

اثر چرخه‌های عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی یک فولاد

کم‌آلیاژ تولیدی به روش تف‌جوشی لیزری

محمود اعظمی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
عبدالرضا سیم‌چی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی و علم‌مواد، دانشگاه صنعتی شریف

در این پژوهش اثر چرخه‌های عملیات حرارتی بر روی یک فولاد کم‌آلیاژ تولیدی به روش تف‌جوشی لیزری مطالعه شده است، و چرخه‌های یکنواخت کردن، بازپخت آستنیتی، سخت کاری - بازگشت و عملیات ترکیبی مورد تحقیق قرار گرفته‌اند. همچنین آزمایش‌های سختی سنجی، استحکام پارگی عرضی و تجزیه و تحلیل ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که برای همگن‌سازی ریزساختار می‌بایست دمای آستنیتیه بیش از $1000^{\circ}C$ باشد. با این وجود، دمای آستنیتیه $900^{\circ}C - 850^{\circ}C$ و زمان 30 دقیقه برای حصول سختی و استحکام مناسب کافی است. با عملیات حرارتی بازپخت آستنیتی (آستمپرینگ) در دمای پایین و سخت کاری - بازگشت در شرایط مناسب می‌توان استحکام فولاد تف‌جوشی شده را حدود 50% افزایش داد به طوری که کاهش سختی نسبتاً کم و حداکثر 20% باشد. نتایج به دست آمده از عملیات حرارتی ترکیبی حاکی از افزایش بیش از 100% درصدی استحکام پارگی عرضی و عدم تغییر میزان سختی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های عملیات حرارتی نشده بود. عملیات ترکیبی شامل یک مرحله نرماله با دمای آستنیتیه در محدوده‌ی انحلال کاربیدها و سپس چرخه‌های بازپخت آستنیتی و سخت کاری - بازگشت بوده است.

مقدمه

مواد مختلفی مانند پلاستیک‌های مهندسی، الاستومرهای ترموپلاستیک (گرمانرم)، فلزات و سرامیک‌ها می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.^[۷] ساخت مدل‌های ریخته‌گری دقیق، مغزی قالب‌های فلزی، قالب‌ها و ماهیچه‌های ریخته‌گری با ماسه از مهم‌ترین زمینه‌های کاربرد فرایند تف‌جوشی لیزری است.^[۸] قابلیت این روش در تف‌جوشی پودر فلزات و سرامیک‌ها، آن را قادر به ساخت ابزارهای همچون توپی و محفظه‌های قالب‌های تزریق پلاستیک یا قالب‌های ریخته‌گری تحت فشار آلومینیم ساخته است. بنابراین ارتقاء خواص مکانیکی حاصل از این محصولات بسیار حائز اهمیت است. در مورد قطعات فلزی، صرف‌نظر از جنس ماده و پارامترهای مورد استفاده در تف‌جوشی لیزری، عملیات حرارتی تأثیر به‌سزایی بر خواص مکانیکی دارد. این عملیات ممکن است با حذف حفره‌های باقی‌مانده از تف‌جوشی لیزری و نیز همگن‌سازی ریزساختاری همراه باشد.^[۹]

نمونه‌سازی سریع^۱ (RP) یک فناوری نسبتاً جدید برای ساخت نمونه‌های فیزیکی و نمونه‌ی اولیه با استفاده از اطلاعات مدل سه‌بعدی طراحی شده به‌کمک رایانه، سی تی اسکن، و ام‌آرای است.^[۱] ایده‌ی اصلی RP قراردادن لایه‌های دقیق بر روی یکدیگر تارسیدن به شکل نهایی قطعه است. برخلاف فرایند تولید به روش کاهنده، مانند ماشین‌های CNC، در فرایند RP برای ساخت قطعات پیچیده مواد به‌صورت مایع، پودر یا ورق به هم متصل می‌شوند.^[۲] ابزارسازی سریع یکی از مهم‌ترین زمینه‌های کاربردی RP است.^[۴] در فرایندهای ساخت، قالب‌سازی یکی از کندترین و گران‌ترین مراحل تولید است که علت آن کیفیت بسیار بالای مورد نیاز، هندسه‌ی پیچیده قالب‌ها، دقت ابعادی در حد صدم میلی‌متر و سختی و مقاومت در برابر سایش بالاست. چون روش‌های متداول قالب‌سازی نظیر CNC و روش تخلیه‌ی الکتریکی نسبتاً گران و زمان بر هستند، سازندگان تمایل زیادی به استفاده از روش‌های RP برای تسریع این مرحله از ساخت دارند.

در این پژوهش ریزساختار و خواص مکانیکی یک فولاد کم‌آلیاژ تولیدی به روش تف‌جوشی لیزری مورد مطالعه قرار گرفته است. با اعمال چرخه‌های مختلف عملیات حرارتی و انجام آزمایش‌هایی نظیر سختی‌سنجی، اندازه‌گیری استحکام پارگی عرضی و مطالعات ریزساختاری اثر این عملیات بررسی و شرایط بهینه تعیین شد. از آنجا

یکی از روش‌های مهم نمونه‌سازی سریع روش تف‌جوشی مستقیم با لیزر است.^[۶] در این فرایند، انرژی لیزر برای ایجاد پیوند بین ذرات پودر مواد و ساخت قطعات جامد با شکل پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

توان $215W$ و ضخامت لایه‌ی $5mm$ انجام شد. ترکیب فولاد مورد استفاده شامل (درصد وزنی) ۴ درصد نیکل، ۱ درصد مولیبدن، ۲ درصد مس و ۸ درصد کربن بوده است. شایان ذکر است که این ترکیب از طریق مخلوط کردن پودرهای عنصری در یک مخلوط کن Turbula به مدت 30° دقیقه حاصل شد.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، چرخه‌های عملیات حرارتی بر روی آن‌ها صورت گرفت. این عملیات عبارت‌اند از: نرم‌اله، بازپخت آستنیتی، سخت‌کاری - بازگشت و عملیات ترکیبی یکنواخت‌کردن / بازپخت آستنیتی و یکنواخت‌کردن / سخت‌کاری. شرایط انجام این عملیات در جدول ۱ ارائه شده است. پس از اعمال چرخه‌های عملیات حرارتی، آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری خواص مکانیکی انجام شد. این آزمون‌ها اندازه‌گیری استحکام پارگی عرضی و سختی را شامل می‌شد. برای این منظور، در ابتدا نمونه‌ها سنگ زده شدند تا کاملاً صیقلی و آماده شوند. استحکام پارگی عرضی از طریق آزمایش خمش سه‌نقطه‌یی (استاندارد ۹۱-۴۱ MPF مطابق با ۹۱-۳۸۰ ASTM) تعیین شد و فاصله‌ی محورهای تکیه‌گاه برابر ۲۵ میلی‌متر بود. سختی نمونه‌ها نیز توسط روش ویکرز با اعمال نیروی 30 کیلوگرم اندازه‌گیری شد. ریزساختار نمونه‌ها نیز توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. در این مورد از محلول نایتال ۲ درصد برای حکاکی استفاده شد. برای مطالعه‌ی ریزساختار از میکروسکوپ نوری استفاده شد.

نتایج و بحث

الف) ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات تف‌جوشی شده

توسط لیزر

قبل از انجام هرگونه عملیات حرارتی، ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌های تف‌جوشی شده مطالعه شد. شکل ۱ ریزساختار متالوگرافی این نمونه را در دو بزرگ‌نمایی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل

که تأثیر عملیات حرارتی بر روی این نمونه‌ها با توجه به ترکیب جدید آن پیش از این تحقیق نشده است، پژوهش انجام شده، کاری نو در این راستا بوده است.

روش تحقیق

نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش طی فرایند تف‌جوشی لیزری پودر فلزات ساخته شدند. دستگاه مورد استفاده شامل دو عدد لیزر CO_2 با نور پیوسته و توان اسمی 250 وات، عدسی‌های متمرکزکننده، سیستم بارگیری پودر و رایانه‌ی کنترل‌کننده است. در این روش به‌منظور ساخت یک قطعه، ابتدا فایل 3D-CAD آن تهیه می‌شود. سپس اطلاعات توسط نرم‌افزار دستگاه به فایل لیتوگرافی سه‌بعدی (STL) تبدیل و در نهایت سطوح قطعه به لایه‌های نازکی در می‌آیند. فرایند ساخت با پخش یک لایه‌ی نازک از پودر ماده بر سطح سکوی دستگاه توسط یک جاروبک شروع می‌شود. سپس نور لیزر مطابق فایل STL بر بستر پودر تابیده می‌شود تا عملیات تف‌جوشی و اتصال ذرات صورت گیرد. پس از تکمیل یک لایه، سکوی دستگاه یک گام (معادل ضخامت یک لایه از فایل STL) به پایین رفته و محفظه‌ی بارگیر پودر یک گام به بالا حرکت می‌کند. عملیات پخش و لایه‌گذاری ماده توسط جاروبک تکرار شده و تابش نور لیزر علاوه بر تف‌جوشی ذرات پودر در لایه‌ی جدید، موجب اتصال لایه‌ها نیز می‌شود. با تکرار این عملیات محصول به‌صورت لایه به لایه ساخته می‌شود.^[۱۰]

به‌منظور ساخت نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش، ابتدا توسط نرم‌افزار Pro/Engineer مدل یک قطعه مکعب مستطیل به ابعاد $40 \times 13 \times 8$ mm طراحی و نقشه‌کشی شد. سپس توسط رایانه‌ی کنترل‌کننده‌ی دستگاه، اطلاعات سطوح به‌صورت لایه‌های نازک به ضخامت $50 \mu m$ درآمد. مخلوط پودر آهن با ابعاد کم‌تر از $50 \mu m$ همراه با پودر کربن، مس، نیکل و مولیبدن در محفظه‌ی نگه‌دارنده‌ی مواد بارگیری و عملیات تف‌جوشی لیزری در سرعت 1000 mm/s ،

جدول ۱. شرایط عملیات حرارتی مختلف مورد استفاده در پژوهش. زمان مورد استفاده برای آستنیت‌زدن 30° دقیقه، و برای بازپخت 60 دقیقه بوده است.

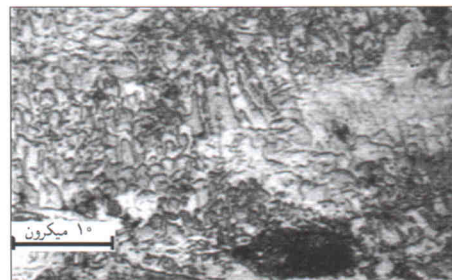
شرح	عملیات
آستنیت‌زدن در دماهای 780° ، 850° و 925° درجه سانتیگراد و سپس سرد کردن در هوا	نرم‌اله
بالایی: آستنیت‌زدن در دماهای 850° و 900° درجه سانتیگراد، انتقال سریع به حمام نمک با دمای $400^\circ C$ و سپس سرد کردن در هوا	بازپخت آستنیتی
پایینی: آستنیت‌زدن در دماهای 850° و 900° درجه سانتیگراد، انتقال سریع به حمام نمک با دمای $300^\circ C$ و سپس سرد کردن در هوا	
آستنیت‌زدن در دماهای 850° و 900° درجه سانتیگراد، سرد کردن سریع در روغن و سپس بازپخت در دمای $450^\circ C$	سردکردن-گرم‌کردن
عملیات نرم‌اله با آستنیت‌زدن در دمای $1050^\circ C$ و سپس بازپخت آستنیتی بالایی با دمای آستنیت $900^\circ C$ و سرمایش سریع در حمام نمک $400^\circ C$	عملیات ترکیبی
عملیات نرم‌اله با آستنیت‌زدن در دمای $1050^\circ C$ و سپس بازپخت آستنیتی پایینی با دمای آستنیت $900^\circ C$ و سرمایش سریع در حمام نمک $300^\circ C$	
عملیات یکنواخت‌کردن با آستنیت‌زدن در دمای $1050^\circ C$ و سپس سخت‌کاری - بازگشت با دمای آستنیت $900^\circ C$ و کوره بازپخت $350^\circ C$	

جدول ۲. نتایج حاصل از انجام عملیات همگن کردن بر نمونه‌های تف‌جوشی شده توسط لیزر.

دمای آستنیت‌ده ($^{\circ}C$)	سختی ($HV_{0.05}$)	استحکام پارگی عرضی (MPa)
بدون عملیات حرارتی	۴۵۴	۸۳۵
۷۸۰	۲۵۲	۱۰۱۰
۸۵۰	۲۷۵	۱۰۲۰
۹۰۰	۲۸۴	۱۱۳۲
۹۲۵	۲۷۵	۱۰۵۱



(الف)



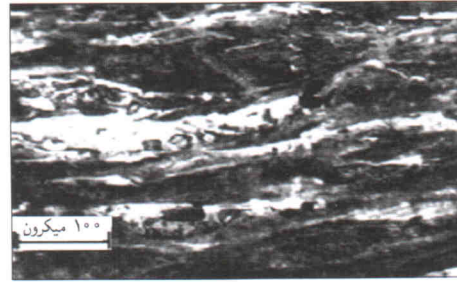
(ب)

شکل ۲. ریزساختار مربوط به نمونه‌ی یکنواخت شده با دمای آستنیت‌ده $900^{\circ}C$ در دو بزرگ‌نمایی مختلف.

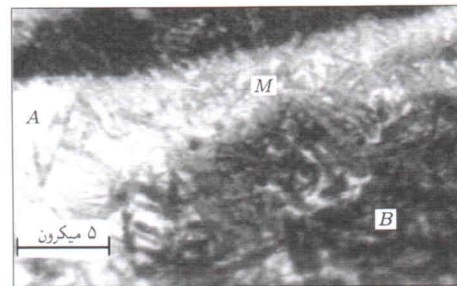
نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی تف‌جوشی شده به‌علت تغییر شکل کاربیدها، حذف فازهای سخت مانند مارتنزیت، و آزاد شدن تنش‌های داخلی است. شایان ذکر است که در فرایند ساخت، به‌دلیل سرعت سرد شدن بالای قطعه، ایجاد تنش‌های پسماند قطعی است. چنانچه در جدول ۲ مشاهده می‌شود دمای بهینه‌ی آستنیت‌ده کردن این فولاد از نقطه نظر بیشترین استحکام همراه با سختی مناسب در $900^{\circ}C$ است.

ج) اثر عملیات بازپخت آستنیتی

این عملیات به دو صورت بازپخت آستنیتی بالایی و پایینی انجام شد. در عملیات بازپخت آستنیتی بالایی، دمای حمام نمک $400^{\circ}C$ و در عملیات بازپخت آستنیتی پایینی $300^{\circ}C$ بود. شرایط آستنیت‌ده کردن در جدول ۱ خلاصه شده است. اثر اعمال این عملیات برخواص مکانیکی نمونه‌های تف‌جوشی شده را می‌توان در جدول ۳ دید.



(الف)



(ب)

شکل ۱. ریزساختار مربوط به نمونه‌های تف‌جوشی شده‌ی لیزری در دو بزرگ‌نمایی مختلف. M: مارتنزیت، A: آستنیت و B: بینیت.

مشاهده می‌شود لایه‌های ناشی از روش ساخت به‌وضوح دیده می‌شوند. ریزساختار شامل مناطق مارتنزیت، مارتنزیت گرم شده، بینیت و آستنیت باقی مانده است که نشان از غیریکنواختی شدید ریزساختار دارد. دلیل این غیرهمگنی، استفاده از مخلوط پودرهای عنصری برای تهیه‌ی نمونه‌ی اولیه است. در فرایند تف‌جوشی لیزری به‌دلیل سرعت زیاد چرخه‌ی حرارتی، زمان لازم برای نفوذ عناصر و همگنی ریزساختار وجود ندارد و بنابراین فازهای مختلف به‌وجود آمده‌اند. مطالعات قبلی صورت گرفته بر روی ریز ساختار این مواد نشان داد که تغییرات نامنظم ریزسختی نسبت به عمق در مورد این فولاد وجود دارد.^[۱۱] این موضوع مبین آن است که فازهای مختلف و ناهمگنی میکروسکوپی در این مواد حضور دارند. اما مقادیر متوسط درشت‌سختی و استحکام پارگی عرضی این نمونه‌ها به ترتیب برابر ۴۵۴ ویکرز و ۸۳۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

ب) اثر عملیات حرارتی همگن کردن

نتایج حاصل از عملیات حرارتی همگن کردن در شرایط مختلف بر سختی و استحکام فولاد مورد تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است. از این اطلاعات چنین استنباط می‌شود که با انجام عملیات همگن کردن، سختی کاهش و استحکام نسبت به نمونه‌های اولیه افزایش یافته است (شکل ۲). ریزساختار قطعه پس از عملیات حرارتی نرماله در دمای $900^{\circ}C$ را نشان می‌دهد. در بزرگ‌نمایی کمتر (شکل ۲الف) ساختار لایه لایه هنوز مشهود است، و در بزرگ‌نمایی بیشتر ساختاری شامل کاربیدهای تقریباً کروی دیده می‌شود. لذا کاهش سختی این

جدول ۳. نتایج حاصل از انجام عملیات بازپخت آستنیتی بالایی و پایینی بر نمونه‌های تفجوشی شده توسط لیزر.

استحکام پارگی عرضی (MPa)	سختی (HV _{۰.۰۵})	دمای آستنیت‌ه و حمام نمک (°C)
۱۴۶۳	۳۶۶	۳۰۰ و ۸۵۰
۱۴۳۶	۳۸۵	۳۰۰ و ۹۰۰
۱۴۴۱	۳۱۸	۴۰۰ و ۸۵۰
۱۳۶۸	۳۴۵	۴۰۰ و ۹۰۰

استحکام پارگی عرضی بین این دو با توجه به شکل کاربیده‌ها قابل توجه است.

د) اثر عملیات سخت‌کاری-بازگشت

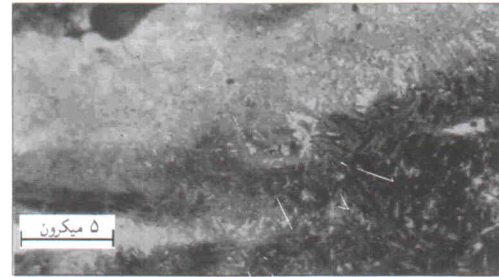
نتایج به دست آمده از این آزمایش در جدول ۴ و تصاویر ریزساختار برای یک نمونه در شکل ۴ آمده است. از این نتایج چنین دریافت می‌شود که استحکام قطعه اندکی کم‌تر از نتایج مربوط به بازپخت آستنیتی است ولی از نظر سختی افزایش نشان می‌دهد. به علاوه، سختی نمونه از مقدار مشابه خود در مورد نمونه تفجوشی شده بیشتر است. لذا می‌توان ادعا کرد که در این عملیات خواص مکانیکی جسم بهبود یافته است. در مورد ریز ساختار، در بزرگ‌نمایی پایین ساختار لایه‌بندی ناشی از روش ساخت و در بزرگ‌نمایی بالا کاربیده‌های شکل گرفته در یک سو قابل مشاهده است (شکل ۴).

و) همگن‌سازی ریزساختار

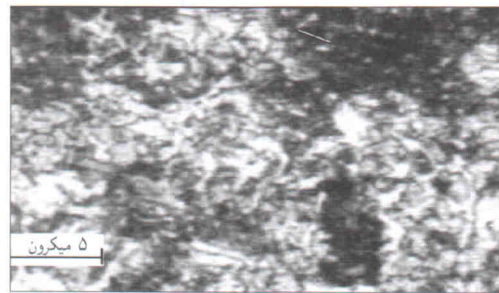
با توجه به این که ساختار نمونه‌ها بعد از آستنیت‌ه کردن در ۹۰۰°C همگن نشده بود و خطوط لایه‌بندی ناشی از روش ساخت (شکل ۱)

جدول ۴. نتایج حاصل از عملیات سخت‌کاری-بازگشت بر نمونه‌های تفجوشی شده توسط لیزر.

استحکام پارگی عرضی (MPa)	سختی (HV _{۰.۰۵})	دمای آستنیت‌ه و بازگشت (°C)
۱۳۸۷	۴۳۲	۳۵۰ و ۸۵۰
۱۱۳۸	۴۹۰	۳۵۰ و ۹۰۰



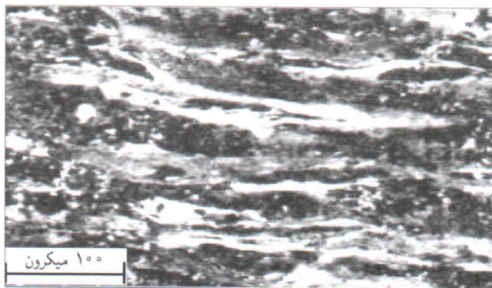
الف) حمام نمک ۳۰۰°C؛



ب) حمام نمک ۴۰۰°C.

شکل ۳. ریزساختار نمونه‌های بازپخت شده با دمای آستنیت‌ه ۹۰۰°C.

به‌طور کلی نتایج حاصل از عملیات بازپخت آستنیتی از نظر سختی و استحکام پارگی عرضی نسبت به عملیات نرماله بهتر بوده است. نتایج به دست آمده از بازپخت آستنیتی پایینی (حمام نمک ۳۰۰°C) از نظر سختی و استحکام نسبت به بازپخت آستنیتی بالایی (حمام نمک ۴۰۰°C) بهتر است. در شکل ۳ ریزساختار نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی بازپخت آستنیتی نشان داده شده است. در این تصاویر مشاهده می‌شود که ریزساختار لایه‌بندی تقریباً حذف شده است، اگر چه مناطق روشن هنوز در ساختار دیده می‌شود. ریز ساختار این قطعات به صورت بینیتی است که بر حسب دما به صورت بینیت پایین برای بازپخت آستنیتی در ۳۰۰°C و بینیت بالا برای بازپخت آستنیتی در ۴۰۰°C است. به عبارت دیگر، نوع کاربیده‌های شکل گرفته در آنها با یکدیگر متفاوت‌اند به طوری که در نمونه‌ی بازپخت شده در ۳۰۰°C به صورت کاربیده‌های نوکتیز و ظریف و در مورد بازپخت آستنیتی در ۴۰۰°C به صورت کاربیده‌های کروی یا منحنی شکل است. لذا اختلاف اندک در میزان سختی و



(الف)



(ب)

شکل ۴. ریزساختار مربوط به نمونه‌ی سخت‌کاری-بازگشت داده شده در دمای آستنیت‌ه ۸۵۰°C و بازگشت ۳۵۰°C در دو بزرگ‌نمایی مختلف.

جدول ۵. نتایج حاصل از انجام عملیات ترکیبی بر نمونه‌های تف‌جوشی شده توسط لیزر.

شرح عملیات	سختی ویکرز (HV ₃₀)	استحکام پارگی عرضی (MPa)
یکنواخت کردن با آستنیت در دمای ۱۰۵۰ °C و سپس بازپخت آستنیتی با دمای آستنیت ۹۰۰ °C و سرمایش سریع در حمام نمک ۳۰۰ °C	۴۷۰	۱۶۱۳
یکنواخت کردن با آستنیت در دمای ۱۰۵۰ °C و سپس بازپخت آستنیتی با دمای آستنیت ۹۰۰ °C و سرمایش سریع در حمام نمک ۴۰۰ °C	۳۷۵	۱۷۳۴
یکنواخت کردن با آستنیت در دمای ۱۰۵۰ °C و سپس سختکاری - بازگشت با دمای آستنیت ۹۰۰ °C و سرمایش سریع در روغن و کوره بازپخت ۳۵۰ °C	۴۷۰	۱۷۶۳

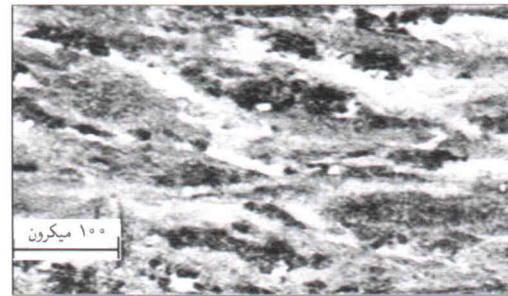
سانتی‌گراد تکرار شد. شکل ۵ ریزساختار این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. از این شکل‌ها چنین دریافت می‌شود که با افزایش دمای آستنیت به تدریج ساختار همگن می‌شود به طوری که در دمای ۱۰۵۰ °C به ساختاری تقریباً همگن دست می‌یابیم.

۵) عملیات حرارتی ترکیبی

این عملیات شامل اعمال دو چرخه‌ی عملیات حرارتی بر نمونه‌های مورد تحقیق بود. ابتدا عملیات یکنواخت کردن انجام شد و سپس عملیات بازپخت آستنیتی بالایی، بازپخت آستنیتی پایینی و سختکاری - بازگشت اعمال شد. هدف از انجام عملیات یکنواخت کردن، همگن‌سازی ساختار با توجه به اطلاعاتی است که در قسمت قبل ارائه شد. لذا عملیات یکنواخت کردن در دمای آستنیت ۱۰۵۰ °C به‌عنوان چرخه‌ی اولیه انجام شد. نتایج به دست آمده در این مورد در جدول ۵ ارائه شده است. نکته‌ی قابل توجه در این عملیات، افزایش قابل توجه استحکام است به طوری که در مقایسه با نمونه‌ی تف‌جوشی شده، افزایش دو برابری استحکام به دست آمد. در این میان، نمونه‌ی مربوط به چرخه‌ی نرماله و پس از آن سختکاری - بازگشت شده دارای بیشترین حد استحکام بودند. سختی نمونه‌ها نیز در حد ۴۷۰ ویکرز اندازه‌گیری شد.

نتیجه‌گیری

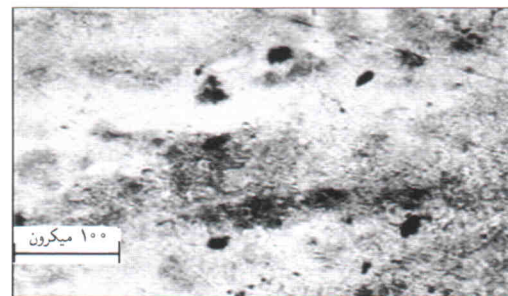
در این پژوهش اثر چرخه‌های عملیات حرارتی بر روی یک فولاد کم‌آلیاژی تولیدی به روش تف‌جوشی لیزری مطالعه شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که ریزساختار فولاد تف‌جوشی شده بسیار ناهمگن و شامل فازهای مختلفی همچون مارتنزیت، مارتنزیت گرم شده، بینیت و آستنیت باقی‌مانده است. به‌منظور همگن‌سازی کامل ساختار می‌بایست عملیات حرارتی در ۱۱۰۰ °C انجام شود. انجام این عملیات سختی فولاد را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد ولی استحکام پارگی عرضی آن را زیاد می‌کند. با این وجود، می‌توان فولاد را در دمای



الف) ۱۰۵۰ °C؛



ب) ۱۰۵۰ °C؛



ج) ۱۱۰۰ °C.

شکل ۵. ریز ساختارهای نمونه‌های نرماله شده پس از آستنیت در دماهای مختلف با هدف همگن‌سازی ریزساختار قطعه‌ی تف‌جوشی شده توسط لیزر.

در ریز ساختار مشاهده می‌شد، عملیات همگن‌سازی قبل از عملیات حرارتی در دمای بالا انجام می‌شود. برای این منظور عملیات حرارتی یکنواخت کردن در سه دمای آستنیت ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه

در $1050^{\circ}C$ انجام شود و پس از سرد کردن فولاد در هوا، عملیات سخت‌کاری-بازگشت در دمای آستنیت $900^{\circ}C$ و بازگشت در دمای $350^{\circ}C$ انجام شود. تحت این شرایط می‌توان ضمن حفظ سختی فولاد، استحکام آن را 10% افزایش داد.

$900^{\circ}C$ آستنیت کرده و با انجام چرخه‌های عملیات حرارتی یکنواخت کردن، بازیخت شده آستنیتی (بالایی یا پایینی) و سخت‌کاری-بازگشت خواص مکانیکی فولاد را ارتقاء داد. بهترین شرایط برای عملیات حرارتی این فولاد زمانی به دست می‌آید که ابتدا عملیات همگن‌سازی

پانوش

1. rapid prototyping
2. stereolithography

منابع

1. Wohlers, T., Rapid Prototyping and Tooling State of the Industry: Worldwide Progress Report 2000, Wohlers Associates, Inc., Fort Collins, Co. (2000).
2. Pham, P.T. and Dimov, S., "Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling", Springer Verlag, London (2001).
3. Atkinson, D., Rapid Prototyping and Tooling: A Practical Guide, Strategy Publication, Herts (1997).
4. King, D. and Tansey, T., "Alternative materials for rapid tooling", *J. Materials Processing Technology*, **121**, pp. 313-317 (2002).
5. Bourell, D.L., Marcus, H.L., Barlow, J.W. and Beaman, J.J., "Selective laser sintering of metals and ceramics", *Int. J. Powder Metallurgy*, **28**(4), pp. 369-381 (1992).

6. Haenninen, "DMLS moves from rapid tooling to rapid manufacturing", *Metal Powder Report*, pp. 25-29 (September 2001).
7. Dalgarno, K.W. and Wright, C.S., "Approaches to processing metals and ceramics through laser scanning of powder beds- a review", *Powder Metal Progress*, **1**(1), pp. 70-79 (2001).
8. Petzoldt, T., Greul, M. and Loffler, H., "Direct metal laser sintering: different applications different material concepts", *Advances in Powder Metallurgy & Particular Materials*, MPIF, Princeton, NJ., **2**(5), pp. 71-76 (1999).
9. Simchi, A., Petzoldt, F. and Pohl, H., "On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling", *J. Materials Processing Technology*, **141**, pp. 319-328 (2003).

۱۰. سیم‌چی، عبدالرضا، «ارتباط بین ریزساختار و سرعت چگالش با شرایط تولید در تف‌جوشی لیزری پودرهای آهنی»، نشریه علمی پژوهشی/میکرکبیر، سال چهاردهم، شماره ب-۵۵، (تابستان ۱۳۸۲).

۱۱. سیم‌چی، عبدالرضا، «ساخت قالب‌های تزریق پلاستیک به روش تف‌جوشی لیزری پودرهای فولادی»، فصلنامه علمی پژوهشی شریف، سال نوزدهم (تابستان ۱۳۸۲).