابی در جدول ۲ گردآوری شده‌اند.

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در آزمایش‌ها

# آزمایش	v (mm/s)	f (g/s)	P (J/s)
۱	۱۰	۰/۲۵	۱۱۵۰
۲	۱۲	۰/۲۵	۱۱۵۰
۳	۱۴	۰/۲۵	۱۱۵۰
۴	۱۰	۰/۳۳	۱۳۰۰
۵	۱۲	۰/۳۳	۱۳۰۰
۶	۱۴	۰/۳۳	۱۳۰۰

همچنین، از گاز آرگون با دبی حجمی ۱۲ لیتر بر دقیقه به عنوان گاز حامل پودر استفاده شد. قبل از انجام هر آزمایش، سطح نمونه با استفاده از الکل تمیزکاری شد تا از ورود آلاینده‌های سطحی در روکش حاصل اجتناب شود. شایان ذکر است که هر آزمایش شامل ۶ خط روکش کاری شده به طول ۱۵۰ میلی‌متر برای هر خط و با همپوشانی ۵۰٪ است. در شکل ۲ روکش کاری لیزر آزمایش نخست مشاهده می‌شود. همچنین، در شکل ۳ نیز نمای روبه‌روی روکش حاصل از ۶ آزمایش نشان داده شده‌است. دقت شود که طول روکش به ۳ نقطه مساوی تقسیم و روکش حاصل در نقاط مذکور با کولیس پایه‌دار با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شدند. در نهایت نیز میانگین نقاط اندازه‌گیری شده به عنوان ضخامت روکش به منظور تحلیل در نظر گرفته شدند.



شکل ۲- فرایند روکش کاری لیزری آزمایش شماره ۱.

²¹ Mass Deposited per Length (MDL)

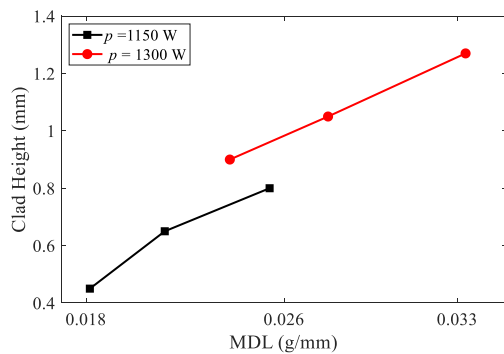
²² Energy Portion (EP)

¹⁷ Kalling No. 1

¹⁸ Chromic acid

¹⁹ Heat input

²⁰ Mass Deposited Energy (MDE)

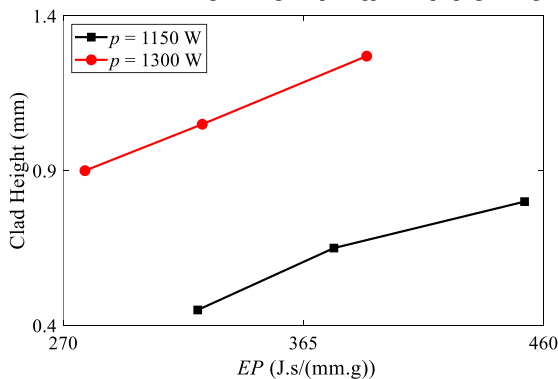


شکل ۶- تغییرات ضخامت روکش بر حسب جرم تزریق شده واحد طول

برای توان‌های لیزری ثابت 1150 W و 1300 W.

مطابق شکل ۶ مشاهده می‌شود که به ازای توان لیزری ثابت، با افزایش جرم تزریق شده واحد طول (MDL)، ضخامت روکش افزایش می‌یابد. دقت شود که به ازای توان ورودی واحد، افزایش MDL به معنای افزایش نرخ تغذیه به ازای واحد طول است. با توجه به اینکه توان لیزر ورودی به حدی است که بتواند تمامی نرخ تغذیه را ذوب کند، بنابراین تمام مواد ثانویه صرف روکش کاری می‌شود. در نتیجه ضخامت روکش افزایش می‌یابد. دقت شود که در مطالعه [۱۰]، این مهم در یک توان ثابت کم (718W) بررسی شد. این در حالیست که در مطالعه حاضر این مهم به همراه تحلیل فیزیکی در دو توان بالا (بیش تر از 1000 W) تایید شده‌است.

تمامی پارامترهای فیزیکی ارائه شده در قسمت قبل در واقع ترکیب دو پارامتر فیزیکی بودند. به منظور بررسی تاثیر پارامتر فیزیکی سهم انرژی که در واقع ترکیب سه پارامتر فرایندی است، تاثیر این پارامتر بر ضخامت روکش حاصل از فرایند لیزری در شکل ۷ نشان داده شده‌است.



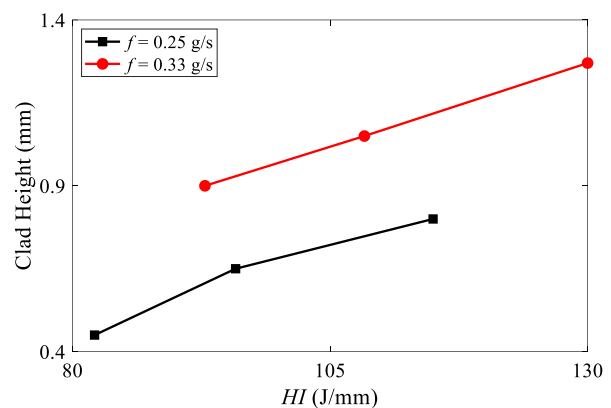
شکل ۷- تغییرات ضخامت روکش بر حسب پارامتر فیزیکی سهم انرژی در

توان‌های ثابت 1150W و 1300W.

مطابق شکل ۷، مشاهده می‌شود که افزایش سهم انرژی منجر به افزایش ضخامت روکش حاصل می‌شود. در توجیه این نتیجه که در دو توان ۱۱۵۰ وات و ۱۳۰۰ وات تایید شده‌است، می‌توان دیدگاه‌های مختلفی را در نظر گرفت. در یک دیدگاه، افزایش انرژی به ازای واحد زمان، مکان و نرخ تغذیه، منجر به افزایش مواد ذوب شده می‌شود. در نتیجه ضخامت روکش افزایش می‌یابد. از دیدگاه دیگر، به ازای طول و انرژی واحد، کاهش سرعت پیمایش منجر به افزایش مواد مذاب و در نتیجه افزایش ضخامت روکش می‌شود.

تحلیل متالورژیکی

تحلیل متالورژیکی ریزساختار موجود در مطالعه حاضر را می‌توان در دو قسمت فلز پایه و روکش بررسی کرد. مطابق شکل ۸، در فلز پایه مارتنزیتی

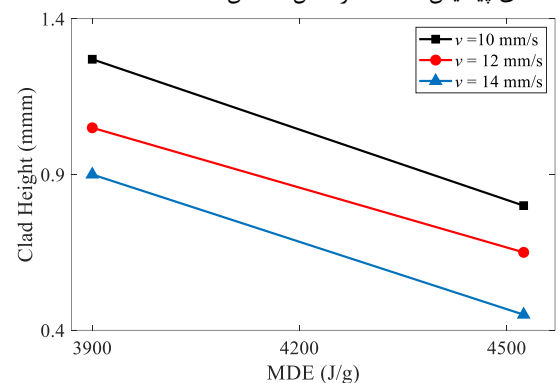


شکل ۴- تغییرات ضخامت روکش بر حسب حرارت ورودی برای نرخ تغذیه

پودر 0.33g/s و 0.25 g/s.

مطابق شکل ۴ مشاهده می‌شود که افزایش حرارت ورودی در هر دو توان ثابت مذکور، منجر به افزایش ضخامت روکش حاصل می‌شود. افزایش حرارتی ورودی به معنی افزایش میزان انرژی است که در واحد طول جذب قطعه کار می‌شود. با افزایش انرژی، امکان ذوب شدن مقدار بیشتری از پودر فراهم خواهد شد. در نتیجه ضخامت روکش افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که روند افزایشی در هر دو نرخ تغذیه 0.25g/s و 0.33 g/s تاییدی بر صحت این نتیجه است.

به منظور بررسی تاثیر دومین پارامتر فیزیکی موثر ارائه شده در مطالعه حاضر بر هندسه روکش، ضخامت روکش حاصل بر حسب این پارامتر در سرعت‌های پیمایش مختلف در شکل ۵ نشان داده شده‌است.



شکل ۵- تغییرات ضخامت روکش بر حسب انرژی جرمی رسوبدهی برای

سرعت‌های پیمایش ثابت 10mm/s، 12mm/s و 14mm/s.

مطابق شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش انرژی جرمی رسوب - دهی، ضخامت روکش حاصل از فرایند روکش کاری لیزری کاهش می‌یابد. در توجیه اینکه پدیده می‌توان اینگونه بیان کرد که به ازای مقدار جرمی ثابت، با افزایش انرژی، انرژی تزریقی بیشتر از انرژی موردنیاز برای ضخامت روکش بهینه خواهد بود. به عبارت دیگر وجود انرژی بیش از حد موردنیاز صرف ذوب و در نتیجه افزایش رقت می‌شود. به عبارت دیگر انرژی صرف نفوذ مذاب به درون فلز پایه خواهد شد. دقت شود که در مطالعات پیشین بیان این نکته که افزایش MDE در سرعت پیمایش ثابت، منجر به افزایش رقت می‌شود، گزارش شده‌است [۱۰]. همچنین با توجه به اینکه افزایش تاثیر پارامتر جرم تزریق شده واحد طول بر ضخامت روکش حاصل از فرایند لیزری برای توان‌های مختلف 1150 W و 1300 W در شکل ۶ نشان داده شده - است.

- در پره‌های توربین استفاده می‌شود. در این راستا، چهار پارامتر فیزیکی که در واقع ترکیبی از پارامترهای فرایندی موثر انتخاب و تاثیر آن‌ها بر ضخامت روکش حاصل بررسی شد. نتایج حاصل از مطالعه حاضر به شرح زیر هستند:
- به منظور افزایش ضخامت روکش حاصل، پارامترهای فیزیکی حرارت ورودی، جرم تزریق شده واحد طول و سهم انرژی نیاز است افزایش یابد. این در حالیست که کاهش پارامتر فیزیکی انرژی جرمی رسوب-دهی منجر به افزایش ضخامت روکش در فرایند لیزری می‌شود.
 - بیشینه ضخامت روکش در مطالعه حاضر برابر 1.27mm بود که در حرارت ورودی 130 J/mm، انرژی جرمی رسوب‌دهی 3900 J/g، جرم تزریق شده واحد طول 0.03 g/mm و سهم انرژی 390 J.s/(mm.g) فراهم شد.
 - با توجه به وجود کاربید در روکش حاصل از پودر استلایت ۶، مقاومت به خوردگی و سختی سطحی به حدی ارتقا یافت که پره روکش کاری شده بتواند در شرایط کاری توربین بخار محافظت شود. در این راستا، بیشینه سختی روکش حاصل از مطالعه حاضر، 650HV گزارش شد.

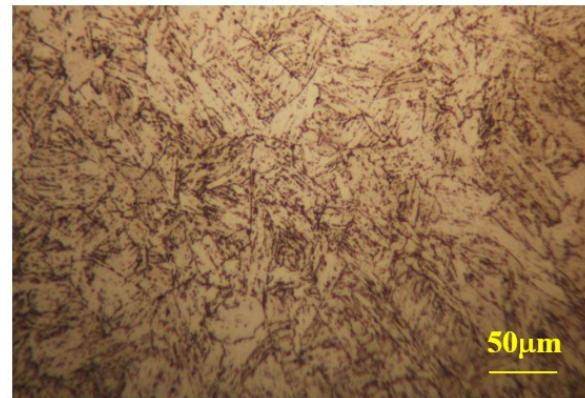
قدردانی و تشکر

مطالعه حاضر با حمایت‌های مالی و معنوی مرکز فناوری‌های نوین (CIT) شرکت دانش‌بنیان طاهاقالب توس با شماره گرنت 2021.02.11LSR01 فراهم شده‌است. بدین وسیله نگارندگان از تمامی کارکنان واحد مهندسی و لیزر و مرکز مربوطه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

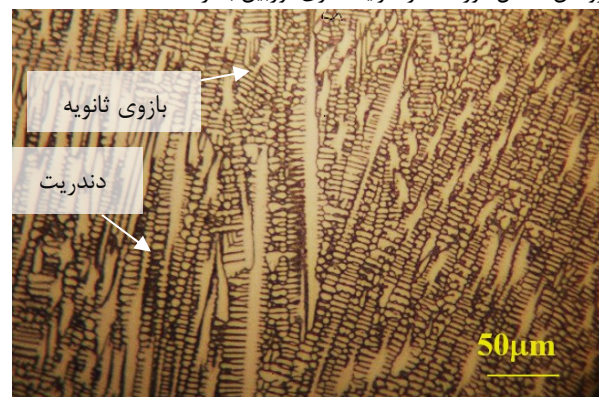
- [۱] H. P. Bloch and M. P. Singh, *Steam turbines: design, applications, and rerating*. McGraw-Hill Education, 2009.
- [۲] K. Fujiyama, "Damage informatics for steam turbine components," *Global Journal of Research In Engineering*, 2014.
- [۳] J. Huebner, D. Kata, J. Kusiński, P. Rutkowski, and J. J. C. I. Lis, "Microstructure of laser clad carbide reinforced Inconel 625 alloy for turbine blade application," vol. 43, no. 12, pp. 8677-8684, 2017.
- [۴] Y. J. S. Kathuria and C. Technology, "Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry," vol. 132, no. 2-3, pp. 262-269, 2000.
- [۵] S. Sun, Y. Durandet, M. J. S. Brandt, and C. Technology, "Parametric investigation of pulsed Nd: YAG laser

GTD450 مشاهده می‌شود دانه‌های سوزنی شکل موردانتظار به صورت بوته‌ای شکل^{۲۳} تبدیل شدند. دلیل این امر را می‌توان بازپخت^{۲۴} این آلیاژ دانست. دقت شود که به منظور افزایش چکش‌خواری، چقرمگی مارتنزیت این عمل در پره‌های توربین موردانتظار است.



شکل ۸- ریزساختار فلز پایه فولادزنگ‌زن مارتنزیتی GTD 450

مطابق شکل ۹ ریزساختار روکش استلایت ۶ دارای ساختار دانه‌بندی دندریت^{۲۵} ریز است. در نتیجه رشد این دانه‌بندی‌ها، بازوهای ثانویه^{۲۶} نیز در ریزساختار مشاهده شد. دندریت مشاهده شده ساختار FCC^{۲۷} پایه کبالت داشته که توسط شکل یوتکتیک^{۲۸} کاربید M_7C_3 احاطه شده‌است. کاربیدهای مرزخانه‌ای در اثر انجماد شکل گرفته‌اند. دقت شود که از لحاظ مقاومت به خوردگی وجود چنین ساختاری مناسب محیط‌های خوردنده نظیر توربین بخار است. سختی روکش حاصل 650HV است که دلیل آن را می‌توان وجود کاربید دانست. بنابراین از دیدگاه سختی و ریزساختار نیز روکش حاصل موردانتظار شرایط کاری توربین بخار است.



شکل ۹- ریزساختار موجود در آلیاژ روکش استلایت ۶

نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد گسترده توربین‌های بخار در سال‌های اخیر یکی از مشکلات این سیستم‌ها می‌توان آسیب‌دیدگی پرها را نامبرد. یکی از روش‌های مرسوم به منظور جلوگیری از این مشکل، روکش کاری لیزری پرها با آلیاژهای مقاوم به خوردگی است. در مطالعه حاضر سعی شد از پودر استلایت ۶ که از خانواده آلیاژهای پایه کبالت محسوب می‌شود به منظور روکش کاری فولاد زنگ‌زن مارتنزیت GTD 450 استفاده شود. دقت شود که فولاد زنگ‌زن مذکور به دلیل مزایایی نظیر استحکام و مقاومت به خوردگی بالا

²⁶ Secondary arm

²⁷ Faced Centred Cubic

²⁸ Eutectic

²³ Bushy type

²⁴ Tempering

²⁵ Dendritic structure



- cladding of stellite 6 on stainless steel," vol. 194, no. 2-3, pp. ۲۰۰۵, ۲۳۱-۲۲۵ .
- [۶] S. Sun, Y. Durandet, and M. Brandt, "Parametric investigation of pulsed Nd: YAG laser cladding of stellite 6 on stainless steel," *Surface and Coatings Technology*, vol. 194, no. 2-3, pp. 225-231, 2005.
- [۷] M. Brandt, S. Sun, N. Alam, P. Bendeich, and A. Bishop, "Laser cladding repair of turbine blades in power plants: from research to commercialisation," *International Heat Treatment and Surface Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 105-114, 2009.
- [۸] C.-M. Lin, "Parameter optimization of laser cladding process and resulting microstructure for the repair of tenon on steam turbine blade," *Vacuum*, vol. 115, pp. 117-123, 2015.
- [۹] F. Brownlie, T. Hodgkiess, A. Pearson, and A. Galloway, "Corrosive wear behaviour of various stainless steel alloys and a Stellite 6 weld cladding," in *17th Nordic Symposium on Tribology*, 2016, pp. 1-12.
- [۱۰] U. De Oliveira, V. Ocelik, and J. T. M. De Hosson, "Analysis of coaxial laser cladding processing conditions," *Surface and Coatings Technology*, vol. 197, no. 2-3, pp. 127-136, 2005.