

روکش کاری لیزری در سال‌های اخیر

چکیده: فرایند روکش کاری لیزری را می‌توان از جمله حوزه‌های جذاب و پیچیده لیزر نامبرد. در سال‌های اخیر حوزه‌های مطالعاتی مختلفی برای روکش کاری لیزر معرفی شده‌است. هدف از مطالعه حاضر معرفی ابعاد مختلف این حوزه‌ها به گونه‌ای کاربردی است. در این راستا، دلایل برتری فرایند روکش کاری لیزری نسبت به سایر روش‌های روکش کاری با معرفی مطالعات مرتبط، بررسی خواهند شد. با توجه به پیچیدگی روکش کاری لیزری، در بخشی جداگانه این علم به بیانی ساده معرفی می‌شود. سپس از دیدگاه مطالعات انجام‌شده، به مقایسه انواع فرایندهای لیزری پرداخته می‌شود. در ادامه نیز تأثیر پارامترهای اصلی فرایند نظیر توان، قطر پرتوی لیزر، سرعت پیمایش، نرخ تغذیه و گاز محافظ بر پارامترهای روکش حاصل مانند سختی، رقت، تخلخل و دمای حوضچه مذاب با ذکر مطالعات مرتبط بررسی خواهند شد. به علاوه، تأثیر پارامترهای فرعی فرایند نظیر هم‌پوشانی، جهت مسیرها، پیش‌گرم و پس‌گرم بر پارامترهای روکش مانند استحکام، بیشینه تغذیه و سختی روکش با بهره‌گیری از مطالعات سال‌های اخیر معرفی خواهند شد. بدین ترتیب، حوزه‌های مطالعاتی روکش کاری که در سال‌های اخیر بدان پرداخته شده‌است، برای محققان و صنعتگران این تکنولوژی به گونه‌ای کاربردی در دسترس خواهد بود.

واژه‌های راهنما: روکش کاری لیزری، پارامترهای اصلی فرایند، پارامترهای فرعی فرایند، پارامتر روکش

محمدحسین
فرشیدیان*
استادیار

سیده فاطمه نبوی
دانشجوی دکترا

سید فریبرز اشراقی
دانشجوی کارشناسی

انوشیروان فرشیدیان
استاد، گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه فردوسی مشهد

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۵

Mohammad Hossein
Farshidianfar
Assistant professor

Seyedeh Fatemeh
Nabavi
PhD student

Syed Fariborz
Eshraghi
BSc Student

Anooshiravan
Farshidianfar
Professor, Department of
Mechanical Engineering,
Ferdowsi University of
Mashhad, Iran

Laser cladding in recent years

Abstract: The laser cladding process is considered as one of the attractive and complex areas of laser. In recent years, various fields of study have been introduced for laser cladding. The purpose of this study is to introduce these areas in an applicable way. Regarding to this, the reasons for the superiority of the laser cladding process over other cladding methods will be investigated by introducing related studies. Due to the complexity of laser cladding, this technology is introduced in simple interpretation way in a separate section. Then, the types of laser processes are compared based on previous studies. In the following, the effect of the main process parameters such as power, laser beam diameter, travel speed, feed rate and shielding gas on the resulting clad parameters such as hardness, dilution, porosity and melt pool temperature will be investigated based on related studies. In addition, the effect of process subsidiary parameters such as overlap, path direction, preheat and post heat on clad parameters such as strength, maximum feed and hardness will be introduced using recent studies. Thus, different aspects of laser cladding studies in recent years will be provided for researchers and industries of this technology in a practical way.

Keywords: Laser cladding, Main processing parameters, Subsidiary processing parameters, Clad parameter

۱- مقدمه

پارامترهای فرایندی چگونه بر شرایط روکش حاصل تأثیرگذار هستند. در این راستا، خلأ مطالعه‌ای جامع و کامل که جنبه‌های مختلف این علم را روشن کند، همواره احساس می‌شود.

در مطالعه حاضر نخست، برتری‌های تکنولوژی روکش کاری لیزری بر سایر روش‌های روکش کاری با بهره‌گیری از مطالعات سال‌های اخیر به دقت بررسی خواهد شد. با توجه به پیچیدگی‌های این علم، تعریف ساده و ملموسی از آن در بخش سوم ارائه می‌شود. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها یعنی انتخاب نوع فرایند روکش کاری لیزری است که در بخش چهارم با استفاده از مطالعات مرتبط بررسی خواهد شد. پارامترهای فرایندی در دسته اصلی و فرعی در بخش پنجم معرفی و تأثیر هر یک بر روکش حاصل مطابق مطالعات انجام‌شده در این حوزه معرفی و به دقت بررسی خواهد شد.

۲- برتری روکش کاری لیزری بر سایر روش‌های روکش کاری

به سبب نیاز و کاربرد روزافزون، تحقیقات گسترده‌ای بر روش‌های روکش کاری شامل تیگ^۲، میگ^۳، HVOF^۵ و لیزری معطوف شده‌است [۱۱، ۱۲]. برای درک بهتر، در جدول ۱ چهار روش مذکور و مشخصات روکش حاصل به صورت کمی و کیفی مشاهده می‌شود.

جدول ۱ روش‌های مرسوم روکش کاری [۲].

پارامتر / روش	لیزر	میگ	تیگ	HVOF
ارتفاع (mm)	۲-۰/۲	۱-۶	۵-۰/۳	۳-۱/۵
سرعت لایه‌نشانی (kg/h)	۲-۰/۷	۳-۲/۱۱	۵-۰/۳	۱-۵
اعوجاج	کم	متوسط	بالا	کم
دقت	بالا	کم	متوسط	کم
رقت (%)	۱-۵	۱۵-۲۰	۱۰-۲۰	کم

مطابق جدول ۱، مواردی نظیر ارتفاع روکش ایجادشده، سرعت لایه‌نشانی^۶، اعوجاج^۷ حاصل، دقت و رقت^۸ از جمله مشخصاتی هستند که در روکش کاری مدنظر قرار می‌گیرند. سرعت لایه‌نشانی، نرخ جرمی روکش ایجادشده در واحد زمان بر قطعه‌کار را نشان می‌دهد. اعوجاج میزان تاب‌دیدگی قطعه به سبب حرارت ورودی موردنیاز برای امتزاج است. دقت و ارتفاع دو ویژگی هندسی روکش هستند که میزان آن اهمیت به‌سزایی در برآورد هزینه قطعه تعمیریری دارد [۱۳]. رقت نیز به صورت حجم ناحیه سطحی روکش به حجم کلی آن تعریف می‌شود که میزان دو تا پنج درصد آن برای اطمینان از اتصال کامل بین روکش و قطعه‌کار پیشنهاد می‌شود [۱۴].

در میان روش‌های ارائه‌شده در جدول ۱، مشاهده می‌شود که تنها در روش روکش کاری لیزری اعوجاج کم در عین دقت بالا فراهم می‌شود. سرعت لایه‌نشانی روش لیزری در بیشترین حالت، دو برابر روش تیگ است. در مقابل، اگرچه سرعت لایه‌نشانی و ارتفاع روکش روش میگ به مراتب بیشتر از روش لیزری است اما اعوجاجی که حین فرایند روکش کاری میگ در قطعه‌کار به وجود می‌آید به حدی است که عملاً در قطعات حساس و

گسترده‌گی لیزر به حدی است که کمتر کسی را می‌توان یافت که نام آن را نشنیده باشد [۱]. با کمی دقت، در محیط اطراف، کاربردهای این تکنولوژی مشاهده می‌شود. این کاربردها از آزمایشگاه‌های پیشرفته مهندسی و کارخانه‌جات صنعتی آغاز شده و تا اسباب بازی‌های کودکان خردسال ادامه می‌یابد.

دلیل رشد روزافزون لیزر، برتری‌هایی نظیر ارتقا سرعت و کیفیت، در عین کاهش هزینه محصولاتی است که لیزر فراهم می‌کند [۲]. هم‌نوایی ویژگی‌های مذکور در کنار توانایی تولید محصول دقیق، پردازش مواد به کمک لیزر^۱ را به یکی از برجسته‌ترین تکنولوژی‌های پیشرو در عصر حاضر تبدیل کرده‌است. به طوری که، امروزه تکامل برخی صنایع مهم نظیر نفت و گاز، خودروسازی، کشتی‌سازی و هوافضا مدیون محصولات پردازش مواد به کمک لیزر هستند [۳-۶].

روکش کاری لیزری^۲ یکی از برجسته‌ترین زمینه‌های پردازش مواد به کمک لیزر محسوب می‌شود. به لطف این تکنولوژی، تعمیر قطعات حساس که پیش از آن امکان‌پذیر نبود، ممکن شده‌است. به عبارت دیگر، روکش کاری لیزری راه‌گشایی جذاب، برای صنایع مختلف محسوب می‌شود [۷]. پیش‌بینی‌ها نیز حاکی از آن است که بازار روکش کاری لیزری از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ با رشد ۴۵ درصدی، به مقدار ۵/۸ میلیارد دلار خواهد رسید [۸].

از دیرباز، روکش کاری از جمله دغدغه‌های پژوهشگران و مهندسان بوده‌است. چراکه روکش کاری روشی سریع و کم‌هزینه برای تعمیر قطعات گران‌قیمتی که ساخت آن‌ها زمان‌بر و هزینه‌بر است، به حساب می‌آید. کاربرد دیگر روکش کاری در قطعات با شرایط کاری خاص است. به سبب برخی شرایط کاری، گاهی ایجاد می‌شود که خواص سطح و داخل قطعه متفاوت از یکدیگر باشند. به عنوان مثال در حالی که انتظار می‌رود سطح قطعه بتواند در مقابل پدیده‌های مخرب نظیر سایش، فرسایش، اکسیداسیون و خستگی مقاوم باشد، قسمت داخلی قطعه باید بتواند نیروهای مختلف را تحمل کند. اولین راه‌حل، استفاده از موادی خاص است که بتواند تمام ویژگی‌های مذکور را دارا باشد. نخست اینکه چنین موادی بسیار نادر و ایده‌آل هستند. به طوری که حتی اگر وجود خارجی داشته باشند، قیمت بالای آن‌ها عملاً توجیه استفاده از آن را زیر سوال می‌برد. دوم اینکه این روش در مواردی که خواص سطح و داخل قطعه در تضاد با یکدیگر هستند، کاربردی نیست. راه آسان و در عین حال قابل اطمینان پژوهشگران و مهندسان، ایجاد لایه‌ای با خواص سطحی موردنظر بر قطعه است [۹]. به عبارت دیگر نخست جنس قطعه بر اساس خواص داخلی موردنیاز انتخاب می‌شود. سپس متناسب با شرایط کاری، روکش موردنظر انتخاب و بر قطعه قرار گرفته و در نتیجه، کیفیت سطح ارتقا می‌یابد [۱۰].

مطابق آنچه بیان شد، روکش کاری لیزری راه‌حلی مطلوب برای صنایع مختلف محسوب می‌شود. در این میان شاید این سوال پیش بیاید که برتری‌های روکش کاری لیزری بر سایر روش‌های روکش کاری چیست؟ در یک کلام، به بیان ساده روکش کاری لیزری چگونه تعریف می‌شود؟ برتری‌های انواع فرایندهای روکش کاری لیزری بر یکدیگر چیست؟ و در ادامه

¹laser material processing ²laser cladding ³tungsten inert gas (TIG) ⁴metal inert gas (MIG) ⁵high velocity oxygen fuel spraying ⁶deposition rate ⁷distortion ⁸dilution

ثانویه در فرایند روکش کاری لیزری، خمیر (پودر ترکیب شده با چسب) باشد، فرایند «روکش کاری لیزری خمیری» نامیده می شود [۷، ۹]. همچنین، اگر ماده ثانویه به صورت پودر یا سیم بر حوضچه مذاب وارد شود، فرایند حاصل به ترتیب روکش کاری پودری و سیمی نامیده می شود. برای درک بهتر، مقایسه‌ای بر سه روش روکش کاری لیزری در جدول ۲ گردآوری شده است.

جدول ۲ مقایسه روش‌های روکش کاری

روش	مزایا	معایب	کاربرد	منبع
پودری	دقت بالا، ایجاد سطحی یکنواخت	بازدهی مواد پایین، تمایل به تخلخل	هندسه‌های پیچیده، نمونه‌سازی	[۷، ۱۷]
سیم	بازدهی مواد بالا	غیرقابل استفاده در هندسه‌های پیچیده	سطوح بزرگ، هندسه‌های ساده	[۹، ۱۷]
خمیری	بازدهی مواد بالا	حساسیت بالا، دشواری افزودن خمیر	سخت کاری سطوح	[۷، ۱۸]

مطابق جدول ۲، هرچند بازدهی مواد روکش خمیری بالا بوده و تمام مواد ثانویه صرف روکش کاری می شود، اما به دلیل حساسیت بالا و دشواری افزودن خمیر در سال‌های اخیر کمتر از این روش استفاده شده است. در مقابل، تمرکز مطالعات بسیاری به سمت روکش کاری پودری و سیمی به دلیل مزایای مختلف رهنمون شد. در حالیکه روش پودری، دقت بالا داشته و می توان به لطف آن هندسه‌های پیچیده را روکش کاری کرد، روش سیمی بازدهی مواد بالا، حدود ۱۰۰٪ دارد و در حین فرایند تمامی سیم ورودی صرف ایجاد روکش می شود. در کنار مزایای ذکر شده، این دو روش معایبی نیز دارند که مطالعات مختلفی به مقایسه آن‌ها با یکدیگر پرداخته‌اند [۱۵، ۱۹، ۲۰].

در مطالعه‌ای، از دو روش روکش کاری پودری و سیمی، با انتخاب ماده ثانویه اینکونل ۶۲۵ بر قطعه کار از جنس فولاد ننگ‌زن ۳۰۴ در شرایط متغیرهای یکسان، مطابق جدول ۳، خواص یک مسیر روکش بررسی شد. دقت شود که ایجاد شرایط یکسان نرخ تغذیه به دلیل تفاوت نوع تزریق، کمی چالش برانگیز بود. چراکه تمامی پودر تزریقی وارد حوضچه مذاب نمی شود، در حالیکه کل مقدار سیم تزریقی صرف تشکیل روکش می شد. در این راستا، مساحت مسیر^۷ (مساحت پاس روکش بر سطح قطعه کار) به عنوان معیاری برای مقایسه مدنظر قرار گرفت [۱۹].

جدول ۳ پارامترهای فرایند و پارامترهای روکش حاصل از دو روش پودری و سیمی فرایند روکش کاری [۱۹].

پارامتر	ماده نوع	پودر	سیم
توان (وات)		۱۸۰۰	۱۸۰۰
سرعت (mm/min)		۱۰۰	۱۰۰
نرخ تزریق ماده		۲۰ g/min	۱۰۰۰ mm/min
میانگین ارتفاع روکش (mm)		۳/۲	۲/۷
میانگین پهنای پاس (mm)		۴/۳	۴/۷
میانگین مساحت پاس (mm ^۲)		۱۰/۹	۱۰/۷
حجم لایه نشانی شده (mm ^۳ /mm)		۲۳/۶	۱۱/۳۲
بازده مواد (%)		۴۵	۹۵

1 feed stock

2 head

3 heat affected zone (HAZ)

4 part

5 powder

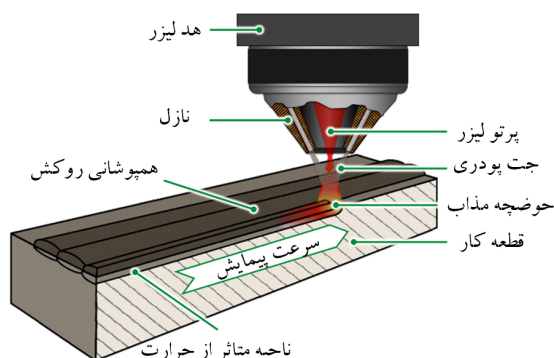
6 wire

7 track area

ظریف از این روش استفاده نمی شود. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که روکش کاری لیزری از دیدگاه‌های مختلفی نسبت به سایر روش‌های مرسوم روکش کاری یکپارچه است. در این راستا، برای درک بیشتر فرایند روکش کاری لیزری، در ادامه جزئیات این تکنولوژی ارائه خواهد شد.

۳- روکش کاری لیزری به بیان ساده

پیش از معرفی فرایند روکش کاری لیزری، مناسب است کمی به «پردازش مواد به کمک لیزر»، پرداخته شود. پردازش مواد به کمک لیزر به مجموعه فرایندهایی گفته می شود که در آن‌ها به کمک لیزر خواص مواد با هدف خاصی تغییر یابد. چنانچه هدف از پردازش مواد به کمک لیزر، ایجاد روکش باشد، فرایند روکش کاری لیزری حاصل خواهد شد. روکش کاری لیزری، نوعی از عملیات ذوبی است که در آن پرتو لیزر، با تابیدن بر قطعه کار در حضور ماده ثانویه، منجر به ایجاد لایه‌ای بر قطعه کار می شود [۱۵]. ماده ثانویه در فرایند روکش کاری لیزری که برخی آن را «ماده افزوده شده»^۱ می نامند، می تواند به شکل‌های مختلفی در حین یا پیش از تابیدن لیزر، بر قطعه کار تزریق شود [۲]. در شکل ۱ نمای شماتیکی از این فرایند نشان داده شده است.



شکل ۱ روکش کاری لیزری [۱۶].

مطابق شکل ۱، هنگامی که پرتوی لیزر از هد^۲ تابیده می شود، دمای سطح قطعه کار و ماده ثانویه به آرامی افزایش می یابد. افزایش دما تا ذوب شدن دو ماده پیشروی کرده و حوضچه مذاب بر روی قطعه کار تشکیل می شود. با افزایش حرارت ورودی ناشی از پرتوی لیزر، حوضچه مذاب به سرعت به عمق قطعه کار نفوذ می کند و دو فلز با یکدیگر ممزوج می شوند. در مرحله آخر، دمای محیط منجر به انجماد حوضچه شده و لایه‌ای بر قطعه کار تشکیل می شود. حداقل فاصله بین روکش و قطعه کار نیز توسط ناحیه متأثر از حرارت^۳ تفکیک می شود [۹]. متناسب با کاربرد، روش‌های مختلفی برای روکش کاری لیزری مطرح می شود. در ادامه، هر یک از این روش‌ها معرفی و بررسی خواهند شد.

۴- مقایسه انواع فرایندهای روکش کاری لیزری

با توجه به گستردگی روکش کاری لیزری، از جنبه‌های مختلفی می توان این تکنولوژی را دسته بندی کرد. در یک دیدگاه کلی، بر اساس حالت ماده ثانویه، روکش کاری لیزری به سه دسته کلی خمیری^۴، پودری^۵ و سیمی^۶ تقسیم می شوند [۷]. چنانچه ماده

۵- مطالعات پارامتری

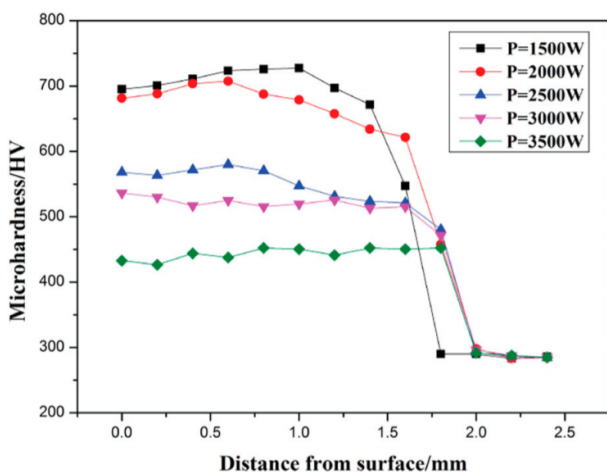
همانند سایر فرایندهای پردازش مواد به کمک لیزر، روکش حاصل از روش لیزری نیز متأثر از متغیرهای مختلفی است. با تغییر هریک از متغیرها، فرایند انجماد، تشکیل روکش و در نتیجه خواص هندسی و مکانیکی روکش حاصل تغییر می‌کند [۲]. خواص هندسی می‌توانند پهنا و ارتفاع روکش باشند، در حالیکه از دیدگاه خواص مکانیکی می‌توان میزان سختی^۵، تردی^۶، تنش تسلیم^۷ و خستگی روکش حاصل را مدنظر قرار داد. مهم‌ترین پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری را می‌توان به دو دسته کلی متغیرهای اصلی و فرعی تقسیم‌بندی کرد. در ادامه هریک از متغیرها معرفی و تأثیر آن بر خواص روکش حاصل بیان خواهند شد.

۵-۱- پارامترهای فرایندی اصلی

۵-۱-۱- تأثیر توان لیزر^۸ بر سختی روکش

توان لیزر یکی از مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر فرایند روکش کاری لیزری محسوب می‌شود. منظور از توان لیزر، میزان انرژی است که پرتوی لیزر در واحد زمان بر قطعه‌کار اعمال می‌کند [۲۱].

توان لیزر به طور مستقیم بر مشخصات مختلفی از روکش حاصل تأثیر می‌گذارد. در مطالعه‌ای، تأثیر توان بر فرایند روکش کاری لیزری پودر NiCrBSi بر قطعه‌کار فولادی 42CrMo بررسی شد. در شکل ۳ نمودار سختی بر حسب ارتفاع روکش برای توان‌های ۱۵۰۰ تا ۳۵۰۰ وات نشان داده شده است.



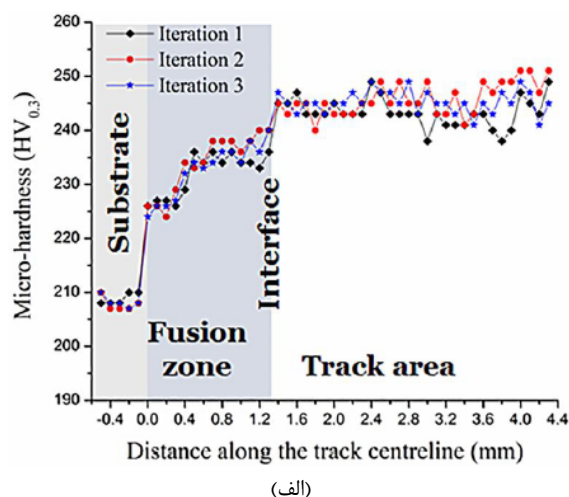
شکل ۳ تأثیر توان بر سختی روکش حاصل از فرایند روکش کاری لیزری [۲۲].

مطابق شکل ۳، افزایش توان منجر به افزایش اثر رقت و افزایش ورود عنصر آهن به روکش شده که این امر سختی روکش را کاهش می‌دهد [۲۲]. این نتیجه در مطالعات دیگر شامل روکش کاری لیزری پودر فولاد ابزار H13 بر قطعه‌کار از همان جنس [۲۳] و روکش کاری $TiB_2-TiC-Al_2O_3$ بر فولاد ۱۰۲۰ [۲۴] نیز تأیید شده است.

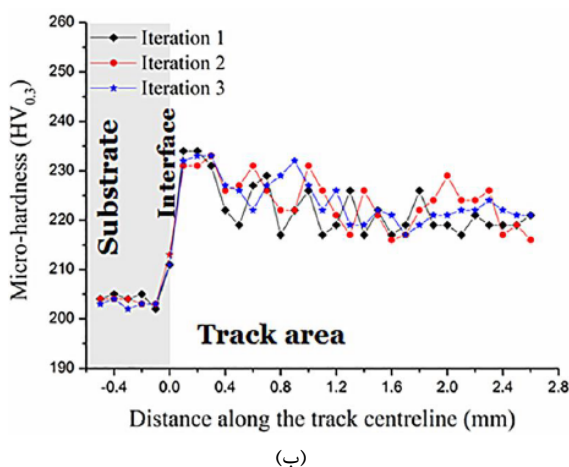
مطابق جدول ۳، میانگین مساحت پاس روکش حاصل از هر دو روش پودری و سیمی در حدود ۱۱ میلی‌متر مربع است. این امر بیانگر آن است که حجم مواد دریافت‌شده بر واحد طول^۱ برای هر دو پاس تقریباً یکسان هستند. حجم مواد تزریق‌شده بر واحد طول^۲ برای پاس پودری و سیمی به ترتیب ۲۳/۶ و ۱۱/۳۲ مترمکعب بر متر گزارش شد که بیانگر بازدهی مواد ۴۵٪ و ۹۵٪ است. بازده موادی پایین پودر بدین سبب است که در حین فرایند روکش کاری، پودر به اطراف پخش می‌شود [۱۹].

در شکل‌های ۲الف و ۲ب، مشاهده می‌شود که میکروسختی^۳ ناشی از دو روش روکش کاری لیزری پودری و سیمی نشان داده شده است. سختی روکش حاصل از روش پودری و سیمی به ترتیب تقریباً ۲۴۵ و ۲۲۴ ویکرز^۴ گزارش شد. این امر بدان سبب است که هرچه حجم رسوب بیشتر یا اندازه دانه‌ها ریزتر باشند، میکروسختی افزایش می‌یابد [۱۹].

دقت شود نتایج مذکور از دیدگاه کلی در شرایط متغیرهای یکسان ارائه شدند. از دیدگاه جزئی با تنظیم متغیرهای مؤثر بر فرایند روکش کاری لیزری، خواص فیزیکی، متالورژیکی و هندسی روکش حاصل را می‌توان به حد مطلوب رساند. در این راستا در بخش بعد، متغیرهای مؤثر بر فرایند روکش کاری لیزری ارائه خواهند شد.



(الف)



(ب)

شکل ۲ نتایج میکروسختی حاصل از دو روش روکش کاری لیزری، (الف) پودری، (ب) سیمی [۱۹].

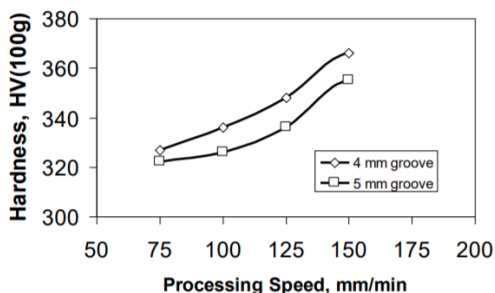
^۱ volume of the material captured per unit length ^۲ material volume deposited per unit length ^۳ microhardness ^۴ hardness Vickers (HV) ^۵ hardness ^۶ brittle ^۷ yield stress ^۸ laser power

سطحی (و نه عمیق) قطعه کار و پودر شده و روکش اتصال مطلوبی با قطعه کار دارد. در حالت غیرمتمرکز مثبت، مشاهده می شود که حوضچه مذاب و رقت افزایش می یابد که این امر نامطلوب است. شایان ذکر است که نتایج EDX نیز نتایج را تأیید می کند [۲۵، ۲۶].

۵-۱-۳- تأثیر سرعت پیشروی^۶ بر سختی روکش

سرعت پیشروی پرتو لیزر همان سرعت حرکت هد لیزر و به عبارتی سرعت انجام فرایند روکش کاری لیزری است. هرچه سرعت پیشروی بیشتر باشد، فرایند روکش کاری در زمان کمتری انجام می شود. در مطالعه ای تأثیر این متغیر بر سختی روکش حاصل از پودر P25 (حاوی ۲۵٪ جرمی کروم و ۱۰٪ جرمی نیکل) بر فولاد کربنی بررسی شد (شکل ۵) [۲۷].

مطابق شکل ۵ مشاهده می شود افزایش سرعت پیشروی سختی سطح را افزایش می دهد. دلیل این امر را می توان اینگونه توجیه کرد که با افزایش سرعت، نرخ خنک کاری^۷ نیز افزایش می یابد. در نتیجه ساختار دانه بندی ریزتر و در نتیجه سختی افزایش می یابد [۲۴].



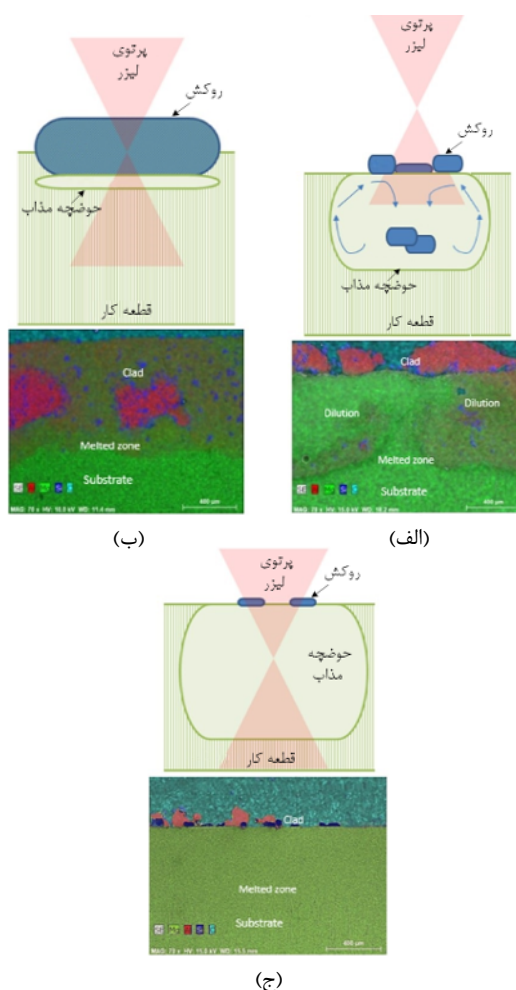
شکل ۵ تأثیر سرعت بر سختی روکش حاصل از فرایند روکش کاری لیزری [۲۷].

۵-۱-۴- تأثیر نرخ تغذیه^۸ بر تخلخل روکش

سرعت ورود مواد ثانویه به حوضچه مذاب در فرایند روکش کاری لیزری، نرخ تغذیه نامیده می شود. در روکش کاری پودری، می توان این کمیت را برابر با دبی پودر خروجی دانست. این متغیر معمولاً بر حسب گرم بر دقیقه بیان می شود.

تغییرات نرخ تغذیه بر میزان تخلخل در هر دو راستای ارتفاع و پهناي روکش در فرایند روکش کاری لیزری در مطالعه ای بررسی شد. در این مطالعه، پودر و قطعه کار اینکونل ۷۱۸، در توان ۳۸۵۸ وات و سرعت ۱۵۰۰ میلی متر بر دقیقه انجام شد (شکل ۶) [۲۸].

مطابق شکل ۶، افزایش نرخ تغذیه به معنای افزایش تزریق ماده ثانویه با همراهی گاز حامل در زمان کم تر است. با افزایش ورود ماده ثانویه این امکان که انرژی لیزر برای ذوب کردن مواد کافی نباشد، افزایش می یابد. در نتیجه حوضچه مذاب زمان کافی برای تشکیل و گسترش نخواهد داشت. همچنین با توجه به اینکه ماده ثانویه با همراهی گاز حامل به حوضچه تزریق می شود، افزایش نرخ تغذیه به معنای افزایش گاز حامل نیز است. بنابراین در شرایطی که حوضچه مذاب زمان کافی برای ذوب پودر را ندارد، گاز حامل نیز وارد می شود و فضا را پر می کند. در نتیجه تخلخل در روکش حاصل افزایش می یابد [۲۸].



شکل ۴ تأثیر فاصله کانونی بر حوضچه مذاب در حالت های الف) غیرمتمرکز مثبت، ب) متمرکز و ج) غیرمتمرکز منفی به همراه تصاویر EDX (رنگ های سبز، قرمز، آبی و فیروزه ای به ترتیب بیانگر منیزیم، آلومینیوم، سیلیکون و کربن) [۲۵].

۵-۱-۲- تأثیر قطر پرتوی لیزر^۱ بر رقت روکش

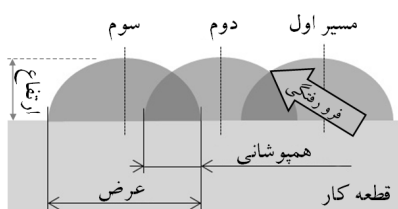
منظور از قطر پرتو، قطر پرتوی لیزر بر سطح قطعه کار است. متناسب با فاصله نازل از قطعه کار، قطر پرتوی لیزر نیز می تواند تغییر کند. در مطالعه ای تأثیر فاصله کانونی در سه حالت غیرمتمرکز منفی^۲، متمرکز^۳ و غیرمتمرکز مثبت^۴ بر فرایند روکش کاری لیزری پودر SiC بر آلیاژ منیزیم ZE41 بررسی شد. مطابق شکل ۴ الف پرتوی غیرمتمرکز مثبت زمانی پدید می آید که کوچک ترین قطر پرتو در بالا و خارج قطعه کار قرار می گیرد. به طور مشابه، دو حالت پرتوی متمرکز و غیرمتمرکز منفی بیانگر آن است که کوچک ترین قطر پرتو به ترتیب در سطح و داخل قطعه کار باشد (شکل های ۴ ب و ۴ ج). دقت شود که «آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس» یا به اختصار EDX^۵ نتایج هریک از سه حالت پرتو نیز در شکل نشان داده شده است [۲۵]. در حالت پرتوی غیرمتمرکز منفی پودر به طور کامل ذوب نشده و تمایلی به تشکیل روکش ندارد، چراکه نواحی پراثری پرتوی لیزر به آن برخورد نمی کند. در این مرحله مکانیزم غالب انرژی صرف ذوب قطعه کار می شود. در حالت متمرکز که حالت بهینه است، انرژی پرتوی لیزر به میزان مطلوبی صرف ذوب

¹spot size ²negative defocused ³focused ⁴positive defocused ⁵energy dispersive x-ray ⁶scanning velocity ⁷cooling rate ⁸feeding rate

۵-۲- پارامترهای فرایندی فرعی

۵-۲-۱- تأثیر همپوشانی و جهت مسیره‌ها بر استحکام روکش

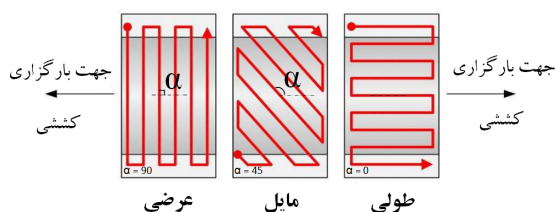
برای ایجاد روکشی کامل و یکنواخت، مطابق شکل ۸ مسیره‌های ۳ روکش با همپوشانی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. به منظور جلوگیری از تشکیل ترک و اتصال کامل بین روکش‌ها، مقداری از مسیر قبلی و قطعه کار توسط مسیر جدید ذوب می‌شود. مقدار ذوب‌شده از مسیر قبلی که در حوضچه مذاب مسیر جدید شرکت می‌کند، «همپوشانی» نامیده می‌شود.



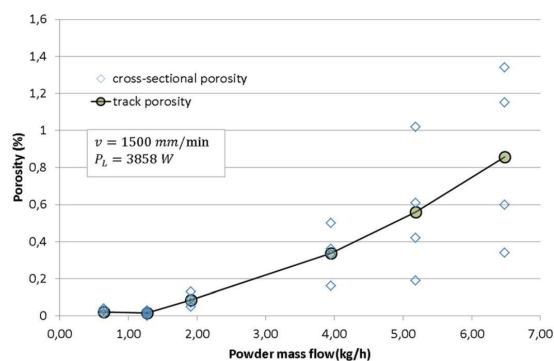
شکل ۸ مسیره‌های روکش کاری [۳۳].

در مطالعه‌ای تأثیر همزمان توان و همپوشانی بر صافی سطح بررسی شد که حاکی از آن بود که در توان‌های پایین (۱۲۰۰ وات) به دلیل اتصال ضعیف و کم ماده ثانویه و قطعه کار، همپوشانی کم منجر به افزایش فاصله بین مسیره‌های روکش شده که صافی سطح و کیفیت سطح روکش را کاهش می‌دهد. این در حالیست که در توان‌های بالا (۱۶۰۰ وات)، پودر مذاب و عمق روکش افزایش یافته و افزایش همپوشانی منجر به افزایش تماس نقاط همپوشانی به قطعه کار و در نتیجه آن افزایش نسبت صافی سطح می‌شود [۳۴]. دقت شود که هدف مطالعه مذکور فراهم‌سازی کم‌ترین صافی سطح و حذف فرایند ماشینکاری (پس از روکش کاری) بود. چنانچه هدف دستیابی با بیشینه ارتفاع روکش باشد، همپوشانی ۲۹/۳٪ پیشنهاد می‌شود [۳۵].

علاوه بر درصد همپوشانی، جهت روکش کاری نیز بر خواص مکانیکی قطعه، تأثیر می‌گذارد. در مطالعه‌ای، استحکام مکانیکی سه جهت روکش کاری برای پودر و قطعه کار از جنس فولاد ۳M300^۴ با حالت بدون روکش بررسی شد. مطابق شکل ۹، جهت و زاویه مسیره‌ها (α) متناسب با جهت بارگذاری در آزمون کشش در نظر گرفته شده که منجر به ایجاد سه مسیر طولی^۵، مایل^۶ و عرضی^۷ شدند [۳۶]. مطابق نمودارهای شکل ۱۰ جهت روکش کاری بر هر دو پارامتر تنش تسلیم و مدول یانگ تأثیر می‌گذارد [۳۶].



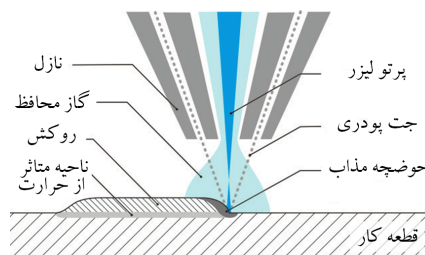
شکل ۹ سه مسیر متفاوت روکش کاری لیزری [۳۶].



شکل ۶ تأثیر نرخ تغذیه بر تخلخل روکش حاصل از فرایند روکش کاری لیزری [۲۸].

۵-۱-۵- تأثیر گاز محافظ بر دمای حوضچه مذاب

یکی از مشخصه‌های مشترک فرایندهای پردازش مواد به کمک لیزر، اعمال انرژی زیاد در مدت زمان کوتاه است که دمای قطعه کار را افزایش می‌دهد. اغلب، فلزات در دماهای بالا، دچار اکسایش می‌شوند که به منظور جلوگیری از آن، از گاز محافظ استفاده می‌شود (شکل ۷) [۲].



شکل ۷ نحوه اعمال گاز محافظ [۲۹].

در مطالعه‌ای تأثیر نوع گاز محافظ بر دمای حوضچه مذاب در فرایند روکش کاری لیزری پودری بر پایه نیکل با نام تجاری اورلیکن متکوکلد ۱۷۱۸ بر قطعه کار از جنس اینکونل ۲۷۱۸^۳ بررسی شد. نتایج این پژوهش در شرایط یکسان با توان ۴۰۰ وات، در سه حالت مختلف آرگون خالص، ۷۵٪ آرگون و ۲۵٪ هلیوم، و ۵۰٪ آرگون و ۵۰٪ هلیوم، مطابق جدول ۴ گزارش شد. شایان ذکر است که آرگون و هلیوم از جمله پرکاربردترین گازهای محافظ مورد استفاده در فرایند روکش کاری لیزری به شمار می‌روند که علت آن عدم شرکت این گازها در واکنش شیمیایی فرایند است [۳۰].

جدول ۴ تأثیر تغییر گاز محافظ بر دمای حوضچه مذاب [۳۰].

ترکیب گاز	میانگین دمای حوضچه مذاب
آرگون ۹۹/۹۹۸٪	۱۹۳۸
آرگون ۷۵٪ هلیوم ۲۵٪	۲۰۹۳
آرگون ۵۰٪ هلیوم ۵۰٪	۲۰۹۷

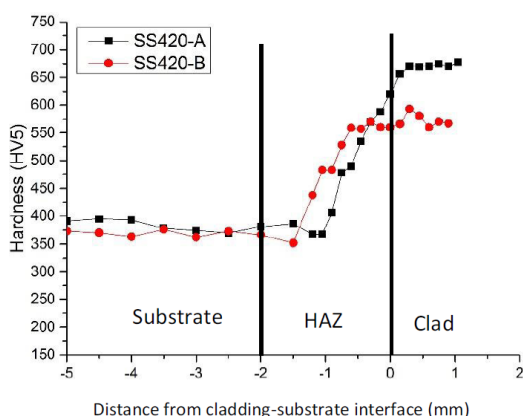
مطابق جدول ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش میزان هلیوم از صفر تا ۵۰ درصد حجمی، میانگین دمای حوضچه مذاب از حدود ۱۹۳۸ تا ۲۰۹۷ درجه کلونین افزایش می‌یابد که دلیل آن، ضریب انتقال حرارت ۴۰ برابر هلیوم نسبت به آرگون است [۳۱، ۳۲]. دقت شود که با افزایش دمای حوضچه مذاب، میزان تخلخل روکش کاهش می‌یابد [۳۰].

^۱Oerlikon MetcoClad ^۲Inconel 718 ^۳tracks ^۴300M (modified AISI 4340) ultra-high strength steel ^۵longitudinal ^۶inclined ^۷transverse

(φ_{max}) و بیشینه راندمان انرژی (Ψ_{max}) در فرایند روکش کاری لیزری پودر NiCrBSi بر قطعه کار فولادی 42CrMo بررسی شد. مطابق شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که افزایش دمای پیش گرم منجر به افزایش نرخ بیشینه تغذیه تزریق و راندمان انرژی می‌شود [۲۲]. دقت شود که هرچه دمای پیش گرم افزایش یابد، انرژی کمتری از لیزر صرف گرم کردن قطعه کار تا نقطه دمای ذوب می‌شود. بنابراین بیشتر انرژی لیزر صرف تشکیل حوضچه مذاب شده و در نتیجه راندمان افزایش می‌یابد. هرچه که بخش بیشتری از انرژی لیزر صرف تشکیل حوضچه مذاب شود، ماده ثانویه بیشتری را می‌توان در فرایند تزریق کرد. بنابراین بیشینه نرخ تغذیه فرایند روکش کاری لیزری نیز افزایش می‌یابد.

۵-۲-۳- تأثیر پس گرم^۱ بر سختی روکش

گرمادهی قطعه روکش شده، پس از اتمام فرایند لیزری را پس گرم می‌نامند. در پژوهشی تأثیر فرایند پس گرم بر روکش حاصل از روش لیزری مطالعه شد. در این مطالعه، با روکش کاری پودر فولاد ۴۱۰ بر قطعه کار فولاد هایپرآکتیوید^۲، پروفیل سختی روکش حاصل مطابق شکل ۱۲، در دو حالت عدم وجود (A) و وجود (B) فرایند پس گرم با دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شد [۳۸].

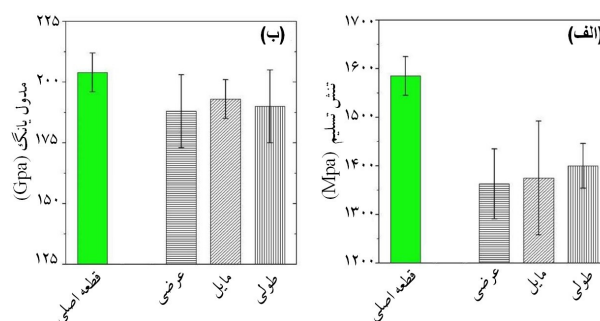


شکل ۱۲ تأثیر وجود و عدم وجود فرایند پس گرم بر سختی روکش حاصل از روش روکش کاری لیزری [۳۸].

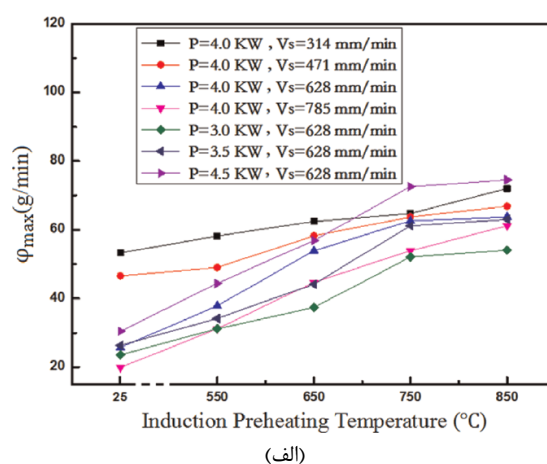
مطابق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که میانگین سختی روکش در دو حالت وجود و عدم وجود پس گرم به ترتیب ۴۷۵ و ۵۱۷ ویکرز است. بنابراین، وجود پس گرم منجر به کاهش سختی روکش و در نتیجه کاهش تردی روکش می‌شود [۳۸]. در مطالعه‌ای روکش کاری لیزری پودر NiCrBSi بر فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰، ذکر شده است که با افزایش دمای پیش گرم، دانه‌های نیکل روکش رشد کرده و مقاومت به حرکت ناب‌جایی کاهش می‌یابد. در نتیجه به نظر می‌رسد که مقاومت به تغییر شکل ناشی از نیروی خارجی نیز کاهش یافته و در ضمن آن سختی سطح نیز کاسته می‌شود [۳۹]. تأیید این نتیجه در پژوهشی دیگر، در فرایند روکش کاری لیزری پودر 70Ni-30C بر آلیاژ Ti6Al4V مشاهده شد [۴۰].

۶- نتیجه‌گیری

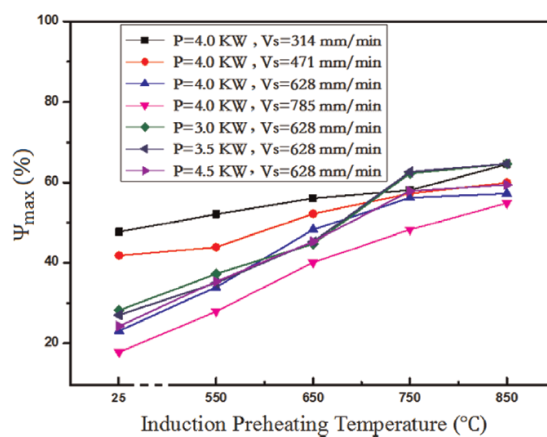
نظر به کاربرد گسترده روکش کاری لیزری، در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری بر این حوزه تمرکز داشته‌اند. با توجه به خلأ



شکل ۱۰ تأثیر جهت روکش کاری بر (الف) تنش تسلیم، (ب) مدول یانگ [۳۶].



(الف)



(ب)

شکل ۱۱ تأثیر دمای پیش گرم (الف) بیشینه نرخ تغذیه و (ب) بیشینه راندمان انرژی لیزر در فرایند روکش کاری لیزر [۲۲].

۵-۲-۲- تأثیر پیش گرم بر بیشینه تغذیه روکش

چنانچه قطعه کار، فلز ثانویه و یا هردو پیش از آغاز فرایند روکش کاری لیزری گرمادهی شوند، در فرایند مذکور، «پیش گرم» انجام شده است. پیش گرم با کاهش سرعت گرم شدن قطعه کار، احتمال ترک در روکش ایجاد شده را کاهش می‌دهد [۲]. برخی مطالعات، پیش گرم در فرایند روکش کاری لیزری را با افزایش راندمان انرژی و افزایش بیشینه نرخ تغذیه تزریقی همراه می‌دانند [۳۷].

در مطالعه‌ای نرخ بیشینه تغذیه تزریق شده به قطعه کار

¹post-clad heat treatment ²hypereutectoid

- tions of laser processing in japan. *The Review of Laser Engineering*, 36(APLS):1188–1191, 2008.
- [5] *Laser Drilling Research and Application: An Update*, vol. All Days of *SPE/IADC Indian Drilling Technology Conference and Exhibition*, 10 2006.
- [6] Roland, Frank, Manzon, Luciano, Kujala, Pentti, Brede, Markus, and Weitzenbock, Jan. *Advanced Joining Techniques in European Shipbuilding. Journal of Ship Production*, 20(03):200–210, 08 2004.
- [7] Toyserkani, Ehsan, Khajepour, Amir, and Corbin, Stephen F. *Laser cladding*. CRC press, 2004.
- [8] Laser processing market with covid-19 impact analysis by laser type (solid lasers, liquid lasers, gas lasers), configuration (fixed beam, moving beam, hybrid), revenue (system revenue, laser revenue), application, end-user industry, and region - global forecast to 2025, 2020. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/Laser-Cutting-Boring-and-Engraving-Machines-Market-611.html>.
- [9] Vilar, Rui. Laser cladding. *Journal of laser applications*, 11(2):64–79, 1999.
- [10] Rickerby, D.S. and Matthews, A. *Advanced Surface Coatings: A Handbook of Surface Engineering*. Blackie, 1991.
- [11] *Development and Application of Dabber Gas Tungsten Arc Welding for Repair of Aircraft Engine, Seal Teeth*, vol. Volume 2: Aircraft Engine; Marine; Microturbines and Small Turbomachinery of *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 04 1982. V002T02A005.
- [12] Yang, Bangjian, Fu, Zhenghong, Li, Ting, Shan, Meile, Guo, Kang, Chen, Bing, Lu, Wei, Gou, Guoqing, and Gao, Wei. Microstructure and fracture toughness properties of CMT repairing welded 7075-t651 MIG welding joint. *Materials Research Express*, 6(12):1265d6, jan 2020.
- [۱۳] آذرگمان، مجید و فورگی نژاد، ابوالفضل. مدلسازی فازی ضخامت لایه در فرایند لایه‌نشانی به‌کمک لیزر پالسی و بهینه‌سازی آن با الگوریتم اجتماع ذرات. *مجله علمی مهندسی مکانیک*، ۱۱۵-۱۲۴-۱۳۹۶.
- [14] Colaço, R., Costa, L., Guerra, R., and Vilar, R. *A Simple Correlation Between the Geometry of Laser Cladding Tracks and the Process Parameters*, pp. 421–429. Springer Netherlands, Dordrecht, 1996.
- [15] Heigel, J.C., Gouge, M.F., Michaleris, P., and Palmer, T.A. Selection of powder or wire feedstock material for the laser cladding of inconel® 625. *Journal of Materials Processing Technology*, 231:357–365, 2016.
- [16] Laser cladding. <https://www.fst.nl/thermal-spray-equipment/modular-thermal-spray-systems/laser-cladding-systems/laser-cladding.html>.
- [17] Abioye, T.E., McCartney, D.G., and Clare, A.T. Laser cladding of inconel 625 wire for corrosion protection. *Journal of Materials Processing Technology*, 217:232–240, 2015.
- موجود، هدف اصلی پژوهش حاضر معرفی کاربردی حوزه‌های مطالعاتی این تکنولوژی است. در این راستا با بهره‌گیری از پژوهش‌های مرتبط بیان شد که مزایای روکش کاری لیزری نسبت به سایر روش‌ها نظیر میگ، تیگ و HVOF به ترتیب دقت بالا، اعوجاج کم و رقت مناسب است. مراحل فرایند پیچیده روکش کاری لیزری به ساده‌ترین شکل ممکن در یک بخش توضیح داده شد. مطابق مطالعات بیان شد که هرچند روکش کاری سیمی مقرون به صرفه است، اما با نوع پودری می‌توان هندسه‌های پیچیده را روکش کاری کرد. مشخص شد که روش خمیری نیز با توجه به کاربرد بسیار کم آن در سال‌های اخیر، عملاً منسوخ شده است. به منظور کاربردی‌تر شدن پژوهش، مطالعات پارامتری این حوزه معرفی شدند. در این راستا پارامترهای فرایندی در دو دسته اصلی و فرعی تقسیم‌بندی شد. در دسته اصلی، مشخص شد که افزایش توان، کاهش سختی روکش را به دنبال دارد. ارتفاع بهینه روکش از پرتو در حالت متمرکز حاصل می‌شود. افزایش سرعت پیشروی منجر به افزایش سختی سطح روکش می‌شود. چنانچه نرخ تغذیه فلز ثانویه افزایش یابد، تخلخل موجود در روکش افزایش می‌یابد. با افزایش درصد هلیوم با همراهی آرگون به عنوان گاز محافظ، دمای حوضچه مذاب افزایش یافته و پودر یکنواخت‌تر ذوب می‌شود. در دسته فرعی، تأثیر جهت مسیر روکش کاری بررسی و مشاهده شد که در حالت روکش کاری طولی تنش تسلیم روکش حاصل نسبت به دو حالت مایل و عرضی بیشتر خواهد بود. بیان شد که افزایش دمای پیش‌گرم منجر به افزایش بیشینه نرخ تغذیه تزریق و راندمان انرژی لیزر می‌شود. همچنین بیان شد وجود فرآیند پس‌گرم، با کاهش سختی روکش، امکان شکست از ناحیه روکش را کاهش می‌دهد.
- در مطالعه حاضر، سعی شد که حوزه‌های مطالعاتی روکش کاری لیزری که در سال‌های اخیر بدان پرداخته شد، معرفی و بررسی شوند. امید است پژوهش حاضر، پاسخی کاربردی، مناسب و در شان این تکنولوژی جذاب و نوپا باشد.

قدردانی

مطالعه حاضر به لطف حمایت‌های مالی و معنوی شرکت دانش‌بنیان پژوهشی-صنعتی طاهاقالب توس فراهم شد. بدین وسیله نگارندگان از تمامی کارکنان واحد مهندسی و لیزر کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

[۱] نبوی، سیده فاطمه، فرشیدیانفر، انوشیروان، و فرشیدیانفر، محمدحسین. اساس لیزر و کاربرد آن در صنعت روز. *مجله علمی مهندسی مکانیک*، ۲۸(۴):۶۱-۷۱، ۱۳۹۸.

[2] Ion, John. *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. Elsevier, 2005.

[3] Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., and Newkirk, J. 13 - aerospace applications of laser additive manufacturing. in Brandt, Milan, ed., *Laser Additive Manufacturing*, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, pp. 351–371. Woodhead Publishing, 2017.

[4] SHIBATA, Kimihiro. Recent automotive applica-

- [30] Ruiz, Jose Exequiel, Cortina, Magdalena, Arrizubieta, Jon Iñaki, and Lamikiz, Aitzol. Study of the influence of shielding gases on laser metal deposition of inconel 718 superalloy. *Materials (Basel, Switzerland)*, 11(8):1388, Aug 2018. 30096886[pmid].
- [31] Arrizubieta, J.I., Taberner, I., Ruiz, J. Exequiel, Lamikiz, A., Martinez, S., and Ukar, E. Continuous coaxial nozzle design for lmd based on numerical simulation. *Physics Procedia*, 56:429–438, 2014. 8th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering LANE 2014.
- [32] Elmer, JW, Vaja, J, Carlton, HD, and Pong, R. The effect of ar and n2 shielding gas on laser weld porosity in steel, stainless steels, and nickel. *Weld J*, 94(10):313s–325s, 2015.
- [33] Oliari, Stella Holzbach, D'Oliveira, Ana Sofia Climaco Monteiro, and Schulz, Martin. Additive manufacturing of h11 with wire-based laser metal deposition. *Soldagem & Inspeção*, 22(4):466–479, 2017.
- [34] Lian, Guofu, Yao, Mingpu, Zhang, Yang, and Chen, Changrong. Analysis and prediction on geometric characteristics of multi-track overlapping laser cladding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5):2397–2407, Jul 2018.
- [35] Li, Yanxiang and Ma, Jian. Study on overlapping in the laser cladding process. *Surface and Coatings Technology*, 90(1):1–5, 1997.
- [36] Rashid, RA Rahman, Barr, CJ, Palanisamy, S, Nazari, KA, Orchowski, N, Matthews, N, and Dargusch, MS. Effect of clad orientation on the mechanical properties of laser-clad repaired ultra-high strength 300 m steel. *Surface and Coatings Technology*, 380:125090, 2019.
- [37] Zhou, Shengfeng, Huang, Yongjun, and Zeng, Xiaoyan. A study of ni-based wc composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding with elliptical spot. *Applied Surface Science*, 254(10):3110–3119, 2008.
- [38] Roy, Taposh, Lai, Quan, Abrahams, Ralph, Mutton, Peter, Paradowska, Anna, Soodi, Mehdi, and Yan, Wenyi. Effect of deposition material and heat treatment on wear and rolling contact fatigue of laser clad rails. *Wear*, 412-413:69–81, 2018.
- [39] Durge, Gaurav, Chandak, Aayush, Jaiswal, Abhimanyu Kumar, Kiran, K Uday Venkat, Sunil, B Ratna, and Dumpala, Ravikumar. Effect of heat treatment on the hardness and wear characteristics of NiCrBSi laser clad deposited on AISI410 stainless steel. *Materials Research Express*, 6(8):086524, may 2019.
- [40] Li, G.J., Li, J., and Luo, X. Effects of post-heat treatment on microstructure and properties of laser clad composite coatings on titanium alloy substrate. *Optics & Laser Technology*, 65:66–75, 2015.
- [18] Lugscheider, E., Bolender, H., and Krappitz, H. Laser cladding of paste bound hardfacing alloys. *Surface Engineering*, 7(4):341–344, 1991.
- [19] Abioye, T. E., Farayibi, P. K., and Clare, A. T. A comparative study of inconel 625 laser cladding by wire and powder feedstock. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(14):1653–1659, 2017.
- [20] Borges, B., Quintino, L., Miranda, Rosa M., and Carr, Phil. Imperfections in laser cladding with powder and wire fillers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(1):175–183, Sep 2010.
- [21] Steen, William M and Mazumder, Jyotirmoy. *Laser material processing*. springer science & business media, 2010.
- [22] Kai-ming, Wang, Han-guang, Fu, Yu-long, Li, Yongping, Lei, Shi-zhong, Wei, and Zhen-qing, Su. Effect of power on microstructure and properties of laser cladding nicrbsi composite coating. *Transactions of the IMF*, 95(6):328–336, 2017.
- [23] Telasang, G., Dutta Majumdar, J., Padmanabham, G., Tak, M., and Manna, I. Effect of laser parameters on microstructure and hardness of laser clad and tempered aisi h13 tool steel. *Surface and Coatings Technology*, 258:1108–1118, 2014.
- [24] Masanta, Manoj, Shariff, S.M., and Roy Choudhury, A. Evaluation of modulus of elasticity, nano-hardness and fracture toughness of tib2–tic–al2o3 composite coating developed by shs and laser cladding. *Materials Science and Engineering: A*, 528(16):5327–5335, 2011.
- [25] Riquelme, Ainhoa, Rodrigo, Pilar, Escalera-Rodríguez, María Dolores, and Rams, Joaquín. Analysis and optimization of process parameters in al–sicp laser cladding. *Optics and Lasers in Engineering*, 78:165–173, 2016.
- [26] Liu, Jianli, Yu, Huijun, Chen, Chuanzhong, Weng, Fei, and Dai, Jingjie. Research and development status of laser cladding on magnesium alloys: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 93:195–210, 2017.
- [27] Barnes, S, Timms, N, Bryden, B, and Pashby, I. High power diode laser cladding. *Journal of materials processing technology*, 138(1-3):411–416, 2003.
- [28] Zhong, Chongliang, Biermann, Tim, Gasser, Andres, and Poprawe, Reinhart. Experimental study of effects of main process parameters on porosity, track geometry, deposition rate, and powder efficiency for high deposition rate laser metal deposition. *Journal of Laser Applications*, 27(4):042003, 2015.
- [29] Graf, Benjamin, Ammer, Stefan, Gumenyuk, Andrey, and Rethmeier, Michael. Design of experiments for laser metal deposition in maintenance, repair and overhaul applications. *Procedia CIRP*, 11:245–248, 2013. 2nd International Through-life Engineering Services Conference.