

ساخت سریع قالب‌های تزریق پلاستیک به روش تفجوشی لیزری پودرهای فولادی

عبدالرضا سیم‌چی (استاد یار)

دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

در این پژوهش ماده و روشی نو برای ساخت قالب‌های تزریق مواد با استفاده از روش تفجوشی لیزری ارائه شده است. در این فرایند شکل قطعه توسط نرم‌افزارهای سه بعدی CAD مانند Pro/Engineer مدل‌سازی می‌شود. سپس اطلاعات سطوح توسط نرم‌افزارهای مناسب به فایل STL تبدیل شده و در نهایت به لایه‌های با ضخامت کم ($50\ \mu\text{m}$) تقسیم می‌شوند. پس از ارسال داده‌های رایانه‌یی به دستگاه تفجوشی مستقیم با لیزر^۱ عملیات ساخت به صورت لایه به لایه و از طریق بارگیری پودر و اتصال ذرات به هم صورت می‌گیرند. پس از اتمام کار، محصول را می‌توان برای افزایش وزن مخصوص و حذف حفره‌های داخلی در کوره‌هایی با اتمسفر محافظ تفجوشی کرد. در این نوشتار رفتار تفجوشی، خواص مکانیکی و ریز ساختار آلیاژ نو ارائه می‌شود. همچنین موارد کاربرد آن به صورت مطالعه‌ی موردی با در نظر گرفتن جنبه‌های فنی و اقتصادی تولید مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

مقدمه

نمونه‌سازی و تولید قطعات صنعتی با استفاده از روش‌های مرسوم سنتی معمولاً فرایندی زمان‌بر است. از طرف دیگر، رشد صنعتی با شتابی بی‌مانند نسبت به گذشته در حال افزایش است. این رشد نه تنها مستلزم ازدیاد سرعت تولید، بلکه نیازمند ارائه‌ی طرح‌های نو و متنوع نیز هست. در نتیجه، صنعت نیازمند ایجاد روش‌های نو با ویژگی‌های خاص به منظور عرضه‌ی محصولات جدید به بازار در حداقل زمان است.^[۱] گسترش کاربرد رایانه‌ها در تمام فرایندهای ساخت و تولید گواهی‌گویی از نیاز صنعت به بهبود کیفیت، افزایش بهره‌وری و کاهش زمان اجرای طرح‌های پیچیده است.

در دهه‌ی گذشته سیستم‌های طراحی رایانه‌یی و مهندسی معکوس نقش به‌سزایی در افزایش بهره‌وری و سرعت تولید ایفا نموده‌اند. با این وجود، شرایط کنونی تجارت جهانی موجب شده است که سازندگان و طراحان به روش‌های نمونه‌سازی، ابزارسازی و قطعه‌سازی سریع متمایل شوند، به طوری که پس از گذشت ۱۵ سال از عمر این فناوری، بازار مصرف آن به بیش از $۱/۳$ میلیارد دلار بالغ شده است.^[۲] از میان تمام فرایندهای موجود، فناوری تفجوشی پودر مواد با لیزر از معدود تکنیک‌هایی است که طی آن می‌توان به طور مستقیم قطعات صنعتی را ساخت.^[۳] ویژگی اصلی این روش امکان تولید قطعاتی با اشکال بسیار پیچیده در زمان کوتاه است. با این وجود، مواد مصرفی و محصولات تولیدشده به این روش هنوز نیازهای صنعت را برآورده نمی‌کند.

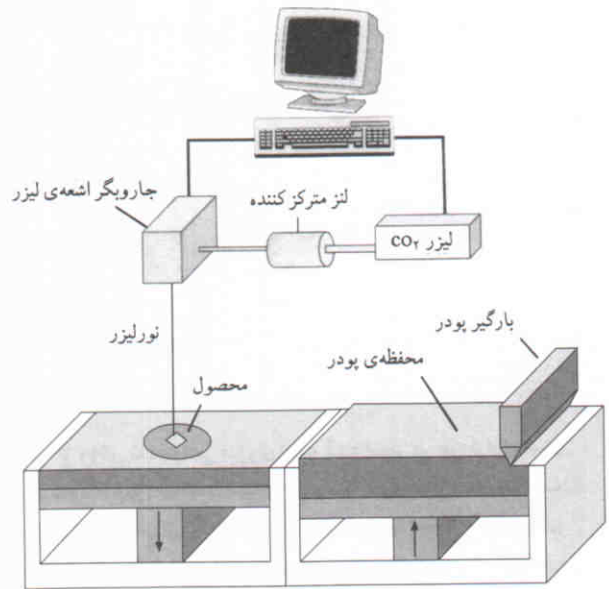
تاکنون سه نوع پودر با نام‌های تجاری Direct Metal (برنزی)، Laser Tool (کاربید تنگستن) و Direct Steel (فولادی) برای فرایند تفجوشی مستقیم با لیزر به بازار عرضه شده‌اند.^[۴] اما، تمامی این مواد تقابلی دارند که کاربرد این فناوری را در ساخت قطعات پیچیده و بزرگ، مانند تویی قالب‌ها و ابزارها، محدود می‌کند. پودرهای پایه‌ی برنز و کاربید تنگستن پس از تفجوشی حداکثر به ۷۵ درصد وزن مخصوص تئوری می‌رسند. بنابراین لازم است پس از ساخت محصول، عملیات ماده خورانی (بسپار یا فلز) انجام شود. بدیهی است که خواص مکانیکی محصول برای ساخت ابزارهایی با توان مقاومت در برابر تنش‌های زیاد مناسب نیست. پودربرنزی (Direct Steel) نیز براساس فولادهای اینوار به بازار عرضه شده است که در بهترین شرایط وزن مخصوص محصول به ۹۵ درصد وزن مخصوص تئوری می‌رسد. بنابراین حضور حفره‌های سطحی از یک طرف و عدم قابلیت سخت شدن طی روش‌های عملیات حرارتی از طرف دیگر معایب اصلی آن به شمار می‌آیند.

در این پژوهش ماده و روشی نو برای این فرایند ارائه شده است. از ویژگی‌های اصلی این دستاورد می‌توان به مواردی همچون کاهش هزینه‌ی مواد اولیه، افزایش سرعت ساخت، امکان دستیابی به چگالی نزدیک به تئوری و خواص مکانیکی خوب اشاره کرد. در این نوشتار رفتار تفجوشی، خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ نو ارائه می‌شود. به علاوه، با ساخت یک قالب تزریق پلاستیک زمینه‌های کاربرد این روش تحلیل می‌شود.

نیروی ۳۰ کیلوگرم، ریزسختی^۴ ویکرز با نیروی ۲۵ گرم، استحکام خمشی^۵ سه نقطه‌یی و آزمایش کشش مطابق استاندارد MPIF^[۶] صورت گرفت. کیفیت سطح نمونه‌ها نیز به روش لیزری با استفاده از یک دستگاه VE۱۲۰ شرکت UBM آلمان بررسی شد. هر آزمایش حداقل دوبار تکرار و میانگین نتایج حاصل گزارش شده‌اند.

نتایج و بحث

تفجوشی پودرهای آهنی تحت انرژی لیزر به عوامل مختلفی چون توان منبع انرژی، سرعت حرکت اشعه، ضخامت لایه‌ی پودر و درصد هم‌پوشانی خط لیزر بستگی دارد. با این وجود، به‌منظور افزایش سرعت تولید متداول است که با فرض ثابت بودن ضخامت لایه و درصد هم‌پوشانی، به بهینه‌سازی سرعت حرکت اشعه در توان پیشینه می‌پردازند. به عبارت دیگر با توجه به اقتصاد تولید، بهترین شرایط برای استفاده از توان پیشینه و تابش نور لیزر در پیشینه‌ی سرعت تعیین می‌شود تا وزن مخصوص مناسب به دست آید. شکل ۲ اثر سرعت حرکت اشعه بر میزان حفره‌ها و وزن مخصوص فولاد مورد تحقیق را در توان ۲۲۵ وات نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل استنباط می‌شود با افزایش این سرعت از ۱۰۰ به ۱۵۰ میلی‌متر بر

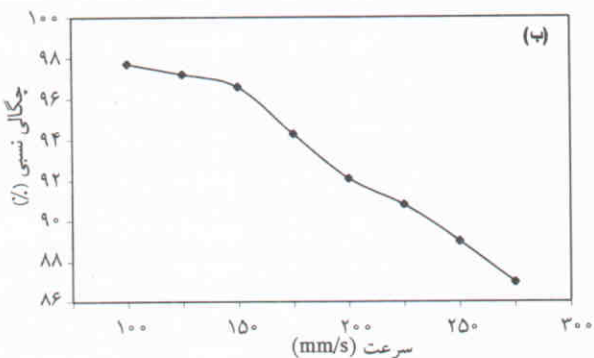
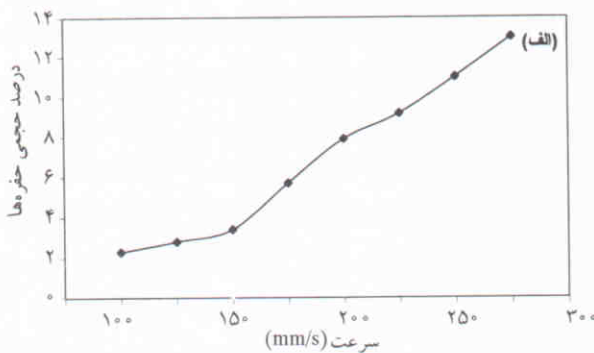


شکل ۱. نمودار تصویری دستگاه تفجوشی لیزری.

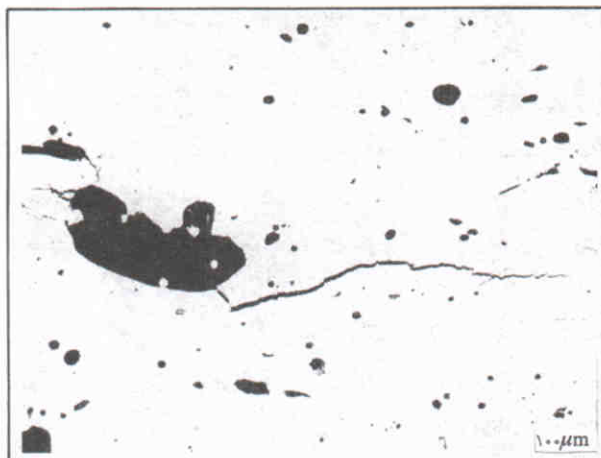
روش تحقیق

نمودار تصویری دستگاه تفجوشی لیزری مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه شامل دو عدد لیزر CO₂ با نور پیوسته و توان اسمی ۲۵۰ وات، عدسی‌های متمرکزکننده، سیستم بارگیری پودر و رایانه‌ی کنترل‌کننده است. به‌منظور ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، توسط نرم‌افزار Pro/Engineer قطعات مکعب مستطیل شکلی به ابعاد ۴۰×۱۳×۸mm طراحی و نقشه کشی شد. سپس توسط رایانه‌ی کنترل‌کننده‌ی دستگاه، اطلاعات سطوح به فایل STL تبدیل شده و به‌صورت لایه‌های نازکی به ضخامت ۵۰μm درآمدند. مخلوط پودر آهن با ابعاد کمتر از ۵۰μm همراه با پودر کربن، مس، نیکل و مولیبدن در محفظه‌ی نگه‌دارنده‌ی مواد بارگیری و عملیات تفجوشی در سرعت‌های مختلف در محدوده‌ی ۱۰۰-۲۷۵mm/s انجام شد. تجزیه و تحلیل شیمیایی مواد مورد تحقیق به گروه فولاد AISI۴XXX نزدیک بوده ولی محتوای کربن آن تقریباً دو برابر است.

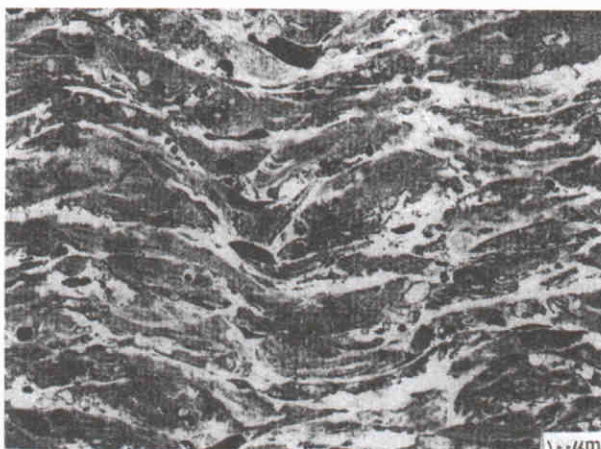
پس از اتمام عملیات ساخت، نمونه‌ها از پایه‌ی دستگاه جدا شده و وزن مخصوص آنها به روش غوطه‌وری در آب اندازه‌گیری شد.^[۵] برخی از نمونه‌ها نیز در محدوده‌ی دمایی ۱۲۲۰-۱۲۸۰°C به مدت نیم ساعت در خلاء با فشار بالا (۱۰^{-۲} torr) مجدداً تفجوشی شدند تا حفره‌های باقی‌مانده حذف شوند. مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی^۲ (SEM) انجام شده است. آزمایش‌های مکانیکی شامل سختی سنجی^۳ به روش ویکرز با



شکل ۲. اثر سرعت حرکت اشعه‌ی لیزر بر: (الف) درصد حجمی حفره‌ها؛ (ب) چگالی نسبی فولاد مورد تحقیق.

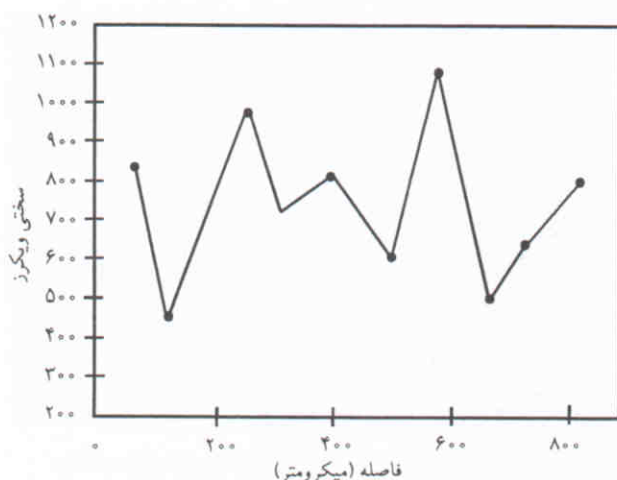


الف) صیقلی شده؛

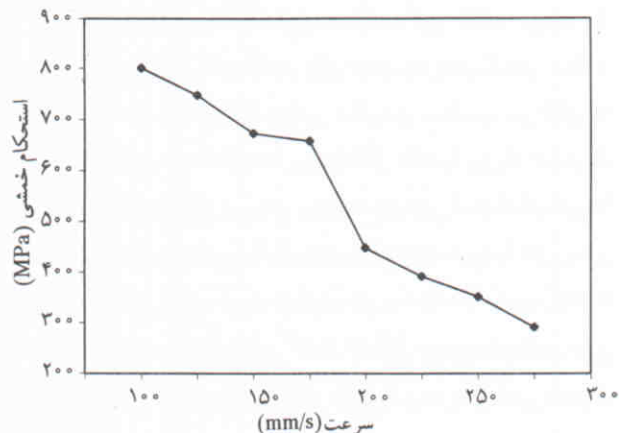


ب) حکاکی شده در محلول نایتال ۲ درصد

شکل ۴. ریزساختار میکروسکوپی فولاد تف‌جوشی شده در سرعت ۲۰۰ mm/s و توان ۲۲۵ وات.



شکل ۵. تغییرات سختی نسبت به عمق در فولاد تف‌جوشی شده لیزری.

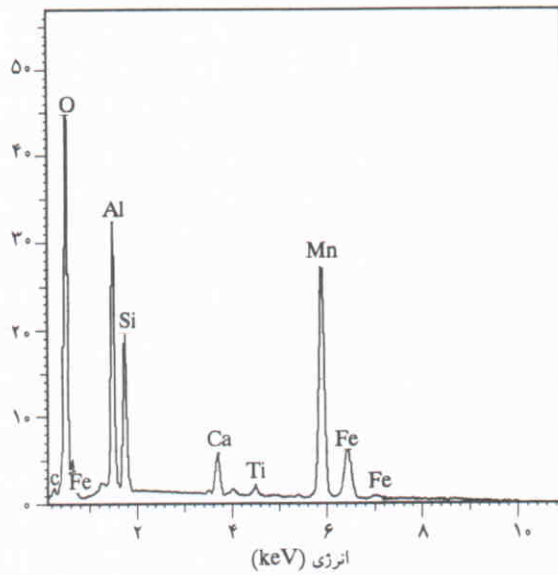


شکل ۳. اثر سرعت حرکت اشعه‌ی لیزر بر استحکام خمشی سه‌نقطه‌یی پودر فولاد تف‌جوشی شده.

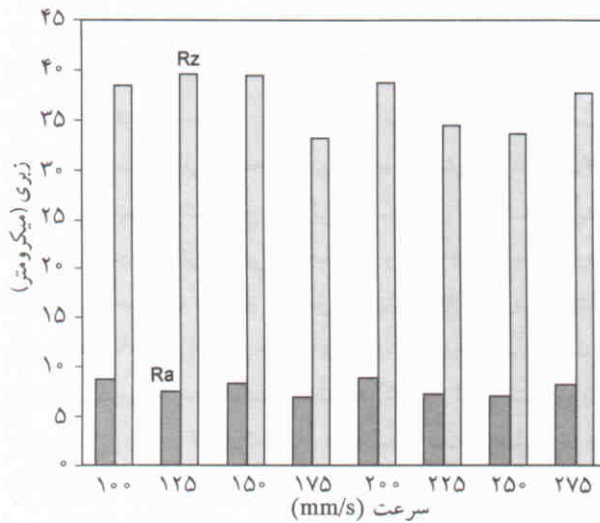
ثانیه وزن مخصوص نسبی (نسبت چگالی ماده‌ی تف‌جوشی شده به چگالی تئوری) کمی کاهش می‌یابد (حدود ۲ درصد). اما، در سرعت‌های بیشتر مقدار این تقلیل شتاب گرفته به طوری که در سرعت ۲۰۰ mm/s چگالی به کمتر از ۹۲ درصد تئوری می‌رسد. علت این تغییرات را می‌توان به زمان تف‌جوشی و مقدار انرژی ورودی نسبت داد. از آنجا که زمان توقف اشعه بر هر ذره‌ی پودر و مقدار انرژی منتقل شده با عکس سرعت متناسب است، انتظار می‌رود که با افزایش این سرعت چگالی تقلیل یابد. در اینجا باید توجه داشت که در سرعت‌های کم دمای سطح به نقطه‌ی جوش نزدیک می‌شود و ترک خوردن جسم به دلیل تنش‌های حرارتی نیز بسیار محتمل است.^[۷] تحت این شرایط در سرعت‌های کم، شدت اثر این عامل بر چگالی تقلیل یافته و در نهایت به حد اشباع می‌رسد. این حد برای فولاد مورد تحقیق ۱۰۰ mm/s برآورد می‌شود.

شکل ۳ اثر سرعت حرکت اشعه‌ی لیزر بر استحکام خمشی پودر فولاد تف‌جوشی شده را نشان می‌دهد. صرف‌نظر از کاهش مقاومت مکانیکی با افزایش سرعت — که ناشی از افزایش حفره‌های جسم است — افت ناگهانی استحکام در سرعت بیش از ۱۷۵ mm/s به وضوح مشهود است. نتایج متالوگرافی مبین آن است که در این محدوده‌ی سرعت، ترک‌هایی در جسم به وجود آمده و به صورت طولی در جسم رشد کرده‌اند (شکل ۴ الف). به علاوه، ریزساختار جسم کاملاً ناهمگن است و فازهای فریت، بینیت، مارتنزیت و مارتنزیت تمپر شده تشکیل شده‌اند (شکل ۴ ب). نتایج ریز سختی‌سنجی نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. آزمایش‌ها در راستای عمود بر جهت بارگیری پودر انجام شده‌اند. چنانچه از شکل برمی‌آید افت و خیزهای شدیدی در میزان سختی لایه‌های مختلف وجود دارد. این تغییرات مبین آن است که در هنگام تف‌جوشی

۳۰ دقیقه را بر چگالی قطعات فراوری شده با لیزر نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که در وزن مخصوص‌های کمتر، مقدار چگالش بیشتر است و با تف‌جوشی ثانویه مناسب می‌توان به چگالی تئوری رسید. شکل ۱۰ ریزساختار قطعه را پس از عملیات تف‌جوشی ثانویه نشان می‌دهد. چنانچه مشخص است تمام حفره‌ها حذف شده‌اند و ساختاری با دانه‌بندی یکنواخت همراه با فاز روشن مرزدانه‌ی شکل گرفته است. اندازه‌ی متوسط دانه‌ها حدود $75\mu m$ است و فاز زمینه عمدتاً بینیتی^۷ است. تشکیل چنین ساختاری مبین آن است که چگالش تحت سازوکار تف‌جوشی در فاز مایعی صورت



شکل ۷. EDX از آخال‌های سطحی نشان داده شده در شکل (۶-الف).



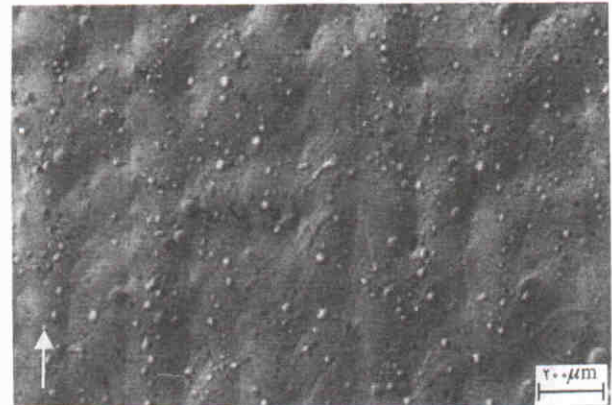
شکل ۸. پارامترهای زبری سطح (Ra, Rz) در سرعت‌های مختلف تابش اشعه‌ی لیزر برای فولاد مورد تحقیق.

هر لایه، لایه‌های زیرین تا عمق مشخصی تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. مقدار این عمق در حدود $200\mu m$ برآورد می‌شود.

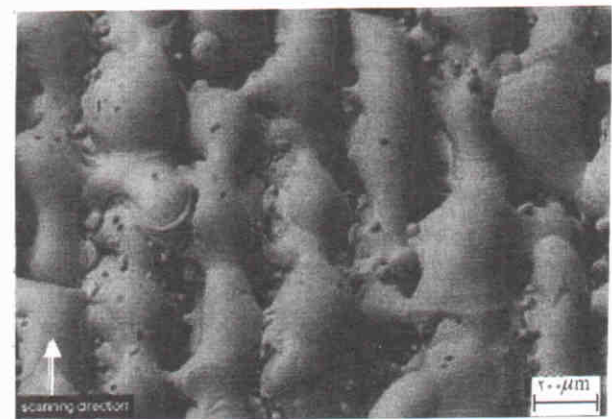
شکل ۶الف تصویر SEM سطح فوقانی پودر فولاد تف‌جوشی را نشان می‌دهد، که در مقایسه با پودرهای آهن خالص (شکل ۶ب) صاف‌تر است. با این وجود، رگه‌های روی سطح به وضوح اثر حرکت اشعه را نشان می‌دهد. به‌علاوه، ذرات ریز و پراکنده‌ی زیادی بر روی سطح مشهود است.

شکل ۷ تجزیه‌ی EDX^۶ این ذرات را نشان می‌دهد. با استناد به این آزمایش می‌توان چنین نتیجه گرفت که این آخال‌ها اکسیدی‌اند و می‌بایست به دلیل اکسیداسیون جزئی در هنگام تف‌جوشی به وجود آمده باشند. سرعت حرکت اشعه اثر قابل ملاحظه‌ی بر وزن مخصوص و خواص مکانیکی پودر فولاد مورد تحقیق دارد، ولی چنانچه از شکل ۸ برمی‌آید زبری سطح تقریباً از این سرعت مستقل است. پارامترهای زبری سطح در مقادیر $Rz=32-40\mu m$ و $Ra=8-10\mu m$ اندازه‌گیری شده‌اند.

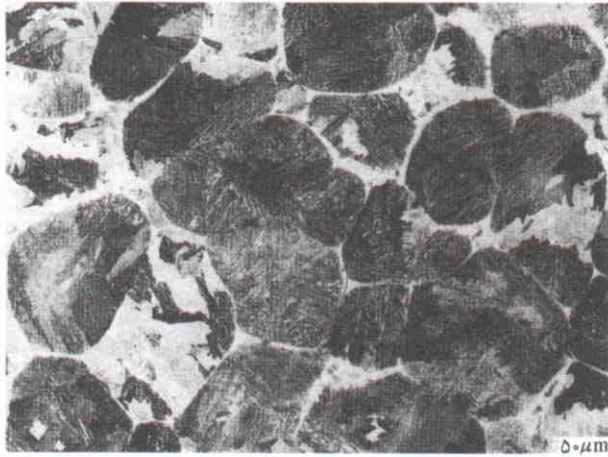
شکل ۹ اثر تف‌جوشی ثانویه در دمای $1260^{\circ}C$ و به مدت



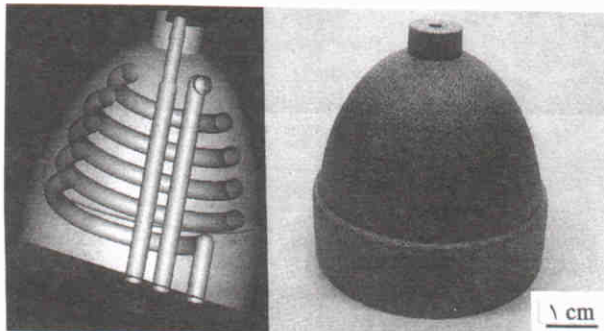
الف) فولاد مورد تحقیق؛



ب) آهن خالص (جهت فلش راستای جاروب نور لیزر را نشان می‌دهد) شکل ۶. تصویر SEM از سطح فوقانی پودر تف‌جوشی شده.



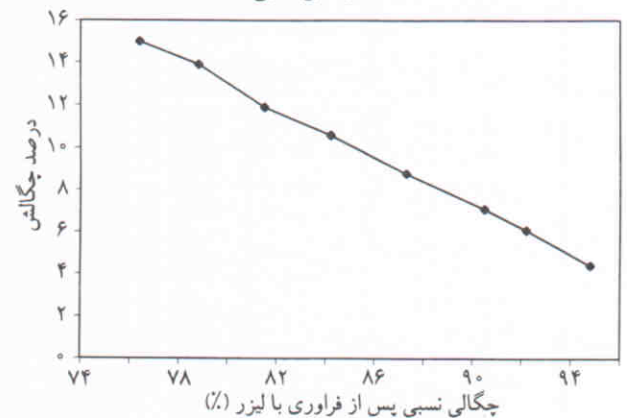
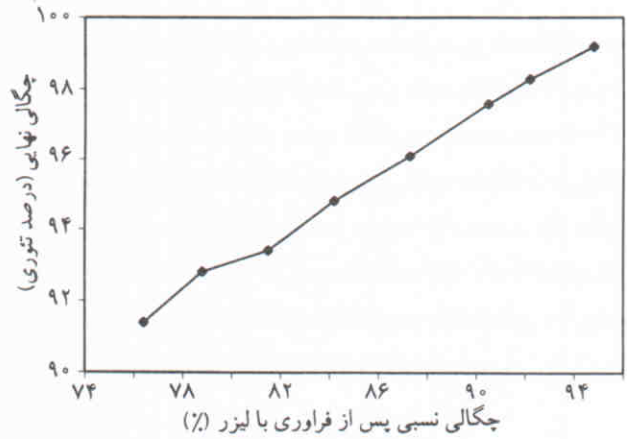
شکل ۱۰. ریز ساختار حاصل از تفجوشی ثانویه قطعات فراوری شده با لیزر (دما 1260°C ، زمان 30 دقیقه) پس از حکاکی در محلول نایتال 2% درصد (دانه بندی یکنواخت با زمینه‌ی عمدتاً بینیتی همراه با فاز روشن مرزدانه‌یی شکل گرفته از تفجوشی در فاز مایع).



شکل ۱۱. تصویر قالب تزریق پلاستیک ساخته شده از روش تفجوشی با لیزر جهت مطالعه‌ی موردی.

جدول ۱. جنبه‌های فیزیکی، مکانیکی و اقتصادی فولاد مورد تحقیق در مقایسه با پودر تجاری Direct Steel.

مشخصه	فولاد تجاری	فولاد مورد تحقیق	درصد بهبود
تخلخل (%)	۵	< ۱	۸۰
سختی (HV_{30})	۱۸۰	> ۳۲۰	> ۷۸
استحکام خمشی (MPa)	۸۰۰-۹۰۰	۸۰۰-۹۰۰	-
خشونت سطح ($\text{Rz}(\mu\text{m})$)	۶۰	۳۰-۴۰	۲۵-۵۰
سرعت ساخت (cm^2/h)	۵/۴	۶/۷۵	۲۵
هزینه مواد اولیه هر کیلوگرم (بر حسب دلار)	۱۳۰	< ۴۵	> ۷۵



شکل ۹. اثر تفجوشی ثانویه بر چگالی نسبی و درصد چگالش قطعات فراوری شده توسط لیزر (دما 1260°C ، زمان 30 دقیقه).

گرفته که پس از انجماد در مرزدانه‌ها رسوب کرده است. از طرف دیگر، نتایج اندازه‌گیری زبری سطح پس از تفجوشی ثانویه نشان می‌دهد که پارامتر Rz به میزان $5-10 \mu\text{m}$ کاهش یافته است.

با استناد به نتایج فوق می‌توان چنین نتیجه گرفت که پودرهای فولادی را می‌توان در شرایط مناسب به نحوی تفجوشی لیزری کرد که چگالی به دست آمده حدود 95% درصد چگالی تئوری باشد. سپس با انجام یک عملیات تفجوشی ثانویه امکان همگن کردن ساختار و حذف حفره‌های باقی‌مانده وجود دارد. به منظور مطالعه‌ی کاربرد روش مورد بحث، قالب تزریق یک پوسته‌ی پلاستیکی نشان داده شده در شکل ۱۱ ساخته شد. لازم به ذکر است که با هدف کاهش زمان تولید، در داخل قالب به صورت مارپیچ خنک‌کننده‌های داخلی طراحی شده‌اند. در جدول ۱ جنبه‌های فنی و اقتصادی ساخت این قطعه از ماده‌ی مورد بحث و پودر تجاری Direct Steel مقایسه شده است. از اطلاعات این جدول می‌توان دریافت که افزایش چگالی، بهبود خواص مکانیکی، تقلیل زمان ساخت و کاهش هزینه تولید از برجسته‌ترین مزایای فولاد مورد تحقیق است.

نتیجه گیری

که پس از تفجوشی با لیزر ریزساختار حاصل بسیار ناهمگن بوده و تغییرات زیادی در سختی بین لایه‌ها وجود دارد. به علاوه، با وجود تجمع آخال‌های اکسیدی در سطح، Rz در محدوده‌ی ۴۰-۳۲ μm قابل دست‌یابی است. با عملیات تفجوشی ثانویه مناسب می‌توان علاوه بر حذف حفره‌های باقی‌مانده، ریزساختار جسم را همگن ساخت و کیفیت سطحی را نیز بهبود داد. با ساخت یک قالب تزریق پلاستیک صنعتی زمینه‌ی کاربرد فولاد توسعه یافته تحلیل و با پودر تجاری موجود در بازار مقایسه شد.

در این پژوهش ماده و روشی نو برای ساخت قطعات پیچیده و دقیق توسط تفجوشی مستقیم پودر فولاد توسط لیزر ارائه شده است. نتایج این تحقیق را می‌توان در ساخت قالب‌های تزریق مواد پلاستیک به کار گرفت. مطالعات تجربی نشان داد که با کاهش سرعت حرکت اشعه‌ی لیزر، وزن مخصوص قطعه‌ی تفجوشی شده فزونی می‌یابد و در نهایت به حد اشباع می‌رسد. برای فولاد مورد تحقیق، سرعت ۱۲۵mm/s مناسب تشخیص داده شد. همچنین مشاهده شد

پانویس

1. direct laser sintering
2. scanning electron microscopic
3. hardness test
4. microhardness
5. bending strenght
6. Energy Dispersive X-ray Analysis
7. bainite

منابع

1. C.C, Kai and L.K., Fai., *Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing*, John Wiley & Sons, Inc., Singapore (1997).
2. T., Wohlers, *Wohlers Report 2001*, Wohlers Associates, Inc., Colorado (2001).
3. D., Atkinson., *Rapid Prototyping and Tooling: A Practical Guide*, Strategy Publication Ltd., UK (1997).
4. Simchi, A., Pohl, H. and Petzoldt, F. "A novel steel powder for rapid tooling using direct metal laser sintering", in *uRapid Conf.*, Berlin, pp 292-298 (2001).
5. Permeable Sintered Metal Materials and Hardmetals- Determination of Density, ISO Standard 3369(1975). *ibid.* BS 5600, Section, 3.1 (1974).
6. Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products, MPIF, N. J. (1986).
7. R. M. German, *Sintering Theory and Practice*, John Wiley & Sons, Inc., USA (1996).