نهمین کنفرانس بین المللی
توسعه فناوری مهندسی
مواد، معدن و زمین شناسی
9th International Conference on Technology Development in Materials Engineering, Mining and Geology
www.emg.bcnf.ir

فرآیند ساخت افزودنی مبتنی بر فیلامنت فلزی (MFFF) : اصول، ویژگی‌ها و چالش‌ها

امیر حسین حسن زاده اصفهانی [۱]، محمدصالح عارف [۲]

۱- واحد تحقیق و توسعه شرکت پارت لایه نگار مشهد، nasir4228@gmail.com [۱]

۲- واحد تحقیق و توسعه شرکت پارت لایه نگار مشهد ، arefmohamadsaleh@gmail.com

خلاصه :

در سال‌های اخیر، فناوری چاپ سه بعدی به عنوان یک روش نوین ساخت، تحول چشمگیری در تولید قطعات با اشکال پیچیده ایجاد کرده است. با پیشرفت این فناوری، به تدریج روش‌های متنوعی برای چاپ سه بعدی فلزات و سرامیک‌ها ابداع شده که هرکدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. در این میان، **فرآیند ساخت افزودنی مبتنی بر فیلامنت فلزی(MFFF)** یکی از جدیدترین و امیدبخش‌ترین روش‌ها محسوب می‌شود که ترکیبی از سادگی سیستم‌های مبتنی بر اکستروژن پلیمری و قابلیت ساخت قطعات فلزی را ارائه می‌دهد. در این مقاله مروری، ابتدا به بررسی کلی **ساخت افزودنی (AM)** پرداخته شده و سپس به صورت تخصصی، روش MFFF مورد تحلیل قرار گرفته است. مراحل مختلف این فرآیند، از جمله آماده‌سازی فیلامنت فلزی-پلیمری، چاپ، عملیات حذف پلیمر یا جداسازی و تف جوشی، به تفصیل شرح داده شده‌اند. در ادامه، **ویژگی‌های کلیدی MFFF** و **پارامترهای حیاتی** مؤثر بر کیفیت قطعه نهایی، از جمله ویسکوزیته فیلامنت، دمای نازل، نرخ رسوب و انقباض ناشی از تف جوشی، مورد بحث قرار گرفته‌اند. با تحلیل این عوامل، محدوده‌های بهینه برای دستیابی به چگالی و خواص مکانیکی مطلوب استخراج شده‌اند. در نهایت این مطالعه نشان می‌دهد که اگرچه MFFF به دلیل هزینه پایین و انعطاف‌پذیری بالا یک گزینه جذاب برای تولید قطعات فلزی است، اما چالش‌هایی همچون کنترل تخلخل و اعوجاج ناشی از انقباض هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

کلمات کلیدی: چاپ سه بعدی فلزات، ساخت افزودنی، MFFF، فیلامنت فلزی

۱. مقدمه

ساخت افزایشی (Additive Manufacturing - AM) به فرایندهایی اطلاق می‌شود که در آن مواد به صورت لایه به لایه برای ساخت قطعات با هندسه دلخواه، مستقیماً از داده‌های مدل سه بعدی ساخته می‌شوند. این روش برخلاف روش‌های تولید سنتی مانند تولید کاهشی و شکل‌دهی است. در AM، مدل سه‌بعدی ایجادشده با نرم‌افزار طراحی به کمک رایانه (CAD) بدون نیاز به برنامه‌ریزی پیچیده تولید، مستقیماً قابل چاپ است. این امر تولید اشیای پیچیده را از داده‌های دیجیتال ساده‌تر می‌سازد. (استاندارد ISO/ASTM 52900)

در اینجا مرور کوتاهی از دسته بندی انواع روش‌های چاپ سه بعدی خواهیم داشت.

روش فتوپلیمریزاسیون یا Vat photopolymerization (VPP) : در این روش مایعات فوتوپلیمری که درون مخزن قرار دادیم تحت تاثیر نورUV قرار می‌گیرد و در نهایت پدیده cross linking اتفاق می‌افتد. [۱]

روش Material jetting (MJT) : در این روش، بر روی نقاط دلخواه از بستر پودر مایعی به نام بایندر ریخته می‌شود که باعث چسبیدن پودر به هم می‌شود. این فرایند در عین حالی که دامنه وسیعی از مواد را پوشش می‌دهد هزینه نسبتاً پایینی برای اجرا دارد. [۱]

روش ذوب بستر پودری یا Powder bed fusion (PBF) : این روش می‌تواند با دقت بالا و ساختارهایی با چگالی بیش از ۹۹.۵٪ قطعات را تولید کند به صورتی که حرارت از یک منبع انرژی بر روی نقاطی خاص از بستر پودر اعمال شود و آن را ذوب یا سینتر کند. از معایب آن نیز می‌توان به سرعت پایین و هزینه بالا اشاره کرد. [۱]

روش چسباندن پودری یا Binder jetting : در این روش بر روی نقاط دلخواه از بستر پودر بایندر ریخته می‌شود که باعث چسبیدن پودر به هم می‌شود، این فرایند در عین حالی که دامنه وسیعی از مواد را پوشش می‌دهد، هزینه نسبتاً پایینی برای اجرا دارد.[۱]

روش رسوب‌گذاری با انرژی متمرکز یا Direct energy deposition : پودر یا سیم مدنظر را ذوب می‌شود و با نرخ بالا رسوب داده می‌شود، اما تولید قطعات نهایی مستقیم با آن بسیار دشوار است.[۱]

روش Sheet lamination : در این روش، لایه‌هایی از ورق‌ها به هم متصل شده و قطعه نهایی را شکل می‌دهند. این روش مناسب برای سازه‌های بزرگ و ترکیباتی از آلیاژهای فلزی و مواد الکترونیکی است. یکی از چالش‌های آن، مقاومت پایین در راستای محور z می‌باشد.[۱]

اکستروژن مواد یا (Material extrusion – MEX) یکی دیگر از فرایندهای ساخت افزایشی است که با پخش کنترل‌شده ماده نرم‌شده از طریق یک نازل مشخص می‌شود. [۲, ۳] رایج‌ترین شکل این فرایند، ساخت با فیلامنت مذاب (Fused filament fabrication – FFF) است که در آن یک نازل گرم‌شونده، فیلامنت از جنس ترموپلاستیک را به‌صورت لایه‌به‌لایه اکسترود کرده و قطعه سه بعدی را شکل می‌دهد. فناوری MEX به‌مرور توسعه یافته و اکنون قادر به استفاده از انواع مواد شامل ترموپلاستیک‌ها، کامپوزیت‌ها، فلزات و سرامیک‌ها است. [۲] ساخت با فیلامنت فلزی (MFFF) یکی از کاربردهای خاص این روش است [۴] که در آن از فیلامنت‌های پرشده با پودر فلزی برای تولید قطعات فلزی استفاده می‌شود. [۵, ۶]

فرایندهای ساخت افزایشی به‌طور گسترده‌ای در اوایل دهه ۱۹۹۰ طبقه بندی شدند که در این چارچوب، اکستروژن مواد به عنوان یکی از زیرشاخه‌های AM مطرح شد. [۳] با توجه به تحقیقات چند سال اخیر که در زمینه روش تولید MFFF انجام شده بود و همینطور کمبود مقالات فارسی مروری در این زمینه، مقاله زیر را به منظور رفع این نیازها و همچنین مطالعه و تحقیق بیشتر روی این حوزه خاص از چاپ سه بعدی فلزی تدوین کردیم.

۲. مراحل تولید

زنجیره فرآیند ساخت افزودنی مبتنی بر فیلامنت فلزی (MFFF) به طور معمول متشکل از ۳ مرحله می‌باشد که در اینجا به طور کلی این مراحل را بررسی خواهیم کرد.

چاپ (Printing) : این مرحله ابتدایی می‌باشد که جسم سه بعدی حاصل از این مرحله که به آن قطعه سبز (Green part) می‌گویند، از طریق تکنیک FFF به صورت لایه به لایه ساخته می‌شود. [۶]

فیلامنت بر پایه پلیمر که با ذرات پودر فلزی مخلوط شده، به داخل نازلِ گرم تغذیه می‌شود.[۶] سپس نازل بر اساس مسیرهای از پیش تعیین شده طبق مدل ۳ بعدی که به صورت جی-کد (G-code) می‌باشد، حرکت می‌کند. [۶, ۷]

فیلامنت ذوب شده از طریق نازل بر روی سطح ساخت اولیه یا لایه قبلی اکسترود می‌شود.[۶] اتصال بین هر لایه از طریق نفوذ زنجیره‌های پلیمری بین لایه‌ها اتفاق می‌افتد. [۶] پارامترهای چاپ اعم از دمای نازل، دمای صفحه ساخت، سرعت چاپ، ارتفاع هر لایه، چگالی پر شوندگی و نرخ جریان بر روی پارامترهای کیفی قطعه سبز مانند چگالی، میزان تخلخل و دقت ابعادی تاثیر گذار است. [۵, ۶]

در این مرحله قطعه سبز به طور عمدی مقداری بزرگ تر از فایل سه‌بعدی چاپ می‌شود تا میزان انقباض رخ داده در مرحله تف جوشی (Sintering) جبران شود. [۶] همچنین قطعات پیچیده از نظر ساختاری ممکن است نیازمند ساختار پشتیبان (Support structure) برای قسمت‌های دارای شیب منفی، باشند. [۸] این قسمت‌ها معمولا از جنس یکسانی با قطعه یا در سیستم‌های تجاری از ساختارهای پشتیبان سرامیکی استفاده می‌شود. [۶]

جداسازی (Debinding) : یکی از مراحل مهم فرآیند، جداسازی می‌باشد. در این مرحله بحرانی بایندر پلیمری که ذرات فلزی را در قطعه سبز در کنار هم نگه داشته بود، حذف می‌شود. [۶, ۷] این مرحله برای بدست آوردن یک قطعه فلزی غیرآلی الزامی می‌باشد. جداسازی معمولا در ۲ مرحله انجام می‌پذیرد. [۶]

در ابتدا جزء اصلی بایندر به صورت انتخابی حذف می‌شود. این کار باعث بوجود آمدن حفره‌هایی در قطعه سبز می‌شود که حذف باقی مانده بایندر را تسهیل می‌بخشد. [۶] این کار می‌تواند از ۳ روش جداسازی محلولی، جداسازی کاتالیزوری یا جداسازی حرارتی بسته به نوع بایندر انجام بپذیرد. [۶, ۷] به طور خلاصه جداسازی محلولی بصورت غرق کردن قطعه در یک حلال، جداسازی کاتالیزوری از طریق استفاده از بخار اسید کاتالیزوری و جداسازی حرارتی بر اساس انتقال گرمای کنترل شده به قطعه می‌باشد. [۶] برای حذف جزء فرعی یا استحکام بخش بایندر که معمولا در مرحله دوم جداسازی حذف می‌شود، معمولا از جداسازی حرارتی استفاده می‌شود. [۶] حذف کامل بایندر بسیار ضروری و مهم می‌باشد به طوری که حضور ناخالصی‌های کربنی باقی مانده می‌تواند تاثیر منفی روی فرآیند تف جوشی و کیفیت نهایی قطعه بگذارد.[۶] پارامترهای فرآیند جداسازی مانند نوع و دمای محلول، نرخ گرمایش و اتمسفر بایستی به دقت کنترل شوند تا از بهم خوردن یکپارچگی شکل قطعه یا بروز ترک‌ها، بادکردگی‌ها و اعوجاج جلوگیری شود. [۶]

تف جوشی (Sintering) : فرآیندِ پایانیِ دما بالا می‌باشد که با تثبیت ذرات پودر فلزی، آنها را به یک قطعه جامد متراکم تبدیل می‌کند. [۶, ۷] قطعه جداسازی شده که اکنون قطعه قهوه‌ای نامیده می‌شود، در داخل کوره تا دمای ۷۰ الی ۹۰ درصد نقطه ذوب پودر گرما داده می‌شود. [۶, ۸] تف جوشی در داخل یک اتمسفر کنترل شده مانند خلاء، نیتروژن، اکسیژن یا آرگون برای جلوگیری از اکسیداسیون یا هر واکنش ناخواسته دیگری انجام می‌پذیرد. [۶]

پدیده نفوذ اتمی باعث می‌شود تا ذرات در همدیگر نفوذ کنند، گلویی‌ها شکل بگیرند و تخلخل کاهش یابد. [۶] قطعه در هنگام تف جوشی تحت انقباض خطی شدیدی در حدود ۱۵ الی ۲۰ درصد قرار می‌گیرد تا متراکم شود. [۶, ۷] همانطور که گفته شد این انقباض بایستی در مدل سهبعدی اولیه در نظر گرفته شود. [۶] پارامترهای تف جوشی اعم از دمای نهایی، زمان نگهداری، نرخ سرد/گرم شدن و نوع اتمسفر کاملا وابسته به مواد اولیه می‌باشد و برای بدست آوردن چگالی و خواص مکانیکی مورد نظر بایستی به آنها دقت شود. [۶]

پس از این مراحل، منابع به پردازش قطعه پس از تف جوشی نیز اشاره می‌کنند. فرآیندهایی مانند پرداخت سطحی، شات بلاست، عملیات حرارتی یا پرس ایزواستاتیک داغ (HIP) برای کاهش تخلخل باقی مانده و افزایش خواص مکانیکی بسته به نوع قطعه توصیه می‌شود. [۶]

۳. فیلامنت فلزی

۳–۱ . متریال‌های مورد استفاده در این روش

منابع متعدد اینگونه ذکر کردند که روش MFFF قابلیت اجرا بر روی انواع فلزات و آلیاژها را دارد. [۶-۸] در ابتدا مروری بر فلزات و آلیاژهای مرسوم مورد استفاده در این روش خواهیم داشت.

فولاد زنگ نزن 316L یکی از پر استفاده ترین متریال‌ها برای این روش است. [۵-۷] یکی از منابع به صراحت ذکر می‌کند که هزینه نهایی برای یک قطعه ساخته شده از روش MFFF نه برابر کمتر از ساخت همین قطعه از روش Selective laser Melting (SLM) می‌باشد. [۵] در یک منبع دیگر حتی از PLA به عنوان بایندر برای فیلامنت این ماده استفاده کرده است. [۹] همینطور اثر دمای نازل بر میزان تراکم قطعه 316L نیز مورد بررسی قرار گرفته است. [۹] تحقیقات نشان می‌دهند که می‌توان از این روش قطعاتی با این جنس با میزان تراکم بالای ۹۵ درصد تولید کرد. [۶]

فولاد زنگ نزن 17-4PH یکی دیگر از آلیاژهای متداول است که اغلب برای کاربردهای با استحکام بالا و نرخ مقاومت به خزش بالا استفاده می‌شود. [۶-۸] مطالعات پیش رو برای این آلیاژ به منظور بهینه کردن پارامترهای چاپ و درک خواص خمشی ناهمسانگرد آن می‌باشد. [۶]

آلیاژ Ti-6Al-4V به جهت داشتن نسبت استحکام به وزن بالا ماده‌ای کلیدی در صنعت هوافضا، خودروسازی و بیومدیکال می‌باشد. [۷] تمرکز مطالعات اخیر بیشتر بر روی چاپ پذیر بودن و وابستگی میان دمای تف جوشی و ریزساختار برای این ماده متمرکز شده است. [۶]

آلیاژهای دیگر مورد استفاده در این روش می‌توان به Inconel 718 که در دماهای بالا کاربرد دارد، همچنین آلیاژهای پایه نیکل-تیتانیوم نیز که به آلیاژهای حافظه دار معروف هستند، نام برد که به تازگی با موفقیت از این روش چاپ شده اند. [۶]

در کنار اینها منابع از چاپ آلیاژهای پایه مس، پایه آلومینیوم، پایه منیزیم همچنین آلیاژهای سنگین پایه تنگستن نیز یاد کرده اند. [۶, ۷] فولادهای ابزار و فولادهای کم آلیاژ نیز در دسته مواد تجاری مورد استفاده از این روش پر کاربرد هستند. [۶, ۷] همانطور که ذکر شد تطبیق پذیری تکنیک اکستروژن مواد، این روش را قادر ساخته تا در کنار چاپ مواد پلیمری از روش FFF قادر به چاپ بازه گسترده‌ای از فلزات نیز باشد. [۶-۸]

۲-۳ . ترکیب شیمیایی و شکل شناسی پودر

مشخصات و خصوصیات پودر فلز، علی الخصوص اندازه ذرات پودر و میزان درصد پودر در ترکیب فیلامنت از اهمیت بالایی برخورد است و فاکتورهای اساسی در حوزه ماده اولیه برای فرآیند MFFF هستند. این پارامترها در انتها تاثیر زیادی بر آماده سازی ماده اولیه، کیفیت فیلامنت، فرآیند چاپ و خصوصیات قطعه نهایی تف جوشی شده دارند. [۶, ۷, ۱۰]

پودر مورد استفاده در فرآیند MFFF در درجه اول بایستی کروی و نسبتا ریز با میانگین اندازه ذرات کمتر از ۵۰ میکرومتر، شبیه به پودرهایی که در فرآیند ساخت از طریق متالورژی پودر (MIM) باشد. [۶] در MIM ، ذرات با میانگین اندازه بین ۵ الی ۱۵ میکرومتر استفاده می‌شود. [۸] هر چه اندازه ذرات پودر ریزتر باشد می‌توانیم درصد پودر در ترکیب ماده اولیه (solid loading) را بالاتر ببریم. در تحقیقی با کاهش میانگین اندازه ذرات پودر 316L از ۳۰ میکرومتر به ۱۰ میکرومتر، حداکثر میزان پودر در ترکیب فیلامنت از ۵۰ درصد به ۶۰ درصد افزایش پیدا کرد. [۶]

پودر با ذرات ریزتز امکان چاپ لایه‌های ظریف و شبکه‌های ریزتر را فراهم می‌سازد که این خود باعث افزایش کیفیت سطح و ایجاد قابلیت تولید قطعات کوچک تر می‌شود. [۵, ۶] در کنار اینها هرچه ذرات ریزتر باشند، نیروی محرکه در فرآیند تف جوشی بیشتر می‌شود. [۶] اگر اندازه ذرات بزرگ باشد این می تواند منجر به مشکلاتی در فرآیند مانند، گیر کردن پیچ اکسترودر، کاهش استحکام نمونه بایندر زدایی شده و افزایش امکان بوجود آمدن عیب و اعوجاج در قطعه نهایی شود. [۵] در مورد درصد پودر در ترکیب ماده اولیه می‌توان گفت میزان پودر بیشتر مطلوب می‌باشد، تا جایی که منجر به کاهش اعوجاج، انقباض همگن و تراکم بالا بعد از تف جوشی شود. [۱۰] با این حال افزایش بیش از حد درصد میزان پودر، فیلامنت را تردتر می‌کند (ممکن است فیلامنت شکسته شود) و گرانروی ذوب آن را افزایش می‌دهد. [۱۰] و بالطبع درصد پودر بیش از حد باعث پیچیده شدن فرآیند تولید فیلامنت می‌شود. [۷] میزان درصد پودر بهینه معمولا در بازه ۵۰ تا ۶۰ درصد می‌باشد. [۷] بعضی مطالعات درصدهای بالاتر تا ۷۲ درصد با اندازه ذرات کوچک تر را مورد آزمایش قرار دادند که این افزایش درصد به طور موثری روی فرآیند تاثیرگذار بوده است. [۷, ۱۰] میزان درصد پودر در ماده اولیه بر روی خواص مکانیکی تاثیر گذار است (مانند سفتی و شکل پذیری)، [۸] افزایش آن باعث کاهش انقباض و افزایش تراکم خواهد شد. [۱۰]

۳-۳ . ترکیب شیمیایی و مشخصات بایندر

فیلامنت مورد استفاده در فرآیند MFFF، کامپوزیتی متشکل از پودر فلز به همراه سیستم بایندر (Binder system) می‌باشد. [۴-۷, ۱۰, ۱۱] سیستم بایندر نقش بسیار محوری در کل فرآیند از آماده سازی فیلامنت تا چاپ، جداسازی و هم جوشی ایفا می‌کند. [۷, ۱۱, ۱۲] سیستم بایندر در این فرآیند نقش نگه داشتن پودر فلز در قالب فیلامنت را دارد تا قابلیت این را داشته باشد که قرقره شده و به چاپگر FFF وارد شود. [۶] سیستم بایندر جریان پذیری مناسب به همراه ویسکوزیته کم را در دمای چاپ برای اکسترود کردن صاف از طریق نازل فراهم می‌آورد. [۱۳] این سیستم همینطور بایستی یکپارچگی ساختاری را برای قطعه سبز ایجاد کند. [۶, ۷, ۱۱, ۱۳] نکته مهم دیگر آن است که سیستم بایندر باید بدون ایجاد هیچ عیبی در فرآیند جداسازی حذف شود. [۶, ۱۰, ۱۲]

اغلب سیستم‌های بایندر مورد استفاده در فرآیند MFFF مخلوطی از ۳ جزء اصلی می‌باشد. [۱۱]

بایندر اصلی (Main binder) : این جزء اکثریت (۵۰ الی ۹۰ درصد) ماتریس پلیمری را تشکیل می‌دهد که معمولا یک پلیمر با وزن مولکولی کم است که ابتدا در مرحله جداسازی اولیه حذف می‌شود. [۶-۸] در اینجا نمونه‌هایی از این ماده را مرور می‌کنیم.

پلی اکسی متیلن یا پلی استال (Polyoxymethylene (POM) or polyacetal) – این بایندر از طریق جداسازی کاتالیزوری به راحتی جدا می‌شود. [۸]

پلی اتیلن گلیکول (Polyethylene glycol (PEG)) – این بایندر حلال در آب است و جداسازی آن نسبتا ساده می‌باشد. [۸]

الاستورهای ترموپلاستیک (Thermoplastic elastomer (TPE)) – این بایندر می‌تواند فیلامنت را انعطاف پذیر کند همچنین به راحتی در هنگام چاپ بین لایه‌ها پیوند برقرار کند. [۱۰]

موم پارافین (Paraffin wax (PW)) – دارای ویسکوزیته پایین می‌باشد و در هنگام ذوب می‌تواند سفتی فیلامنت را ارتقا ببخشد. [۶, ۸]

بایندر مستحکم کننده (Backbone binder) : از نوع پلیمرهای با وزن مولکولی بالا، که می‌تواند تا۵۰ درصد در سیستم بایندر حضور داشته باشد. [۶-۸] نقش اصلی این جزء حفظ یکپارچگی شکل قطعه هنگام جداسازی بایندر اصلی و در ابتدای مرحله هم جوشی می‌باشد. [۱۱] معمولا در حین انجام مرحله جداسازی حرارتی قبل از رسیدن به هم جوشی نهایی حذف می‌شود. [۱۱] در اینجا نیز چند نمونه از بایندرهای مستحم کننده مورد استفاده آورده شده است.

پلی لاکتیک اسید (Polylactic acid (PLA))[۶, ۹, ۱۴]

پلی الفین (Polyolefin (PO))[۶]

پلی اتیلن‌ها (Polyethylenes (HDPE/LDPE)) [۸]

مواد افزودنی : این اجزاء بخش کوچک تری (تا ۱۰ درصد) از سیستم بایندر را تشکیل می‌دهند و برای بهبود انعطاف پذیری فیلامنت، جلوگیری از تجمع پودر و افزایش تعامل پودر و بایندر به کار می‌روند. [۱۰, ۱۱, ۱۳] در اینجا نیز چند نمونه پر کاربرد از این مواد آورده شده است.

دی بوتیل فتالات ((Dibutyl phthalate (DBP) و دیوکتیل فتالات ((Dioctyl Phthalate (DOP) – این مواد به عنوان نرم کننده برای افزایش انعطاف پذیری و کارایی فیلامنت به کار می‌رود. [۶, ۱۲]

اتیل اکریلیک اسید ((Ethylene acrylic acid (EAA) و HDPE پیوندی با اسید اکریلیک (Acrylic acid grafted HDPE (AAHDPE)) – این مواد پیوند میان پودر و بایندر را تقویت، پراکندگی پودر را افزایش و ویسکوزیته را کاهش می‌دهند. [۶]

اسید استئاریک ((Stearic acid (SA) – بیشتر به عنوان سورفکتانت برای کاهش ویسکوزیته و جلوگیری از جمع شدگی پودر به هنگام مخلوط کردن به کار می‌رود.[۶, ۷, ۱۰]

از مواد دیگر می‌توان به اسید اولئیک ((Oleic acid (OA)[۶, ۸]، انواع نرم کننده‌ها (Plasticizers) [۶, ۸, ۱۰, ۱۲]، چسبناک کننده‌ها (Tackifiers)[۱۰] که هر کدام کاربرد مشخصی را دارند، اشاره کرد.

استفاده زیاد از پودر فلز (حدود ۵۵ الی ۶۵ درصد) برای رسیدن به قطعه ای متراکم پس از هم جوشی الزامی است اما این کار باعث افزایش شکنندگی و ویسکوزیته در حالت مذاب است که مانع چاپ با کیفیت می‌شود.[۱۲] استفاده از سیستم بایندر چند جزئی و افزودنی‌های مختلف می‌تواند تعادل را در این دوگانگی ایجاد کند. [۶] سیستم‌های پودری مختلف (بر اساس ترکیب شیمیایی، اندازه ذرات و شکل‌شناسی) ممکن است نیازمند سیستم‌های بایندر متفاوت باشند. حتی برای یک فلز یکسان، تفاوت در مشخصات پودر می‌تواند نیازمند تنظیم دوباره مشخصات سیستم بایندر باشد. [۶] اجزاء سیستمِ بایندرِ انتخاب شده، روش جداسازی و شرایط حذف کامل بایندر بدون ایجاد آسیب به شکل قطعه را تعیین می‌کند.[۱۱]

جزئیات مربوط به گریدهای پلیمری مورد استفاده و نسبت آنها مشابه مواد اولیه مورد استفاده در فرآیند MIM است. فرمولاسیون فیلامنت‌های تجاری اغلب اختصاصی و مخصوص همان شرکت می‌باشد. [۶, ۸, ۱۳] همینطور اطلاعات مربوط به بایندرهای تجاری در مقالات فاش نمی‌شود.[۱۳]

۴-۳ . ویسکوزیته (گرانروی) فیلامنت

ویسکوزیته رشته‌های فیلامنت مورد استفاده در فرآیند MFFF یک ویژگی پیچیده است که تحت تاثیر بارگذاری پودر فلز، ترکیب خاص سیستم بایندر پلیمری مورد استفاده و دمای اکستروژن می‌باشد.[۷, ۱۰] فیلامنت‌های قابل چاپ باید دارای ویسکوزیته و نرخ تغذیه کافی در دمای چاپ باشند تا امکان اکستروژن مداوم مواد فراهم شود. [۱۰] در عین حال ویسکوزیته نباید خیلی کم باشد، زیرا می‌تواند منجر به ایجاد قطعه سبز با استحکام پایین شود. [۱۰] مطالعات نشان داده اند که مواد قابل چاپ می‌توانند ویسکوزیته‌ای بین ۵۰ الی ۲۶۳۰pa.s داشته باشند. [۱۰] ویسکوزیته متوسط (۱۰۰۰pa.s) معمولا برای رشته‌های قابل چاپ ترجیح داده می‌شود. [۱۰]

۵-۳ . قطر فیلامنت

محدوده مناسب برای قطر رشته‌های فیلامنت به شدت کنترل می‌شود تا از چاپ مناسب اطمینان حاصل گردد. [۶] منابع نشان می‌دهد که رایج ترین قطر ۱.۷۵ میلی‌متر می‌باشد. [۶, ۱۵] البته در بعضی موارد از قطر ۲.۸۵ میلی‌متر نیز بسته به نوع چاپگر استفاده می‌شود. [۶]

۶-۳ . روش تولید فیلامنت

همانطور که گفته شد روش MFFF بر اساس استفاده از ماده اولیه‌ای کامپوزیتی است و در فرم فیلامنت می‌باشد که متشکل از مخلوطی از پودر فلز به همراه سیستم بایندر است. [۴] مقدار فلز در فیلامنت‌ها حدود ۷۰ الی ۹۰ درصد وزنی [۱۴] و همینطور بین ۵۵ الی ۶۰ درصد حجمی می‌باشد. [۵]

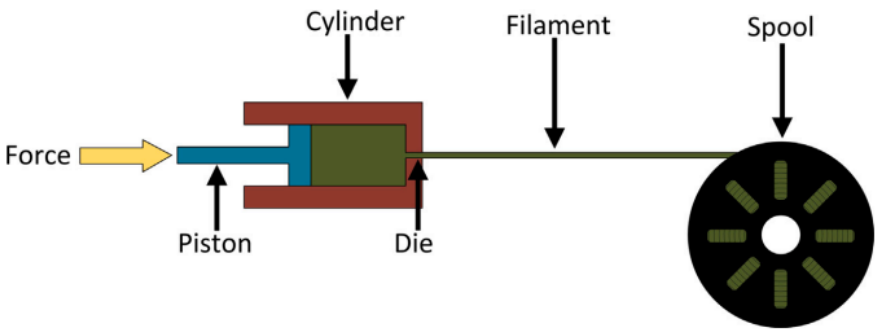
تولید فیلامنت در این روش متشکل از چند مرحله کلیدی است.

انتخاب ماده : این مرحله شامل انتخاب مناسب پودر فلزی با شکل و اندازه مورد نیاز [۷] و یک سیستم بایندر مناسب می‌باشد [۵-۷] که اغلب شامل یک جزء اصلی، بایندر مستحکم کننده و مواد افزودنی است. [۱۱]

ترکیب کردن : پودر فلزی انتخاب شده به همراه سیستم بایندر بایستی با یکدیگر مخلوط شوند تا یک توزیع همگن از ذرات فلزی را درون ماتریس بایندر داشته باشیم.[۷, ۱۰] مخلوط کردن می‌تواند توسط دستگاه اکسترودر دو پیچی دوار (rotating twin-screw extruder) انجام شود. [۵] یکنواختی توزیع پودر به طور قابل توجهی می‌تواند بر رئولوژی فرآیند در هنگام تولید تاثیر گذار باشد. [۱۰]

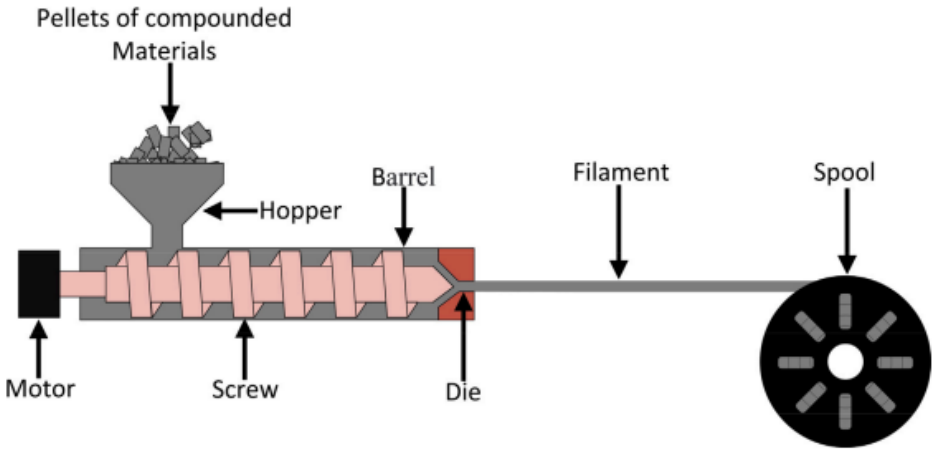
اکستروژن : این ترکیب یکنواخت سپس به صورت مذاب اکسترود و تبدیل به فیلامنت خواهد شد. [۶, ۱۰] این مرحله بسیار پر اهمیت می‌باشد طوری که مواد در آن از طریق اکسترودر رانده می‌شود و با استفاده از سیم پیچ بر روی یک قرقره پیچیده می‌شود. [۱۰] به طور کلی از ۲ تکنیک اصلی برای اکستروژن می‌توان استفاده کرد. [۱۰]

اسکترود به کمک پیستون (Piston-extrusion) : مواد مرکب در یک استوانه گرم شده، بارگذاری می‌شود و از طریق یک قالب رانده می‌شود. (شکل ۱)



شکل ۱ : تولید فیلامنت از طریق روش اکسترود به کمک پیستون [۱۰]

اکسترود با کمک اکسترودر پیچی (Screw extruder) : این روش، به ویژه با استفاده از یک اکسترودر تک پیچ، برای ساخت فیلامنت محبوب تر می‌باشد. اکسترودر معمولاً دارای چندین ناحیه گرمایشی برای کنترل ذوب و جریان مواد اولیه است. شرکت‌هایی مانند Desktop metal، Markforged، BASF و Virtual Foundries با استفاده از این تکنیک فیلامنت‌های خود را تولید می‌کنند. [۱۰] (شکل ۲)



شکل ۲ : تولید فیلامنت با کمک اکسترودر پیچی [۱۰]

پیچیدن : سپس فیلامنت اکسترود شده روی قرقره‌ها پیچیده می‌شود و برای استفاده در چاپگر FFF آماده است. [۱۰, ۱۶]

دستیابی به درصد پودر بالا با حفظ قابلیت اکسترودپذیری و انعطاف پذیری مناسب برای قرقره شدن یک چالش بزرگ در تولید فیلامنت می‌باشد. فیلامنت‌هایی با سورفکتانت یا نرم کننده ناکافی ممکن است به دلیل گشتاور اختلاط بیش از حد (excessive mixing torqu) برای اکستروژن مذاب نامناسب باشند. [۶] فیلامنت بدست آمده باید دارای سفتی، استحکام، و چقرمگی مناسب باشد تا از تغذیه مناسب در چاپگر سه بعدی بدون هیچگونه شکستگی اطمینان حاصل شود. [۱۶]

خواص رئولوژیکی ماده اولیه در طول اکستروژن حیاتی می‌باشد. [۱۰, ۱۷] فیلامنت بایستی ویسکوزیته پایینی در دمای چاپ داشته باشد تا امکان اکستروژن مداوم مواد فراهم شود. به همین منظور میزان درصد پودر در فیلامنت بایستی بهینه باشد زیرا پودر بیش از حد می‌تواند ویسکوزیته را افزایش دهد و منجر به شکستن فیلامنت شود و در عین حال درصد پودر کم منجر به انقباض و نشست بالا در حین تف جوشی می‌شود. در کنار همه اینها اختلاط همگن بایندر و ذرات پودر در طول ترکیب برای دستیابی به یک جریان بدون وقفه ضروری است. [۱۰]

در حالی که بسیاری از شرکت‌ها در حال حاضر به صورت تجاری به تولید فیلامنت‌های MFFF مشغول هستند، برای تولید کنندگان خریداری این فیلامنت‌ها ممکن است مقرون به صرفه نباشد بنابراین تحقیقات همچنان بر توسعه روش‌هایی برای آزمایشگاه‌ها و صنایع برای ساخت فیلامنت‌های خود با هزینه کمتر متمرکز است. [۱۰]

۴. چاپ

۴–۱. مراحل چاپ

همانطور که اشاره شد، به طور کلی Material extrusion یکی از روش‌های ساخت افزایشی است. در این روش ماده‌ی نرم‌شده به‌صورت کنترل‌شده از طریق نازل روی سطح ساخت (substrate) رسوب داده می‌شود.[۲, ۶] ساخت با فیلامنت مذاب یا همان مدل‌سازی رسوب مذاب (FDM) رایج‌ترین نوع این فرآیند محسوب می‌شود. در اینجا به طور خلاصه مراحل چاپ قطعه را مرور خواهیم کرد. [۶]

ایجاد مدل سه‌بعدی : فرایند با طراحی مدل سه‌بعدی توسط نرم‌افزارهای طراحی به کمک رایانه (CAD) یا از طریق اسکن سه‌بعدی آغاز می‌شود. خروجی این مرحله معمولاً فایلی با فرمت STL است. [۶] برش لایه‌ای و تولید G-code : فایل STL توسط نرم‌افزار Slicer به لایه‌های نازک تقسیم می‌شود. این نرم‌افزار، مسیر چاپ و پارامترهای اکستروژن را به کدی به نام G-code تبدیل می‌کند که برای چاپگر قابل فهم است. [۶] بارگذاری ماده و مایع‌سازی : همانطور که توضیح داده شد ماده اولیه در FFF معمولاً یک فیلامنت پلیمری ترموپلاستیک یا کامپوزیتی از پودر فلز و بایندر پلیمری است.[۴] این فیلامنت توسط چرخ تغذیه یا غلطک وارد محفظه‌ی گرمایی (liquefier) می‌شود، جایی که تا بالای نقطه‌ی ذوب یا نرم‌شوندگی گرم شده و به صورت مایع یا ویسکوز درمی‌آید. [۶] اکستروژن : فشار اعمال شده به ماده مذاب (ناشی از فشار مکانیکی فیلامنت تغذیه‌شده) باعث می‌شود ماده از نازل خارج شود. [۶] نرخ جریان حجمی ماده تابعی از سرعت تغذیه فیلامنت و شعاع آن است. [۱۸] رسوب‌دهی : نازل که روی محور X و Y حرکت می‌کند، مسیر تعریف‌شده در G-code را دنبال کرده و ماده‌ی مذاب را به صورت رشته‌های نازک (roads) روی بستر ساخت یا لایه‌های قبلی رسوب می‌دهد. [۶] پس از پایان هر لایه، پلتفرم به‌صورت مرحله‌ای در محور Z بالا می‌رود تا فضای لازم برای لایه بعدی ایجاد شود. [۱۸] انجماد و اتصال لایه‌ها : ماده‌ی رسوب‌یافته به سرعت سرد و جامد شده و به لایه‌های قبلی می‌چسبد. [۶]

درباره پرینترهای مورد استفاده در فرآیند MFFF می‌توان گفت که تمام پرینترهای تجاری قابل استفاده در فرآیند FFF قابلیت استفاده در این روش را نیز دارند. از انواع و اقسام پرینترهای مدل کارتزین، دلتا، سه بعدی قطبی و چند نازله می‌توان برای این فرآیند استفاده کرد. [۶]

۴–۲. نازل

نازل‌های مورد استفاده برای این پرینترها از اهمیت خاصی برخوردار است. به دلیل محتوای بالای فلز در فیلامنت که می‌تواند باعث سایش شدید شود، استفاده از نازل‌های سخت‌کاری‌شده یا مقاوم در برابر سایش در MFFF توصیه می‌شود تا پایداری جریان فیلامنت حفظ شده و عمر نازل افزایش یابد.[۶] در یکی از مطالعات، از نازل برنجی استفاده شده است. [۵] از طرف دیگر قطرهای متداول نازل در این روش، در بازه ۰.۴ تا ۱.۰ میلی‌متر قرار دارند.[۱۹] قطر نازل تاثیر قابل توجهی بر دقت چاپ دارد. [۳] نازل‌های با قطر کمتر معمولاً منجر به کاهش زبری سطح [۲۰] و امکان ایجاد جزئیات دقیق‌تر [۶] می‌شوند. ارتفاع لایه نیز تحت تأثیر قطر نازل قرار دارد. [۲۱] افزایش قطر نازل می‌تواند دقت چاپ را کاهش دهد، اما ممکن است به کاهش احتمال انسداد نازل که یکی از چالش‌های روش‌های اکستروژن محور در AM است، کمک کند. [۳]

۳-۴ . پارامترهای چاپ

۱-۳-۴ . دمای عملکرد

دمای پیشنهادی برای چاپ (دمای نازل) و دمای بستر چاپ در فرآیند MFFF از پارامترهای کلیدی هستند که به طور قابل توجهی بر کیفیت قطعه سبز چاپ شده و در نهایت، بر کیفیت قطعه فلزی سینتر شده تأثیر می‌گذارند. [۶] مقادیر بهینه این دماها ثابت نیستند و به عواملی مانند ترکیب پودر فلزی و بایندر موجود در فیلامنت بستگی دارند. دمای نازل باید بالاتر از دمای ذوب پلیمر بایندر موجود در فیلامنت باشد تا ویسکوزیته به حدی کاهش یابد که اکستروژنِ مناسب انجام شود. [۱۹] مطالعه‌ای نشان داده است که دمای ۲۹۰ درجه سانتی‌گراد، دمای بهینه برای یک فیلامنت خاص از جنس فولاد زنگ نزن 316L (با دمای ذوب بایندر استحکام دهنده در حدود ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. [۱۹] در دماهای پایین‌تر، ویسکوزیته زیاد مانع از اکستروژن مداوم می‌شود، در حالی که دماهای بالاتر چسبندگی لایه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. [۱۹]

۲-۳-۴ . ضخامت لایه

چندین عامل بر انتخاب ضخامت لایه در MFFF تأثیر دارند.

قطر نازل : ضخامت لایه معمولاً کسری از قطر نازل است. در صورتی که ضخامت لایه بیش از حد بزرگ باشد، می‌تواند باعث اتصال ضعیف بین لایه‌ها و ایجاد شکاف شود. [۵] کیفیت سطح موردنظر : کاهش ضخامت لایه باعث کاهش اثر پله‌ای (Staircase effect) در سطوح شیب‌دار و در نتیجه بهبود پرداخت سطحی شود، اما در مقابل، زمان چاپ را افزایش می‌دهد. [۲۱] دقت ابعادی : کاهش ضخامت لایه می‌تواند موجب افزایش دقت ابعادی قطعه نهایی شود.[۶] ویژگی‌های ماده : ویسکوزیته و رفتار جریان فیلامنت فلزی-پلیمری در دمای چاپ، می‌تواند بر ضخامت لایه قابل دستیابی و بهینه تأثیر بگذارد. [۶] مطالعه‌ای که به بهینه‌سازی پارامترهای چاپ برای فولاد زنگ‌نزن 17-4 PH پرداخته، بهترین خواص کششی را در ضخامت لایه ۰.۲ میلی مترگزارش کرده است.[۴]

۳-۳-۴ . درصد پرشدگی (Infill)

در فرایند MFFF، درصد پرشدگی معمولاً در مقادیر بالا تنظیم می‌شود تا چگالی و استحکام قطعه نهایی پس از مراحل حذف بایندر و تف جوشی به حداکثر برسد. اگرچه محدوده استانداردی به‌طور جهانی تعریف نشده است، اما تمایل به استفاده از درصد پرشدگی بالا، اغلب در حدود ۱۰۰٪ یا حتی اندکی بیشتر مشاهده می‌شود. درصد پرشدگی نقش مهمی در ساختار داخلی قطعه سبز در MFFF ایفا می‌کند و در نتیجه، استحکام و چگالی قطعه فلزی نهایی را تعیین می‌کند. افزایش درصد پرشدگی منجر به افزایش استحکام مکانیکی می‌شود. با پر شدن بیشتر فضای داخلی، قطعه توانایی بهتری در تحمل بارهای مکانیکی خواهد داشت. [۵] افزایش infill همچنین باعث ایجاد چگالی بیشتر در قطعه سبز و کاهش تخلخل‌های داخلی می‌شود.[۵] این ویژگی در MFFF بسیار حیاتی است، زیرا هرگونه فضای خالی در قطعه سبز می‌تواند در مراحل حذف بایندر و تف جوشی باقی بماند یا حتی افزایش یابد. [۶] یک قطعه سبز متراکم، چگالی نهایی بیشتری در قطعه فلزی سینتر شده ایجاد کرده و تخلخل را کاهش می‌دهد. [۶]

۴-۳-۴ . الگوهای مختلف پر شدگی

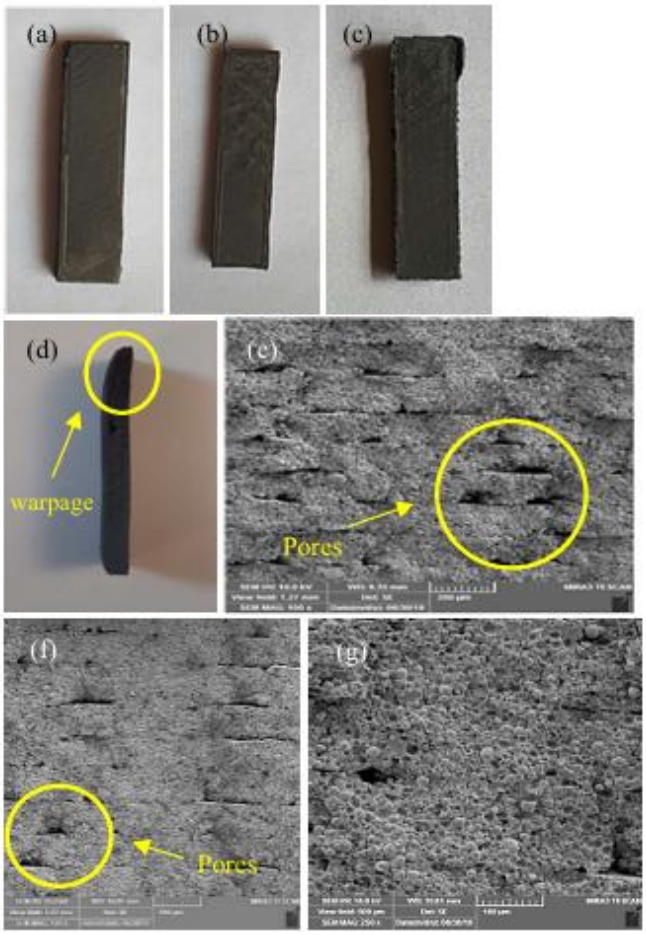
مطالعات منابع مختلف جزئیات محدودی درباره الگوهای پرشدگی خاص MFFF ارائه داده‌اند. با این حال، یک تحقیق به کارگیری الگوی پرشدگی مستطیلی با زاویه ۴۵ درجه در هر لایه را گزارش کرده است، به گونه‌ای که فضای خالی بین خطوط پرشدگی باقی نماند و ساختار داخلی تقریباً جامد باشد.[۵]

۴-۳-۵ . دمای بستر ساخت

به گفته یک منبع، دمای بستر ساخت به منظور تقویت چسبندگی لایه اول و جلوگیری از تاب برداشتن در هنگام استفاده از فیلامنت‌های کامپوزیتی ۱۰۰ درجه سانتی گراد بایستی در نظر گرفته شود. [۱۹] مطالعه دیگری همچنین دمای بستر را برای چاپ به روش MFFF، ۹۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته بود. [۵]

۴-۳-۶ . سرعت چاپ

یک مطالعه به صورت مشخصی تاثیر سرعت‌های مختلف چاپ بر روی فولاد زنگ نزن 316L را با استفاده از دستگاه FDM معمولی بررسی کرده است. در این مطالعه از ۳ سرعت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی متر بر ثانیه استفاده شد. آنها دریافتند که سرعت چاپ ۲۰ میلی متر بر ثانیه کیفیت ظاهری و دقت ابعادی بالاتری را به همراه دارد و همچنین چسبندگی بالای بین لایه‌ها بدون هیچگونه حفره و تاب برداشتنی از دیگر مزایای استفاده از سرعت پایین تر بوده است. (شکل ۳) [۵]



شکل ۳ [۵] : a) سرعت چاپ ۲۰ میلی متر بر ثانیه، کیفیت بالا و ظاهر بدون تاب برداشتگی

b) سرعت چاپ ۳۰ میلی متر بر ثانیه با کیفیت نسبتا پایین

c) سرعت چاپ ۴۰ میلی متر بر ثانیه با کیفیت و ظاهر پایین

d) تاب برداشتگی که ناشی از سرعت بالا می‌باشد.

e) وجود منافض بین لایه ای در سرعت چاپ‌های بالا

f) کاهش منافذ در سرعت چاپ ۳۰ میلی متر بر ثانیه

g) چسبندگی بالا بین لایه‌ها بدون داشتن منافذ زیاد در سرعت ۲۰ میلی متر بر ثانیه

۵. جداسازی

پس از اینکه قطعه سبز با اکسترود کردن یک فیلامنت کامپوزیتیِ پلیمر- فلز شکل گرفت، قبل از اینکه ذرات فلز از طریق تف‌جوشی یکپارچه شوند، باید بایندر پلیمری حذف شود. به فرآیند حذف این بایندر پلیمری، جداسازی یا Debinding گویند. [۵, ۶, ۱۱, ۱۲]

همانطور که در ابتدا گفته شد، منابع، ۳ روش مختلف را برای جداسازی پیشنهاد کرده‌اند که می‌توان از تلفیق این روش‌ها با یکدیگر نیز استفاده کرد. [۵, ۱۱, ۱۲] در اینجا درباره جزئیات بیشتر روش جداسازی محلولی بحث خواهیم کرد.

روش جداسازی محلولی شامل استفاده از یک حلال برای حل و حذف بخش قابل توجهی از بایندر پلیمری است. [۱۱] جداسازی از طریق حلال، تشکیل منافذ به هم پیوسته را در داخل قطعه تسهیل می‌کند، که اینکار به خروج گاز از اجزای بایندر در طول جداسازی حرارتی کمک می‌کند. حلال‌های مورد استفاده معمولا مایعات قابل اشتعال هستند که نیاز به پروتکل مخصوص برای جابجایی دارند. [۱۳] در این روش از محلول‌های متنوعی استفاده می‌شود که در اینجا به چند مورد از پرکاربردترین‌هایشان می‌پردازیم. البته این را باید مد نظر داشته باشیم که محلول مورد استفاده در این روش باید با توجه به بایندر استفاده شده انتخاب شود.

سیکلوهگزان (Cyclohexane) به دفعات در منابع متعدد به عنوان جداکننده در فرآیند MFFF آورده شده است. [۶, ۱۰, ۱۲, ۱۵, ۱۹] در دماهای مختلف از جمله ۶۰ [۶, ۱۰]، ۶۵ [۱۹] و حتی در ۲۳، ۴۰ و ۷۵ درجه سانتی گراد [۱۵] استفاده شده است. این محلول در از بین بردن جزء اصلی بایندر موثر است و بایندر مستحم کننده را برای حفظ شکل قطعه باقی می‌گذارد. [۱۵] سرعت حل شوندگی سیکلوهگزان به دما و مشخصات ذرات بستگی دارد. دماهای بالاتر معمولا به دلیل افزایش انحلال منجر به حذف سریعتر می‌شود. [۸] منابع مختلف زمان‌های نگه داری مختلفی را برای این حلال پیشنهاد کرده اند. زمان بهینه بستگی به ضخامت و پیچیدگی قطعه، ترکیب بایندر و حلالیت آن در سیکلوهگزان و دمای انحلال دارد. بر اساس اطلاعات موجود در منابع بازه زمانی ۱۲ الی ۲۴ ساعت برای قطعات نازک تر و احتمالا طولانی تر تا ۵۷ ساعت[۱۹] برای مقاطع ضخیم‌تر مناسب باشد. نظارت منظم بر کاهش وزن قطعه بهترین راه برای تعیین نقطه پایان فرآیند جداسازی از طریق انحلال می‌باشد.

محلول هپتان (Heptane) نیز به عنوان یک حلال، گاهی اوقات در یک فرآیند دو مرحله ای با آب مقطر استفاده شده است. [۶, ۱۰] یکی از موارد استفاده از این محلول در دمای ۶۴ درجه سانتی گراد به مدت ۴ ساعت بوده است. [۱۰] حلال‌های دیگر از جمله استون (Acetone) [۱۲] ، آب [۱۰] و متیلن کلرید (Methylene Chloride) [۸] در شرایط مختلف به عنوان حلال مورد استفاده قرار گرفته اند.

منابع تاکید می‌کنند که انتخاب حلال باید با سیستم بایندر سازگار باشد و امکان حذف انتخابی بایندر اصلی را فراهم کند و در حالت ایده آل، بایندر مستحکم کننده را دست نخورده باقی بگذارد.[۶, ۱۲, ۱۵] اثربخشی جداسازی حلال تحت تاثیر عواملی مانند دما، زمان غوطه وری و همینطور هندسه و ابعاد قطعه چاپ شده است. [۸, ۱۰, ۱۲] منابع همچنین به نگرانی‌های بالقوه زیست محیطی و ایمنی مرتبط با برخی از حلال‌های آلی اشاره می‌کنند به همین دلیل علاقه روز افزون به سیستم‌های بایندرهای محلول در آب می‌باشد. [۱۰]

۶. تف جوشی

بر اساس گزارش منابع معتبر، تف جوشی (Sintering) یک مرحله مهم در فرآیند MFFF می‌باشد که قطعه متخلخلِ به دست آمده از مرحله جداسازی را که آنرا جسم قهوه ای می‌نامند، به یک قطعه فلزی متراکم و جامد تبدیل می‌کند. [۶]

۶–۱. سیکل گرمایی تف جوشی

منابع جزئیات قابل توجهی را در مورد سیکل گرمایش و سرمایش تف جوشی ارائه می‌دهند، به ویژه بر روی سرعت گرمایش و زمان نگهداری و همینطور نقش حیاتی آنها در فرآیند ساخت فیلامنت‌های فلزی MFFF تمرکز می‌کنند. [۵, ۶] داشتن چرخه دمایی تدریجی و تنظیم شده در تف جوشی بسیار مهم است. [۱۲] نرخ گرمایش بیش از حد بالا به ویژه در قطعات با دیواره ضخیم می‌تواند باعث ایجاد نقص‌هایی مانند بادکردگی یا ترک شود. یکی از منابع، نرخ گرمایشِ یک درجه سانتی گراد در دقیقه برای سیلندری با ضخامت دیواره ۶ میلی متر را بیش از حد گزارش کرده است. همچنین تجزیه سریع پلیمر در طول جداسازی حرارتی به دلیل نرخ گرمایش بالا (به عنوان مثال، ۳ درجه سانتی گراد در دقیقه) می‌تواند به از بین رفتن کامل قطعه قهوه‌ای منجر شود. و اما گرمایش آهسته در محدوده دمای بحرانی امکان تبخیر پلیمر تجزیه شده از قطعه را فراهم می‌کند و از تشکیل نقص در حین جداسازی حرارتی جلوگیری می‌کند که مستقیماً بر مرحله تف جوشی بعدی تأثیر می‌گذارد. برای یک سیلندر با ضخامت ۶ میلی‌متر، نرخ گرمایش ۰.۲ درجه سانتی‌گراد در دقیقه در محدوده دمای بحرانی برای جداسازی بدون عیب بهینه است. کاهش ضخامت دیواره به ۲ میلی متر امکان افزایش نرخ گرمایش تا ۱ درجه سانتی گراد در دقیقه را فراهم می‌کند. [۱۹] زمان نگهداری (dwell time) مدت زمانی است که قطعه در حداکثر دمای تف جوشی نگهداری می‌شود. [۶] زمان تف جوشی طولانی معمولا با دادن زمان بیشتر برای مکانیسم‌های متراکم سازی باعث افزایش چگالی می‌شود. [۱۰, ۱۲] به عنوان مثال یک مطالعه نشان داد که برای فولاد زنگ نزن 316L، چگالش پس از ۱۲۰ دقیقه تف جوشی در دمای ۱۳۶۰ درجه سانتی گراد بهینه می‌باشد. [۱۹] با این حال نگه داشتن بیش از حد قطعه در دمای بالا باعث بزرگ شدن اندازه دانه (grain growth) می‌شود که بر روی خواص مکانیکی تاثیر منفی می‌گذارد. [۱۰, ۱۲, ۱۹] در آخر این نکته حائز اهمیت است که نرخ سرد شدن کنترل شده پس از تف جوشی برای کنترل استحاله‌های فازی ضروری می‌باشد. این نشان می‌دهد که نرخ‌های خنک‌کنندگی مختلف می‌توانند بر ریزساختار نهایی و به طور بالقوه بر خواص قطعه فلزی تأثیر بگذارند. [۶]

۶–۲. درصد تخلخل و چگالی

هدف نهایی از تف جوشی در شرایط عملی دستیابی به چگالی بین ۹۵٪ تا ۹۹.۵٪ چگالی نظری می‌باشد. [۶] با این حال، منابع نشان می‌دهند که دستیابی به این مقادیر ایده آل به طور مداوم در MFFF می‌تواند چالش برانگیز باشد. برای فولاد زنگ نزن 316L یک مطالعه دانسیته تف جوشی را $7.43\ g/cm^3 \pm 0.07$ گزارش کرد که با ۹۲.۸۷ درصد چگالی نظری مطابقت دارد. با این حال، بررسی‌های دیگر، چگالی کمتری را در حدود ۸۷ تا ۹۰ درصد نشان دادند.[۵]

۳-۶. انقباض

پس از تف جوشی، قطعات تولید شده توسط MFFF معمولاً تحت یک انقباض خطی در حدود ۱۵٪ تا ۲۰٪ قرار می‌گیرند. [۶] این انقباض نتیجه مستقیم کاهش حجم منافذ و متراکم شدن قطعه در اثر ادغام ذرات فلزی است. [۵] برای فولاد زنگ نزن 316L یکی از منابع، انقباض در عرض را ۱۶.۳٪ و انقباض در ارتفاع را ۱۷.۴٪ گزارش کرده است که منجر به چگالی نهایی حدود ۹۵٪ محصول اصلی می‌شود. [۷] مطالعه دیگری انقباض خطی را برای یک قطعه از همین جنس ۱۹٪ تخمین می‌زند. [۱۵]

۷. خواص مکانیکی

در حالی که MFFF مزایایی مانند هزینه تجهیزات کمتر و توانایی ایجاد هندسه پیچیده را ارائه می‌دهد، [۶, ۱۴] دستیابی به خواص مکانیکی قوی و ثابت قابل مقایسه با سایر تکنیک‌های ساخت افزودنی فلزی یا روش‌های سنتی همچنان به عنوان یک چالش کلیدی باقی مانده است. [۶, ۱۱, ۱۲]

خواص مکانیکی نهایی قطعات MFFF تحت تأثیر عوامل متعددی در کل زنجیره فرآیند، از مواد اولیه تا عملیات پس از پردازش قرار دارد. [۵, ۶, ۱۰, ۱۱, ۱۹] در بحث مواد اولیه پارامترهایی مانند اندازه،شکل و میزان درصد پودر داخل فیلامنت به طور مستقیم با خواص مکانیکی ارتباط دارند. یا به عنوان مثال سازگاری پودر فلز با بایندر پلیمری و ویسکوزیته حاصل از فیلامنت بسیار پر اهمیت جلوه می‌کند. [۱۰, ۱۱] در بحث پارامترهای چاپ مهمترین پارامتر پیوند بین لایه ای و درون لایه‌ای [۶] می‌باشد که از بهینه بودن ارتفاع لایه، دمای اکستروژن و سرعت چاپ حاصل می‌شود. [۶] الگو و چگالی پر کردن نیز بر خواص مکانیکی مانند استحکام کششی و سفتی تاثیر می‌گذارد. [۱۱, ۱۶] افزون بر این، جهت ساخت قطعه در حین چاپ می‌تواند منجر به خواص مکانیکی ناهمسانگرد شود، به طوری که قطعات چاپ شده در جهت عمودی اغلب استحکام کششی کمتری از خود نشان می‌دهد. [۶, ۱۲] در مراحل بعدی مانند جداسازی و تف جوشی دستیابی به چگالی بالا و به حداقل رساندن عیوب داخلی در حین پخت از اهداف کلیدی برای رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب هستند.[۵, ۱۶, ۱۹]

در مقایسه با روش‌های دیگر مانند دسته روش PBF، منابع مختلف نشان می‌دهند که قطعات ساخته شده به روش MFFF ممکن است خواص مکانیکی پایین تری نسبت به آنهایی که از تکنیک‌های PBF ساخته شده اند، نشان دهند.[۴, ۶, ۱۱, ۱۲] دلیل این موضوع بیشتر به بحث تخلخل‌های باقی مانده و آثار باقیمانده بایندرها نسبت داده می‌شود. [۶, ۲۲] در حالی که تکنیک‌های PBF شامل ذوب کامل ذرات پودر می‌شود اما MFFF تنها به تف جوشی متکی می‌باشد که ممکن است همیشه به چگالی کامل نرسد. [۱۲] با این حال یک منبع اشاره می‌کند که عدم وجود نرخ‌های گرمایش و سرمایش بالا و سریع به طور بالقوه می‌تواند منجر به هم محور شدن (equiaxed) دانه‌ها شود که این می‌تواند مفید باشد. [۶, ۱۱] در مقایسه با تولید قطعات به روش متالورژی پودر (MIM) برخی از مطالعات نشان دادند که قطعات MFFF از نظر استحکام کششی حداکثر، نتایج قابل مقایسه ای با MIM نشان می‌دهد، اما گاهی اوقات با توجه به رفتار انعطاف پذیر تر استحکام تسلیم کمتری دارند. [۱۲, ۲۲] در مقایسه با روش‌های سنتی در حالی که زبری سطح و دقت هندسی قطعات MFFF ممکن است نسبت به سایر تکنیک‌های AM فلزی پایین تر باشد، خواص مکانیکی آنها را با روش‌های تولید مانند ریخته گری یا آهنگری مقایسه می‌کنند.[۱۱] به عنوان یک نمونه در مطالعه ای مقادیر استحکام کششی حداکثر برای قطعه تولید شده از جنس فولاد زنگ نزن 316L تولید شده توسط MFFF با درصد تخلخل ۷ درصد حدود ۵۲۱ مگاپاسکال گزارش شده است[۶] این درحالی است که روش SLM همین جنس را با استحکام کششی حداکثر ۶۰۰ مگاپاسکال تولید می‌کند.[۶] در کل می‌توان گفت تخلخل باقیمانده عامل اصلی محدود کننده عملکرد مکانیکی قطعات MFFF در مقایسه با روش کاملا متراکم است. [۴, ۶, ۱۱, ۱۲] پس در نتیجه بهینه سازی پارامترهای تف جوشی برای به حداقل رساندن تخلخل بسیار پر اهمیت می‌باشد. [۱۹]

۸. مزایا و معایب

مزیت اصلی MFFF تجهیزات و هزینه‌های عملیاتی کمتر آن در مقایسه با روش‌های بستر پودری (PBF) مانند SLM یا EBM است. [۶, ۱۲] هزینه یک خط تولید کامل روش MFFF حدود یک سوم تا یک دوم چاپگر SLM و تا یک چهارم یک سیستم EBM برآورد شده است.[۶] به صورت عمومی هزینه‌های کمِ تولید فیلامنت و همچنین امکان استفاده از دستگاه‌های FFF تجاری از دیگر مزایایی این روش می‌باشد. [۱۱]

برخلاف روشهای PBF، روش MFFF در حین چاپ به محیط محافظ نیاز ندارد، زیرا پودر در داخل بایندر پلیمری محصور شده است. [۶, ۱۱] پودرهای مورد استفاده در فرایند MFFF به مشخصات سختگیرانه‌ای که برای فرآیندهای PBF استفاده می‌شود، نیاز ندارند و به طور کلی امکان استفاده از طیف وسیع تری از پودرها فراهم است که این باعث کاهش هزینه‌ها خواهد شد. [۱۱] روش MFFF به مراحل پس پردازشِ جداسازی و تف جوشی نیاز دارد تا چسب پلیمری حذف شود و ذرات یکپارچه شوند[۶, ۱۰] این می‌تواند زمان تحویل را در مقایسه با سایر روش‌های دیگر AM طولانی کند. [۶] فرآیند MFFF شباهت زیادی با روش متالورژی پودر دارد، هردو فرآیند شامل ترکیب پودر با چسب پلیمری به همراه جداسازی و تف جوشی می‌باشد. [۱۰] با توجه به این مشابهت می‌توان از دانش فنی روش متالورژی پودر برای MFFF نیز استفاده کرد. [۶] این فناوری توانایی ایجاد ساختارهای شبکه‌ای را دارد که می‌تواند وزن قطعات را کاهش دهد و استفاده از مواد را بهینه کند. [۱۱] برای حجم تولید کم، FFF فلزی به دلیل هزینه سرمایه گذاری پایین آن می‌تواند به شدت رقابتی باشد.[۶]

۹. نتیجه گیری

در این مقاله در ابتدا به بررسی انواع روش‌های چاپ سه بعدی پرداخته شد سپس به طور تخصصی روش MFFF مورد بررسی قرار گرفت. به عنوان نتیجه‌گیری می‌توان به این موضوع اشاره کرد که این روش می‌تواند رنج گسترده‌ای از مشکلات و محدودیت‌های موجود در صنعت را حل کند و راهکار نوینی برای تولید قطعات از جنس های خاص و با شرایط خاص باشد. همانطور که در متن مقاله به آن اشاره شد، MFFF روش نوین و کم هزینه ای نسبت به روش های مشابه AM، می باشد و می تواند جایگزین روش های دیگر ساخت افزایشی باشد اما در کنار این مزایا، معایبی نیز دارد. یکی از مشکلات اساسی، حضور تخلخل‌ها و بزرگ شدن اندازه دانه‌ها می‌باشد که به طور مستقیم بر روی خواص مکانیکی قطعات تاثیرگذار است به همین دلیل هم‌اکنون این روش از نظر خواص مکانیکی عملکرد ضعیف‌تری نسبت به روش‌های مشابه نشان داده که این خود نشان دهنده اهمیت ادامه تحقیقات در ذیل این موضوع می‌باشد. امید است در آینده این روش بتواند جایگاه خودش را در میان روش‌های دیگر ساخت افزایشی پیدا کند.

۹. منابع

[۱] A. Bandyopadhyay and S. Bose, Additive Manufacturing. CRC Press, 2015.

[۲] X. Miao, K. C. Chin, and A. J. Boydston, "Design, testing, and application of an open-source powder material extrusion 3D printer," Additive Manufacturing, vol. 81, p. 104014, 2024.

[۳] S. C. Altıparmak and S. I. C. Daminabo, "Suitability analysis for extrusion-based additive manufacturing process," Additive Manufacturing Frontiers, vol. 3, no. 1, p. 200106, 2024.

[٤] S. Molazadeh and A. Hosseini, "Modelling of material behavior for additively manufactured 17-4 PH stainless steel produced by fused filament fabrication," CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 52, pp. 341-365, 2024.

[٥] Z. Lotfizarei, A. Mostafapour, A. Barari, and A. Jalili, "Analysis of Metal Fused Filament Fabrication process chain for 316L stainless steel," Manufacturing Letters, vol. 41, pp. 1022-1033, 2024/10/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.127.

[٦] J. Jacob, D. Pejak Simunec, A. E. Kandjani, A. Trinchi, and A. Sola, "A Review of Fused Filament Fabrication of Metal Parts (Metal FFF): Current Developments and Future Challenges," Technologies, vol. 12, no. 12, p. 267, 2024.

[۷] S. Roshchupkin, A. Kolesov, A. Tarakhovskiy, and I. Tishchenko, "A brief review of main ideas of metal fused filament fabrication," Materials Today: Proceedings, vol. 38, pp. 2063-2067, 2021/01/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.142.

[۸] J. Gonzalez-Gutierrez, S. Cano, S. Schuschnigg, C. Kukla, J. Sapkota, and C. Holzer, "Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives," Materials, vol. 11, no. 5, p. 840, 2018.

[۹] N. H. Musa et al., "Effect of nozzle temperatures on the densification of 316L SS alloy fabricated by fused filament fabrication metal 3D printing technique," in AIP Conference Proceedings, 2024, vol. 3124, no. 1: AIP Publishing .

[۱۰] N. K. Bankapalli, V. Gupta, P. Saxena, A. Bajpai, C. Lahoda, and J. Polte, "Filament fabrication and subsequent additive manufacturing, debinding, and sintering for extrusion-based metal additive manufacturing and their applications: A review," Composites Part B: Engineering, vol. 264, p. 110915, 2023.

[۱۱] F. Fazzini, A. Boschetto, L. Bottini, A. C. Diez, and A. Cini, "Correlation between Metal Fused Filament Fabrication parameters and material properties of sintered 17-4 PH," Procedia Structural Integrity, vol. 49, pp. 59-66, 2023.

[۱۲] J. M. B. V. H. Pérez, "Development of Metal FFF for Mechanical Applications: Mechanical Properties and Corrosion Characterization," PQDT-Global, 2023.

[۱۳] S. Hosseinimehr et al., "Defect evolution and mitigation in metal extrusion additive manufacturing: From deposition to sintering," Journal of Materials Processing Technology, vol. 329, p. 118457, 2024.

[۱٤] P. Vijaya Kumar and C. Velmurugan, "Metal fused filament fabricated stainless steel 316L: Heat treatment effects on mechanical, tribological, phase stability, and microstructural behavior," Journal of Materials Engineering and Performance, pp. 1-10, 2024.

[۱٥] J. Gonzalez-Gutierrez, D. Godec, C. Kukla, T. Schlauf, C. Burkhardt, and C. Holzer, "Shaping, debinding and sintering of steel components via fused filament fabrication," in 16th international scientific conference on production engineering—computer integrated manufacturing and high speed machining. Zadar, Croatia, 2017 .

[۱٦] S. Jasper and M. Ravichandran, "Metal Fused Filament Fabrication Process—A Review," in International Conference on Smart Sustainable Materials and Technologies, 2023: Springer, pp. 219-225 .

[۱۷] M. Strano, K. Rane, F. B. Vangosa, and L. Di Landro, "Extrusion of metal powder-polymer mixtures: Melt rheology and process stability," Journal of Materials Processing Technology, vol. 273, p. 116250, 2019.

[۱۸] I. Gibson et al., Additive manufacturing technologies. Springer, 2021.

[۱۹] Y. Thompson, J. Gonzalez-Gutierrez, C. Kukla, and P. Felfer, "Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel," Additive Manufacturing, vol. 30, p. 100861, 2019/12/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100861.

[۲۰] L. Jiang, Y. Liu, S. Zhang, J. Zhang, W. Liu, and H. Cheng, "Investigation of microstructural evolution and property optimization of pure tungsten via powder extrusion 3D printing," International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, p. 107088, 2025.

[۲۱] L. F. C. Durão, R. Barkoczy, E. Zancul, L. Lee Ho, and R. Bonnard, "Optimizing additive manufacturing parameters for the fused deposition modeling technology using a design of experiments," Progress in Additive Manufacturing, vol. 4, pp. 291-313, 2019.

[۲۲] L. Martignoni et al., "Prototyping and characterisation of 316L stainless steel parts and lattice structures printed via metal fused filament fabrication," Rapid Prototyping Journal, vol. 30, no. 11, pp. 123-141, 2024.