

بررسی فناوری پوشش دهی لیزری مواد و پارامترهای مؤثر بر آن

جواد رفیعی^۱، احمدرضا قاسمی^{۲*}، بهزاد سلطانی^۲

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

*مسئول مکاتبات: ghasemi@kashanu.ac.ir

◀ واژگان کلیدی

پوشش دهی لیزری
لایه پوششی
ساخت افزایشی
مخلوط شدگی
حوضچه مذاب

◀ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶

◀ چکیده

فناوری و فرایند پوشش دهی لیزری به دلیل ماهیت آن، قابلیت تولید و تعمیر و بهینه سازی قطعات با دقت و پیچیدگی بالا را ایجاد می کند. پوشش دهی لیزری انتقال حرارت پیچیده با گستردگی زیاد و تغییرات ترموالاستوپلاستیک در ارتباط بین میدان های مولتی فیزیکی را ارائه می دهد که با چند پدیده فیزیکی از جمله ذوب شدگی، انجماد، گذر و تغییر فاز در پودر فلز و غیر فلز همراه است. این فرایند شامل گرادیان های گرمایی بالا و نرخ گرمایش و سرمایش است که باعث ایجاد تنش های پسماند، پیچش و اعوجاج می شود. حرارت و میدان های جریان در حوضچه مذاب بر روی هدایت و انتقال گرما، انتقال جرم و انجماد و در نهایت بر روی کیفیت لایه پوشش دهی تأثیر می گذارد. کیفیت و خصوصیات لایه پوششی توسط عوامل زیادی از قبیل هندسه پوشش، میکروساختارها، میزان مخلوط شدگی، وجود نقص، اعوجاج، صافی سطح، تغییرات متالورژیکی در زیر لایه و بازدهی فرایند می تواند مشخص و تعیین شود. این عوامل، بدون در نظر گرفتن درجه اهمیت شان، متأثر از پارامترهای فرایند پوشش دهی و پدیده فیزیکی که در طول فرایند رخ می دهد، هستند. در این تحقیق، به مطالعه و بررسی فرایند پوشش دهی لیزری، بیان انواع و روش انجام آنها، خصوصیات فرایند، پارامترهای مؤثر در طول فرایند و پژوهش های انجام شده در این حوزه پرداخته شده است.

Investigation on the effects of laser cladding parameters technology

J. Rafei¹, A. R. Ghasemi², B. Soltani²

¹ PhD student of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

² Associated Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

► Abstract

Laser cladding technology, creates the ability to produce, repair and optimize parts with high accuracy and complexity. Laser cladding exhibits highly complex heat transfer and thermo-elastic-plastic-flow with multi-physics field coupling changes, which are accompanied by such physical phenomena as melting, solidification and phase transitions in the metal and non-metal powders. This process involves high thermal gradients and heating and cooling rates that cause residual stresses, torsion, and distortion. The temperature rates and flow fields in the molten pool affect convection, heat transfer, mass transfer, and solidification, which ultimately affect the quality of the cladding layer. The quality and properties of the cladding can be determined by many factors such as cladding geometry, microstructures, dilution ratio, defects, distortion, surface smoothness and metallurgical changes in the substrate and process efficiency. These factors, regardless of their degree of importance, are affected by the parameters of the cladding process and the physical phenomena that occur during the process. In this research, a landscape review on the process of laser cladding, type and methods, characteristics of process and effective parameters on process are studied and presented.

► Keywords

Laser cladding
Cladding layer
Additive manufacturing
Dilution
Molten pool

► Article history

Received: 07 Jan 2021

Accepted: 06 Mar 2021

۱ مقدمه

برای محاسبه تنش‌های پسماند ارائه نمود. نتایج حاکی از وابستگی تنشهای پسماند به شکل دامنه ذوب‌شدگی و عدم وابستگی به اندازه آن بود. در این مطالعه، محاسبات برای لایه پوششی شیشه کوارتز بر روی زیرلایه آلومینا با خصوصیات ترموالاستیک انجام گرفت [۱۳]. شیخ^{۱۰} و همکاران لایه پوششی را با هندسه نیم استوانه شبیه‌سازی کردند. آنها مدل اجزای محدود سه‌بعدی برای شبیه‌سازی حرارتی هدایت و انتقال حرارت در طول فرایند با استفاده از لاگراژین-اویلر دلخواه را استفاده نمودند و میدان حرارت را پیش‌بینی کردند [۱۴]. فرهمند و همکاران میدان حرارتی یک‌لایه پوششی، چندلایه و حوزه تنش- کرنش و نحوه تغییر شکل اندازه حوضچه مذاب را مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. زمینیه کامپوزیت ترموپلاست CFRP^{۱۱} توسط روش FDM^{۱۲} توسط فودا نینگ^{۱۳} و همکارانش ساخته شد و پس از آن اثر پودرهای فیبرکربنی بر روی خصوصیات کششی (استحکام کششی، چقرمگی، مدول یانگ و شکل‌پذیری) و خصوصیات پیچشی (تنش پیچشی، مدول و چقرمگی پیچشی) مورد بررسی قرار گرفت [۱۶]. مدل سه‌بعدی اجزا محدود گرمایی- مکانیکی جهت پیش‌بینی تنش‌های پسماند و تغییر شکل توسط ليو^{۱۴} و همکارانش توسعه داده شد و اثر پارامترهای رسوب‌گذاری بر آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. این تحقیق بر روی رسوب فولاد ۱۵۳۰۴ با روش اجزا محدود و نرم‌افزار آباکوس^{۱۶} متمرکز بود [۱۷]. محمود ابراهیم و همکاران، پودر FeCrMoCb را بر روی زیرلایه نیکل بدون فولاد با استفاده از سطوح مختلف انرژی لایه‌گذاری نمودند. این لایه به عنوان یک بیومتریال قابل اطمینان در کاربردهای ایمپلنت دندان است. خصوصیات مکانیکی و متالورژیکی ماده ساخته‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۸].

پوشش‌دهی لیزری به عنوان یکی از روش‌های جدید و اساس ساخت افزایشی لیزری مورد توجه دانشمندان و محققان علوم مختلف از جمله علم مکانیک، مواد و فیزیک قرار گرفته است لذا در این تحقیق، به مطالعه بررسی فرایند پوشش‌دهی لیزری، بیان انواع و روش انجام آنها، خصوصیات فرایند و پارامترهای مؤثر در طول فرایند پرداخته شده است.

۲ روش انجام فرایند

فرایند مهندسی سطح به روش‌های مختلف دسته‌بندی می‌شود از جمله، روش‌های مبتنی بر انجام فرایند در حالت‌های مختلف ماده که حالت گازی، محلول، حالت مذاب و نیمه مذاب و حالت جامد هستند. مهندسی سطح با لیزر جزء روش‌هایی است که بر پایه حالت مذاب و نیمه مذاب است. در ادامه به روش‌های مختلف مهندسی سطح با لیزر پرداخته شده است.

۱.۲ روش‌های مهندسی سطح با لیزر

اندرکنش بین لیزر و ماده که در شکل ۱ نشان داده شده است به فرایندهای مختلفی منجر می‌شود. این اندرکنش‌ها را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱. اندرکنش لیزر با ماده بدون ایجاد تغییر فاز در ماده.

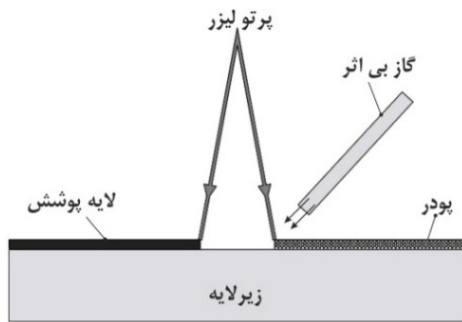
پوشش‌دهی لیزری، ذوب فلزی متفاوت بر روی یک زیر لایه است که در آن لایه‌ای محافظ به ضخامت ۰/۱ تا ۱/۵ میلی‌متر با حداقل ذوب‌شدگی زیر لایه و حداکثر چسبندگی و پیوستگی ایجاد می‌شود که البته این عملیات در صورتی به خوبی شکل می‌گیرد که ترکیب آلیاژ سطحی تحت کنترل، پیوند مستحکمی با زیر لایه داشته باشد [۱]. این روش بصورت تجاری در صنایع هوافضا و اتومبیل‌سازی و همچنین جهت تعمیر و ساخت قالب و رفع خوردگی و ترک‌های سطحی کاربرد دارد [۲]. روش جدید لایه‌گذاری به روش پوشش‌دهی لیزری نه تنها سطح فلز را نسبت به سایش، خزش و خستگی مقاوم می‌کند بلکه جهت تغییر عیوب موضعی ماشین‌ها نیز استفاده می‌شود [۳]. مزایای این فناوری، رسوب پوششی نازک عاری از حفره و ترک با ضخامت قابل کنترل بر روی سطح مورد نظر است [۴]. فرایند پوشش‌دهی لیزری به دو صورت تک‌مرحله و دو مرحله‌ای قابل انجام است. در روش تک‌مرحله‌ای، پودر مورد نظر بوسیله دستگاه تغذیه پودر به ناحیه تابش پرتو لیزر بر سطح زیرلایه، تزریق می‌شود [۵].

۱.۱ تحقیقات انجام‌شده

تاکنون تحقیقات زیادی جهت شبیه‌سازی، آنالیز و توصیف پارامترهای مؤثر بر فرایند پوشش‌دهی لیزری و خواص لایه ایجادشده انجام گرفته و در حال انجام است که در ادامه به بررسی تعدادی از آنها خواهیم پرداخت. در سال ۱۹۴۶، روزنتال^۱ و همکاران توابع تحلیلی سه‌بعدی جهت توصیف شکل حوضچه مذاب ایجادشده در اثر حرکت منبع حرارتی بر روی یک جامد را ارائه نمود [۶]. مازومدر^۲ و همکاران، سیستم نیمه‌پایدار برای میدان حرارت ناشی از پوشش‌دهی لیزری را ارائه نمودند که در آن از اثرات گرمای نهان میدان حرارت حوضچه مذاب چشم‌پوشی کردند [۷]. پیکاسو^۳ در سال ۱۹۹۴ مدل دو بعدی اجزا محدود جهت محاسبه شکل حوضچه مذاب در ارتفاع مشخصی از لایه پوششی را ارائه نمود [۸]. محاسبات عددی فرایند پوشش‌دهی لیزری در حوزه حرارت و تنش- کرنش برای لایه پوششی استلایت^۴ بر روی زیرلایه کرومیم استیل^۵ در سال ۲۰۰۴ توسط ژندرزوووسکی^۶ برای حالت پیش‌گرم و بدون آن انجام گرفت. نتایج نشان داد که در شرایط پیش‌گرم تنش‌ها بسیار کمتر است و ترک مشاهده نمی‌شود [۹]. تویسرکانی و همکارانش مدل سه بعدی اجزای نامحدود ناپایدار برای نشان دادن اثر نرخ تغذیه پودر و سرعت حرکت بر روی فرایند پوشش‌دهی ارائه نمودند [۱۰]. پلاتی^۷ و همکارانش، تنش‌های پسماند در جریان فرایند پوشش‌دهی لیزری زیرلایه فولاد توسط کامپوزیت فلز را بدست آوردند. آنها مدل اجزای محدود سه‌بعدی جهت شبیه‌سازی میدان حرارت و میدان تنش کرنش با در نظر گرفتن تغییر شکل الاستیک- پلاستیک کامل را ارائه نمودند [۱۱]. فروزمهر و همکاران با استفاده از نرم افزار انسیس^۸ دامنه حرارت و تنش در فرایند رسوب‌گذاری لیزری را شبیه‌سازی نمودند آنها اثر رسوب بر روی توزیع تنش را مورد مطالعه قرار دادند [۱۲]. گیوسارف^۹ مدل ترموالاستیک

¹Rosenthal ²Mazumder ³Picasso ⁴stellite SF6 ⁵X10Cr13 fiber reinforced polymer ⁶Jendrzejewski ⁷Plati ⁸Ansys ⁹Gusarov ¹⁰Cheikh ¹¹carbon ¹²fused deposition modeling ¹³Fuda Ning ¹⁴Liu ¹⁵Sst304 ¹⁶ABAQUS

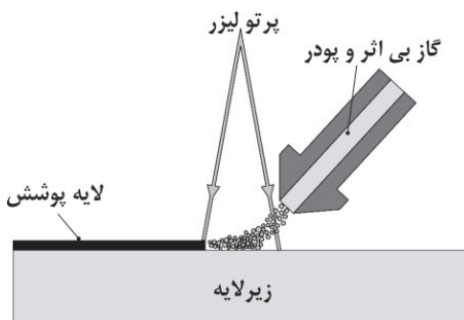
جلوگیری از هدر رفتن ذرات پودر به واسطه وزش جریان گاز در طول مرحله دوم فرایند و همچنین کیفیت خوب پوشش نهایی می‌شود. آب و ماده همبند در فرایند خشک‌کردن در دمای بالا و ذوب لیزری تبخیر می‌شوند که ممکن است باعث ظهور خلل و فرج در لایه نهایی شود. البته پودر پیش‌نشان را می‌توان بوسیله تکنیک‌های دیگر پوشش‌دهی از جمله پاشش حرارتی و الکتروپلیت تثبیت کرد [۱۹-۲۱]



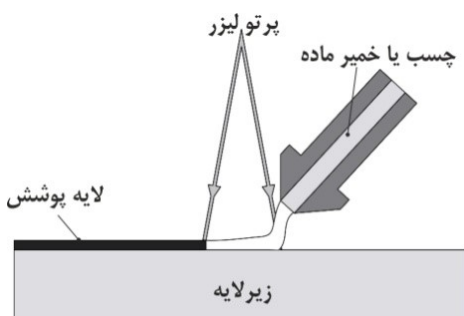
شکل ۲: شماتیک پوشش‌دهی دومرحله‌ای [۱۹].

۲.۲.۲ فرایند پوشش‌دهی تک‌مرحله

در فرایند پوشش‌دهی تک‌مرحله‌ای، ماده متشکله جسم جدید به صورت دینامیکی، به حوضچه مذاب بوجود آمده توسط منبع لیزر تغذیه می‌شود. این حرکت توام منبع لیزر و سیستم تغذیه، لایه پوششی را تشکیل می‌دهد. سطوح بزرگ و یا سازه‌های سه‌بعدی پیچیده را می‌توان بوسیله همپوشانی نوارهای متوالی در کنار هم و یا با ایجاد لایه‌ها بر روی یکدیگر، پوشش‌دهی و یا ایجاد نمود. ماده پوششی می‌تواند به شکل پودر مطابق شکل ۳، چسب مطابق شکل ۴ و مفتول مطابق شکل ۵ باشد.



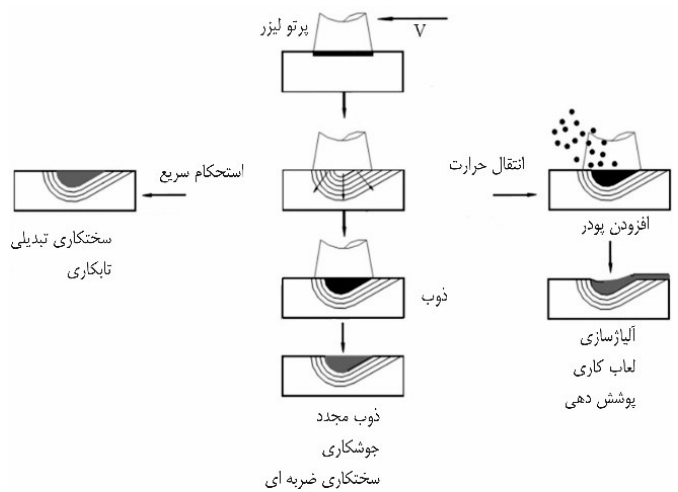
شکل ۳: شماتیک پوشش‌دهی تک‌مرحله‌ای با پودر در بستر گاز حامل [۱۹].



شکل ۴: شماتیک پوشش‌دهی تک‌مرحله‌ای با چسب یا ماده خمیری [۱۹].

۲. اندرکنش لیزر با ماده و ایجاد تغییر فاز در ماده.
۳. اندرکنش لیزر با ماده، ایجاد تغییر فاز در ماده و اضافه کردن ماده دیگر به فرایند.

سخت‌کاری لیزری، ذوب لیزری، جوش لیزری و سخت‌کاری ضربه‌ای بر پایه تغییر میکروساختار لایه سطحی هستند. در پوشش‌دهی لیزری و آلیاژ سازی لیزری، اضافه کردن ماده پوششی به حوضچه مذاب، لایه پوششی با ترکیب شیمیایی متفاوت بر روی زیر لایه ایجاد می‌کند. ترکیب شیمیایی خصوصیات پوشش بستگی به نوع و ماده اضافه‌شده دارد. در آلیاژسازی لیزری تنها مقدار کمی از ماده پوششی به حوضچه مذاب تغذیه می‌شود بنابراین یک اختلاط همگن و کامل از ماده افزودنی و پایه به دست می‌آید. پوشش‌دهی لیزری نیز شبیه آلیاژسازی است با این تفاوت که مخلوط‌شدگی با زیر لایه کمتر و ماده افزودنی بیشتری تغذیه می‌شود [۱۹].



شکل ۱: شماتیک تکنیک‌های مختلف فرآوری مواد با لیزر [۱۹].

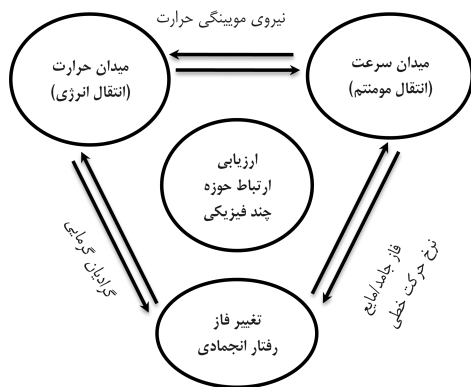
۲.۲ روش‌های مختلف پوشش‌دهی لیزری

ماده افزودنی بر روی زیر لایه به دو روش رسوب می‌کند:
۱. همجوشی ماده افزودنی قبل از قرار گرفتن بر روی سطح ماده پایه (فرایند دومرحله‌ای).
۲. تغذیه ماده افزودنی به صورت دینامیکی به لیزر که حوضچه مذاب را تشکیل می‌دهد (فرایند تک‌مرحله‌ای).

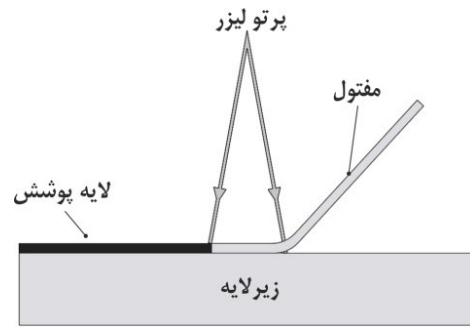
۱.۲.۲ فرایند پوشش‌دهی دومرحله

شکل ۲ شماتیکی از پوشش‌دهی دومرحله‌ای را نشان می‌دهد. در فرایند دومرحله‌ای، مرحله اول شامل رسوب لایه (پیش‌خمیری) بر روی ماده زیرلایه، مرحله دوم شامل ذوب لایه پیش‌نشان‌شده در طول تابش لیزر است. ماده پیش‌نشان می‌تواند در شکل‌های مختلف مانند پودر، خمیر، مفتول، چسب و فویل تهیه شود. پوشش‌دهی با پودر پیش‌نشان یکی از راحت‌ترین روش‌های این فرایند است. پودر معمولاً از محلول حاوی پودر، آب و ماده همبند ساخته شده و به فرایند اضافه می‌گردد. هدف، تضمین همجوشی و اتصال خوب بین لایه پودر پیش‌نشان شده و زیرلایه است. این اتفاق باعث

- فاز ۳: اندرکنش لیزر و پودر و زیرلایه
- فاز ۴: انجماد و ایجاد لایه پوششی



شکل ۶: نمودار ارزیابی ارتباط میدان‌های مولتی فیزیک [۱۹].



شکل ۵: شماتیک پوشش‌دهی تک‌مرحله‌ای با مفتول [۱۹].

پوشش‌دهی لیزری با تغذیه همزمان پودر به دلیل محدوده وسیعی از مواد که به صورت پودر موجود هستند و بازده اتصال خوب بین پودر و پرتو لیزر یکی از گسترده‌ترین روش‌های تک‌مرحله‌ای است.

در یک دستگاه پوشش‌دهی لیزری با پاشش پودر سه جزء اصلی وجود دارد: سیستم لیزر، سیستم رباتیک کنترل شونده با کامپیوتر CNC^{۱۷} و سیستم تغذیه پودر [۲۲].

هدف سیستم لیزری مهیا نمودن انرژی لازم برای فرایند به واسطه پرتو لیزر است. عمومی‌ترین سیستم‌های کانونی‌کننده لیزر پرتوهای دایره‌ای شکل، خطی و مستطیلی را ایجاد می‌کند. شدت پرتو دایره‌ای تابعی از فاصله شعاع است در حالیکه پرتو خطی و مستطیلی شکل شدت یکنواخت دارند. شکل پرتو توسط لنز و آینه‌های انتقال و کانونی‌کننده پرتو و سطح پرتو (اندازه لکه) توسط تغییر فاصله بین اجزای کانونی‌کننده و سطح ترکیب می‌تواند کنترل شود. معمولاً پرتو لیزر عمود بر سطح زیرلایه می‌تابد [۱۹-۲۱].

۳ اندرکنش میدان‌های مولتی-فیزیک در فرایند

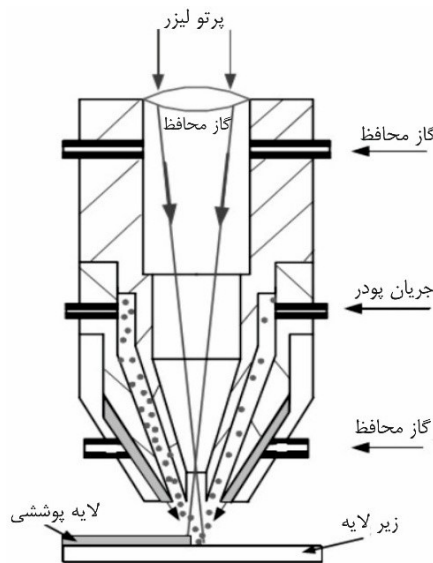
پوشش‌دهی لیزری

نمودار شکل ۶ بیانگر ارتباط بین میدان‌های مولتی فیزیک و اندرکنش بین آنها در فرایند پوشش‌دهی لیزری است. پوشش‌دهی لیزری انتقال حرارت پیچیده با گستردگی زیاد و تغییرات ترموالاستوپلاستیک در ارتباط بین میدان‌های مولتی فیزیک را ارائه می‌دهد که با چند پدیده فیزیکی از جمله ذوب‌شدگی، انجماد، گذر و تغییر فاز در پودر فلز و غیرفلز همراه است. این فرایند شامل گرادیان‌های گرمایی بالا و نرخ گرمایش و سرمایش است که اثر مستقیم در اعوجاج، پیچش و تنش‌های پسماند دارد. حرارت و میدان‌های جریان در حوضچه مذاب بر روی هدایت و انتقال گرما، انتقال جرم و انجماد تأثیر می‌گذارد و در نهایت بر روی کیفیت لایه پوشش‌دهی تأثیر می‌گذارد [۲۳].

۴ فازبندی فرایند پوشش‌دهی لیزری

با توجه به مطالب مطرح شده و اساس کار پوشش‌دهی لیزری، به طور کلی این فرایند را می‌توان به چهار فاز تقسیم نمود:

- فاز ۱: تولید و انتقال انرژی
- فاز ۲: انتقال پودر در بستر گاز حامل و گاز محافظ



شکل ۷: هد پوششی‌دهی لیزری با نازل هم‌محور [۱۹].

و پارامترهای زیرلایه (هندسه و جرم، ترکیبات شیمیایی، شرایط سطح، خصوصیات ترموفیزیکی و اپتیکی) می‌شود، وابسته است. پارامترهای عملکردی بوسیله کاربر دستگاه و تأثیر تغییرات آن بر روی نتایج فرایند می‌تواند تغییر کند. توان خروجی لیزر، سرعت حرکت و روبش لیزر، نرخ تغذیه پودر به واسطه تأثیر زیاد آنها بر روی خصوصیات لایه پوششی، پارامترهای بنیادین هستند [۲۵].

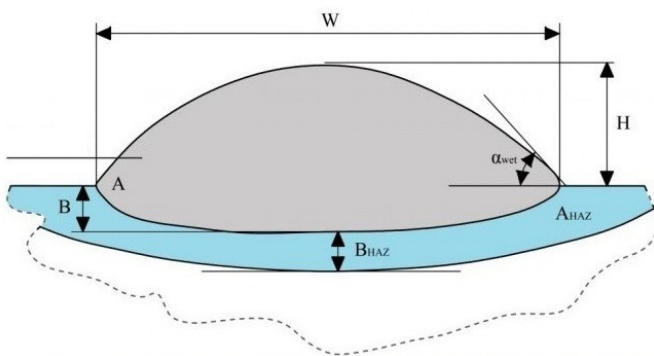
۷ خصوصیات لایه پوششی

همان‌طور که اشاره شد خصوصیات لایه‌های پوششی لیزری بوسیله عوامل مختلفی مشخص می‌شود که در این بخش خصوصیات اصلی لایه معرفی می‌شوند.

۱.۷ هندسه پوشش

سطح مقطع یک نوار تکی لایه پوششی در شکل ۹ نشان داده شده است که پارامترهای مهم تشکیل دهنده آن عبارتند از [۶، ۱۲]:

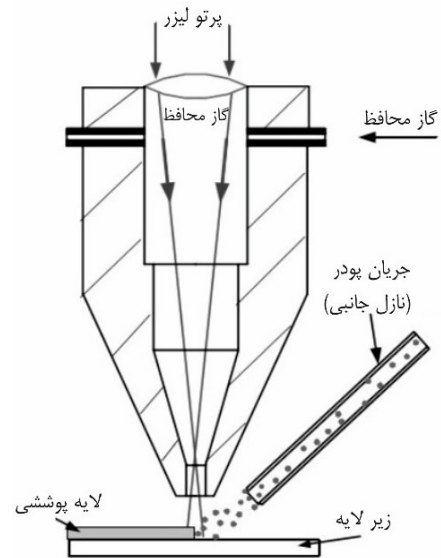
- ارتفاع لایه (H): ضخامت نوار لایه پوششی بر روی سطح ماده زیرلایه
- عرض یک نوار تکی لایه پوششی (W)
- ضخامت زیرلایه ذوب‌شده در طول پوشش‌دهی و لایه پوشش جایگزین (B)
- سطح مقطع لایه پوشش داده شده (A)
- عمق ناحیه متأثر از گرما در زیرلایه (B_{HAZ})
- سطح ناحیه متأثر از گرما در زیرلایه (A_{HAZ})
- زاویه تماس یا ترشدگی (زاویه بین سطح زیرلایه و مماس بر سطح لایه پوششی) (α_{wet})



شکل ۹: سطح مقطع لایه پوششی همراه با خصوصیات هندسی [۲۵].

۲.۷ مخلوط‌شدگی

مخلوط‌شدگی به نظر یکی از مهم‌ترین عوامل برای کنترل عدم خلوص لایه پوششی بوسیله ماده زیرلایه است. در واقع یک سطح کمینه از اختلاط جهت تضمین اتصال خوب با زیرلایه لازم است. مخلوط‌شدگی بیش از حد ممکن است اثر منفی و معکوس بر پارامترهای پوشش داشته باشد. مخلوط‌شدگی به روش‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. عمومی‌ترین روش بوسیله اندازه‌گیری



شکل ۸: هد پوششی دهی لیزری با نازل جانبی [۱۹].

۶ پارامترهای مؤثر در تحلیل فرایند

کیفیت و خصوصیات لایه پوششی توسط عوامل زیادی از قبیل هندسه پوشش، میکروساختارها، میزان مخلوط‌شدگی، وجود نقص، اعوجاج، صافی سطح، تغییرات متالورژیکی در زیرلایه و بازدهی فرایند می‌تواند مشخص و تعیین شود. این عوامل، بدون در نظر گرفتن درجه اهمیت‌شان، متأثر از پارامترهای فرایند پوشش‌دهی و پدیده فیزیکی که در طول فرایند رخ می‌دهد، هستند. جدول ۱ پارامترهایی که در فرایند پوشش‌دهی لیزری دخالت دارند را نشان می‌دهد که به سه دسته پارامترهای ورودی، فرایند و خروجی تقسیم می‌شوند.

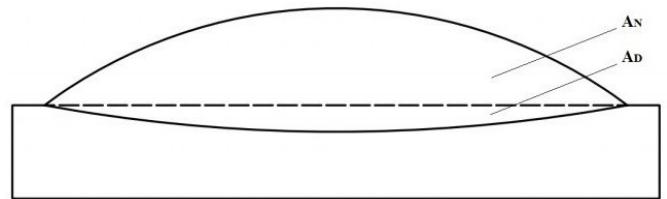
جدول ۱: پارامترهایی مؤثر در فرایند پوشش‌دهی لیزری [۲۵].

ورودی	
طول موج؛ قطبش؛ شدت؛ ابعاد لکه	خصوصیات پرتو
خصوصیات زیرلایه؛ هندسه؛ جرم؛ ترکیبات شیمیایی؛ شرایط سطح؛ خصوصیات متالورژیکی، اپتیکی و ترموفیزیکی	خصوصیات ماده
تجهیزات تغذیه؛ جهت و زاویه؛ گاز محافظ	پارامترهای تغذیه
توان لیزر؛ سرعت روبش؛ نرخ تغذیه؛ همپوشانی؛ پیش‌گرم؛ رویکرد لایه‌گذاری	پارامترهای عملکردی
اندازه ذره؛ مورفولوژی؛ ترکیبات؛ خصوصیات ترموفیزیک و اپتیکی	خصوصیات پودر
خروجی	
هندسه؛ نسبت طول به عرض؛ میکروساختار؛ مخلوط‌شدگی؛ ترک و تخلخل؛ تنش پسماند؛ صافی سطح؛ اعوجاج؛ بازدهی ماده و انرژی؛ قابلیت تولید؛ تغییرات متالورژیکی در زیرلایه	
فرایند	
پدیده‌های فیزیکی؛ جذب؛ هدایت، انتقال و تابش؛ دینامیک حوضچه مذاب؛ اکسیداسیون؛ انجماد؛ اندرکنش لیزر-پودر-حوضچه مذاب-گاز	

پارامترهای فرایند شامل پارامترهای پرتو، تغذیه، مواد و پارامترهای عملکردی می‌شوند که معمولاً پارامترهای پرتو و تغذیه متأثر از تجهیزات لیزر و اپتیک و سیستم تغذیه هستند و پارامترهای ماده به انتخاب ماده مورد نظر جهت لایه‌نشانی و زیرلایه که شامل خصوصیات پودر (اندازه ذره، مورفولوژی، ترکیبات شیمیایی، خصوصیات ترموفیزیک و اپتیکی)

دو قسمت ترک ترد و ترک داغ تقسیم می‌شود. ترک داغ پوشش‌دهی لیزری شبیه ترک داغ جوش است. این نقص‌ها به دلیل فازها و یا وجود ناخالصی‌ها با دمای ذوب پایین است، که معمولاً در منطقه همجوشی نزدیک به انتهای انجماد ظاهر می‌شوند. ترک‌های داغ معمولاً در نوار لایه پوششی به‌طور طولی و در طول مرز دانه‌ها به‌واسطه جدایی ناشی از ناخالصی‌ها اتفاق می‌افتد. ترک ترد در طول فرایند خنک‌سازی هنگامی که پوشش داغ تمایل به انقباض دارد، ولی توسط زیرلایه سرد و جامد مقید گردیده است، رخ می‌دهد. این ترک معمولاً عمود بر سطح اتصال لایه پوشش و زیرلایه ایجاد می‌شود. یک راه حل برای جلوگیری از ایجاد آن، پیش‌گرم کردن زیرلایه است.

نسبت $\frac{A_D}{A_N + A_D}$ بین سطح مقطع ذوب‌شدگی ماده زیرلایه (A_D) و سطح مقطع کلی از لایه پوششی ($A_N + A_D$) است، که به صورت شماتیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است [۲۶، ۲۷].



شکل ۱۰: شماتیک سطح مقطع لایه پوششی و ذوب‌شدگی زیرلایه [۲۵].

۳.۷ میکروساختار

پارامترهای عملکردی و کیفیتی لایه تولیدشده با فناوری پوشش‌دهی لیزری، به شدت وابسته به ساختار میکرونی نهایی هستند. اولین پیش‌شرط برای فرایند پوشش‌دهی موفق، یکنواختی حوضچه مذاب است که این یکنواختی بواسطه انتقال حرارت تضمین می‌شود. در واقع گرادیان‌های گرمایی در حوضچه مذاب، انتقال گرمای شدید بواسطه اثر ماراگنی^{۱۸} را تولید می‌کنند. پارامتری که اثر انتقال حرارت بر روی یکنواختی مذاب را مشخص می‌کند، عدد کشش سطحی S است که با رابطه (۱) داده می‌شود [۲۸].

$$S = \frac{d\gamma}{dt} \frac{QD}{\mu VK} \quad (1)$$

$\frac{d\gamma}{dt}$ ضریب کشش سطحی، Q جریان انرژی خالص بر روی سطح ناشی از پرتو لیزر، D قطر پرتو لیزر، V سرعت رویش، μ ویسکوزیته حوضچه مذاب و K ضریب هدایت حرارتی ماده پوشش‌دهی است. همراه با یکنواختی حوضچه مذاب کنترل فرایند استحکام (انجماد) برای رسیدن به میکروساختار مورد دلخواه، بسیار بااهمیت و اساسی است. در پوشش‌دهی لیزری نرخ خنک‌سازی خیلی بالا است و میکروساختار نهایی اغلب با فرایند انجماد مشخص می‌شود. میکروساختار انجماد به شرایط موضعی انجماد که با نرخ سرمایش R و گرادیان گرمایی در فصل مشترک جامد-مایع G معین می‌شود، بستگی دارد. شرایط انجماد تابعی از اندازه و هندسه مذاب است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود این شرایط می‌تواند تابعی از عمق لایه تشکیل شده باشد.

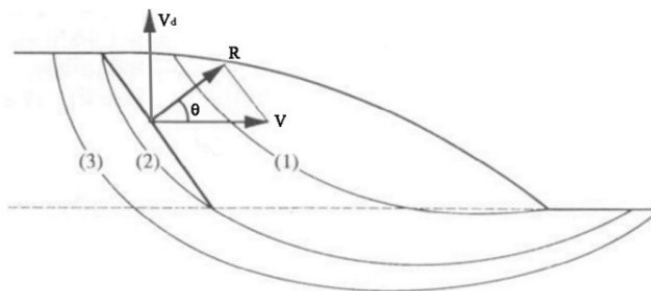
رابطه (۲) نرخ انجماد و سرعت رویش را به صورت زیر نشان می‌دهد:

$$R = V \cos \theta \quad (2)$$

که در آن θ زاویه بین سرعت رویش و جهت عمود بر سطح اتصال جامد و مایع است [۲۵].

۴.۷ نقص‌های پوشش

اصلی‌ترین نقص‌هایی که ممکن است در تولید لایه پوششی به‌واسطه پوشش‌دهی لیزری اتفاق بیفتد ترک و تخلخل است. ترک در لایه پوششی به



شکل ۱۱: مقطع عرضی موازی با جهت حرکت برش داده‌شده در مرکز نوار پوششی؛ نشانگر انجماد، R شعاع، V سرعت رویش، θ زاویه بین آنها و V_d نرخ رشد لایه‌هاست [۲۵].

۵.۷ تنش‌های پسماند

در پوشش‌دهی لیزری به دلیل اینکه پرتو لیزر یک منبع گرمایی موضعی با شدت بالا و زمان اندرکش پایین است گرادیان‌های گرمایی بزرگ بین لایه پوششی (مذاب داغ) و زیرلایه‌ی به نسبت سرد ایجاد می‌شود. در طول خنک‌سازی سریع اولیه، ماده پوششی تمایل به انقباض دارد ولی انقباض توسط زیرلایه محدود می‌شود. این امر باعث ایجاد تنش‌های کششی می‌شود که این تنش‌ها به‌طور مستقیم به ضریب انبساط حرارتی ماده پوششی (α_c) مدول یانگ آن (E_c) و اختلاف حرارت بین حرارت مذاب ماده پوششی و حرارت زیرلایه در طول فرایند (ΔT) مطابق با رابطه (۳) وابسته می‌شود.

$$\sigma_{th} = E_c \alpha_c \Delta T \quad (3)$$

این تنش‌ها بوسیله تغییر شکل‌های پلاستیک و خزش می‌توانند به‌طور جزئی کاهش یابند. در مرحله دوم از خنک‌سازی (رسیدن از دمای فرایند به دمای محیط)، تنش‌های پسماند ایجاد می‌شود. در این مورد، بزرگی و علامت تنش‌ها بستگی به اختلاف دما بین حوضچه مذاب و زیرلایه در طول فرایند، خصوصیات مکانیکی آن (مدول یانگ و تنش تسلیم)، نرخ خنک‌سازی، هندسه زیرلایه و انتقال فاز حالت جامد شامل تغییرات حجم، بستگی دارد. اگر فرض شود هیچ تغییر شکل و یا تغییر حجم به‌واسطه انتقال فاز وجود ندارد، تنش‌های ایجاد شده می‌تواند با رابطه (۴) تخمین زده شوند.

$$\sigma = \frac{(\alpha_c - \alpha_s) \Delta T E_c}{1 - \nu_c} \quad (4)$$

¹⁸Maragoni effect

- [9] Jendrzejewski, R, Śliwiński, G, Krawczuk, M, and Ostachowicz, W. Temperature and stress fields induced during laser cladding. *Computers & structures*, 82(7-8):653-658, 2004.
- [10] Toyserkani, Ehsan, Khajepour, Amir, and Corbin, Steve. 3-d finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process. *Optics and lasers in engineering*, 41(6):849-867, 2004.
- [11] Plati, A, Tan, JC, Golosnoy, IO, Persoons, R, Van Acker, Karel, and Clyne, TW. Residual stress generation during laser cladding of steel with a particulate metal matrix composite. *Advanced engineering materials*, 8(7):619-624, 2006.
- [12] Foroozmehr, Ehsan and Kovacevic, Radovan. Effect of path planning on the laser powder deposition process: thermal and structural evaluation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(5-8):659-669, 2010.
- [13] Gusarov, AV, Pavlov, M, and Smurov, I. Residual stresses at laser surface remelting and additive manufacturing. *Physics Procedia*, 12:248-254, 2011.
- [14] El Cheikh, Hussam, Courant, Bruno, Branchu, Samuel, Hascoet, Jean-Yves, and Guillén, Ronald. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(3):413-422, 2012.
- [15] Farahmand, Parisa and Kovacevic, Radovan. An experimental- numerical investigation of heat distribution and stress field in single-and multi-track laser cladding by a high-power direct diode laser. *Optics & Laser Technology*, 63:154-168, 2014.
- [16] Ning, Fuda, Cong, Weilong, Qiu, Jingjing, Wei, Junhua, and Wang, Shiren. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80:369-378, 2015.
- [17] Liu, Heng, Sparks, Todd, Liou, Frank, and Dietrich, David M. Residual stress and deformation modelling for metal additive manufacturing processes. *Proc. World Congr. Mech. Chem. Mater. Eng.(MCM 2015)*, 2015.
- [18] Ibrahim, Mahmoud Z, Sarhan, Ahmed AD, Kuo, TY, Hamdi, M, Yusof, Farazila, Chien, CS, Chang, CP, and Lee, Tzer-Min. Advancement of the artificial amorphous-crystalline structure of laser cladmed ferromob on nickel-free stainless-steel for bone-implants. *Materials Chemistry and Physics*, 227:358-367, 2019.
- [19] Toyserkani, Ehsan, Khajepour, Amir, and Corbin, Stephen F. *Laser cladding*. CRC press, 2004.
- [20] Tuominen, Jari. *Engineering coatings by laser cladding-the study of wear and corrosion properties*. Ph.D. thesis, 2009.
- [21] Hoadley, AFA and Rappaz, Mb. A thermal model of laser cladding by powder injection. *Metallurgical transactions B*, 23(5):631-642, 1992.
- [22] Gedda, Hans, Powell, John, Wahlström, G, Li, WB, Engström, Hans, and Magnusson, Claes. Energy redistribution during co2 laser cladding. in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, vol. 2001, pp. 549-558. Laser Institute of America, 2001.

که σ تنش های پسماند ایجاد شده، α_s و α_c به ترتیب، ضریب انبساط حرارتی لایه پوششی و زیرلایه، ΔT_1 اختلاف حرارت بین حوضچه مذاب و زیرلایه، E_c مدول یانگ لایه پوششی و v_c ضریب پواسون ماده پوششی است [۲۵].

۸ نتیجه گیری

در این مطالعه روش پوشش دهی لیزری مورد بررسی قرار گرفت. فرایند پوشش دهی لیزری، چگونگی انجام، پارامترهای مؤثر، مزایا، محدودیت ها و خصوصیات آن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه این فرایند یک فرایند مولتی-فیزیک است، پارامترهای زیادی در شکل گیری نتیجه نهایی آن تأثیر دارند که از مهمترین آنها توان لیزر، سرعت حرکت و نرخ تغذیه ماده پوششی را می توان نام برد. کاربرد این تکنیک به دلیل کنترل انرژی دقیق، موضعی بودن آن، استحکام و یکنواختی در لایه پوششی تنوع در استفاده از مواد مختلف و سرعت بالا، به طور روزافزون در صنایع مختلف و بازسازی قطعات حساس و گرانتیمت در حال افزایش است. یکی از مهم ترین کاربردهای این روش استفاده موضعی از آن در سطوح و مقیاس کوچک و در نواحی با پوشش های حساس و دقیق با سختی بالاتری است. این فرایند، روشی سریع و پیشرفته جهت بهبود خواص و ویژگی های سطحی ماده، نظیر بهبود مقاومت خوردگی و استحکام مکانیکی است.

مراجع

- [1] Nowotny, S, Richter, A, and Tangermann, K. Surface protection of light metals by one-step laser cladding with oxide ceramics. *Journal of thermal spray technology*, 8(2):258-262, 1999.
- [2] Picasso, M and Rappaz, M. Laser-powder-material interactions in the laser cladding process. *Le Journal de Physique IV*, 4(C4):C4-27, 1994.
- [3] Lim, JS, Ng, KL, and Teh, KM. Development of laser cladding and its application to mould repair. *SIMTech Tech Reports*, 9:142-147, 2008.
- [4] Qian, M, Lim, LC, Chen, ZD, and Chen, WI. Parametric studies of laser cladding processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 63(1-3):590-593, 1997.
- [5] Ocelík, V, De Oliveira, U, De Boer, M, and De Hosson, J Th M. Thick co-based coating on cast iron by side laser cladding: Analysis of processing conditions and coating properties. *Surface and Coatings Technology*, 201(12):5875-5883, 2007.
- [6] Rosenthal, Daniel. The theory of moving sources of heat and its application of metal treatments. *Transactions of ASME*, 68:849-866, 1946.
- [7] Mazumder, J and Steen, WM. Heat transfer model for cw laser material processing. *Journal of Applied Physics*, 51(2):941-947, 1980.
- [8] Picasso, M and Hoadley, AFA. Finite element simulation of laser surface treatments including convection in the melt pool. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 1994.

- Durali, Mohammad. Prediction of melt pool depth and dilution in laser powder deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(12):2613, 2006.
- [27] Hofman, JT, De Lange, DF, Pathiraj, B, and Meijer, J. Fem modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2):187-196, 2011.
- [28] Drezet, J-M, Pellerin, Sébastien, Bezençon, Cyrille, and Mokadem, Sélim. Modelling the marangoni convection in laser heat treatment. in *Journal de Physique IV (Proceedings)*, vol. 120, pp. 299-306. EDP sciences, 2004.
- [23] Lin, Jehnming and Hwang, Bor-Chyang. Coaxial laser cladding on an inclined substrate. *Optics & Laser Technology*, 31(8):571-578, 1999.
- [24] Li, Chang, Yu, Zhibin, Gao, Jingxiang, Zhao, Jinyue, and Han, Xing. Numerical simulation and experimental study of cladding Fe60 on an ASTM 1045 substrate by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 357:965-977, 2019.
- [25] Zanzarin, Simone. *Laser cladding with metallic powders*. Ph.D. thesis, University of Trento, 2015.
- [26] Fathi, Alireza, Toyserkani, Ehsan, Khajepour, Amir, and