

مواد گرادیدانی تابعی ساخته شده توسط ساخت افزایشی: نگرشی کوتاه بر کاربرد مواد گرادیدانی در توربین

چکیده: مواد گرادیدانی تابعی (FGM)، گروهی از مواد مهندسی شده هستند که به صورت پیوسته و ناپیوسته در دو حالت فیلم نازک و بالک، طراحی و ساخته می شوند. با گسترش و دسترسی آسان تر روش های پیشرفته، دقیق تر و کنترلی ساخت قطعات مانند ساخت افزایشی، پتانسیل استفاده از این مواد نیز افزایش یافته است. در این گزارش، با مروری بر تعاریف اولیه و روش های متداول ساخت مواد گرادیدانی، به بررسی امکان ساخت این مواد با استفاده از ساخت افزایشی پرداخته شده و با بررسی مطالعات انجام گرفته، ویژگی های هر روش ذکر گردیده است. در انتها، با در نظر گرفتن میزان اهمیت استفاده از این دسته از مواد در کاربردهای حساسی مانند صنعت توربین، دو نمونه از مطالعات موردی استفاده از این مواد براساس روش ساخت افزایشی در سیستم دوار (توربین گاز)، ارائه و معرفی شده است. در این مطالعات، هم از حالت فیلم نازک در قالب پوشش گرادیدانی و هم به صورت بالک و یکپارچه جهت ساخت قطعه مورد استفاده در توربین گاز، استفاده گردیده است.

واژه های راهنما: مواد گرادیدانی تابعی، مواد مهندسی شده، ساخت افزایشی، توربین گاز، فیلم نازک، بالک

مریم اکبری*

کارشناس ارشد
واحد متالورژی و مواد

کوروش نعمتی پور

کارشناس ارشد
واحد متالورژی و مواد

علی ربواز

مدیر واحد مدیریت پروژه،
شرکت تأمین کالای
توربین ماشین خاورمیانه،
تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

Maryam Akbari*
Material expert

Kourosh

Nematipour*
Senior Material expert

Ali Rivaz

Project manager,
Turbine Machine m. e.
Part Supplier Co., Tehran

A review on the application of additive manufacturing FGMs in turbines

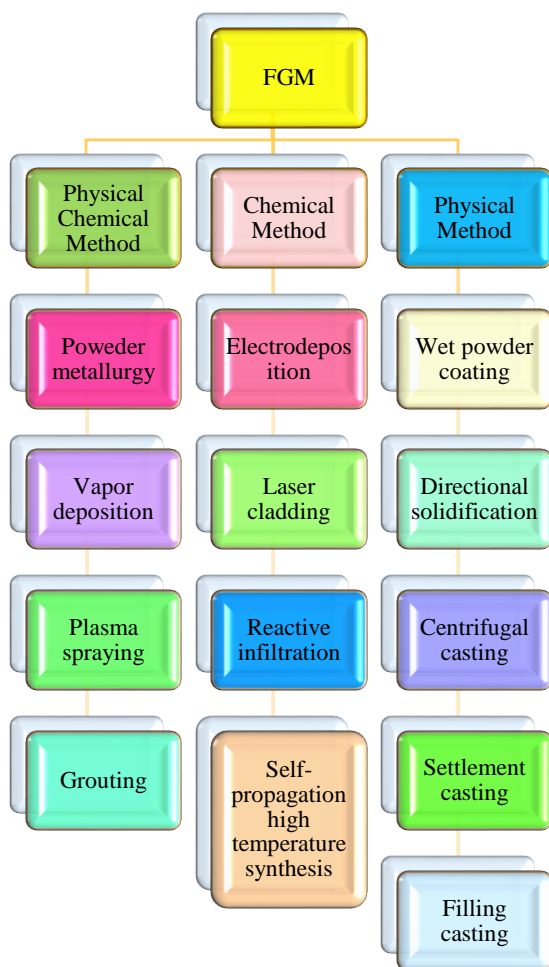
Abstract: Functionally graded materials (FGM) are a group of engineered materials that are designed and manufactured continuously and discontinuously in two forms, thin film and bulk. With the expansion and easier access of advanced, more precise and controlled methods of manufacturing parts such as additive manufacturing, the potential of using these materials has also increased. In this report, with an overview of the basic definitions and common methods of gradient materials manufacturing, the possibility of produce these materials using additive manufacturing has been investigated, and the characteristics of each method have been mentioned by reviewing the studies conducted. In the end, considering the importance of using this category of materials in sensitive applications such as the turbine industry, two examples of case studies of the use of these materials based on the additive manufacturing method in the rotary system (gas turbine) have been introduced. In these studies, both the thin film in the form of gradient coating and the bulk and integrated form have been used to make the part used in the gas turbine.

Keywords: Functionally Graded Materials, Engineered materials, Additive manufacturing, Gas turbine, Thick films, Bulk

۱- مقدمه

اتمی ذرات سازنده ماده گرادیانی است. دسته بندی بر اساس روش‌های ساخت، شامل روش فیزیکی، شیمیایی و فیزیکی-شیمیایی [۱۶]، که در آن فاکتورهای گرادیانی، کنترل‌کننده فرآیند هستند. در شکل (۱)، روش‌های آماده سازی و ساخت مواد گرادیانی، ارائه گردیده است.

ذکر این نکته ضروری است که یکی از نوین ترین روش‌های ساخت مواد گرادیانی، همانند ساخت قطعات یکنواخت، ساخت افزایشی است [۱۷] که در این گزارش، به مروری بر روش‌های ساخت FGM با استفاده از این روش و علی‌الخصوص جهت ساخت قطعات مورد استفاده در توربین گازی، پرداخته خواهد شد.



شکل ۱ برخی از روش‌های ساخت FGM [۱۶]

۳- ساخت FGM با استفاده از ساخت افزایشی

علاوه بر روش‌های بیان شده در قسمت قبل، ساخت افزایشی به‌عنوان یکی از نوظهورترین، کنترل‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها برای ساخت مواد گرادیانی مطرح می‌گردد. براساس گزارشی از کمیته ASTM F42، ساخت افزایشی، فرآیندی جهت ساخت

FGMها را می‌توان مواد مهندسی شده پیشرفته نامید. در این مواد، دو یا چند ماده مختلف حضور داشته و فاکتورهای همچون چگالی، ریزساختار و ترکیب شیمیایی، در یک یا چند جهت هندسی در قطعه، تغییر می‌کند [۱]، [۲].

FGM، بهینه شده ترکیب دو یا چند ماده با هدف بهبود خواص متالورژیکی است که کامپوزیت نامیده می‌شود [۳]. دسته‌بندی این مواد، براساس پارامترهای گوناگون بوده که متداول‌ترین آن‌ها عبارتند از: حالت ماده حین تولید [۴]، ساختار FGM [۵]، فاکتور گرادیانی [۶] و ابعاد و اندازه [۷].

در بحث مواد گرادیانی، ساختارهای پیوسته و ناپیوسته مطرح است [۸]، [۹]. در زمینه‌های مختلفی، از این مواد استفاده شده است که عبارتند از: ۱- حوزه فضایی: براساس مقاومت، شوک خستگی حرارتی و خوردگی بالا، در سطوحی که نیاز به مقاومت حرارتی است [۱۰]؛ ۲- حوزه انرژی هسته‌ای: قطعه باید دارای استحکام بالا، مقاومت حرارتی و خوردگی خوب باشد [۱۱]؛ ۳- کاربردهای بیولوژیکی: استحکام ویژه بالا، مدول الاستیک ویژه بالا، مقاومت در برابر سایش و زیست سازگاری [۱۲]، ۴- حوزه الکترومغناطیس و نور [۱۳]، [۱۴] و ۵- حوزه انرژی: یکی از کاربردهای این مواد، که مورد بحث در این گزارش است؛ در این حوزه بوده و با تمرکز بر سیستم‌های تولید انرژی مانند توربین، خواصی همچون استحکام و مقاومت حرارتی بالا مورد نیاز است [۱۵].

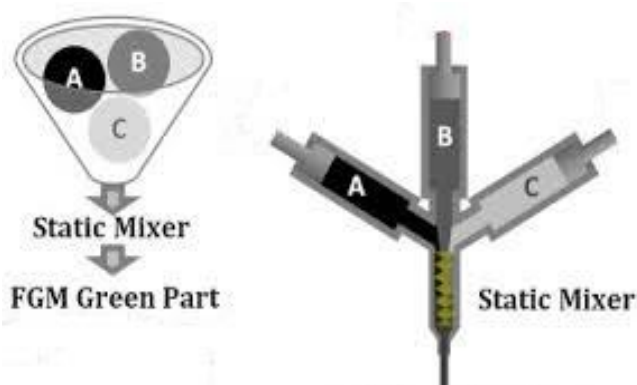
ذکر این نکته ضروری است که با توجه به نوین بودن روش تولید و همچنین حساسیت بالا و نیاز به خواص خاص (به‌عنوان مثال، شرایط عمل‌کردی دمای بالا) قطعات مورد استفاده در توربین و همچنین، خاص بودن این نوع از کامپوزیت‌ها (مواد تابعی گرادیانی)، تعداد مقالات و پژوهش‌های صورت گرفته با تمرکز بر قطعات توربینی بسیار محدود بوده که در این گزارش، سعی گردیده است بر اساس هدف نویسندگان مقاله، فاکتور اصلی مورد بررسی جهت تغییر و بهبود با استفاده از این مواد/روش، ارائه گردد.

۲- روش‌های ساخت مواد گرادیانی

از جنبه‌های مختلفی به ساخت مواد گرادیانی نگاه شده است که دو مورد متداول آن، براساس حالت فیزیکی مواد تشکیل دهنده و یا بر اساس روش‌های به‌کار رفته است. ماهیت اصلی و نتیجه هر یک از این روش‌ها بر اساس هر دسته بندی، اتصال در مقیاس

سه بعدی اشیا از یک ورودی مدل سه بعدی و با استفاده از اضافه کردن لایه‌های مواد، تعریف می‌شود و متفاوت با روش‌هایی که با حذف ماده همراه هستند؛ می‌باشد [۱۸]. این تعریف منطبق با استانداردهای ارائه شده در زمینه ساخت افزایشی همچون ISO/ASTM52900-21 است.

به عنوان ابتدایی‌ترین مزیت و جذابیت این روش، می‌توان به لایه لایه‌ای بودن افزودن مواد اشاره نمود [۱۹] که سبب ایجاد توانایی در ساخت قطعات با هندسه بسیار پیچیده با دقت قابل قبول می‌گردد که با استفاده از روش‌های ساخت مرسوم و متداول، بسیار سخت خواهد بود [۲۰]. تلفیقی از ریزساختار گرادینانی غیرهمگن و بهینه‌سازی خواص مکانیکی، در هنگام استفاده از این روش در ساخت مواد گرادینانی، امکان‌پذیر است [۲۱].



شکل ۲ شماتیکی از فرآیند FEF [۲۶]

در یکی از جدیدترین پژوهش‌ها، فرآیند پرینت فیلامنت فلزی، علی‌رغم تصور همگانی که FDM، مناسب پرینت مواد پلیمری است؛ موسی پور و همکاران [۲۸]، نمونه فلزی را با استفاده از فرآیند FDM و به‌طور همزمان با استفاده از دو فیلامنت، پرینت نموده‌اند که نگارنده مقاله، در حال ساخت نمونه فیلامنت فلزی جهت استفاده در پرینترهای FDM است که به روش FFF^۸ شناخته می‌شود و یکی از ارزان‌ترین، نوین‌ترین و در دسترس‌ترین روش‌های ساخت مواد گرادینانی است.

ب) نفوذ بستر پودر: در این روش، به‌طور ساده یک قیف جهت تأمین پودر و یک غلتک جهت صاف کردن پودر روی سطح وجود دارد. یک لایه پودر ریخته شده؛ با غلتک پهن شده؛ توسط یک پرتو با منشأهایی همچون الکترونی و لیزری، براساس مدل ورودی دو بعدی، پودر اسکن شده و سپس یک لایه پایین آمده و مجدداً پودر روی لایه قبل، تزریق می‌شود [۲۹]. در شکل (۳)، شماتیکی از سیستم نفوذ بستر پودر نشان داده شده است.

فرآیندهایی همچون SLS^۹، جهت ساخت گرادینان ترکیب شیمیایی و تخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرند. در پژوهشی، Zhang و همکاران [۳۰]، از SLS به‌عنوان روشی جهت ساخت ترکیب گرادینانی فلز/سرامیک استفاده نموده‌اند. در پژوهشی دیگر [۳۱]، از این روش، جهت ساخت ایمپلنت پایه تیتانیومی برای

هندسه کلی قطعات گرادینانی، به دو دسته اصلی فیلم نازک و بالک تقسیم می‌شود. زمانی که هدف، ساخت فیلم و یا لایه نازک باشد؛ به علت کاهش زمان ساخت، دارای مزایای بیشتری جهت ساخت با این روش نسبت به بالک هستند [۲۲]. روش‌های متداول جهت ایجاد لایه نازک گرادینانی، لایه نشانی با بخار به-روش‌های فیزیکی و شیمیایی و برای ساخت بالک، روش متداول، متالورژی پودر می‌باشد [۲۳]. مواد گرادینانی ممکن است تک جزئی و از یک ترکیب شیمیایی ساخته شده و یا از دو و یا چند ترکیب شیمیایی و جزء تشکیل شده باشند که روش ساخت افزایشی متداول برای تولید این دو گروه، تفاوتی با یکدیگر نداشته و می‌توان به روش‌هایی بر پایه لایه نشانی توسط انرژی جهت‌دار^۱ همچون LENS^۲ و LMD^۳ و روش‌های بر پایه نفوذ پودر مانند SLM^۴ و EBM^۵ اشاره نمود [۲۱]، [۲۴]، [۲۵].

در این تحقیق، چهار روش در دسترس ساخت افزایشی شامل اکستروژن، نفوذ بستر پودری، لایه نشانی توسط انرژی جهت‌دار و لمینیت ورق، جهت ساخت مواد گرادینانی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف) اکستروژن: در دو روش FEF^۶ و FDM^۷ بر پایه استفاده از فیلامنت جهت ساخت مواد گرادینانی با استفاده از پرینتر سه بعدی، از اکستروژن جهت ساخت ورودی مترالی به پرینتر استفاده می‌شود. در دو پژوهش [۲۶]، [۲۷]، از روش FEF جهت ساخت مواد گرادینانی استفاده شده است. این روش جهت ساخت مواد گرادینانی فلزی و سرامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و از

⁶ Freeze-form extrusion fabrication

⁷ Fused deposition modeling

⁸ Fused filament fabrication

⁹ Selective laser sintering

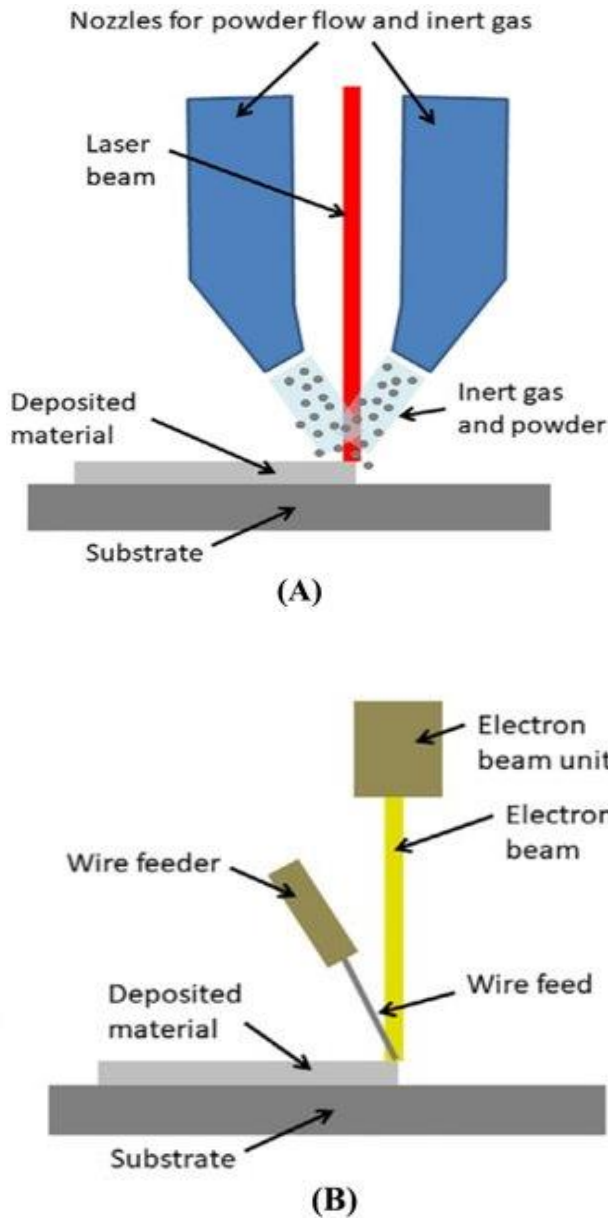
¹ Directed energy deposition

² Laser engineered net shaping

³ Laser metal deposition

⁴ Selective laser melting

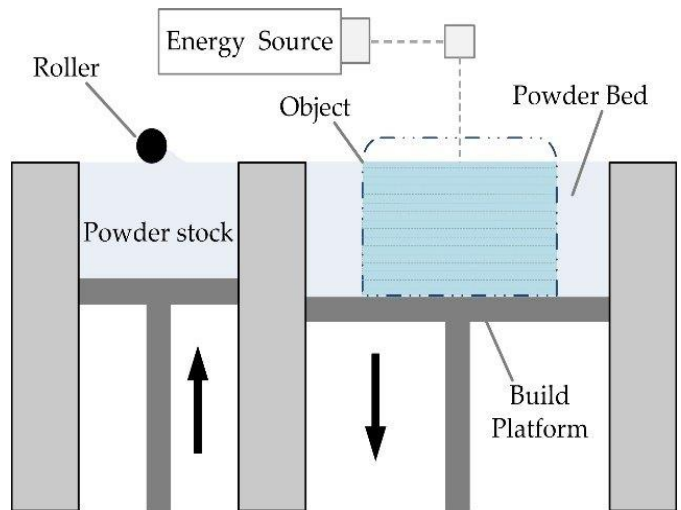
⁵ Electron beam melting



شکل ۴ شماتیکی از فرآیند DED؛ ورودی: A: پودر و B: فیلامنت [۳۹]

در شکل (۵)، نمونه‌ای از ریزساختار حاصل از فرآیند، نشان داده شده است. هدف از بررسی ریزساختار، ذکر نمونه‌ای از مواد گرادانیی تابعی است که دو فصل مشترک مجزا با تغییر موقعیت لایه رسوب نشانی شده، تشکیل می‌گردد. زمانی که اینکونل ۷۱۸ روی فولاد زنگ‌نزن 316L لایه نشانی شده است؛ فصل مشترک نسبتاً هموار و یا گاهی تیز تشکیل می‌شود. در صورتی که فولاد زنگ‌نزن روی سوپرآلیاژ لایه نشانی شده باشد؛ ریزساختاری به صورت باندهای حوضچه‌ای ایجاد می‌شود (بخش C) که نشان دهنده نفوذ عمیق‌تر فولاد زنگ‌نزن به داخل ساختار سوپرآلیاژ است (جهت بررسی دقیق‌تر و جزئی‌تر میزان نفوذ و تأثیر آن روی ترکیب شیمیایی، به اصل مقاله رجوع گردد).

ساخت ایمپلنت بهره برده شد. در کنار SLS، فرآیندهایی همچون EBM و SLM نیز با استفاده از این روش، جهت ساخت مواد گرادانیی، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۲]، [۳۳]، [۳۴]، [۳۵].



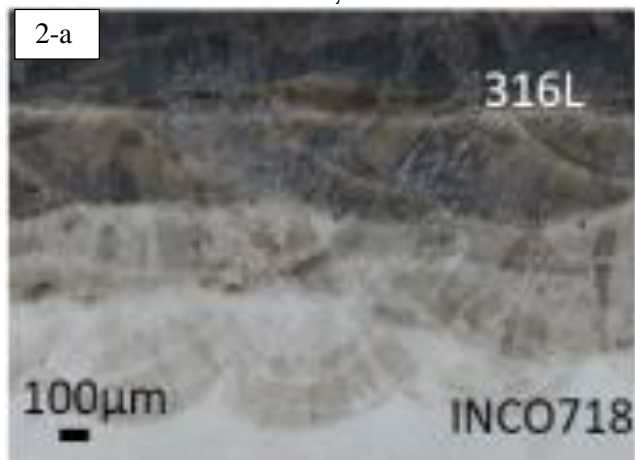
شکل ۳ شماتیکی از فرآیند نفوذ بستر پودر [۲۹]

پ) لایه نشانی توسط انرژی جهت‌دار: در این روش، با استفاده از یک منبع انرژی قابل کنترل از لحاظ جهت مانند لیزر، پرتو الکترونی و یا پلاسما، روی زیرلایه و قطعه پایه، حوضچه مذاب تشکیل شده؛ پودر و یا فیلامنت به صورت عمودی به حوضچه مذاب نزدیک شده و سبب ایجاد اتصال و پیوند بین اجزای سازنده زیرلایه و پودر/ فیلامنت می‌گردد [۳۶]. در شکل (۴)، شماتیکی از این فرآیند، براساس مواد تزریقی به صورت پودری/ فیلامنتی نشان داده شده است.

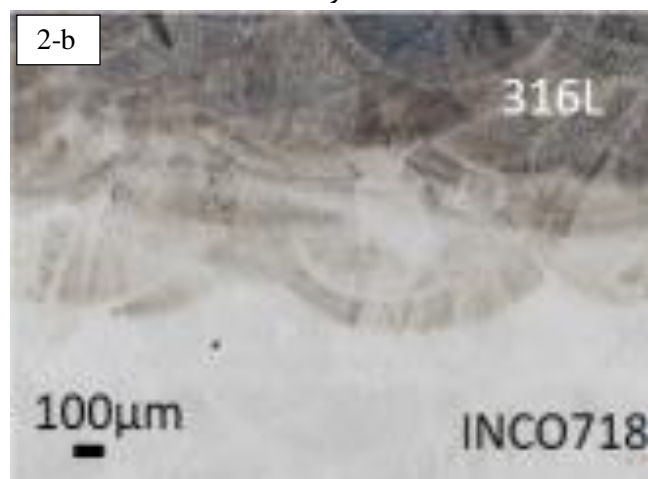
یکی از ترکیبات گرادانیی ساخته شده با استفاده از این روش، کامپوزیت AISI 316L/Inconel 718 است [۳۷]، [۳۸]. اینکونل ۷۱۸، دارای خواص عالی در دما و فشار بالا است که یکی از آن‌ها، مقاومت به خوردگی بالای این ماده در دمای بالا است. در این سوپر آلیاژ، نیوبیوم در کنار مولیبدن، به استحکام بخشی آلیاژ کمک نموده و استحکام بالایی را بدون عملیات حرارتی، در دسترس قرار می‌دهد. اینکونل ۷۱۸، در ساخت قطعاتی که در شرایط عمل کردی فشار و دمای بالا مانند Heat exchanger ها، توربین‌های گازی و ولوها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. جوش پذیری این سوپر آلیاژ پایین بوده و یکی از بهترین مواد که دارای خواص خوردگی مناسب و جوش‌پذیری بهتر از این ترکیب باشد؛ فولاد زنگ‌نزن 316L است که دلیل انتخاب ماده تقویت‌کننده و عامل دیگر گرادیان ساز در این تحقیقات جهت استفاده در قطعات با دمای کاری بالا بوده است [۳۷].

فصل مشترک فولاد زنگ‌نزن 316L و اینکونل ۷۱۸

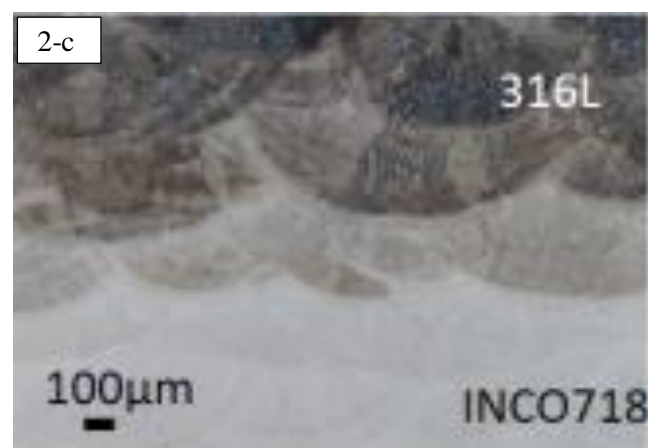
۳۵۰ وات



۴۵۰ وات



۵۰۰ وات

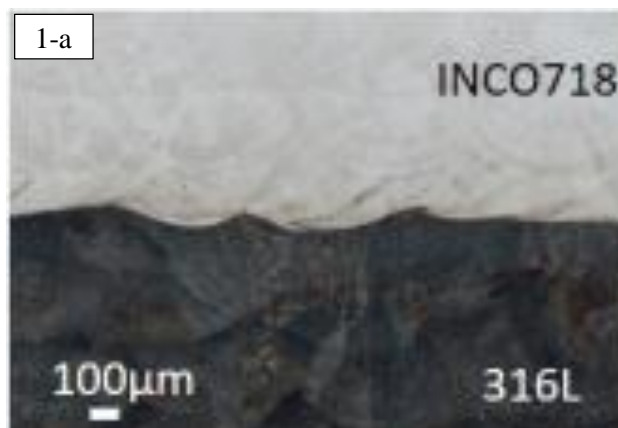


شکل ۵ ریزساختار نفوذ پودر 316L و اینکونل ۷۱۸ روی یکدیگر:
 حالت یک: فصل مشترک اینکونل ۷۱۸ و فولاد زنگ‌نزن 316L -
 حالت دو: فصل مشترک فولاد زنگ‌نزن 316L و اینکونل ۷۱۸ -
 توان‌های ساخت: ۳۵۰ (تصویر a)، ۴۵۰ (تصویر b) و ۵۰۰ وات
 (تصویر c) [۳۷]

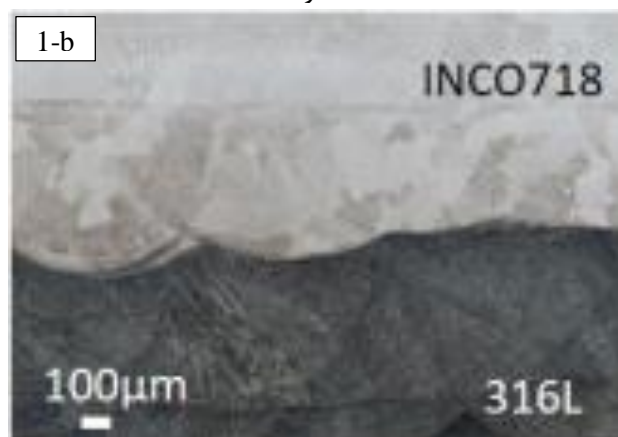
علت ایجاد این ریزساختار، به بالاتر بودن میزان هدایت حرارتی فولاد زنگ‌نزن نسبت به سوپرآلیاژ برمی‌گردد. وقتی 316L مذاب روی اینکونل ۷۱۸ رسوب می‌کند، به دلیل رسانایی حرارتی پایین‌تر برای اینکونل ۷۱۸، جذب انرژی و اتلاف گرما از ناحیه ذوب مجدد برای اینکونل ۷۱۸ کمتر است و به این معنی است که ناحیه ذوب مجدد اینکونل ۷۱۸ هنگام عمل به‌عنوان یک بستر بزرگتر است و بنابراین نسبت به حالت مقابل، ناحیه تحت تأثیر گرما بزرگتری وجود دارد [۳۷].

فصل مشترک اینکونل ۷۱۸ و فولاد زنگ‌نزن 316L

۳۵۰ وات



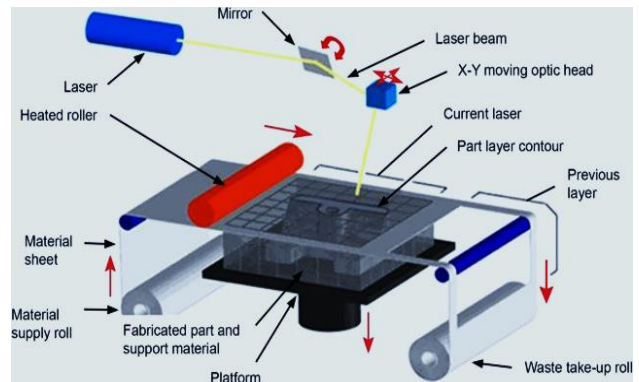
۴۵۰ وات



۵۰۰ وات



ت) لمینیت ورق: این روش، یکی از فرآیندهای حالت جامد ساخت افزایشی است که در آن ورق‌های مختلف و یا تک جنس، در هر مرحله، روی همدیگر قرار داده شده و با استفاده از غلتک حرارتی، چسبندگی اولیه ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از یک منبع انرژی مانند پرتو لیزر، براساس مدل دو بعدی ورودی به پرینتر، اسکن حرارتی انجام شده و مراحل مجدداً تکرار می‌شود و در انتها، نمونه برش می‌خورد [۴۰]. شکل (۶)، شماتیکی از این فرآیند است.

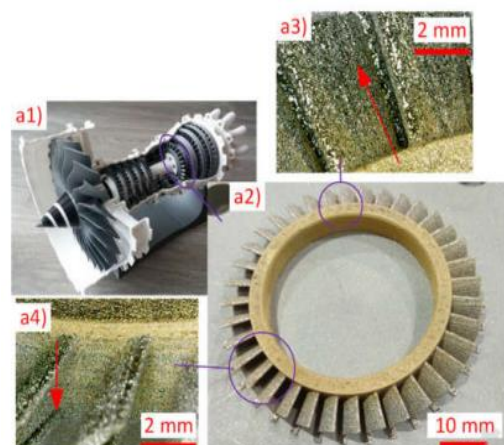


شکل ۶ شماتیکی از فرآیند لمینیت ورق [۴۰]

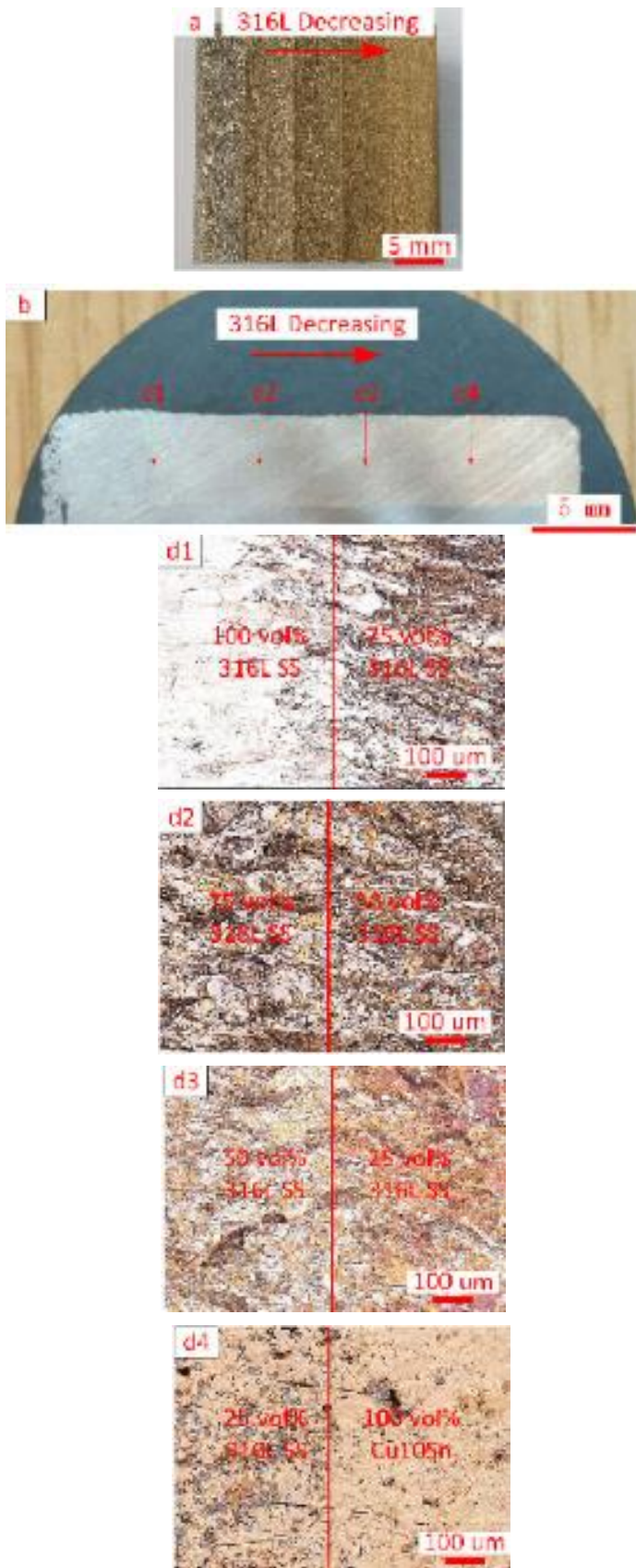
از این روش جهت ساخت کامپوزیت‌هایی همچون تیتانیوم کاربید- نیکل [۴۱] با گرادیان خواص مکانیکی (استحکام) در جهت موازی و عمود بر فرآیند استفاده می‌شود. از مزیت این روش می‌توان به ارزان و در دسترس بودن و از معایب آن می‌توان به عدم توانایی ساخت قطعات با هندسه پیچیده اشاره نمود.

۴- FGM های ساخته شده با استفاده از ساخت افزایشی در توربین

یکی از موارد تحقیقاتی، ساخت دیسک توربین با استفاده از روش SLM و به صورت گرادپانی است [۴۲].



شکل ۷ دیسک توربین ساخته شده با استفاده از 3D FGM [۴۲]



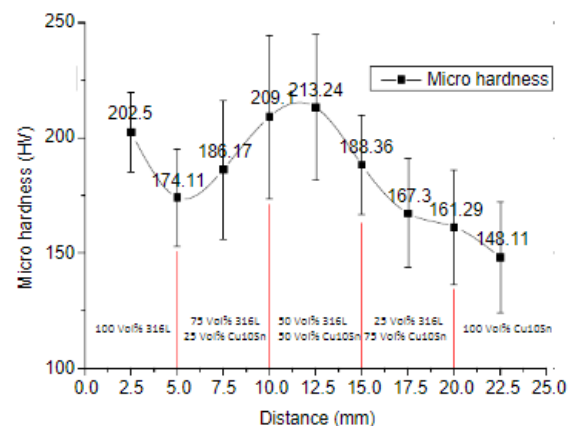
شکل ۸ تغییرات ریزساختار بر اساس توزیع عامل گرادپان ساز؛ a و b - پروفیل ماکرو از بالا و برش عرضی، d1 تا d4 - تصاویر میکروسکوپی در فصل مشترک‌های تعیین شده در تصویر b (متناظر با نقاط C1 تا C4) [۴۲]

روش ساخت افزایشی قابلیت ساخت مواد گرادیانی را دارا بوده که به آن‌ها در این گزارش اشاره گردیده است. با کنار هم قرار گرفتن روش نوین ساخت افزایشی و ساختارهای کنترلی و مهندسی شده گرادیانی، می‌توان بدون انجام عملیات اصلاحی مانند عملیات حرارتی، هزینه و زمان را در ساخت و حتی تعمیر قطعات توربینی کاهش داد. در این گزارش نیز به‌طور خلاصه و به‌عنوان نمونه، به کاربرد این روش اشاره گردیده است. بیان این نکته ضروری است که ساخت افزایشی، همانند سایر روش‌های ساخت، دارای عملیات پایانی^۲ روی قطعه ساخته شده هستند و نمونه پرینت شده، بلافاصله، قابل استفاده نخواهد بود.

۶- مراجع

- [1] R. S. Parihar, S. G. Setti, and R. K. Sahu, "Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: a review," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 309-336, 2018, <https://doi.org/10.1515/secm-2015-0395>.
- [2] P. Muller, P. Mognol, and J.-Y. Hascoet, "Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing," *Journal of materials processing technology*, vol. 213, no. 5, pp. 685-692, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.11.020>.
- [3] S. A. CPM, B. Varghese, and A. Baby, "A review on functionally graded materials," *Int. J. Eng. Sci*, vol. 3, pp. 90-101, 2014.
- [4] T. Rajan and B. Pai, "Development in manufacturing processes of functionally graded materials," *International Journal of Advanced Engineering Applications*, vol. 2, no. 5, pp. 4-74, 2009.
- [5] C. Zhang *et al.*, "Additive manufacturing of functionally graded materials: A review," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 764, p. 138209, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138209>.
- [6] D. Mahmoud and M. A. Elbestawi, "Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 1, no. 2, p. 13, 2017, <https://doi.org/10.3390/jmmp1020013>.
- [7] M. Mohammadi, M. Rajabi, and M. Ghadiri, "Functionally graded materials (FGMs): A review of classifications, fabrication methods and their

در مطالعه حاضر، مجموعه Blade و Disk، با استفاده از فولاد زنگ‌نزن 316L و Cu_{10}Sn ، ساختار گرادیانی با استفاده از ساخت افزایشی، ساخته شد. هدف از انتخاب این موضوع، پارامتر گرادیان چند بعدی در فرآیند SLM است که به ندرت این فاکتور مورد توجه قرار گرفته و غالب مواد چند جزئی، با فاکتور عمودی گرادیانی ساخته شده‌اند. در این پژوهش، یکی از اهداف بیان شده در کنار ساخت هدفمند یکی از قطعات توربینی که در شکل (۷) نشان داده شده است؛ ایجاد گرادیان سه بعدی با استفاده از روش ساخت SLM بوده است که نمونه ریزساختارهای مورد بررسی، در شکل (۸) ارائه گردیده است. چون یکی از خواص مورد بررسی در مجموعه Blade و Disk، سختی است؛ در این پژوهش، سختی نیز اندازه‌گیری شده و در شکل (۹)، براساس تابعی از میزان عامل دوم گرادیانی، ارائه گردیده است.



۹ شماتیکی از مشاهده گرادیان سختی براساس فواصل در نمونه ساخته شده با استفاده از ساخت افزایشی [۴۲]

همانطور که در قسمت دوم بیان گردید؛ ساخت مواد گرادیانی می‌تواند در قالب فیلم نازک و یا بالک باشد؛ یکی از موارد استفاده از ساختار گرادیانی در توربین، استفاده از پوشش سد حرارتی گرادیانی است. در این پژوهش [۴۳]، پوشش چند لایه گرادیانی، جایگزین پوشش متداول^۱ TBC شده و نتایج بهتری از لحاظ عمل کردی حاصل شده است.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

ساخت افزایشی را می‌توان روشی دانست که ساخت قطعات در سه بعد بدون محدودیت در پیچیدگی و به‌طور مستقیم از مدل سه بعدی، براساس افزودن لایه به لایه مواد، انجام می‌پذیرد. چند

² Finishing

¹ Thermal barrier coating

- Journal of Materials Research and Technology*, vol. 17, pp. 478-497, 2022,
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.029>.
- [18] N. Gupta, C. Weber, and S. Newsome, "Additive manufacturing: status and opportunities," *Science and Technology Policy Institute, Washington*, 2012.
- [19] D.-A. Türk, A. Ebnöther, M. Zogg, and M. Meboldt, "Additive manufacturing of structural cores and washout tooling for autoclave curing of hybrid composite structures," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 140, no. 10, p. 105001, 2018,
<https://doi.org/10.1115/1.4040428>.
- [20] J. Gardan, "Additive manufacturing technologies: state of the art and trends," *Additive Manufacturing Handbook*, pp. 149-168, 2017.
- [21] B. Zhang, P. Jaiswal, R. Rai, and S. Nelaturi, "Additive manufacturing of functionally graded material objects: a review," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 18, no. 4, p. 041002, 2018,
<https://doi.org/10.1115/1.4039683>.
- [22] M. Ivosevic, R. Knight, S. Kalidindi, G. Palmese, and J. Sutter, "Solid particle erosion resistance of thermally sprayed functionally graded coatings for polymer matrix composites," *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, no. 16-17, pp. 5145-5151, 2006,
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.05.038>.
- [23] G. Knoppers, J. Gunnink, J. Van Den Hout, and W. Van Vliet, "The reality of functionally graded material products," in *Intelligent Production Machines and Systems: First I* PROMS Virtual Conference, Elsevier, Amsterdam*, 2005, pp. 467-474.
- [24] D. Shamvedi, O. J. McCarthy, E. O'Donoghue, C. Danilenkoff, P. O'Leary, and R. Raghavendra, "3D Metal printed heat sinks with longitudinally varying lattice structure sizes using direct metal laser sintering," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 13, no. 4, pp. 301-310, 2018.
- [25] Y. Zhai, H. Galarraga, and D. A. Lados, "Microstructure, static properties, and fatigue crack growth mechanisms in Ti-6Al-4V fabricated by additive manufacturing: LENS and EBM," *Engineering failure analysis*, vol. 69, pp. 3-14, 2016,
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.036>.
- [26] M. C. Leu, B. K. Deuser, L. Tang, R. G. Landers, G. E. Hilmas, and J. L. Watts, "Freeze-form extrusion fabrication of functionally graded materials," *CIRP annals*, vol. 61, no. 1, pp. 223-226, 2012,
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.050>.
- applications," *Processing and Application of Ceramics*, vol. 15, no. 4, pp. 319-343, 2021,
<https://doi.org/10.2298/PAC2104319M>.
- [8] R. MR, "Evaluation of Mechanical and Tribological Properties of Directionally Solidified Al-Si Based FG Composite," *Silicon*, vol. 12, no. 3, pp. 701-713, 2020,
<https://doi.org/10.1007/s12633-019-00179-5>.
- [9] M. Shojaeefard, H. Saeidi Googarchin, M. Mahinzare, and M. Ghadiri, "Free vibration and critical angular velocity of a rotating variable thickness two-directional FG circular microplate," *Microsystem Technologies*, vol. 24, pp. 1525-1543, 2018,
<https://doi.org/10.1007/s00542-017-3557-8>.
- [10] W. Zhang, Z. Feng, and D. Cao, "Nonlinear dynamics analysis of aero engine blades," *J Dyn Control*, vol. 10, pp. 213-221, 2012.
- [11] P. Zhao, S. Guo, G. Liu, Y. Chen, and J. Li, "Fast fabrication of W-Cu functionally graded material by high-gravity combustion synthesis and melt-infiltration," *Journal of nuclear materials*, vol. 445, no. 1-3, pp. 26-29, 2014,
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.10.032>.
- [12] W. Li and B. Han, "Research and application of functionally gradient materials," in *IOP conference series: materials science and engineering*, 2018, vol. 394, p. 022065: IOP Publishing,
[10.1088/1757-899X/394/2/022066](https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/2/022066).
- [13] I. M. El-Galy, B. I. Saleh, and M. H. Ahmed, "Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view," *SN Applied Sciences*, vol. 1, pp. 1-23, 2019,
<https://doi.org/10.1007/s42452-019-1413-4>.
- [14] B. Wu, Y. Qiao, and J. Ren, "Optical properties of Ni²⁺ doped transparent ZnO. Al₂O₃. SiO₂ glass ceramics [J]," *Journal of Wuhan University of Technology*, vol. 29, pp. 251-253, 2007.
- [15] N. K. Sharma, M. Bhandari, and A. Dean, "Applications of functionally graded materials (FGMs)," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 2, no. 3, 2014.
- [16] N. Zhang, T. Khan, H. Guo, S. Shi, W. Zhong, and W. Zhang, "Functionally graded materials: an overview of stability, buckling, and free vibration analysis," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, 2019,
<https://doi.org/10.1155/2019/1354150>.
- [17] S. W. Yang, J. Yoon, H. Lee, and D. S. Shim, "Defect of functionally graded material of inconel 718 and STS 316L fabricated by directed energy deposition and its effect on mechanical properties,"

- [36] A. Saboori, A. Aversa, G. Marchese, S. Biamino, M. Lombardi, and P. Fino, "Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 16, p. 3316, 2019, <https://doi.org/10.3390/app9163316>.
- [37] T. Z. K. Halmesova, K. Martina, "Effect of Laser Power on Thermal Properties of Multimaterial Structure Inconel 718 and Stainless Steel 316L Processed by Directed Energy Deposition," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 927, p. 167082, 2022, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102663-2.00002-2>.
- [38] H. L. K. Sang Hoon, S. Yeon, "Selective compositional range exclusion via directed energy deposition to produce a defect-free Inconel 718/SS 316L functionally graded material," *Additive Manufacturing*, vol. 47, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167082>.
- [39] C. F. T. S.L. Sing, J.H.K. Tan, S. Huang, Wai Yee Yeong, "3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing," *Rapid Prototyping of Biomaterials (Second Edition)*, pp. 17-40, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102288>.
- [40] R. A. M. Rivera, "Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications.," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, pp. 17-31, 2020, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05663-6>.
- [41] Y. Zhang, J. Han, X. Zhang, X. He, Z. Li, and S. Du, "Rapid prototyping and combustion synthesis of TiC/Ni functionally gradient materials," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 299, no. 1-2, pp. 218-224, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01377-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01377-0).
- [42] C. Wei, Z. Sun, Q. Chen, Z. Liu, and L. Li, "Additive manufacturing of horizontal and 3D functionally graded 316L/Cu10Sn components via multiple material selective laser melting," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 141, no. 8, p. 081014, 2019, <https://doi.org/10.1115/1.4043983>.
- [43] R. Vassen, H. Kassner, A. Stuke, D. E. Mack, M. O. D. Jarligo, and D. Stöver, "Functionally graded thermal barrier coatings with improved reflectivity and high-temperature capability," in *Materials science forum*, 2010, vol. 631, pp. 73-78: Trans Tech Publ, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.631-632.73>.
- [27] A. Li *et al.*, "Freeze-form extrusion fabrication of functionally graded material composites using zirconium carbide and tungsten," 2012.
- [28] M. Mousapour, M. Salmi, L. Klemettinen, and J. Partanen, "Feasibility study of producing multi-metal parts by Fused Filament Fabrication (FFF) technique," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 67, pp. 438-446, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.021>.
- [29] L. Bai *et al.*, "Additive manufacturing of customized metallic orthopedic implants: Materials, structures, and surface modifications," *Metals*, vol. 9, no. 9, p. 1004, 2019, <https://doi.org/10.3390/met9091004>.
- [30] X. Zhang, Y.-h. Chueh, C. Wei, Z. Sun, J. Yan, and L. Li, "Additive manufacturing of three-dimensional metal-glass functionally gradient material components by laser powder bed fusion with in situ powder mixing," *Additive Manufacturing*, vol. 33, p. 101113, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101113>.
- [31] T. Traini, C. Mangano, R. Sammons, F. Mangano, A. Macchi, and A. Piattelli, "Direct laser metal sintering as a new approach to fabrication of an isoelastic functionally graded material for manufacture of porous titanium dental implants," *Dental materials*, vol. 24, no. 11, pp. 1525-1533, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.03.029>.
- [32] W. Yan *et al.*, "Multi-scale modeling of electron beam melting of functionally graded materials," *Acta Materialia*, vol. 115, pp. 403-412, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.022>.
- [33] X. Tan *et al.*, "Graded microstructure and mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting," *Acta Materialia*, vol. 97, pp. 1-16, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.036>.
- [34] C. Han *et al.*, "Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants," *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, vol. 80, pp. 119-127, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.01.013>.
- [35] K. B. Hazlehurst, C. J. Wang, and M. Stanford, "An investigation into the flexural characteristics of functionally graded cobalt chrome femoral stems manufactured using selective laser melting," *Materials & Design*, vol. 60, pp. 177-183, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.068>.