

## A review on the presence of lasers in the processes of coating, repair, and prototyping

\*Mohammad Hossein Farshidianfar<sup>1</sup>, Seyed Fariborz Eshraghi<sup>2</sup>, Seyedeh Fatemeh Nabavi<sup>3</sup>, Anooshiravan Farshidianfar<sup>4</sup>

1- Assistant Professor, Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- B.Sc. student, Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- PhD, Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

4- Professor, Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

**Citation:** Farshidianfar M. H, Eshraghi S.F, Nabavi S.F, Farshidianfar A. A review on the presence of lasers in the processes of coating, repair, and prototyping. Metallurgical Engineering 2022; 24(4): 325-342 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2022.535727.1329>

**doi** : <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2022.535727.1329>

### ABSTRACT

The aim of this study is to provide the characteristics of laser cladding and its application in three areas of coating, repair and prototyping. Among the innovations of this research, we can compare the features and advantages of laser coating with other conventional methods such as tags, etc. by mentioning sample studies. Also, the study of the areas of coating, repair / reconstruction and prototyping of laser coating with mentioning an objective industrial example in order to understand the exact application of other innovations of the present study is considered. In other words, the innovation of this research is the presentation of features and application of laser coating in three areas of coating, reconstruction and prototyping of industrial parts in comparison with other methods that were not addressed in a study. In this regard, the benefits of this technology will be presented first. Details of the laser coating process of the brake discs are given. How to repair the gas turbine fuel nozzle and rebuild the locomotive engine body by laser method will also be introduced. A prominent example of laser prototyping is the production of a helicopter engine combustion chamber. For a better understanding, a comprehensive overview of previous studies will be provided. Finally, the speed and capabilities used in each of the three areas of coating, reconstruction and laser prototyping are introduced.

**Keywords:** Laser, Laser cladding, Coating, Repair, Rapidprototype.

Received: 31 August 2021

Accepted: 27 August 2022

■.....■

\* **Corresponding Author:**

**Mohammad Hossein Farshidianfar, PhD**

**Address:** Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

**Tel:** +98 (51) 38806000

**E-mail:** Farshidianfar@um.ac.ir

## مروری بر حضور روکش کاری لیزری در فرایندهای پوشش دهی، بازسازی و نمونه سازی قطعات

محمد حسین فرشیدیان فر<sup>۱</sup>، سید فریبرز اشراقی<sup>۲</sup>، سیده فاطمه نبوی<sup>۳</sup>، انوشیروان فرشیدیان فر<sup>۴</sup>

- ۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- ۲- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- ۳- دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- ۴- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

### چکیده

هدف مطالعه حاضر بیان ویژگی‌های روکش کاری لیزری و کاربرد آن در سه حوزه پوشش دهی، تعمیر/بازسازی و نمونه سازی است. از جمله نوآوری این پژوهش می‌توان مقایسه ویژگی‌ها و برتری‌های روکش کاری لیزری با سایر روش‌های مرسوم نظیر تیگ و ... با ذکر نمونه مطالعاتی را نامبرد. همچنین، بررسی حوزه‌های پوشش دهی، تعمیر/بازسازی و نمونه سازی روکش کاری لیزری با ذکر مثال عینی صنعتی به جهت درک کاربرد دقیق از دیگر نوآوری‌های مطالعه حاضر محسوب می‌شود. به عبارت دیگر، نوآوری این پژوهش، ارائه ویژگی‌ها و کاربرد روکش کاری لیزر در سه حوزه پوشش دهی، بازسازی و نمونه سازی قطعات صنعتی در مقایسه با سایر روش‌ها است که در مطالعه‌های بدان پرداخته نشد. در این راستا، نخست مزایای این تکنولوژی ارائه خواهند شد. جزئیات فرایند پوشش دهی لیزری دیسک‌های ترمز بیان می‌شوند. نحوه تعمیر نازل سوخت توربین گازی و بازسازی بدنه موتور لوکوموتیو به روش لیزری نیز معرفی خواهند شد. مثال برجسته نمونه سازی لیزری یعنی تولید محفظه احتراق موتور هلیکوپتر نیز بررسی می‌شود. به جهت درک بهتری، مروری جامع و کامل بر مطالعات پیشین ارائه خواهد شد. در نهایت سرعت و توان‌های مورد استفاده در هر یک از سه حوزه پوشش دهی، بازسازی و نمونه سازی لیزری معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: لیزر، روکش کاری لیزری، پوشش دهی، تعمیر، نمونه سازی.

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹ | پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

### ۱. مقدمه

پس از پیدایش تکنولوژی لیزر در سال ۱۹۶۰ میلادی [۸]، دقت و انعطاف لیزر سبب جلب توجه مهندسان و محققان در حوزه‌های روکش کاری و ساخت افزایشی<sup>۱</sup> شد. هزینه‌ی اولیه بالا و بازده پایین منابع لیزر، کاربرد گسترده لیزر در صنعت را تا دهه ۸۰ میلادی به تاخیر انداخت [۹]. از آن پس به لطف پیشرفت علم، این تکنولوژی به طور گسترده در فرایندهای تولید و ساخت استفاده شد [۱۰]. به طوریکه امروزه یکی از سردمداران حوزه تولید محسوب می‌شود که در ادامه چرایی این امر بررسی خواهد شد.

اغلب از فرایند روکش کاری لیزری به منظور ارتقاء سختی [۱۱]، افزایش مقاومت به سایش [۱۲]، خوردگی [۱۳]، اکسیداسیون و خستگی [۱۴] استفاده می‌شود. پیوند

روکش کاری سطح با توجه به نیاز صنعت، یکی از موضوعات روز جهان محسوب می‌شود. چراکه به لطف این تکنولوژی در عین تولید قطعه با کیفیت و خواص مطلوب، می‌توان در مواد مصرفی نیز به شیوه‌ای هدفمند صرفه جویی کرد [۱]. در اینجا شاید این سوال پیش بیاید که اصولاً چرا روکش کاری؟ قطعات تولیدی در اغلب موارد در شرایط کاری خاص نظیر دماهای بالا [۲]، فشارهای شدید [۳]، رطوبت [۴]، محیط‌های اسیدی [۵] و ارتعاشات [۶] قرار می‌گیرند. این شرایط دست به دست هم داده تا قطعات دچار آسیب‌های سطحی شوند. علاوه بر آن تولید مواد فلزی که بتواند در مقابل شرایط مذکور بدون آسیب باقی بماند امری بس مشکل است [۷]. تمامی این مشکلات، محققان و صنعتگران را رهنمون تکنولوژی‌های نوین روکش کاری لیزری کرده است.

\* نویسنده مسئول:

دکتر محمد حسین فرشیدیان فر

نشانی: مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک.

تلفن: ۳۸۸۰۶۰۰۰ (۵۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: Farshidianfar@um.ac.ir

1. Additive Manufacturing

## ۲. تحولات متالورژیکی فرایند روکش کاری لیزری

در فرایند روکش کاری لیزری، در کنار تاثیر پارامترهای فرایند بر خواص روکش که در مطالعه قبل بدان پرداخته شد [۲۷]، مشخصات و خواص مواد روکش بر خواص روکش حاصل تاثیرگذار هستند. مواد افزودنی یا ثانویه که در حین فرایند روکش کاری لیزری بر قطعه کار تزریق می‌شود، باید سازگاری مناسبی با فلز پایه داشته باشد. نظر به این اهمیت در بخش حاضر به این مهم پرداخته می‌شود. مواد مورد استفاده در فرایند روکش کاری لیزری می‌توانند فلزات و آلیاژهای آن‌ها، سرامیک‌ها و ترکیبی از آن‌ها، کامپوزیت و برخی مواد خاص باشند [۲۸]. در ادامه رفتار متالورژیکی روکش حاصل از مواد فلزی و سرامیکی در فرایند روکش کاری لیزری، به دلیل اهمیت بیشتر نسبت به سایر مواد، معرفی و بررسی خواهند شد.

### فلزات و آلیاژها

پودر فلزات یا آلیاژهای آن یکی از مرسوم‌ترین مواد مورد استفاده در فرایند روکش کاری لیزری هستند. در حال حاضر از پودر مواد پایه آهن، پایه نیکل و پایه کبالت در فرایند روکش کاری لیزری به طور گسترده استفاده می‌شود.

پارامترهای فرایندی تاثیر قابل توجهی بر خواص متالورژیکی روکش حاصل از پودر فلزات و آلیاژهای آن در فرایند روکش کاری لیزری دارند. به عنوان مثال، فرایند انجماد و ریزساختار آلیاژ اینکونل ۷۱۸ پایه نیکل (پودر و فلز پایه هم‌جنس بودند) فرایند روکش کاری لیزری بر مبنای پارامترهای فرایندی در مطالعه‌ای بررسی شد [۲۹]. در نتیجه این مطالعه مشاهده شد که ریزساختار لایه روکش از دندریت ستونی و ذرات میکروندریتی تشکیل شده است. نسبت  $G/R$  با افزایش توان لیزری از ۱۵۰ وات تا ۳۰۰ وات و افزایش سرعت ۴ تا ۶ میلی‌متر بر ثانیه کاهش می‌یابد و در نتیجه آن فاصله بازوی دندریت ثانویه (SDAS) از ۱/۰۸ به ۰/۹۸ کاهش می‌یابد. در قسمت الف شکل ۱ تاثیر توان بر SDAS فرایند روکش کاری لیزر اینکونل ۷۱۸ نشان داده شده است. همچنین در قسمت‌های ب و ج شکل ۱ نیز به ترتیب تصویر الکترونی میکروساختار و دندریت‌های روکش در توان ۱۵۰ و ۳۰۰ وات مشاهده می‌شود.

### سرامیک‌ها

روکش‌های سرامیکی مقاومت در برابر سایش، خوردگی و اکسیداسیون در دمای بالا را دارند، در نتیجه سرامیک در فرایند روکش کاری لیزر در صنایعی نظیر هوا فضا، ماشین‌آلات شیمیایی و ... کاربرد دارد.

متالورژیکی مستحکم [۱۵]، رقت<sup>۲</sup> کافی، احتمال پایین ترک [۱۶] و انعطاف‌پذیری بالا در تولید [۱۷] از برتری‌های تکنولوژی روکش کاری لیزری نسبت به سایر روش‌های مرسوم نظیر تیگ<sup>۳</sup>، میگ<sup>۴</sup> و ... محسوب می‌شود [۱۸]. در این راستا شاید این سوال پیش بیاید که اساسا روکش کاری لیزری چیست؟ به طور مختصر، ذوب ماده ثانویه<sup>۵</sup> بر سطح قطعه کار به کمک انرژی لیزر و تشکیل روکش را «روکش کار لیزری» می‌نامند [۱۹]. ماده ثانویه اغلب به دو صورت پودر و سیم به فرایند اضافه می‌شوند [۲۰]. به تناسب مواد مورد استفاده، از این تکنولوژی در صنایع مختلفی نظیر نفت و گاز [۲۱]، خودروسازی [۲۲]، کشتی‌سازی [۳] و به خصوص هوا فضا [۲۳] استفاده می‌شود. با توجه به اینکه فرایند روکش کاری لیزری با افزودن مواد بر قطعه کار انجام می‌شود، آن را به نحوی می‌توان از خانواده ساخت افزایشی به شمار آورد [۱۷]. ساخت افزایشی لیزری یا به بیانی نمونه‌سازی لیزری نیز در نوع خود از جمله سردمداران حوزه ساخت افزایشی محسوب می‌شود [۲۴]. زمان ساخت بالا و مواد اتلافی زیاد در روش‌های مرسوم نمونه‌سازی همگی سبب رشد روز افزون این تکنولوژی شده‌اند [۲۵]. بازار ساخت افزایشی در سال ۲۰۱۶، ۲/۷ بیلیون دلار تخمین زده شده و انتظار می‌رود در دو دهه آینده تا ۹۷/۳ بیلیون دلار رشد کند [۲۶].

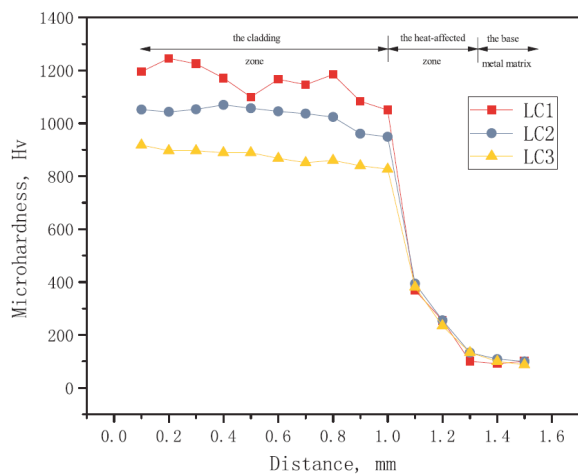
با توجه به مطالب پیشین، نخستین سوالی که در ذهن مطرح می‌شود آن است که اصولا چه تحولاتی متالورژیکی در فرایند روکش کاری لیزری اتفاق می‌افتد. مزایای فرایند روکش کاری لیزری دقیقا چیست که محققان و صنعتگران با این سرعت به سمت آن رهنمون شده‌اند. در مرحله بعد چالش‌های روبه‌روی این تکنولوژی چیست؟ همچنین دقیقا در چه حوزه‌هایی از صنعت روکش کاری لیزری ورود کرده است. با توجه به عدم وجود مطالعه‌ای جامع و کامل در این حوزه، در مطالعه حاضر گام به گام با بهره‌گیری از مطالعات پیشین، به سوالات مذکور پاسخ داده می‌شود.

در این راستا، در بخش دوم ابتدا تحولات متالورژیکی و سپس در بخش سوم ویژگی‌های لیزر شامل اصلی فرایند روکش کاری لیزری یعنی موضعی بودن در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم روکش کاری معرفی خواهد شد. سپس سایر مزایای این تکنولوژی در مقایسه با سایرین با ذکر مطالعات مربوطه بررسی می‌شود. چالش‌ها و معایب روکش کاری لیزری که موانعی برای پیشرفت محسوب می‌شوند نیز در بخشی جداگانه معرفی خواهند شد. به سبب کاربردی کردن مطالعه حاضر سعی شد نمونه‌های صنعتی روکش کاری لیزری در سه حوزه پوشش‌دهی، تعمیر/بازسازی و نمونه‌سازی بیان و نتایج حاصل از فرایند نیز بررسی شود.

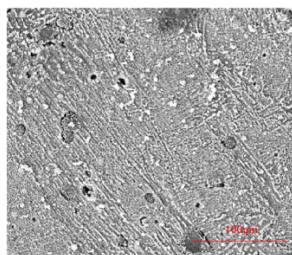
2. Dilution
3. Tungsten Inert Gas (TIG)
4. Metal Inert Gas (MIG)
5. Additive material

۶. نسبت گرادیان دمایی (Temperature Gradient) به نرخ رشد دندریت (The growth rate of a dendrite)

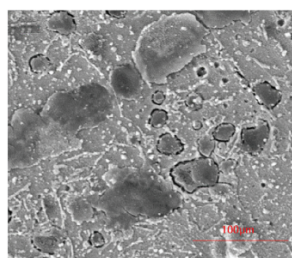
7. Secondary Dendrite Arm Spacing (SDAS)



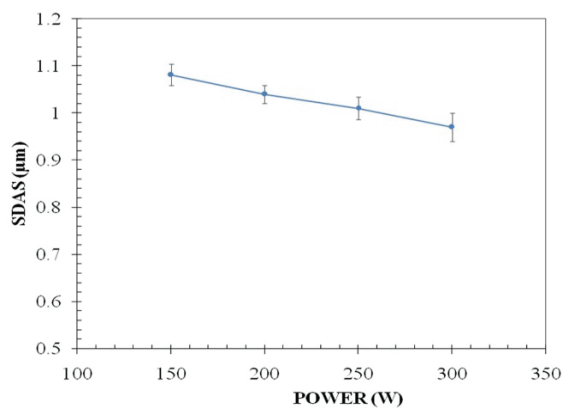
(الف)



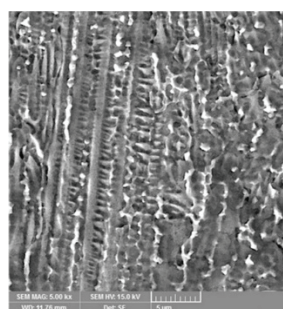
(ب)



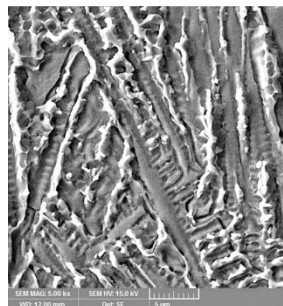
(ج)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. فرایند روکش کاری لیزری با پودر سرامیک، الف) پروفیل سختی نمونه‌ها، ب) تصویر SEM روکش ایجادشده با پودر LC1، ج) تصویر SEM روکش ایجادشده با پودر LC3 [۳۰].

جدول ۱. مشخصات ترکیب پودر سرامیکی مورد استفاده در فرایند روکش کاری لیزری [۳۰].

نام پودر	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	B <sub>4</sub> C	پودر Al
LC1	۱۰	۵۸	۱۹	۱۳
LC2	۳۰	۴۴	۱۴	۱۲
LC3	۵۰	۳۱	۱۰	۹

۲، سختی لایه روکش ایجادشده نیز هنگامی که Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> کم (نمونه LC1)، بیشتر است. در قسمت ب و ج شکل ۲ نیز تصاویر SEM مربوط به روکش ایجادشده با پودرهای LC1 و LC3 به ترتیب نشان داده شده‌اند.

شکل ۱. فرایند روکش کاری لیزری اینکونل ۷۱۸، الف) تاثیر توان بر اندازه فاصله بازوی دندریتی ثانویه، ب) تصویر الکترونی میکروساختار و دندریتهای روکش در توان ۱۵۰ وات، ج) تصویر الکترونی میکروساختار و دندریتهای روکش در توان ۳۰۰ وات [۲۹].

با توجه به اینکه پوشش سرامیکی تک فاز برای فرایند روکش کاری لیزری مناسب نیست، اغلب از سرامیک‌های چندفازی در فرایند روکش کاری لیزری استفاده می‌شود. در مطالعه‌ای تاثیر اجزای مختلف Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر مورفولوژی هندسی، میکروساختار و سختی فرایند روکش کاری لیزری TiB<sub>2</sub>-TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> روکش سرامیکی بر سطح فولاد کربنی بررسی شد [۳۰]. در این مطالعه سه ترکیب پودری از سرامیک استفاده شد که جزئیات آن در جدول ۱ گردآوری شده‌است.

در نتیجه این مطالعه مشاهده شد که لایه روکشی از فازهای TiB<sub>2</sub>، TiC و TiO<sub>2</sub> و نوار یا دانه‌های سیاه‌رنگی Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و فاز a-Fe در روکش ایجاد خواهد شد. مطابق قسمت الف شکل



به تناسب نوع و بیشینه توان منبع لیزری، چگالی توان حاصل از فرایند روکش کاری لیزری نیز می‌تواند متفاوت باشد. در این راستا، در جدول ۲ بیشینه توان و چگالی توان دو منبع لیزری پرکاربرد مورد استفاده در روکش کاری جمع‌آوری شده‌است. دقت شود به بیان برخی مراجع، چگالی توان مورد نیاز برای فرایند روکش کاری لیزری  $0.7 \text{ MW/cm}^2$  تا  $1 \text{ MW/cm}^2$  است [۳۵].

جدول ۲. مشخصات برخی از منابع لیزر مورد استفاده در روکش کاری لیزری [۳۵]

پارامتر	نوع منبع	CO <sub>2</sub>	Nd:YAG
چگالی توان (MW/cm <sup>2</sup> )	۱-۱۰۰	۰.۱-۱۰۰۰	
بیشینه توان (kW)	۴۵	۵	

مطابق جدول ۲ مشاهده می‌شود که دو منبع لیزری CO<sub>2</sub> و Nd:YAG در بازه توان ۵ تا ۴۵ کیلووات، چگالی توان مورد نیاز برای فرایند روکش کاری لیزر را می‌توانند فراهم کنند. نکته اینکه امروزه در اغلب موارد از منابع فیبری به منظور تامین انرژی مورد نیاز فرایند روکش کاری لیزری استفاده می‌شود. دلیل این امر بازدهی بالاتر و در نتیجه چگالی توان بالاتر در بیشینه توان کمتر است. برای مطالعه بیشتر مرجع [۳۶] پیشنهاد می‌شود.

باتوجه به آنچه بیان شد، برخی ویژگی‌های اولیه ناشی از خاصیت موضعی بودن فرایند روکش کاری لیزری درک شد. در ادامه برخی مزایای دیگر حاصل از این خاصیت که نیازمند بررسی دقیق‌تر هستند، معرفی و جزئیات هر یک با ذکر مثال ارائه خواهند شد.

• ناحیه متاثر حرارتی "کوچک": نواحیه‌ای از فلز که در عملیات حرارتی ذوب نشده اما تحت تاثیر تغییر دما دچار تغییر خواص متالورژیکی (سایز و نوع ریزدانه‌ها) می‌شود را «ناحیه متاثر حرارتی» می‌نامند [۳۷]. ناحیه متاثر حرارتی کوچک سبب کاهش اعوجاج و تنش پسماند می‌شود [۳۸]. دقت شود که تنش پسماند نیز سبب تضعیف پیوند مکانیکی قطعه کار و روکش می‌شود [۳۹].

در مطالعه‌ای پهنای ناحیه متاثر حرارتی دو فرایند روکش کاری لیزری و تیگ با یکدیگر مقایسه شدند. جنس قطعه کار و ماده ثانویه در این مطالعه به ترتیب اینکونل ۷۳۸ و اینکونل ۶۲۵ بودند. دقت شود که ماده ثانویه مورد استفاده در فرایند روکش کاری لیزری و تیگ به ترتیب به صورت پودر و سیم بودند. فرایند روکش کاری لیزری در بازه توان (۳۰۰-۱۵۰) وات، سرعت (۳-۶) میلی‌متر بر دقیقه و فرایند روکش کاری تیگ در جریان (۴۰-۱۵۰) آمپر و ولتاژ (۱۰.۴-۸.۳) وات

مطابق قسمت‌های ب و ج شکل ۲ مشاهده می‌شود که هنگامی که میزان  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در پودر افزایش می‌یابد (نمونه LC3)، در روکش دانه‌های درشت  $\text{Al}_2\text{O}_3$  تشکیل می‌شود. همچنین، به دلیل ذوب ناقص حوضچه مذاب، ذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در حوضچه مذاب باقی می‌مانند. این ذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در حین خنک‌شدن از بستر جدا می‌شوند که این امر منجر به تردی ساختار می‌شود. در نتیجه مشاهده می‌شود که وجود  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در پودر روکش اگرچه منجر به افزایش سختی می‌شود اما همواره با افزایش تردی نیز همراه است.

### ۳. ویژگی‌های روکش کاری لیزری

ویژگی‌های مختلفی می‌توان برای فرایند روکش کاری لیزری برشمرد. در این قسمت برای درک بهتر جنبه‌های مختلف این فرایند لیزری، در دو قسمت جداگانه مزایا و چالش‌های فرایند مذکور ارائه خواهند شد.

#### مزایا

نظر به پیشرفت روزافزون تکنولوژی روکش کاری لیزری، در این قسمت برخی از برجسته‌ترین مزایای این فرایند معرفی خواهند شد. مطابق مطالعات ارائه شده در سال‌های اخیر، به واقع شاید بتوان «موضعی بودن» را مهم‌ترین ویژگی روکش کاری لیزری برشمرد. چراکه، این خاصیت به نوعی دلیل به وجود آمدن سایر مزایای فرایند روکش کاری لیزری محسوب می‌شود.

با توجه به سه خاصیت پرتوی لیزر (مونوکروماتیک<sup>۸</sup>، جهت‌مندی<sup>۹</sup> و هم‌دوسی<sup>۱۰</sup>) [۳۱]، در فرایندهای لیزری انرژی بسیار زیادی در ناحیه‌ای کوچک بر قطعه کار تابیده می‌شود. بنابراین، با توجه به اینکه انرژی با شدت بالایی در محدوده کوچکی تریق می‌شود، فرایند روکش کاری لیزری را فرایندی «موضعی» می‌نامند. به لطف این ویژگی، حرارت به صورت کنترل شده وارد قطعه کار می‌شود. مزیت دیگر موضعی بودن پرتوی لیزری، چگالی توان بالای این فرایند است [۳۲]. دقت شود که چگالی توان به صورت توان لیزر تابیده شده بر واحد سطح تعریف می‌شود [۳۳].

برای درک بهتر شاید مناسب باشد چگالی توان ناشی از فرایند لیزری با سایر منابع روکش کاری مورد استفاده در صنعت مقایسه شود. به عنوان مثال، در بهترین حالت دستگاه تیگ با فرکانس ۶۰ هرتز، بازه جریان ۱۰-۴۰۰ آمپر و بازه ولتاژ ۸.۳ تا ۱۰.۴ ولت می‌تواند چگالی توان  $0.1 \text{ MW/cm}^2$  را تولید کند. این مقدار بسیار کمتر از چگالی توان تولیدی دستگاه روکش کاری لیزری کم توان (حداکثر توان ۷۰۰ وات) یعنی  $10 \text{ MW/cm}^2$  است [۳۴].

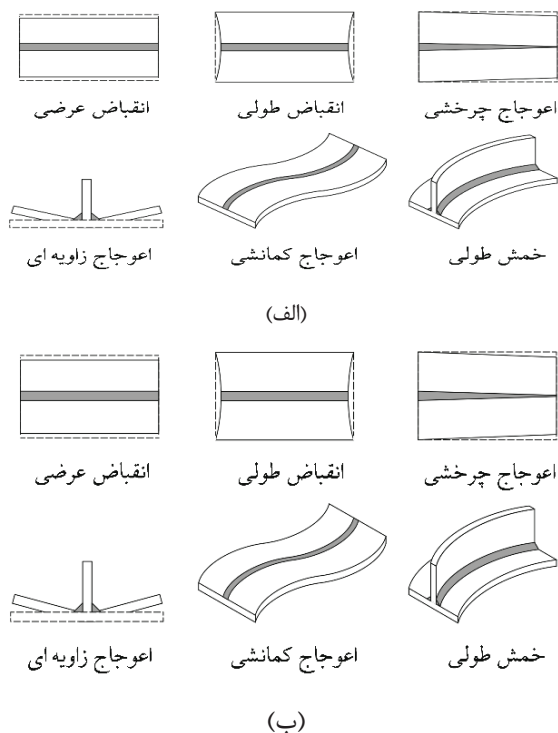
8. Monochromatic

9. Directionality

10. Coherence

11. Heat Affected Zone (HAZ)

برون صفحه‌ای (اعوجاج زاویه‌ای)<sup>۱۶</sup>، خمش طولی<sup>۱۷</sup> یا اعوجاج خمشی<sup>۱۸</sup> و اعوجاج کمانشی<sup>۱۹</sup>) تقسیم‌بندی می‌کنند. در قسمت‌های الف و ب شکل ۴ به ترتیب نمای شماتیک هر یک از دو دسته اعوجاج نشان داده شده است [۴۱].

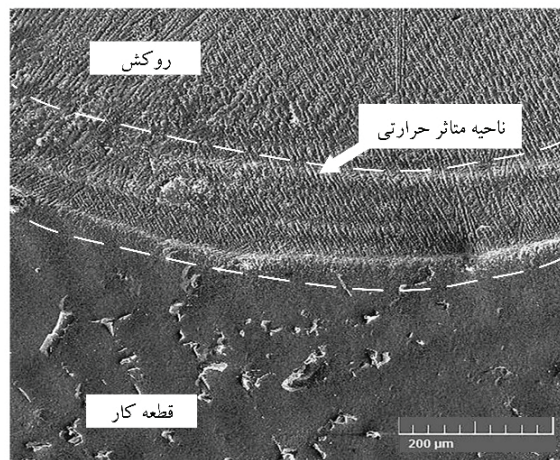


شکل ۴. انواع اعوجاج ایجاد شده در فرایندهای حرارتی، الف) درون صفحه، ب) برون صفحه [۴۱]

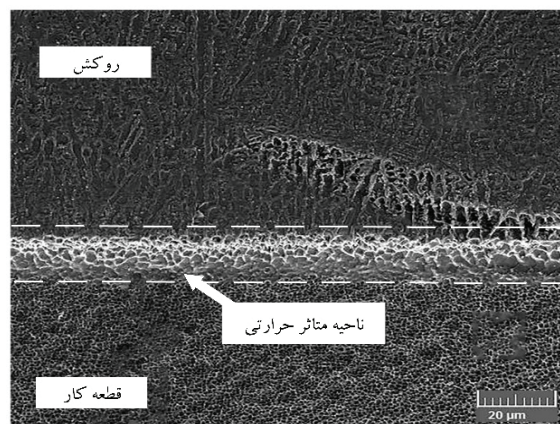
دقت شود که اغلب اعوجاج برون صفحه‌ای از اهمیت بیشتری نسبت به سایرین برخوردار است، هرچند هر یک از انواع اعوجاج ممکن است در فرایندهای روکش کاری اتفاق بیافتد. در این راستا، محققان در مطالعه‌ای به مقایسه‌ی اعوجاج برون صفحه‌ای حاصل از روش‌های روکش کاری لیزری و تیگ پرداختند. جنس قطعه کار و پودر روکش به ترتیب از جنس فولاد کربنی و فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ بودند. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که اعوجاج حاصل از فرآیند روکش کاری لیزری به مراتب کمتر از روش تیگ است [۴۲].

نمایی از این نتایج در شکل ۵ مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۵، مشاهده می‌شود که برای روکش ایجاد شده با سختی یکسان در محل ۵۰ میکرومتری روکش از سطح قطعه کار، اعوجاج قابل توجهی در نمونه حاصل از تیگ نسبت به روش لیزری حاصل می‌شود [۴۲]. دقت شود که مطالعات حاکی از آن هستند که اعوجاج رابطه مستقیم

ولت انجام شدند. تصویر میکروسکوپ الکترونی یا SEM<sup>۱۲</sup> ناحیه متاثر حرارت ناشی از دو فرایند روکش کاری تیگ و لیزری به ترتیب در قسمت‌های الف و ب شکل ۳ نشان داده شده است [۳۴].



(الف)



(ب)

شکل ۳. ریزساختار ناحیه متاثر حرارتی فرآیند؛ الف) تیگ، ب) لیزر [۳۴].

مطابق شکل ۳ مشاهده می‌شود که پهنای ناحیه متاثر حرارتی روش تیگ و لیزری به ترتیب ۲۰۰ و ۴۰ میکرومتر بودند. به عبارت دیگر، ضخامت ناحیه متاثر حرارتی ناشی از فرایند لیزری بسیار کوچک و در حدود یک پنجم فرایند تیگ است که این ویژگی از جمله برجستگی‌های این فرایند محسوب می‌شود [۴۰]. چراکه به لطف این خاصیت، اعوجاج و تنش پسماند کمتری در قطعه کار ایجاد خواهد شد [۳۴].

• **اعوجاج کم:** تغییر شکل هندسی ناشی از حرارت اعمالی به قطعه در فرایندهای حرارتی «اعوجاج» نامیده می‌شود [۳۹]. برخی اعوجاج حاصل را به دو دسته کلی درون صفحه‌ای (انقباض عرضی<sup>۱۳</sup>، انقباض طولی<sup>۱۴</sup> و اعوجاج چرخشی<sup>۱۵</sup>) و

16. Angular distortion  
17. Longitudinal bending  
18. Bowing distortion  
19. Buckling distortion

12. Scanning Electron Microscopic (SEM)  
13. Transverse shrinkage  
14. Longitudinal shrinkage  
15. Rotational distortion

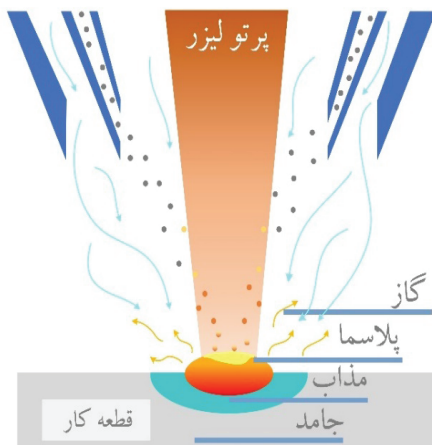
جدول ۳. مقایسه سرعت خنک کاری فرآیندهای مختلف روکش کاری [۴۸].

روش	اکسی استیلن	تیگ	لیزر
سرعت خنک کاری (°C/s)	۹	۴۵.۷	۳۰۴۵.۲

### معایب و چالش‌ها

روکش کاری لیزری نیز همانند سایر تکنولوژی‌های نوپا معایب و چالش‌های منحصر به فرد خود را دارد. اگرچه در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی بر این چالش‌ها متمرکز شده‌اند، اما همچنان برخی از آن‌ها مانعی برای این فرایند محسوب می‌شوند. در ادامه هریک از چالش‌های این حوزه به طور کلی معرفی خواهند شد:

- **کنترل پیچیده:** شاید مهم‌ترین چالش فرایند روکش کاری لیزری را کنترل پیچیده فرایند دانست [۴۹]. این فرایند در واقع برهمکنش بین چهار فاز جامد، مایع، گاز و پلازما است که در شکل ۶ نمایی از آن نشان داده شده است. نخست اینکه تعادل بین این فازها در فضای کوچک حوضچه مذاب امری پیچیده محسوب می‌شود [۵۰]. همچنین، در محیط محدود حوضچه مذاب نیروهای مختلفی نظیر کشش سطح، اثر ماراگونی<sup>۲۱</sup> و هر سه نوع انتقال حرارت هدایت، جابه‌جایی و تشعشع وجود دارند [۵۱]. هریک از موارد مذکور به گونه‌ای منحصر به فرد بر روکش حاصل تاثیر می‌گذارد که بر پیچیدگی کنترل فرایند می‌افزاید [۵۲]. بنابراین از دید پژوهشگران، کنترل فرایند روکش کاری لیزری امری پیچیده بوده که نیازمند مطالعات بیشتر است [۵۳].



شکل ۶. شماتیک روکش کاری پودری [۵۴].

### مشکلات زیست‌محیطی

از دید سازمان سلامت جهانی<sup>۲۲</sup> و سازمان سلامت کشور یکی

21. Maragoni effect

22. World Health Organization (WHO)

با حرارت ورودی به قطعه کار دارد [۴۳]. به عبارت دیگر هرچه حرارت ورودی بر سطح کمتر باشد، اعوجاج کمتری در قطعه ایجاد می‌شود. شایان ذکر است که حرارت ورودی به صورت انرژی حرارتی وارد شده بر واحد طول تعریف می‌شود [۴۴]. از طرفی گزارشات بیانگر آن هستند که حرارت ورودی روکش کاری لیزری بسیار کمتر از روش تیگ است. در مطالعه‌ای در شرایط ارتفاع روکش یکسان، حرارت ورودی روش لیزری یک چهارم روش تیگ گزارش شده است (به ترتیب ۳۰۰ J/m و ۱۲۰۸ J/m) [۴۵]. بنابراین، با توجه به این که حرارت ورودی فرایند روکش کاری لیزری کمتر، در نتیجه اعوجاج کمتری در قطعه کار ایجاد خواهد شد.



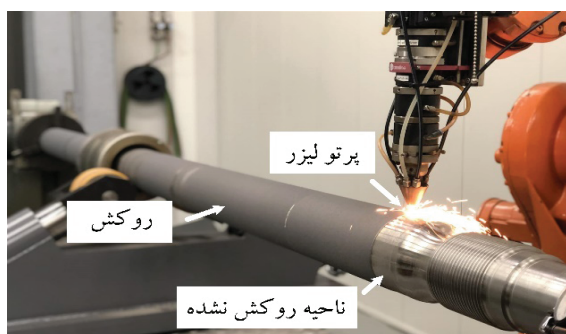
شکل ۵. اعوجاج ناشی از فرآیندهای روکش کاری تیگ و لیزر [۴۲].

### • سرعت خنک کاری بالا

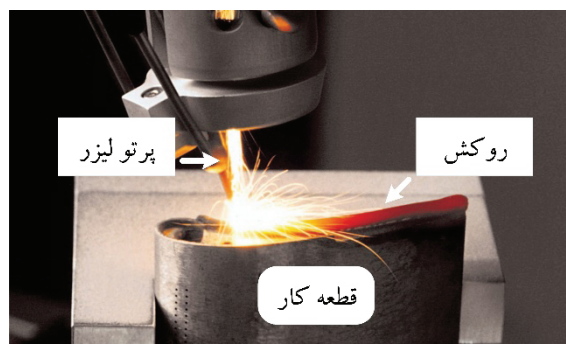
سرعت کاهش دما پس از فرایند روکش کاری را «سرعت خنک کاری» می‌نامند [۱۶]. روش‌های مرسوم روکش کاری (تیگ، میگ و ...) اغلب دارای سرعت خنک کاری پایینی هستند [۳۴]. دلیل آن را می‌توان اعمال غیربهینه انرژی بر قطعه کار دانست. این در حالی است که در روش روکش کاری لیزری انرژی بصورت بهینه و هدفمند بر ناحیه خاصی از قطعه کار وارد می‌شود [۴۶]. منظور از اعمال بهینه انرژی، اعمال انرژی به ناحیه‌ای مشخص به منظور تشکیل حوضچه مذاب است. در سایر فرایندهای روکش کاری مرسوم گرما به کل قطعه وارد شده و سهم کمی از انرژی صرف ایجاد حوضچه‌ی مذاب و انجام فرایند روکش کاری می‌شود [۴۷]. به منظور مقایسه بهتر، در جدول ۳ مقایسه‌ای از سرعت خنک کاری فرایندهای لیزری و سایر روش‌های مرسوم روکش کاری در آلیاژ پایه کروم گردآوری شده است. مطابق جدول ۳، مشاهده می‌شود که سرعت خنک کاری فرایند لیزری به ترتیب تقریباً ۳۳۸ و ۶۷ برابر روش‌های اکسی استیلن و تیگ است. سرعت خنک کاری بالا از آن جهت مطلوب است که منجر به تشکیل ریزساختار کوچک تر و استحکام بالاتر می‌شود [۴۸].

20. Cooling rate





(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷. انواع کاربردهای روکش کاری لیزری؛ (الف) پوشش دهی [۶۰]، (ب) تعمیر/بازسازی و (ج) نمونه سازی [۶۱].

[۶۸] و ... در روکش کاری لیزری، می توان استفاده کرد. در ادامه، متناسب با هدف فرایند، برخی اجزا و سیستم های صنایع مختلف که در آنها از فرایند روکش کاری لیزری استفاده می شود، معرفی خواهند شد.

#### پوشش دهی

به سبب شرایط کاری خاص سیستم ها و قطعات، گاهی ایجاب می شود که خواص سطح و داخل قطعه متفاوت از یکدیگر باشند [۵۷]. به عنوان مثال در حالی که انتظار می رود سطح قطعه بتواند در مقابل پدیده های مخرب نظیر سایش، فرسایش، اکسیداسیون و خستگی مقاوم باشد، قسمت درونی

از چالش های فرایندهای روکش کاری لیزری، اثرات و مشکلات زیست محیطی این فرایند است. پرتوی لیزر ایجاد شده در فرایند روکش کاری لیزر ممکن است بر اجزای بدن نظیر چشم، دستگاه تنفسی و ... تاثیر منفی بگذارد. به تناسب طول موج پرتوی لیزر ساطع شده هریک از سه قسمت چشم (قرنیه، عدسی و شبکیه) آسیب بینند. گرچه با استفاده از عینک مخصوص می توان اثرات مخرب آن را کاهش داد، اما نمی توان این اثرات را به طور کامل از بین برد. همچنین، پودر پاشیده شده به محیط اطراف در فرایند روکش کاری لیزری پودری بر دستگاه تنفس اثرگذار بوده و در درازمدت سرطانزا است [۵۵].

#### ۴. کاربردهای صنعتی روکش کاری لیزری

همانطور که در قسمت پیشین بیان شد، فرایند روکش کاری لیزری به دلیل مزایای معرفی شده در صنایع مختلف و به دلیل چالش های مذکور در قطعات حساس کاربرد فراوانی دارد. رشد روزافزون این تکنولوژی در سال های اخیر بیانگر آینده ای درخشان برای این علم است [۵۶]. چراکه این فرایند می تواند چالش ها و مشکلات مختلف صنعت را در کوتاه ترین زمان ممکن در عین کیفیت مطلوب حل کند [۵۷].

در یک دیدگاه کلی می توان کاربرد روکش کاری لیزری را با سه هدف پوشش دهی<sup>۲۳</sup>، تعمیر/بازسازی<sup>۲۴</sup> و نمونه سازی<sup>۲۵</sup> تقسیم بندی کرد. گستردگی این کاربرد از اتومبیل سازی [۵۸] تا خطوط ریلی [۵۹] را شامل می شود. در شکل ۷ نمایی از کاربردهای روکش کاری لیزری در سه حوزه مذکور نشان داده شده است.

مطابق قسمت الف شکل ۷، مشاهده می شود که پوشش دهی شافت های بزرگ به کمک لیزر امکان پذیر است. از مزایای روکش کاری لیزری در این حوزه عدم ایجاد اعوجاج را می توان نامبرد. شایان ذکر است که روکش کاری لیزری محدودیت ابعاد نداشته و قطعات ظریف با هندسه های پیچیده نظیر پره توربین را می توان با آن تعمیر کرد. در قسمت ب شکل ۷ نمایی از این فرایند نشان داده شده است. این مهم به لطف ویژگی "موضعی بودن" فراهم شده است [۶۲]. ویژگی سرعت کاری بالا دلیل حضور چشمگیر روکش کاری لیزری در حوزه نمونه سازی است که در قسمت ج شکل ۷ عملیات نمونه سازی محفظه توربین به کمک فرایند روکش کاری لیزری به مشاهده می شود. شایان ذکر است که زمان ساخت قطعات با ضخامت کم همانند محفظه توربین، به کمک روش روکش کاری لیزری به میزان چشمگیری کاهش یافته است [۶۳].

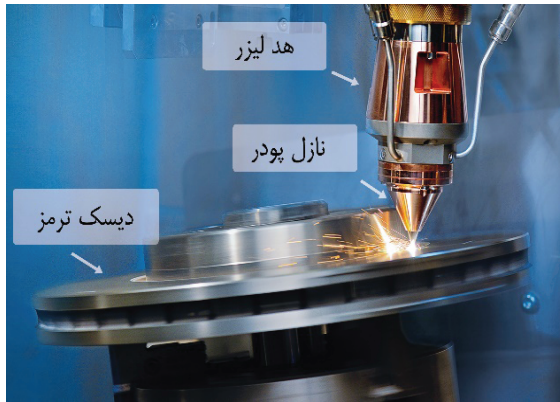
همچنین از جنس ها و مواد مختلفی نظیر چدن [۶۴]، آلومینیوم [۶۵]، فولاد [۶۶]، آلیاژهای پایه نیکل [۶۷]، کبالت

23. Coating

24. Refurbishment

25. Rapid prototyping

در سال ۲۰۱۲ موسسه تکنولوژی‌های لیزری شرکت فرانهافر<sup>۲۹</sup> با همکاری دانشگاه آخن<sup>۳۰</sup> روش نوینی، به نام «پوشش‌دهی لیزری سرعت‌بالا»<sup>۳۱</sup> را برای ایجاد پوششی بر دیسک‌های ترمز ارائه کردند (شکل ۸) [۷۵]. در این روش می‌توان پوششی به ضخامت ۵۰ تا ۰۳۵ میکرومتر با بیشینه سرعت ۵۰۰ متر بر دقیقه (۲۵۰ برابر سرعت روش لیزری مرسوم) بر سطح دیسک ایجاد کرد.



شکل ۸. فرایند پوشش‌دهی لیزری سرعت بالا دیسک ترمز [۷۶].

در مطالعه‌ای پوششی به ضخامت ۳۲۵ میکرومتر از جنس اینکسل ۶۲۵/کاربید ولفرام<sup>۳۲</sup> بر روی دیسک چدنی با تکنولوژی لیزری سرعت‌بالا ایجاد شد [۷۷]. منبع لیزر مورد استفاده از نوع دیودی (با توان بیشتر از ۱۵ کیلووات) و سرعت تغذیه پودر ۱۰۰ گرم بر دقیقه بودند [۷۸].

#### • تعمیر/بازسازی

پدیده‌های مخرب نظیر سایش، خوردگی، اکسیداسیون و خستگی معمولاً مشکلاتی نظیر تعویض قطعات و در برخی موارد حتی جایگزینی قطعات گرانقیمت را به همراه دارد. این امر مشکلات تولید را در صنایع مختلف افزایش می‌دهد. روکش‌کاری لیزری روشی است که به سبب آن می‌توان قطعات حساس و گران‌قیمت را تعمیر و بازسازی کرد [۱۰]. در نتیجه مشکلات تولید را می‌توان کاهش داد. در این راستا، در ادامه دو مثال کاربردی تعمیر و بازسازی روکش‌کاری لیزری معرفی و بررسی خواهند شد.

#### • تعمیر لیزری نازل سوخت توربین گازی<sup>۳۳</sup>

به منظور دریافت بیشینه انرژی از توربین‌های گازی، اغلب قطعات این سیستم‌ها در معرض دما و فشارهای بالا و در برخی موارد ارتعاشات شدیدی قرار می‌گیرند. در این شرایط،

قطعه باید بتواند نیروهای داخلی را تحمل کند. راه آسان و در عین حال قابل اطمینان ایجاد پوششی با خواص سطحی مورد نظر بر قطعه کار است [۱۹]. به عبارت دیگر نخست جنس قطعه بر اساس خواص داخلی مورد نیاز انتخاب می‌شود. سپس متناسب با شرایط کاری، جنس پوشش مورد نظر انتخاب و بر قطعه قرار می‌گیرد. در نتیجه، کیفیت سطح به مقدار مطلوب ارتقا می‌یابد. به این عمل «پوشش‌دهی» گفته می‌شود [۶۹]. با توجه به این تعریف، برای درک بیشتر کاربرد این حوزه از فرایند روکش‌کاری لیزری در دیسک ترمز معرفی خواهد شد.

#### • پوشش‌دهی لیزری دیسک ترمز

با توجه به اینکه در دیسک ترمز از تبدیل انرژی جنبشی به انرژی گرمایی<sup>۳۴</sup> (اصطکاک)، سرعت خودرو کاهش می‌یابد، در انتخاب مواد سازنده این قطعات، خواصی نظیر مقاومت به سایش و انتقال حرارت بالا مدنظر قرار می‌گیرد [۷۰]. در این راستا، از چدن خاکستری به عنوان ماده اصلی در ساخت دیسک ترمز استفاده می‌شود. دلیل این امر، خواص حرارتی<sup>۳۵</sup> این آلیاژ نظیر نقطه ذوب و ضریب انتقال حرارت بالا (به ترتیب  $1200^{\circ}\text{C}$ ،  $72-50\text{ W/m.K}$ ) است که منجر به تسریع فرایند خنک‌کاری قطعه می‌شود [۲۲]. از جمله نقاط ضعف آلیاژهای چدنی، می‌توان مقاومت به سایش پایین آن‌ها را نامبرد [۷۱]. بهره‌گیری از تکنولوژی پوشش‌دهی با ایجاد روکشی مقاوم به سایش و خوردگی یکی از راه‌حل‌های پرکاربرد برای افزایش عمر دیسک‌های ترمز است. در ادامه جزئیات بیشتری از روش‌های پوشش‌دهی این قطعه معرفی خواهد شد. روش‌های مرسوم در روکش‌کاری دیسک‌های ترمز می‌توان آبکاری کروم<sup>۳۶</sup>، HVOF و لیزر را نامبرد. با توجه به مشکلات زیست‌محیطی روش آبکاری کروم، استفاده از این روش از سال ۲۰۱۷ مطابق استانداردهای مربوطه محدود به برخی صنایع شد. در روش HVOF بازده ماده روکش کم و در حدود ۵۰ درصد است. این درحالیست که بازده مواد در روش پوشش‌دهی لیزری در حدود ۹۰ درصد است. به این مزیت، مطالعات در سال‌های اخیر به سمت ارتقا فرایند پوشش‌دهی لیزری مورد استفاده در دیسک ترمز متمرکز شدند [۷۲].

در کنار مزایای روش پوشش‌دهی لیزری مرسوم، به‌کاربردن این روش در پوشش‌دهی دیسک ترمز چالش‌هایی دارد. ضخامت معمول روش لیزری مرسوم حداقل ۵۰۰ میکرومتر است که این ضخامت برای پوشش‌دهی دیسک مقدار زیادی محسوب می‌شود [۷۳]. همچنین بیشینه سرعت روش مرسوم لیزری ۰٫۵ متر بر دقیقه بوده که این میزان سرعت در مقیاس انبوه سرعت پایینی به شمار می‌رود [۷۴]. برای رفع چالش‌های روش پوشش‌دهی لیزری مرسوم،

29. Fraunhofer Institute for Laser Technology

30. RWTH Aachen University

31. High-speed Laser Material Deposition

32. WC/IN 625

33. Gas engine fuel nozzle

26. Thermal energy

27. Thermophysical

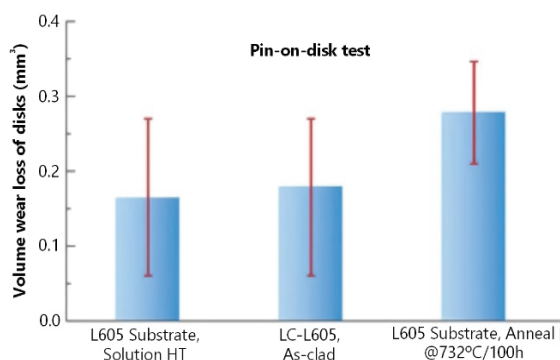
28. Chromium plating



مطابق شکل ۹، نازل سوخت وظیفه انتقال سوخت و هوا به درون محفظه احتراق را به عهده دارد. دمای محفظه احتراق توربین های گازی بعضا تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد افزایش می یابد [۷۹]. در نتیجه به دلیل شرایط کاری خاص، کلاhek هوا در این قطعه دچار سوختگی و آسیب می شود (قسمت الف شکل ۱۰).

مطالعات حاکی از آن هستند که جنس کلاhek نازل سوخت، آلیاژ L-۶۰۵ (هاینس ۲۵<sup>۳۵</sup>) است. L-605 آلیاژ بر پایه کبالت بوده که مقاومت اکسایش و خوردگی بالایی دارد. به منظور تعمیر این قطعه، ابتدا محل آسیب دیده تراشیده و سپس به کمک تکنولوژی لیزری روکشی بر محل ایجاد می شود. در مطالعه ای این فرایند با منبع لیزری Nd:YAG ۵۰۰ وات، سرعت رسوب دهی ۵ تا ۱۰ گرم بر دقیقه با پودر L-605 به ابعاد ۱۵ تا ۴۵ میکرومتر انجام شد [۸۱].

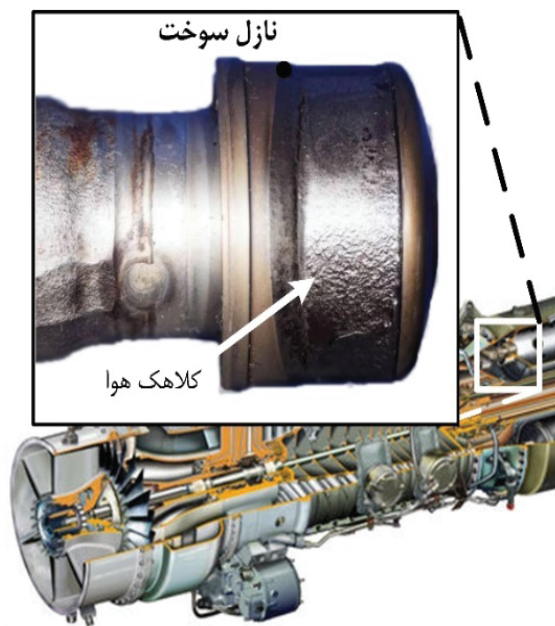
به منظور بررسی، سه نمونه مختلف از نازل سوختی آنیل شده<sup>۳۶</sup>، تعمیر شده با فرایند لیزری (قسمت ب شکل ۱۰) و عملیات حرارتی شده با یکدیگر مقایسه شدند. شایان ذکر است که نمونه آنیل شده در دمای ۷۳۲ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰۰ ساعت و نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۱۲۳۲ درجه سانتی گراد به مدت یک ساعت قرار گرفتند. نمونه ها تحت آزمایش سایش<sup>۳۷</sup> قرار گرفتند. آزمایش سایش با توپک ۰.۲۵ اینچی استلایت ۲۰ با نیرو عمودی ۱۵۰g و سرعت پیمایش ۶۶ میلی متر بر ثانیه و پیمایش ۳۰۰۰ متر انجام شدند. نتایج تست سایش سه نمونه در شکل ۱۱ نشان داده شده است [۲].



شکل ۱۱. مقایسه تست های سایش کلاhek نازل از جنس L-605 در سه حالت تعمیری آنیل شده، روکش کاری لیزری و عملیات حرارتی شده [۲].

مطابق شکل ۱۱، مشاهده می شود که حجم ساییده شده به روش لیزری از نمونه آنیل شده به میزان قابل توجهی کمتر بوده و تقریباً نزدیک به نمونه عملیات حرارتی شده است. به عبارت دیگر بدون نیاز به کوره خلا و چالش های دیگر روش

35. Haynes 25  
36. Annealed  
37. Sliding wear testing



شکل ۹. کلاhek هوای نازل سوخت و محل قرارگیری آن در توربین گازی [۸۰].



(الف)

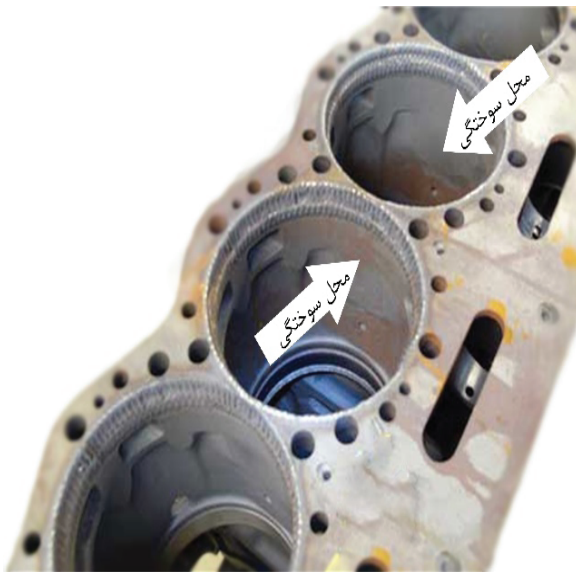


(ب)

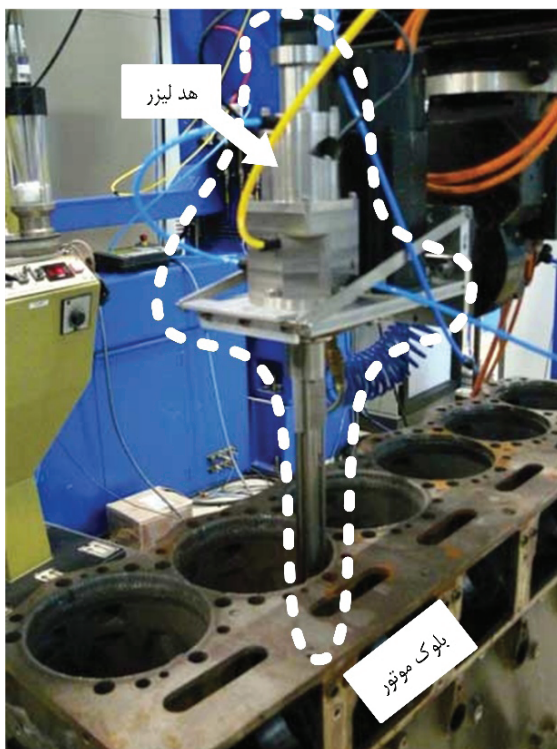
شکل ۱۰. کلاhek نازل سوخت (الف) آسیب دیده، (ب) تعمیر شده به کمک روکش کاری لیزری [۲].

اجزایی نظیر نازل سوخت توربین در دوره سرویس دهی خود دچار آسیب های شدید می شوند. برای درک بیشتر در شکل ۹، نازل سوخت توربین رولز رویس ۵۰۱کا<sup>۳۴</sup> با نام تجاری RR501K نشان داده شده است. توان الکتریکی این توربین ۸۷۰۰ اسب بخار بوده و از آن در ناوشکن های نیروی دریایی آمریکا استفاده می شود [۲].

34. Rolls-Royce 501K



شکل ۱۲. بدنه موتور لوکوموتیو آسیب دیده [۸۲].



شکل ۱۳. بدنه داخلی سیلندر در حال روکش کاری لیزری [۸۲].

عملیات حرارتی، می‌توان به روش لیزری قطعه را به نحوی تعمیر کرد که مقاومت به سایشی نزدیک به روش عملیات حرارتی شده ایجاد کند [۸۱].

#### • بازسازی لیزری بلوک موتور لوکوموتیو

موتورهای احتراق داخلی نظیر موتور لوکوموتیو اغلب به سبب شرایط کاری خاص از قسمت‌های مختلف آسیب می‌بینند. بلوک موتور، یکی از درونی‌ترین قسمت‌های موتور است که دمای بالا، فشارهای شدید و تماس‌های پیستون موتور با بدنه داخلی سیلندرها منجر به آسیب آن می‌شود. مطابق شکل ۱۲، این موتور از سیلندرها دچار سوختگی و آسیب شدید می‌شوند [۳]. شایان ذکر است که موتور دیزل ۷۰۰ کیلوگرمی این لوکوموتیو از جنس چدن<sup>۳۸</sup> بود و توان تولیدی آن ۲۵۰۰ اسب بخار گزارش شد. تعویض این موتور حداقل ۱۴،۰۰۰ یورو هزینه داشت و زمان ساخت آن بسیار طولانی بود. در نتیجه، به سبب هزینه بالا و زمان زیاد تعویض، روکش کاری لیزری روشی مناسب و صرفه‌جویانه در تعمیر این اجزا محسوب می‌شود [۸۲].

در مطالعه‌ای، به منظور بازسازی نواحی آسیب‌دیده داخلی سیلندر از فرآیند روکش کاری لیزری کمک گرفته شد (شکل ۱۳). دستگاه لیزر متشکل از منبع Nd:YAG ۳ کیلووات به همراه هد<sup>۳۹</sup> شرکت آی‌کلد<sup>۴۰</sup> بود. هد لیزر انتخاب شده قابلیت روکش کاری در حداقل شعاع داخلی ۲۶ میلی‌متر و بیشینه عمق ۵۰۰ میلی‌متر را داشت. در این مطالعه، قطر سیلندر موتور تعمیری ۱۷۸ میلی‌متر بوده که تا عمق ۳۴۰ میلی‌متر آن بازسازی شد [۸۲]. روکش کاری در میسرهای مارپیچ<sup>۴۱</sup>، با اعمال زاویه ۰۹ درجه بین سطح و هد، با پودر فولاد زنگ‌نزن به ضخامت روکش ۱ میلی‌متر گزارش شد [۸۲].

#### نمونه‌سازی

از کاربردهای نوین روکش کاری لیزری می‌توان به نمونه‌سازی قطعات پیچیده فلزی اشاره کرد. روش‌های مرسوم این حوزه نظیر ماشین‌کاری و قالب‌سازی همواره هزینه‌بر بوده و زمان ساخت طولانی می‌طلبد. همچنین، بازده موادی روش‌های مذکور پایین است. مطابق گزارشات مرکز بین‌المللی ساخت و تولید<sup>۴۲</sup>، مشخص شد که در نمونه‌سازی به کمک لیزر زمان ساخت قالب‌ها تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. به همین دلیل امروزه تمایلات صنعت‌گران به ساخت سریع به کمک لیزر رهنمون شده است [۸۳]. شماتیک روش نمونه‌سازی لیزری در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۲ مشاهده

می‌شود، پس از طراحی مدل سه‌بعدی کامپیوتری<sup>۴۳</sup> (قسمت الف شکل ۱۴)، لایه‌ها مرحله به مرحله بر روی یکدیگر چیده شده (قسمت ب شکل ۱۴) و قطعه نهایی شکل می‌گیرد (قسمت ج شکل ۱۴) [۸۴]. در ادامه برای درک بیشتر، محفظه احتراق موتور هلیکوپتر ساخته شده به روش لیزری ارائه خواهد شد.

43. CAD

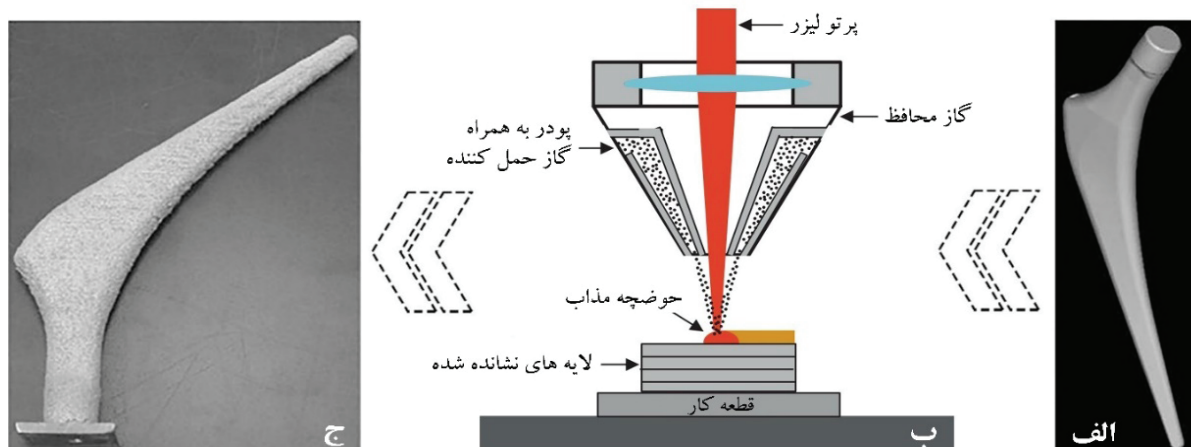
38. Cast iron

39. Head

40. iClad

41. Helical

42. National Center for Manufacturing Science (NCMS)



شکل ۱۴. الف) مدل سه بعدی، ب) شماتیک فرآیند نمونه‌سازی لیزری [۹۰] و ج) نمونه ساخته‌شده به کمک روش روکش کاری لیزری [۹۱].

دقیقه و سرعت افقی هد ۱،۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه. همچنین ابعاد پوسته حاصل ۹۰×۳۰۰×۳۰ میلی‌متر گزارش شد. مراحل نمونه‌سازی لیزری قطعه مذکور شامل ابتدا، حین و پس از اتمام فرایند به ترتیب در قسمت‌های الف، ب و ج شکل ۱۵ نشان داده شده‌است. دقت شود که سازه معرفی شده یکی از بزرگ‌ترین سازه‌های تولیدشده به روش لیزری است که قابلیت این تکنولوژی در ساخت قطعات ضخامت کم در عین دقت بالا را نشان می‌دهد [۸۶].

### ۵. برخی از پژوهش‌های پیشین

همانطور که پیش‌تر بیان شد، فرایند روکش کاری لیزری در صنایع مختلف کاربردهای فراوانی دارد. در جدول ۴ مروری از برخی مطالعات پیشینیان روکش کاری لیزری در سه حوزه پوشش‌دهی، تعمیر/بازسازی و نمونه‌سازی به همراه پارامترهای فرایندی آن قرار گرفته‌است. مطابق جدول ۴، مشاهده می‌شود اغلب کاربردهای روکش کاری لیزری در حوزه تعمیر/بازسازی است. دلیل این امر ویژگی‌هایی اعوجاج حداقلی، دقت بالا و کیفیت مطلوب است. با توجه به اینکه، فرآیند روکش کاری لیزری نسبت به روش‌های مرسوم، هزینه تمام‌شده نسبتاً بالاتری دارد، کاربرد آن در پوشش‌دهی و ساخت افزایشی تنها در قطعات حساسی که با سایر روش‌ها امکان پوشش‌دهی آن ممکن نیست کاربرد دارد [۸۹].

از دیدگاه پارامترهای مورد استفاده در مطالعات سه حوزه روکش کاری لیزری از جدول ۴ نتایج مختلفی می‌توان استنباط کرد. به عنوان مثال، در اغلب مطالعات از آرگون به عنوان گاز محافظ استفاده شده‌است. دلیل این امر خنثی بودن این گاز و عدم شرکت آن در حوضچه مذاب دانست [۲۷]. از دیدگاه سرعت فرایند، در شکل ۱۶، دسته‌بندی سرعت کاری مطالعات پیشین سه حوزه پوشش‌دهی، تعمیر/بازسازی و نمونه‌سازی نشان داده شده‌است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود در

• نمونه‌سازی لیزری محافظه احتراق موتور هلیکوپتر صنعت هوافضا از اولین حامیان تکنولوژی نمونه‌سازی لیزری<sup>۴۴</sup> محسوب می‌شود [۸۵]. دقت شود در گذشته جایگزین این روش، جوش کاری پلاسما<sup>۴۵</sup> بود که به دلیل مشکلاتی نظیر زمان طولانی و خطای بالا استفاده از آن به حداقل رسید. به لطف تکنولوژی لیزری، امکان تولید قطعات توخالی، با هندسه پهنه، در زمان محدود، در عین حفظ کیفیت و با بازدهی بالای مواد فراهم می‌شود [۸۶]. در یک مقایسه، محافظه احتراق موتور هلیکوپتر با روش‌های مرسوم ماشینکاری، در مدت زمان بیش از دو ماه ساخته شد. این در حالیست که قطعه مذکور به روش لیزری در ۷،۵ تولید شد [۸۷]. از این رو این فرایند در سال‌های اخیر فرایند نمونه‌سازی لیزری مورد توجه صنایع پیشرفته هوایی نظیر ایرباس و بویینگ قرار گرفته‌است [۸۸]. در مطالعه‌ای بازدهی مواد روش نمونه‌سازی لیزری با روش مرسوم تولیدی در ساخت بدنه موتور ۷۰۰ گرمی از جنس اینکونل ۷۱۸ مقایسه شدند. در این مقایسه هدرفت موادی روش مرسوم و روش لیزری به ترتیب حدود ۱۰ کیلوگرم و به ۰،۵ کیلوگرم گزارش شد. در این مقایسه مشاهده شد که بازدهی موادی روش لیزری در حدود ۷۰ درصد بوده امری حائز اهمیت به شمار می‌رود. چراکه، افزایش بازدهی ماده به معنای مصرف ماده کم‌تر در نتیجه کاهش قابل توجه هزینه تولید قطعه است [۸۶].

شایان ذکر است، فرایند نمونه‌سازی لیزری معرفی شده توسط موسسه‌ی جوشکاری<sup>۴۶</sup> (TWI) با ضخامت ۰،۸ میلی‌متر، با منبع لیزر ۱ کیلووات فایبر و خطای ابعادی،  $\pm 0,9$  میلی‌متر انجام شد.

پارامترهای فرایند عبارت بودند از سرعت رسوبدهی ۲،۵ گرم بر دقیقه، توان ۹۲۵ وات، دبی گاز محافظ ۳ لیتر بر

44. Laser additive manufacturing

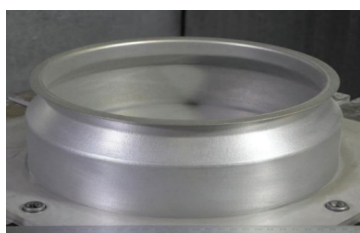
45. Plasma arc welding

46. TWI (The Welding Institute)

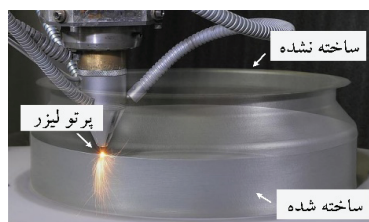


**جدول ۴.** مروری بر برخی پژوهش‌های پیشین حضور روکش کاری لیزری در سه حوزه پوشش‌دهی، تعمیر/بازسازی و نمونه‌سازی

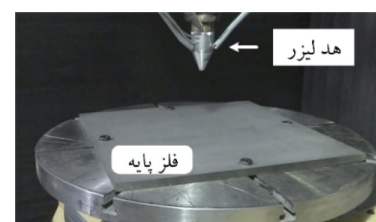
ردیف	کاربرد	سال	شرایط کاری	قطعه‌کار	ماده ثانویه	پارامترهای فرایندی			مرجع		
						سرعت (mm/s)	توان (W)	گاز محافظ			
پوشش‌دهی	دیسک ترمز	۲۰۱۲	سایش، دما بالا	چدن خاکستری	اینکل ۶۲۵	۸۳۳۳,۳	۱۵۰۰۰	-	۱۰۰	[۷۵]	
	قالب ریخته‌گری	۲۰۱۸	سایش فلز-فلز، دما بالا	فولاد H13	Cu/TiB <sub>2</sub>	۱۰	۹۹۵	آرگون	پیش نشانده	[۹۲]	
	شفت پمپ	۱۹۹۶	خوردگی آب دریا	مونل K500	استلایت ۶	۹,۲	۲۴۰۰	ندارد	۱۵	[۹۳]	
	شفت استرن	تماس اصطکاکی با بوش	۲۰۱۰		Ck45	316L هشت لایه اول	۱۵	۵۳۰۰	آرگون	۵۰	[۹۴]
						410L دولایه آخر	۱۵	۵۴۰۰	آرگون	۵۰	[۹۴]
	نازل سوخت	۲۰۱۴	دما تا ۱۰۰۰ سانتی‌گراد	L-605	L-605 (آلیاژ پایه کبالت)	-	۵۰۰	-	۱۰-۵	[۸۱]	
	ایمپلر	۲۰۱۶	سرعت ۲۸۶۹۶ دور/دقیقه	فولاد زنگ‌نزن FV520V	FeCrNiCu	۵	۱۱۰۰	نیتروژن	۸	[۹۵]	
تعمیر/بازسازی	پره توربین فشار بالا	۲۰۱۷	خودگی، دما ۱۱۰۰ و فشار بالا	CMSX-4	۴-CMSX	۱,۶	۲۴۰	-	۲	[۹۶]	
	شیر توپی	۲۰۱۷	اصطکاک فلز-فلز	316L	استلایت ۶	۸	۱۸۰۰	آرگون	۱۲	[۹۷]	
					ترکیب استلایت ۳, ۲۱, ۶	۶	۱۷۰۰	آرگون	۱۳	[۹۷]	
	پره توربین کم فشار	۲۰۱۹	اکسایش و خوردگی شدید	آلیاژ پایه تیتانیوم 1-VT3	آلیاژ پایه تیتانیوم ۴۰۱۰ Metco	۶	۸۰۰	آرگون	۵	[۹۸]	
	ریل راه‌آهن	۲۰۱۹	سایش و خستگی	فولاد U75V	۳۱۶L	۱۰	۵۰۰	-	۱,۲	[۹۹]	
	چرخ قطار	۲۰۱۹	سایش و خستگی	فولاد Grade C wheel	فولاد ۴۱۰/۴۲۰	۸	۵۰۰	-	۱,۲	[۹۹]	
	تیغه ماشین حفاری تونل	۲۰۲۰	سایش شدید	1-LC-WC60	۵Cr۵MoSiV۱	-	۱۵۰۰	آرگون	-	[۱۰۰]	
	تیغه ماشین حفاری تونل	۲۰۲۱	سایش شدید	فولاد 5Cr5MoSiV1	آلیاژ پایه نیکل Ni-Ta	-	۴۰۰۰	آرگون	-	[۱۰۱]	
	نمونه‌سازی	ایرفویل	۲۰۰۴	مجرا خنک کننده داخلی	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	-	-۳۰۰	-	۱-۳۰	[۱۰۲]
		دریچه هوا	۲۰۱۵	هندسه پیچیده	۳۱۶L	۳۱۶L	۲۱,۷	۱۸۰	آرگون	۳,۶-۳,۸	[۱۰۳]
موتور هلیکوپتر		۲۰۱۷	فشار و دما بالا	۳۰۴L	اینکل ۷۱۸	۲۰	۹۲۵	آرگون	۲,۵	[۸۶]	



(ج)

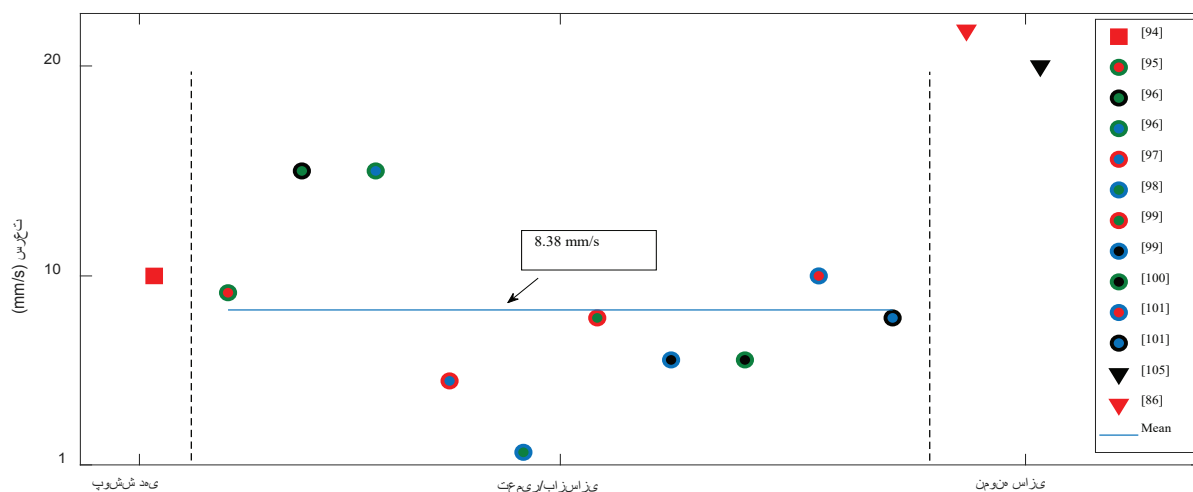


(ب)

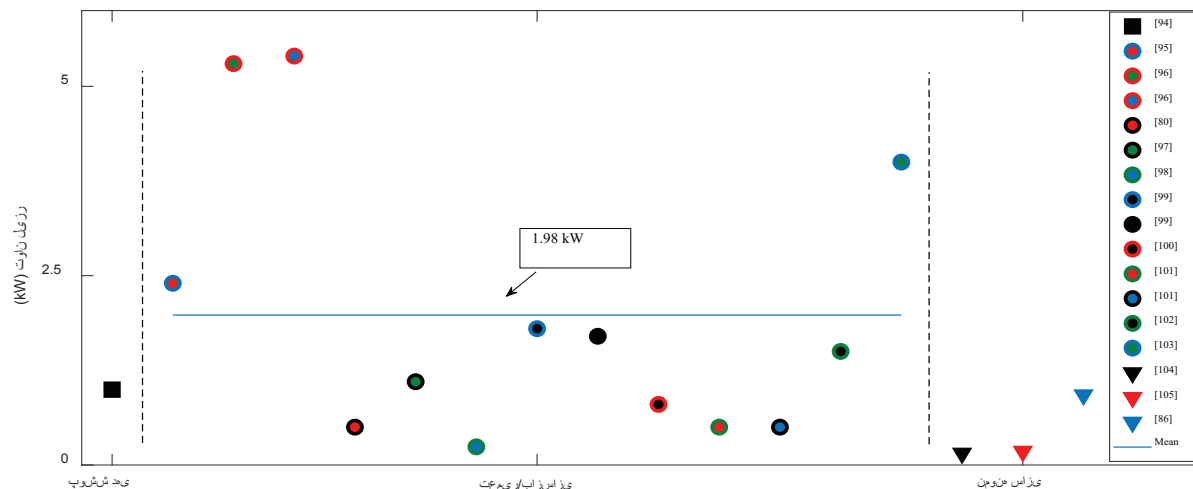


(الف)

**شکل ۱۵.** بدنه موتور هلیکوپتر (الف) پیش از ساخت، (ب) در حال ساخت و (ج) پس از اتمام [۸۶].



شکل ۱۶. سرعت مورد استفاده در پژوهش‌های حوزه‌های پوشش‌دهی، تعمیر/بازسازی و نمونه‌سازی لیزری



شکل ۱۷. توان‌های مورد استفاده در پژوهش‌های حوزه‌های پوشش‌دهی، تعمیر/بازسازی و نمونه‌سازی لیزری

در فرایندهای تعمیراتی هدف ایجاد استحکام و امتزاج بالا بین روکش و قطعه کار بوده و در نتیجه آن توان کاری بالا استفاده می‌شود. در نتیجه در توان مورد استفاده در حوزه تعمیر/بازسازی به مراتب بیشتر از دو حوزه پوشش‌دهی و نمونه‌سازی لیزری است.

### ۶. نتیجه گیری

نظر به اهمیت و کاربرد گسترده روکش کاری لیزری، سعی شد برخی خلاءهای مطالعاتی مورد نیاز با ذکر مثال‌های واقعی در مطالعه حاضر معرفی شوند. در این راستا، ابتدا چرایی پیشرفت روزافزون این تکنولوژی در قالب مزایای آن بررسی شدند. مشاهده شد چگالی انرژی لیزر کم توان و تیگ به ترتیب ۱۰ و ۰/۱ مگاوات بر سانتی‌متر مربع است (روش

حوزه نمونه‌سازی و پوشش‌دهی سرعت کاری بالایی دارند. با توجه به اینکه در این حوزه هرچه سرعت بالاتر باشد، میزان تولید افزایش می‌یابد، بنابراین ویژگی سرعت بالا مدنظر قرار می‌گیرد (سرعت بالاتر از ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه). در حوزه تعمیر/بازسازی لیزری اما هدف کیفیت و استحکام بالاست. بنابراین سرعت پایین‌تر (میانگین ۸/۳۸ میلی‌متر بر ثانیه) و کمتر از دو حوزه پوشش‌دهی و نمونه‌سازی است.

توان مورد استفاده در مطالعات پیشین سه حوزه پوشش‌دهی، تعمیر/بازسازی و نمونه‌سازی لیزری در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۵ مشاهده می‌شود میانگین توان مورد استفاده در حوزه تعمیر/بازسازی با میانگین ۱۹۸۰ وات بیشتر از دو حوزه پوشش‌دهی و نمونه‌سازی لیزری (کمتر از ۱۰۰۰ وات) است. همانطور که بیان شد



## References

- [1] A. A. Siddiqui and A. K. Dubey, "Recent trends in laser cladding and surface alloying," *Optics & Laser Technology*, vol. 134, p. 106619, 2021.
- [2] L. Xue, M. Donovan, Y. Li, J. Chen, S. Wang, and G. Campbell, "Integrated rapid 3D mapping and laser additive repair of gas turbine engine components," in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2013, vol. 2013, no. 1, pp. 318-325: Laser Institute of America.
- [3] S. Kalawrytinios and H. Desmecht, "Rejuvenating Engines with Rotating Internal Processing Heads: Efficient repair of worn cylinder bores through laser cladding," ed: Wiley Online Library, 2010.
- [4] 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.
- [5] P. P. Alvisi and V. F. Lins, "An overview of naphthenic acid corrosion in a vacuum distillation plant," *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, no. 5, pp. 1403-1406, 2011.
- [6] D. Wang, K.-L. Tsui, and Q. Miao, "Prognostics and health management: A review of vibration based bearing and gear health indicators," *Ieee Access*, vol. 6, pp. 665-676, 2017.
- [7] L. Santo, "Laser cladding of metals: a review," *International Journal of Surface Science and Engineering*, vol. 2, no. 5, pp. 327-336, 2008.
- [8] A. L. Schawlow and C. H. Townes, "Masers and maser communications system," ed: Google Patents, 1960.
- [9] K. F. Renk, *Basics of laser physics*. Springer, 2012.
- [۱۰] م. مرندي، م. نبوي، س. ف.، فرشیدیان‌فر، م. ح. فرشیدیان‌فر، جهان‌پور، ج. شجاعی، م. "تحليل آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای فیزیکی بر ضخامت روکش حاصل از فرایند لیزری پره توربین بخار." in *هفدهمین همایش ملی و ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ساخت و تولید*، ۲۰۲۱.
- [11] Y. Ding, R. Liu, L. Wang, J. Li, and J. Yao, "Corrosion and Wear Performance of Stellite Alloy Hardfacing Prepared via Laser Cladding," *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, vol. 56, no. 2, pp. 392-404, 2020.
- [12] H. Zhang, J. Dai, C. Sun, and S. Li, "Microstructure and wear resistance of TiAlNiSiV high-entropy laser cladding coating on Ti-6Al-4V," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 282, p. 116671, 2020.
- [13] F. Weng, H. Yu, C. Chen, and J. Dai, "Microstructures and wear properties of laser cladding Co-based composite coatings on Ti-6Al-4V," *Materials & Design*, vol. 80, pp. 174-181, 2015.
- [14] X. Tong *et al.*, "Effects of pre-placed coating thickness on thermal fatigue resistance of cast iron with biomimetic non-smooth surface treated by laser alloying," *Optics & Laser Technology*, vol. 41, no. 6, pp. 671-678, 2009.
- [15] A. Emamian, M. H. Farshidianfar, and A. Khajepour, "Thermal monitoring of microstructure and carbide morphology in direct metal deposition of Fe-Ti-C metal matrix composites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 710, pp. 20-28, 2017.
- [16] M. H. Farshidianfar, A. Khajepour, and A. P. Gerlich, "Effect of real-time cooling rate on microstructure in laser additive manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 231, pp. 468-478, 2016.
- [17] M. Brandt, *Laser additive manufacturing: materials, design, technologies, and applications*. Springer, 2016.

لیزری چگالی انرژی ۱۰۰ برابر بیشتر از روش تیگ دارد). مشاهده شد که نمونه‌های روکش کاری شده به کمک فرآیند لیزری دارای اعوجاج حداقلی و ریزساختار مناسب هستند. علل اصلی این ویژگی موضعی بودن و سرعت خنک کاری بالای (۶۷ برابر روش تیگ) لیزر معرفی شدند. به منظور درک بیشتر جنبه‌های تکنولوژی روکش کاری لیزری، کاربردهای آن در سه دسته اصلی پوشش دهی، تعمیر/ بازسازی و نمونه‌سازی تقسیم‌بندی بررسی شدند. در دسته پوشش دهی لیزری، به کارگیری نوع پرسرعت آن، مورد استفاده در دیسک‌های ترمز خودرو با قابلیت ایجاد روکشی به ارتفاع ۵۰ تا ۳۵۰ میکرومتر و بیشینه سرعت ۵۰۰ متر بر دقیقه معرفی شدند. مزیت این روش نسبت به روش‌های مرسوم آبکاری کروم و HVOF، کاهش مشکلات زیست محیطی در عین استحکام اتصال بالا گزارش شد. مشاهده شد که کم‌هزینه‌ترین راه برای تعمیر نازل سوخت توربین گازی استفاده از روش روکش کاری لیزری است. جزئیات و مراحل روکش کاری لیزری در فرآیند بازسازی بدنه داخلی سیلندر موتور لوکوموتیو نیز معرفی شدند. در حوزه نمونه‌سازی لیزری نیز مشاهده شد که تولید محفظه احتراق موتور هلی‌کوپتر به روش لیزری بازدهی مواد مصرفی هفتاد درصدی دارد. در انتها نیز مروری بر پژوهش‌های پیشین سه حوزه پوشش دهی، تعمیر/بازسازی و نمونه‌سازی لیزری ارائه شد. در نتیجه این بررسی مشاهده شد فرایندهای پوشش دهی و نمونه‌سازی در سرعت‌های کاری بالاتر (بیش از ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه) از تعمیر/بازسازی لیزری انجام می‌شوند. این درحالیست که توان کاری مطالعات تعمیر/بازسازی لیزری بالاتر (با میانگین توان ۱۹۸۰ وات) از فرایندهای پوشش دهی و نمونه‌سازی لیزری (توان کمتر از ۱۰۰۰ وات) بودند.

به عبارت دیگر در مطالعه حاضر سعی شد ویژگی‌ها و برجستگی‌های لیزر در کاربردهای پوشش دهی، بازسازی و نمونه‌سازی قطعات صنعتی معرفی و بررسی شوند. امید است مطالعه حاضر توانسته باشد پاسخگویی جامع، کامل و درخور تکنولوژی جذاب و نوپای روکش کاری لیزری باشد.

## قدردانی

مطالعه حاضر با حمایت‌های مالی و معنوی مرکز فناوری‌های نوین (CIT) شرکت دانش‌بنیان طاهاقالب توس با شماره گرنت ۲۰۲۱.۰۵.۰۳LSR۰۲ فراهم شده است. بدین وسیله نگارندگان از تمامی کارکنان واحد مهندسی و لیزر و مرکز مربوطه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

- [18] R. Bernhard *et al.*, "Laser Cladding – Additive Manufacturing," in *Laser Cladding of Metals*, P. Cavaliere, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1-8.
- [19] R. Vilar, "Laser cladding," *Journal of laser applications*, vol. 11, no. 2, pp. 64-79, 1999.
- [20] W.-W. Liu, Z.-J. Tang, X.-Y. Liu, H.-J. Wang, and H.-C. Zhang, "A review on in-situ monitoring and adaptive control technology for laser cladding remanufacturing," *Procedia Cirp*, vol. 61, pp. 235-240, 2017.
- [21] W. Assiri, A. Asiri, S. Roman-Alerigi, S. Batarseh, and M. Salman, "A New Horizon in Corrosion Prevention Using State of the Art High Power Laser Cladding Technology," in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2020: Society of Petroleum Engineers.
- [22] O. Aranke, W. Algenaid, S. Awe, and S. Joshi, "Coatings for automotive gray cast iron brake discs: A review," *Coatings*, vol. 9, no. 9, p. 552, 2019.
- [23] N. K. Dey, *Additive manufacturing laser deposition of Ti-6Al-4V for aerospace repair application*. Missouri University of Science and Technology, 2014.
- [24] M. H. Farshidianfar, "Real-time closed-loop control of microstructure and geometry in laser materials processing," 2017
- [25] P. Cavaliere, A. Silvello, and A. Perrone, "Additive Manufacturing by Laser Cladding: State of the Art," *Laser Cladding of Metals*, pp. 9-31, 2021.
- [26] L. J. Kumar and C. K. Nair, "Current trends of additive manufacturing in the aerospace industry," in *Advances in 3D printing & additive manufacturing technologies*: Springer, 2017, pp. 39-54.
- [۲۷] فرشیدیانفر، م. ح.، نبوی، س. ف.، "روکش کاری لیزری در سال های اخیر،" *مهندسی مکانیک*، vol. ۲۰، no. ۲، pp. ۶۹-۷۷، خرداد و تیر ۱۴۰۰.
- [28] G. Pastras, A. Fysikopoulos, C. Giannoulis, and G. J. T. I. J. o. A. M. T. Chrissoulouris, "A numerical approach to modeling keyhole laser welding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 78, no. 5-8, pp. 723-736, 2015.
- [29] S. Jelvani, R. S. Razavi, M. Barekat, M. R. Dehnavi, M. J. O. Erfanmanesh, and L. Technology, "Evaluation of solidification and microstructure in laser cladding Inconel 718 superalloy," *Optics & Laser Technology*, vol. 120, p. 105761, 2019.
- [30] Z. Li *et al.*, "Microhardness and wear resistance of Al2O3-TiB2-TiC ceramic coatings on carbon steel fabricated by laser cladding," *Ceramics International*, vol. 45, no. 1, pp. 115-121, 2019.
- [۳۱] نبوی، س. ف.، فرشیدیانفر، الف.، و فرشیدیانفر، م. ح.، "اساس لیزر و کاربرد آن در صنعت روز،" *مجله علمی مهندسی مکانیک*، علمی ترویجی، دوره ۲۸، صفحات ۶۱ تا ۷۱، سال ۱۳۹۸.
- [32] S. F. Nabavi, M. H. Farshidianfar, A. Farshidianfar, and B. J. O. Beidokhti, "Physical-based methodology for prediction of weld bead characteristics in the Laser Edge Welding process," *Optik*, vol. 241, p. 166917, 2021.
- [33] W. M. Steen and J. Mazumder, *Laser material processing*. springer science & business media, 2010.
- [34] M. N. Fesharaki, R. Shoja-Razavi, H. A. Mansouri, and H. Jamali, "Microstructure investigation of Inconel 625 coating obtained by laser cladding and TIG cladding methods," *Surface and Coatings Technology*, vol. 353, pp. 25-31, 2018.
- [35] E. Toyserkani, A. Khajepour, and S. F. Corbin, *Laser cladding*. CRC press, 2004.
- [36] G. Turichin, E. Zemlyakov, E. Y. Pozdeeva, J. Tuominen, and P. Vuoristo, "Technological possibilities of laser cladding with the help of powerful fiber lasers," *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 54, no. 3, pp. 139-144, 2012.
- [37] F. Khodabakhshi, M. Farshidianfar, A. Gerlich, M. Nosko, V. Trembošová, and A. Khajepour, "Effects of laser additive manufacturing on microstructure and crystallographic texture of austenitic and martensitic stainless steels," *Additive Manufacturing*, vol. 31, p. 100915, 2020.
- [38] M. H. Farshidianfar, A. Khajepour, and A. Gerlich, "Real-time control of microstructure in laser additive manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 82, no. 5-8, pp. 1173-1186, 2016.
- [39] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. John Wiley & Sons, 2020.
- [40] M. H. Farshidianfar, "Control of microstructure in laser additive manufacturing," University of Waterloo, 2014.
- [41] R. B. Hetnarski, *Encyclopedia of thermal stresses*. Springer Netherlands, 2014.
- [42] M. Soodi, "Laser Cladding compared with TIG welding to repair and refurbish railway axles," in *CORE 2010, Conference on Railway Engineering, Wellington, New Zealand, 12-15 September, 2010*, 2010.
- [43] F. Khodabakhshi, M. Farshidianfar, A. Gerlich, M. Nosko, V. Trembošová, and A. Khajepour, "Microstructure, strain-rate sensitivity, work hardening, and fracture behavior of laser additive manufactured austenitic and martensitic stainless steel structures," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 756, pp. 545-561, 2019.
- [44] Y.-C. Kim, M. Hirohata, M. Murakami, and K. Inose, "Effects of heat input ratio of laser-arc hybrid welding on welding distortion and residual stress," *Welding International*, vol. 29, no. 4, pp. 245-253, 2015.
- [45] W. M. Steen, "Laser surface treatment," in *Laser Material Processing*: Springer, 2003, pp. 227-278.
- [46] Y. Huang *et al.*, "Rapid prediction of real-time thermal characteristics, solidification parameters and microstructure in laser directed energy deposition (powder-fed additive manufacturing)," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 274, p. 116286, 2019.
- [47] G. Muvvala, D. P. Karmakar, and A. K. Nath, "Online monitoring of thermo-cycles and its correlation with microstructure in laser cladding of nickel based super alloy," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 88, pp. 139-152, 2017.
- [48] J. Powell, P. Henry, and W. Steen, "Laser cladding with pre-placed powder: analysis of thermal cycling and dilution effects," *Surface engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 141-149, 1988.
- [49] M. H. Farshidianfar, A. Khajepour, S. Khosravani, and A. Gerlich, "Clad height control in laser cladding using a nonlinear optimal output tracking controller," in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2013, vol. 2013, no. 1, pp. 470-479: Laser Institute of America.
- [50] M. H. Farshidianfar, A. Khajepouhor, and A. Gerlich, "Real-time monitoring and prediction of martensite formation and hardening depth during laser heat treatment," *Surface and Coatings Technology*, vol. 315, pp. 326-334, 2017.
- [51] C. Panwisawas *et al.*, "Keyhole formation and thermal fluid flow-induced porosity during laser fusion welding in titanium

- alloys: Experimental and modelling," *Acta materialia*, vol. 12, pp. 251-263, 2017.
- [52] M. H. Farshidianfar, F. Khodabakhshi, A. Khajepour, and A. P. Gerlich, "Closed-loop control of microstructure and mechanical properties in additive manufacturing by directed energy deposition," *Materials Science and Engineering :A*, vol. 803, p. 140483, 2021.
- [53] M. H. Farshidianfar, "Real-time closed-loop control of microstructure and geometry in laser materials processing," PhD, University of Waterloo, 2017.
- [54] *What is Laser Cladding Technology?* Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-laser-cladding>
- [55] W. Cai, J. Wang, P. Jiang, L. Cao, G. Mi, and Q. Zhou, "Application of sensing techniques and artificial intelligence-based methods to laser welding real-time monitoring: A critical review of recent literature," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 57, pp. 1-18, 2020.
- [56] L. Zhu *et al.*, "Recent research and development status of laser cladding: A review," *Optics & Laser Technology*, vol. 138, p. 106915, 2021.
- [57] [۵۷] کلاگر، ع. م.، "بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC لایه نشانی شده با لیزر." "مهندسی متالورژی، دوره ۲۲، شماره ۱، صفحات ۵۲-۶۴، سال ۱۳۹۸.
- [58] A. Singh, A. Ramakrishnan, and G. P. Dinda, "Direct laser metal deposition of eutectic Al-Si alloy for automotive applications," in *TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*, 2017, pp. 71-80: Springer.
- [59] L. Meng, B. Zhu, C. Xian, X. Zeng, Q. Hu, and D. Wang, "Comparison on the wear properties and rolling contact fatigue damage behaviors of rails by laser cladding and laser-induction hybrid cladding," *Wear*, vol. 458, p. 203421, 2020.
- [60] Available: <https://tmcomas.com/en/service/laser-cladding/>
- [61] W. Grzesik, "Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review ", *Journal of Machine Engineering*, vol. 18, 2018.
- [62] J. R. Lawrence, *Advances in laser materials processing: technology, research and applications*. Woodhead Publishing, 2017.
- [63] M. Meboldt and C. Klahn, *Industrializing additive manufacturing-proceedings of additive manufacturing in products and applications-AMPA2017*. Springer, 2017.
- [64] B. Graf, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier, "Laser metal deposition as repair technology for stainless steel and titanium alloys," *Physics Procedia*, vol. 39, pp. 376-381, 2012.
- [65] M. Froend, V. Ventzke, S. Riekehr, N. Kashaev, B. Klusemann, and J. Enz, "Microstructure and microhardness of wire-based laser metal deposited AA5087 using an Ytterbium fibre laser," *Materials Characterization*, vol. 143, pp. 59-67, 2018.
- [66] M. Farshidianfar, F. Khodabakhshi, A. Khajepour, and A. Gerlich, "Closed-loop deposition of martensitic stainless steel during laser additive manufacturing to control microstructure and mechanical properties," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 145, p. 106680, 2021.
- [67] J. Liu, H. Liu, X. Tian, H. Yang, and J. Hao, "Microstructural evolution and corrosion properties of Ni-based alloy coatings fabricated by multi-layer laser cladding on cast iron," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 822, p. 153708, 2020.
- [68] Y. Zou, B. Ma, H. Cui, F. Lu, and P. Xu, "Microstructure, wear, and oxidation resistance of nanostructured carbide-strengthened cobalt-based composite coatings on Invar alloys by laser cladding," *Surface and Coatings Technology*, vol. 381, p. 125-188, 2020.
- [69] D. S. Rickerby and A. Matthews, *Advanced surface coatings: a handbook of surface engineering*. 1991.
- [70] A. Rashid, "Overview of disc brakes and related phenomena-a review," *International journal of vehicle noise and vibration*, vol. 10, no. 4, pp. 257-301, 2014.
- [71] M. Shin, K. Cho, S. Kim, and H. Jang, "Friction instability induced by corrosion of gray iron brake discs," *Tribology letters*, vol. 37, no. 2, pp. 149-157, 2010.
- [72] T. Schopphoven, J. H. Schleifenbaum, S. Tharmakulasingam, and O. Schulte, "Setting Sights on a 3D Process: Extreme high-speed laser material deposition, or EHLA, is now being developed into an additive manufacturing process," *Photonics Views*, vol. 16, no. 5, pp. 64-68, 2019.
- [73] M. H. Farshidianfar, A. Khajepour, M. Zeinali, and A. Gerlich, "System identification and height control of laser cladding using adaptive neuro-fuzzy inference systems," in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2013, vol. 2013, no. 1, pp. 615-623: Laser Institute of America.
- [74] F. ILT. (2014, 9/19/2020). *Coating through High-speed Laser Material Deposition*. Available: [https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/annual\\_reports/ar13/AR13\\_P78.pdf](https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/annual_reports/ar13/AR13_P78.pdf)
- [75] T. Schopphoven, A. Gasser, and G. Backes, "EHLA: Extreme High Speed Laser Material Deposition: Economical and effective protection against corrosion and wear," *Laser Technik Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 26-29, 2017.
- [76] K. Sertoglu. (2020, 2/13/2021). *BILSING AUTOMATION ADOPTS FRAUNHOFER ILT'S DED 3D PRINTING TECHNOLOGY*. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/bilsing-automation-adopts-fraunhofer-ilt-s-ded-3d-printing-technology-173706/>
- [77] L. Nickels, "They do it with lasers," *Metal Powder Report*, vol. 75, no. 2, pp. 79-81, 2020.
- [78] M. Barbosa, R. Bischoff, W. Strauß, H. Hillig, S. Nowotny, and C. Leyens, "Less CO2 and Fine Dust Emissions in Automotive: High-power laser cladding as a cost-effective rotor coating solution," *Photonics Views*, vol. 17, no. 4, pp. 46-49, 2020.
- [79] B. W. Lagow, "Materials Selection in gas turbine engine design and the role of low thermal expansion materials," *JOM*, vol. 68, no. 11, pp. 2770-2775, 2016.
- [80] J. D. Majumdar and I. Manna, "Laser processing of materials," *Sadhana*, vol. 28, no. 3, pp. 495-562, 2003.
- [81] M. D. Lijue Xue, Yangsheng Li, Jianyin Chen, Shaodong Wang, and Glen Campbell. (2014). *Laser repairing gas turbine engine components*. Available: <https://www.industrial-lasers.com/surface-treatment/article/16484892/laser-repairing-gas-turbine-engine-components>
- [82] A. W. Stephan Kalawrytinis, and Hugues Desmecht. (2011). *Laser cladding of worn cylinder bores*. Available: <https://www.industrial-lasers.com/surface-treatment/article/16485698/laser-cladding-of-worn-cylinder-bores>
- [83] J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi, and A. Ghosh, "Closed loop direct metal deposition: art to part," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 34, no. 4-6, pp. 397-414, 2000.

- [84] M. Touri, F. Kabirian, M. Saadati, S. Ramakrishna, and M. Mozafari, "Additive manufacturing of biomaterials- the evolution of rapid prototyping," *Advanced Engineering Materials*, vol. 21, no. 2, p. 1800511, 2019.
- [85] J. Edgar and S. Tint, "Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing," *Johnson Matthey Technology Review*, vol. 59, no. 3, pp. 193-198, 2015.
- [86] R. Liu, Z. Wang, T. Sparks, F. Liou, and J. Newkirk, "Aerospace applications of laser additive manufacturing," in *Laser additive manufacturing*: Elsevier, 2017, pp. 351-371.
- [87] C. Hauser. *Case Study: Laser Powder Metal Deposition Manufacturing of Complex Real Parts*. Available: <https://docplayer.net/48458850-Case-study-laser-powder-metal-deposition-manufacturing-of-complex-real-parts.html>
- [88] M. Burhan, M. W. Shahzad, D. Ybyraiymkul, S. J. Oh, N. Ghaffour, and K. C. Ng, "Performance investigation of MEMSYS vacuum membrane distillation system in single effect and multi-effect mode," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 34, pp. 9-15, 2019.
- [89] J. Ion, *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. Elsevier, 2005.
- [90] P. Cavaliere, *Laser Cladding of Metals*. Springer, 2021.
- [91] F. A. España, V. K. Balla, S. Bose, and A. Bandyopadhyay, "Design and fabrication of CoCrMo alloy based novel structures for load bearing implants using laser engineered net shaping," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 30, no. 1, pp. 50-57, 2010.
- [92] S. Yang and T. A. Phung, "Microstructure and properties of Cu/TiB<sub>2</sub> wear resistance composite coating on H13 steel prepared by in-situ laser cladding," *Optics & Laser Technology*, vol. 108, pp. 480-486, 2018.
- [93] L. R. Migliore, *Laser Materials Processing*. CRC Press, 1996.
- [94] N. Kampanis and I. Hauer, "PROPELLER SHAFT REPAIR FOR A LARGE FERRY WITH THE AID OF LASER CLADDING TECHNIQUE," 2010.
- [95] X. Lei, C. Huajun, L. Hailong, and Z. Yubo, "Study on laser cladding remanufacturing process with FeCrNiCu alloy powder for thin-wall impeller blade," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, no. 5-8, pp. 1383-1392, 2017.
- [96] S. Kaierle *et al.*, "Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 19, pp. 196-199, 2017.
- [97] Y. Ding, R. Liu, J. Yao, Q. Zhang, and L. Wang, "Stellite alloy mixture hardfacing via laser cladding for control valve seat sealing surfaces," *Surface and Coatings Technology*, vol. 329, pp. 97-108, 2017.
- [98] A. Pascu, J. M. Rosca, and E. M. Stanciu, "Laser cladding: from experimental research to industrial applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 19, pp. 1059-1065, 2019.
- [99] Y. Zhu, Y. Yang, X. Mu, W. Wang, Z. Yao, and H. Yang, "Study on wear and RCF performance of repaired damage railway wheels :Assessing laser cladding to repair local defects on wheels," *Wear*, vol. 430, pp. 126-136, 2019.
- [100] D. Hu, Y. Liu, H. Chen, and M. Wang, "Microstructure and wear resistance of Ni-based tungsten carbide coating by laser cladding on tunnel boring machine cutter ring," *Surface and Coatings Technology*, vol. 404, p. 126432, 2020.
- [101] D. Hu, Y. Liu, H. Chen, M. Wang, and J. Liu, "Microstructure and properties of in-situ synthesized Ni<sub>3</sub>Ta-TaC reinforced Ni-based coatings by laser cladding," *Surface and Coatings Technology*, vol. 405, p. 126599, 2021.
- [102] L. Xue, A. Theriault, M.-U. Islam, M. Jones, and H.-P. Wang, "Laser consolidation of Ti-6Al-4V alloy to build functional net-shape airfoils with embedded cooling channels," in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2004, vol. 2004, no. 1, p. 1706: Laser Institute of America.
- [103] M. Marya, V. Singh, S. Marya, and J. Y. Hascoet, "Microstructural development and technical challenges in laser additive manufacturing: case study with a 316L industrial part," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 46, no. 4, pp. 1654-1665, 2015.