



تقديم به

آرنا و آرتين

# فراوری مواد با لیزر

مؤلفین:

رضا شجاع رضوی

محمد عرفان منش

سرشناسه:	شجاع رضوی، رضا، ۱۳۵۷ - .
عنوان:	فرآوری مواد با لیزر.
مشخصات نشر:	تهران: دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری:	۶۴۴ ص.
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیپا.
موضوع:	لیزر - کاربردهای صنعتی.
موضوع:	مهندسی مواد.
شناسه افزوده:	عرفان منش، محمد، ۱۳۶۴ - .
شناسه افزوده:	دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
رده بندی کنگره:	۱۳۹۳ ف۳/ش ۱۶۷۵ TA
رده بندی دیویی:	۶۲۱/۳۶۶
کتابشناسی ملی:	۳۷۵۲۳۴۳



دانشکده مهندسی مواد

عنوان کتاب: ..... فرآوری مواد با لیزر

مؤلف: ..... رضا شجاع رضوی

ناشر: ..... انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر

طرح روی جلد: ..... فریناز عسگری

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: ..... انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر

صفحه‌آرایی رایانه‌ای: ..... امین پژوهش جهرمی

ویراستار ادبی: ..... امین پژوهش جهرمی

شمارگان: ..... ۱۰۰۰ جلد

نوبت چاپ: ..... اول، زمستان ۹۳

قیمت: ..... ۳۶۰۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-7736-04-3

شابک: ۳ - ۰۴ - ۷۷۳۶ - ۶۰۰ - ۹۷۸

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

از میان کارهای برجسته قرن بیستم در علوم و مهندسی، لیزر به حق جایگاه رفیعی را به خود اختصاص داده است. با اختراع لیزر در سال ۱۹۶۰ راه برای گسترش فناوری آن گشوده شد و امروز سامانه‌های لیزر در بیش‌تر زمینه‌های علوم و مهندسی کاربردهای وسیعی دارند. از لیزر در مخابرات، رایانه، ابزارهای اندازه‌گیری دقیق و ساخت قطعات پیچیده فنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربردهای متنوع لیزر نیز به دلیل خواص فوق‌العاده آن است. با توجه به سازوکار تولید لیزر، نور لیزر دارای سه ویژگی اصلی همدوسی، تکرنگی و هم‌راستایی است که متفاوت با نورهای معمولی است. هم‌راستایی است که فراوری مواد را ممکن می‌سازد. یک پرتو موازی می‌تواند بر یک نقطه متمرکز شود و باعث شود یک لیزر با توان خروجی یک کیلو وات، تولید چگالی توان  $10^7 \text{ W/cm}^2$  نماید. این چگالی توان بالا است و می‌تواند باعث ذوب و تبخیر شود. از آن‌جا که در بیش‌تر فرایندهای متالورژی نیاز به یک منبع حرارت یکنواخت و متمرکز است؛ بنابراین این پرتو، می‌تواند گزینه‌ای مناسب و قابل اعتماد برای انجام این فرایندها باشد. پرتوی لیزر تولید شده توسط منابع تولید آن را می‌توان به راحتی به وسیله ابزارهای نوری بازتابیده و یا متمرکز نمود و بر سطح فلز تابانید؛ که این یکی از مزیت‌های استفاده از این منبع انرژی نو ظهور و پرتوان است. از جمله این

فرایندها می‌توان به سوراخ کاری، برش کاری، جوش کاری، سخت کاری سطحی، روکش کاری، ذوب سطحی و آلیاژسازی با لیزر اشاره نمود، که برخی از آنها کاربردهای فوق‌العاده حساس و منحصر به فردی را در صنایع نظامی، هوافضا و انرژی اتمی دارند.

در کشور ایران از سال‌ها پیش 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 ماموریت‌های دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، گسترش جنبه‌های مختلف لیزر در مهندسی مواد در داخل کشور است. با توجه به نیاز مبرم و روزافزون صنایع مرتبط با فناوری برتر و وجود دانش فنی لازم در زمینه فراوری مواد، این دانشکده اقدام به توسعه دانش فنی فراوری مواد با لیزر در کشور نموده است و پروژه‌های دانشجویی، تحقیقاتی و صنعتی متعددی در این مرکز انجام شده است. با توجه به این که در میان کتاب‌های منتشر شده در زمینه لیزر، اکثراً به اصول اساسی و پدیده‌های فیزیکی مرتبط با لیزر پرداخته‌اند و فقدان کتابی جامع که به فراوری مواد به وسیله لیزر پرداخته باشد، احساس می‌شود؛ مولفین در راستای اهداف خود تصمیم به تالیف این کتاب نموده‌اند که عمدتاً نتیجه مطالعات و فعالیت‌های تحقیقاتی خود در طی ده سال گذشته است.

از آن جایی که تمام فرایندهای لیزری بر اساس برهمکنش لیزر با مواد است، بنابراین برای درک صحیح از آنها باید با ماهیت نور لیزر، ویژگی‌های ذاتی لیزرها و هم‌چنین با برهمکنش‌های لیزر با مواد آگاهی داشت. در فصل یک این کتاب سعی

شده با زبانی ساده و بدون استفاده از ریاضیات پیچیده به شناخت این نور شگفت‌انگیز پرداخته شود؛ هم‌چنین بعضی از لیزرهای صنعتی پرکاربرد در ادامه این فصل توضیح داده شده‌اند. فصل دوم این کتاب به برهمکنش لیزر با ماده و اثرات عوامل مختلف بر آن می‌پردازد. در فصل‌های بعدی فرایندهای تولید و جایگاه لیزر در آن‌ها، سازوکار عملکرد لیزر در هر فرایند، ملاحظات عملی، کاربردها و پیشرفت آن فرایند به طور مفصل توضیح داده شده است.

در پایان بر خود واجب می‌دانم از تلاش‌ها و زحمات آقایان حبیب ا... رستگاری، مصطفی سالک بافقی، سید مسعود برکت، حسین جمالی، مرتضی حاجی زاده، علی اوشنی و غلامرضا گردانی در چاپ این کتاب، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. هم‌چنین از خانواده عزیزم کمال تشکر را دارم که با صبر و تشویق‌های‌شان من را در این راه حمایت و پشتیبانی نمودند.

رضا شجاع‌رضوی      محمد عرفان‌منش

پاییز ۱۳۹۳





## فهرست مطالب

فصل نخست: مقدمه‌ای بر لیزر.....	۳
۱-۱- ماهیت تابش الکترومغناطیس.....	۳
۲-۱- تاریخچه لیزر.....	۷
۳-۱- سازوکار عملکرد لیزر.....	۱۱
۱-۳-۱- گسیل و جذب.....	۱۲
۲-۳-۱- گسیل القایی.....	۱۵
۳-۳-۱- جمعیت معکوس.....	۱۸
۴-۱- اجزای اصلی لیزر.....	۲۰
۱-۴-۱- ماده فعال.....	۲۱
۲-۴-۱- دمش کننده.....	۲۲
۳-۴-۱- تشدیدکننده‌های نوری.....	۲۳
۱-۳-۴-۱- ابعاد کاواک و عدد فرسنتل.....	۲۸
۲-۳-۴-۱- ملاحظات سرمایشی.....	۳۰
۵-۱- مشخصات پرتو لیزر.....	۳۲
۱-۵-۱- تک‌رنگی.....	۳۳
۲-۵-۱- هم‌راستایی.....	۳۵
۳-۵-۱- همدوسی پرتو.....	۳۷
۴-۵-۱- درخشندگی.....	۳۷
۵-۵-۱- اندازه نقطه کانونی.....	۳۹

۴۰	..... ۶-۵-۱- مد‌های عرضی
۴۲	..... ۷-۵-۱- مد‌های زمانی
۴۳	..... ۱-۷-۵-۱- پالس کردن نرمال
۴۴	..... ۲-۷-۵-۱- Q- سوئیچ
۴۵	..... ۳-۷-۵-۱- قفل‌شدگی مد
۴۶	..... ۸-۵-۱- قطبش
۴۹	..... ۶-۱- انواع لیزرهای صنعتی
۵۲	..... ۱-۶-۱- لیزرهای گازی
۵۲	..... ۱-۱-۶-۱- لیزر CO <sub>2</sub>
۶۰	..... ۲-۱-۶-۱- لیزر اگزایمر
۶۴	..... ۲-۶-۱- لیزرهای جامد
۶۶	..... ۱-۲-۶-۱- لیزر نئو دیمم-یاگ (Nd:YAG)
۸۰	..... ۲-۲-۶-۱- Nd:glass لیزر
۸۰	..... ۳-۲-۶-۱- لیزرهای دیسکی
۸۱	..... ۴-۲-۶-۱- لیزرهای فیبری (فیبر نوری برای لیزرهای صنعتی)
۸۹	..... ۵-۲-۶-۱- لیزر یاقوت
۸۹	..... ۶-۲-۶-۱- لیزرهای نیمه‌رسانا (دیودی)
۹۴	..... ۷-۲-۶-۱- لیزرهای دیودی جدید و توان بالا (HPDL)
۱۰۱	..... ۷-۱- مقایسه لیزرها
۱۰۷	..... فصل دوم: برهمکنش لیزر با مواد
۱۰۷	..... ۱-۲- برهمکنش تابش الکترومغناطیس با مواد
۱۱۳	..... ۲-۲- بازتاب یا جذب
۱۱۴	..... ۱-۲-۲- برخورد نور با سطح مواد
۱۱۴	..... ۱-۱-۲-۲- برخورد نور با سطوح دی‌الکتریک
۱۱۶	..... ۲-۱-۲-۲- برخورد نور با سطوح فلزات
۱۲۰	..... ۳-۱-۲-۲- برخورد نور روی نیمه‌رساناها
۱۲۱	..... ۲-۲-۲- اثر عوامل مختلف بر بازتاب‌پذیری

۱۲۱	..... اثر طول موج..... ۱-۲-۲-۲
۱۲۲	..... اثر دما..... ۲-۲-۲-۲
۱۲۳	..... اثر لایه‌های سطحی..... ۳-۲-۲-۲
۱۲۴	..... اثر زاویه برخوردی..... ۴-۲-۲-۲
۱۲۵	..... اثر مواد و زبری سطح..... ۵-۲-۲-۲
۱۲۶	..... تاثیرات حرارتی..... ۳-۲-۲-۲
۱۲۷	..... ذوب و تبخیر..... ۱-۳-۲-۲
۱۲۸	..... تشکیل پلاσμα..... ۲-۳-۲-۲
۱۳۰	..... فرسایش..... ۳-۳-۲-۲
۱۳۵	..... فصل سوم: فرایندهای تولید.....
۱۳۵	..... ۱-۳- مقدمه.....
۱۳۶	..... ۲-۳- فرایندهای تولید.....
۱۳۷	..... ۱-۲-۳- ریخته‌گری.....
۱۳۹	..... ۲-۲-۳- شکل‌دهی.....
۱۴۳	..... ۳-۲-۳- فرایندهای اتصال.....
۱۴۵	..... ۴-۲-۳- فرایندهای ماشین‌کاری.....
۱۴۶	..... ۱-۴-۲-۳- فرایندهای ماشین‌کاری سنتی.....
۱۴۹	..... ۲-۴-۲-۳- فرایندهای ماشین‌کاری غیر سنتی.....
۱۵۲	..... ۳-۳- کاربرد لیزر در ساخت و تولید.....
۱۵۲	..... ۱-۳-۳- لیزر در ریخته‌گری.....
۱۵۳	..... ۲-۳-۳- شکل‌دهی با لیزر.....
۱۵۶	..... ۳-۳-۳- اتصال با لیزر.....
۱۵۸	..... ۴-۳-۳- ماشین‌کاری لیزری.....
۱۶۱	..... ۴-۳- انتخاب فرایند تولید.....
۱۶۲	..... ۱-۴-۳- خواص مواد.....
۱۶۶	..... ۲-۴-۳- پیچیدگی هندسه محصول.....

۱۶۹	۳-۴-۳- پارامترهای کیفیت
۱۷۳	۳-۴-۴- اقتصاد و هزینه‌های تولید
۱۸۱	فصل چهارم: مته‌زنی و سوراخ‌کاری لیزری
۱۸۱	۴-۱- مقدمه
۱۸۴	۴-۲- انواع فرایند سوراخ‌کاری
۱۸۶	۴-۲-۱- سوراخ‌کاری ضربه‌ای لیزری
۱۹۰	۴-۲-۲- سوراخ‌کاری چرخشی
۱۹۳	۴-۳- ملاحظات عملی
۱۹۳	۴-۳-۱- اثر پارامترهای لیزر
۱۹۵	۴-۳-۲- اثر نوع گاز کمکی، فشار و طرح نازل
۱۹۹	۴-۴- جنبه‌های کیفی
۲۰۳	۴-۵- کاربردهای سوراخ‌کاری
۲۰۴	۴-۵-۱- سوراخ‌های خنک‌کننده در پره‌های توربین، تیغه‌ها و محفظه‌های احتراق
۲۰۶	۴-۵-۲- نازل‌های جوهرافشان
۲۰۷	۴-۵-۳- سوراخ‌کاری راه ارتباطی
۲۰۸	۴-۵-۴- سوراخ‌کاری روی اشیاء متفرقه
۲۰۸	۴-۵-۵- سوراخ‌کاری سنگ
۲۰۹	۴-۶- پیشرفت‌های سوراخ‌کاری لیزری
۲۱۵	فصل پنجم: برش‌کاری لیزری
۲۱۵	۵-۱- مقدمه
۲۱۶	۵-۱-۱- ویژگی‌های کیفیت برش
۲۱۸	۵-۱-۲- ویژگی‌های فرایند
۲۱۹	۵-۲- چیدمان و چگونگی انجام فرایند
۲۲۱	۵-۳- روش‌های برش‌کاری لیزری
۲۲۳	۵-۳-۱- برش‌کاری لیزری تبخیری

۲۲۳	..... ۲-۳-۵- برش کاری ذوبی (ذوب و دمش)
۲۳۳	..... ۳-۳-۵- برش کاری ذوبی واکنشی
۲۳۶	..... ۴-۳-۵- شکست کنترل شده
۲۴۰	..... ۵-۳-۵- حکاکی
۲۴۱	..... ۶-۳-۵- برش کاری سرد
۲۴۲	..... ۷-۳-۵- برش کاری اکسیژنی به کمک لیزر- فرایند LASOX
۲۴۴	..... ۴-۵- ملاحظات عملی
۲۴۵	..... ۱-۴-۵- مشخصات پرتو
۲۴۵	..... ۱-۱-۴-۵- اثر اندازه
۲۴۷	..... ۲-۱-۴-۵- اثر توان
۲۴۹	..... ۳-۱-۴-۵- اثر قطبش پرتو
۲۵۱	..... ۴-۱-۴-۵- اثر طول موج
۲۵۳	..... ۲-۴-۵- مشخصات انتقال
۲۵۳	..... ۱-۲-۴-۵- تاثیر سرعت
۲۵۴	..... ۲-۲-۴-۵- تاثیر موقعیت کانونی
۲۵۶	..... ۳-۴-۵- مشخصات گاز
۲۵۶	..... ۱-۳-۴-۵- تاثیر سرعت جت گاز
۲۶۰	..... ۲-۳-۴-۵- تاثیر پارامترهای نازل
۲۶۲	..... ۳-۳-۴-۵- تاثیر ترکیب گاز
۲۶۴	..... ۴-۴-۵- ویژگی های ماده
۲۶۶	..... ۵-۵- کاربردهای برش کاری لیزری
۲۶۷	..... ۱-۵-۵- برش قالب
۲۶۷	..... ۲-۵-۵- برش لوله های کوارتزی
۲۶۸	..... ۳-۵-۵- صنعت هوافضا
۲۶۹	..... ۴-۵-۵- تولید الگوی خودرو
۲۶۹	..... ۵-۵-۵- صنایع مبل سازی

۲۷۰	..... ۵-۵-۶- برش مواد پرتوزا
۲۷۱	..... ۵-۵-۷- کاربردهای الکترونیکی
۲۷۱	..... ۵-۵-۸- کشتی سازی
۲۷۱	..... ۵-۵-۹- پانچ لیزری
۲۷۲	..... ۵-۶- مثال سرمایه گذاری
۲۷۳	..... ۵-۷- پیشرفت های برش کاری لیزری
۲۷۳	..... ۵-۷-۱- برش لیزری تقویت شده با قوس
۲۷۴	..... ۵-۷-۲- ماشین کاری داغ
۲۷۵	..... ۵-۷-۳- لیزر هدایت شده با جت آب
۲۸۱	..... فصل ششم: جوش کاری لیزری
۲۸۱	..... ۶-۱- مقدمه
۲۸۷	..... ۶-۱-۱- مزایای جوش کاری لیزر
۲۸۸	..... ۶-۱-۲- محدودیت ها و معایب جوش کاری لیزر
۲۸۹	..... ۶-۲- چیدمان و چگونگی انجام فرایند
۲۹۲	..... ۶-۳- سازوکارهای فرایند - حفره کلید و پلاسما
۳۰۱	..... ۶-۴- ملاحظات عملی
۳۰۲	..... ۶-۴-۱- توان
۳۰۲	..... ۶-۴-۱-۱- اثر توان پیوسته
۳۰۴	..... ۶-۴-۱-۲- توان پالسی
۳۰۸	..... ۶-۴-۲- مد و اندازه اثر
۳۰۸	..... ۶-۴-۳- قطبش
۳۱۰	..... ۶-۴-۴- طول موج
۳۱۱	..... ۶-۴-۵- سرعت
۳۱۳	..... ۶-۴-۶- موقعیت کانونی
۳۱۷	..... ۶-۴-۷- هندسه اتصال
۳۱۷	..... ۶-۴-۷-۱- آرایش اتصال

۳۲۲	..... اثر شکاف..... ۲-۷-۴-۶
۳۲۸	..... گاز محافظ و فشار گاز..... ۸-۴-۶
۳۲۸	..... ترکیب گاز محافظ..... ۱-۸-۴-۶
۳۳۵	..... اثر طراحی گاز محافظ..... ۲-۸-۴-۶
۳۳۸	..... اثر فشار گاز - با توجه به سرعت و محیط..... ۹-۴-۶
۳۳۸	..... اثرات سرعت..... ۱-۹-۴-۶
۳۳۸	..... محیط فشار کم..... ۲-۹-۴-۶
۳۴۰	..... فشارهای زیاد..... ۳-۹-۴-۶
۳۴۰	..... اثر خواص مواد..... ۱۰-۴-۶
۳۴۳	..... مواد فلزی..... ۱-۱۰-۴-۶
۳۵۰	..... سرامیک‌ها..... ۲-۱۰-۴-۶
۳۵۱	..... بَسپارها..... ۳-۱۰-۴-۶
۳۵۴	..... مواد غیرمشابه..... ۴-۱۰-۴-۶
۳۵۶	..... کاربردهای عمومی جوش کاری لیزری..... ۵-۶
۳۵۸	..... خودرو..... ۱-۵-۶
۳۶۱	..... جوش کاری پارچه‌های ساخته شده با الیاف..... ۲-۵-۶
۳۶۲	..... مثال سرمایه‌گذاری..... ۶-۶
۳۶۴	..... پیشرفت‌های جوش کاری لیزری..... ۷-۶
۳۶۴	..... جوش کاری لیزری تقویت شده با قوس..... ۱-۷-۶
۳۶۸	..... جوش لیزر دو پرتویی..... ۲-۷-۶
۳۶۹	..... پیمودن و چرخیدن پرتو..... ۳-۷-۶
۳۷۳	..... فصل هفتم: عملیات سطحی لیزری.....
۳۷۳	..... ۱-۷ مقدمه.....
۳۷۹	..... ۲-۷ عملیات حرارتی توسط پرتو لیزر.....
۳۸۴	..... ۱-۲-۷ ملاحظات عملی.....
۳۸۵	..... ۱-۱-۲-۷ خواص مواد.....

۳۸۹	.....	۲-۱-۲-۷	مشخصات پرتو
۳۹۶	.....	۳-۱-۲-۷	پارامترهای پردازش
۴۰۱	.....	۲-۲-۷	کاربردهای صنعتی سخت کاری لیزری
۴۰۱	.....	۱-۲-۲-۷	صنعت خودروسازی
۴۰۶	.....	۲-۲-۲-۷	قطعات ماشین آلات
۴۰۸	.....	۳-۲-۷	سرمایه گذاری سخت کاری لیزری
۴۰۸	.....	۱-۳-۲-۷	هزینه های سامانه
۴۰۸	.....	۲-۳-۲-۷	هزینه های عملیات
۴۱۰	.....	۳-۷	ذوب سطحی لیزری
۴۱۵	.....	۱-۳-۷	اصول فرایند
۴۱۶	.....	۱-۱-۳-۷	گرمایش
۴۱۶	.....	۲-۱-۳-۷	تشکیل حوضچه مذاب
۴۱۸	.....	۳-۱-۳-۷	سرمایش و انجماد
۴۲۰	.....	۲-۳-۷	ملاحظات عملی
۴۲۰	.....	۱-۲-۳-۷	خواص مواد
۴۲۱	.....	۲-۲-۳-۷	مشخصات پرتو
۴۲۱	.....	۳-۲-۳-۷	پارامترهای فرایند
۴۲۳	.....	۴-۲-۳-۷	بهینه سازی فرایند ذوب سطحی لیزر
۴۲۴	.....	۳-۳-۷	کاربردها
۴۲۶	.....	۱-۳-۳-۷	بادامک موتور خودرو
۴۲۸	.....	۲-۳-۳-۷	حساسیت زدایی از مناطق فاسد جوش در فولاد زنگ نزن
۴۲۹	.....	۳-۳-۳-۷	بوش محفظه موتور اصلی شاتل فضایی
۴۳۰	.....	۴-۷	آلیاژسازی سطحی لیزری
۴۳۳	.....	۱-۴-۷	روش های رسوب دادن مواد
۴۳۵	.....	۲-۴-۷	مقایسه با سایر روش ها
۴۳۸	.....	۳-۴-۷	پارامترهای بحرانی
۴۳۹	.....	۴-۴-۷	کاربرد



۴۴۰	..... ۵-۷- روکش کاری لیزری
۴۴۲	..... ۱-۵-۷- تفاوت بین روکش کاری، آلیاژسازی و لعاب کاری لیزری
۴۴۴	..... ۲-۵-۷- مقایسه بین روکش کاری لیزری و دیگر روش های پوشش دهی فلزی
۴۴۷	..... ۳-۵-۷- دلایل استفاده از روکش کاری لیزری
۴۴۹	..... ۴-۵-۷- روش های مختلف روکش کاری لیزری
۴۵۰	..... ۱-۴-۵-۷- روکش کاری لیزری دو مرحله ای
۴۵۲	..... ۲-۴-۵-۷- روکش کاری لیزری تک مرحله ای
۴۵۵	..... ۵-۵-۷- تجهیزات روکش کاری لیزری
۴۵۵	..... ۱-۵-۵-۷- انواع لیزرهای به کار رفته در فرایند روکش کاری لیزری
۴۶۴	..... ۲-۵-۵-۷- سامانه تغذیه پودر
۴۷۲	..... ۳-۵-۵-۷- نازل ها
۴۷۶	..... ۴-۵-۵-۷- سامانه موقعیت دهی
۴۷۶	..... ۶-۵-۷- ملاحظات عملی
۴۷۷	..... ۱-۶-۵-۷- رقیق شدگی
۴۷۸	..... ۲-۶-۵-۷- زاویه ترشوندگی و انرژی های آزاد سطحی
۴۸۰	..... ۳-۶-۵-۷- نرخ تغذیه پودر و سرعت فرایند
۴۸۱	..... ۴-۶-۵-۷- متغیرهای ترکیبی
۴۸۴	..... ۷-۵-۷- کاربردهای روکش کاری لیزری
۴۸۷	..... ۶-۷- رسوب دهی با لیزر
۴۹۰	..... ۱-۶-۷- سازوکار رسوب به کمک لیزر پالسی (PLD)
۴۹۳	..... ۲-۶-۷- تجهیزات اصلی در سامانه PLD
۴۹۴	..... ۱-۲-۶-۷- سامانه خلاء
۴۹۴	..... ۲-۲-۶-۷- لیزر
۴۹۶	..... ۳-۲-۶-۷- سامانه گرم کننده قطعه هدف
۴۹۷	..... ۴-۲-۶-۷- سامانه چرخاننده قطعه هدف
۴۹۸	..... ۵-۲-۶-۷- سامانه شبکه سازی پرتو لیزر
۴۹۹	..... ۶-۲-۶-۷- فیلترهای مکانیکی

۵۰۰	.....	PLD	محافظه سامانه	۷-۲-۶-۷
۵۰۱	.....	PLD	پارامترهای متداول در سامانه	۷-۶-۳
۵۰۱	.....	PLD	کاربردهای	۷-۶-۴
۵۰۱	.....		الف) لایه‌های اکسیدی رسانای شفاف (TCO)	
۵۰۲	.....		ب) لایه‌های ابر رسانای دمای بالا (HTS)	
۵۰۲	.....		پ) کربن شبه الماس (DLC)	
۵۰۳	.....		ت) فلزات	
۵۰۳	.....		ث) مواد زیستی	
۵۰۳	.....		ج) ترموالکتریک‌ها	
۵۰۴	.....		چ) پیزوالکتریک‌ها	
۵۰۴	.....		ح) پوشش‌های روان کار	
۵۰۴	.....		۷-۷-۷- سخت گردانی با شوک	
۵۱۱	.....		فصل هشتم: شکل دهی لیزری	
۵۱۱	.....		۸-۱- مقدمه	
۵۱۴	.....		۸-۲- فرایندهای شکل دهی لیزر	
۵۱۷	.....		۸-۲-۱- خمش یا سازوکار گرادیان دما (TGM)	
۵۲۱	.....		۸-۲-۲- سازوکار کمانش (BM)	
۵۲۵	.....		۸-۲-۳- سازوکار بشکه‌ای شدن (UM)	
۵۲۷	.....		۸-۳- ملاحظات عملی	
۵۲۷	.....		۸-۳-۱- پارامترهای پردازش لیزر	
۵۲۷	.....		۸-۳-۱-۱- تاثیر پارامترهای لیزر	
۵۳۵	.....		۸-۳-۱-۲- تاثیر هندسه ورق	
۵۳۷	.....		۸-۳-۱-۳- تاثیر خواص مواد	
۵۴۲	.....		۸-۳-۲- نرخ خم شدن و اثرات لبه	
۵۴۲	.....		۸-۳-۲-۱- نرخ خم شدن	
۵۴۸	.....		۸-۳-۲-۲- تاثیرات لبه	
۵۵۰	.....		۸-۳-۳- ریزساختار و خواص قطعات شکل داده شده با لیزر	

۵۵۵	۴-۸- کاربردهای شکل دهی لیزری
۵۵۵	۴-۸-۱- اصلاح زوایای خم
۵۵۶	۴-۸-۲- شکل دهی لیزری شکل های پیچیده
۵۵۷	۴-۸-۳- نمونه سازی سریع
۵۵۸	۴-۸-۴- صاف کردن پوسته خودرو
۵۵۸	۴-۸-۵- ساخت قطعات میکرونی
۵۵۹	۴-۸-۶- شکل دهی لیزر در فضا
۵۵۹	۸-۵- پیشرفت های حاصله در شکل دهی لیزر
۵۵۹	۸-۵-۱- شکل دهی لیزری لوله ها
۵۶۲	۸-۵-۲- شکل دهی لیزری با اعمال نیروی اولیه (پیش تنش)
۵۶۳	۸-۵-۳- شکل دهی لیزر با دو پرتو
۵۶۴	۸-۵-۴- شکل دهی لیزری مواد کامپوزیتی
۵۶۹	فصل نهم: نمونه سازی سریع و تولید کم حجم
۵۶۹	۹-۱- مقدمه
۵۷۱	۹-۲- دامنه فرایندها
۵۷۱	۹-۲-۱- سبک های ساخت
۵۷۲	۹-۲-۲- طبقه بندی روش های نمونه سازی سریع بر حسب ماده
۵۷۲	۹-۳- طراحی به کمک رایانه
۵۷۵	۹-۴- موضوعات ساخت لایه ای
۵۷۵	۹-۴-۱- عمومی
۵۷۶	۹-۴-۲- گام های پله ای
۵۷۶	۹-۴-۳- انتخاب ضخامت لایه
۵۷۶	۹-۴-۴- دقت
۵۷۷	۹-۴-۵- جهت اجزاء
۵۷۷	۹-۴-۶- ساختارهای مورد پشتیبانی

- ۵-۹-۵۷۸..... فرایندهای نمونه‌سازی سریع با لیزر..... ۵۷۸
- ۵-۹-۵۷۸-۱-۱-۵-۹..... پرتودهی نوری پویا..... ۵۷۸
- ۵-۹-۵۷۸-۱-۱-۵-۹..... طراحی الگو..... ۵۷۸
- ۵-۹-۵۷۹-۲-۱-۵-۹..... آماده‌سازی داده‌ها و برش الگو..... ۵۷۹
- ۵-۹-۵۷۹-۳-۱-۵-۹..... ساخت الگو با پرتودهی نوری پویا..... ۵۷۹
- ۵-۹-۵۸۱-۴-۱-۵-۹..... پخت بعدی..... ۵۸۱
- ۵-۹-۵۸۲-۵-۱-۵-۹..... تغییرات فرایند..... ۵۸۲
- ۵-۹-۵۸۴-۶-۱-۵-۹..... مزایا و معایب پرتودهی نوری پویا..... ۵۸۴
- ۵-۹-۵۸۵-۲-۵-۹..... تف‌جوش انتخابی لیزر..... ۵۸۵
- ۵-۹-۵۸۵-۱-۲-۵-۹..... تشریح فرایند..... ۵۸۵
- ۵-۹-۵۸۶-۲-۲-۵-۹..... دقت..... ۵۸۶
- ۵-۹-۵۸۷-۳-۲-۵-۹..... تغییرات فرایند..... ۵۸۷
- ۵-۹-۵۸۷-۴-۲-۵-۹..... مزایا و معایب تف‌جوش انتخابی لیزر..... ۵۸۷
- ۵-۹-۵۸۹-۳-۵-۹..... ساخت قطعات چندلایه..... ۵۸۹
- ۵-۹-۵۸۹-۱-۳-۵-۹..... تشریح فرایند..... ۵۸۹
- ۵-۹-۵۸۹-۲-۳-۵-۹..... دقت..... ۵۸۹
- ۵-۹-۵۹۰-۳-۳-۵-۹..... تغییرات فرایند..... ۵۹۰
- ۵-۹-۵۹۱-۴-۳-۵-۹..... مزایا و معایب ساخت قطعات چندلایه..... ۵۹۱
- ۵-۹-۵۹۲-۴-۵-۹..... ریخته‌گری مستقیم لیزری یا رسوب‌نشانی فلزی مستقیم..... ۵۹۲
- ۵-۹-۵۹۲-۱-۴-۵-۹..... تشریح فرایند..... ۵۹۲
- ۵-۹-۵۹۶-۲-۴-۵-۹..... دقت..... ۵۹۶
- ۵-۹-۵۹۶-۳-۴-۵-۹..... تغییرات فرایند..... ۵۹۶
- ۵-۹-۵۹۷-۶-۹-۹..... ملاحظات عملی..... ۵۹۷
- ۵-۹-۵۹۸-۱-۶-۹-۹..... پارامترهای کنترل شده توسط کارور و یا رایانه..... ۵۹۸
- ۵-۹-۵۹۹-۱-۱-۶-۹-۹..... کنترل روبش لیزر..... ۵۹۹
- ۵-۹-۶۰۳-۲-۱-۶-۹-۹..... توان لیزر..... ۶۰۳
- ۵-۹-۶۰۴-۳-۱-۶-۹-۹..... لایه نشانی مکانیکی پودر..... ۶۰۴

۶۰۶	..... کنترل اتمسفری..... ۴-۱-۶-۹
۶۰۷	..... جریان هوا بر سطح پودر..... ۵-۱-۶-۹
۶۰۷	..... گرم کننده‌ها..... ۶-۱-۶-۹
۶۰۹	..... پارامترهای مخصوص دستگاه..... ۲-۶-۹
۶۰۹	..... لیزر..... ۱-۲-۶-۹
۶۱۰	..... شعاع روبش..... ۲-۲-۶-۹
۶۱۱	..... خواص ماده..... ۳-۶-۹
۶۱۱	..... ویسکوزیته..... ۱-۳-۶-۹
۶۱۴	..... کشش سطحی..... ۲-۳-۶-۹
۶۱۶	..... اندازه ذره..... ۳-۳-۶-۹
۶۱۸	..... توزیع اندازه..... ۴-۳-۶-۹
۶۲۱	..... شکل ذره..... ۵-۳-۶-۹
۶۲۱	..... هدایت گرمایی..... ۶-۳-۶-۹
۶۲۲	..... گرمای ویژه..... ۷-۳-۶-۹
۶۲۳	..... خواص تابشی..... ۸-۳-۶-۹
۶۲۸	..... روش‌های تولید سریع..... ۷-۹
۶۲۹	..... قالب‌گیری چسب سیلیکونی..... ۱-۷-۹
۶۲۹	..... ریخته‌گری دقیق..... ۲-۷-۹
۶۳۰	..... ریخته‌گری ماسه‌ای..... ۳-۷-۹
۶۳۰	..... ریخته‌گری مستقیم لیزری..... ۴-۷-۹
۶۳۱	..... ابزارسازی با نمونه‌سازی سریع..... ۵-۷-۹
۶۳۲	..... کاربردها..... ۸-۹
۶۳۳	..... نتایج..... ۹-۹
۶۳۵	..... منابع و مراجع.....



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: میدان‌های الکتریکی (E) و مغناطیسی (H) در یک موج الکترومغناطیس قطبیده صفحه‌ای ..... ۵
- شکل ۲-۱: طیف الکترومغناطیس ..... ۶
- شکل ۳-۱: مدارهای فرعی که یک الکترون می‌تواند اشغال کند. .... ۱۲
- شکل ۴-۱: تابش فوتون به دلیل سقوط الکترون از مدار فرعی پر انرژی به کم انرژی ..... ۱۳
- شکل ۵-۱: تاباندن فوتون به دلیل فرستادن الکترون از مدار کم انرژی به پر انرژی. .... ۱۴
- شکل ۶-۱: برخورد پرتو به ماده و نمایش پدیده‌های (الف) جذب؛ (ب) گسیل خود به خودی؛ (پ) گسیل القایی (برانگیخته). .... ۱۷
- شکل ۷-۱: طرح کلی عملکرد لیزر: (الف) دمش یا تحریک؛ (ب) کسب القایی؛ (ج) نمودار ارتعاشات تابش همدوس ایجاد شده در اثر گسیل القایی ..... ۱۸
- شکل ۸-۱: طرح‌واره توزیع جمعیت یک سامانه دارای دو تراز انرژی: (الف) در حال تعادل ترمودینامیکی؛ (ب) پس از ایجاد جمعیت معکوس ..... ۲۰
- شکل ۹-۱: طرح‌واره جمعیت معکوس در سامانه‌های دارای ۳ تراز انرژی؛ (ب) ۴ تراز انرژی ..... ۲۰
- شکل ۱۰-۱: طرح‌واره سامانه لیزر. .... ۲۱
- شکل ۱۱-۱: طرح‌واره مراحل تقویت‌سازی در طی عملیات: (الف) شرایط غیر برانگیخته اولیه (عدم وجود لیزر)؛ (ب) ایجاد حالت برانگیخته با دمش نوری؛ (پ) آغاز گسیل القایی؛ (ت) تقویت‌سازی به وسیله گسیل القایی؛ (ث) ادامه تقویت‌سازی به علت بازتابش مکرر از آینه‌ها که سبب خروج لیزر از یکی از آینه‌ها می‌گردد. .... ۲۴

- شکل ۱-۱۲: شکل‌های مختلف آینه‌ها برای کاواک‌های تشدیدکننده (R شعاع آینه است):  
 (الف) صفحات موازی؛ (ب) هم مرکز؛ (پ) هم کانون؛ (ت) یک تخت و یک آینه کاو  
 (نیمه کروی). ..... ۲۵
- شکل ۱-۱۳: حالت گرافیکی وضعیت‌های پایدار بودن کاواک‌های تشدیدکننده با دو آینه  
 دارای شعاع‌ها و انحنای مختلف. .... ۲۷
- شکل ۱-۱۴: ساختار یک کاواک لیزری: (الف) پایدار؛ (ب) ناپایدار؛ (پ) پایدار با پنجره  
 آیرودینامیکی. .... ۲۹
- شکل ۱-۱۵: مفهوم عدد فرسنتل ..... ۳۰
- شکل ۱-۱۶: طرح‌واره جهت ترجیحی انتقال حرارت در سه نوع متداول لیزرهای حالت  
 جامد: (الف) دیسکی؛ (ب) میله‌ای؛ (پ) فیبری. .... ۳۱
- شکل ۱-۱۷: طیف بسامدی در خروجی لیزر: (الف) مدهای کاواک لیزری؛ (ب) مدهای  
 محوری در خروجی لیزر. .... ۳۴
- شکل ۱-۱۸: اجزای اصلی وسعت‌دهنده برای بهبود هم‌راستایی. .... ۳۶
- شکل ۱-۱۹: طرح کلی مفهوم همدوسی (الف) نور همدوس، (ب) نور غیر همدوس. .... ۳۸
- شکل ۱-۲۰: شکل یک پرتو گاوسی. .... ۳۹
- شکل ۱-۲۱: مدهای عرضی مختلف. .... ۴۱
- شکل ۱-۲۲: نمایی از توزیع شدت مدهای مختلف لیزر. .... ۴۱
- شکل ۱-۲۳: مدهای زمانی برای عملیات لیزر: (الف) مد موج پیوسته، (ب) مد پالسی. .... ۴۳
- شکل ۱-۲۴: شکل پالس نرمال با تعداد قله‌های با دامنه و طول مدت غیر یکنواخت (به طور  
 نوعی در دامنه میکرو ثانیه). .... ۴۴
- شکل ۱-۲۵: شکل پالس نرمال با تعداد قله‌های با دامنه و طول مدت غیر یکنواخت. .... ۴۶
- شکل ۱-۲۶: طرح‌واره بازتاب پرتو برخوردی. .... ۴۷
- شکل ۱-۲۷: نور قطبیده نوع P ..... ۴۷
- شکل ۱-۲۸: نور قطبیده نوع S ..... ۴۷
- شکل ۱-۲۹: (الف) قطبش خطی (صفحه‌ای) و (ب) قطبش دایره‌ای. .... ۴۹



- شکل ۱-۳۰: لیزرهای مورد استفاده در فراوری مواد دسته‌بندی بر اساس نوع ماده فعال..... ۵۰
- شکل ۱-۳۱: انتخاب لیزرهای تجاری با طول موج و توان متوسط مشخص شده است. در پس‌زمینه، کاربردها نشان داده شده است (خطوط، طول موج خروجی اصلی را نشان می‌دهد و آنهایی که سایه‌دار هستند، در فراوری مواد صنعتی استفاده می‌شوند)..... ۵۱
- شکل ۱-۳۲: مدهای نوسانی مولکول  $CO_2$ : (الف) متقارن؛ (ب) خمش؛ و (پ) نامتقارن..... ۵۳
- شکل ۱-۳۳: ترازهای انرژی در عملیات لیزر  $CO_2$ ..... ۵۴
- شکل ۱-۳۴: پالس‌های محصور یا بهبود یافته..... ۵۵
- شکل ۱-۳۵: انواع لیزرهای  $CO_2$ ، (الف) لیزرهای جریان آهسته؛ (ب) لیزرهای جریان عرضی؛ (پ) لیزرهای جریان طولی سریع..... ۵۷
- شکل ۱-۳۶: ترازهای انرژی لیزر اگزایمر..... ۶۲
- شکل ۱-۳۷: ساختار اصلی لیزر اگزایمر با تخلیه الکتریکی پیش یونش و مدار تطبیق‌یافته..... ۶۳
- شکل ۱-۳۸: طرح طرح‌واره سامانه لیزر Nd:YAG..... ۶۶
- شکل ۱-۳۹: نمایی از گذار لیزری در لیزر چهار تراز Nd:YAG..... ۶۷
- شکل ۱-۴۰: طیف جذبی کریستال Nd:YAG و مقایسه طیف‌های نشر فلش لامپ با لیزر دیودی..... ۶۹
- شکل ۱-۴۱: طرح‌واره محفظه دمش لیزر Nd:YAG لامپی..... ۷۱
- شکل ۱-۴۲: طرح‌واره لیزر Nd:YAG دمش با لیزر دیودی (دمش عرضی)..... ۷۲
- شکل ۱-۴۳: طرح‌واره لیزر Nd:YAG دمش دیودی (دمش انتهایی)..... ۷۲
- شکل ۱-۴۴: تمهیدات ممکن برای دستیابی به توان بیش از ۱ kW با لیزر Nd:YAG، (الف) تقویت‌کننده توان تشدیدکننده، (ب) فیبرهای متصل شده..... ۷۴
- شکل ۱-۴۵: ساختار کلی لیزر Nd:YAG، (الف) با دمش فلش لامپ، (ب) با دمش لیزر دیودی..... ۷۵
- شکل ۱-۴۶: ماهیت سوزنی شکل پالس‌ها (الف) Nd:YAG (ب) Nd:glass..... ۸۰
- شکل ۱-۴۷: ساختار اصلی یک لیزر دیسکی..... ۸۱
- شکل ۱-۴۸: به هم وصل شدن نور در داخل یک فیبر..... ۸۳

- شکل ۱-۴۹: متصل‌کننده فیبر نوری. ۸۳.....
- شکل ۱-۵۰: سر متمرکزکننده فیبر نوری. ۸۴.....
- شکل ۱-۵۱: فیبر نوری مورد استفاده در کاربردهای صنعتی. ۸۵.....
- شکل ۱-۵۲: ساختار اصلی یک لیزر فیبری. ۸۸.....
- شکل ۱-۵۳: نمودار باند انرژی برای اتصال p-n: (الف) مدار باز؛ (ب) بایاس معکوس؛ (ج) بایاس مستقیم. ۹۰.....
- شکل ۱-۵۴: ترکیب مجدد حامل‌های بار که سبب انتشار فوتون می‌شود (بایاس مستقیم). ۹۲.....
- شکل ۱-۵۵: نمودار خروجی نور بر حسب جریان برای لیزر نیمه‌رسانا. ۹۲.....
- شکل ۱-۵۶: طرح‌واره‌ای ساختار عمومی لیزر دیودی نیمه‌رسانا مبتنی بر پیوندهای همگن. ۹۳.....
- شکل ۱-۵۷: مقایسه منابع مختلف لیزری بر پایه نمودار کیفیت در مقابل توان پرتو. ۹۵.....
- شکل ۱-۵۸: طرح‌واره لیزر دیود نیمه‌رسانا نواری. ۹۶.....
- شکل ۱-۵۹: توزیع شکاف نوار و سطوح انرژی‌های مربوط به InGaAs-QW تعبیه شده در یک لایه موج‌بر AlGaAs. ۹۷.....
- شکل ۱-۶۰: طرح‌واره موج‌بر سه لایه‌ای: ساختار اصلی لیزرهای دیودی. ۹۹.....
- شکل ۱-۶۱: طرح‌واره ساختار لایه‌ای لیزر دیودی توان بالا. ۱۰۱.....
- شکل ۱-۶۲: مقایسه انواع مختلف لیزر در زمینه‌های، (الف) توان موجود بر حسب طول موج، (ب) هزینه اصلی، (پ) هزینه عملیات. ۱۰۲.....
- شکل ۱-۲: پرتو الکترومغناطیس برخوردی با فصل مشترک جامد-هوا، با فاز و دامنه موج  $E$ ، بسامد  $W$  و جهت حرکتی  $Z$ . ۱۰۷.....
- شکل ۲-۲: درجه یونش بر حسب تابعی از دما. ۱۱۰.....
- شکل ۲-۳: ترتیب وقایع مختلف جذب با توان جذب‌شده. ۱۱۱.....
- شکل ۲-۴: بازتاب‌پذیری بر حسب زاویه برخورد برای یک نارسانا. ۱۱۶.....
- شکل ۲-۵: بازتاب‌پذیری بر حسب زاویه برخورد برای فلزات. ۱۱۸.....
- شکل ۲-۶: تغییرات بازتاب با طول موج برای مواد مختلف (طول موج دولیزر مهم  $CO_2$  و Nd-YAG) در شکل رسم شده است. ۱۲۲.....

- شکل ۷-۲: تغییرات بازتاب با دما برای تابش  $1.06\mu\text{m}$  ..... ۱۲۳
- شکل ۸-۲: لایه سطحی به عنوان یک تداخل جفت شده (پوشش‌های ضدبازتابی). اگر  $2d / \cos\phi = [(2n + 1) / 2] \lambda$  تداخل تخریبی پرتو بازتابش شده وجود خواهد داشت ..... ۱۲۴
- شکل ۹-۲: جذب برحسب ضخامت لایه اکسیدی روی فولاد برای تابش  $1.06\mu\text{m}$  ..... ۱۲۴
- شکل ۱۰-۲: اثرات مختلف برهمکنش لیزر با ماده: (الف) گرمایش؛ (ب) ذوب سطحی؛ (پ) تبخیر سطحی؛ (ت) تشکیل پلاسما؛ و (ث) فرسایش ..... ۱۲۷
- شکل ۱۱-۲: طرح‌واره تغییرات عمق ذوب نسبت به الف (زمان؛ و ب) توان (فلش‌ها بیان‌گر آغاز ذوب سطحی و تبخیر در طی تابش پیوسته لیزر هستند) ..... ۱۲۸
- شکل ۱۲-۲: طرح‌واره (الف) جفت‌شدگی پلاسما و (ب) حفاظ پلاسما ..... ۱۲۹
- شکل ۱-۳: طرح‌واره‌ای از فرایند ریخته‌گری فلزات ..... ۱۳۷
- شکل ۲-۳: طرح‌واره‌ای از فرایندهای مختلف تولید: الف) نورد؛ ب) آهنگری؛ پ) اکستروژن؛ ت) کشش؛ ث) شکل‌دهی ورق؛ ج) متالورژی پودر (فشردن و تف‌جوشی)؛ و چ) قالب‌گیری ..... ۱۴۰
- شکل ۳-۳: طرح‌واره‌ای از فرایندهای مختلف اتصال: الف) جوش‌کاری قوسی؛ ب) اتصال مکانیکی؛ پ) چسباندن ..... ۱۴۵
- شکل ۴-۳: طرح‌واره‌ای از هندسه متعامد و تشکیل تراشه در طول ماشین‌کاری ..... ۱۴۶
- شکل ۵-۳: طرح‌واره‌ای از برخی از فرایندهای ماشین‌کاری سنتی مرسوم، الف) تراش‌کاری، ب) سوراخ‌کاری، پ) فرزکاری، ت) سنگ‌زنی ..... ۱۴۸
- شکل ۶-۳: فرایند ریخته‌گری لیزری الف) فلز ریخته‌گری شده؛ ب) فلز ریخته‌گری شده و قالب؛ پ) قالب ..... ۱۵۳
- شکل ۷-۳: نمونه‌هایی از قطعات شکل‌دهی شده با لیزر ..... ۱۵۵
- شکل ۸-۳: فرایندهای نمونه‌سازی سریع مبتنی بر لیزر، الف) پرتودهی نوری پویا، ب) تف‌جوش انتخابی، پ) ساخت قطعات چندلایه، ت) شکل‌دهی پودر با پرتوی لیزر ..... ۱۵۶
- شکل ۹-۳: طرح‌واره‌ای از جوش‌کاری نفوذی لیزری ..... ۱۵۸

- شکل ۱۰،۳: طرح‌واره‌ای از فرایندهای ماشین‌کاری لیزری: الف) سوراخ‌کاری لیزری (ماشین‌کاری یک بعدی)؛ ب) برش‌کاری لیزری (ماشین‌کاری دو بعدی)؛ پ) فرز‌کاری لیزری (ماشین‌کاری سه بعدی)؛ ت) ماشین‌کاری به کمک لیزر. .... ۱۵۹
- شکل ۱۱-۳: نمودار انتخاب مواد برای ریخته‌گری ..... ۱۶۴
- شکل ۱۲-۳: نمودار انتخاب مواد نشان‌دهنده رابطه بین اندازه قطعه و پیچیدگی آن برای انواع فرایندهای تولید. .... ۱۶۷
- شکل ۱۳-۳: توانایی فرایندهای مختلف تولید برای دستیابی به کوچک‌ترین ابعاد قطعه. ۱۶۸
- شکل ۱۴-۳: تلرانس‌های ابعادی به دست آمده در انواع فرایندهای تولید. .... ۱۷۱
- شکل ۱۵-۳: زبری سطح به دست آمده برای فرایندهای مختلف تولید. .... ۱۷۳
- شکل ۱۶-۳: طرح‌واره‌ای از انواع هزینه‌های ماشین‌کاری با سرعت برش. .... ۱۷۵
- شکل ۱۷-۳: اطلاعات مربوط به فروش لیزر غیردیودی در سراسر جهان برای کاربردهای مختلف. .... ۱۷۶
- شکل ۱-۴: روش‌های مختلف سوراخ‌کاری. .... ۱۸۴
- شکل ۲-۴: الف) سوراخ‌کاری لیزری ضربه‌ای ماده کامپوزیتی Kevlar/Epoxy (قطر سوراخ ۱۰۰ میکرون) ب) ریزماشین‌کاری لیزری ماده PET به روش سوراخ‌کاری چرخشی. ۱۸۵
- شکل ۳-۴: تغییرات زمانی عمق حفره کلیدی. .... ۱۸۷
- شکل ۴-۴: فرایندهای فیزیکی در طی سوراخ‌کاری ضربه‌ای لیزری، الف) تشکیل حوضچه مذاب، ب) بیرون راندن (پاشیدن) مذاب، پ) تشکیل لایه منجمد شده. .... ۱۸۸
- شکل ۵-۴: چیدمان اپتیکی در هد چرخشی. .... ۱۹۱
- شکل ۶-۴: چرخش پرتو با استفاده از هد چرخشی ILT. .... ۱۹۱
- شکل ۷-۴: تجهیزات چرخش پرتو. .... ۱۹۲
- شکل ۸-۴: مثال‌هایی از کیفیت سوراخ‌های چرخشی ایجاد شده با لیزر: الف) سوراخ رشته‌ای که نشان‌دهنده تطبیق‌پذیری حفره‌های لیزری چرخشی است و می‌تواند کمابیش شکلی ایجاد کند؛ و ب) سوراخ چرخشی مورد استفاده در انژکتور سوخت دیزل. .... ۱۹۳

- شکل ۴-۹: برش عمودی از سطح مقطع حفره ایجاد شده به وسیله لیزر پالسی یاقوت در صفحه آلومینیومی با ضخامت  $1/6$  mm در سه انرژی پالسی مختلف. ۱۹۴.....
- شکل ۴-۱۰: تغییرات عمق نفوذ با تعداد پالس‌ها در طی سوراخ‌کاری لیزری فولاد نرم با دوشکل پالسی مختلف: الف) زمان پالس  $40 \mu s$ ، شدت توان  $330 \text{ kWJ}^{-1}$ ؛ ب) زمان پالس  $15 \mu s$ ، شدت توان  $1/3 \text{ MWJ}^{-1}$ . ۱۹۵.....
- شکل ۴-۱۱: تغییرات زمان سوراخ‌کاری با فشار گاز کمکی اکسیژن برای ورق مسی به ضخامت  $0.75$  mm در توان‌های مختلف لیزری. ۱۹۸.....
- شکل ۴-۱۲: تغییرات زمان سوراخ‌کاری با فشار گاز کمکی آرگون برای ورق آلیاژ Al6061 به ضخامت  $1/58$  mm در توان‌های مختلف لیزری. ۱۹۸.....
- شکل ۴-۱۳: هندسه معمولی حفره ایجاد شده با لیزر. ۲۰۰.....
- شکل ۴-۱۴: هندسه معمولی حفره ایجاد شده با لیزر. ۲۰۰.....
- شکل ۴-۱۵: مقطع عمودی حفره ایجاد شده با سوراخ‌کاری لیزری در آلیاژ IN718. نشان‌دهنده حفره مخروطی شکل. ۲۰۱.....
- شکل ۴-۱۶: تغییرات مخروطی‌شدن سوراخ برحسب ضخامت در ماده فضایی سوراخ‌کاری شده با لیزر Nd:YAG پالسی با انرژی پالسی  $15 \text{ J}$  و دوره پالس  $1/4 \text{ ms}$ . ۲۰۱.....
- شکل ۴-۱۷: تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از سوراخ ایجاد شده به وسیله لیزر در آلیاژ نمونیک ۲۶۳، با استفاده از گازهای کمکی، الف) آرگون و ب) اکسیژن. ۲۰۲.....
- شکل ۴-۱۸: تصویر میکروسکوپی نوری از آرایش سوراخ‌های ایجاد شده به وسیله لیزر در آلیاژ نمونیک ۲۶۳؛ الف) بدون پوشش ضد پاشش و با استفاده از گاز کمکی اکسیژن، ب) با استفاده از پوشش ضد پاشش و گاز کمکی اکسیژن، پ) بدون پوشش ضد پاشش و گاز کمکی هوا، ت) با استفاده از پوشش ضد پاشش و گاز کمکی هوا. ۲۰۳.....
- شکل ۴-۱۹: حفره سردکننده ایجاد شده با لیزر در یک سوپر آلیاژ پایه نیکل با پوشش سد حرارتی (TBC) پلاسما اسپری شده. ۲۰۶.....
- شکل ۴-۲۰: حفره‌های ایجاد شده با لیزر در سر جوهرافشان چاپگر. ۲۰۷.....

- شکل ۴-۲۱: ماشین کاری پرتو لیزر با: الف) پالس‌های طولانی (۱۵ ns)؛ ب) پالس‌های کوتاه (۱۵۰ fs). ..... ۲۱۰
- شکل ۴-۲۲: دستگاه فمتوفاب، طراحی شده برای ریزماشین‌کاری و سوراخ‌کاری سریع و دقیق در فضای سه بعدی برای کاربردهای صنعتی. .... ۲۱۰
- شکل ۴-۲۳: سوراخ‌کاری با لیزر پالسی در ورق آلومینیومی با ضخامت ۰/۳ mm در مجاورت، الف) آب، ب) هوا. .... ۲۱۲
- شکل ۵-۱: چیدمان کلی برش لیزری؛ الف) استفاده از عدسی‌های انتقال‌دهنده و ب) استفاده از عدسی‌های بازتابنده. .... ۲۲۰
- شکل ۵-۲: طرح‌واره کلی از فرایند برش‌کاری لیزری با جت گازی هم‌محور برای راندن مذاب. .... ۲۲۳
- شکل ۵-۳: حجم ذوب شده و برداشته شده در طی فرایند برش. .... ۲۲۵
- شکل ۵-۴:  $P/t$  بر حسب  $V$  برای فولاد نرم با گاز کمکی اکسیژن. .... ۲۲۵
- شکل ۵-۵:  $P/t$  بر حسب  $V$  برای فولاد زنگ‌نزن با گاز کمکی اکسیژن و نیتروژن. .... ۲۲۶
- شکل ۵-۶:  $P/t$  بر حسب  $V$  برای تیتانیوم با گاز کمکی اکسیژن و آرگون. .... ۲۲۶
- شکل ۵-۷: برهمکنش‌ها در قسمت جلویی برش؛ الف) انتقال انرژی نوری و ب) انتقال جرم و گشتاور. .... ۲۳۱
- شکل ۵-۸: تشکیل پله‌ای خط‌بندی. .... ۲۳۱
- شکل ۵-۹: خطوط روی وجه برش یک فولاد زنگ‌نزن با توان ۳ kW و  $1/5 \text{ m min}^{-1}$  سرعت. .... ۲۳۲
- شکل ۵-۱۰: فرایند ایجاد شکاف به روش اونیل. .... ۲۳۲
- شکل ۵-۱۱: طرح‌واره‌ای از مراحل سازوکار برش لیزر؛ الف) گرمادهی؛ ب) سوخت؛ پ) خاموشی؛ ت) دوباره‌سوزی؛ ث) تولید خطوط مقطع برش. .... ۲۳۴
- شکل ۵-۱۲: تشکیل خط‌بندی به دلیل سوختن کناره‌ای. .... ۲۳۵

- شکل ۵-۱۳: نمای بالایی و زیرین برش‌ها در فولاد کم‌کربن در سرعت‌های برش‌کاری مختلف. خط‌بندی‌های درشت و خشن شکل گرفته در سرعت‌های پایین‌تر آشکارا قابل مشاهده است. ۲۳۵.....
- شکل ۵-۱۴: ساختار آزمایشگاهی برش‌کاری لیزری به روش شکست کنترل‌شده. ۲۳۸.....
- شکل ۵-۱۵: سطح جدایش و سطح مقطع مسیر برش: الف) سرعت برش ۲ mm/s؛ و ب) سرعت برش ۱۰ mm/s. ۲۳۹.....
- شکل ۵-۱۶: سطح مقطع زیرلایه‌های سرامیکی آلومینا برش‌کاری شده با روش‌های، الف) شکست کنترل شده، ب) حکاکی لیزری و پ) ذوب و دمش. ۲۴۰.....
- شکل ۵-۱۷: برش روی موی سر انسان با استفاده از یک لیزر اگزایمر. ۲۴۱.....
- شکل ۵-۱۸: فرایند LASOX: الف) چیدمان کلی و ب) نرخ برش‌کاری برای فولاد کم‌کربن. ۲۴۴.....
- شکل ۵-۱۹: سرعت برش بر حسب توان لیزر برای پرتوهای لیزر متداول و چرخشی. ۲۴۷.....
- شکل ۵-۲۰: اثر توان لیزر بر الف) عرض برش و ب) زبری لبه برش برای سه سرعت برش مختلف (ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی با ضخامت ۱/۲ mm و لیزر Nd:YAG). ۲۴۸.....
- شکل ۵-۲۱: اثر توان لیزر بر نرخ جدایش در شکست کنترل شده برای سرامیک آلومینا با خلوص بالای ۹۹ درصد و ضخامت ۰/۷ mm. ۲۴۹.....
- شکل ۵-۲۲: توان مورد نیاز برای جدایش بر حسب ضخامت در طی شکست کنترل شده سرامیک آلومینا با خلوص بالا با نرخ جدایش ۳۰۵ mm/min. ۲۴۹.....
- شکل ۵-۲۳: اثر قطبش با جهت برش روی عملکرد برش. ۲۵۱.....
- شکل ۵-۲۴: تغییرات عرض شکاف با سرعت برش. ۲۵۳.....
- شکل ۵-۲۵: برش لیزری یک بلوک با ضخامت چند سانتی‌متری. ۲۵۴.....
- شکل ۵-۲۶: ساختار پرتو با یک عدسی دو کانونی. ۲۵۵.....
- شکل ۵-۲۷: تغییرات سرعت برش با فشار نازل اکسیژن. ۲۵۷.....
- شکل ۵-۲۸: اثر تداخل میدان‌های گرادیان چگالی (DGFs) بر تمرکز پرتوی لیزر. ۲۵۷.....
- شکل ۵-۲۹: ساختمان یک جت صوتی پرتابی. ۲۵۸.....