

تقدیم بہ

روح پاک پدر بزرگوارم

روکش کاری لیزری

مؤلف:

دکتر رضا شجاع رضوی

عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مواد

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

سرشناسه:	شجاع رضوی، رضا؛ ۱۳۵۷ -
عنوان و نام پدیدآور:	روکش کاری لیزری / مؤلف رضا شجاع رضوی.
مشخصات نشر:	تهران: دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۵
مشخصات ظاهری:	ظ، ۳۸۴ ص: مصور، جدول.
شابک:	۲-۳۰-۷۷۳۶-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیا.
یادداشت:	واژه‌نامه.
یادداشت:	کتابنامه.
موضوع:	روکش فلزات.
موضوع:	فلزها- پوشش.
موضوع:	لیزر- کاربردهای صنعتی.
شناسه افزوده:	دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
رده‌بندی کنگره:	۱۳۹۵ ش ۳۹ / ۶۵۳/۵ TS
رده‌بندی دیویی:	۶۷۱/۷
کتابشناسی ملی:	۴۴۷۹۷۹۷



عنوان کتاب: روکش کاری لیزری
مؤلف: رضا شجاع رضوی
ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
طرح روی جلد: فریناز عسگری
لیتوگرافی، چاپ و صحافی: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
صفحه آرایایی رایانه ای: امین پژوهش
ویراستاری ادبی: امین پژوهش
شمارگان: ۱۰۰۰
نوبت چاپ: اول، پاییز ۹۵
قیمت: ۲۶۰.۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-7736-30-2

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

نقل مطالب فقط با ذکر مشخصات کامل کتاب و با اشاره به نام ناشر مجاز است.

آدرس: تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مرکز فناوری اطلاعات و مدیریت دانش،

مدیریت انتشارات. تلفن: ۲۲۹۳۲۸۹۱

پیشگفتار

امروزه نگرش اقتصادی جامعه صنعتی به سمت استفاده مجدد از قطعات معیوب و قابل تعمیر می‌باشد. تا زمانی که قطعه باکیفیت به راحتی در دسترس باشد، نیاز به روش‌های تعمیر و بازسازی قطعات نیست. مهندسين علاوه بر تولید محصولات جدید و با عملکردی بهینه باید قادر به تعمیر و استفاده مجدد از قطعات باشند. با توجه به تجارب صنعتی ناشی از مشکلات اقتصادی در کشورهای توسعه یافته می‌توان دریافت که دیگر نمی‌توان از به کارگیری قطعاتی که کمی صدمه دیده‌اند صرف نظر نمود. در سراسر جهان تبلیغات تجاری و ابزارهای بازاریابی جوامع بشری را به خرید محصولات جدید تشویق می‌کنند. به همین دلیل جوامع مصرف کننده باعث ضرر به منابع طبیعی می‌شوند. خوشبختانه جامعه و صنعت به درکی رسیده‌اند که برای کاهش هزینه‌ها می‌توان از روش‌های تعمیر و بازسازی استفاده کرد؛ به طوری که حتی اگر منابع اولیه نیز در دسترس باشند و در صورتی که تعمیر قطعات قبلی امکان پذیر باشد، تمایلی برای تولید قطعات جدید وجود ندارد. از این رو تعمیر و بازسازی در بخش‌های مکانیکی و مهندسی ساخت در حال حاضر رو به گسترش است و این بخش از پتانسیل و وسعت زیادی در صنعت برخوردار شده است.

شرایط کاری مداوم، سایش، خوردگی و عیوب رایجی مانند برآمدگی‌ها، بریدگی‌ها، شیارها و غیره که در سطوح مواد رخ می‌دهد باعث از کارافتادگی و غیرقابل استفاده شدن قطعات می‌شود. از جمله روش‌هایی که برای تعمیر و بازسازی وجود دارد، می‌توان به روش‌های جوش کاری، پاشش حرارتی و روکش کاری لیزری اشاره نمود.

ب ♦ روکش کاری لیزری

روکش کاری لیزری مزایای بسیاری نسبت به سایر روش های متعارف روکش کاری دارد. با این روش می توان به کیفیت مطلوب تری نسبت به سایر روش ها با حداقل اعوجاج در قطعه و همچنین کیفیت سطحی مناسب دست یافت. به طوری که خواص مواد سطحی، مشابه و یا حتی بهتر از نمونه های اصلی خود به دست می آیند. به طور کلی مزایای استفاده از روکش کاری لیزری عبارت اند از: کاهش زمان تولید، افزایش کنترل حرارت، تعمیر بسیار رضایت بخش قطعات. پتانسیل این فناوری عظیم با گروه های تحقیقاتی در سراسر جهان از طریق برنامه های تحقیقاتی، صنعتی و آموزش متخصص های مجرب در این زمینه در حال رشد و پیشرفت است.

در کشور ایران از سال ها قبل دانش لیزر در مراکز تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته است و دستاوردهای قابل توجهی نیز در زمینه تولید لیزرهای آزمایشگاهی، صنعتی و پزشکی داشته است. اما گسترش استفاده از لیزر در صنعت در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از ماموریت های دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، گسترش جنبه های مختلف لیزر در مهندسی مواد در داخل کشور است. با توجه به نیاز مبرم و روز افزون صنایع مرتبط با فناوری برتر و وجود دانش فنی لازم در زمینه فراوری مواد، این دانشکده اقدام به توسعه دانش فنی فراوری مواد توسط لیزر در کشور نموده است و پروژه های دانشجویی، تحقیقاتی و صنعتی متعددی در این مرکز انجام شده است. از آنجایی که دانشگاه مالک اشتر پیشتاز تهیه کتاب هایی در زمینه لیزر است، این موسسه در سال ۱۳۹۳ کتاب فراوری مواد با لیزر را منتشر ساخت. استقبال خوب از این کتاب و نظر به اهمیت موضوع و گسترش وسیع علم و فناوری لیزر، ما را بر آن داشت تا کتابی تخصصی در زمینه روکش کاری لیزری تهیه نماییم. با توجه به این که در میان کتاب های منتشر شده در زمینه لیزر، فقدان کتاب تخصصی که به روکش کاری به وسیله لیزر پرداخته باشد، احساس می شد؛ مولف در راستای اهداف خود تصمیم به تالیف این کتاب گرفت که عمده تا نتیجه مطالعات و فعالیت های تحقیقاتی خود در طی ده سال گذشته است.

پیشگفتار ♦ ج

در فصل یک این کتاب مبانی روکش کاری و روش های مختلف روکش کاری از جمله روش های جوش کاری، پاشش حرارتی و روکش کاری لیزری که برای تعمیر و بازسازی قطعات صنعتی استفاده می شود، بیان و با یکدیگر مقایسه شده است. در فصل دوم این کتاب به مبانی روکش کاری لیزری هم از دیدگاه متالورژیکی و هم از دیدگاه فناورانه پرداخته می شود. فصل سوم عوامل موثر بر روکش کاری لیزری و فصل چهارم آلیاژهای مختلفی که در روکش کاری لیزری استفاده می شوند، توضیح داده می شوند و در نهایت در فصل پنجم به کاربردهای روکش کاری لیزری در صنایع مختلف پرداخته شده است.

در پایان بر خود واجب می دانم از تلاش ها و زحمات آقایان محمد عرفان منش و سید مسعود برکت در چاپ این کتاب، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از خانواده عزیزم که با صبر و تشویق های شان من را در این راه حمایت و پشتیبانی نمودند کمال تشکر را دارم.

رضا شجاع رضوی

پاییز ۱۳۹۵

فهرست مطالب

فصل نخست: مبانی روکش کاری ۳

- ۱-۱- مقدمه ۳
- ۲-۱- فرایندهای روکش کاری ۸
- ۲-۲-۱- روکش کاری توسط فرایندهای جوش کاری ۹
- ۲-۲-۲- روکش کاری توسط فرایندهای پاشش حرارتی ۱۰
- ۲-۲-۳- روکش کاری توسط لیزر ۲۲
- ۲-۳-۱- مقایسه بین روکش کاری لیزری و دیگر روش‌های پوشش‌دهی ۲۷
- ۲-۳-۲- مقایسه بین روکش کاری لیزری و دیگر روش‌های نمونه‌سازی ۲۹
- ۲-۳-۳-۱- دلایل استفاده از روکش کاری لیزری ۳۰
- ۳-۱- عوامل موثر بر انتخاب فرایندهای روکش کاری ۳۳
- ۳-۱-۱- خواص و کیفیت مورد نظر ۳۴
- ۳-۱-۲- مشخصات فیزیکی قطعه کار ۳۸
- ۳-۱-۳- مشخصات متالورژیکی فلز پایه ۳۸
- ۳-۱-۴- نوع آلیاژ روکش کاری ۴۰
- ۳-۱-۵- هزینه ۴۳

فصل دوم: مبانی روش کار لیزری ۴۷

۴۷	۱-۲- مقدمه
۵۴	۲-۲- تاریخچه
۵۶	۳-۲- مبانی فناوریانه
۵۶	۱-۳-۲- روش های مختلف روش کار لیزری
۵۸	۱-۱-۳-۲- روش کار لیزری دو مرحله ای
۶۰	۲-۱-۳-۲- روش کار لیزری تک مرحله ای
۶۸	۲-۳-۲- تجهیزات روش کار لیزری
۷۰	۱-۲-۳-۲- انواع لیزرهای به کار رفته در فرایند روش کار لیزری
۷۷	۲-۲-۳-۲- سامانه تغذیه پودر
۸۵	۳-۲-۳-۲- نازل ها
۹۴	۴-۲-۳-۲- دستگاه موقعیت دهی مجهز به نرم افزار CAM / CAD
۱۰۲	۵-۲-۳-۲- سامانه بازخورد
۱۰۳	۶-۲-۳-۲- نرم افزار دیده بانی
۱۰۴	۴-۲- مبانی متالورژیکی فرایند روش کار لیزری
۱۰۴	۱-۴-۲- مقدمه
۱۰۶	۲-۴-۲- خصوصیات روش
۱۰۸	۱-۲-۴-۲- خصوصیات هندسی
۱۱۸	۲-۲-۴-۲- خواص مکانیکی
۱۲۲	۳-۲-۴-۲- خصوصیات متالورژیکی (اندازه دانه و ساختار)

۱۲۶ ۴-۲-۴-۲- خصوصیات کیفی

فصل سوم: عوامل موثر بر روکش کاری لیزری..... ۱۳۵

۱۳۵ ۱-۳- مقدمه

۱۳۵ ۲-۳- اصول فیزیکی فرایند

۱۳۶ ۱-۲-۳- جذب در مواد مختلف

۱۳۷ ۱-۱-۲-۳- برخورد نور با سطوح دی الکتریک

۱۴۰ ۲-۱-۲-۳- برخورد نور با سطوح فلزات

۱۴۳ ۳-۱-۲-۳- برخورد نور روی نیمه‌هادی‌ها

۱۴۵ ۴-۱-۲-۳- اثر عوامل مختلف بر بازتاب‌پذیری

۱۵۱ ۲-۲-۳- پویایی حوضچه ذوب

۱۵۱ ۱-۲-۲-۳- نیروی شناوری

۱۵۳ ۲-۲-۲-۳- نیروی لورنتز

۱۵۳ ۳-۲-۲-۳- نیروی مارانگونی

۱۵۴ ۴-۲-۲-۳- تنش برشی ناشی از پلاسمای قوس

۱۵۵ ۵-۲-۲-۳- نیروی مارانگونی در روکش کاری لیزری

۱۵۹ ۳-۲-۳- انجماد سریع

۱۵۹ ۱-۳-۲-۳- حالت‌های انجماد

۱۶۱ ۲-۳-۲-۳- تحت انجماد ترکیبی

۱۶۵ ۳-۳-۲-۳- تاثیر سرعت سرمایش

۱۶۹ ۳-۳- خواص مواد استفاده شده در فرایند روکش کاری لیزری

- ۱۷۳ ۳-۴- پارامترهای پردازش
- ۱۷۴ ۳-۴-۱- تاثیر پارامترهای فرایند روش کار لیزری بر ارتفاع روش
- ۱۸۴ ۳-۴-۲- تاثیر پارامترهای فرایند روش کار لیزری بر پهنای روش
- ۱۸۷ ۳-۴-۳- تاثیر پارامترهای فرایند روش کار لیزری بر عمق نفوذ و آمیختگی
- ۱۹۱ ۳-۴-۴- تاثیر پارامترهای فرایند روش کار لیزری بر زاویه تر شوندگی
- ۱۹۳ ۳-۴-۵- نقشه پارامترهای فرایند برای نمونه‌های تک‌پاس
- ۱۹۷ ۳-۴-۶- متغیرهای ترکیبی

فصل چهارم: روش کار لیزری آلیاژهای مختلف ۲۰۳

- ۲۰۳ ۴-۱- مقدمه
- ۲۰۷ ۴-۲- سوپرآلیاژها
- ۲۰۸ ۴-۲-۱- اصول متالورژیکی سوپرآلیاژها
- ۲۰۹ ۴-۲-۲- دمای کاری سوپرآلیاژها
- ۲۱۱ ۴-۲-۳- خواص سوپرآلیاژها
- ۲۱۱ ۴-۲-۴- خواص مکانیکی سوپرآلیاژها و کاربرد در دماهای متفاوت
- ۲۱۳ ۴-۲-۵- ساختار بلوری سوپرآلیاژها
- ۲۱۳ ۴-۲-۶- مقدمه‌ای بر گروه‌های آلیاژی
- ۲۱۳ ۴-۲-۶-۱- سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل
- ۲۱۴ ۴-۲-۶-۲- سوپرآلیاژهای پایه نیکل
- ۲۱۵ ۴-۲-۶-۳- سوپرآلیاژهای پایه کبالت
- ۲۱۶ ۴-۲-۷- عناصر آلیاژی و تاثیر آنها بر ریزساختار

فهرست مطالب ♦ ط

- ۲۱۸ عناصر اصلی در سوپرآلیاژها ۱-۷-۲-۴
- ۲۱۸ عناصر جزئی مفید در سوپرآلیاژها ۲-۷-۲-۴
- ۲۱۸ عناصر تشکیل دهنده فازهای ترد ۳-۷-۲-۴
- ۲۱۹ عناصر ناخواسته و مضر در سوپرآلیاژها ۴-۷-۲-۴
- ۲۱۹ عناصر ایجادکننده مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون ۵-۷-۲-۴
- ۲۲۰ استحکام‌دهی سوپرآلیاژها ۸-۲-۴
- ۲۲۱ فاز γ' ۱-۸-۲-۴
- ۲۲۱ فاز γ'' ۲-۸-۲-۴
- ۲۲۲ کاربیدها ۳-۸-۲-۴
- ۲۲۳ بوراید‌ها و عناصر جزئی مفید دیگر (به جز کربن) ۴-۸-۲-۴
- ۲۲۳ تخریب محیطی سوپرآلیاژها ۹-۲-۴
- ۲۲۴ اکسیداسیون ۱-۹-۲-۴
- ۲۲۵ خوردگی داغ ۲-۹-۲-۴
- ۲۲۷ تخریب سوپرآلیاژها ۱۰-۲-۴
- ۲۲۸ ناپایداری ریزساختاری ۱-۱۰-۲-۴
- ۲۲۸ فوق‌گداز و ذوب موضعی ۲-۱۰-۲-۴
- ۲۲۸ انحلال فاز سخت γ' ۳-۱۰-۲-۴
- ۲۲۹ انحلال و اصلاح کاربیدها ۴-۱۰-۲-۴
- ۲۲۹ کار در دمای ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد ۵-۱۰-۲-۴
- ۲۳۰ خسارات ناشی از خزش و خستگی ۶-۱۰-۲-۴

۲۳۰	۴-۲-۱۱- بازسازی و تعمیر.....
۲۳۱	۴-۲-۱۲- مروری کوتاه بر پوشش دهی سوپرآلیاژها.....
۲۳۲	۴-۳- روکش کاری لیزری با استفاده از پودرهای سوپرآلیاژ.....
۲۳۲	۴-۳-۱- آلیاژهای پایه کبالت.....
۲۳۳	۴-۳-۱-۱- مقایسه ریزساختاری بین دو فرایند روکش کاری لیزری و جوش کاری.....
۲۳۶	۴-۳-۱-۲- روکش کاری لیزری پودر پایه کبالت روی فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی.....
۲۳۸	۴-۳-۱-۳- روکش کاری استلایت ۶ روی زیرلایه فولاد Cr-Mo-V.....
۲۴۱	۴-۳-۱-۴- بررسی ساختار لایه‌های سطحی پوشش استلایت.....
۲۴۵	۴-۳-۱-۵- روکش کاری فولاد زنگ‌نزن با استفاده از پودر آلیاژی استلایت ۶.....
۲۴۹	۴-۳-۱-۶- روکش کاری چندلایه پودر استلایت ۶.....
۲۵۲	۴-۳-۱-۷- روکش کاری لیزری پودر استلایت به همراه WC.....
۲۵۷	۴-۳-۱-۸- روکش کاری پودر استلایت ۲۱.....
۲۶۲	۴-۳-۲- آلیاژهای پایه نیکل.....
۲۷۰	۴-۳-۳- آلیاژهای پایه آهن.....
۲۸۸	۴-۴- روکش کاری لیزری مواد سرامیکی پایه زیرکونیایی.....
۲۸۹	۴-۴-۱- ریزساختار و آنالیز فازی حاصل از روکش کاری لیزری.....
۲۹۷	۴-۴-۲- رفتار اکسیداسیون و مقاومت به خوردگی داغ.....
۳۰۲	۴-۴-۳- مقاومت به فرسایش و شوک حرارتی.....
۳۰۸	فصل پنجم: کاربردهای روکش کاری لیزری.....
۳۰۸	۵-۱- مقدمه.....

فهرست مطالب ♦ ک

- ۳۱۱ ۲-۵- صنایع هوافضا
- ۳۱۲ ۱-۲-۵- ارايه فرود هواپيما
- ۳۱۵ ۲-۲-۵- قطعات توربين
- ۳۲۴ ۳-۵- صنایع توليد نيرو و توربين های گازی صنعتی
- ۳۲۴ ۱-۳-۵- شيرها و قطعات آب بند
- ۳۲۶ ۲-۳-۵- تيغه های توربين های بخار و گاز
- ۳۲۸ ۳-۳-۵- ديگ بخار
- ۳۲۹ ۴-۵- صنایع خودروسازی و موتورهای پيستونی
- ۳۲۹ ۱-۴-۵- سوپاپ و پيستون
- ۳۳۰ ۲-۴-۵- سيلندر
- ۳۳۱ ۳-۴-۵- ميل بادامک و ميل لنگ
- ۳۳۲ ۴-۴-۵- توربو شارژر
- ۳۳۳ ۵-۴-۵- ميل گاردان
- ۳۳۴ ۵-۵- صنایع نفت و گاز
- ۳۳۷ ۶-۵- ماشين ساخت کاغذ و خمير
- ۳۴۰ ۷-۵- ماشين های سنگين
- ۳۴۲ ۸-۵- قالب ها
- ۳۴۳ ۹-۵- مسير آينده برای روکش کاری ليزری
- ۳۴۳ ۱-۹-۵- روکش کاری ليزری در ابعاد ميكرومتر
- ۳۴۵ ۲-۹-۵- مواد نو ظهور

ل ♦ روکش کاری لیزری

۳۴۶ ۳-۷-۵- ساخت افزایشی

۳۴۹..... مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: هندسه جوش ۷
- شکل ۲-۱: انواع روش‌های روکش‌کاری ۸
- شکل ۳-۱: طرح‌واره‌ای از کلیات فرایند پاشش حرارتی ۱۲
- شکل ۴-۱: سازوکار قفل شدن مکانیکی پوشش‌های پاشش حرارتی روی سطح ۱۴
- شکل ۵-۱: پوشش حاصل از پاشش حرارتی روی یک سطح ناهموار ۱۵
- شکل ۶-۱: پوشش حاصل از پاشش حرارتی روی یک سطح ناهموار ۱۷
- شکل ۷-۱: طرح‌واره سامانه روکش‌کاری لیزری ۲۴
- شکل ۸-۱: طبقه‌بندی روش‌های ساخت افزایشی لیزری ۲۶
- شکل ۹-۱: اثر روش جوش‌کاری بر درجه آمیختگی ۳۴
- شکل ۱۰-۱: اثر آمیختگی بر ریز ساختار آلیاژ Fe-28Cr-4Mo-0.4Mn-4.6C ۳۶
- شکل ۱۱-۱: اثر فرایندهای جوش‌کاری بر ریز ساختار آلیاژ روکش‌کاری ERCoCr-A ۳۷
- شکل ۱-۲: عملیات رایج توسط لیزر ۴۹
- شکل ۲-۲: محدوده‌های مناسب از انرژی لیزر جهت عملیات مختلف لیزری ۵۰
- شکل ۳-۲: طرح‌واره فرایند دو مرحله‌ای روکش‌کاری لیزری ۵۷
- شکل ۴-۲: طرح‌واره فرایند تک مرحله‌ای روکش‌کاری لیزری ۵۷
- شکل ۵-۲: جابه‌جایی جبهه جلویی مذاب در اثر زمان واکنش در توان‌های لیزر متفاوت در حالی که شعاع پرتو لیزر ۱ میلی‌متر است ۶۰
- شکل ۶-۲: طرح‌واره فرایند تک مرحله‌ای روکش‌کاری لیزری با تزریق ماده پوشش ۶۱
- شکل ۷-۲: اثر سرعت فرایند و سرعت تغذیه خمیر روی کیفیت پوشش ۶۳

- شکل ۲-۸: تغذیه پودر آلیاژی به سطح زیرلایه با استفاده از نازل هم‌محور..... ۶۶
- شکل ۲-۹: روکش کاری لیزری به وسیله تغذیه با سیم..... ۶۷
- شکل ۲-۱۰: مجموعه‌های از تجهیزات روکش کاری لیزری..... ۶۹
- شکل ۲-۱۱: تصویر دستگاه روکش کاری شرکت TRUMPF..... ۶۹
- شکل ۲-۱۲: ارتباط بین بازتاب و طول موج پرتو برای دو ماده مختلف در دو محدوده مختلف طول موج..... ۷۱
- شکل ۲-۱۳: سطح مقطع‌های معمول ناحیه پوشش و زیرلایه که توسط لیزرهای CO₂ و HPDL ایجاد شده‌اند..... ۷۵
- شکل ۲-۱۴: توزیع ذرات و همچنین توزیع انرژی لیزر به صورت گوسی..... ۷۷
- شکل ۲-۱۵: طرح‌واره‌ای از سامانه تغذیه بر اساس گرانش..... ۷۹
- شکل ۲-۱۶: سامانه تغذیه پودر مبتنی بر گرانش با یک چرخ دوار دیسکی برای اندازه‌گیری..... ۸۰
- شکل ۲-۱۷: یک سامانه تغذیه پودر مبتنی بر گرانش با یک چرخ دوار استوان‌های برای اندازه‌گیری..... ۸۰
- شکل ۲-۱۸: سامانه تغذیه پودر مبتنی بر گرانش با یک چرخ دوار کروی..... ۸۱
- شکل ۲-۱۹: طرح‌واره‌ای از یک سامانه تغذیه پودر بر اساس مارپیچ انتقال مواد..... ۸۲
- شکل ۲-۲۰: یک سامانه ساده تغذیه پودر با استفاده از سیال کردن پودر..... ۸۳
- شکل ۲-۲۱: طرح‌واره‌ای از یک سامانه تغذیه لرزشی..... ۸۴
- شکل ۲-۲۲: اشکال مختلف نازل..... ۸۶
- شکل ۲-۲۳: الف) نازل پودر جانبی ب) جریان پودر گاز پ) نازل‌های جانبی با طراحی مستطیل شکل برای لایه‌های گسترده..... ۸۸
- شکل ۲-۲۴: نازل‌های متفاوت هم‌محور با نوک‌های متفاوت..... ۸۹
- شکل ۲-۲۵: الف) نازل تغذیه پودر هم‌محور به طور پیوسته نصب شده روی سامانه‌های نوری لیزر و ب) جریان گاز پودر..... ۹۰
- شکل ۲-۲۶: الف) نازل تزریق پودر ناپیوسته (سه راه) و ب) جریان گازی پودر..... ۹۲

فهرست شکل‌ها ♦ س

- شکل ۲-۲۷: دوش‌های گاز محافظ اضافه شده برای بهبود حفاظت از اکسیداسیون در طی
روکش‌کاری لیزری..... ۹۲
- شکل ۲-۲۸ (الف): سر نازل‌های روکش‌کاری داخلی با نازل تغذیه پودر و سامانه اپتیکی
یکپارچه و (ب) فرایند روکش‌کاری داخلی..... ۹۳
- شکل ۲-۲۹: درجات آزادی حرکت در فضای سه بعدی..... ۹۵
- شکل ۲-۳۰: نمونه‌ای از میزهای دو محوره..... ۹۶
- شکل ۲-۳۱: نمونه‌ای از میزهای سه محوره..... ۹۷
- شکل ۲-۳۲: سامانه موقعیت‌دهی سه محوره..... ۹۷
- شکل ۲-۳۳: مقایسه‌ای از میزهای سه و پنج محوره..... ۹۹
- شکل ۲-۳۴: مقایسه‌ای از میزهای سه و پنج محوره..... ۹۹
- شکل ۲-۳۵: نمونه‌ای از میزهای چهار محوره..... ۱۰۰
- شکل ۲-۳۶: سامانه موقعیت‌دهی پنج محور پیشرفته..... ۱۰۱
- شکل ۲-۳۷: سامانه موقعیت‌دهی رباتیک..... ۱۰۱
- شکل ۲-۳۸: طرح‌واره‌ای از سامانه بازخورد بسته..... ۱۰۲
- شکل ۲-۳۹ (الف): سر منقاری پره توربین پس از رسوب‌دهی و (ب) قابلیت‌های نرم‌افزار
دیدهبانی..... ۱۰۳
- شکل ۲-۴۰: تصویر پدیده‌های فیزیکی در طول روش‌های مختلف فراوری مواد توسط لیزر..... ۱۰۴
- شکل ۲-۴۱: تصویر پدیده‌های فیزیکی در طول فرایندهای مختلف فراوری مواد توسط لیزر..... ۱۰۵
- جدول ۲-۴- خصوصیات لایه روکش..... ۱۰۷
- شکل ۲-۴۲ (الف): طرح‌واره فرایند روکش‌کاری لیزری، (ب) سطح مقطع روکش استلایت
روی یک زیرلایه فولادی..... ۱۰۸
- شکل ۲-۴۳: ساختار پوشش ایجاد شده با فرایند روکش‌کاری لیزری نشان‌دهنده سطح مقطع
۳ نوار تکی روکش دارای هم‌پوشانی جزئی..... ۱۰۹
- شکل ۲-۴۴ (الف): طرح‌واره و (ب) نمونه واقعی از سطح مقطع یک نوار پوشش ایجاد با
روکش‌کاری لیزری..... ۱۰۹

ع ♦ روکش کاری لیزری

- شکل ۲-۴۵: سطح مقطع‌های روکش کاری لیزری با زاویه ترشوندگی و انرژی‌های آزاد سطحی مربوطه..... ۱۱۲
- شکل ۲-۴۶: پدیده گلوله‌ای شدن در طی فرایند روکش کاری لیزری پودر Cu-30CuSn-10CuP ۱۱۷
- شکل ۲-۴۷: نمودار توزیع سختی در فرایندهای مختلف روکش کاری آلیاژ پایه کبالت ۱۲۰
- شکل ۲-۴۸: الف) تصویر میکروسکوپی نوری سطح مقطع روکش WC-Co روکش کاری شده با لیزر و ب) نمودار توزیع سختی تصویر الف..... ۱۲۱
- شکل ۲-۴۹: ساختارهای منجمد شده مختلف لایه‌های روکش کاری لیزری؛..... ۱۲۳
- الف) ساختار دندرتی آلیاژ استلایت ۲۱..... ۱۲۴
- شکل ۲-۵۰: تصویر میکروسکوپی الکترونی سطح مقطع عرضی پوشش کامپوزیتی CoWSi/WSi_2 حاصل از روکش کاری لیزری..... ۱۲۵
- شکل ۲-۵۱: تصویر حفرة گازی در روکش کاربید تنگستن-کبالت در فرایند روکش کاری لیزری..... ۱۲۶
- شکل ۲-۵۲: طرح‌واره‌ای از ذوب ناقص یا تخلخل بین اجزا..... ۱۲۸
- شکل ۲-۵۳: نمونه‌ای از انواع ترک‌های ایجاد شده در روکش کاری لیزری ترکیب Co-Cr-Mo بر آلیاژ TiAl با توان 350W ، سرعت روبش 7mm/s و نرخ پاشش پودر 200mg/s ۱۳۱
- شکل ۳-۱: متغیرها در روکش فلزی لیزر با تزریق پودر..... ۱۳۶
- شکل ۳-۲: طرح‌واره بازتاب پرتو برخوردی..... ۱۳۸
- شکل ۳-۳: بازتاب‌پذیری بر حسب زاویه برخورد برای یک نارسانا..... ۱۳۹
- شکل ۳-۴: بازتاب‌پذیری بر حسب زاویه برخورد برای فلزات..... ۱۴۲
- شکل ۳-۵: تغییرات بازتاب با طول موج برای مواد مختلف (طول موج دولیزر مهم CO_2 و Nd:YAG) در شکل رسم شده است)..... ۱۴۵
- شکل ۳-۶: تغییرات بازتاب با دما برای تابش $106\mu\text{m}$ ۱۴۶
- شکل ۳-۷: لایه سطحی به عنوان یک تداخل جفت شده (پوشش‌های ضدانعکاسی)..... ۱۴۷
- شکل ۳-۸: جذب برحسب ضخامت یک لایه اکسیدی روی فولاد برای تابش $106\mu\text{m}$ ۱۴۷

فهرست شکل‌ها ♦ ف

- شکل ۳-۹: نیروهای رانش جابه‌جایی حوضچه جوش ۱۵۲
- شکل ۳-۱۰: طرح‌واره انتقال حرارت حوضچه مذاب در طول ذوب لیزری برای $d\sigma/dT < 0$... ۱۵۵
- الف) مقطع طولی حوضچه مذاب، ب) مقطع حوضچه مذاب ۱۵۵
- شکل ۳-۱۱: مقادیر کشش سطحی در فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با درصد‌های گوگرد متفاوت. ۱۵۷
- شکل ۳-۱۲: جوش‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با لیزر YAG ۱۵۸
- شکل ۳-۱۳: مدل هیپل جابه‌جایی مارانگونی در حوضچه مذاب ۱۵۸
- شکل ۳-۱۴: طرح‌واره ریخت‌شناسی انجماد بر حسب تابعی از نرخ انجماد و گرادیان دمایی ... ۱۵۹
- شکل ۳-۱۵: طرح‌واره ایجاد انجماد صفحه‌ای؛ هنگامی که دمای واقعی مذاب از دمای انجماد بیش‌تر است، هیچ برآمدگی روی فصل مشترک جامد-مذاب رشد نکرده و در نتیجه فصل مشترک صاف باقی می‌ماند ۱۶۰
- شکل ۳-۱۶: تحت انجماد ترکیبی ۱۶۲
- شکل ۳-۱۷: تاثیر تحت انجماد ترکیبی بر حالت انجماد ۱۶۴
- شکل ۳-۱۸: تاثیر سرعت سرمایش یا زمان انجماد بر فاصله بازوهای دندریته ۱۶۵
- شکل ۳-۱۹: طرح‌واره رشد دندریته‌ها در یک آلیاژ در یک موقعیت ثابت و در مراحل مختلف انجماد، توجه شود که بازوهای کوچک‌تر از بین رفته و بازوهای درشت‌تر رشد می‌کنند ۱۶۶
- شکل ۳-۲۰: تاثیر GR بر فاصله سلولی آلیاژهای Sn-Pb ۱۶۷
- شکل ۳-۲۱: تاثیر گرادیان دمایی (G) و نرخ رشد (R) بر ریخت‌شناسی و اندازه ریزساختار حاصل از انجماد ۱۶۸
- شکل ۳-۲۲: اصلاح دانه‌های آلیاژ AlSi10Mg بعد از ذوب سطحی لیزر با توان یک کیلو وات و قطر پرتو یک میلی‌متر ۱۶۹
- شکل ۳-۲۳: تغییرات ارتفاع روکش تک‌پاس بر حسب نرخ تغذیه پودر برای توان‌ها و نرخ روبش‌های لیزری مختلف مربوط به روکش‌کاری لیزری ترکیب Co-Cr-Mo بر آلیاژ TiAl ۱۷۵
- شکل ۳-۲۴: تغییرات ارتفاع گرده روکش تک‌پاس بر حسب پارامتر ترکیبی $FS^{5/4}$ مربوط به روکش‌کاری لیزری ترکیب Co-Cr-Mo بر آلیاژ TiAl ۱۷۷

- شکل ۳-۲۵: سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده برای روکش کاری لیزری هم‌محور پودر پایه نیکل روی زیرلایه فولاد C45. پارامتر ترکیبی F / S در محور افقی مقدار مواد تغذیه در واحد طول را مشخص می‌کند و توان لیزر روی محور عمودی ۱۷۸
- شکل ۳-۲۶: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده‌شده برای روکش کاری لیزری ترکیب Co-Cr-Mo بر زیرلایه آلومینایدتیتانیوم در توان‌های ثابت. . ۱۸۰
- شکل ۳-۲۷: تصویر سطح مقطع نمونه در توان ۲۵۰W، روبش لیزری ۴mm/s و نرخ پاشش پودر ۳۵۰mg/s مربوط به روکش کاری لیزری ترکیب Co-Cr-Mo بر آلیاژ TiAl ۱۸۳
- شکل ۳-۲۸: تغییرات پهنای روکش تک‌پاس بر حسب توان لیزر برای نرخ پاشش پودر و نرخ روبش‌های لیزری مختلف مربوط به روکش کاری لیزری ترکیب Co-Cr-Mo بر آلیاژ TiAl ... ۱۸۴
- شکل ۳-۲۹: تغییرات پهنای روکش تک‌پاس بر حسب پارامتر ترکیبی $PS^{-2/3}$ مربوط به روکش کاری لیزری ترکیب Co-Cr-Mo بر آلیاژ TiAl ۱۸۷
- شکل ۳-۳۰: تغییرات عمق نفوذ اثر تک‌پاس بر حسب پارامتر ترکیبی $P^2S^{-1/4}F^{1/4}$ ۱۸۸
- شکل ۳-۳۱: تغییرات آمیختگی تک‌پاس بر حسب پارامتر ترکیبی $P^{2/3}S^{-1/2}F^{-1/2}$ ۱۸۹
- شکل ۳-۳۲: تغییرات زاویه ترشوندگی بر حسب پارامتر ترکیبی $P^{1/4}S^{1/2}F^{-1/2}$ ۱۹۲
- شکل ۳-۳۳: نقشه‌های پارامترهای فرایند برای نمونه‌های تک‌پاس الف) در روکش کاری لیزری پودر Co-Cr-Mo روی زیرلایه آلومینایدتیتانیوم ۱۹۶
- شکل ۳-۳۴: طرح‌واره‌ای از ناحیه موثر لایه‌نشانی که به وسیله پالس‌های مکرر لیزر تولید شده است ۱۹۸
- شکل ۳-۳۵: ارتباط بین انرژی موثر و چگالی پودر موثر برای پودر Fe-Al روی زیرلایه فولاد ساده کربنی. ۱۹۹
- شکل ۴-۱: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از صفحات مارتنزیتی ۲۳۴
- شکل ۴-۲: تصویر میکروسکوپی نوری از لایه‌های بالای نمونه ۲۳۴
- شکل ۴-۳: نمودار توزیع سختی در فرایندهای مختلف روکش کاری آلیاژ پایه کبالت ۲۳۵
- شکل ۴-۴: سطح مقطع عرضی از پوشش پودر پایه کبالتی ۲۳۷
- شکل ۴-۵: سطح مقطع عرضی از فصل مشترک پودر پایه کبالتی ۲۳۷

فهرست شکل‌ها ♦ ق

- شکل ۴-۶: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از منطقه متأثر از حرارت پودر پایه کبالتی
(الف) انرژی بالا (ب) انرژی پایین. ۲۳۸
- شکل ۴-۷: توزیع سختی پس از روکش کاری پودر پایه کبالتی. ۲۳۸
- شکل ۴-۸: ریزساختار از مقطع عرضی نمونه (الف) روکش کاری لیزری (ب) پاشش پلاسمایی. ۲۳۹
- شکل ۴-۹: تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری از نمونه روکش کاری لیزری با پودر استلایت. ۲۴۰
- شکل ۴-۱۰: نمودار توزیع سختی در نمونه‌های لیزری و پاشش پلاسمایی مونه روکش کاری لیزری با پودر استلایت. ۲۴۱
- شکل ۴-۱۱: مقطع عرضی از نمونه پس از روکش کاری پودر استلایت ۶. ۲۴۲
- شکل ۴-۱۲: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی. ۲۴۳
- شکل ۴-۱۳: تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری روکش استلایت ۶. ۲۴۳
- شکل ۴-۱۴: نمودار توزیع سختی پس از روکش کاری لیزری پودر استلایت ۶. ۲۴۴
- شکل ۴-۱۵: نمودار کاهش وزن سطح ساینده پس از روکش کاری لیزری پودر استلایت ۶. ۲۴۵
- شکل ۴-۱۶: تصویر سطح مقطع عرضی از نمونه فولاد زنگ‌نزن. ۲۴۶
- شکل ۴-۱۷: (الف) تصویر سطح مقطع عرضی از روکش‌های هم‌پوشانی شده و منطقه متأثر از حرارت (ب) تصویر از بالا. ۲۴۷
- شکل ۴-۱۸: اثر نرخ تغذیه پودر روی آمیختگی و ارتفاع پوشش. ۲۴۸
- شکل ۴-۱۹: تصویر از سطح مقطع عرضی نمونه در بزرگ‌نمایی پایین. ۲۴۸
- شکل ۴-۲۰: تصویر شکل ۴-۱۹ در بزرگ‌نمایی بالا. ۲۴۹
- شکل ۴-۲۱: طرح‌واره از ساختار چندلایه با استفاده از پوشش استلایت ۶. ۲۵۰
- شکل ۴-۲۲: ریزساختار ایجاد شده پس از انجماد. ۲۵۱
- شکل ۴-۲۳: ریزساختار مناطق بین‌دندریتی. ۲۵۲
- شکل ۴-۲۴: ارتباط بین شکل پوشش و درصد حجمی کاربرد تنگستن. ۲۵۳
- شکل ۴-۲۵: تصویر سطح مقطع عرضی از پوشش استلایت همراه. ۲۵۴

ر ♦ روکش کاری لیزری

- شکل ۴-۲۶: نمودار تعداد ترک برحسب درصد کاربید تنگستن ۲۵۵
- شکل ۴-۲۷: تصویر ساختار هیپویوتکتیک ایجاد شده ۲۵۶
- شکل ۴-۲۸: تصویر ساختار هایپر یوتکتیک ۲۵۶
- شکل ۴-۲۹: توزیع سختی در پوشش استلایت ۶ با مقادیر مختلف کاربید تنگستن ۲۵۶
- شکل ۴-۳۰: ارتباط بین وزن کاهنده و درصد حجمی کاربید تنگستن ۲۵۷
- شکل ۴-۳۱: نمونه روکش کاری لیزری با استفاده از نازل هم‌محور ۲۵۹
- شکل ۴-۳۲: ریزساختار پس از روکش کاری پودر استلایت ۲۱ با نازل هم‌محور ۲۵۹
- شکل ۴-۳۳: آنالیز طیف سنجی تفرق انرژی پس از روکش کاری پودر استلایت ۲۱ با نازل هم‌محور ۲۵۹
- شکل ۴-۳۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات ذوب نشده پس از روکش کاری پودر استلایت ۲۱ با نازل هم‌محور ۲۶۰
- شکل ۴-۳۵: ریزساختار پس از روکش کاری پودر استلایت ۲۱ با نازل غیر هم‌محور ۲۶۰
- شکل ۴-۳۶: الگوی پراش پرتو ایکس ۲۶۲
- شکل ۴-۳۷: جوانه‌زنی ترک در روکش کاری اینکونل ۷۳۸ روی سوپر آلیاژ پایه نیکل DS در تحقیق انجام شده توسط ژونگ و همکارانش ۲۶۴
- شکل ۴-۳۸: ریخت‌شناسی ترک و ب) سطح شکست در تحقیق انجام شده توسط ژونگ و همکارانش ۲۶۵
- شکل ۴-۳۹: مقطع عرضی روکش تک پاس ایجاد شده ۲۶۶
- شکل ۴-۴۰: تصویر میکروسکوپی نوری مقطع عرضی روکش ۱۰ لایه ایجاد شده روی زیرلایه در تحقیق انجام شده توسط سانتوس و همکارانش ۲۶۸
- شکل ۴-۴۱: تشکیل دانه‌های سرگردان ۲۶۸
- شکل ۴-۴۲: الف) روکش کاری لیزری Rene 142 روی Rene 125، ب) جوش کاری TIG آلیاژ Rene 142 روی Rene 125 ۲۷۰
- شکل ۴-۴۳: نمودار استحکام کششی و سختی در مقابل دمای تمپر ۲۷۲
- شکل ۴-۴۴: توزیع سختی در منطقه ذوب لیزری ۲۷۲

فهرست شکل‌ها ♦ ش

- شکل ۴-۴۵: طرح‌واره تجهیزات آزمایشگاهی و نمونه‌های مورد تعمیر با فرایند روکش کاری لیزری ۲۷۴
- شکل ۴-۴۶: تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار منطقه ذوب (برش عرضی) ۲۷۴
- شکل ۴-۴۷: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختار منطقه روکش کاری (برش عرضی) ۲۷۴
- شکل ۴-۴۸: تصاویر مقاطع عرضی از نمونه‌ها در سرعت روبش 3 mm/s ۲۷۵
- شکل ۴-۴۹: نمونه الف) شیار V شکل، ب) شیار U شکل و پ) شیار U شکل با زاویه در دیواره‌ها ۲۷۷
- شکل ۴-۵۰: تصاویر میکروسکوپی نوری از مقاطع عرضی فولاد زنگ‌نزن ۲۷۷
- شکل ۴-۵۱: فولاد زنگ‌نزن 17-4 PH تعمیر شده با فرایند روکش کاری لیزری ۲۷۸
- شکل ۴-۵۲: ریزساختار روکش کاری فولاد زنگ‌نزن 17-4 PH ۲۷۹
- شکل ۴-۵۳: ریزساختار روکش لیزری فولاد زنگ‌نزن 17-4PH ۲۸۰
- الف) قسمت پایینی، ب) قسمت میانی، پ) قسمت بالایی ۲۸۰
- شکل ۴-۵۴: تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری و نتایج EDS رسوب ناناندازه در شبکه‌های مارتنزیت در منطقه روکش شده ۲۸۰
- شکل ۴-۵۵: منطقه تحت تأثیر حرارت در لایه ایجاد شده ۲۸۱
- الف) محدوده روکش کاری شده، ب) فصل مشترک زیرلایه و لایه، پ) زیرلایه ۲۸۱
- شکل ۴-۵۶: ریزساختار زیرلایه فولاد زنگ‌نزن 17-4PH ۲۸۲
- شکل ۴-۵۷: توزیع ریزسختی در نمونه‌های تعمیر شده فولاد زنگ‌نزن 17-4PH با نسبت‌های تعمیر ۲۸۴
- شکل ۴-۵۸: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از منطقه روکش شده فولاد AISI 4340 با پودر فولاد هم‌جنس ۲۸۶
- شکل ۴-۵۹: تصاویر ریزساختار از HAZ در روکش کاری لیزری فولاد AISI 4340 ۲۸۷
- شکل ۴-۶۰: مقطع عرضی لایه سرامیکی ZrO_2 روی فولاد 16MnCr5 به همراه آستری ۲۸۹
- شکل ۴-۶۱: ریزساختار لایه سرامیکی روکش کاری لیزری شده ۲۹۰

ت ♦ روکش کاری لیزری

- شکل ۴-۶۲: ریخت شناسی ترک‌های سطحی (الف) ترک‌های عمدتاً عمودی بر جهت رویش سطح (ب) ترک‌های بسیار کم موازی با جهت روکش کاری سطحی لیزری ۲۹۱
- شکل ۴-۶۳: ریخت شناسی ترک‌های عرضی در مقطع عرضی نمونه‌ها، نشان‌دهنده جوانه‌زنی و رشد ترک‌ها در (الف) نزدیک فصل مشترک (ب) لایه سرامیکی ۲۹۱
- شکل ۴-۶۴: ریخت شناسی ترک‌های عمودی در مقطع عرضی نمونه‌ها نشان‌دهنده جوانه‌زنی و رشد ترک‌ها در (الف) نزدیک فصل مشترک (ب) لایه سرامیکی ۲۹۲
- شکل ۴-۶۵: نتایج آزمون پراش پرتو ایکس ۲۹۳
- شکل ۴-۶۶: ریخت شناسی مقطع عرضی پوشش روکش کاری لیزری شده ۲۹۵
- شکل ۴-۶۷: توزیع خطی عناصر در ناحیه مرزی ۲۹۶
- شکل ۴-۶۸: ریزساختار فصل مشترک در پوشش روکش کاری لیزری شده ۲۹۷
- شکل ۴-۶۹: مقایسه بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری تغییرات وزن نمونه‌های اینکونل پوشش داده شده در آزمون اکسیداسیون سیکلی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ۲۹۸
- شکل ۴-۷۰: تشکیل لایه اکسیدی در فصل مشترک پوشش و لایه میانی ۲۹۹
- شکل ۴-۷۱: مقایسه بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری تغییرات وزن نمونه‌های اینکونل پوشش داده شده در آزمون خوردگی داغ در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد ۳۰۰
- شکل ۴-۷۲: مقایسه بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری تغییرات وزن نمونه‌های اینکونل پوشش داده شده در آزمون خوردگی داغ در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد ۳۰۱
- شکل ۴-۷۳: تأثیر سرعت روبش بر سختی لایه YPSZ ۳۰۳
- شکل ۵-۱: کاربرد روکش کاری لیزری در صنایع و قطعات مختلف به منظور تعمیر و سخت کاری قطعات نو ۳۰۹
- شکل ۵-۲: (الف) تصویر ارابه اصلی فرود هواپیما و (ب) تصویر هواپیمای مسافربری و نمایش ارابه‌های فرود دماغه و اصلی ۳۱۳
- شکل ۵-۳: تصویر پیستون جاذب ضربه ارابه فرود جت که عملیات تحت عملیات روکش کاری قرار گرفته است ۳۱۵

فهرست شکل‌ها ♦ ث

- شکل ۴-۵: تصویر محور هوافضایی آسیب دیده ناشی از خوردگی تعمیر شده با روکش کاری لیزری ۳۱۵
- شکل ۵-۵: مصرف سوپرآلیاژها در صنایع مختلف ۳۱۶
- شکل ۶-۵: طرح‌واره‌ای از موتور شرکت رولز رویس به کار رفته در هواپیمای بویینگ [۱۷۸] ۳۱۷
- شکل ۷-۵: الف) انواع پره‌های متحرک توربین، ب) پره ثابت توربین، پ و ت) پره‌های کمپرسور، ث) لاینر (محفظه احتراق). ج) نازل سوخت پاش ۳۱۸
- شکل ۸-۵: الف) پوشش‌دهی پره توربین، ب) پره پوشش داده شده، پ) پره جوش داده شده به روش TIG ۳۱۹
- شکل ۹-۵: به وسیله روکش کاری لیزری آلیاژ لحیم‌کاری برای تعمیر سطح ساییده شده حفره‌های خنک‌کننده در پره‌های توربین استفاده می‌شود ۳۲۰
- شکل ۱۰-۵: تعمیر چرخ توربین با فلز مشابه به وسیله روکش کاری لیزری ۳۲۰
- شکل ۱۱-۵: محفظه آینه در هوا فضا، ساخته شده توسط رسوب مستقیم لیزر ۳۲۱
- شکل ۱۲-۵: بلیسک تعمیر شده توسط شرکت رولز رویس با استفاده از روکش کاری لیزری با استفاده از پودر تیتانیوم ۳۲۳
- شکل ۱۳-۵: قطعات مختلف هوافضایی تعمیر شده توسط شرکت هافمن به وسیله روکش کاری لیزری ۳۲۳
- شکل ۱۴-۵: الف) شیر دروازه‌های روکش کاری لیزری شده و ب) ریزساختار لایه روکش با فریت (آبی) و آستنیت (خاکستری) ۳۲۵
- شکل ۱۵-۵: الف) آب‌بند چرخشی تعمیر شده در صفحه خنک‌کننده برای یک توربین گازی (آلیاژ پایه نیکل)، ب) بزرگ‌نمایی بالاتر تصویر الف؛ لایه‌های چندگانه با عرض ۰/۶ میلی‌متر استفاده شده است ۳۲۶
- شکل ۱۶-۵: روکش کاری تیغه توربین بخار با استفاده از پودر استالایت به منظور بهبود مقاومت در برابر فرسایش توسط قطرات آب ۳۲۶

خ ♦ روکش کاری لیزری

- شکل ۵-۱۷: روکش کاری لیزری با استفاده از پودر اینکونل ۷۳۸ در منطقه تحت تنش بالای
پره اینکونل ۷۳۸ مرحله اول ۳۲۷
- شکل ۵-۱۸: بازسازی نوک پره به وسیله از فرایند روکش کاری لیزری با پودر اینکونل ۷۳۸. ۳۲۷
- شکل ۵-۱۹: تعمیر و بازسازی نوک پره به اندازه‌ی ۶ میلی‌متر با استفاده از پودر متکوکلد
۶۳۵ روی اینکونل ۷۳۸ ۳۲۸
- شکل ۵-۲۰: الف) فرایند روکش کاری لیزری یک تیوب دیگ بخار، ب) تیوب روکش کاری
لیزری شده، پ) بزرگ‌نمایی ناحیه خمش تیوب روکش کاری شده، ت و ث) تصویر
میکروسکوپی تیوب فولادی A۲۱۰ روکش کاری شده با پودر آلیاژی اینکونل ۶۲۲ و فولاد
زنگ‌نزن ۳۰۹L ۳۲۹
- شکل ۵-۲۱: الف) تعمیر شکاف رینگ اول پیستون چدنی موتورهای دیزلی به وسیله
روکش کاری لیزری با استفاده از پودر استلایت، ب و پ) تصویر میکروسکوپی بعد از
روکش کاری و ماشین‌کاری ۳۳۰
- شکل ۵-۲۲: روکش کاری لیزری سوپاپ با پودر آلیاژی پایه کبالت ۳۳۰
- شکل ۵-۲۳: روکش کاری لیزری داخل سیلندر آلیاژ آلومینیوم با سیلسیم ۳۳۱
- شکل ۵-۲۴: روکش کاری سطح میل بادامک توسط شرکت ترامپف ۳۳۲
- شکل ۵-۲۵: تصویر محور توربو شارژر؛ الف) سایش یافته، ب) بعد از عملیات روکش کاری
لیزری، پ) بعد از ماشین‌کاری ۳۳۳
- شکل ۵-۲۶: تصویر میل گاردان ۳۳۴
- شکل ۵-۲۷: محور کمپرسور در حال تعمیر با روکش کاری لیزری با استفاده از پودر اینکونل
۶۲۵ ۳۳۶
- شکل ۵-۲۸: مراحل تعمیر محور کمپرسور گریز از مرکز از مرحله در حال سرویس تا
ماشین‌کاری ۳۳۷
- شکل ۵-۲۹: ماشین ساخت خمیر مد اسکرین شرکت آلستروم؛ روتور با پره‌ها در مرکز مقطع
برش خورده نشان داده شده است ۳۳۸
- شکل ۵-۳۰: پره‌های روتور روکش کاری شده با پودر استلایت از ماشین خمیرسازی ۳۴۰

فهرست شکل‌ها ♦ ذ

- شکل ۳۱-۵: مرمت و بازسازی محور سانتریفیوژ ۳۴۱
- شکل ۳۲-۵: تعمیر قطعات دارای چرخ دنده با روکش کاری لیزری ۳۴۱
- شکل ۳۳-۵: ناحیه تعمیر شده قالب لامپ فرسایش یافته ۳۴۲
- شکل ۳۴-۵: اصلاح ابعاد یک قالب تزریق برای لامپ خودرو (ماده: فولاد کار گرم) ۳۴۳
- شکل ۳۵-۵: افزایش دید پرتو ایکس با روکش کاری لیزری تانتالوم روی استنت‌های نایتینول ... ۳۴۴
- شکل ۳۶-۵: روکش کاری انتخابی لیزری اتصالات طلا روی سوئیچ‌های فولاد زنگ‌نزن ... ۳۴۵
- شکل ۳۷-۵: روکش کاری لیزری اتصالات طلا بر یک صفحه دو قطبی برای سلول‌های سوختی ۳۴۵
- شکل ۳۸-۵: الف) لایه مدرج پایه فولاد روی زیرلایه مسی؛ ب) کاربرد بالقوه: ابزار فرورونده برای قالب تزریقی ۳۴۶
- شکل ۳۹-۵: ساخت افزایشی پره‌ها روی یک محور ۳۴۷
- شکل ۴۰-۵: قالب‌های ساخته شده توسط فرایند رسوب فلز مستقیم بر اساس روکش کاری لیزری ۳۴۷

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- مزایا و معایب فرآیندهای مختلف روکش کاری با فرایندهای جوش کاری ۱۱
- جدول ۲-۱- مزایا و معایب فرآیندهای مختلف پوشش‌دهی پاشش حرارتی ۱۹
- جدول ۳-۱- مقایسه فرآیندهای مختلف پوشش‌دهی پاشش حرارتی ۲۱
- جدول ۴-۱- مقایسه بین روکش کاری لیزری و دیگر روش‌های پوشش‌دهی فلزی ۲۸
- جدول ۵-۱- مقایسه بین روش روکش کاری لیزری و دیگر روش‌های نمونه‌سازی ۳۰
- جدول ۶-۱- آلیاژهای رایج روکش کاری ۴۲
- جدول ۱-۲- ویژگی‌های لیزرهای رایج استفاده شده در روکش کاری لیزری ۷۳
- جدول ۲-۲- انواع سامانه‌های تغذیه پودر استفاده شده در سازمان‌ها و مراکز پژوهشی در روکش کاری لیزری ۸۵
- جدول ۳-۲- زمینه‌های کاربردی برای نازل‌های مختلف تغذیه پودر ۹۳
- جدول ۱-۳- ضرایب شکست و بازتاب برای مواد مختلف طی تابش $106 \mu\text{m}$ ۱۴۲
- جدول ۲-۳- ضرایب شکست و زاویه بروستر برای مواد مختلف ۱۴۳
- جدول ۳-۳- مقادیر نوعی بازتاب برای سطوح مختلف برای تابش $106 \mu\text{m}$ در زاویه برخوردی عمود ۱۴۹
- جدول ۴-۳- بیشینه سرعت در جوش کاری GTAW در نیروهای رانش مختلف ۱۵۵
- جدول ۵-۳- بررسی سازگاری مواد پوشش مختلف به منظور روکش کاری لیزری روی انواع زیرلایه‌ها ۱۷۱
- جدول ۱-۴- آلیاژهای رایج مورد استفاده در روکش کاری لیزری ۲۰۴
- جدول ۲-۴- عمده عناصر استفاده شده در سوپرآلیاژها ۲۱۷
- جدول ۳-۴- ترکیب پودر پایه کبالت ۲۳۶

ظ ♦ روکش کاری لیزری

- جدول ۴-۴: پارامترهای روکش کاری لیزری استفاده شده در فرایند روکش کاری HPDL
غیر هم محور و چند سامانه تغذیه..... ۲۵۸
- جدول ۴-۵: پارامترهای فرایند روکش کاری لیزری فولاد 17-4PH..... ۲۷۸
- جدول ۴-۶: پارامترهای مورد استفاده در روکش کاری لیزری فولاد AISI 4340..... ۲۸۵
- جدول ۴-۷: ترکیب شیمیایی مواد اولیه مورد استفاده برای روکش کاری فولاد FV520B به
همراه ترکیب فولاد بر اساس درصد وزنی..... ۲۸۷
- جدول ۴-۸: مشخصات مخلوط پودری مورد استفاده..... ۲۹۴
- جدول ۵-۱: کاربردهای صنعتی روکش کاری لیزری و رسوب دهی فلزی..... ۳۱۰
- جدول ۵-۲: مواد روکش کاری برای مواد پایه مختلف مورد استفاده در کاربردهای هوافضا.. ۳۲۱

فصل نخست

مبانی روکش کاری

روکش کاری لیزری

فصل نخست: مبانی روکش کاری

۱-۱- مقدمه

به رسوبدهی یک ماده روی سطح قطعه کار برای به دست آوردن خواص یا ابعاد مورد نظر عملیات پوشش‌دهی گویند که به طور معمول به منظور افزایش عمر کاری قطعه یا جایگزینی فلزی (که فرسوده یا خورده شده است) به کار می‌رود. عملیات سطحی می‌تواند موجب افزایش مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش، کاهش ضریب اصطکاک و چقرمگی در محل مورد نظر گردد. برخی از پوشش‌ها توسط فرایندهای جوش‌کاری گازی یا قوسی، پاشش‌دهی حرارتی و لیزر رسوب داده می‌شوند و روش‌های دستی، نیمه‌خودکار یا خودکار را می‌توان برای هر یک از فرایندها به کار برد. مواد پرکننده مناسب در شکل‌ها و انواع گوناگون نظیر الکتروود پوشش‌دار، خمیر، سیم و پودر موجود می‌باشد. چسبندگی این مواد روی فلزات پایه از طریق پیوندهای متالورژیکی، پیوندهای مکانیکی و پیوند فیزیکی صورت می‌گیرد. پیوند مکانیکی ناشی از برخورد و نشست ذرات پودر مذاب در ناصافی‌های سطح است و به زبری سطح بستگی دارد؛ پیوندهای متالورژیکی به دلیل تشکیل یک ناحیه نفوذ یا به وجود آمدن یک ترکیب میانی بین فلز پایه و ماده پوششی است و تابعی از درجه حرارت خواهد بود و پیوند فیزیکی حاصل نیروهای ثانویه (واندوالس) بین ماده پوشش و فلز پایه می‌باشد. به طور کلی از جمله خواص مهم آلیاژی که جهت پوشش‌دهی به کار می‌روند، می‌توان به سختی، مقاومت به سایش، مقاومت به ضربه،

مقاومت حرارتی (مانند مقاومت به خزش، مقاومت در برابر اکسیداسیون یا خوردگی داغ)، مقاومت در برابر خوردگی و خواص اصطکاکی اشاره نمود [۱-۴].

مهم‌ترین مزایای پوشش‌دهی عبارتند از:

- الف) افزایش مقاومت به سایش و خوردگی در محل مورد نیاز؛
- ب) استفاده آسان از ترکیبات خیلی سخت و آلیاژهای مقاوم به سایش؛
- پ) سهولت کاربرد در محل؛
- ت) استفاده اقتصادی از عناصر آلیاژی گران‌قیمت؛
- ث) اقتصادی بودن به دلیل عمر کارکرد بیشتر، کاهش هزینه نگهداری و تعویض، بازیابی قطعات فرسوده، استفاده از مواد پایه ارزان قیمت‌تر، مصرف کمتر انرژی در هنگام کار و افزایش بازدهی قطعه در بیش‌تر موارد [۱-۳].

عملیات پوشش‌دهی را می‌توان به سه گروه به شرح زیر تقسیم‌بندی نمود:

الف) پر کردن (بازسازی)^۱

در این روش با افزودن فلز جوش به سطح فلز پایه، قطعاتی را که نیاز به بازسازی ابعادی دارند، می‌توان تعمیر نمود. همچنین می‌توان به منظور بزرگ‌تر کردن یا پر کردن سطح قطعه از این روش استفاده کرد. در فرایند بازسازی، خواص لایه رسوب داده شده اغلب مشابه با خواص فلز قطعه کار می‌باشد [۲ و ۳].

ب) لایه نشانی^۲

لایه نشانی نیز به منظور افزودن یک یا چند لایه از فلز جوش به سطح اتصال یا سطوحی که جوش کاری می‌شوند، انجام می‌گیرد. این روش بر خلاف روش

^۱ Build up

^۲ Battering

بازسازی، جهت بزرگ کردن ابعاد انجام نمی‌شود، بلکه به دلایل متالورژیکی صورت می‌گیرد. به عنوان مثال گاهی به منظور جوش کاری دو قطعه غیر مشابه، ابتدا باید روی لبه‌های اتصال، توسط چند نوع الکتروود، لایه‌هایی از رسوب ایجاد شود تا ترکیب شیمیایی و خواص دیگر دو لبه به یکدیگر نزدیک شود، سپس عملیات اتصال انجام گیرد. با روش‌های مختلف جوش کاری لایه‌های مورد نظر را می‌توان رسوب داد، اما باید توجه داشت تا حد امکان عمق نفوذ و میزان آمیختگی^۱ کم باشد [۲ و ۳].

پ) روکش کاری^۲ و رویه سختی^۳

روکش کاری عبارت است از یک لایه نسبتاً ضخیم فلز پرکننده که روی فلز پایه قرار می‌گیرد و سبب افزایش مقاومت سطحی قطعه در برابر خوردگی می‌شود. این فرایند معمولاً توسط روش‌های قوسی مانند جوش کاری زیر پودری، جوش کاری الکتروود دستی، جوش کاری قوسی تحت گاز محافظ و لیزر انجام می‌گیرد، هر چند فرایندهای جوش کاری حالت جامد نظیر روکش‌دهی انفجاری و روکش‌دهی غلطکی نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

فرایندهای رویه‌سختی به گروهی از فرایندها اطلاق می‌شود که در آنها با به کار بردن مواد مقاوم به سایش و سخت روی سطح یک قطعه، از بین رفتن مواد در اثر عوامل مختلفی چون سایش، ضربه، فرسایش، خوردگی سایشی، خستگی حرارتی کاهش پیدا می‌کند. رویه‌سختی یک قطعه می‌تواند توسط روش‌هایی چون فرایندهای جوش کاری، پاشش‌دهی حرارتی و لیزر انجام شود و با استفاده از عملیات حرارتی یا فرایندهای اصلاح سطح مانند سخت کاری شعله‌ای یا نیتروژن‌دهی نمی‌توان یک قطعه

¹ Dilution

² Cladding

³ Hardfacing

را رویه‌سختی کرد. اگرچه هدف اصلی به کارگیری اکثر مواد رویه‌سختی کاهش سایش است، اما با توجه به این که سازوکارهایی چون خوردگی و پوسته شدن سطح فلز در دماهای بالا، تأثیر به‌سزایی بر سرعت سایش قطعه دارد، از این‌رو در این موارد، انتخاب ماده مناسب رویه‌سختی، بر اساس شدت این سازوکارها صورت می‌گیرد [۱-۳].

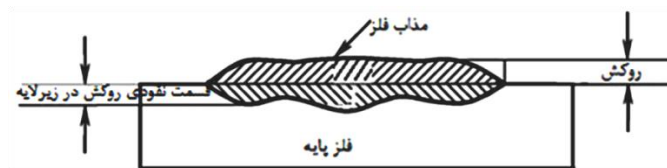
کاربردهای رویه‌سختی، به منظور کنترل سایش با توجه به نوع سازوکار سایش، به طور گسترده‌ای تغییر می‌کند. محدوده این کاربردها از سایش بسیار شدید در ابزار برش، ابزار حفاری، چرخ‌های آسیاب تا سایش فلزات روان‌کاری نشده یا به طور جزئی روان‌کاری شده روی هم، نظیر شیرهای کنترل و یاتاقان‌ها تغییر می‌کند. فرایند رویه‌سختی را هم‌چنین می‌توان به منظور کنترل سایش و خوردگی هم‌زمان به عنوان مثال در شیرها و پمپ‌هایی که در معرض مایعات خوردنده قرار دارند، به کار برد.

در بسیاری از منابع، رویه‌سختی و روکش‌کاری در یک معنی و مفهوم استفاده می‌شود و با اصطلاح روکش‌کاری از آن‌ها نام برده می‌شود و سازوکار آن رسوب‌دهی یک ماده پرکننده مقاوم به سایش و خوردگی روی سطح قطعه‌کار جهت افزایش طول عمر آن در شرایط کاری می‌باشد [۲ و ۳]. در این کتاب نیز برای فرایندهای رویه‌سختی و روکش‌کاری از اصطلاح روکش‌کاری استفاده شده است.

در سال‌های اخیر، روش‌های روکش‌کاری به کمک جوش به‌سرعت در حال توسعه‌اند و اکنون در صنایع متعددی از جمله شیمیایی و پتروشیمی، هسته‌ای و نیروگاه‌های بخار استفاده می‌شود. بزرگ‌ترین تفاوت بین جوش‌کاری اتصالی و روکش‌کاری از طریق جوش، میزان آمیختگی می‌باشد (مطابق با شکل ۱-۱). درجه آمیختگی، مربوط به آلیاژسازی داخلی آلیاژ روکش‌کاری و فلز پایه است که معمولاً به صورت درصد فلز پایه در آلیاژ روکش‌کاری بیان می‌شود. درجه آمیختگی ۱۰ درصد به آن معنی است که رسوب روکش‌کاری شامل ۱۰ درصد فلز پایه و ۹۰ درصد آلیاژ

فصل نخست: مبانی روکش کاری ♦ ۷

روکش کاری می‌باشد. ترکیب و خواص روکش ایجاد شده به شدت تحت تأثیر آمیختگی قرار می‌گیرند. در فرایند روکش کاری آمیختگی کم مطلوب است. وقتی که آمیختگی کم باشد اندازه رسوب ریزتر بوده و مقاومت به خوردگی مناسبی در پوشش ایجاد می‌شود [۵].



شکل ۱-۱: هندسه جوش [۵]

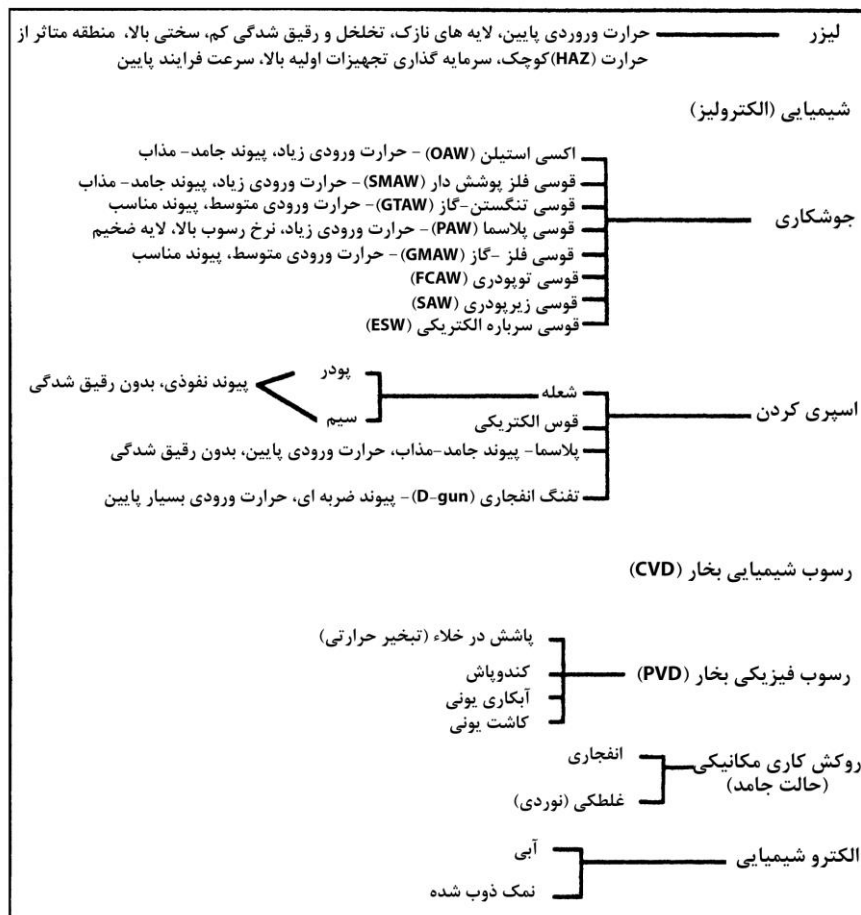
مهم‌ترین مزایای این روش عبارت‌اند از:

- الف) کاهش هزینه: با استفاده از این روش، امکان استفاده از فلزات پایه ارزان‌تر و امکان تعمیر قطعات خراب شده با هزینه کم‌تر نسبت به تولید مجدد آن‌ها وجود دارد؛
- ب) افزایش عمر قطعات: روکش کاری قطعات در حین فرایند ساخت، باعث افزایش عمر آن‌ها می‌شود که میزان این افزایش وابسته به شرایط کاری حاکم بر آن‌ها است؛
- پ) افزایش کیفیت محصولات: روکش کاری قالب‌ها و ابزارها باعث افزایش کیفیت سطحی محصولات تولیدی می‌شود؛
- پ) افزایش بازده کاری: با توجه به این‌که زمان لازم برای تعمیر قطعات فرسوده معمولاً کمتر از زمان لازم برای ساخت مجدد آن‌هاست، بنابراین با استفاده از این روش، مدت‌زمان از کارافتادگی قطعات کمتر شده و این امر موجب افزایش بازده کاری می‌شود [۶].

به‌طور کلی اندازه و شکل قطعات، قابلیت در دسترس بودن، ترکیب فلز پایه، آمیختگی موردنیاز، مساحت سطحی که باید روکش کاری شود و تعداد قطعاتی که باید روکش کاری شوند، از جمله عوامل مؤثر بر انتخاب روش‌های روکش کاری هستند.

۱-۲- فرایندهای روش کار

همان‌طور که در شکل ۱-۲ مشخص است فرایندهای مختلفی برای روش کار وجود دارد که در این میان فرایندهای جوش کاری، پاشش حرارتی (اسپری کردن) و روش کار لیزری از اهمیت بیش‌تری برخوردارند و از این رو در این بخش به معرفی این فرایندها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر پرداخته می‌شود.



شکل ۱-۲: انواع روش‌های روش کار [۴]

۱-۲-۱- روکش کاری توسط فرایندهای جوش کاری

تقریباً از تمامی فرایندهای جوش کاری می‌توان برای روکش کاری استفاده کرد. از مهم‌ترین دلایل روکش کاری با استفاده از روش‌های جوش کاری می‌توان به استفاده از انواع ضخامت قطعه، چسبندگی خوب پوشش به زیرلایه و نرخ رسوب‌گذاری بالا اشاره کرد [۷].

متداول‌ترین فرایندهای جوش کاری مورداستفاده در این زمینه عبارت‌اند از: جوش کاری قوسی تنگستن-گاز محافظ^۱، جوش کاری قوس با الکترودهای روکش دار^۲، جوش کاری قوس توپودری^۳، جوش کاری قوس زیرپودری^۴، جوش کاری اکسی‌استیلن^۵ و جوش کاری با قوس پلاسما^۶ که کلیه این فرایندها از جمله روش‌های جوش کاری ذوبی می‌باشند. جوش کاری ذوبی فرایندی است که در آن از ذوب فلز پایه برای ایجاد اتصال استفاده می‌شود. کاربرد جوش کاری اکسی‌استیلن به دلیل سرعت جوش کاری و رسوب‌دهی پایین در مقایسه با فرایندهای جوش کاری قوسی محدود شده است [۶-۸].

در جوش کاری قوسی الکتروود تنگستن با گاز محافظ، قوس یکنواخت و آرام‌تر از فرایندهای قوسی با الکتروود مصرفی بوده، ضمن آنکه پاشش نیز کمتر می‌باشد. استفاده جداگانه از سیم جوش در این روش، کنترل بیشتر کارور روی شکل رسوب را به همراه خواهد داشت. کیفیت بالای رسوب و روکش کاری قطعات کوچک از دیگر مزایای این روش نسبت به دیگر فرایندها می‌باشد. فرایند جوش کاری قوس

¹ Gas tungsten arc welding (GTAW)

² Shielded metal arc welding (SMAW)

³ Flux -Cored arc welding (FCAW)

⁴ Submerged arc welding (SAW)

⁵ Oxy Acetylene welding(OAW)

⁶ Plasma arc welding (PAW)

زیرپودری نیز به دلیل، نرخ رسوب‌دهی بالا، ایجاد رسوبات بدون تخلخل در فرایند روکش کاری مورد توجه بوده و در وضعیت‌های تخت از آن استفاده می‌شود. البته در روکش کاری توسط قوس زیر پودری، درجه آمیختگی نسبتاً بالا است و در مواردی مشاهده می‌شود که در اثر آلیاژسازی داخلی فلز پرکننده و فلز پایه، درجه آمیختگی به بیش از ۳۰ درصد می‌رسد. در نتیجه به منظور حصول بیشینه مقاومت سایشی، ممکن است دو یا سه لایه فلز جوش مورد نیاز باشد [۹-۱۱]. به منظور درک بهتر و مقایسه دقیق‌تر، مزایا و معایب این روش‌ها در جدول ۱-۱ آورده شده است.

۱-۲-۲- روکش کاری توسط فرایندهای پاشش حرارتی

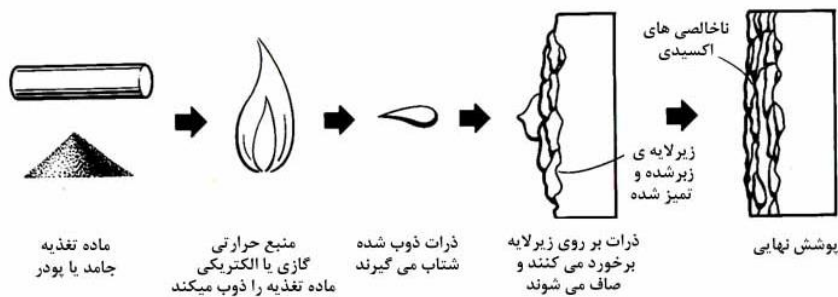
پاشش حرارتی^۱ نام کلی برای مجموعه از روش‌هایی است که برای ایجاد پوشش در سطح قطعات و با استفاده از تلفیقی از انرژی حرارتی و انرژی جنبشی انجام می‌گیرد. در تمامی فرایندهای پاشش حرارتی، مواد مصرفی پوشش به تفنگ پاششی تغذیه شده سپس منابع انرژی، مواد اولیه را به صورت ذوب و یا خمیری درآورده و در مرحله بعد، ذرات ماده پوششی توسط یک گاز خنثی (آرگون، هلیوم، ازت و یا مخلوطی از این گازها) سرعت داده شده و با شتاب به سطح آماده‌شده قطعه، پرتاب شده و در اثر شتاب زیاد، در هنگام برخورد ذرات به سطح قطعه، بین ذرات و سطح یک پیوند مکانیکی قوی به وجود آمده و ذرات در یکدیگر قفل می‌شوند و به تدریج پوشش با ضخامت موردنظر ساخته می‌شود [۱۲]. به طور کلی دمای زمینه را می‌توان کمتر از ۲۰۰°C نگه داشت تا تغییرات متالورژیکی در آن رخ ندهد. تفنگ پاششی، حرارت لازم برای ذوب را از طریق احتراق گازها، قوس الکتریکی یا پلاسما فراهم می‌کند. در این فرایند به دلیل عدم ذوب فلز پایه، میزان آمیختگی صفر است. شکل ۱-۳ کلیات یک فرایند پاشش حرارتی را نشان می‌دهد [۳].

^۱ Thermal spary

فصل نخست: مبانی روکش کاری ♦ ۱۱

جدول ۱-۱- مزایا و معایب فرآیندهای مختلف روکش کاری با فرایندهای جوش کاری [۶-۱۱]

فرایند	مزایا	معایب
جوش کاری قوسی تنگستن-گاز محافظ	ایجاد روکش با کیفیت، برخورداری از انرژی ورودی زیاد اما متمرکز، امکان کنترل پارامترهای روکش کاری، امکان روکش کاری قطعات بزرگ و کوچک	نرخ رسوب‌دهی پایین، اعوجاج بالا در قطعه
جوش کاری قوس با الکترودهای روکش‌دار	قابلیت حمل بودن تجهیزات، عدم نیاز به گازهای محافظ و فلاکس، قابلیت روکش کاری مناطق دور از دسترس، امکان روکش کاری قطعات بزرگ به دلیل حرارت شدید قوس	تمایل به نفوذ بالا و درجه آمیختگی بالا، نیاز به زدودن سرباره، احتمال ایجاد ترک به خصوص در الکترودهای پرآلیاژ
جوش کاری قوس توپودری	نرخ رسوب بالا، امکان خودکارشدن فرایند، ظاهر سطحی خوب	نیاز به برداشتن سرباره، انرژی ورودی و آمیختگی بالا، عدم استفاده از این روش برای قطعات کوچک
جوش کاری قوس زیرپودری	سرعت و راندمان بالای رسوب‌دهی، ایجاد پوشش بدون تخلخل و یکنواخت، امکان خودکار شدن فرایند	انرژی ورودی و آمیختگی بالا در قطعه، استفاده از این روش فقط در حالت تخت و قطعات ساده استوان‌های، اعوجاج بالا در قطعه
جوش کاری اکسی استیلن	رسوب‌دهی لایه‌های بسیار نازک، پر کردن دقیق شیارها و فرورفتگی‌ها، تجهیزات ساده در مقایسه با جوش کاری قوسی،	سرعت جوش کاری و رسوب‌دهی پایین، عدم امکان کاربرد برای قطعات بزرگ، وابسته به مهارت جوش‌کار،
جوش کاری با قوس پلاسما	نرخ رسوب بالا، بازیابی پودر بالا (حدود ۹۵ درصد)، قابلیت کنترل درجه آمیختگی (۵ تا ۲۰ درصد)	هزینه بالای تجهیزات، محدودیت در روکش کاری قطعات عمودی یا استوان‌های، نامناسب برای کاربردهایی با حجم کم



شکل ۱-۳: طرح واره‌ای از کلیات فرایند پاشش حرارتی [۳]

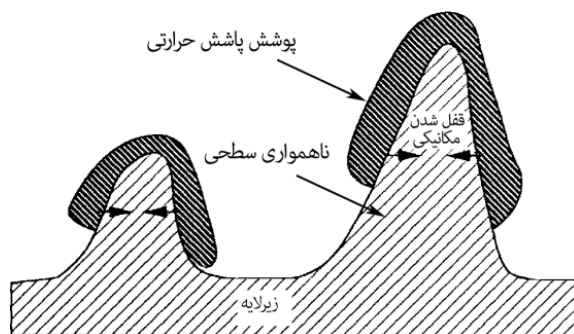
سطوحی که قرار است تحت عملیات پاشش حرارتی قرار گیرند، باید قبلاً آماده‌سازی شوند. این آماده‌سازی شامل عملیات‌های چربی‌زدایی، ماسک‌گذاری و زبر کردن سطحی می‌باشد. عملیات چربی‌زدایی با استفاده از حلال‌های آلی از جمله استون و متیل‌الکل انجام می‌گیرد. عملیات زبر کردن سطحی به روش‌های متفاوتی شامل زبر کردن ماکروسکوپی، اچ کردن شیمیایی و ماسه‌پاشی صورت می‌گیرد. عملیات ماسه‌پاشی (ساجمه‌زنی یا ماسه‌پاشی) یک روش استاندارد برای زبر کردن سطح، قبل از فرایند پاشش حرارتی به‌شمار می‌رود. در این روش با دمش ذرات ساینده با جنس‌های مختلف (ذرات ماسه‌ای، سرامیکی و یا ساجمه‌های فلزی) روی سطح قطعه، لایه اکسیدی و آلودگی‌ها از سطح زدوده شده و زبری مناسبی در سطح ایجاد می‌شود. ذرات و ساجمه‌های سرامیکی معمولاً از جنس کاربید سیلیسیم، آلومینا یا اکسید سیلیسیم و ساجمه‌های فلزی از جنس فولاد یا چدن انتخاب می‌شوند. در فرایند ماسه‌پاشی معمولاً اندازه ذرات و ساجمه‌های مورد نظر بستگی به ضخامت، جنس و ابعاد قطعه مورد نظر دارد. در حالت‌هایی که ضخامت قطعه زیاد نباشد، استفاده از ساجمه‌های ریزتر مناسب به نظر می‌رسد [۱۳].

انجام صحیح عملیات ماسه‌پاشی روی کیفیت پوشش پاشش حرارتی تاثیرگذار است. با انتخاب شکل و اندازه مناسب ذرات ساجمه و دقت در سایر متغیرهای فرایند شامل زمان ساجمه‌زنی، فشار و زاویه برخورد ذرات ساجمه به سطح قطعه،

می‌توان زبری و خواص استحکام چسبندگی مورد نظر را روی سطح قطعه به دست آورد. استحکام چسبندگی، استحکام اتصال بین پوشش و زیرلایه است که یک عامل اساسی در کیفیت و کارایی پوشش محسوب می‌گردد. نتایج بررسی‌ها نشان داده که بیش‌ترین زبری سطح تحت زاویه ۹۰ درجه (عمود) حاصل می‌شود، به‌طوری‌که میزان زبری بیشینه تحت این زاویه در زمان‌های کوتاه‌تری حاصل خواهد شد. هم‌چنین بهتر است زاویه ماسه‌پاشی همواره مطابق با همان زاویه تفنگ پاشش حرارتی باشد. در صورتی که این دو زاویه متفاوت باشد، در سطح مشترک اتصال، حفره‌هایی ایجاد خواهد شد، به‌طوری‌که با افزایش اختلاف این دو زاویه، درصد حفرات نیز بیش‌تر خواهد شد. یکی از خصوصیات مکانیکی پوشش‌های پاشش حرارتی، استحکام چسبندگی این پوشش‌ها به زیر لایه است. بسته به نوع فرایند، استحکام چسبندگی پوشش متغیر است. به‌طور کلی هر قدر میزان اکسید در پوشش بالاتر باشد، دانسیته پوشش کم‌تر شده و استحکام چسبندگی پوشش را کاهش می‌دهد. با استفاده از اتمسفر محافظت شده، استحکام بالای پوشش حاصل می‌گردد. عامل اصلی که باعث محدود شدن استحکام پیوند پوشش و زیرلایه می‌گردد، تنش ناشی از انجماد سریع ورقه است. تنش سطحی را می‌توان با انتخاب و تنظیم دقیق متغیرهای پوشش‌دهی تا حدی تعدیل نمود [۱۳].

بسیاری از محققان، چسبندگی پوشش‌های ایجاد شده به طریق پاشش حرارتی روی سطح قطعه را بر مبنای سازوکار قفل شدن مکانیکی توجیه می‌کنند. قفل شدن مکانیکی با درجه زبری سطح، تقویت خواهد شد. همان‌طور که در شکل ۱-۴ نشان داده شده، بعضی از لایه‌های پوششی تشکیل شده روی سطوح برآمده، در حین سرد شدن دچار انقباض ناشی از انجماد می‌شوند. انقباض، موجب گیر افتادن یا قفل شدن لایه در برآمدگی شده و در نتیجه یک تماس خوب بین پوشش و زیرلایه (یا لایه‌های زیرین پوشش) حاصل خواهد شد. اساساً به این دلیل که سطح را نمی‌توان به تنهایی

دارای نقاط فرورفته (یعنی همواره در کنار مناطق برآمده، مناطق فرورفته نیز وجود دارد)، لذا اتصال مکانیکی بین پوشش و سطح زیرلایه، تمامی سطح فصل مشترک را شامل نمی‌شود [۱۳ و ۱۴].



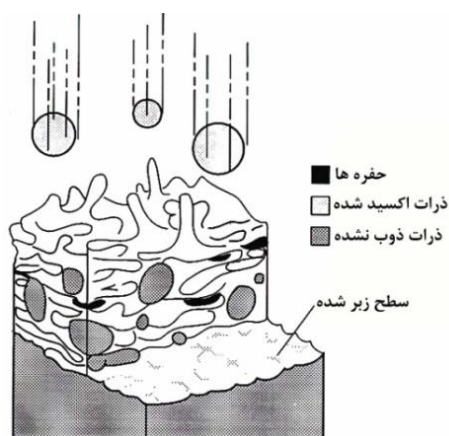
شکل ۱-۴: سازوکار قفل شدن مکانیکی پوشش‌های پاشش حرارتی روی سطح [۱۴]

به عبارت دیگر در نقاط فرورفته ممکن است بین پوشش با لایه‌های زیرین جدایش وجود داشته باشد. استفاده از پوشش‌های واسطه یا لایه میانی^۱ نیز می‌تواند در مواردی به درگیر شدن بهتر پوشش به زیرلایه کمک کند. هم‌چنین باعث افزایش استحکام پیوند پوشش به زیرلایه نیز می‌گردد [۱۳].

با توجه به اینکه مواد به صورت مذاب می‌باشند، ترکیب پوشش‌های پاشش حرارتی، معمولاً تحت تاثیر واکنش با گازهای فرایند و اتمسفر قرار می‌گیرد. به عنوان مثال زمانی که هوا یا اکسیژن به عنوان گاز مورد استفاده در فرایند به کار می‌رود، ممکن است مواد پوششی اکسید شده و قسمتی از پوشش را تشکیل دهند. پوشش‌های پاشش حرارتی معمولاً در چندین پاس توسط یک تفنگ بر سطح قطعه تشکیل می‌شوند. تغییرات ساختاری به نوع فرایند پاشش حرارتی، پارامترهای فرایند،

^۱ Bond coat

روش و ماده پاششی مورد استفاده بستگی دارد. در شکل ۱-۵، ریز ساختار به دست آمده از فرایند پاشش حرارتی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ذرات مذاب پخش شده و با برخورد با زمینه تغییر شکل می‌دهند. این ذرات در آغاز به ناهمواری‌های سطحی و پس از آن به یکدیگر می‌چسبند. در صورتی که هوا میان پوشش، حبس شده باشد، امکان تشکیل حفره وجود دارد [۳ و ۱۳].



شکل ۱-۵: پوشش حاصل از پاشش حرارتی روی یک سطح ناهموار [۳]

کاربردهای پوشش‌های پاشش حرارتی بسیار وسیع هستند اما هدف عمده از ایجاد این پوشش‌ها، مقاومت در برابر خوردگی و فرسایش می‌باشد. همچنین بازیابی ابعادی، سدهای حرارتی، هادی‌های حرارتی، مقاومت یا هادی‌های الکتریکی، حفاظ‌های الکترومغناطیسی از دیگر کاربردهای این پوشش‌ها می‌باشند. این پوشش‌ها در همه صنایع از جمله هوا فضا، کشاورزی، خودروسازی، معدن، کاغذ، نفت و گاز، مواد شیمیایی، پلاستیک‌ها و شیمی زیستی کاربرد دارند [۱۴].

در سال‌های اخیر فرایندهای پاشش حرارتی در ساخت قطعات و یا بازسازی آن‌ها کاربرد زیادی یافته است. که از جمله دلایل آن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:
الف) در پاشش حرارتی امکان استفاده از ترکیبات مواد مختلفی به عنوان پوشش و زیرلایه وجود دارد.

ب) به دلیل انعطاف‌پذیری فرایند پاشش حرارتی امکان ترمیم بسیاری از قطعات وجود دارد.

پ) در مقایسه با سایر روش‌های ترمیم، پاشش حرارتی دارای هزینه کمتر و زمان توقف کوتاه‌تری می‌باشد.

ت) قطعه پوشش شده با این روش حرارت کمی می‌بیند در نتیجه دچار تغییر میکروساختار و پیچیدگی کمتری می‌شوند.

ث) کاربرد این روش به ابعاد قطعه بستگی ندارد.

ج) حتی قطعات پیچیده را می‌توان با رعایت شرایط خاص پوشش داد.

چ) بسته به نوع پوشش و فرایند می‌توان به ضخامت‌های مختلف دست یافت.

از معایب این روش می‌توان به موارد زیر را اشاره نمود:

الف) تخلخل میکرونی لایه پوشش؛

ب) استحکام اتصال محدود لایه پوشش؛

پ) حساسیت پوشش نسبت به فشار لبه‌ها، خمش و ضربه؛

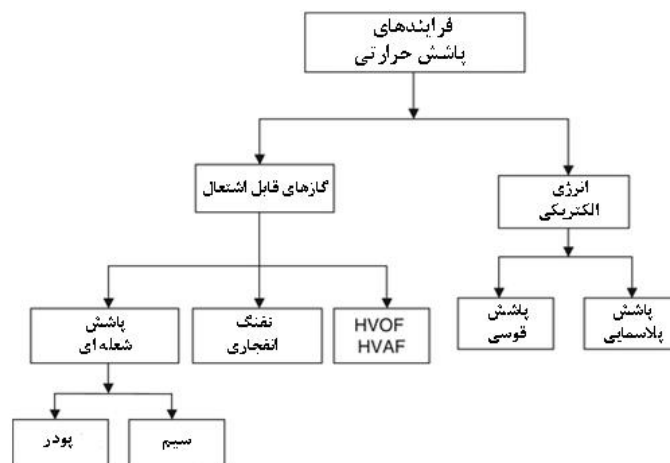
ت) محدودیت‌های موجود ناشی از ابعاد هندسی مانند هنگامی که سطح داخلی

لوله‌هایی با قطر کم پوشش می‌شوند [۱۲-۱۴].

صنایع بسیاری از قابلیت‌های فناوری پاشش حرارتی برای بهبود سطح و تعمیر قطعات صنعتی و افزایش کارایی آن‌ها استفاده می‌کنند. از این پوشش‌ها برای ایجاد سطوح و تعمیر قطعاتی از جمله موتورهای توربین هواپیماها و بالگردها در صنایع هوافضا، پره‌های توربین، محفظه‌های احتراق، نازل‌های موتور در صنایع نیروگاهی و انرژی، قالب‌های اکستروژن و قالب‌های ریخته‌گری استفاده شده است. علاوه بر بازیابی قطعات صنعتی، می‌توان پوشش‌هایی ایجاد نمود که محافظ خوبی در برابر خوردگی و اکسیداسیون و سایش هستند. استفاده از پوشش‌های پاشش حرارتی همچنین در زمینه‌های مختلف نظیر بازیابی قطعات فرسوده و تعمیر قطعات معیوب حین تولید رایج بوده و رو به گسترش است. گاهی استفاده از این روش تنها راه ممکن برای بازسازی به شمار می‌رود. همچنین از پاشش حرارتی برای تعمیر قطعات مورد استفاده در صنایع خودرویی که به‌نوعی درگیر سایش، شوک حرارتی و خوردگی هستند، می‌توان استفاده کرد. از جمله این قطعات می‌توان به دیسک ترمز، پیستون‌ها، رینگ‌های پیستون و میل‌لنگ اشاره نمود [۱۵-۱۷].

همان طور که در شکل ۱-۶ نشان داده شده است، فرایندهای پاشش حرارتی را بر اساس روش تولید حرارت می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. گروه اول که در آنها، گازهای قابل اشتعال به عنوان منبع حرارتی به کار می‌رود و گروه دوم که انرژی الکتریکی وظیفه تامین حرارت را دارد. به‌طور کلی این فرایند را می‌توان به پنج گروه اصلی به شرح زیر تقسیم‌بندی نمود [۱۸]:

- الف) پاشش شعله‌ای^۱؛
- ب) پاشش با قوس الکتریکی^۲؛
- پ) پاشش پلاسمایی^۳؛
- ت) روش شعله‌ای پرسرعت (HVOF)^۴؛
- ث) روش تفنگ انفجاری^۵.



شکل ۱-۶: پوشش حاصل از پاشش حرارتی روی یک سطح ناهموار [۱۸]

¹ Flame spray

² Arc spray

³ Plasma spray

⁴ High velocity oxygen fuel

⁵ Detonation gun method

در میان فرایندهای ذکر شده، روش قوس پلاسما بیشترین کاربرد را دارد. بررسی بازار نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۰، پاشش قوس پلاسما، حدود ۴۸٪، فرایند HVOF، ۲۵٪، روش قوس الکتریکی ۱۵٪ و روش‌های احتراقی (OFW, OFP) مجموعاً ۱۲٪ میزان کاربرد را تشکیل می‌دهند. انتخاب روش مناسب پاشش حرارتی بر اساس فاکتورهایی مثل ماده پوششی مورد نظر، ملزومات اجرایی پوشش، در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و هزینه و اندازه قطعه کار و قابلیت حمل تجهیزات تعیین می‌شود [۱۵ و ۱۶].

فرایندهای پاشش حرارتی به دلیل قابلیت پوشش دادن مواد مختلف، سازگاری با محیط زیست و کیفیت مناسب پوشش‌ها، کاربردهای گسترده‌ای دارند. در این روش‌ها مواد شیمیایی برای پوشش به کار نمی‌رود و بنابراین مواد خطرناک در این فرایندها، تولید یا استفاده نمی‌شوند و برای محیط زیست مشکلی را به وجود نمی‌آورند. به طور کلی دو خصوصیت بارز فرایند پاشش حرارتی، که باعث کاربردهای گسترده آن می‌باشد، عبارت است از:

الف) انتخاب مواد پاشش‌دهی نامحدود است؛ این مواد به گروه‌های زیر تقسیم می‌شوند:

فلزات خالص، آلیاژهای فلزی، سرامت‌ها، سرامیک‌ها، کاربیدها، پلیمرها و مواد کامپوزیتی خاص مثل پودر کامپوزیتی نیکل-آلومینیم.

ب) فرایند پاشش حرارتی به خوبی قابل کنترل می‌باشد؛ در این فرایند حرارت کمی به زمینه منتقل می‌شود (۱۰۰ تا ۲۶۰°C) و در نتیجه تغییرات متالورژیکی، اعوجاج و اکسیداسیون در قطعه رخ نخواهد داد. به همین دلیل پوشش‌های پاشش حرارتی را تقریباً روی هر زمینه‌ای (مانند فلزات، پلاستیک‌ها، کامپوزیت‌ها و غیره) می‌توان اعمال کرد. همچنین در مواقعی که نمی‌توان از فرایندهای جوش کاری، عملیات حرارتی یا سایر فرایندهای دمای بالا استفاده کرد، این پوشش‌ها را می‌توان روی قطعه

ماشین‌کاری شده نهایی نشانند. جدول ۱-۲ مزایا و معایب این فرایندها را با یکدیگر مقایسه نموده است [۱۴-۱۷].

جدول ۱-۲- مزایا و معایب فرآیندهای مختلف پوشش‌دهی پاشش حرارتی [۱۴]

پاشش با سرعت زیاد	تفنگ انفجاری	پاشش قوسی	پاشش شعله‌ای	پاشش پلاسمایی	
				چسبندگی بالا، مناسب برای مواد دیرگداز، منبع حرارتی خنثی	مزایا
تراکم بالای پوشش، چسبندگی مطلوب، حداقل ناخالصی و اکسیداسیون	سختی بالای پوشش، چسبندگی فوق‌العاده بالا، تراکم بالای پوشش	سرعت پوشش‌دهی بالا، چسبندگی بهتر نسبت به روش شعله‌ای	اقتصادی بودن		
	هزینه‌بر، حساس به پارامترهای انتخابی، نیاز به سامانه ایمنی بالا	تخلخل بالا، نیاز به پیش‌گرم	تخلخل نسبتاً بالا، نیاز به پیش‌گرم	هزینه‌بر	معایب

تفاوت روش‌های پاشش حرارتی، در پارامترهایی مثل سازوکار احتراق و سرعت پرتاب ذرات است. در برخی از این روش‌ها، عمل احتراق گازها و در بعضی دیگر، پدیده انفجار تامین‌کننده این انرژی است و در مواردی نیز تخلیه الکتریکی این انرژی را

تامین می‌کند. پیشرفت فناوری در پاشش ذرات، باعث بهبود عملیات پوشش‌دهی شده است. سرعت پاشش، تاثیر گازهای محیط، فاصله پاشش و ضخامت پوشش از جمله عواملی هستند که می‌توانند کنترل‌کننده کیفیت پوشش باشند. طبیعی است هرچه سرعت پاشش ذرات بیش‌تر باشد، انرژی سینتیک آن‌ها بیش‌تر خواهد شد و پوشش متراکم‌تری روی سطح قطعه ایجاد شده و تخلخل و عیوب ساختاری کمتری به‌وجود خواهد آمد. از طرفی محیط پاشش و گازهای محیط نیز روی کیفیت پاشش موثر است، به عنوان مثال نفوذ اکسیژن به شعله پلاسما، باعث دگرپوره شدن کاربرد تنگستن می‌شود و همین امر، کیفیت پوشش را کاهش می‌دهد؛ به همین دلیل جهت رفع این عیب پاشش را تحت گاز محافظ یا در خلاء انجام می‌دهند. فاصله محل پاشش تا سطح مورد نظر هم از عوامل کنترل‌کننده کیفیت پوشش است. به‌طوری‌که هر چه فاصله بیش‌تر باشد، احتمال جذب اکسیژن بیش‌تر می‌شود و کیفیت پوشش را پایین می‌آورد. بنابراین انتخاب روش‌های پاششی می‌تواند روی خصوصیات پوشش تاثیر بگذارد. ضخامت پوشش هم از جمله مواردی است که باید در طراحی برای داشتن استحکام کافی برای کاربردهای مختلف در نظر گرفته شود. در جدول ۱-۳ خصوصیات پوشش‌های مختلف پاشش حرارتی به‌طور خلاصه ارائه شده است [۱۳-۱۵].

انتخاب‌های مختلفی از پوشش‌های پاشش حرارتی برای مهندسين طراح وجود دارد. این پوشش‌ها خواصی از مواد را ارائه می‌دهند که در فلزات وجود ندارد. پوشش‌ها را می‌توان روی قسمت‌های خاصی از قطعه و نه لزوماً کل آن اعمال کرد. هزینه‌های تولید را می‌توان با حذف مراحل مختلف غیرضروری کاهش داد. با طراحی مشخصات اجرایی فوق‌العاده، می‌توان عمر مفید پوشش‌ها را افزایش داد و محصول جدید و قابل قبولی به بازار ارائه کرد.

فصل نخست: مبانی روکش کاری ♦ ۲۱

جدول ۱-۳- مقایسه فرآیندهای مختلف پوشش دهی پاشش حرارتی [۱۴]

تفنگ انفجاری	HVOF	پاشش پلاسمایی	پاشش قوسی	پاشش شعله‌ای	
۰-۲	۰-۲	۱-۱۰	۱۰-۱۵	۱۰-۱۵	درصد تخلخل
انفجار	سوخت گازهای اکسی استیلن، اکسیژن و نیتروژن	قوس و پلاسما	قوس الکتریکی	شعله اکسی استیلن / اکسیژن	منبع حرارت
هوا	هوا / گاز خنثی	گاز خنثی	هوا	موج حرارت ناشی از سوخت اکسی استیلن	عامل محرک
پودر	پودر	پودر	سیم	پودر و سیم	حالت مواد تغذیه
۲۸۰۰	۲۸۰۰	۱۶۰۰۰	۶۰۰۰	۴۵۰۰	دمای نازل پاشش (°C)
۱۵۰۰	۱۳۵۰	۹۰۰	۲۴۰	۸۰۰	سرعت پرتاب ذرات (m/sec)
پلیمرها، فلزات، آلیاژها، سرامیک و کاربیدها	پلیمرها، فلزات، آلیاژها، سرامیک و کاربیدها	پلیمرها، فلزات، آلیاژها، سرامیک و کاربیدها	مواد فلزی	پلیمرها، فلزات، آلیاژها	مواد پوشش
بیش تر از ۷۰	۴۰-۹۶	۷۰ تحت خلاء: بیش تر از ۷۰	۴۰-۶۰	۲۰-۲۸	استحکام چسبندگی (MPa)

پوشش‌های پاشش حرارتی، راه حل مناسبی برای برطرف کردن مشکل ناشی از عدم مقاومت مکانیکی و الکتریکی قطعات، همچنین عدم مقاومت در برابر خوردگی آن‌ها می‌باشند. با این وجود کاربردهای خاصی وجود دارند که این پوشش‌ها را نمی‌توان در آن‌ها به کار برد. قبل از انجام پوشش‌دهی پاشش حرارتی باید معیارهای زیر در نظر گرفته شود:

الف) قطعه‌ای که آماده پاشش می‌شود باید قابلیت تحمل هر بار مکانیکی که در حین کار ممکن است بر آن اعمال شود را داشته باشد (در برخی کاربردها می‌توان با پوشش پاشش حرارتی استحکام را افزایش داد، با این وجود این کاربردها غیرمعمول بوده و باید به دقت آزمایش شوند).

ب) اگر قسمتی که اسپری می‌شود یا هر قسمتی از قطعه در حین کار، تحت بار برشی قرار می‌گیرند، پاشش حرارتی برای آن قطعه مناسب نیست.

پ) بارگذاری نقطه‌ای همراه با تماس خطی رسوب فلز پاشش شده، موجب جدا شدن رسوب می‌شود. اگر رسوب روی یک قسمت متحرک است که تحت این بار می‌باشد، به سرعت از بین می‌رود.

ت) اگر فلز پایه نیتride شده باشد، روشی جز HVOF برای آن پیشنهاد نمی‌شود، مگر اینکه نیتride شدن قبل از فرایند اسپری حذف شود [۱۷-۲۰].

۱-۲-۳- روکش کاری توسط لیزر

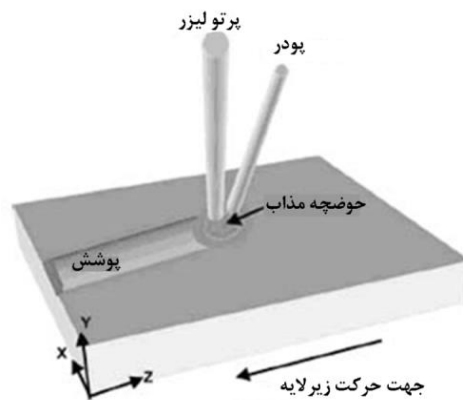
عملیات پوشش‌دهی با لیزر روشی جدید در عرصه پوشش‌دهی سطوح است که تحت عنوان روکش کاری لیزری شناخته می‌شود. روکش کاری لیزری یک فناوری بین رشته‌ای می‌باشد که از فناوری لیزر، طراحی و تولید به کمک رایانه، ربات، حسگرها، کنترل و متالورژی پودر بهره می‌برد. این فرایند می‌تواند روی قطعات نو یا فرسوده پیاده شود و اغلب برای ترمیم قطعات معیوب و فرسوده، سختی‌سازی سطح مواد حساس به سایش و یا حساس به خوردگی، اکسیداسیون و یا ترکیبی از این‌ها استفاده

می‌شود. روکش کاری لیزری از منبع حرارتی لیزر برای نشان دادن لایه‌ای نازک روی فلز پایه بهره می‌گیرد. حرارت ورودی بسیار پایین که در این روش منتقل می‌شود باعث آمیختگی بسیار پایین رسوب با زیرلایه می‌شود. همچنین، منجر به ناحیه متأثر از حرارت بسیار باریک به همراه اعوجاج و پیچیدگی حداقل می‌شود [۲۱-۲۴].

شکل ۱-۷ طرح‌واره عملیات روکش کاری سطحی توسط لیزر را نشان می‌دهد. اصول کلی روکش کاری لیزری با دیگر فرایندهای رویه سختی و روکش کاری متفاوت می‌باشد. در این روش از یک پرتو لیزری پر انرژی به جای قوس یا شعله گاز، به عنوان منبع حرارتی استفاده می‌شود. حرارت ورودی بسیار پایین که در این روش منتقل می‌شود باعث آمیختگی بسیار پایین رسوب با زیرلایه می‌شود. همچنین، منجر به ناحیه متأثر از حرارت بسیار باریک به همراه اعوجاج و پیچیدگی حداقل می‌شود. پرتوهای لیزر امکان به وجود آوردن لایه‌هایی با ضخامت کم و دسترسی آسان‌تر به سطوح را نسبت به الکتروود یا مشعل فراهم می‌سازند. اساس فرایند روکش کاری لیزری به این ترتیب است که آلیاژ مخصوص روکش کاری توسط یک پرتوی لیزر ذوب و آزادانه پخش می‌شود و روی زمینه منجمد می‌گردد. پرتو لیزر، همچنین موجب ذوب لایه نازکی از زمینه می‌گردد که با فلز جوش مایع ترکیب شده و پیوند متالورژیکی قوی ایجاد می‌شود [۳].

مواد در فرایند روکش کاری لیزری، به صورت پودر، میله، سیم یا ورق نیز می‌توانند به کار روند اما مشکلات انعکاسی ناشی از آنها، مستلزم به کار بردن دستورالعمل‌های ویژه‌ای می‌باشد. در این فرایند نیز تنش‌های حرارتی فلز جوش سبب ایجاد ترک می‌گردند که با پیش گرم مناسب، چگالی توان کم، قطرهای بزرگ پرتو و سرعت‌های کم انتقال نمونه، رسوبی بدون ترک حاصل خواهد شد [۳ و ۲۱]. مبانی این فرایند به طور مفصل در فصل دوم توضیح داده می‌شود.

تاکنون گستره‌ی وسیعی از مواد در روش روکش کاری لیزری مورد مطالعه قرار گرفته است و می‌توان گفت امکان و سهولت روکش کاری لیزری در موادی مانند فلزات، سرامیک‌ها، ترکیبات بین‌فلزی و غیره وجود دارد. آلیاژهای پایه Co، Al، Ti، Cu، Ni و همچنین گستره وسیعی از فولادها مانند فولادهای ابزار و فولادهای زنگ‌نزن به وسیله لیزر روی مواد مختلف روکش کاری شده‌اند. با این وجود در حدود چندین سال اخیر مواد دمای بالا و کامپوزیت‌ها در این زمینه مورد توجه خاصی را به خود جلب کرده‌اند. در سال‌های گذشته توجه خاصی به روکش کاری لیزری آلیاژهای پایه دما بالای Ni، Fe، Co و معطوف بوده است. این آلیاژها گران‌قیمت هستند و با روش‌های معمول تولید آن‌ها مشکل می‌باشد، اما خواص ممتازی دارند. در اکثر موارد این آلیاژها روی فولادهای ارزان قیمت، کم کربن و یا کم‌آلیاژ روکش کاری شده است. عناصر اصلی پوشش آلیاژی در اکثر آلیاژهای مورد نظر Ni، Co، Cr و Fe به همراه مقادیر کمی از W و Mo می‌باشد و همچنین C که کاربیدهای فلزی با اجزای تشکیل‌دهنده می‌باشد [۲۱-۲۳].



شکل ۱-۷: طرح‌واره سامانه روکش کاری لیزری [۲۳].

به طور کلی این آلیاژها قابلیت روکش کاری خوبی با فلز پایه فولاد کم‌کربن نشان می‌دهد. از آنجایی که یکی از کاربردهای اولیه روکش کاری لیزری ایجاد پوشش‌های

مقاوم به سایش می‌باشد، تلاش‌های تحقیقاتی زیادی صرف روکش کاری کامپوزیت‌های فلز/سرامیک شده است. تولید کامپوزیت‌های فلز/سرامیک به وسیله روش‌های معمولی مانند متالورژی پودر و ریخته‌گری (مخصوصاً در مواردی که مقدار سرامیک آن زیاد باشد) مشکل است. کامپوزیت‌ها انعطاف‌پذیری و چقرمگی کمی دارند و برای ساخت به صورت حجمی نامناسب می‌باشند. با این حال به دلیل وجود ذرات سرامیکی، سختی و مقاومت به سایش ممتازی دارند و در کاربردهای روکش کاری لیزری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۱].

با رشد سریع فناوری‌های مختلف در صنعت که موجب کاهش هزینه در فرایندهای تولیدی شده، استفاده از لیزر اهمیت زیادی در صنایع مختلف به دست آورده است. در بین کاربردهای فناوری لیزر، روکش کاری لیزری توجه زیادی در سال‌های اخیر به سبب توان متنوع آن به خود اختصاص داده است که از آن جمله می‌توان به پوشش‌های فلزی، سرامیکی و کامپوزیتی، تعمیر قطعات گران‌قیمت که به پوشش آن‌ها آسیب‌رسیده است و نمونه‌سازی سریع و تولید در حجم کم^۱ (یا فرایندهای ساخت افزایشی^۲) اشاره نمود [۴ و ۲۵]. همان‌طور که در شکل ۱-۸ نشان داده شده است، فناوری ساخت افزایشی لیزری، برای تولید قطعات فلزی به طور معمول دارای سه روش اساسی تفجوشی لیزری انتخابی^۳ (SLS)، ذوب لیزری انتخابی^۴ (SLM) و رسوب لیزری فلز^۵ (LMD) است. فرایندهای ساخت افزایشی عموماً به منظور ساخت قطعات به عنوان محصول نهایی استفاده می‌شوند، ولی استفاده از همین روش‌ها فرصت جدیدی برای تعمیر قطعات که قبلاً به وسیله روش‌های رایج قابل تعمیر نبودند، ایجاد می‌شود [۲۶].

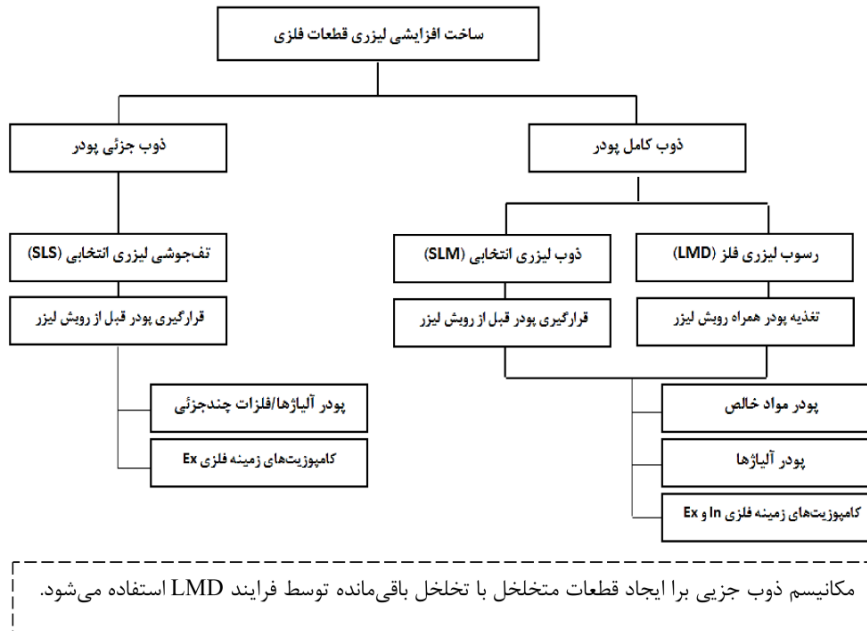
¹ Rapid prototyping and low-volume manufactur

² Additive manufacturing

³ Selective laser sintering

⁴ Selective laser melting

⁵ Laser metal deposition



شکل ۱-۸: طبقه‌بندی روش‌های ساخت افزایشی لیزری [۲۶].

روکش کاری لیزری از دقت کافی برخوردار بوده و میزان حرارت ورودی و آمیختگی در این فرایند کم می‌باشد و حداقل اعوجاج در فلز پایه ایجاد می‌گردد. این ویژگی‌ها از طریق فرایندهای معمولی دیگر مانند جوش کاری یا پاشش حرارتی قابل دستیابی نمی‌باشد. این فرایند برای بهبود مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش و مقاومت به اکسیداسیون قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. اخیراً روکش کاری لیزری برای تعمیر قطعات گران‌قیمت آسیب‌دیده مورد استفاده قرار گرفته است. برای مثال روکش کاری لیزری برنز نیکل-آلومینیوم برای تعمیر قطعات دریایی به کار می‌رود. روکش کاری لیزری سوپر آلیاژها روی قطعات آسیب دیده موتور استفاده شده است. تعمیر قطعات آسیب‌دیده برای استفاده مجدد از آنها می‌تواند بسیاری از هزینه‌های تولید و مواد اولیه را کاهش دهد [۲۷ و ۲۸].

۱-۳-۲-۱- مقایسه بین روکش کاری لیزری و دیگر روش های پوشش دهی

روکش کاری لیزری با چند روش پوشش دهی مانند پاشش حرارتی، جوش کاری، رسوب بخار شیمیایی^۱ (CVD) و رسوب بخار فیزیکی^۲ (PVD) در رقابت است. جدول ۱-۴ ویژگی های عمده این روش ها را با ارائه مزایا و معایب فرایندها برای کاربردهای پوشش دهی فلزی و غیر فلزی مقایسه می کند. همان طور که در جدول ۱-۴ فهرست شده است، روکش کاری لیزری پیوندی بسیار قوی با آمیختگی کم ایجاد می کند، به طوری که ناحیه تحت تاثیر حرارت در زیرلایه بسیار کوچک است. با این حال هزینه های سرمایه گذاری و نگهداری دستگاه روکش کاری لیزری در حال حاضر زیاد بوده که جزء معایب این روش به شمار می رود. انتظار می رود که به دلیل پیشرفت سریع نسل جدید لیزرها مانند دیودهای با توان بالا و لیزرهای فیبری با راندمان بیش تر و هزینه نگهداری کمتر، فناوری روکش کاری لیزری نقش مهمی را در بازار پوشش دهی فلزی در آینده نزدیک بازی کند.

محدودیت اصلی فرایندهای جوش کاری، آمیختگی بالای آنها است ولی به دلیل ایجاد پیوند متالورژیکی، استحکام پیوند لایه با ماده پایه بسیار عالی است؛ در مقابل در روش های پاشش حرارتی، آمیختگی صفر است ولی به دلیل ایجاد پیوند مکانیکی، استحکام پیوند لایه با ماده پایه ضعیف بوده و محدودیت اصلی این روش های است. در مقایسه با روش های رقیب، روکش کاری لیزری پیوند لایه با ماده پایه بسیار عالی و درجه آمیختگی در مقایسه با روش های جوش کاری بسیار کمتر است. علاوه بر این، در این روش عملاً تخلخلی وجود ندارد و ریزساختار پوشش بسیار همگن تر است. همچنین، به خاطر حرارت ورودی پایین در این روش می توان فولادهای مقاوم

^۱ Chemical vapour deposition

^۲ Physical vapour deposition

به دمای بالا را بدون پیش گرم و یا پس گرم لایه نشانی نمود. علی‌رغم مزایای فراوان روکش کاری لیزری، کاربردهای صنعتی آن هنوز محدود است که دلیل آن علاوه بر قیمت نسبتاً بالای سامانه لیزر، به حساسیت بالای فرایند به تغییرات در متغیرهای آن می‌باشد. برای مثال تغییر اندک در مقدار توان جذب شده لیزر به تغییرات زیاد در اندازه حوضچه مذاب می‌انجامد. هم‌چنین، نوسانات در جریان پودر، موجب تغییرات مهمی در هندسه کلی و ریزساختار پوشش می‌شود. به طور کلی، ورودی‌ها و یا پارامترهای عملیاتی شامل لیزر، دستگاه حرکت، تنظیم تغذیه‌کننده پودر و هم‌چنین مواد و خواص محیطی است که بر خروجی‌های فرایند همچون هندسه، ریزساختار، ترک، تخلخل، زبری سطح، تنش پسماند و درصد آمیختگی که نشان‌دهنده کیفیت پوشش می‌باشند، تاثیر گذار می‌باشد [۲۱].

جدول ۱-۴- مقایسه بین روکش کاری لیزری و دیگر روش‌های پوشش‌دهی فلزی [۲۱].

ویژگی	روکش کاری لیزری	جوش کاری	پاشش حرارتی	CVD	PVD
استحکام چسبندگی	زیاد	زیاد	متوسط	کم	کم
آمیختگی	زیاد	زیاد	صفر	صفر	صفر
مواد پوشش	فلز و سرامیک	فلز	فلز و سرامیک	فلز و سرامیک	فلز و سرامیک
ضخامت پوشش	۲mm-۵۰µm	یک تا چند میلی‌متر	۵۰ µm تا چند میلی‌متر	۲۰µm-۰/۰۵	۱۰µm-۰/۰۵
تکرارپذیری	متوسط تا زیاد	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد
ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)	کم	زیاد	زیاد	بسیار کم	بسیار کم
کنترل پذیری	متوسط تا زیاد	کم	متوسط	متوسط تا زیاد	متوسط تا زیاد
هزینه	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد