

ساخت افزایشی با رسوب‌نشانی مستقیم لیزری

مؤلفین:

دکتر رضا شجاع رضوی

دکتر محمد عرفان منش

دکتر سید مسعود برکت

راحله احمدی پیدانی

احمد احمدی بنی

دکتر حسین جمالی

عنوان و نام پدیدآور:	ساخت افزایشی با رسوب‌نشانی مستقیم لیزری / تألیف رضا شجاع‌رضوی ... [و دیگران].
مشخصات نشر:	تهران: دانشگاه صنعتی مالک اشتر، انتشارات، ۱۳۹۸
مشخصات ظاهری:	ی، ۴۲۲ ص: مصور، جدول.
شابک:	۹۷۸-۶۰۰-۷۷۳۶-۷۴-۶
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیبا.
یادداشت:	تألیف رضا شجاع‌رضوی، محمد عرفان‌منش، سیدمسعود برکت، راحله پیدانی، احمد احمدی‌بنی، حسین جمالی.
یادداشت:	کتابنامه.
یادداشت:	واژه‌نامه.
موضوع:	چاپ سه‌بعدی.
نوع:	لیزر - کاربردهای صنعتی.
شماره درجده:	شجاع‌رضوی، رضا، ۱۳۵۷ -
شناسه افی‌دی:	دانشگاه صنعتی مالک اشتر، انتشارات.
رده‌بندی کنگره:	TS ۱۷۱/۸ س۲ ۱۳۹۷
رده‌بندی دیویی:	۶۲۱/۹۸۱
کتابشناسی ملی:	۵۵۸ ۱۵۳



دانشگاه صنعتی مالک اشتر

عنوان کتاب:	ساخت افزایشی با رسوب‌نشانی مستقیم لیزری
تألیف:	رضا شجاع‌رضوی - محمد عرفان‌منش - سیدمسعود برکت - راحله پیدانی - احمد احمدی‌بنی - حسین جمالی
ناشر:	انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
طرح روی جلد:	فریناز عسگری
لیتوگرافی، چاپ و صحافی:	دانشگاه صنعتی مالک اشتر
صفحه‌آرایی رایانه‌ای:	امین پژوهش
ویراستار ادبی:	امین پژوهش
شمارگان:	۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ:	اول، بهار ۱۳۹۸
قیمت:	۸۶۰۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-7736-74-6

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، معاونت پژوهش و فناوری.

مدیریت دانش، انتشارات، تلفن: ۲۲۹۳۲۸۹۱

پیشگفتار

پیشرفت‌های روزگزون فناوری حافظه‌های رایانه‌ای و نیز روند روبه‌رشد استفاده از فناوری لیزر، توسعه بخش‌های جدید صنعتی در ساخت سریع مدل‌ها، نمونه‌ها یا قطعات ترکیبی به هم رسانده است. فرایند ساخت کاملاً خودکار، با استفاده از رایانه قوی و در ساعات کمی کم با سامانه ساخت بسیار انعطاف‌پذیر و تعدادی از روش‌های پس از ساخت انجام می‌شود. بر خلاف روش‌های معمول ساخت (تراش کاری یا ماشین کاری) که قلعه با استن از ماده خام اولیه تولید می‌شود. در روش چاپگر سه‌بعدی، افزودن مبنای ساخت است. در این روش نمونه به صورت لایه لایه مستقیماً از روی فایل رایانه‌ای سه‌بعدی آن ساخته می‌شود. چاپگر سه‌بعدی در حال ورود به سومین دهه توسعه فناوری به صورت جهان است. در طی دهه‌های پیشین، تغییرات مهمی در فرایندهای چاپگرهای سه‌بعدی انجام شده که منجر به بهبود دقت، خواص مکانیکی بهتر، دامنه کاربرد وسیع‌تر و کاهش هزینه اجزای و قطعات تولیدی شده است.

رسموب مستقیم لیزری (DI.D)، یکی از روش‌های چاپگر سه‌بعدی است که قابلیت تعمیر و بازسازی قطعات و نیز ساخت قطعه جدید را دارا است. این فناوری، در واقع همان توسعه نمونه‌سازی سریع است، اما برخلاف نمونه‌سازی سریع، قطعات فلزی کاملاً پرداخت‌شده تولید می‌کند. روش‌های چاپگر سه‌بعدی بر پایه لیزر، به

روش‌هایی اشاره دارد که برای تولید قطعات به شکل مورد نظر، با استفاده از سامانه لیزری کنترل‌شده توسط رایانه به عنوان منبع انرژی، مواد اولیه را که معمولاً به شکل پودر هستند، به صورت لایه به لایه، با هم مخلوط می‌کنند.

رسوب‌نشانی مستقیم با استفاده از لیزر در چند سال اخیر به شدت گسترش یافته است و پتانسیل تولید سریع نمونه اولیه از قطعات فلزی، تولید قطعات پیچیده و سفارشی، پوشش‌دهی یا تعمیر قطعات گران‌قیمت فلزی و تولید یا تعمیر در موقعه‌های دور و ضعیف را فراهم کرده است. در حال حاضر، توسعه این فرایند روی تولید قطعات لاری شامل فلزات، آلیاژها و کامپوزیت‌های زمینه فلزی با اشکال پیچیده متمرکز شده. به تازمندی‌های صنایع مختلف را پاسخگو باشد. صنایع خودروسازی، هوافضا و پزشکی بزرگ‌ترین صنایع استفاده‌کننده از فرایندهای چاپگر سه‌بعدی هستند. در صنایع هوافضا، خودروسازی، چاپگر سه‌بعدی به دلیل قابلیت ساخت قطعات پیچیده و کاهش زمان و هزینه محصولات، از اهمیت بالایی برخوردار است. در پزشکی، اغلب به دلیل امکان اختصاص سازی ایمپلنت‌ها برای بیماران با استفاده از روش‌های پزشکی، چاپگرهای سه‌بعدی به کمک‌مند و غیرقابل جایگزین خواهد بود. چاپگرهای سه‌بعدی کمابیش در تمام بخش‌های قابل تصور محصولات مصرفی کاربرد پیدا کرده است. هرچه این فرایندها رواج بیشتری پیدا کنند، به همان میزان هزینه‌ها نیز کاهش پیدا خواهند کرد. کاهش هزینه‌ها باعث افزایش نیروی محرکه توسعه و دامنه کاربرد این فرایندها می‌شود. به تازگی این نیروی محرکه باعث تجاری شدن فرایندهای چاپگرهای سه‌بعدی با استفاده از پودر فلزی شده است.

در ایران نیز از سال‌ها پیش دانش لیزر در مراکز تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته و دستاوردهای قابل توجهی در زمینه تولید لیزر و فراوری مواد به کمک لیزر به دست

آمده است. با توجه به نیاز مبرم و روزافزون صنایع کشور به استفاده از فناوری‌های نوین ساخت قطعه و کسب دانش فنی لازم در ابعاد مختلف این فناوری‌ها، می‌توان گفت ورود به حیطه چاپگر سه‌بعدی به کمک لیزر، زمینه‌ساز تحول بزرگی در فرایندهای ساخت قطعات فلزی خواهد شد. بنابراین، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اقدام به توسعه دانش فنی فراوری مواد توسط لیزر به‌ویژه روکش‌کاری و چاپ سه‌بعدی لیزری مواد فلزی در کشور نموده است و پروژه‌های دانشجویی، تحقیقاتی و صنعتی متعددی در این مرکز انجام شده است. از آنجایی که دانشگاه مالک اشتر نیاز تهیه کتاب‌هایی در زمینه لیزر است، این موسسه در سال ۱۳۹۳ کتاب فراوری لیزر را منتشر ساخت و با توجه به استقبال خوب از این کتاب و نظر به اهمیت موضوع و گسترش وسیع علم و فناوری لیزر، در سال ۱۳۹۵ کتاب تخصصی در زمینه روکش‌کاری لیزر تهیه شد. با توجه به این که در میان کتاب‌های منتشر شده در زمینه لیزر، تعداد کتاب تخصصی که به چاپ سه‌بعدی مواد فلزی به وسیله لیزر پرداخته باشد، احساس می‌شود؛ ما فین در راستای اهداف خود تصمیم به تألیف کتاب چاپ سه‌بعدی لیزری مواد فلزی به روش رسوب‌نشانی مستقیم گرفتند؛ کتابی که عمدتاً نتیجه مطالعات و فعالیت‌های تحقیقاتی خود در طی ده سال گذشته است. امید است با تکیه بر تجربیات عملی و توسعه دانش فنی فرایندهای مهندسی انجام شده به کمک لیزر، گامی مؤثر در جهت ایجاد رونق، این فناوری‌ها در کشور برداشت.

کتاب حاضر مشتمل بر پنج فصل است. در فصل نخست، دسته‌بندی و مبانی علمی روش‌های چاپ سه‌بعدی آورده شده است. مبانی علمی فرایند رسوب‌نشانی مستقیم با تمرکز بر پدیده‌های انتقال، حوضچه مذاب و توزیع دمایی در فصل دوم، و مبانی

مثال‌ورژیکی فرایند رسوب‌نشانی مستقیم با تمرکز بر خواص مکانیکی، بهینه‌سازی پارامترهای فرایند و کنترل در فصل سوم بیان شده است. در فصل چهارم کاربردهای فرایند رسوب‌نشانی مستقیم ارائه شده و در نهایت در فصل پنجم نمونه‌هایی از تحقیقات انجام گرفته در حوزه فرایند رسوب‌نشانی مستقیم روی آلیاژهای مختلف شامل سوپرآلیاژ، فولاد، تیتانیوم، آلومینیوم و سرامیک آورده شده است.

لازم به ذکر است که با توجه به این‌که کلیه فرایندهای رسوب‌نشانی فلز لیزری (LAD) مبانی یکسانی داشته و مشابه هم می‌باشند (به عنوان مثال، رسوب‌نشانی مستقیم فلز (DMD)، قطعه ساخته شده با مهندسی لیزر (LENS)، شکل‌دهی سریع لیزری (LRF)، ساخت توسط نور مستقیم (DLF)، رسوب‌نشانی مستقیم لیزری (DLID)، در این کتاب با کیدواژه رسوب‌نشانی مستقیم لیزری (DLD) نام‌گذاری شده است.

در پایان بر خود واجب می‌دانم از هیئت‌های مدیران صنعت بومی‌سازی مواد فلزی و انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از خانواده عزیزم که با صبر و تشویق‌های شان من را در این راه حمایت و پشتیبانی نمودند کمال تشکر را دارم.

مؤلفین

زمستان یک‌هزار و سیصد و نود و هشت

فهرست مطالب

فصل نخست: مبانی علمی چاپ سه بعدی.....	۳
۱-۱- مقدمه	۳
۲-۱- تاریخچه فناوری های ساخت افزایشی	۴
۳-۱- طبقه بندی روش های نمونه سازی سریع بر حسب ماده	۱۰
۴-۱- مراحل اصلی فرایند ساخت افزایشی	۱۳
۱-۴-۱- ایجاد مدل CAD قطعه تولید شده	۱۴
۲-۴-۱- تبدیل مدل CAD به فرمت STL	۱۴
۳-۴-۱- برش فایل STL به لایه های نازک مقطع	۱۶
۴-۴-۱- ساخت قطعه به روش لایه به لایه	۱۷
۵-۴-۱- پس پردازش قطعه	۱۸
۵-۱- مشکلات ساخت لایه ای در فرایند ساخت افزایشی	۱۸
۱-۵-۱- گام های پله ای	۱۸
۲-۵-۱- انتخاب ضخامت لایه	۱۹
۳-۵-۱- دقت	۱۹
۴-۵-۱- جهت اجزاء	۱۹
۵-۵-۱- ساختارهای مورد پشتیبانی	۲۰
۶-۱- مزایا و حوزه کاربرد فرایندهای ساخت افزایشی	۲۱

- ۱-۶-۱- سرعت تولید ۲۲
- ۱-۶-۲- آزادی طراحی ۲۲
- ۱-۶-۳- صرفه جویی در هزینه ۲۲
- ۱-۶-۴- تولید سبز ۲۳
- ۱-۷- دسته بندی فرایندهای مهم ساخت افزایشی لیزری و ریزساختارهای حاصل از آن ۲۵
- ۱-۷-۱- تف جوشی لیزری انتخابی (SLS) ۲۷
- ۱-۷-۱- ذوب انتخابی لیزری (SLM) ۳۳
- ۱-۷-۱- رسوبنشانی لیزری فلز (LMD) ۳۶
- ۱-۷-۴- پرتوهای نور پویا ۴۶
- ۱-۸- جنبه های فیزیکی راهکارهای طراحی مواد برای روش های ساخت افزایشی ۴۸
- ۱-۸-۱- جذب ۴۸
- ۱-۸-۲- کشش سطحی و ترشوندگی ۵۰
- ۱-۸-۳- گرادیان ۵۱
- ۱-۹- خواص سطحی قطعات تولید شده توسط فرایند ساخت افزایشی ۵۳
- ۱-۱۰- ساختار قطعات تولید شده با فرایند ساخت افزایشی ۵۷
- ۱-۱۰-۱- اندازه دانه و ساختار ۵۷
- ۱-۱۰-۲- میزان تراکم ۶۱
- ۱-۱۱- خواص مکانیکی قطعات حاصل از فرایند ساخت افزایشی ۶۳
- ۱-۱۱-۱- تنش پسماند و استحکام ۶۳
- ۱-۱۱-۲- سختی و خواص سایشی ۶۶
- منابع ۶۸

فصل دوم: مبانی علمی فرایند رسوب‌نشانی مستقیم لیزری

۸۱-۱-۲-۱-۲ مقدمه ۸۱

۸۲-۲-۲-۱-۲ مبانی فیزیکی فرایند رسوب‌نشانی مستقیم لیزری ۸۲

۸۹-۱-۲-۲-۱-۲ انتقال لیزر و پودر ۸۹

۹۹-۲-۲-۲-۲ حوضچه مذاب ۹۹

۱۰۰-۱-۲-۲-۱-۲ انتقال حرارت ۱۰۰

۱۰۳-۲-۲-۱-۲-۲ توزیع دمایی ۱۰۳

۱۰۹-۳-۲-۱-۲ تجهیزات لازم برای فرایند رسوب‌نشانی مستقیم ۱۰۹

۱۱۲-۱-۳-۲-۱-۲ لیزر ۱۱۲

۱۱۳-۱-۳-۲-۱-۲ اجزای اصلی ۱۱۳

۱۱۴-۲-۱-۳-۲-۲ طرز کار لیزر ۱۱۴

۱۱۴-۳-۱-۳-۲-۲ ویژگی‌های پودر لیزر ۱۱۴

۱۱۷-۴-۱-۳-۲-۲ نمایه فضایی لیزر ۱۱۷

۱۲۰-۵-۱-۳-۲-۲ اثر لیزر بر مواد ۱۲۰

۱۳۴-۶-۱-۳-۲-۲ انواع لیزر ۱۳۴

۱۳۷-۷-۱-۳-۲-۲ انتخاب لیزر مناسب جهت فرایند DI.D ۱۳۷

۱۳۸-۲-۳-۲-۲ سامانه تغذیه‌کننده پودر ۱۳۸

۱۴۰-۱-۲-۳-۲-۲ سامانه تغذیه پودر بر اساس گرانش ۱۴۰

۱۴۳-۲-۲-۳-۲-۲ سامانه تغذیه پودر به کمک مارپیچ انتقال مواد ۱۴۳

۱۴۴-۳-۲-۳-۲-۲ سامانه تغذیه پودر با استفاده از سیال‌کردن پودر ۱۴۴

۱۴۵-۴-۲-۳-۲-۲ سامانه تغذیه پودر لرزشی ۱۴۵

۱۴۷-۳-۳-۳-۲-۲ نازل پاشش پودر ۱۴۷

- ۱۵۱..... ۴-۳-۲- دستگاه موقعیت‌دهی مجهز به نرم‌افزار CAM / CAD
- ۱۵۳..... ۱-۴-۳-۲- میزهای دو محوره
- ۱۵۴..... ۲-۴-۳-۲- میزهای سه محوره
- ۱۵۶..... ۳-۴-۳-۲- میزهای چهار محور و بالاتر
- ۱۶۰..... ۵-۳-۲- سامانه بازخورد
- ۱۶۱..... ۶-۳-۲- نرم‌افزار دیده‌بانی
- ۱۶۲..... ۱-۲- تأثیر پارامترهای فرایند
- ۱۶۲..... ۴-۲-۴-۲- تولید انرژی، نرخ تغذیه پودر، سرعت روبش
- ۱۶۶..... ۲-۴-۲- سوب‌دهی
- ۱۶۸..... ۳-۴-۲- راه‌دهش لایه
- ۱۷۱..... ۵-۲- بهینه‌سازی فرایند
- ۱۷۱..... ۱-۵-۲- کاهش بعد
- ۱۷۳..... ۲-۵-۲- نقشه‌های فرایند
- ۱۷۸..... ۳-۵-۲- مدل‌های داده محور
- ۱۸۰..... ۶-۲- کنترل فرایند
- ۱۸۲..... ۱-۶-۲- کنترل حوضچه مذاب
- ۱۸۸..... ۲-۶-۲- کنترل رسوب‌نشانی
- ۱۹۲..... منابع

فصل سوم: مبانی متالورژیکی فرایند رسوب‌نشانی مستقیم..... ۲۱۱

- ۲۱۱..... ۱-۳- مقدمه
- ۲۱۲..... ۲-۳- بررسی انجماد و ریزساختار قطعات حاصل از فرایند DLD
- ۲۱۲..... ۱-۲-۳- مبانی انجمادی
- ۲۱۶..... ۲-۲-۳- دگرگونی در حالت جامد

۲۱۸.....	۳-۲-۳- تحولات انجمادی و ریزساختاری حین فرایند DLD
۲۲۶.....	۳-۳- ویژگی های مکانیکی
۲۲۷.....	۳-۳-۱- ریزسختی
۲۲۹.....	۳-۳-۲- تنش پسماند
۲۳۱.....	۳-۳-۳- خواص کششی
۲۳۸.....	۳-۳-۴- مقاومت خستگی
۲۴۰.....	۳-۴-۱- شروع ترک خستگی
۲۵۳.....	۳-۴-۱-۱- رشد ترک خستگی
۲۵۷.....	۳-۴-۳- مدل های خستگی
۲۶۲.....	۴-۳- نتیجه گیری فصل چالش های پیشرو
۲۷۰.....	منابع
۲۷۹.....	فصل چهارم: کاربردهای فرایند رسوب نشانی مستقیم
۲۷۹.....	۴-۱- مقدمه
۲۸۰.....	۴-۲- قطعات ساخته شده به منظور اثبات فناوری
۲۹۱.....	۴-۳- شرکت های فعال
۲۹۱.....	۴-۳-۱- آزمایشگاه های ملی سندیا
۲۹۱.....	۴-۳-۲- شرکت ایتومک
۲۹۲.....	۴-۳-۳- شرکت پی او ام
۲۹۳.....	۴-۴- کاربرد رسوب نشانی مستقیم لیزری در صنایع هوایی و هوافضا
۳۰۰.....	۴-۵- کاربرد رسوب نشانی مستقیم لیزری و چاپ سه بعدی در پزشکی
۳۰۴.....	۴-۶- کاربرد رسوب نشانی مستقیم لیزری در سایر صنایع
۳۰۷.....	منابع