

فرآیند ساخت افزایشی – Additive Manufacturing (AM)

فاطمه زارعی، عزیز شفیعی

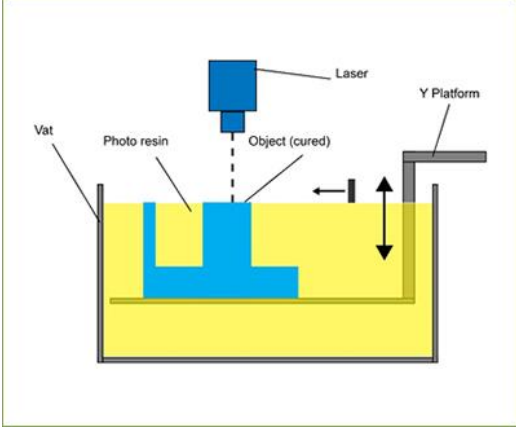
انقلاب صنعتی را می‌توان از لحاظ تاریخی به چهار دوره تقسیم بندی کرد: (1) تغییر از تولید دستی به تولید با ماشین مولد بخار، از سال 1760 تا سال 1830 (2) انقلاب صنعتی در فاصله زمانی 1840 تا 1940 همراه با توسعه‌ی مواد در مقیاس بزرگ، تولید انرژی و گسترش کارخانه‌ها (3) از سال 1940 تاکنون، جنبش دیجیتالی محور به وسیله انتقال از سیستم‌های آنالوگی، مکانیکی، و الکترونیکی به تکنولوژی عجین شده با دیجیتالی، و (4) چهارمین انقلاب صنعتی به عنوان ساخت دیجیتالی بدون واسطه، به وسیله‌ی اتوماسیون سازی‌های مدرن، ارتباط متقابل داده‌ها و فن‌آوری‌های پیشرفته تولید از سال 2010 [1]. ساخت افزایشی یکی از مؤلفه‌های اصلی در چهارمین انقلاب صنعتی است که تا سال 2030 می‌تواند هر شرکت تولیدی را دچار تغییر و تحول کند [1،2]. ساخت افزایشی به طور رسمی در استاندارد ASTM F2792 برای کاربردهای تکنولوژیکی طبقه بندی شده و به عنوان فرآیند اتصال لایه به لایه‌ی مواد برای تولید قطعه از داده‌های مدل و در نقطه مقابل روش‌های معمول ساخت مانند ماشین کاری تعریف شده است [3]. بنابراین، این نوآوری می‌تواند طیف گسترده‌ای از فناوری‌های بالقوه جهت تبدیل مدل سه بعدی به یک قطعه نهایی را در یک فرایند سریع و آسان مهیا کرده و در عین حال مزایای زیادی را از نظر مواد، پیچیدگی، دقت، هندسه و برنامه نویسی نسبت به ماشینکاری CNC را به همراه دارد. کاهش نیاز به مونتاژ، زمان نظارت و کار تخصصی از دیگر مزایای فن‌آوری ساخت افزایشی است [2-5].

مبنای این فناوری به این صورت است که مدلی که در ابتدا با استفاده از یک سیستم طراحی سه بعدی به کمک رایانه (3D CAD) تولید می‌شود، بدون نیاز به برنامه ریزی برای فرایندهای مختلف تولیدی می‌تواند به طور مستقیم از مدل طراحی شده در یک مرحله ساخته شود. اگرچه این موضوع در واقعیت به همان سادگی که در ابتدا به نظر می‌رسد نیست، اما فناوری AM قطعاً روند تولید اشیاء پیچیده سه بعدی بصورت مستقیم از داده‌های CAD را ساده می‌کند. سایر فرآیندهای ساخت نیاز به یک تحلیل دقیق و جزئی از هندسه قطعه برای تعیین مواردی از قبیل ترتیب ساخت قسمت‌های مختلف، ابزارها و فرآیندهایی که باید استفاده شود و فرایندهای تکمیلی که ممکن است برای نهایی کردن قطعه مورد نیاز باشد، دارند. در مقابل، AM فقط تنها به برخی از جزئیات ضروری ابعادی، و فهم کلی از نحوه کارکرد دستگاه AM و مواد مورد استفاده نیاز دارد [9].

نکته اصلی در مورد نحوه عملکرد AM این است که قطعات با قرار دادن مواد بصورت لایه لایه روی هم ساخته می‌شوند. هر لایه یک سطح مقطع نازک از قطعه است که اطلاعات آن از داده‌های اصلی CAD

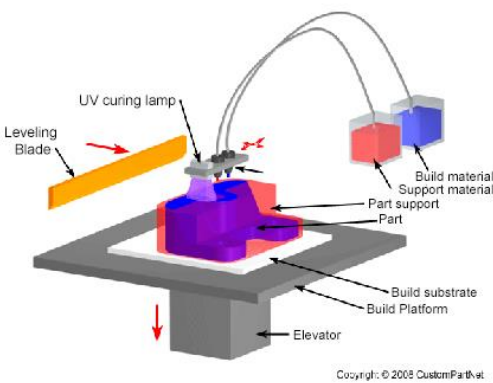
گرفته شده است. لایه ها هرچقدر نازک تر باشند، قطعه‌ی بدست آمده به قطعه‌ی اصلی نزدیک تر خواهد بود. در تمامی دستگاه‌های AM تجاری شده تا به امروز از همین روش مبتنی بر اتصال لایه به لایه مواد استفاده شده و تفاوت آنها در مواد مورد استفاده، نحوه ایجاد لایه‌ها و همچنین چگونگی اتصال لایه‌ها به یکدیگر است. این فناوری را می‌توان به عنوان انقلابی در توسعه محصولات و روش‌های تولید توصیف کرد. برخی حتی ذکر کرده‌اند که اگر AM به مرحله نهایی توسعه خود برسد، دیگر شاهد روش‌های تولید به شکلی که امروزه می‌شناسیم نخواهیم بود. صرف نظر از پیچیدگی قسمت‌هایی از قطعه، تولید به وسیله AM بطور کلی در یک مرحله انجام می‌شود. در حالی که در دیگر فرایندهای تولید عموماً نیاز به انجام مراحل متعدد و تکراری است و هرچقدر طرح قطعه دارای جزییات بیشتری باشد، تعداد این مراحل به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد. با ساخت افزایشی می‌توان بسیاری از این فرایندهای چند مرحله‌ای را حذف و یا حداقل ساده کرد [9].

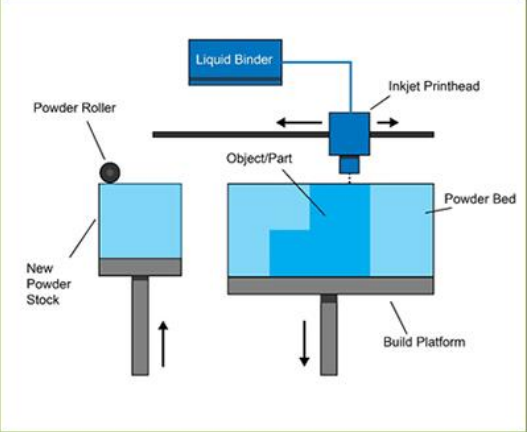
اگرچه رسانه‌ها تمایل دارند از اصطلاح "چاپ سه بعدی" به عنوان مترادفی برای کلیه فرایندهای تولید افزایشی استفاده کنند، اما در واقع فرایندهای مجزای زیادی وجود دارند که در روش ساخت لایه‌ها، مواد و همچنین تکنولوژی ماشینی که استفاده می‌کنند با هم متفاوتند. از این رو، در سال 2010، گروه "ASTM F42 - ساخت افزایشی" انجمن آزمایش و مواد آمریکا (ASTM) مجموعه‌ای از استانداردها را تدوین کرده که فرایندهای تولید افزایشی را به 7 دسته طبقه بندی می‌کند. در ادامه هر کدام از این گروه‌ها بطور مختصر توضیح داده شده است.

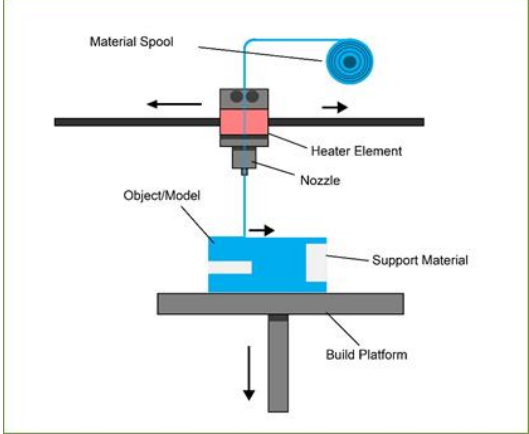
| | پلیمریزاسیون VAT ¹ |
|---|--|
|  <p>The diagram illustrates the Vat Polymerization process. A blue 'Laser' beam is directed at a blue 'Object (cured)' which is partially submerged in a yellow 'Photo resin' contained within a 'Vat'. A 'Y Platform' is positioned at the bottom of the vat, with a vertical arrow indicating its movement. The cured object is shown being lifted from the resin.</p> | <p>در این روش قطعه بصورت لایه به لایه در یک مخزن حاوی رزین فوتو پلیمر مایع ساخته می‌شود. به این صورت که از نور ماوراء بنفش (UV) برای جامد کردن رزین در قسمت‌های مورد نیاز استفاده شده و پس از سخت شدن هر لایه قطعه توسط پایه‌ای که زیر آن قرار دارد به اندازه ضخامت یک لایه به سمت پایین جابجا می‌شود.</p> <p>برخلاف روش‌های مبتنی بر پودر که در آن‌ها بخش‌هایی از ماده به عنوان نگه دارنده سایر بخش‌ها عمل می‌کنند، در این فرایند از آنجا که فاز مایع برای ساختن قطعه استفاده می‌شود، هیچ بخش سازه‌ای برای نگه داشتن مواد سخت شده وجود ندارد. به همین خاطر در این روش لازم است تا از سازه‌های</p> |

¹ Vat Polymerization

| | |
|--|---|
| | <p>پشتیبان استفاده شود. رزین ها از طریق فرآیند پلیمریزاسیون نوری و با پرتو ماوراء بنفش جامد سازی می شوند. به گونه ای که نور با استفاده از آینه های قابل کنترل با موتور در سطح رزین هدایت می شود. قسمت هایی از رزین که با نور در تماس باشد جامد می شود [10].</p> |
|--|---|

| | |
|--|---|
|  | <p>پاشش مواد^۲</p> <p>در این روش قطعه با روشی مشابه با پرینتر جوهر افشان دو بعدی تولید می شود. به این صورت که مواد توسط نازلی که بصورت افقی در حال حرکت است بر روی سطح از پیش ساخته شده ای بصورت لایه لایه پاشیده شده و جامد می شوند. ماشین آلات از نظر پیچیدگی و روش های کنترل لایه نشانی مواد متنوع هستند. لایه های پاشیده شده در هر مرحله با استفاده از نور ماوراء بنفش (UV) سخت و جامد می شوند. از آنجا که مواد باید به صورت قطره قطره نشاندن شوند، تنوع مواد قابل استفاده در این روش محدود است. پلیمرها و مومها به خاطر گرانش مناسب و توانایی شکل گیری قطره ای، از مواد مناسب و متداول در این روش هستند.</p> |
|--|---|

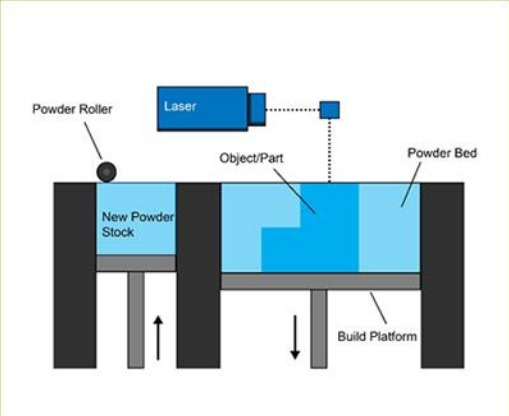
| | پاشش چسب ^۳ |
|--|--|
|  <p>The diagram illustrates the Binder Jetting process. A 'Liquid Binder' is dispensed by an 'Inkjet Printhead' onto a 'Powder Bed'. A 'Powder Roller' moves the powder bed to the left, while the 'Build Platform' moves downwards. As the platform moves down, a 'New Powder Stock' is added to the bed. The 'Object/Part' is formed by the binder being deposited on the powder bed.</p> | <p>در این فرایند از پودر به عنوان ماده اصلی و چسب برای اتصال لایه‌های پودری به یکدیگر استفاده می‌شود. به این صورت که نازل دستگاه در راستای افقی در امتداد محورهای X و Y حرکت و به شکل تناوبی لایه‌هایی از مواد اصلی و چسب را بر روی سطح می‌نشاند. قطعه در حال ساخت توسط سکویی که در زیر آن قرار دارد در هر مرحله به اندازه ضخامت یک لایه به سمت پایین حرکت داده می‌شود. با توجه به استفاده از چسب برای اتصال، خواص قطعه تولیدی برای استفاده آن به عنوان یک قطعه سازه‌ای مناسب نبوده و همچنین علی‌رغم سرعت نسبتاً بالای این فرآیند، به دلیل نیاز به انجام فرایندهای ثانویه، زمان قابل توجهی به روند کلی اضافه می‌شود.</p> <p>همانند سایر روشهای تولید برپایه‌ی پودر، در اینجا نیز بستر پودر از قطعه در حال ساخت بصورت مکانیکی پشتیبانی کرده و پس از اتمام فرایند از آن جدا می‌شود. این فناوری اغلب به عنوان فناوری 3DP نیز شناخته می‌شود.</p> |

| | اکستروژن مواد ^۴ |
|--|--|
|  <p>The diagram illustrates the Material Extrusion process. A 'Material Spool' feeds material into a 'Nozzle' which is heated by a 'Heater Element'. The material is extruded through the nozzle onto a 'Build Platform'. The 'Object/Model' is formed by the extruded material. 'Support Material' is also extruded to support the main object. The 'Build Platform' moves downwards as the object is built.</p> | <p>در این روش، مواد از داخل نازل عبور کرده و گرم می‌شوند و سپس بصورت لایه به لایه نشاندگی می‌شوند. نازل به صورت افقی حرکت کرده و سکویی که قطعه روی آن ساخته می‌شود، بعد از نشاندن هر لایه جدید به صورت عمودی حرکت می‌کند. این روش در بسیاری از چاپگرهای سه بعدی ارزان قیمت و خانگی متداول بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. فاکتورهای زیادی بر کیفیت قطعه نهایی حاصل از این فرایند تأثیر می‌گذارد. که در صورت موفقیت آمیز بودن کنترل این</p> |

³ Binder Jetting

⁴ Material Extrusion

| | |
|--|---|
| | <p>فاکتورها، این روش از پتانسیل و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است. در این روش مواد از طریق یک نازل تحت فشار ثابت و در یک جریان پیوسته اضافه می‌شوند. لازمه دستیابی به نتایج دقیق این است که فشار و سرعت خروج مواد از نازل حین فرآیند ثابت نگه داشته شود [10]. لایه های مواد را می‌توان با کنترل دما یا با استفاده از مواد شیمیایی به یکدیگر پیوند داد. شکل‌های دیگری از این فرآیند مشابه با فرآیند همزن اصطکاکی^۵ (FSP) و نیز سطح کاری اصطکاکی^۶ (FS) اخیراً مطرح شده است.</p> |
|--|---|

| | |
|---|--|
|  | <p>ذوب بستر پودر^۷ (PBF)</p> <p>فرآیند ذوب بستر پودر شامل روشهای متعددی است که به طور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها شامل تف جوشی مستقیم فلز با لیزر^۸ (DMLS)، ذوب با پرتو الکترونی^۹ (EBM)، ذوب انتخابی با لیزر^{۱۰} (SLM) و تف جوشی انتخابی با لیزر^{۱۱} (SLS) هستند. در همه این روش‌ها از پرتو لیزر یا پرتو الکترونی برای ذوب و تفجوشی پودر مواد مورد نظر به یکدیگر استفاده می‌شود. روش‌های ذوب با پرتو الکترونی (EBM) نیاز به محیط خلا داشته و با استفاده از آن‌ها می‌توان قطعات کاربردی از انواع مخلف فلزات و آلیاژها را تولید کرد. در تمامی فرآیندهای PBF مواد بصورت پودر از طریق ابزارهای مختلفی از جمله غلتک یا تیغه بر روی لایه قبلی قرار می‌گیرند. تف جوشی مستقیم فلز با لیزر (DMLS)</p> |
|---|--|

5 Friction Stir Processing

6 Friction Surfacing

7 Powder Bed Fusion

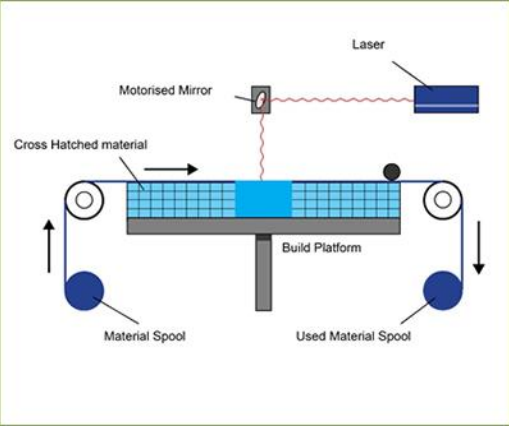
8 Direct Metal Laser Sintering

9 Electron Beam Welding

10 Selective Laser Melting

11 Selective Laser Sintering

| | |
|--|--|
| | <p>همانند SLS است، با این تفاوت که در این روش بجای مواد پلاستیکی از پودرهای فلزی استفاده شده که لایه به لایه تف جوشی می‌شوند [10].</p> |
|--|--|

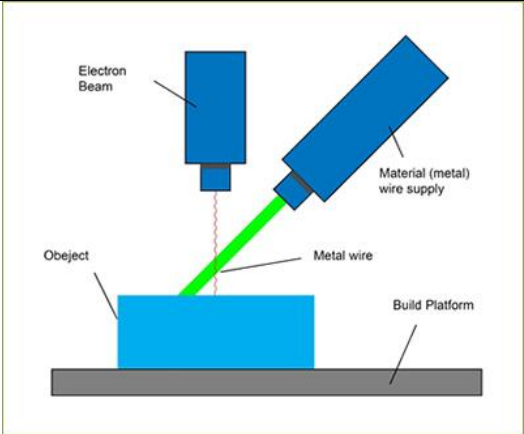
| | |
|---|--|
| | <p>لایه بندی ورق^{۱۲}</p> |
|  | <p>فرآیندهای لایه بندی ورق شامل تولید افزایشی اولتراسونیک^{۱۳} (UAM) و ساخت افزایشی با جوشکاری همزن اصطکاکی^{۱۴} (FSWAM) است. در فرآیند تولید افزایشی اولتراسونیک ورق یا نوارهای نازک فلزی با استفاده از جوشکاری مافوق صوت به یکدیگر متصل می‌شوند. در این فرآیند بطور معمول لازم است تا قسمتهای متصل نشده و اضافی لایه‌ها ماشینکاری و حذف شوند. در روش FSWAD نیز ورق های فلزی روی هم قرار گرفته و هر لایه از طریق جوشکاری همزن اصطکاکی به لایه زیری متصل می‌شود. از این روش می‌توان برای ساخت کامپوزیت‌ها نیز استفاده کرد. هر دو این روش‌ها قابلیت ساخت قطعات از فلزات مختلف شامل آلومینیوم، منیزیم، مس، فولاد ضد زنگ و تیتانیوم را داشته و دمای نسبتا پایین و در حالت جامد^{۱۵} انجام می‌شوند [10].</p> |

¹² Sheet Lamination

¹³ Ultrasonic Additive Manufacturing

¹⁴ Friction Stir Additive Manufacturing

¹⁵ Solid State

| | |
|---|---|
|  | <p>لایه نشانی با اعمال مستقیم انرژی^{۱۶} (DED)</p> <p>این روش با عناوین دیگری از جمله Laser engineered net shape، direct metal deposition، directed light fabrication، shaping و 3D laser cladding نیز شناخته می‌شود. این فرآیند در مقایسه با سایر روش‌ها پیچیده‌تر بوده و از آن معمولاً برای ترمیم یا اضافه کردن مواد بیشتر به قطعات موجود نیز استفاده می‌شود [10] یک دستگاه معمول DED از نازل نصب شده بر روی بازوی چند محوری تشکیل شده است که مواد از طریق آن بر روی سطح نشاند می‌شوند. این فرایند با روش‌های اکستروژن مواد مشابه است، با این تفاوت که در این روش نازل می‌تواند در جهات مختلف حرکت کرده و در یک محور خاص ثابت نیست. به دلیل وجود ماشین‌های چهار و پنج محوره، مواد را می‌توان از هر زاویه‌ای روی سطح نشاند. مواد به شکل پودر یا سیم از نازل خارج شده و همزمان با لیزر یا پرتو الکترونی ذوب می‌شود. هر چند از این روش می‌توان برای ساخت قطعات پلیمری و سرامیکی هم استفاده کرد، اما از این روش بیشتر برای فلزات استفاده می‌شود [10].</p> |
|---|---|

مهمترین ویژگی کلیدی روش‌های ساخت افزایشی مبتنی بر ذوب و انجماد و همچنین فرآیندهای حالت جامد، استفاده از دانش بنیادی است که طی چندین دهه پژوهش در زمینه متالورژی جوشکاری و فن آوری‌های مبتنی بر قوس الکتریکی، پرتوهای با چگالی بالا (لیزر و پرتوی الکترونی) و اتصال حالت جامد بدست آمده‌اند. از این رو بهره‌گیری از دانش و تجربه جوشکاری و اتصال مواد می‌تواند بطور قابل توجهی در درک بهتر فرآیند ساخت افزایشی کمک کند. این درک شامل نحوه اجرای فرآیند، ارتباط پارامترهای فرآیند با ویژگی‌های ریزساختاری و مکانیکی قطعات تولیدی و همچنین شناخت عوامل ایجاد عیوب در قطعات می‌باشد [11].

ساخت افزایشی قطعات فلزی

در سال‌های اخیر روش‌های ساخت افزایشی با قوس الکتریکی^{۱۷} (WAAM) به دلیل توانایی ساخت قطعات بزرگ فلزی با نرخ رسوب بالا، هزینه کم تجهیزات و استفاده بهینه از مواد به طور فزاینده‌ای مورد توجه بخش‌های تولیدی و صنعتی قرار گرفته و در سال‌های اخیر پیشرفت‌های مداوم و قابل توجهی در توسعه این فن‌آوری صورت گرفته است. امروزه WAAM به یک فرایند آینده دار در زمینه ساخت قطعات فلزی مختلف از جمله تیتانیوم، آلومینیوم، آلیاژهای نیکل و فولاد تبدیل شده است. در مقایسه با فرآیند سنتی ساخت، این فرایند قادر است بسته به اندازه قطعه زمان ساخت را به میزان 40 تا 60 درصد کاهش دهد. به عنوان نمونه، پیشرفت‌های اخیر در فن‌آوری WAAM امکان ساخت دنده‌های چرخنده‌ی فرود هواپیما را با صرفه جویی حدود 78٪ در مواد اولیه در مقایسه با فرآیند ماشینکاری سنتی فراهم کرده است [12].

در میان هفت نوع فن‌آوری‌های AM، فن‌آوری‌های مبتنی بر پرتو، یعنی ذوب بستر پودر (PBF) و لایه نشانی با اعمال مستقیم انرژی (DED) روش‌های ذوبی پر کاربرد برای ساخت فلزات و آلیاژهای امروزی هستند. برهمکنش پرتو پر انرژی با پودر یا سیم فلزی باعث پیدایش مجموعه‌ای از فرآیندهای فیزیکی پیچیده از جمله ذوب فلز، جریان پویای مذاب و انجماد سریع می‌شود. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینه این فرآیندها انجام شده و شاهد پیشرفت‌های چشم‌گیری در زمینه بهبود ریزساختار و کنترل کیفیت قطعات بوده‌ایم. اگرچه با وجود این پیشرفت‌ها هنوز شکاف قابل توجهی بین آنچه این گونه فن‌آوری‌های پرهزینه و پرنرزی ارائه می‌دهند و آنچه جامعه و صنعت به آن نیاز دارند وجود دارد. به همین خاطر در سال‌های اخیر روش‌های ساخت افزایشی حالت جامد توجهات بسیاری را به سمت خود جلب کرده‌اند [3].

در سال‌های اخیر چندین فرآیند ساخت افزایشی حالت جامد بدون پرتو توسعه یافته و برای استفاده گسترده امیدوار کننده هستند. انجمن تحقیقاتی ساخت افزایشی فلز^{۱۸} شروع به پذیرش این روش‌های جایگزین کرده و همچنین در سال‌های اخیر کنفرانس‌های متعددی با همین موضوع برگزار شده‌اند [13].

در روش‌های مبتنی بر ذوب و انجماد احتمال ایجاد عیوب مختلف انجمادی مانند تخلخل و ترک با لا بوده که می‌تواند بر عملکرد مکانیکی قطعات تولید شده تأثیر گذارد. همچنین ناهمسانگردی^{۱۹} و تنش‌های باقیمانده و اعوجاج نیز می‌تواند مسئله ساز شود. از این رو توسعه فن‌آوری‌های حالت جامد به منظور جلوگیری از ایجاد این نواقص امر مهم و قابل توجهی است [13].

¹⁷ Wire and Arc Additive Manufacturing

¹⁸ The metal AM research community

¹⁹ Anisotropy

فرآیندهای حالت جامد مبتنی بر اصطکاک از قبیل جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW) و سطح کاری اصطکاکی (FS) دو فرایند ساخت افزایشی با دمای پایین و هزینه کم هستند که در سال‌های اخیر بخاطر قابلیت‌های منحصر به فردشان مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند. محصول این فرآیندها دارای ساختار کار شده است که از جهات مختلف بهتر از ساختارهای ریخته‌گری است. علاوه بر این، با استفاده از این فرآیندها می‌توان طیف وسیعی از آلیاژهای مهندسی و کامپوزیت‌ها را با سرعت و کیفیت بالا تولید کرد [14]. با این حال، به عنوان یک فناوری جدید که اخیراً مورد توجه عموم قرار گرفته است، تحقیقات آن هنوز در یک وضعیت ابتدایی قرار دارد که جنبه‌های اساسی آن کاملاً درک نشده است.

مراجع:

- 1-
- 2-
- 3-