

تأثیر فرآیند نورد بر خواص مواد تولید شده به روش ساخت افزایشی (پرینت سه بعدی): مقاله مروری

سید میثم شریف موسوی^۱، فرشاد نظری^{۱،۲*}، رضا مسلمانی^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۲ مرکز تحقیقات فولاد، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

* P.O.B. 6135783151, F.nazari@scu.ac.ir

چکیده:

فرآیند نورد از روش‌های رایج و پر کاربرد در تولید و شکل دهی قطعات مختلف می‌باشد. فرآیند نورد خواص مکانیکی و ریزساختار مواد را تحت تاثیر قرارداده که این امر در تولید محصولات اهمیت فراوانی دارند. چاپ سه بعدی یا ساخت افزایشی از روش‌های جدید در تولید قطعات محسوب شده که توانایی ساخت قطعات را بطور مستقیم از روی مدل‌های دیجیتال داد. این فرآیند مبتنی بر ساخت قطعات بصورت لایه لایه بوده و می‌تواند قطعات مختلف را در زمان کوتاه و با دقت بالا تولید نماید. ویژگی‌های منحصر به فرد روش ساخت افزایشی مانند آزادی در طراحی، عدم نیاز به قالب و تجهیزات کمکی، تولید قطعات پیچیده و یکپارچه سازی قطعات موجب توجه بسیاری از صنایع مانند هوافضا، نفت و گاز، صنایع دریایی و خودرو به استفاده از این روش تولیدی شده است. البته مشکلاتی مانند وجود عیوب ساختاری، اعوجاج، تنش پسماند و ناهمسانگردی خواص مکانیکی مواد از چالش‌های موجود در تولید افزایشی یا پرینت سه بعدی قطعات محسوب می‌شود. استفاده از فرآیند نورد جهت اصلاح قطعات پرینت سه بعدی شده، یکی از روش‌های بهبود میکرو ساختار و خواص مکانیکی مواد می‌باشد. استفاده از ترکیب فرآیند نورد و ساخت افزایشی می‌تواند با همگن سازی و ریزدانه کردن ساختار ماده سبب افزایش سختی و استحکام شده و قابلیت افزایش طول را نیز بهبود بخشد. همچنین این فرآیند توانایی کاهش اعوجاج و تنش پسماند را در قطعات تولید شده با روش ساخت افزایشی دارد.

کلمات کلیدی: نورد، پرینت سه بعدی، ساخت افزایشی، خواص مکانیکی، ریز ساختار، تنش پسماند

The effect of the rolling process on the properties of materials produced by additive manufacturing (3D printing): a review paper

Seied Meisam Sharif Mosavi¹, Farshad Nazari^{1,2,*}, Reza Mosalmani¹

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Research Institute of Steel, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

* P.O.B. 6135783151, F.nazari@scu.ac.ir

Abstract:

The rolling process is one of the common and widely used methods in manufacturing and forming various parts. The rolling process has a significant effect on the mechanical properties and microstructure of materials, which making it important in the manufacturing of products. 3D printing or additive manufacturing is a of the new method in producing parts that allows for the direct creation of parts from digital models. This process is based on creation parts layer by layer and can produce various parts quickly and with high precision. The unique features of additive manufacturing, such as design freedom, no need to dies and auxiliary equipment, and the ability to produce complex and integrated parts, have caught the attention of many industries such as aerospace, oil and gas, marine and automotive industries to use this method. In the other hand, problems such as microstructure defects, distortion, residual stress and anisotropy of mechanical properties are among the challenges in additive manufactured or 3D printed parts. Using the rolling process to modify 3D printed parts is one way to improve the microstructure and mechanical properties of materials. By combining the rolling process with additive manufacturing, hardness, strength, and elongation can be increased by homogenizing and refining grains of the structure. Also, this process can reduce distortion and residual stress in the additive manufactured parts.

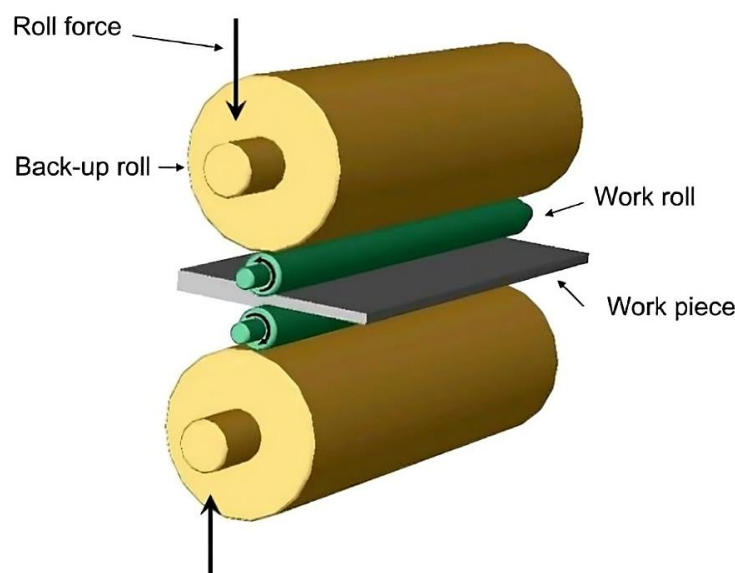
Keywords: Rolling process, 3D printing, Additive manufacturing, Mechanical properties, Microstructure, Residual stress

فهرست مطالب

- ۱- تاثیر فرآیند نورد بر قطعات تولیدی با روش‌های غیر از پرینت سه‌بعدی ۴
- ۲- فرآیند نورد در قطعات تولید شده به روش پرینت سه‌بعدی ۷
- ۲-۱- پیکربندی‌های نورد در پرینت سه‌بعدی و مکانیسم‌های هیبریدی ۷
- ۲-۲- تکرارپذیری فرآیند ۱۱
- ۲-۳- خواص مکانیکی، ریزساختار، عیوب ۱۲
- ۲-۴- اعوجاج و تنش پسماند ۲۳
- ۲-۵- هندسه ذرات ۲۸
- ۲-۶- مواد ترکیبی و مفاهیم نوین ۲۹
- ۳- نتیجه‌گیری ۳۱
- ۴- واژه نامه ۳۳
- ۵- مراجع ۳۴

۱- تاثیر فرآیند نورد بر قطعات تولیدی با روش‌های غیر از پرینت سه‌بعدی

نورد از فرآیندهای مهم در تولید و شکل‌دهی مواد، بخصوص مواد فلزی می‌باشد. در این فرآیند ماده اولیه از بین دو یا چند غلتک عبور کرده که سبب تغییر در هندسه، خواص مکانیکی و ریز ساختار ماده می‌گردد. این فرآیند را می‌توان بر حسب دما به سه دسته نورد سرد، گرم و داغ تقسیم بندی کرد. نورد سرد در دمای محیط انجام شده، نورد گرم در دمای زیر دمای تبلور مجدد و نورد داغ در دمای بالای دمای تبلور مجدد ماده اولیه انجام می‌شود [۱]. شماتیک فرآیند نورد در شکل ۱ ارائه شده و در ادامه به بررسی تعدادی از مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته شده است.



شکل ۱. شماتیک فرآیند نورد، شامل قطعه‌کار، غلطک‌های نورد و غلطک‌های پشتیبان [۲]

کیم و همکارانش [۳] نورد نامتقارن را با نورد معمولی مقایسه کردند. آنها برای تجزیه و تحلیل کرنش ایجاد شده از روش پراش الکترونی برای بررسی ریزساختارها، با تمرکز بر گسترش جهت‌گیری دانه‌ها (GOS) استفاده کردند. نتایج نشان داد نورد نامتقارن جهت‌یاف ماده مورد بررسی را ۵ تا ۱۰ درجه جابجا کرد و انعطاف‌پذیری را بدون کاهش استحکام افزایش داد. کیم و همکارانش [۴] همچنین در پژوهشی دیگر، به کمک فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید با استفاده از روش نورد سریع دیفرانسیلی (DSR) موفق به تغییر شکل ورق آلیاژی AZ91 شدند. صفحات نازکی با اندازه دانه میکرونی و با خاصیت ایزوتروپیک م سطح در نتیجه این فرآیند ایجاد شد. ورق‌ها استحکام بالایی با تنش تسلیم حدوداً ۳۲۷ مگاپاسکال و شکل‌پذیری یا ازدیاد طول ۹ تا ۱۱ درصد را نشان دادند. در مقایسه با فرآیندهای پرس در کانال مساوی زاویه‌دار (ECAP) و نورد تجمعی (ARB)، DSR استحکام و شکل‌پذیری بالاتری را ارائه می‌دهد. یو و همکارانش [۵] ورق‌های تیتانیوم با استحکام بالا (MPa) ۸۹۵-۹۱۵ را با استفاده از نورد به روش DSR شکل‌دهی کردند. آنها به کمک این فرآیند ضخامت را تا ۶۳

درصد در یک پاس کاهش دادند. این فرآیند نوارهای برشی یکنواختی را تشکیل داد که منجر به دانه‌های بسیار ریز با اندازه ۰/۱ تا ۰/۳ میکرومتر شد. ورق‌های تیتانیوم نورد شده استحکام کششی نهایی ۸۹۵ تا ۹۱۵ مگاپاسکال را نشان دادند. جیانگ و همکارانش [۶] در پژوهش خود دریافتند که فرآیند نورد نامتقارن بهبود یافته (ASR) استحکام تسلیم آلومینیوم نورد شده را تا حد زیادی افزایش می‌دهد و در نتیجه دانه‌های بسیار ریز با مرزهای زاویه دار را ایجاد می‌کند. لی و همکارانش [۷] ریزدانه‌های تیتانیوم با اندازه دانه متوسط ۸۰ نانومتر را با استفاده از نورد نامتقارن و متقارن در دمای اتاق تولید کردند. سپس تاثیر فرآیند آنیلینگ را بر روی آنها در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه بررسی کردند. در نتیجه تیتانیوم با دانه‌بندی فوق‌العاده ریز با اندازه دانه کمتر از ۲۰۰ نانومتر به دست آمد که نشان دهنده پایداری حرارتی نسبتاً خوب است. تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس (XRD) جهت‌گیری‌های مشخصی را در امتداد صفحات کریستالی نشان داد، که با دمای آنیل بالاتر شدت جهت‌گیری کمی کاهش یافت. هوانگ و همکارانش [۸] جهت بررسی آلیاژ منیزیم AZ80 با قابلیت عملیات حرارتی، از روش نورد DSR با کاهش ضخامت ۳۳ درصد در هر پاس استفاده کردند. ورق نورد شده با این روش استحکام کششی ۳۲۹ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۲۵٪ را نشان داد. جان و همکارانش [۹] فرآیند نورد سطحی اولتراسونیک (USRP) را به عنوان یک روش جدید بررسی کردند. USRP یک فرآیند جدید تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) است که طی آن فرآیندهای پینینگ اولترا سونیک (UIP) و نورد عمیق (DR) را برای بهبود یکپارچگی سطح و خواص مکانیکی مواد با هم به کار می‌گیرد. این فرآیند گرادیان لایه‌های سطحی نانو ساختار را تحریک کرده و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد و از شکست مواد جلوگیری می‌کند. در این پژوهش نتایج مربوط به متریال‌های مختلف ارائه شدند. استپانف و همکارانش [۱۰] ریزساختار و خواص مکانیکی مس پس از ۱ تا ۱۰ پاس فرآیند ECAP را با فرآیند نورد سرد بر روی این متریال مقایسه کردند. نورد باعث تبدیل ساختار مس از هم محور به لایه‌ای بدون ریزتر کردن دانه‌ها شد. همچنین منجر به گسترش مرزهای با زاویه زیاد و بهبود ساختار تشکیل شده گردید. خیری و همکارانش [۱۱] خواص کششی فولاد ضد زنگ AISI 316L نورد سرد را پس از انجام فرآیندهای مختلف مانند تبدیل کامل فاز مارتنزیت به آستنیت، تبلور مجدد آستنیت باقی‌مانده و رشد دانه در دماهای مختلف از ۸۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد را بررسی کردند. نتایج نشان داد که دماهای بالاتر فرآیندهای برگشت و تبلور مجدد را تسریع می‌بخشند؛ اما منجر به دانه‌های درشت‌تر در پایان تبلور مجدد می‌شوند. کاهش دمای آنیل در طول تبلور مجدد کامل، تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی را افزایش داد، در حالی که ازدیاد طول کل را کاهش داد. جالب توجه است که وابستگی تنش تسلیم به اندازه دانه بیشتر از استحکام کششی نهایی است، که احتمالاً به دلیل بهبود رفتار سخت‌شدگی و انعطاف‌پذیری ناشی از تبدیل با اندازه دانه درشت‌تر است. رن و همکارانش [۱۲] در پژوهش عملی خود خواص مکانیکی آلیاژ Inconel 718 را با استفاده از روش نورد سرد دو مرحله‌ای، شامل نورد سرد اولیه، فرآیند آنیلینگ میانی، نورد سرد ثانویه و عملیات پیری بهبود دادند. چن و همکارانش [۱۳] ورق‌های آلیاژی Mg-5Zn-1Mn را به کمک نورد

با نرخ کرنش بالا (HSRR) در دماهای بین ۲۵۰ درجه سانتی گراد تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد تولید کردند. آنها ریزساختار و خواص مکانیکی ورق‌های نورد شده را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بارش دینامیکی نقش مهمی در تکامل ریزساختاری و خواص مکانیکی دارد. هی و همکارانش [۱۴] آلیاژهای بور آهن حاوی مقادیر مختلف تیتانیوم را با استفاده از روش ذوب القایی خلاء (VIM) تولید کردند. آلیاژها دارای خواص مکانیکی ضعیف، به‌ویژه از لحاظ شکل پذیری بودند. فرآیند نورد گرم برای بهبود ریز ساختار و خواص مکانیکی استفاده شد. تجزیه و تحلیل ریزساختار نشان داد که نورد گرم باعث کاهش اندازه و بهبود توزیع تقویت کننده‌ها می‌شود. آزمایش مکانیکی، بهبود استحکام کششی و ازدیاد طول را نشان داد، در حالی که استحکام تسلیم بدون تغییر باقی ماند. افزایش میزان تیتانیوم در ابتدا باعث کاهش جزئی و سپس افزایش استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم شد. ونگ و همکارانش [۱۵] تاثیر کاهش ضخامت ناشی از نورد و عملیات آنیل بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم AA5052 را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج این پژوهش، کاهش بیشتر ضخامت باعث ازدیاد طول دانه‌های هم محور می‌شود که منجر به افزایش استحکام اما کاهش انعطاف پذیری می‌گردد. هدایتی و همکارانش [۱۶] تاثیر کاهش ضخامت‌های مختلف از طریق نورد سرد بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی فولاد ضد زنگ AISI 304L را تحلیل کردند. نورد سرد در دمای ۰ °C با کاهش ۱۰ تا ۹۰ درصدی ضخامت منجر به تشکیل فاز مارتنزیت ناشی از کرنش و افزایش استحکام شد. یافته‌های تجربی با مدل اولسن-کوهن همراستا شدند و بر افزایش استحکام به وجود آمده صحت گذاشتند. پنیگرهی و جایگانتان [۱۷] اثر دمای نورد بر خواص مکانیکی و ویژگی‌های ریزساختاری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس پژوهش انجام شده نورد شدید آلیاژ در نیتروژن مایع و دمای اتاق نشان داد که آلیاژ کرایورول^۱ شده دارای استحکام بالاتر در حدود ۲۵۷ مگاپاسکال در مقایسه با آلیاژ نورد شده در دمای اتاق با استحکام ۲۳۲ مگاپاسکال به دلیل چگالی نابجایی بالاتر است. پس از نورد انجام شده، عملیات آنیل در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه استحکام کششی و شکل پذیری آلیاژ کرایورول شده را بهبود بخشید. جهازی و همکارانش [۱۸] تاثیر دمایی حرارت مجدد، درصد تغییر شکل، زمان بین پاسی و دمای نورد نهایی بر روی فولاد AISI 4130 را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. سختی، کشش و خواص ضربه‌ای نمونه‌ها اندازه‌گیری و ریز ساختار آنها مورد بررسی قرار گرفت. با کنترل دقیق عملیات ترمومکانیکی، تعادل ایده‌آل میان استحکام و چقرمگی به دست آمد. نتایج نشان دادند که خواص مکانیکی با افزایش درصد نورد در هر پاس بهبود می‌یابد، با این حال، خواص بهینه زمانی به دست می‌آید که ترکیب مناسبی از درصد کاهش ضخامت، و گرم کردن مجدد و دمای نورد به کار گرفته شود. ون لانگ و همکارانش [۱۹] افزایش استحکام فولاد کم کربن از طریق تغییر شکل نورد را با فولاد تحت عملیات حرارتی دو فازی قرار گرفته بررسی و مقایسه کردند. فولادی که تحت عملیات

^۱ کرایورولینگ یک فرآیند نورد ساده در دمای پایین است که در آن دمای پایین توسط نیتروژن مایع حفظ می‌شود. کرایورولینگ یک فرآیند تغییر شکل مکانیکی منحصر به فرد است که با استفاده از آن می‌توان به آلیاژهایی با استحکام و شکل پذیری بالا دست یافت.

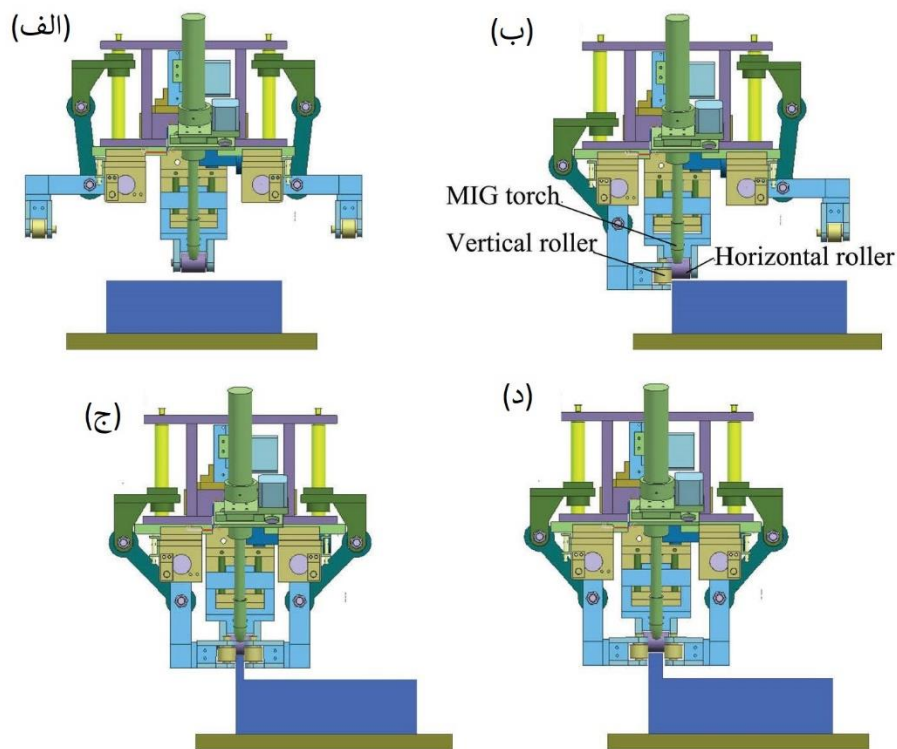
حرارتی قرار گرفته بود استحکام بالایی در حدود ۷۴۰ MPa و شکل پذیری خوب با ۱۵٪ ازدیاد طول در هنگام شکست را نشان داد؛ در حالی که فولاد نورد شده استحکام ۷۰۰ MPa و ازدیاد طول زیر ۳٪ در هنگام شکست را نتیجه داد.

بطور خلاصه، بررسی تاثیر نورد بر خواص مکانیکی و ریزساختار مواد تولید شده با روش‌های عمومی تولید نشان می‌دهند فرآیند نورد سبب افزایش سختی و استحکام شده و ریزساختار ماده را به شکل ریزدانه تغییر می‌دهد [۱۹-۳].

۲- فرآیند نورد در قطعات تولید شده به روش پرینت سه‌بعدی

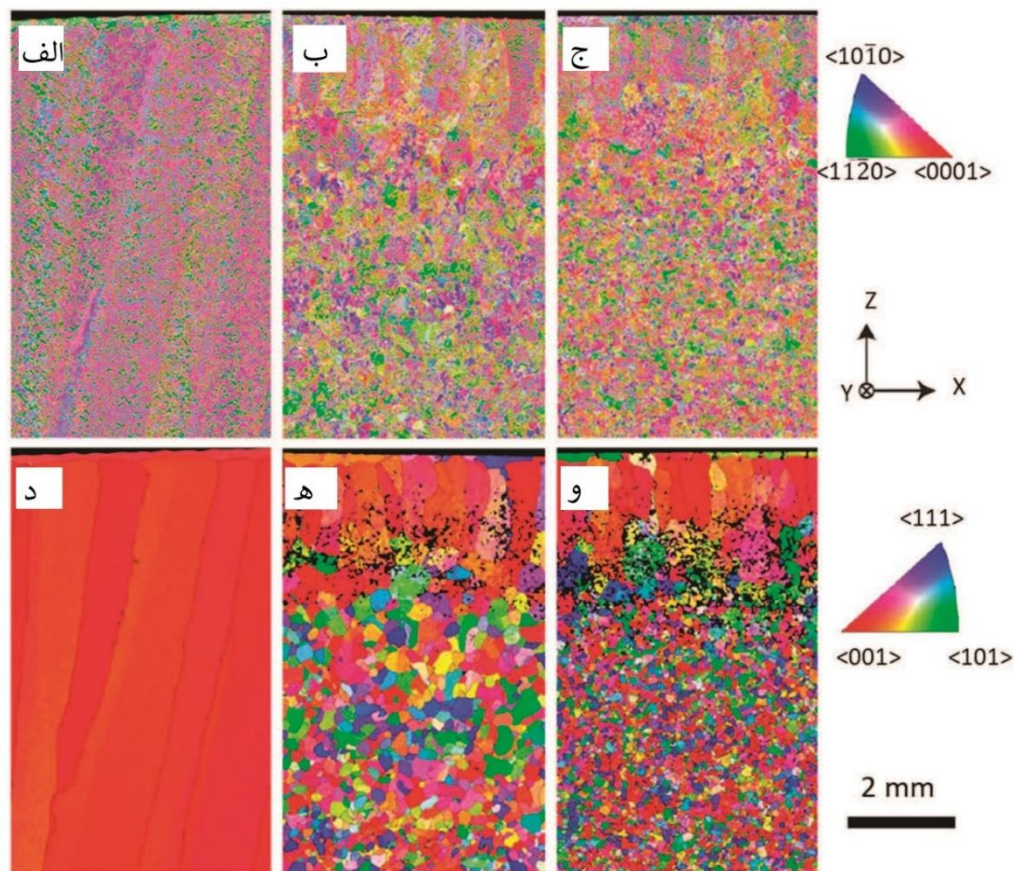
۲-۱- پیکربندی‌های نورد در پرینت سه‌بعدی و مکانیسم‌های هیبریدی

ژنگ و همکارانش [۲۰] در سال ۲۰۱۳ یک مکانیسم دگرگونی در خصوص فرآیند تولید افزایشی سیم و قوس (WAAM) را ارائه کردند که این مکانیزم دارای یک سیستم نورد جدید با سه غلتک است که پیکربندی آن همانند آنچه در شکل ۲ مشاهده می‌شود می‌تواند با توجه به ویژگی‌های قطعه نسبت به نورد کردن سطوح بالا یا جانبی رسوب تغییر کند. در این پژوهش تأثیر نیرو و دمای نورد بر شکل لایه پرینت شده، مورد مطالعه قرار گرفت و پارامترهای بهینه نورد برای کنترل ارتفاع و عرض لایه‌ها به دست آمد.



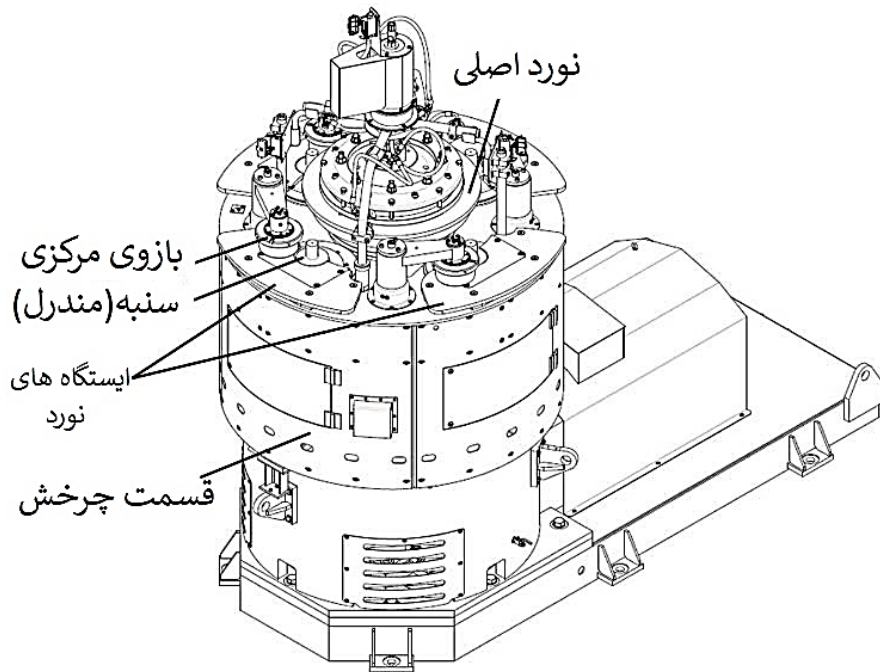
شکل ۲. شبیه‌سازی مکانیزم نورد دگرگونی در شرایط کاری و پیکربندی‌های مختلف. (الف) یک غلتک (ب) دو غلتک (ج) سه غلتک برای دیواره نازک با ضخامت ۶ میلیمتر (د) سه غلتک برای دیواره نازک با ضخامت ۱۰ میلی‌متر [۲۰]

رودریگز و همکارانش [۲۱] عنوان کردند که طراحی غلتک نقش مهمی در روش نورد بین لایه‌ای ایفا می‌کند و هندسه قرارگیری غلتک‌ها باید با توجه به ویژگی‌های قطعه (ضخامت و ...) طراحی شود تا بتوان به ریزدانه‌های همگن رسید. آنها در این مطالعه از فرآیند WAAM و آلیاژ Ti-6Al-4V استفاده نمودند. شکل ۳ ریزساختار ماده مورد مطالعه را قبل و بعد از نورد نشان می‌دهد.



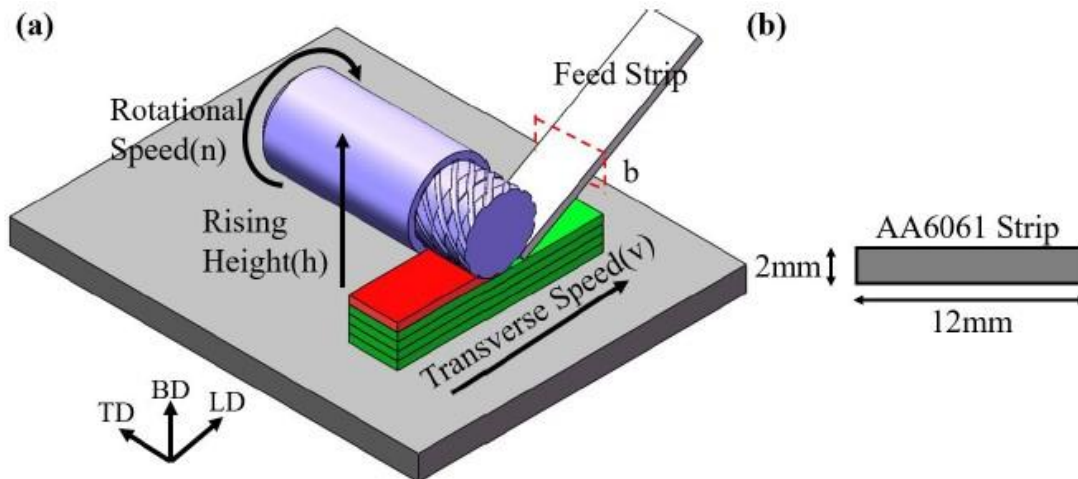
شکل ۳. نماهای پراش برگشتی الکترون (EBSD) از فاز α (الف-ج) و فاز β بازسازی شده (د-و) در نمونه‌های تولید شده بدون نورد و همراه با نورد با بارگذاری‌های ۵۰ و ۷۵ KN [۲۱]

میشل و همکارانش [۲۲] نورد حلقه‌ای را به عنوان یک فرآیند شکل دهی انعطاف پذیر برای تولید حلقه‌های بدون درز با ابعاد و مقاطع مختلف، مورد بررسی قرار دادند. شکل ۴ طراحی انجام شده که شامل یک میز نورد با چهار سنبه می‌باشد را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است گاهی مقاطع مختلف برای رسیدن به هندسه نهایی ممکن است نیاز به چند مرحله فرم دهی داشته باشند. به همین دلیل برای افزایش انعطاف پذیری فرآیند، استفاده از روش‌های پربازده تولید افزودنی مانند WAAM در فرآیند نورد حلقه‌ای مفید می‌باشد. این روش امکان کار بر روی مواد مختلف با نرخ رسوب بالا را فراهم می‌کند. در این حالت، می‌توان مقاطع پیچیده‌تری را تنها با یک مرحله نورد حلقه‌ای تولید کرد. بررسی نتایج نشان می‌دهند که پیش فرم‌های WAAM رفتار شکل دهی خوبی داشته و هیچ نقص سطحی روی آنها ایجاد نشد. همچنین، عیوب داخل حلقه‌ها هیچ اثر منفی بر روند فرآیند نورد را نشان نداد. شرایط سطح (خام یا ماشینکاری شده) بر رفتار شکل دهی تأثیری نداشته و ترکیب WAAM و نورد حلقه‌ای با اهداف بهبود کارایی فرآیند و کاهش هزینه‌ها قابل اجرا به نظر می‌رسد.

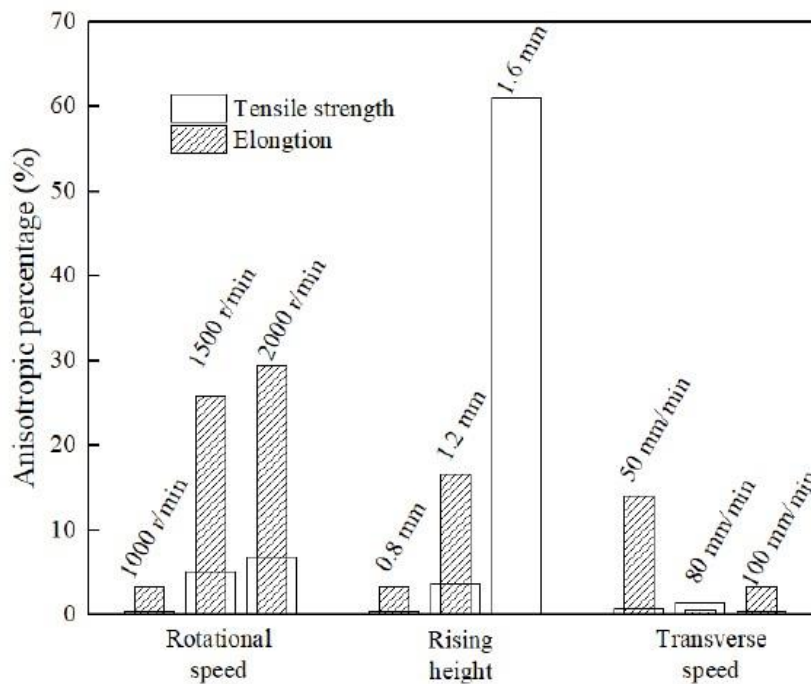


شکل ۴. طرح کلی نورد حلقه‌ای خودکار [۲۲]

ژی و همکارانش [۲۳] در سال ۲۰۲۳ به عنوان اولین مطالعه از نوارهای آلیاژ آلومینیوم ۵۲-۵۰-H32 با ضخامت ۲ میلیمتر به عنوان فیلر در فرآیند ساخت افزودنی به روش نورد اصطکاکی (FRAM) استفاده کردند. شماتیک این فرآیند در شکل ۵ قابل مشاهده است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای فرآیند از جمله افزایش ارتفاع و سرعت دورانی بر کیفیت شکل‌دهی، ریزساختار و خواص مکانیکی قطعه حاصل بررسی شد. نتایج نشان داد که با انتخاب پارامترهای فرآیند مناسب می‌توان از عیوب شکل‌دهی ماکروسکوپی جلوگیری کرد. در نتیجه فرآیندهای انجام شده یک ریزساختار لایه‌ای غیر مسطح از دانه‌های هم‌محور ریز و فوق‌العاده ریز که به طور متراکم در کنار یکدیگر ادغام شده‌اند، بدون تخلخل یا نقص زیاد به دست آمد. اگرچه مواد رسوب‌شده از دانه‌های کاملاً هم‌محور تشکیل نشده بودند، ناهمسانگردی خواص مکانیکی کم بود (شکل ۶). استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول در هر دو جهت طولی و جهت تشکیل مواد رسوب‌شده به دلیل ریزساختار لایه‌ای غیرمسطح و ایجاد ریز دانه‌ها، به ترتیب با حداکثر مقادیر ۲۱۵ مگاپاسکال و ۳۲ درصد بیشتر از نوارهای فیلر خام بود.



شکل ۵. شماتیک عملیات FRAM، (b) ابعاد مقطع نوار آلومینیومی به عنوان فیلامنت [۲۳]



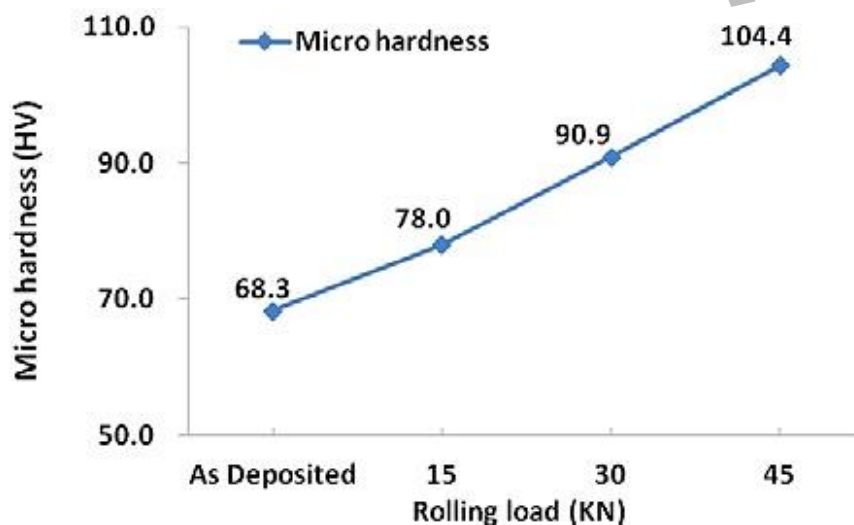
شکل ۶. درصد ناهمسانگردی در پارامترهای مختلف در فرآیند FRAM [۲۳]

۲-۲- تکرارپذیری فرآیند

مارتینا و همکارانش [۲۴] در پژوهش خود یک قطعه از جنس Ti-6Al-4V را با روش WAAM پرینت کرده و با استفاده از روش نورد فشار بالا هر لایه از پرینت را به صورت بین پاسی نورد نمودند. آنها نشان دادند نمونه‌های نورد شده به این روش تکرارپذیری فرآیند تولید را افزایش داده و این امر می‌تواند به اجرای صنعتی فرآیند کمک کند.

۲-۳- خواص مکانیکی، ریزساختار، عیوب

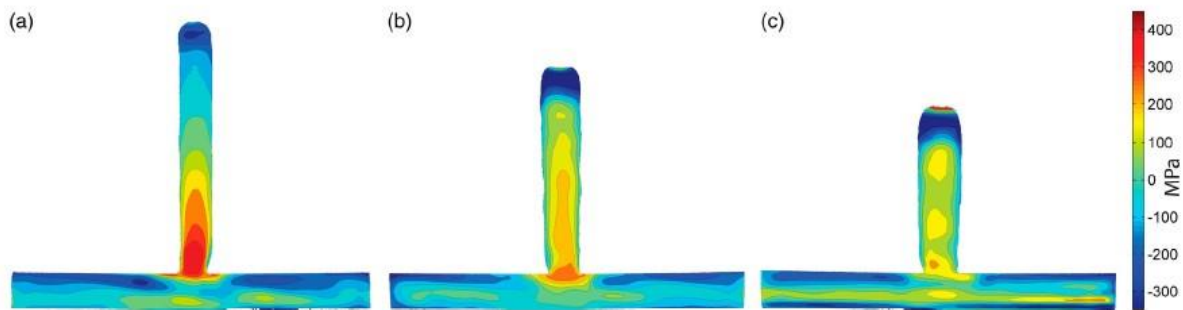
ژنگ و همکارانش [۲۰] نشان دادند که روش رسوب و نورد ترکیبی برای ریزدانه کردن، جلوگیری از ترک داغ و بهبود خواص مکانیکی قطعات مفید خواهند بود. گو و همکارانش [۲۵] اشاره کردند که فرآیند نورد باعث بهبود فرآیند ریز دانه کردن و همچنین افزایش سختی (شکل ۷) می شود، بنابراین با استفاده از روش WAAM خواص مکانیکی آلیاژ تولید شده بهبود داده می شود. همچنین در نتایج این پژوهش آمده است که در آینده نزدیک سیم های ترکیبی جدید، نورد بین پاسی و عملیات حرارتی پس از ساخت برای بهبود خواص جامع آلیاژهای آلومینیوم با بکارگیری روش WAAM اعمال خواهند شد. در این مقاله قطعات مورد بررسی از سیم های آلیاژ آلومینیوم ER2319 تولید شدند.



شکل ۷. متوسط میکرو سختی آلیاژ آلومینیوم ER2319 پرینت شده به روش WAAM نورد شده همراه با افزایش بار [۲۵]

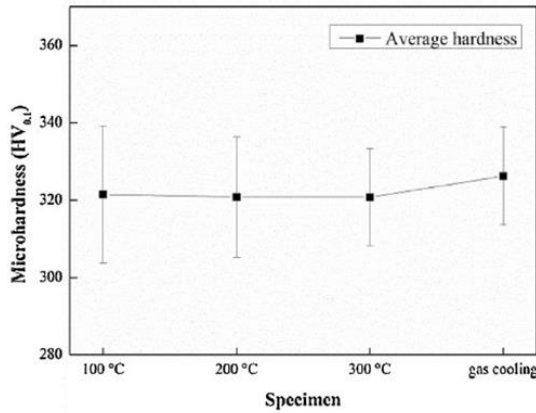
مارتینا و همکارانش [۲۶] برای بهبود ریزساختار لایه های تشکیل شده، اثر نورد بین پاسی فشار بالا را مورد ارزیابی قرار دادند و در این راستا یک غلتک مسطح و یک غلتک پروفیلی را با هم مقایسه کردند. در نتیجه ریزساختار از دانه های بزرگ ستونی به دانه های هم محور که اندازه آنها بین ۵۶ تا ۱۳۹ میکرومتر بود تغییر کردند. نتایج نشان دادند که نورد بین پاسی فشار بالا می تواند بر بسیاری از کاستی های قطعات تولید شده به روش AM غلبه کند و به طور بالقوه به اجرای صنعتی این فرآیند کمک کند. در این پژوهش فرآیند تولید افزودنی WAAM و متریال Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار گرفتند. آنها همچنین اثبات کردند هنگامی که در سازه های فولادی تولید شده به روش WAAM فرآیند نورد اعمال شود، این فرآیند می تواند منجر به کاهش اندازه دانه شود. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می دهد نورد باعث بهبود قابل توجه فرآیند ریزدانه کردن، کاهش ضخامت کلی لایه ها و تغییر ریزساختار از حالت کاملاً ستونی به هم محور می شود که دلیل

آن تبلور مجدد لایه تغییر شکل یافته در هنگام رسوب کردن و ذوب شدن لایه بعدی باشد. اندازه ناحیه تبلور مجدد متاثر از میزان بار و در نتیجه میزان تغییر شکل ماده قرار می‌گیرد. غلتک مسطح، که دارای مزایای عملی قابل توجهی نسبت به سایر غلتک‌ها است، کاهش‌های مشابهی را در اندازه دانه ایجاد کرد و ممکن است انتخاب بهتری برای بهره‌برداری تجاری از فرآیند نورد باشد. این پژوهشگران همچنین در مقاله‌ای دیگر [۲۴] عنوان کردند که نورد می‌تواند به ریزساختار هم محور منجر شود، لذا این مورد همراه با کاهش تنش پسماند (شکل ۸) و اعوجاج متریال Ti-6Al-4V تولید شده با روش WAAM ثابت می‌کند که نورد می‌تواند ابزار مفیدی برای بهبود کیفیت قطعات ساخته شده از طریق روش تولید افزودنی باشد.

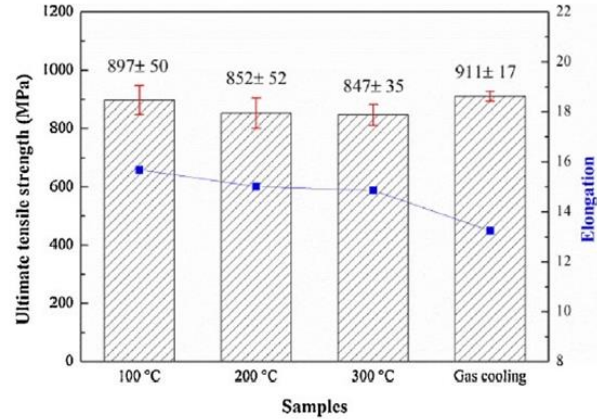


شکل ۸. نقشه کانتور تنش پسماند: (a) کنترل. نمونه‌های نورد شده با استفاده از غلتک پروفیلی با بارهای (b) ۵۰ کیلو نیوتن و (c) ۷۵ کیلو نیوتن [۲۴]

وو و همکارانش [۲۷] نشان دادند که اگر از فرآیند WAAM استفاده شود، گرادیان حرارتی لایه‌های رسوب‌گذاری و فرآیند گرمایش و خنک‌سازی متناوب باعث می‌شود که قسمت هدف دارای تکامل ریزساختاری و خواص مکانیکی بهتر باشد که در شکل ۹ مشاهده می‌شود. تکنیک نورد سرد به طور قابل توجهی ناهمسانگردی ریز ساختاری را از طریق تغییر شکل پلاستیکی شدید رسوبات کاهش می‌دهد. نورد سرد بین پاسی همچنین می‌تواند نقش مهمی در بهبود تخلخل هیدروژنی در قطعات آلومینیومی ساخته شده توسط WAAM ایفا کند. متریال‌های مختلفی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ارتباط بین متریال‌ها و عیوب در فرآیندهای WAAM مربوط به متریال‌های مختلف در شکل ۱۰ آورده شده است.

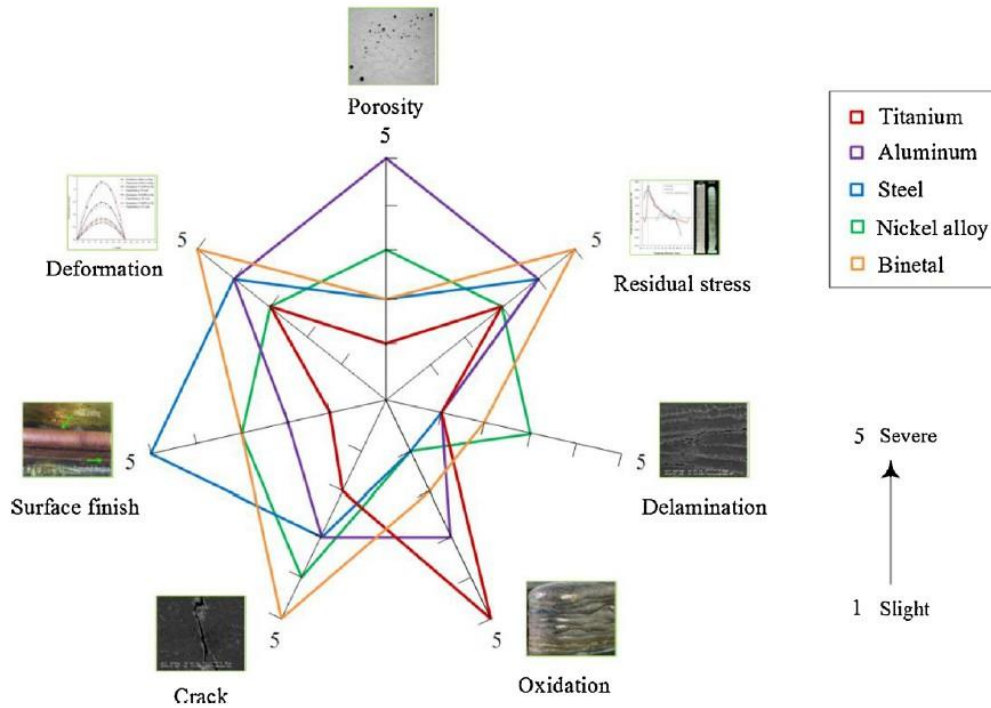


الف



ب

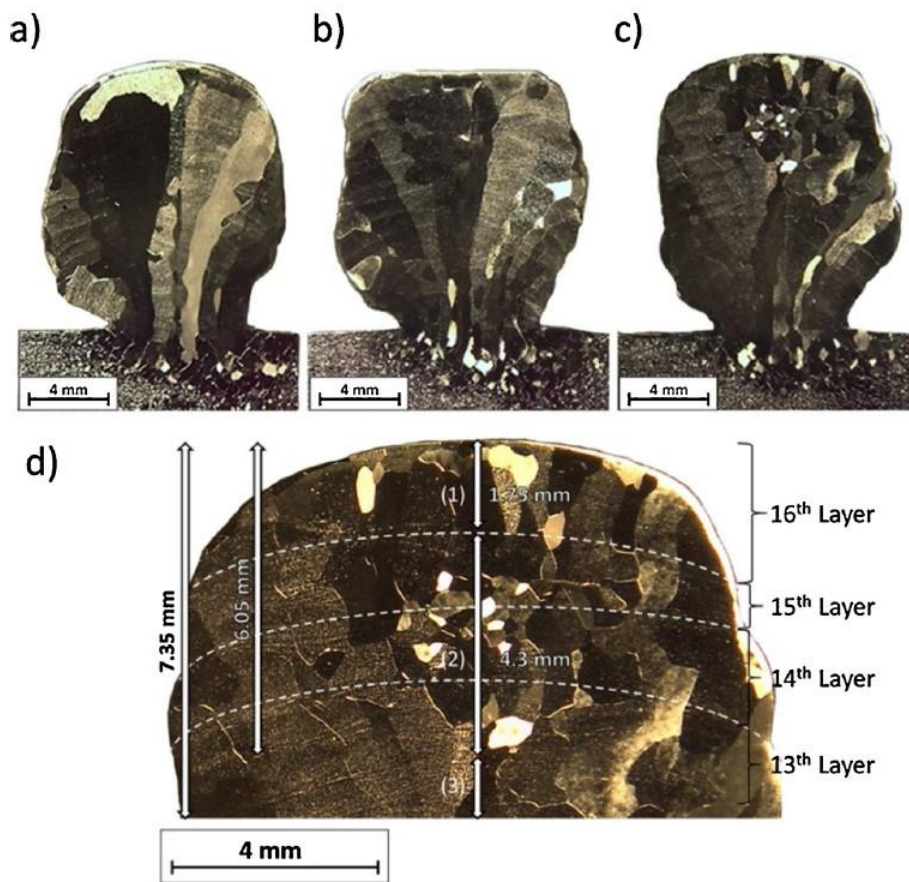
شکل ۹. خواص مکانیکی قطعه Ti6Al4V تولید شده توسط WAAM با خنک کننده میان پاسی با استفاده از گاز CO₂: (الف) سختی. (ب) استحکام کششی و ازدیاد طول. [۲۷]



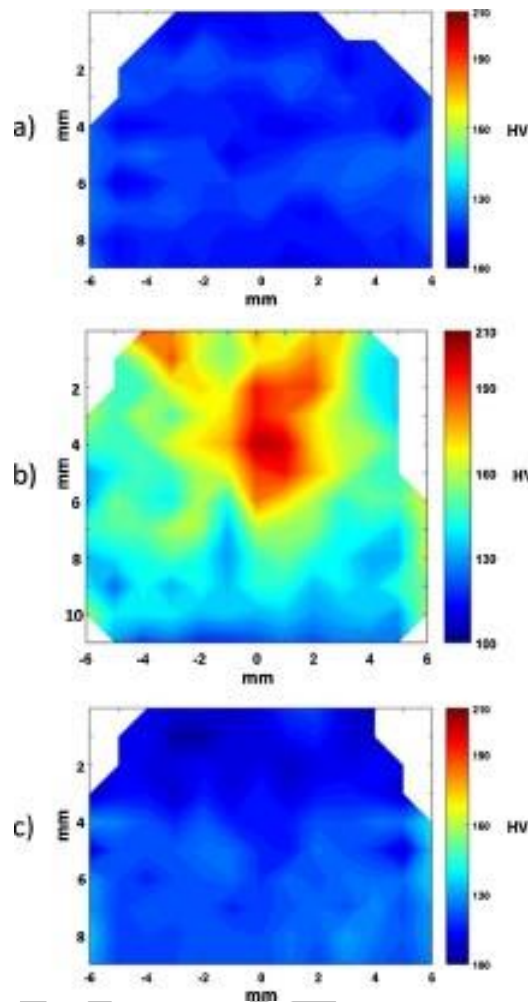
شکل ۱۰. ارتباط بین متریال‌ها و عیوب در فرآیندهای WAAM [۲۷]

گیساریو و همکارانش [۲۸] اشاره کردند که برای بهبود ریزساختار و کاهش تخلخل، می‌توان نورد سرد را به طور مستقیم پس از رسوب مواد روی قطعه اعمال کرد. رودریگوز و همکارانش [۲۱] نشان دادند که نورد بین لایه‌ای در متریال Ti-6Al-4V تولید شده به روش WAAM باعث بهبود ریز دانه‌های قبلی، کاهش ضخامت لایه‌های فاز آلفا و تغییر کلی ریزساختار از ستونی به هم محور می‌شود. همچنین نشان دادند که نورد بین لایه‌ای با

افزایش بار نورد، اندازه و کمیت تخلخل را کاهش می‌دهد که دلیل افزایش شکل پذیری آلیاژهای آلومینیومی تولید شده به روش WAAM نورد شده است. کیو و همکارانش [۲۹] نتیجه گرفتند که عملیات رسوب دهی پس از نورد گرم راهی موثر برای اصلاح قابل توجه ریز ساختار و بهبود خواص مکانیکی رسوبات آلیاژ A380 ساخته شده از طریق سیستم‌های ارزان قیمت فشار متوسط پاشش سرد است. در این پژوهش عملیات نورد گرم پس از پاشش رسوبات A380 با حرارت دادن آنها در دمای ۵۰۰ درجه در کوره به مدت ۲ ساعت و سپس عملیات نورد یک طرفه با کاهش ضخامت‌های ۲۰ و ۴۰ درصد به ترتیب در ۱ و ۲ پاس انجام شد. متریال به کار گرفته شده در این پژوهش آلیاژ A380 است. ملکی و همکارانش [۳۰] عنوان کردند که اگر پارامترهای مناسب برای عملیات نورد انتخاب شوند، این روش می‌تواند فرآیند ریزدانه کردن را بهبود ببخشد و باعث ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در لایه تحت عملیات قرار گرفته شود. این ویژگی‌ها می‌توانند منجر به بهبود خواص مکانیکی و همچنین کاهش زبری سطح شوند. استراتژی‌های مختلفی برای استفاده از نورد به منظور کنترل ریز ساختار لایه‌ها بر روی فلزات AM مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که از جمله آنها می‌توان یک پاس نورد بر روی سطح خارجی لایه نهایی یا نورد بین پاسی را نام برد. متریال استفاده شده در این پژوهش از نوع Ti-6Al-4V می‌باشد. مارینلی و همکارانش [۳۱] اشاره کردند که اجزای تولید شده به روش WAAM معمولاً با دانه‌های ستونی بزرگ مشخص می‌شوند. این حالت را می‌توان با بکارگیری نورد سرد در فرآیند کاهش داد. در واقع، تغییر شکل پلاستیک شدید در این فرآیند منجر به کاهش اعوجاج و تنش‌های پسماند و اصلاح ریز ساختاری می‌شود. در این تحقیق، نورد بین پاسی با بار ۵۰ کیلو نیوتن بر روی یک سازه خطی تانتالیوم برای ارزیابی اثربخشی نورد در تغییر ساختار دانه از ستونی به هم محور و همچنین در اندازه ریزدانه‌ها انجام شد. اندازه دانه متوسط ۶۵۰ میکرومتر پس از پنج چرخه نورد بین پاسی و رسوب به دست آمد. هنگامی که لایه تغییر شکل یافته در طی رسوب بعدی دوباره گرم شد، تبلور مجدد رخ داد که منجر به رشد دانه‌های جدید بدون کرنش شد. عمق منطقه بهبود یافته مشخص شد و با مشخصات سختی ایجاد شده پس از نورد مرتبط گردید. علاوه بر این، یک بافت تصادفی پس از نورد تشکیل شد که باید به دستیابی به خواص مکانیکی همسانگرد کمک کند. در این پژوهش تاثیر نورد عمودی سرد با بار ۵۰ کیلو نیوتن بر ریز ساختار و سختی بافت یک جزء تانتالیوم AM پس از هر مرحله از فرآیند مورد مطالعه قرار گرفته است. سه نمونه اصلی مربوط به سه مرحله متوالی در این مطالعه این گونه بودند: به صورت رسوب (نمونه R۱)، به صورت رسوب + نورد (نمونه R۲)، به صورت رسوب + نورد + رسوب (نمونه R۳). در نمونه‌های مورد مطالعه، بار نورد اعمال شده باعث ایجاد یک کرنش فشاری در لایه‌های رسوب شده قبلی شد و میدان حرارتی رسوب بعدی اجازه تشکیل و رشد دانه‌های تبلور مجدد جدید را داد. تبلور مجدد در مرکز ساختار رسوب شده، جایی که اوج کرنش در آن قرار داشت و در عمق سه لایه زیر آخرین لایه رسوب شده رخ داد. مراحل پی در پی نورد و رسوب منجر به یک منطقه به تدریج بزرگتر از دانه‌های هم محور با اندازه دانه متوسط ۶۵۰ میکرومتر پس از پنج مرحله نورد بین پاسی شد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).



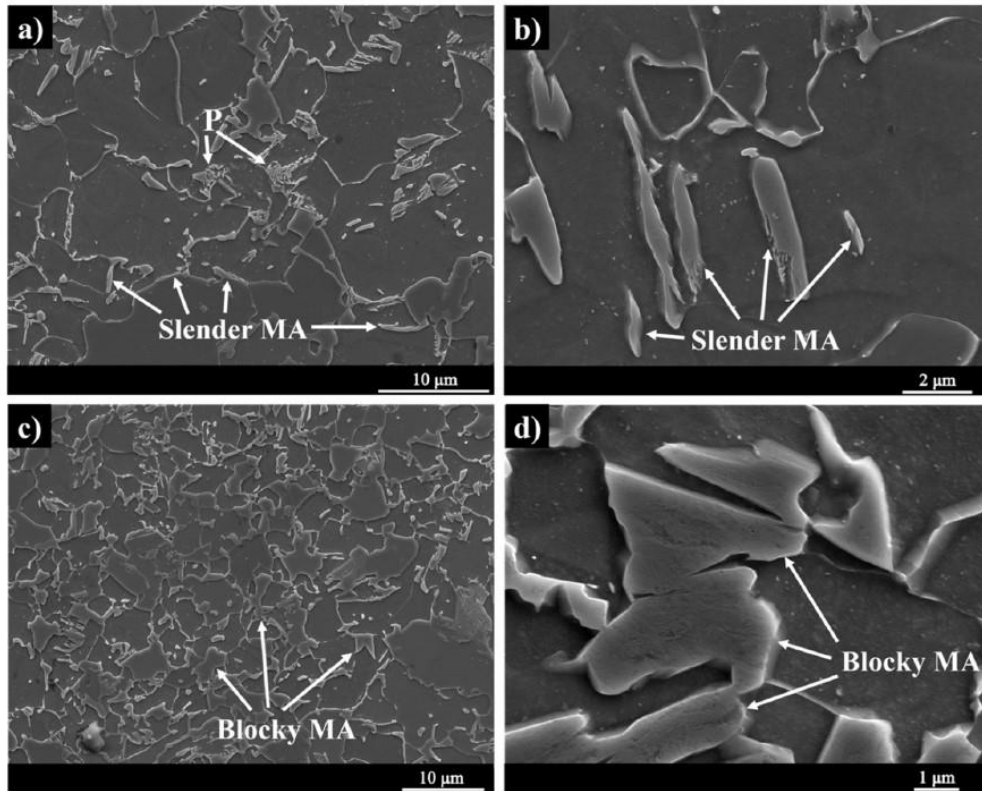
شکل ۱۱. میکروگراف‌های نوری نمونه‌های R1 (a)، R2 (b) و R3 (c). بزرگنمایی قسمت بالای تبلور مجدد نمونه R3 (d). [۳۱]



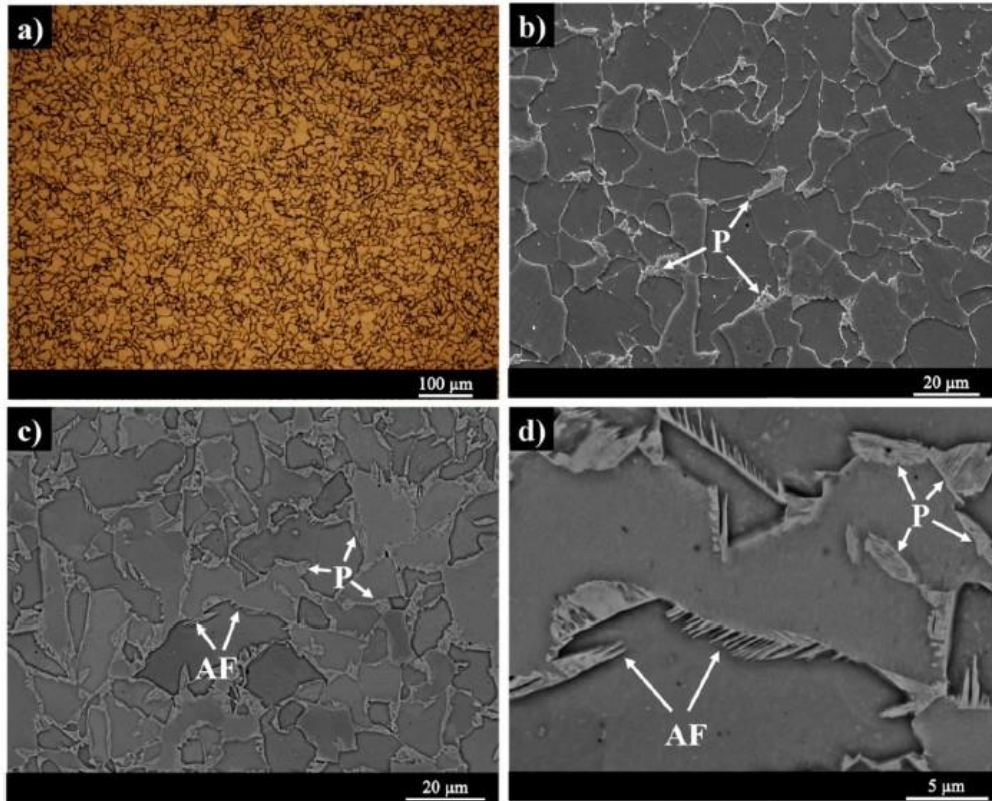
شکل ۱۲. نقشه‌های کانتور مرتبط با اندازه‌گیری سختی ویکرز برای نمونه‌های (a) R1، (b) R2 و (c) R3 [۳۱]

نمانی و همکارانش [۳۲] در پژوهش خود امکان‌سنجی ساخت ورق فولادی کم آلیاژ کم کربن نورد شده (EH36) با فناوری WAAM با استفاده از فیلر ER70S را بررسی کردند. پس از فرآیند ساخت، چرخه‌های مختلف عملیات حرارتی، از جمله خنک‌سازی هوا و کوئنچ آب از دمای آستنیت‌ده بحرانی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، برای هر دو نمونه نورد معمولی و WAAM اعمال شد. ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی ورق‌های کشتی ساخته شده با نورد و WAAM به طور کامل قبل و بعد از چرخه‌های مختلف عملیات حرارتی مشخص و مقایسه شدند. هر دو عملیات حرارتی خنک‌کننده هوا و کوئنچ آب منجر به تشکیل ترکیبات سخت مارتنزیت آستنیت در ریزساختار ورق نورد شده گردیدند که منجر به افزایش سختی و استحکام کششی و کاهش شکل‌پذیری قطعه می‌شود. از طرف دیگر، عملیات حرارتی خنک‌کننده هوا باعث همگن شدن ریزساختار صفحه کشتی WAAM و باعث کاهش جزئی سختی و استحکام کششی شد،

در حالی که چرخه کوئنچ آب منجر به تشکیل فریت سوزنی و پرلیت بین دانه‌ای و کمک به بهبود خواص مکانیکی قطعه شد که تمامی مراحل و حالت‌های یاد شده در شکل ۱۳ مشاهده می‌شوند. بنابراین، یکپارچگی مکانیکی مطلوب تر قطعه WAAM کوئنچ شده با آب در مقایسه با قطعه نورد شده، امکان ساخت صفحات کشتی توسط WAAM را تأیید کرد (شکل ۱۴).

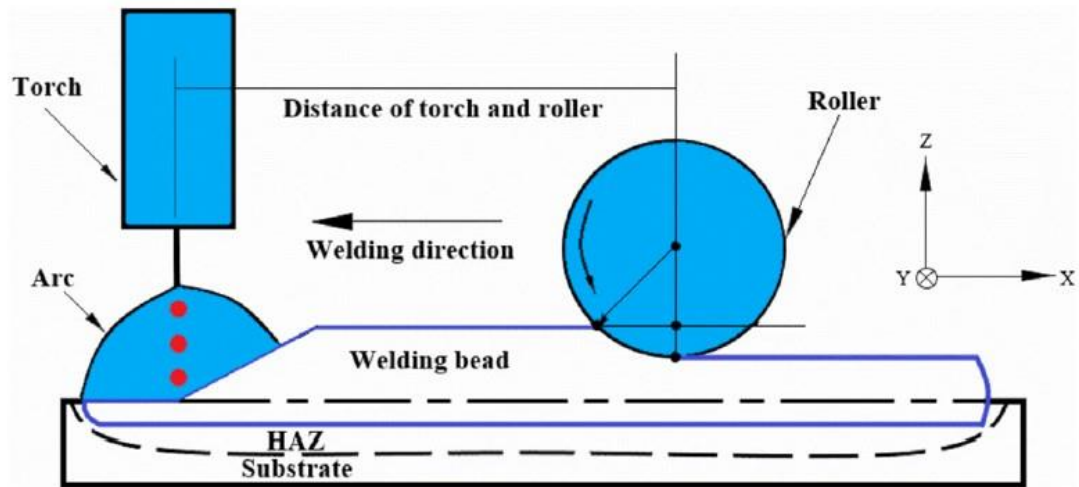


شکل ۱۳. میکروگراف‌های SEM از صفحه کشتی نورد شده پس از اعمال عملیات حرارتی مختلف: (a) و (b) چرخه خنک‌کنندگی توسط هوا و (c) و (d) چرخه کوئنچ کردن آب. [۳۲]

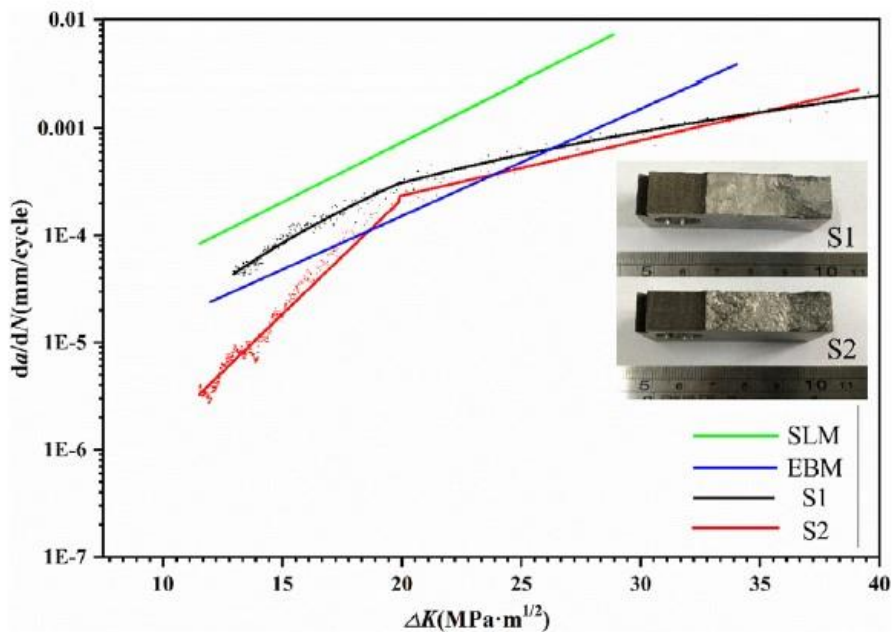


شکل ۱۴. میکروگراف‌های نوری و SEM که از نمونه WAAM پس از عملیات حرارتی مختلف از جمله: (a) و (b) چرخه خنک‌کنندگی هوا و (c) و (d) چرخه کوئنچ آب گرفته شده است. (P: پرلیت، AF: آستنیت فریت) [۳۲]

گائو و همکارانش [۳۳] مقاومت رشد ترک خستگی و ریزساختار آلیاژهای TC4-DT ساخته شده توسط WAAM (نمونه S1) و WAAM نورد شده در محل (نمونه S2) و به دنبال آن عملیات حرارتی را مقایسه کردند (شما تیک نمونه S2 در شکل ۱۵ آورده شده است). نمونه S2 دارای مقاومت در برابر رشد ترک خستگی بهتر بود که عمدتاً به نقص‌های ظریف‌تر و فاز ظریف‌تر آن مربوط می‌شود. اندازه بحرانی عیوب مربوط به عملکرد خستگی نیز محاسبه شد. اکثر عیوب در نمونه S2 کمتر از اندازه بحرانی بودند، در حالی که چندین نقص درشت در حدود ۱٫۹۱ میلی‌متر در نمونه S1 مشاهده شد. ترک‌های ثانویه متعدد را می‌توان در نزدیکی سطح شکست در نمونه S2 شناسایی کرد که منجر به مسیرهای طولانی و پیچ در پیچ انتشار ترک خستگی می‌شود. می‌توانید چگونگی و نرخ رشد ترک خستگی در فرآیندهای مختلف را در شکل ۱۶ مشاهده کنید. بنابراین، نورد در محل می‌تواند خواص خستگی آلیاژهای تیتانیوم ساخته شده توسط تولید افزودنی را بهبود بخشد.



شکل ۱۵. نمودار شماتیک فرآیند WAAM همراه با نورد در ادامه فرآیند [۳۳]



شکل ۱۶. نرخ رشد ترک خستگی نمونه‌های آلیاژ تیتانیوم TC4-DT تولید شده توسط فرآیندهای مختلف [۳۳]

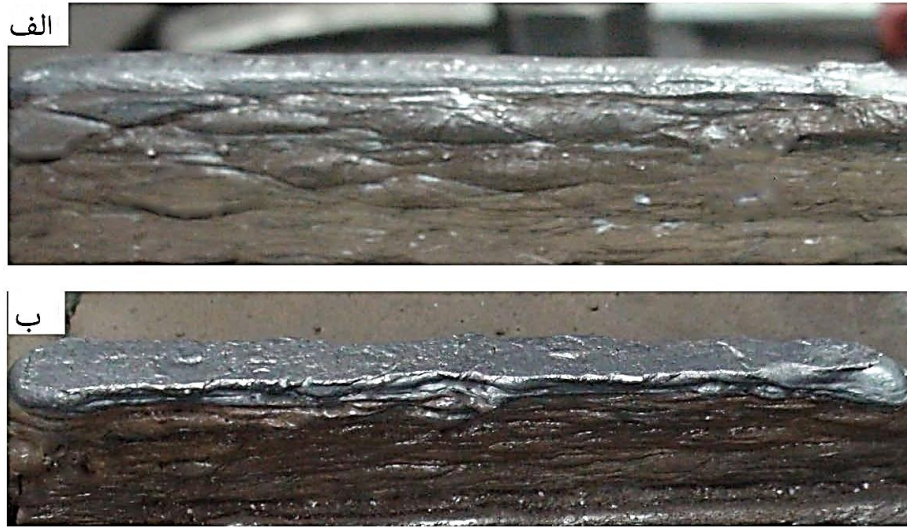
میشل و همکارانش [۲۲] دریافتند در صورتی که هیچ نقصی در نمونه‌های حاصل از نورد حلقه‌ای ظاهر نشود، می‌توان به خواص مکانیکی خوبی برای بارگذاری استاتیکی دست یافت. به طور کلی، استراتژی جو شکاری باید بهبود داده شود تا از حفره‌ها و عدم وجود خطاهای ناشی از جوش جلوگیری شود، که در غیر این صورت ممکن است به صورت اتفاقی در فرآیند WAAM ظاهر شوند و منجر به از دست دادن استحکام و شکل پذیری

گردند. گو و همکارانش [۲۵] تغییرات ناشی از عملیات حرارتی پس از ساخت و نورد بین پاسی با فشار بالا را با هدف افزایش استحکام قطعات ساخته شده به روش WAAM مورد بررسی قرار دادند. آنها در آزمایشات خود یک دستگاه نورد نه چندان پیشرفته مربوط به دانشگاه کرانفیلد را برای فرآیندهای نورد بین پاسی به کار گرفتند. کیو و همکارانش [۲۹] در پژوهش خود رسوبات آلیاژی اسپری شده تحت عملیات نورد گرم با درصدهای مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌های نورد گرم در مقایسه با حالت اسپری شده، استحکام و شکل پذیری بهتری از خود نشان می‌دهند. ژنگ و همکارانش [۲۰] نتیجه گرفتند که در مقایسه با تولید افزودنی معمول که یک فرآیند رسوب آزاد است، قطعات ساخته شده به صورت ترکیبی از طریق رسوب دهی و نورد دارای سطوح بهتر و نوسان ابعاد بسیار کمتر هستند که مزایای صرفه‌جویی در زمان و مواد برای رسیدن به شکل نهایی قطعات بدون استفاده از ماشین کاری زیاد پس از تشکیل قطعه را شامل می‌شوند. میانگین ارتفاع و حداکثر خطای مطلق ارتفاع قطعات جدار نازک ۱۶ لایه در حالت بدون نورد افقی به ترتیب ۳۰/۸ میلی‌متر و ۲/۴ میلی‌متر به دست آمدند؛ در حالی که مقادیر برای حالتی که نورد انجام شد، ۲۵/۱ میلی‌متر و ۰/۲ میلی‌متر به دست آمدند. در حالت بدون نورد عمودی میانگین عرض بین ۸/۷۳ تا ۹/۱۴ میلی‌متر در نوسان بود و حداکثر مقدار خطای مطلق عرضی ۰/۴۵ میلی‌متر برای قطعات جدار نازک به دست آمد. در مقابل، برای حالتی که روی قطعه نورد انجام شد، میانگین عرض بین ۸/۶۷ و ۸/۷۸ میلی‌متر در نوسان بود و حداکثر مقدار خطای مطلق عرضی ۰/۱۲ میلی‌متر محاسبه گردید که تمامی این مقادیر در قالب جدول ۱ در زیر آورده شده است. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نیز نماهای عرضی لایه‌ها با و بدون نورد افقی و عمودی آورده شده‌اند. همچنین در شکل ۱۹ خطای مطلق ارتفاع ماکزیمم قطعه جداره نازک با توجه به تعداد لایه‌های رسوب شده نمایش داده شده است.

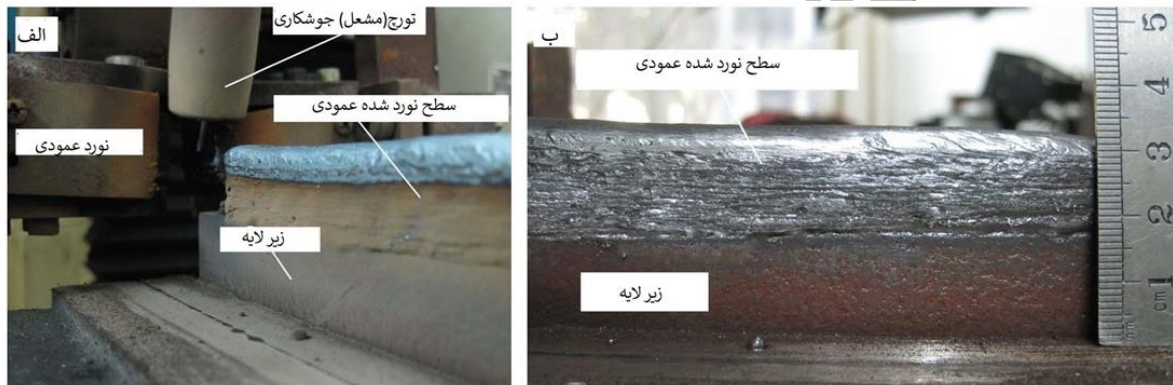
جدول ۱. تجزیه و تحلیل دقیق خطاها در خصوص لایه‌های رسوب شده با و بدون نورد عمودی [۲۰]

Deposition layer	Average width(mm)		Maximum width absolute error (mm)		Mean square deviation (mm)	
	a*	b	a	b	a	b
First	8.73	8.67	0.36	0.06	0.14	0.03
Second	8.92	8.71	0.19	0.10	0.08	0.04
Fourth	8.83	8.76	0.33	0.12	0.13	0.02
Sixth	9.07	8.78	0.45	0.07	0.20	0.05
Eighth	9.14	8.70	0.42	0.04	0.18	0.02

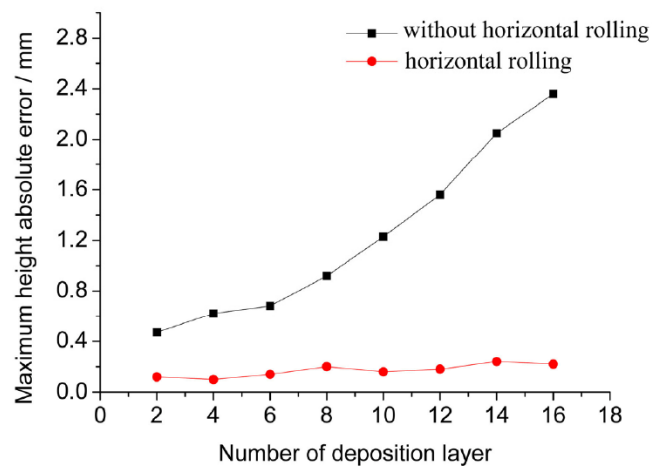
* a is the condition for the thin-walled parts without vertical rolling. b is the condition for the thin-walled parts with vertical rolling.



شکل ۱۷. تصاویر جداره نازک ۱۶ لایه با و بدون نورد افقی (الف) بدون نورد (ب) همراه با نورد [۲۰]



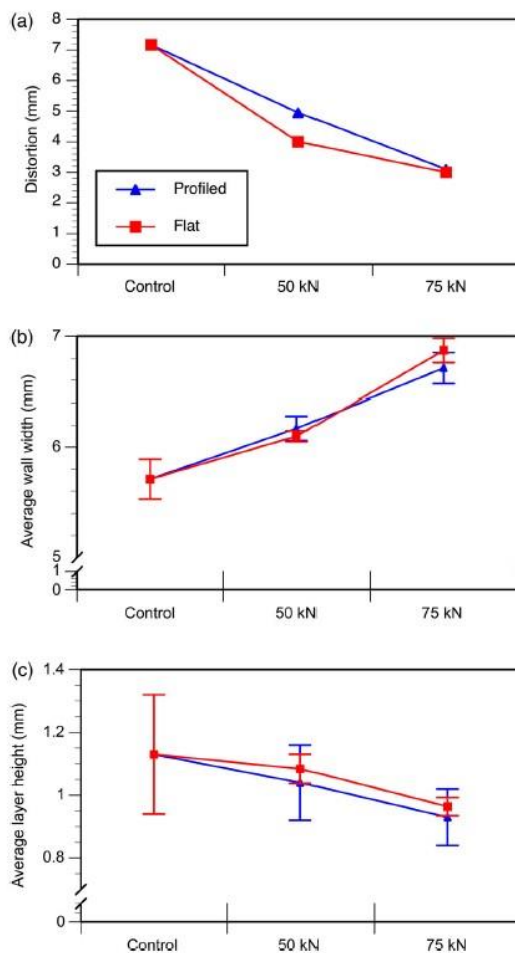
شکل ۱۸. تصاویر قطعات جداره نازک نورد عمودی (الف) نمای جانبی قطعه جداره نازک با نورد (ب) نمای روبروی قطعه جداره نازک با نورد [۲۰]



شکل ۱۹. خطای مطلق ارتفاع ماکزیمم قطعه جداره نازک [۲۰]

۲-۴- اعوجاج و تنش پسماند

ژنگ و همکارانش [۲۰] همانطور که پیش تر اشاره شد مشخص کردند که قطعات ساخته شده توسط روش سوب دهی و نورد به صورت ترکیبی دارای سطوح مسطح و نوسان ابعاد بسیار کوچکتر هستند که یکی از مزایای آن دستیابی به شکل خالص قطعات با ماشین کاری کمتر است. یکی دیگر از مزیت‌های مهم این روش در خصوص فرآیند ریز دانه‌سازی، کاهش تنش پسماند، جلوگیری از ترک داغ و بهبود خواص مکانیکی است. گو و همکارانش [۲۵] نشان دادند که اگرچه خاصیت استحکام آلیاژ پس از عملیات حرارتی قطعا بهبود می‌یابد؛ با این حال مشکل اصلی کنترل اعوجاج است. بنابراین نورد سرد بین پاسی را نیز به فرآیند اعمال کردند، که توانست به طور قابل توجهی حداکثر تنش پسماند را کاهش دهد، بنابراین به کمک این روند میتوان اعوجاج را کاهش داد و یا حتی حذف نمود. مارتینا و همکارانش [۲۶] نشان دادند که نورد فشار بالا که در اصل برای فرآیند جوشکاری می‌باشد، یک روش کشش مکانیکی در محل تولید است که در آن بار با یک غلتک متحرک اعمال می‌شود. اگر بار برای فشرده سازی پلاستیک شدید سطح در جهت نرمال کافی باشد، کشش پلاستیک در جهت غلتش رخ می‌دهد، و در نتیجه تنش‌های پسماند طولی کاهش می‌یابند. همچنین آنها در پژوهشی دیگر [۲۴] نورد فشار بالا را به هر لایه از یک قطعه تولید شده با متریال Ti-6Al-4V به روش WAAM به صورت بین پاسی اعمال کردند. در نمونه‌های نورد شده، اعوجاج خارج از صفحه کمتر از نصف شد (شکل ۲۰). همچنین با استفاده از روش کانتور اندازه‌گیری تنش‌های پسماند نتیجه‌گیری کردند که اگرچه نمونه‌ها هنوز تنش‌های کششی تا حدود ۵۰۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهند، بزرگی آنها ۶۰ درصد کاهش می‌یابد، به ویژه در سطح مشترک بین روش سوب و بستر. بر اساس نتایج به دست آمده از این مقاله نورد بین پاسی در کاهش تنش پسماند طولی موفق بود. نورد منجر به تنش‌های فشاری بالاتر در نزدیکی بالای سطح قطعه شد.

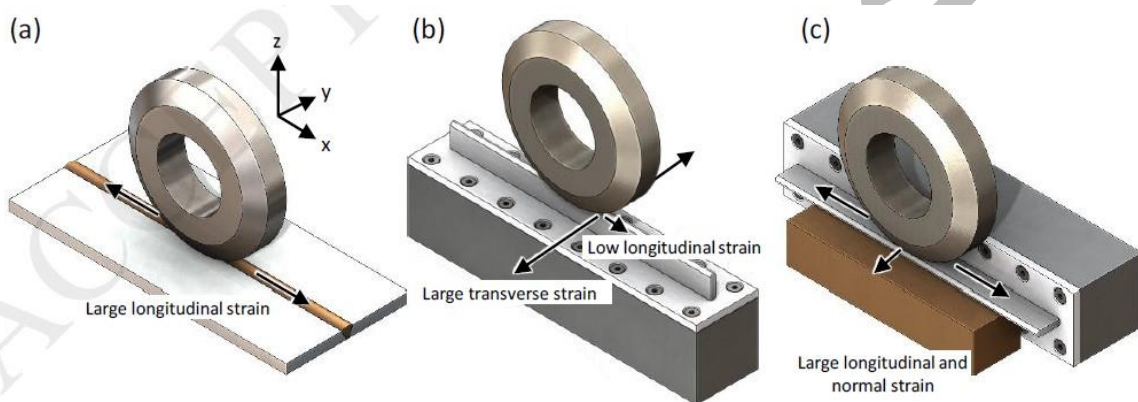


شکل ۲۰. (a) اعوجاج، (b) میانگین عرض دیواره و (c) ارتفاع لایه در برابر بار نورد. توجه داشته باشید که

نوارهای خطا در (b) و (c) نشان دهنده انحراف معیار سه اندازه‌گیری انجام شده هستند [۲۴]

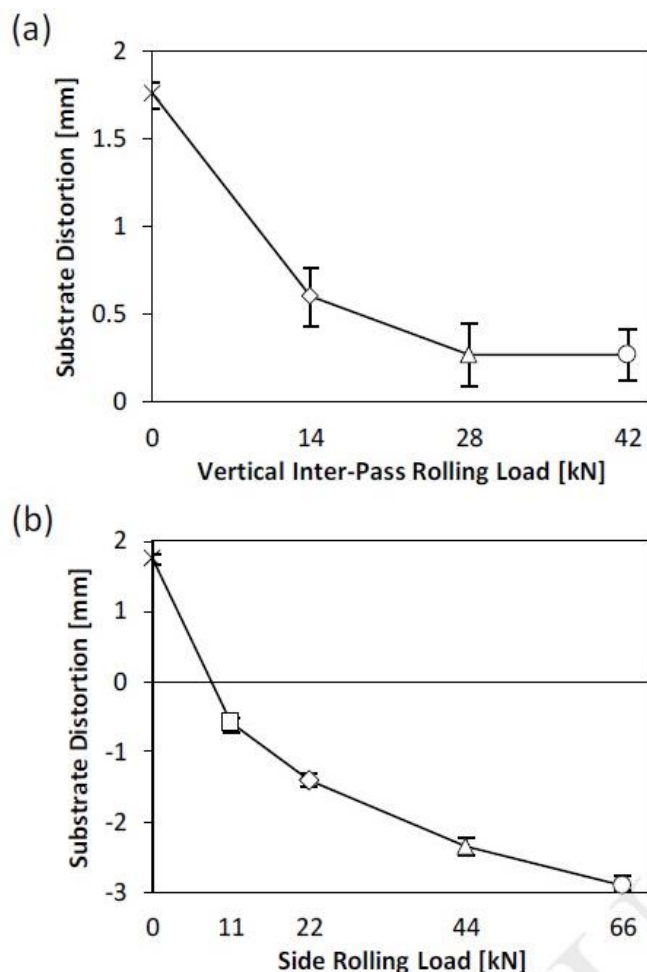
ویلیامز و همکارانش [۳۴] نشان دادند که کرنش ایجاد شده توسط یک پاس نورد منجر به کاهش تنش پسماند می‌شود. همچنین مشخص شد در حالی که نمونه رول نشده ماکزیمم تنش ۶۰۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهد، تنش ماکزیمم قطعات نورد شده در وضعیت اعمال ۵۰ کیلو نیوتن، ۳۰۰ مگاپاسکال است. غلتک شکاف دار، که محدودیت‌های بیشتری را به فرآیند تحمیل می‌کند، منجر به یک کرنش بیشتر در جهت طولی شد و ماکزیمم تنش را به ۲۵۰ مگاپاسکال کاهش داد. متریال مورد تحلیل در این مقاله Ti-6Al-4V و فرآیند مورد استفاده WAAM می‌باشد. وو و همکارانش [۲۷] ثابت کردند که نورد بین پاسی که پس از تکمیل هر لایه رسوب انجام می‌شود، می‌تواند باعث کاهش تنش‌های پسماند و اعوجاج شود. نورد سرد بین پاسی نه تنها تنش پسماند را کاهش می‌دهد، بلکه خواص مواد همگن بیشتری را به همراه دارد. هانیگ و همکارانش [۳۵] اشاره کردند که نورد می‌تواند تنش و اعوجاج باقیمانده را در قطعات آلومینیومی ساخته شده با روش WAAM کنترل کند. نورد در این پژوهش هم به صورت عمودی روی هر لایه رسوبی (بین پاسی) و هم بعد از تکمیل رسوب اعمال شد.

اعوجاج عملا با روش بین پاسی عمودی برخلاف سایر فلزات حذف شد و با نورد جانبی معکوس شد. نورد بین پاسی عمودی اعوجاج را حذف می‌کند، اما منجر به ایجاد یک میدان تنش چند جهته با تنش‌های فشاری به عمق تقریباً ۲ mm زیر سطح و تنش کششی هیدرواستاتیک به عمق ۵-۱۰ mm زیر سطح می‌شود. تمامی حالت‌های نورد انجام شده در این پژوهش را در شکل ۲۱ مشاهده می‌کنید. اعوجاج در قطعات ساخته شده نامتقارن می‌تواند قابل توجه باشد، اما به دلیل استحکام تسلیم پایین در حالت رسوب برای آلیاژ آلومینیوم، عموماً کمتر از سایر فلزات است. نورد عمودی بین پاسی تنش پسماند در قطعات آلومینیوم تولید شده WAAM را اصلاح می‌کند و برخلاف تحقیقات قبلی برای دیواره‌های Ti-6Al-4V و فولاد کم کربن می‌تواند اعوجاج را از بین ببرد (شکل ۲۲). نتایج این پژوهش پس از بررسی اثر نورد بین پاسی عمودی و نورد جانبی پس از رسوب بر روی ۲۳۱۹ دیواره آلومینیومی تولید شده به روش WAAM آورده شده است.



شکل ۲۱. جهت‌های اصلی کرنش به کمک فرآیند نورد سرد: (a) نورد عمودی جوش‌های لب به لب. (b) نورد

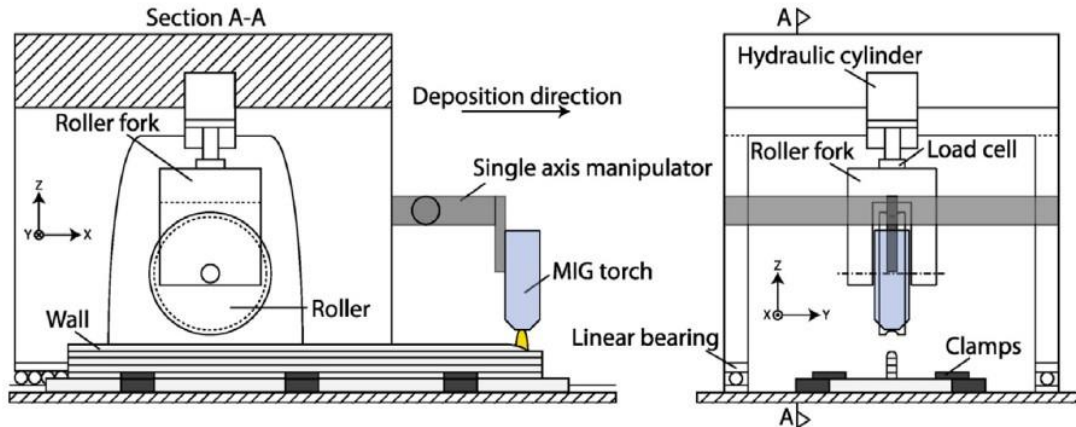
عمودی دیواره WAAM. (c) نورد جانبی دیواره WAAM. [۳۵]



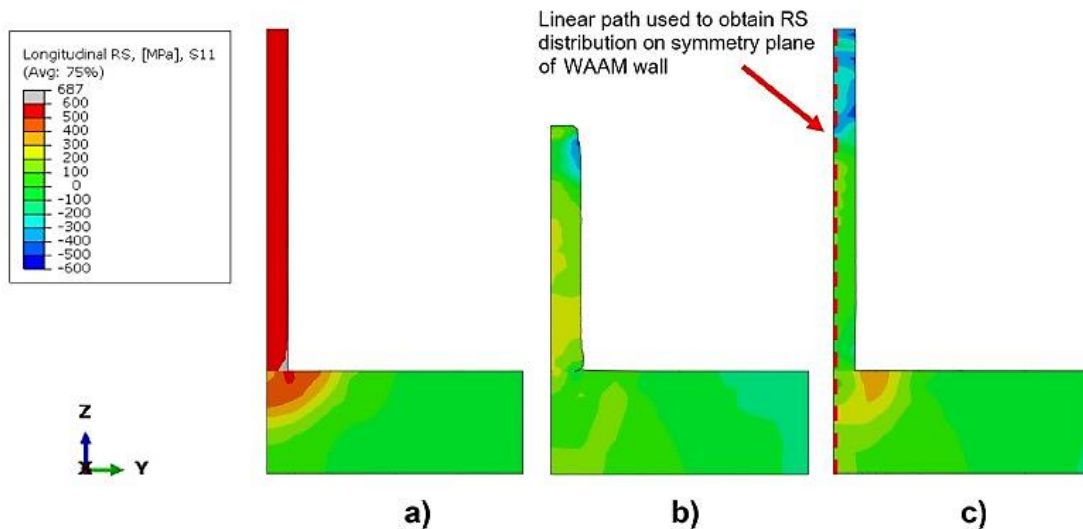
شکل ۲۲. کاهش اعوجاج خارج از صفحه D نمونه کنترل با (a) نورد عمودی بین پاسی و (b) نورد جانبی [۳۵]

گیساریو و همکارانش [۲۸] عنوان کردند که به دلیل گرمای زیاد تولید شده توسط قوس، اجزای تولید شده به کمک روش WAAM در معرض اعوجاج و تنش پسماند هستند. اگر اعوجاج‌ها (هم‌کمانش و هم‌خمش) به طور موثر در طول ساخت مدیریت شوند، می‌توان با استفاده از عملیات حرارتی، تنش پسماند را از بین برد. به طور کلی، در فرآیند کار سرد از طریق نورد فشار بالا می‌توان به کاهش تنش در چنین قطعات بزرگی کمک کرد، اما در هر صورت، به کارگیری یک عملیات حرارتی استاندارد برای این فرآیند ضروری است. آنها همچنین عنوان کردند که مزایای فرآیند نورد سرد بسیار شبیه به نتایج مثبتی است که از طریق فرآیند شات پینینگ به دست می‌آید، به شکلی که کره‌های کوچکی که به سطح برخورد می‌کنند تنش‌های کششی را کاهش می‌دهند و گاهی اوقات تنش‌های فشاری به جای آن ایجاد می‌شوند. از طرف دیگر، نورد می‌تواند تنش فشاری را به طور مداوم ایجاد کند و تغییر شکل پلاستیک شدید کل مقطع جوش را پوشش دهند. می‌توان به کمک آزمایش‌های نورد سرد پرفشار در طول ساخت قطعات بزرگ با استفاده از WAAM نتیجه گرفت که این سیستم می‌تواند تنش‌های پسماند ماکزیمم را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و این اثر را در سطح مقطع مواد رسوب شده گسترش دهد.

اعوجاج حاصل در جهت طولی نیز کاهش می‌یابد. گورنیاکف و همکارانش [۳۶] اشاره کردند که فرآیند ترکیبی WAAM و نورد فشار بالا می‌تواند اجزایی در مقیاس بزرگ با تنش پسماند زیاد و اعوجاج ایجاد کند. در این مقاله یک مدل فرآیند ترکیبی کارآمد برای یک دیواره فولادی مطابق با شکل ۲۳ ارائه شده است تا فرآیند رسوب WAAM و نورد را شبیه‌سازی کند. توزیع تنش پسماند پیش‌بینی شده و ابعاد دیواره به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارند. تغییرات چرخه‌ای کشش طولی تنش پسماند در طول رسوب WAAM و نورد بین لایه‌ای در شرایط ثابت شده رخ می‌دهند. عمق نفوذ رسوب و نورد با تعداد لایه‌های زیرینی که پس از هر چرخه فرآیند تغییر شکل پلاستیکی شدید می‌دهند، مشخص می‌شود. برای نورد بین لایه‌ای با یک غلتک مسطح، نورد عمق نفوذ کمتری نسبت به رسوب دارد. در نتیجه، نورد تنش پسماند کششی WAAM پس از چرخه‌های حرارتی را حذف نمی‌کند، بلکه به بازسازی آنها می‌پردازد. فرآیند نورد با یک غلتک شکاف دار باعث ایجاد کرنش پلاستیکی کششی بیشتری می‌شود و در نتیجه به طور موثرتری تنش پسماند کششی و اعوجاج غیرثابت را کاهش می‌دهد. در مقایسه با نورد بین لایه‌ای، نورد به صورت چهار لایه چهار لایه رسوبات عمق نفوذ بیشتری دارد و از این رو کارایی کاهش تنش پسماند مشابه با نورد بین پاسی را با تعداد نورد کمتر نتیجه می‌دهد (شکل ۲۴)؛ در حالی که نورد پس از ساخت به دلیل نفوذ ناکافی، کارایی پایین‌تری دارد. بنابراین، روش نورد لایه‌های انباشته با رولر شکاف دار برای حالت ترکیبی WAAM و نورد توصیه می‌شود.



شکل ۲۳. طرح تجهیزات آزمایشی و راه‌اندازی برای فرآیند رسوب و نورد WAAM [۳۶]



شکل ۲۴. توزیع تنش پسماند طولی در دیواره رسوب شده WAAM با گیره‌های فعال: (الف) فقط رسوب WAAM، (ب) رسوب WAAM + نورد بین پاسی با استفاده از غلتک تخت، (ج) رسوب WAAM + نورد بین پاسی با استفاده از غلتک شکاف‌دار [۳۶]

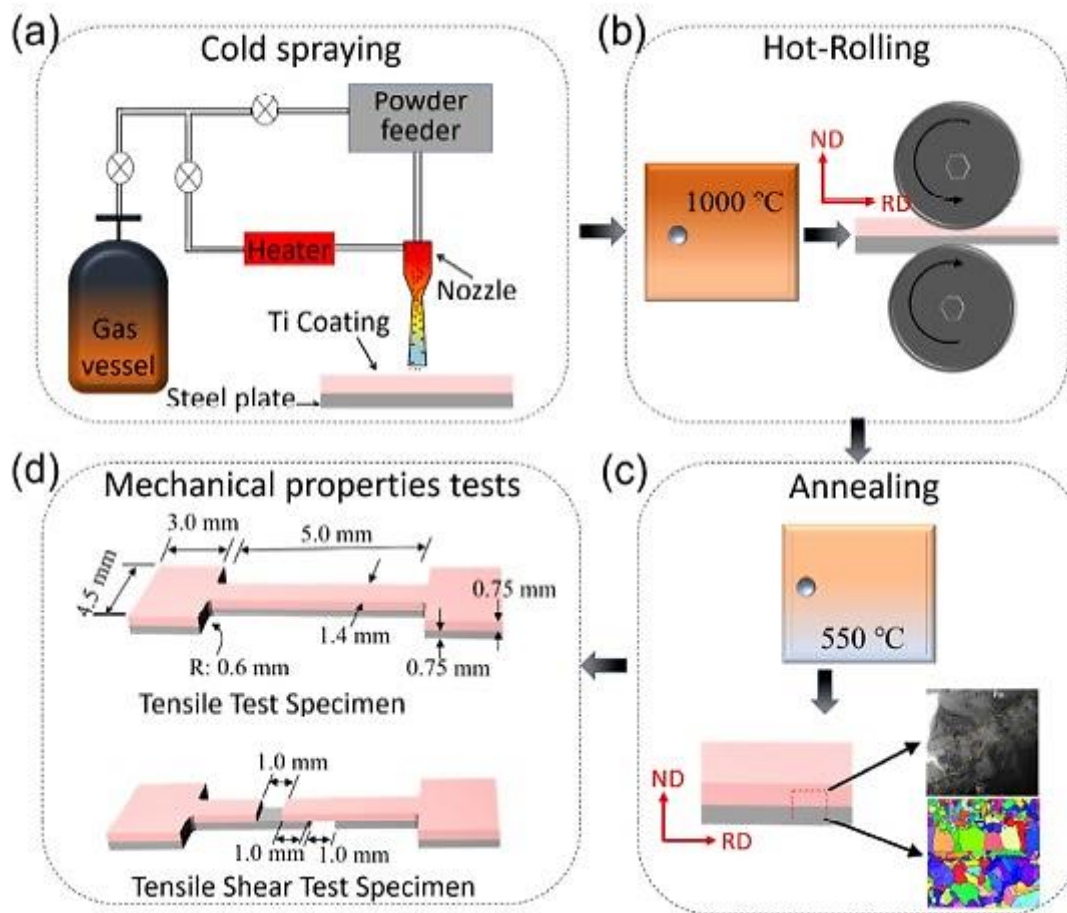
کم [۳۷] در پژوهش خود اشاره می‌کند که نورد بین پاسی فشار بالا تنش پسماند و اعوجاج را در قطعات آلیاژ آلومینیوم تولید شده با روش WAAM کاهش می‌دهد. با این فرآیند، تخلخل ایجاد شده در قطعات آلیاژی تولید شده با WAAM نیز می‌تواند کاهش یافته یا حذف شود و استحکام و شکل پذیری افزایش یابد. این فرآیند نورد سرد همچنین کیفیت سطح محصول را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، نورد سرد بین پاسی نه تنها تنش‌های پسماند و اعوجاج را کاهش می‌دهد، بلکه از طریق تغییر شکل پلاستیک شدید، خواص مواد را همگن‌تر می‌کند، به عبارت دیگر، ناهمسانگردی را از بین می‌برد. با این حال، به دلیل محدودیت هندسی فرآیند نورد، این تکنیک تنها برای قطعات ساده مانند دیواره‌های مستقیم مناسب است.

۲-۵- هندسه ذرات

مارتینا و همکارانش [۲۴] در پژوهش خود نورد فشار بالا را به هر لایه از یک جزء تولید شده Ti-6Al-4V با روش WAAM به صورت بین پاسی اعمال کردند. در نمونه‌های نورد شده، تغییری در هندسه رسوبات به دلیل تغییر شکل پلاستیک مشاهده شد که منجر به افزایش عرض دیواره و کاهش ارتفاع لایه شد. انحراف استاندارد ارتفاع لایه به طور قابل توجهی با نورد کاهش یافت و فرآیند WAAM را آسان‌تر کرد. رودریگوز و همکارانش [۲۱] عنوان کردند که نورد سرد برای کنترل عرض قطعات و در نتیجه بهبود پوشش سطح هندسه نهایی نیز می‌تواند استفاده شود.

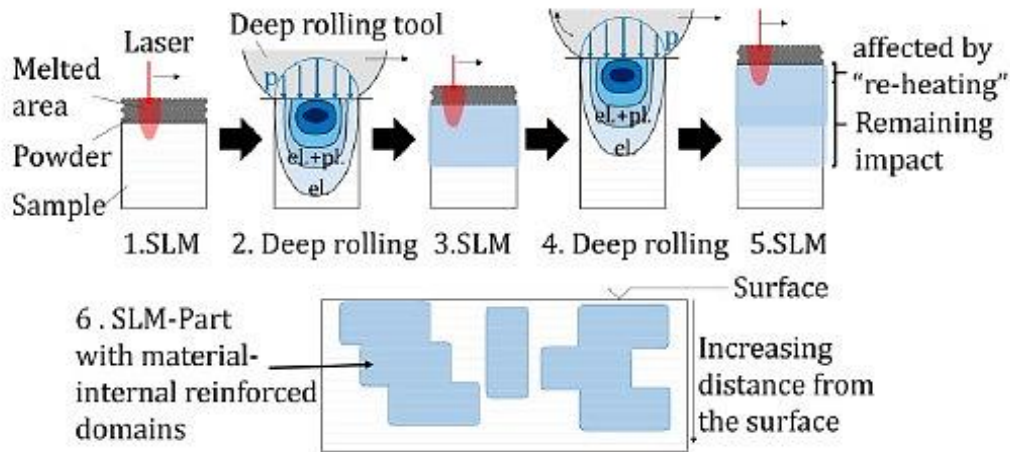
۲-۶- مواد ترکیبی و مفاهیم نوین

ژائو و همکارانش [۳۸] در سال ۲۰۱۹ یک رویکرد نوآورانه برای ساخت صفحات روکش شده تیتانیوم/ فولاد را مورد بررسی قرار دادند. به جای استفاده از ورق‌های Ti، پودر تیتانیوم خالص در ابتدا با استفاده از روش تولید افزودنی اسپری سرد (CSAM) روی صفحات فولادی به صورت رسوب قرار گرفت. سپس صفحات روکش تیتانیوم/ فولاد کاملاً به هم کوپل شده از طریق عملیات نورد گرم و آنیلینگ بدست آمدند. خواص مکانیکی این صفحات در مراحل مختلف تولید با انجام یک سری آزمایش کشش و برش مورد ارزیابی قرار گرفتند. مشخص شد که صفحات روکش تیتانیوم/ فولاد دارای استحکام برشی عالی ۲۸۰ مگاپاسکال، استحکام کششی نهایی ۵۶۴ مگاپاسکال و ازدیاد طول مناسب ۱۸٪ بودند. بررسی ریزساختاری نمونه‌ها با روش‌های SEM، EBSD و TEM انجام شد. مشخص شد که پاشش سرد پیوند خوبی از Ti با صفحه فولادی ایجاد می‌کند و در نتیجه ترک‌خوردگی و اکسیداسیون را در سطح مشترک مهار می‌کند. عملیات نورد گرم منافذ/عیوب پوشش تیتانیوم اسپری شده را ترمیم کرده و منجر به پیوند متالورژیکی بین ذرات Ti و همچنین رابط Ti/ فولاد می‌شود که به طور قابل توجهی استحکام را بهبود می‌بخشد. عملیات نورد منجر به تشکیل ترکیبات جدید (به عنوان مثال FeTi و TiC) در سطح مشترک شد. در نهایت، عملیات بازپخت منجر به بازیابی و تبلور مجدد تیتانیوم و قطعات فولادی سطح مشترک شد که نه تنها چگالی نابجایی / کرنش‌های موضعی را در نمونه آنیل شده کاهش داد، بلکه باعث رشد ترکیبات شکننده (FeTi و TiC) شد که منجر به مقادیر استحکام کششی نهایی ۵۶۴ مگاپاسکال و مقاومت برشی ۲۸۰ مگاپاسکال و ازدیاد طول بالاتر ۱۸٪ شد. طرح شماتیک این فرآیند را در شکل ۲۵ ملاحظه می‌کنید.



شکل ۲۵. نمایش شماتیک (a) پاشش سرد Ti بر روی صفحه فولادی، (b) فرآیند نورد گرم، (c) فرآیند بازپخت، و (d) ابعاد نمونه برای آزمایش‌های کشش و برش [۳۸]

میر و ویلکی [۳۹] در سال ۲۰۱۹ مفهوم جدیدی را برای یکپارچه‌سازی پرداخت مکانیکی سطح در فرآیند ساخت افزودنی ارائه کردند. فرآیند ساخت به صورت لایه لایه با استفاده از روش ذوب لیزری انتخابی (SLM) امکان دسترسی به لایه‌ها قبل از ادامه افزودن لایه‌های بعدی در بالای سطوح پرداخت شده مکانیکی را فراهم می‌کند. از نورد عمیق برای افزایش یکپارچگی سطح تا عمق چندین لایه تا ضخامت ۴۵۰ mm در فرآیند SLM بهره گرفته می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد یکپارچگی مجدد سطح نورد شده در فرآیند SLM باعث ایجاد ناسازگاری نمی‌شود. رویکرد کلی این پژوهش نشان داد یکپارچگی پرداخت مکانیکی سطح در فرآیندهای ساخت افزودنی تنها به روش SLM محدود نمی‌شود. شکل ۲۶ شماتیک فرآیند تولید به روش SLM همراه با نورد عمیق را نشان می‌دهد.



شکل ۲۶. شماتیک فرآیند تولید به روش SLM همراه با نورد عمیق میانی [۳۹]

۳- نتیجه گیری

در مقاله مروری حاضر پژوهش‌های انجام شده در خصوص تاثیر فرآیند نورد بر خواص مکانیکی، ریزساختار، تنش پسماند و رشد ترک در مواد تولید شده به روش ساخت افزایشی بررسی شده و فرآیند مختلف هیبریدی پرینت سه‌بعدی-نورد معرفی و ارزیابی شده است. نتایج این پژوهش بطور خلاصه در ادامه بیان شده است:

- با انجام فرآیند نورد استحکام قطعات پرینت سه‌بعدی شده افزایش می‌یابد. این امر سبب می‌شود استحکام کششی قطعات افزایش یافته و انعطاف‌پذیری آنها کاهش یابد.
- نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که فرآیند نورد می‌تواند در خصوص ریزدانه‌کردن و بهبود ریزساختار مواد تولید شده به روش ساخت افزایشی و تبدیل آن از حالت کاملاً ستونی به هم محور موثر بوده و تا حدودی عیوب ساختاری و تخلخل موجود در ساختار را کاهش دهد.
- روش‌های مختلف نورد به خصوص روش نورد فشار بالا و نورد بین پاسی می‌توانند تنش پسماند و اعوجاج را در مواد تولید شده به روش ساخت افزایشی تا میزان قابل توجهی کاهش دهند.
- در مقایسه با روش‌های ساخت افزایشی معمول، قطعات ساخته شده به صورت ترکیبی از طریق رسوبدهی و نورد دارای کیفیت سطح بهتر، هندسه مسطح‌تر و نوسان ابعادی بسیار کمتری هستند.
- طراحی غلتک‌ها نقش مهمی در روش نورد بین لایه‌ای ایفا می‌کند و هندسه قرارگیری غلتک‌ها باید با توجه به ویژگی‌های قطعه طراحی شود تا بتواند خواص مطلوب مورد نظر را در قطعات پرینت سه‌بعدی شده ایجاد نماید.

- روش هیبریدی ساخت افزایشی-نورد برای ریزدانه کردن، جلوگیری از تشکیل عیوب مانند ترک و بهبود خواص مکانیکی و قطعات موثر و مفید بوده و سبب کاهش اعوجاج و تنش پسماند در قطعات تولیدی به روش پرینت سه بعدی می گردد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز به این پژوهش، در قالب پژوهانه (SCU.EM1402.73332) تشکر و قدردانی می گردد.

مجلس
انتخابات

۴- واژه نامه

انگلیسی	فارسی	انگلیسی	فارسی
Severe Plastic Deformation	تغییر شکل پلاستیک شدید	rolling	نورد
Ultrasonic Impact Peening (UIP)	فرآیند پینینگ اولتراسونیک	additive manufacturing	ساخت افزایشی
Deep Rolling (DP)	نورد عمیق	distortion	اعوجاج
equiaxed	هم محور	residual stress	تنش پسماند
lamellar	لایه‌ای	anisotropy	ناهمسانگردی
aging	پیری	grain refinement	ریزدانه سازی
High Strain Rate Rolling (HSRR)	نورد با نرخ کرنش بالا	elongation	افزایش طول (کشیدگی)
Dynamic Precipitation (DP)	بارش دینامیکی	roller	غلtek
Vacuum Induction Melting (VIM)	ذوب القایی خلاء	recrystallization	تبلور مجدد
dislocation density	چگالی نابجایی	asymmetric rolling	نورد نامتقارن
Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)	تولید افزایشی سیم و قوس	Electron Back-Scatter Diffraction (EBSD)	پراش الکترونی
Electron BackScatter Diffraction (EBSD)	پراش برگشتی الکترون	Grain Orientation Spread (GOS)	گسترش جهت گیری دانه‌ها
ring rolling	نورد حلقه‌ای	texture	الیاف
Friction-Rolling Additive Manufacturing (FRAM)	ساخت افزودنی به روش نورد اصطکاکی	Differential Speed Rolling (DSR)	نورد سریع دیفرانسیلی
Cold Spray Additive Manufacturing (CSAM)	روش تولید افزودنی اسپری سرد	Equal-Channel Angular Pressing (ECAP)	پرس در کانال مساوی زاویه‌دار
Selective Laser Melting (SLM)	ذوب لیزری انتخابی	Accumulative Roll Bonding (ARB)	نورد تجمعی
slotted roller	رولر (غلtek) شکاف دار	shear band	نوار برشی
homogenous	همگن	Improved Asymmetric Rolling (ASR)	نورد نامتقارن بهبود یافته
thin wall	جداره نازک	high-angle boundary	مرز زاویه‌دار
interpass	بین پاسی	X-Ray Diffraction (XRD)	پراش پرتو ایکس
thermal gradient	گرادیان حرارتی	Ultrasonic Surface Rolling Process (USRP)	فرآیند نورد سطحی اولتراسونیک

- [١] Y. Zhi, X. Wang, S. Wang, and X. Liu, "A review on the rolling technology of shape flat products," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. ٩٤, pp. ٤٥١٨-٤٥٠٧, ٢٠١٨ .
- [٢] J. G. Lenard, *Primer on flat rolling*. Newnes, ٢٠١٣.
- [٣] W. Kim, J. Lee, W. Kim, H. Jeong, and H. Jeong, "Microstructure and mechanical properties of Mg–Al–Zn alloy sheets severely deformed by asymmetrical rolling," *Scripta Materialia*, vol. ٥٦, no. ٤, pp. ٣١٢-٣٠٩, ٢٠٠٧ .
- [٤] W. Kim, J. Park, and W. Kim, "Effect of differential speed rolling on microstructure and mechanical properties of an AZ ٩١ magnesium alloy," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. ٤٦٠, no. ٢-١, pp. ٢٩٣-٢٨٩, ٢٠٠٨ .
- [٥] W. Kim, S. Yoo, and J. Lee, "Microstructure and mechanical properties of pure Ti processed by high-ratio differential speed rolling at room temperature," *Scripta Materialia*, vol. ٦٢, no. ٧, pp. ٤٥٤-٤٥١, ٢٠١٠ .
- [٦] J. Jiang, Y. Ding, F. Zuo, and A. Shan, "Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminum by asymmetric rolling," *Scripta Materialia*, vol. ٦٠, no. ١٠, pp. ٩٠٨-٩٠٥, ٢٠٠٩.
- [٧] Z. Li, L. Fu, B. Fu, and A. Shan, "Effects of annealing on microstructure and mechanical properties of nano-grained titanium produced by combination of asymmetric and symmetric rolling," *Materials Science and Engineering: A*, vol. ٥٥٨, pp. ٣١٨-٣٠٩, ٢٠١٢.
- [٨] X. Huang, K. Suzuki, and N. Saito, "Microstructure and mechanical properties of AZ ٨٠ magnesium alloy sheet processed by differential speed rolling," *Materials Science and Engineering: A*, vol. ٥٠٨, no. ٢-١, pp. ٢٣٣-٢٢٦, ٢٠٠٩.
- [٩] M. John *et al.*, "Ultrasonic surface rolling process: Properties, characterization, and applications," *Applied Sciences*, vol. ١١, no. ٢٢, p. ١٠٩٨٦, ٢٠٢١.
- [١٠] N. Stepanov, A. Kuznetsov, G. Salishchev, G. Raab, and R. Valiev, "Effect of cold rolling on microstructure and mechanical properties of copper subjected to ECAP with various numbers of passes," *Materials Science and Engineering: A*, vol. ٥٥٤, pp. ١١٥-١٠٥, ٢٠١٢.
- [١١] S. Kheiri, H. Mirzadeh ,and M. Naghizadeh, "Tailoring the microstructure and mechanical properties of AISI ٣١٦L austenitic stainless steel via cold rolling and reversion annealing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. ٧٥٩, pp. ٩٦-٩٠, ٢٠١٩.
- [١٢] R. Ran *et al.*, "Microstructure, precipitates and mechanical properties of Inconel ٧١٨ alloy produced by two-stage cold rolling method," *Materials Science and Engineering: A*, vol. ٧٩٣, p. ١٣٩٨٦٠, ٢٠٢٠.

- [13] C. Chen, J. Chen, H. Yan, B. Su, M. Song, and S. Zhu, "Dynamic precipitation, microstructure and mechanical properties of Mg-0Zn-1Mn alloy sheets prepared by high strain-rate rolling," *Materials & Design*, vol. 100, pp. 66-88, 2016.
- [14] L. He, Y. Liu, J. Li, and B. Li, "Effects of hot rolling and titanium content on the microstructure and mechanical properties of high boron Fe-B alloys," *Materials & Design* (2010-1980), vol. 36, pp. 93-88, 2012.
- [15] W. Bo, X.-h. Chen, F.-s. Pan, J.-j. Mao, and F. Yong, "Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 20, no. 8, pp. 2489-2481, 2010.
- [16] A. Hedayati, A. Najafizadeh, A. Kermanpur, and F. Forouzan, "The effect of cold rolling regime on microstructure and mechanical properties of AISI 304L stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 8, pp. 1022-1017, 2010.
- [17] S. K. Panigrahi and R. Jayaganthan, "Effect of rolling temperature on microstructure and mechanical properties of 6063Al alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 492, no. 2-1, pp. 300-300, 2008.
- [18] M. Jahazi and B. Egbali, "The influence of hot rolling parameters on the microstructure and mechanical properties of an ultra-high strength steel," *Journal of materials processing technology*, vol. 103, no. 2, pp. 279-276, 2000.
- [19] L. Van Long, D. Van Hien, N. T. Thanh, N. C. Tho, and V. T. Do, "Impact of Cold- Rolling and Heat Treatment on Mechanical Properties of Dual- Phase Treated Low Carbon Steel," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, no. 1, p. 1674837, 2020.
- [20] H. Zhang, D. Ruia, Y. Xiea, and G. Wangb, "Study on Metamorphic Rolling Mechanism for Metal Hybrid Additive Manufacturing".
- [21] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. Miranda, T. G. Santos, and J. Oliveira, "Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)," *Materials*, vol. 12, no. 9, p. 1121, 2019.
- [22] D. Michl, B. Sydow, and M. Bambach, "Ring rolling of pre-forms made by wire-arc additive manufacturing," *Procedia Manufacturing*, vol. 47, pp. -342 348, 2020.
- [23] R. Xie, Y. Shi, R. Hou, H. Liu, and S. Chen, "Efficient depositing aluminum alloy using thick strips through severe deformation-based friction rolling additive manufacturing: processing, microstructure, and mechanical properties," *Journal of Materials Research and Technology*, 2023.

- [24] F. Martina *et al.*, "Residual stress of as-deposited and rolled wire+ arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components," *Materials Science and Technology*, vol. 32, no. 1, pp. 144-149, 2016.
- [25] J. Gu, B. Cong, J. Ding, S. W. Williams, and Y. Zhai, "WIRE+ ARC ADDITIVE MANUFACTURING OF ALUMINIUM".
- [26] F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, and J. Meyer, "Microstructure of interpass rolled wire+ arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 46, no. 12, pp. 6118-6123, 2015.
- [27] B. Wu *et al.*, "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 30, pp. 139-147, 2018.
- [28] A. Gisario, M. Kazarian, F. Martina, and M. Mehrpouya, "Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 53, pp. 149-154, 2019.
- [29] X. Qiu *et al.*, "In-situ Si₃N₄/Al₂O₃ alloy nano/micro composite formation through cold spray additive manufacturing and subsequent hot rolling treatment: microstructure and mechanical properties," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 780, pp. 66-69, 2019.
- [30] E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, and M. Guagliano, "Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities," *Additive Manufacturing*, vol. 37, p. 101619, 2021.
- [31] G. Marinelli, F. Martina, S. Ganguly, and S. Williams, "Grain refinement in an unalloyed tantalum structure by combining Wire+ Arc additive manufacturing and vertical cold rolling," *Additive Manufacturing*, vol. 32, p. 101009, 2020.
- [32] A. V. Nemani, M. Ghaffari, and A. Nasiri, "Comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of shipbuilding steel plates fabricated by conventional rolling versus wire arc additive manufacturing," *Additive Manufacturing*, vol. 32, p. 101086, 2020.
- [33] Y. Gao *et al.*, "Towards superior fatigue crack growth resistance of TC4-DT alloy by in-situ rolled wire-arc additive manufacturing," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 10, pp. 1407-1410, 2021.
- [34] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire+ arc additive manufacturing," *Materials science and technology*, vol. 32, no. 7, pp. 647-651, 2016.
- [35] J. Hönnige, P. A. Colegrove, S. Ganguly, E. Eimer, S. Kabra, and S. Williams, "Control of residual stress and distortion in aluminium wire+ arc additive manufacture with rolling," *Additive Manufacturing*, vol. 22, pp. 783-790, 2018.

- [۳۶] V. Gornyakov, Y. Sun, J. Ding, and S. Williams, "Modelling and optimising hybrid process of wire arc additive manufacturing and high-pressure rolling," *Materials & Design*, vol. ۲۲۳, p. ۱۱۱۱۲۱, ۲۰۲۲.
- [۳۷] G. Çam, "Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM)," ۲۰۲۲.
- [۳۸] Z. Zhao *et al.*, "Microstructural evolutions and mechanical characteristics of Ti/steel clad plates fabricated through cold spray additive manufacturing followed by hot-rolling and annealing," *Materials & design*, vol. ۱۸۵, p. ۱۰۸۲۴۹, ۲۰۲۰.
- [۳۹] D. Meyer and N. Wielki, "Internal reinforced domains by intermediate deep rolling in additive manufacturing," *CIRP Annals*, vol. ۶۸, no. ۱, pp. ۵۸۲-۵۷۹, ۲۰۱۹.