العدد الثالث عشر
ديسمبر ٢٠٢٤

الأبعاد التقنية والجمالية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الأشغال المعدنية

The Technical and Aesthetic Dimensions of 3D Printing Technology in the Field of Metalwork

د/ دعاء جابر حسين محمد

مدرس أشغال المعادن بقسم التربية الفنية – كلية التربية النوعية – جامعة جنوب الوادي

د/ إبراهيم دسوقي عبد الموجود سليمان

مدرس الخزف بقسم التربية الفنية – كلية التربية النوعية – جامعة جنوب الوادي

مجلة جامعة جنوب الوادي الدولية للعلوم التربوية

المعرف الرقمي للبحث DOI

10.21608/musi.2024.341832.1194

الترقيم الدولي الموحد الالكتروني

2636-2899

موقع المجلة عبر بنك المعرفة المصري

musi.journals.ekb.eg

١٤٤٦هـ/٢٠٢٤م

مستخلص البحث:

هدف البحث إلى التعرف على الأسس الفكرية للأبعاد التقنية والجمالية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الأشغال المعدنية. واتبع البحث المنهج الوصفي التحليلي الأبعاد التقنية والجمالية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الأشغال المعدنية. وتوصل البحث إلى العديد من النتائج منها تعزيز لتقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعا كنهج متعدد التخصصات بين معلمي الفنون والفنانين والفنيين لدعم دمجها في العملية التعليمية؛ وتوفر الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد الكثير من الوقت والجهد من مراحل التصميم وصولًا إلى النموذج النهائي، وكذلك المناخ الإبداعي للفنانين وطلاب الفنون. وتتيح تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد المزيد من الالتزام والتحفيز والمشاركة والوصول إلى مستويات أعلى من الإبداع الفني في مجال الأشغال المعدنية. وأوصى البحث بالاستفادة من دراسة تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP) في مجال الأشغال المعدنية وتطبيقها كاتجاهات جديدة في العملية التعليمية؛ والعمل على نشر الوعي الأشغال المعدنية أكاديميًا وفنيًا في المتاحف واستوديوهات الفن لإلهام التفكير النقدي والإبداعي وتمكينه، وتشجيع مشاريع البحث الإجرائي التي يجريها معلمي الفنون والفنانون للتحقيق في تكامل الأشغال المعدنية والفن والتعاون عبر مجالات الموضوع.

الكلمات المفتاحية:

الأبعاد التقنية والجمالية؛ تكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد؛ الأشغال المعدنية

Abstract:

The Technical and Aesthetic Dimensions of 3D Printing Technology in the Field of Metalwork

The study aimed to explore the intellectual foundations of the technical and aesthetic dimensions of 3D printing technology in the field of metalwork. The research employed a descriptive and analytical approach to examine these dimensions. The findings revealed several outcomes, including the enhancement of metal 3D printing techniques as an interdisciplinary approach among art educators, artists, and

technicians to support its integration into the educational process. Metal 3D printing significantly saves time and effort, from the design stages to the final model, while fostering a creative environment for artists and art students. Furthermore, 3D metal printing technologies promote greater engagement, motivation, and participation, enabling higher levels of artistic creativity in the field of metalwork. The study recommended leveraging the exploration of metal 3D printing technologies (Metal-3DP) in metalwork and applying them as new directions within the educational process. Additionally, it emphasized raising academic and artistic awareness of metalwork in museums and art studios to inspire and empower critical and creative thinking. The study also encouraged action research projects conducted by art educators and artists to investigate the integration of metalwork and art, as well as collaboration across different disciplines.

key words:

The Technical and Aesthetic Dimensions; 3D Printing Technology; Metalwork

تمهيد:

كانت التكنولوجيا ولا تزال العصب الأساس والفاعل في تحريك عجلة تقدم وتطور الفن بكل مجالاته وأصبحت مدخلاتها على اختلاف أنواعها عاملًا رئيسًا في تحقيق السبق والتفرد في أي مجال فني تنشط فيه وبالأخص موضوع البحث الحالي الذي يتناول الأبعاد التقنية والجمالية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الأشغال المعدنية.

تعمل تقنيات التصنيع الجديدة المبتكرة، على سبيل المثال، التصميم بمساعدة الحاسوب (CAD)/ التصنيع بمساعدة الحاسوب (CAM) ومعدات الإنتاج المؤتمتة والروبوتات والطباعة ثلاثية الأبعاد على تغيير كيفية التصميم والنماذج الأولية والإنتاج.

والطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) هي عملية تصنيع تتيح تصنيع الكائنات عن طريق طباعة طبقة تلو الأخرى متتالية مسترشدة بنموذج رقمي ثلاثي الأبعاد. (Citarella & Giannella, 2021, p. 1) ويحظى التصنيع الإضافي بشعبية كبيرة حيث تسمح هذه التقنية الفريدة بتصنيع أشكال معقدة يكاد يكون من المستحيل تصنيعها باستخدام الأنظمة التقليدية. لذلك، والطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) هي مورد أداة يمكّن المصممين من إنشاء نماذج مخصصة أو معقدة في خطوة واحدة دون قيود التصنيع التقليدية مثل نفايات المواد العالية، وصعوبة تصنيع الأشكال المعقدة، والحاجة إلى الأدوات المتخصصة. (ISO/ASTM 52910, 2018) علاوة على ذلك، يمكن تقليل عدد الأجزاء، وبالتالي، يتم تقليل أو إلغاء وقت التجميع والتكلفة. (Wong & Hernandez, 2012). وتتضمن طرق الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) الشائعة انصهار طبقة المسحوق powder-bed fusion، أو التغذية بالمسحوق powder-feed، أو تغذية الأسلاك wire-feed، أو الطرق القائمة على نفاث الموثقbinder-jet-based.

في السنوات الأخيرة كان هناك اتجاه في الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP) ومعظم التقارير عن التصنيع الإضافي (AM) تدور حول النمو الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP) وتأثيرها الكبير على التصميم والإنتاج السريع للأجزاء المتطورة المعقدة. حيث يوضح تقرير (Wohlers Report, 2022) نموًا كبيرًا في الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP)؛ وتتمثل الفوائد الرئيسية الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-

3DP) مقارنةً بالتصنيع التقليدي في سلسلة قيمة أقصر، وتكلفة إنتاج منخفضة ومدد زمنية للأجزاء المعقدة، وحرية تصميم، وتخصيص أكبر، وتقليل إهدار المواد.

مشكلة البحث:

تتيح الأبعاد التقنية والجمالية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الأشغال المعدنية إنتاج إنتاجًا أكثر إبداعاً وتنوعاً وتعقيداً من التي تُنتج بواسطة تقنيات التشكيل التقليدية مما يتيح أفاق جديدة للإبداع الفني. وهذا ما أشارت اليه دراسة **العامري (٢٠١٦)**، بأن استخدام التكنولوجيا الحديثة في المجالات الفنية المختلفة يعد أمرًا حتميًا لمواجهة المفاهيم الجديدة في ظل فنون الحداثة وما بعدها. وأوصت به دراسة **محسن (٢٠١٨)**، بضرورة استخدام الكليات والاقسام التصميمية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد بسبب امكانياتها المتقدمة في تصنيع النماذج والمنتجات مما يساعد بصورة فاعلة في تنفيذ تصاميم الطلاب بطريقة سريعة وغير مكلفة ودون الحاجة الى استخدام ورش متعددة تتطلب عدد غير قليل من المكائن والمعدات فضلا عن انتفاء الحاجة الى التعاقد شركات ومعامل الإنتاج لأداء هذا الغرض وكذلك ضرورة استحداث مناهج جديدة في موضوع الطباعة المعدنية ثلاثية الابعاد حيث أنها تساهم في تدريب الطلاب على التصميم من خلال التطبيقات الخاصة بهذه التكنولوجيا من اجل تهيئتهم لاستخدامها سواء في مراحل الدراسة او في حياتهم العملية. وما توصلت إليه دراسة **Menano & et.al., (2019)** على أن دمج تكنولوجيا التصنيع بالإضافة في مجالات التصميم والفنون، يمكّن الفنانين ومعلمي الفنون من استخدام وسيلة جديدة تمامًا لتنمية إبداع الفني للفنانين وكذلك طلاب الفنون. تضاف إلى ماهو متعارف عليه تشكيليًا.

وفي ضوء ما سبق تكمن مشكلة البحث في التعرف على الأبعاد التقنية والجمالية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الأشغال المعدنية. ويمكن تحديد مشكلة البحث في التساؤلات التالية:

١. ما الأبعاد التقنية والجمالية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الأشغال المعدنية؟

هدف البحث:

١. التعرف على الأسس الفكرية للأبعاد التقنية والجمالية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الأشغال المعدنية.

أهمية البحث:

١. تناوله لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد التي لا تزال مصدر اهتمام الباحثين وموضوع حديث وفعال في مجال الأشغال المعدنية.
٢. تزويد العملية التدريسية في مجال الأشغال المعدنية بالتكنولوجيا الحديثة.
٣. بيان أهمية دمج تكنولوجيا التصنيع بالإضافة وعلاقتها بتطوير وتنمية إبداع الطالب والفنان في مجال الأشغال.
٤. إثارة تحفيز الإبداع الفني في ضوء تكنولوجيا التصنيع بالإضافة في مجال الأشغال المعدنية.
٥. تشكل الدراسة نموذجًا نظريًا لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الأشغال.
٦. تسهم في تكوين مجموعة المعرفة حول الأبعاد التقنية والجمالية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال التشكيل المعدني.
٧. تقدم هذه الدراسة أدبيات نظرية يمكن توظيفهما لإجراء دراسات أخرى تتناول متغيرات جديدة غير المتغيرات التي تناولتها الدراسة الحالية.

منهجية البحث:

يتبع البحث المنهج الوصفي التحليلي للأبعاد التقنية والجمالية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الأشغال المعدنية.

مصطلحات الدراسة:

وفقًا لـ (ISO/ASTM 52900, 2015) ، يُعرَّف التصنيع الإضافي بأنه "عملية ضم المواد لصنع أجزاء من بيانات نموذج ثلاثي الأبعاد، عادةً طبقة تلو طبقة، بدلاً من التصنيع الطرحي ومنهجيات التصنيع التكويني.". وكذلك تقرير وهلر Wohler لعام ٢٠١٤، وأيضًا

بواسطة اللجنة الدولية (ASTM F42) تم تعريف الطباعة ثلاثية الأبعاد على أنها "تصنيع الأشياء بأبعاد ثلاثية من خلال ترسيب مادة باستخدام رأس طباعة أو فوهة أو تقنية طابعة أخرى". (عبدالموجود و أخرون، ٢٠٢٣)

وعرف (Tebianian & et.al., 2023) التصنيع الإضافي بأنه "عملية تعتمد على التكديس المنفصل، والذي يتم التحكم فيه عن طريق البرنامج ونظام التحكم في المواد".

فالطباعة ثلاثية الأبعاد هي "آلة تبني نموذجًا ماديًا من نموذج رقمي، تقوم بذلك عن طريق إضافة طبقات متتالية من المواد على سطح مستوٍ يسمى لوحة البناء وتذيب تلك المواد في شكل النموذج". (أحمد و عبدالموجود، ٢٠٢٣)

ويعرفها البحث إجرائيًا بأنها: "عملية يتم من خلالها إنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد عن طريق إضافة طبقات عبر وضع انتقائي للمواد المعدنية".

الإطار النظري:

نمت الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) وتطورت بشكل كبير خلال الثلاثين عامًا الماضية منذ أن بدأ الباحثون في أوستن تكساس في تطوير ما يمكن القول بأنه أول تكنولوجيا للطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP) باستخدام المعادن؛ حيث استخدم الليزر في إذابة طبقات البوليمر بشكل انتقائي، ثم المعدن لاحقًا. (Beaman & Traver , 1986) ولقد حقق تطوير تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP) تقدمًا كبيرًا منذ ذلك الحين. ويعد فهم العمليات المختلفة المستخدمة في الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP) المرتبطة بها أمرًا بالغ الأهمية لتحسين المنتجات والمواد التي يتم إنتاجها من خلالها.

وفيما يلي المخطط الزمني لتاريخ تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP).

١٩٨٤م: بدأ Deckard & Beaman العمل على التكنولوجيا لبناء أجزاء ثلاثية الأبعاد من المسحوق، باستخدام مصدر حرارة ليزري.

١٩٨٦م: براءة اختراع SLS بواسطة Deckard في جامعة تكساس.

١٩٨٩م: براءة اختراع ترسيب الموثق النافث للحبر، بواسطة Sachs & Cima في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا.

١٩٩٣م: براءة اختراع EBM من قبل Larson بدون انتماء.

١٩٩٥م: تطلق EOS "EOSINT M 25" للتلبيد المباشر للمعادن بالليزر (DMLS).

١٩٩٥م: مختبرات ساندیا Sandia الوطنية تبدأ تطوير LENS.

١٩٩٧م: ترخص EOS حقوق SLS من 3D Systems وتركز على المسحوق.

١٩٩٩م: التقوية بالموجات فوق الصوتية المسجلة ببراءة اختراع بواسطة Dawn White of Solidica.

٢٠٠١م: استحوذت شركة 3D Systems على حقوق تقنية SLS من خلال الاستحواذ على شركة تحمل براءات اختراع أصلية بواسطة Deckard.

٢٠٠٢م: أطلقت Arcam أول آلة تجارية S12.

٢٠١٢م: استحوذت شركة 3D Systems على شركة Z–Corp صاحبة براءة الاختراع الأصلية في عملية ربط النافثة للحبر inkjet binder. (Sames & et.al., 2016)

تصنيف عمليات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP):

تنقسم عمليات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP) الرئيسية إلى سبع فئات، شكل (١)، (Ron & et.al., 2023) حددتها الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM)، (ISO/ASTM 52900, 2015) ولكل فئة العديد من التقنيات الفرعية لكل منها خامات خاصة.

١. **نفث المادة الرابطة Binder Jetting:** تعتمد على ترسيب مادة رابطة سائلة بشكل انتقائي لدمج جزيئات المسحوق وتشكيل النموذج المطلوب. وتشمل تطبيقاتها تقنية (BJ) المستخدمة مع الجبس، الرمل، المعادن، والخزف.

٢. **ترسيب الطاقة الموجه Directed Energy Deposition:** تعتمد على استخدام طاقة حرارية مركزة لصهر المواد أثناء عملية ترسيبها لتشكيل المجسمات. تشمل تطبيقاتها تقنية (LENS) التي تعتمد على المعادن، وتقنية (EBAM) التي تعتمد أيضًا على المعادن.

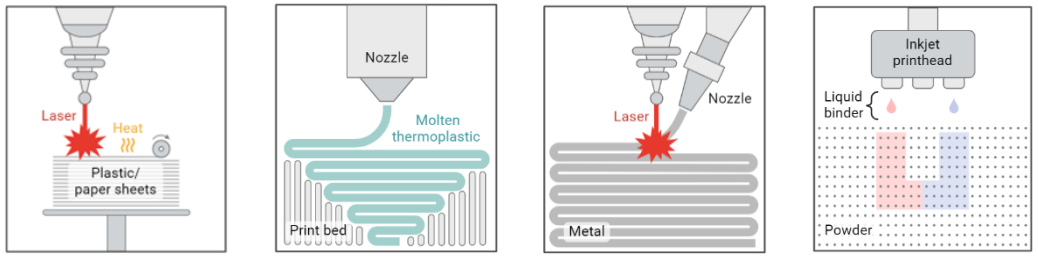
٣. **بثق المواد Material Extrusion:** تعتمد على إخراج المواد بشكل انتقائي من خلال فوهة أو فتحة مخصصة. تشمل تطبيقاتها تقنية (FDM) التي تستخدم البلاستيك، الزجاج، والمواد المركبة، وتقنية (PDM) التي تعتمد على الخزف والخرسانة.

٤. **تصفيح الرقائق Sheet Lamination:** تعتمد على ربط صفائح المواد المختلفة لتشكيل الأجزاء المطلوبة. تتضمن تقنية (LOM) التي تستخدم الورق والمواد المركبة.

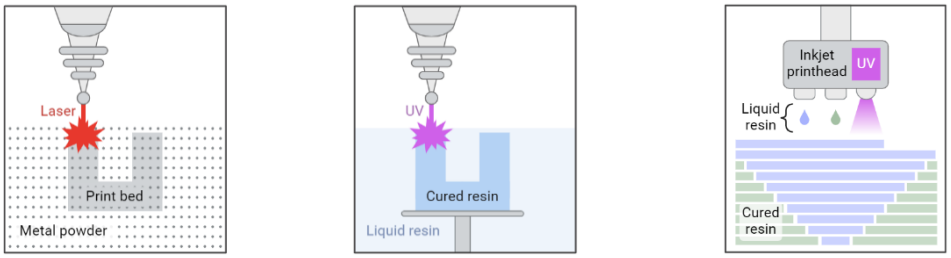
٥. **نفث المواد Material Jetting:** تعتمد على ترسيب قطرات صغيرة من مواد البناء بشكل انتقائي لتشكيل الأشكال المطلوبة. تتضمن تقنية (MJ) التي تعتمد على البلاستيك، تقنية (NPJ) التي تعتمد على المعادن، وتقنية (DOD) التي تعتمد على الخزف.

٦. **البلمرة الضوئية بالحوض vat photopo-lymerization:** تعتمد على معالجة بوليمر ضوئي سائل في حوض باستخدام الضوء لتنشيط عملية البلمرة بشكل انتقائي. تتضمن تقنية (SLA) التي تستخدم البلاستيك والخزف، و(CDLP) التي تعتمد على البلاستيك.

٧. **صهر طبقة المسحوق Powder Bed Fusion:** تعتمد على دمج مناطق محددة من طبقة المسحوق باستخدام طاقة حرارية بشكل انتقائي. من تقنياتها: (MJ) و(SLS) التي تعتمد على البلاستيك، و(SLM) و(EBM) التي تعتمد على المعادن. (Ahangar & ey.al., 2019)، (Ruscitti & et.al., 2020)، (Redwood & et.al., 2017)، (Urhal & et.al., 2019)



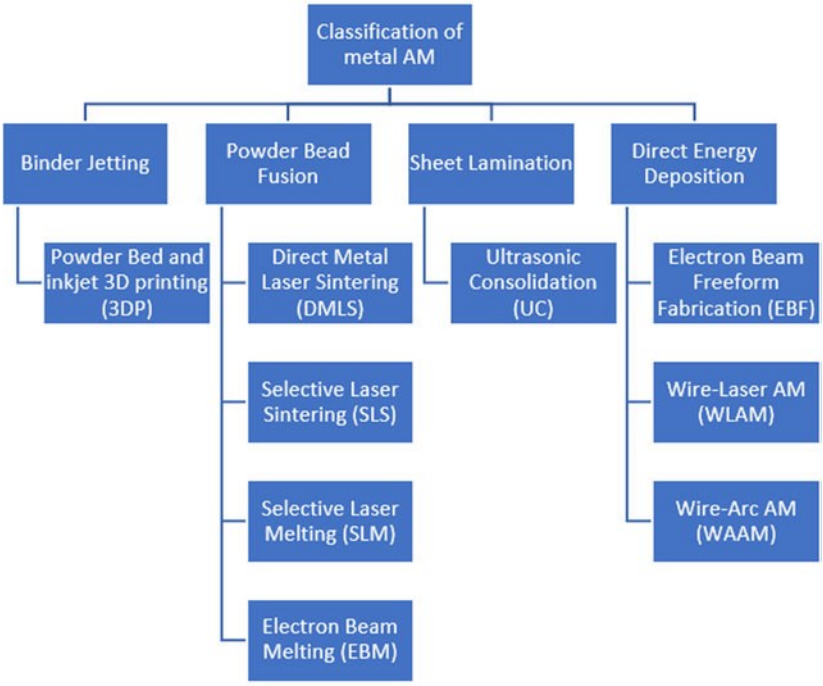
تصفيح الرقائق Sheet Lamination	بثق المواد Material Extrusion	ترسيب الطاقة الموجه Directed Energy Deposition	نفث المادة الرابطة Binder Jetting



صهر طبقة المسحوق	البلمرة الضوئية بالحوض	نفث المواد
Powder Bed Fusion	vat photopo-lymerization	Material Jetting

شكل (١): الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP).

ويتم تصنيف عمليات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP) بناءً على معايير مختلفة مثل شكل المواد المستخدمة (مثل الأسلاك wire والمسحوق powder، إلخ) وأنواع مصادر التسخين (مثل الليزر laser شعاع الإلكترون electron beam، إلخ)، حجم البناء، إلخ (Ansell, 2021). شكل (٢).(Zhong & et.al., 2019)



شكل (٢): تصنيف الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP).

ونستنتج مما سبق أنه تم استخدام مجموعة متنوعة من العمليات لتشكيل مواد أولية (مسحوق powder أو صفائح sheets أو أسلاك wire، إلخ) إلى هيئات ثلاثية الأبعاد عن طريق الإذابة melting أو اللصق joining أثناء عمليات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد

(Metal-3DP) لتحقيق ذلك، تكون عمليات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP) إما مباشرة Direct Metal-3DP أو غير مباشرة Indirect Metal-3DP.

أولًا: تقنيات التشكيل المباشر للطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Direct Metal-3DP):

تتعلق الفئات الأربعة التالية من الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-AM) بتقنيات التشكيل المباشر: (Sames & et.al., 2016)

١. **انصهار طبقة المسحوق Powder bed fusion (PBF):**
- الإذابة بالليزر الانتقائي Selective laser melting (SLM).
- ذوبان شعاع الإلكترون Electron beam melting (EBM).

٢. **ترسيب الطاقة المباشر Direct energy deposition (DED):**
- الليزر Laser مقابل الشعاع الإلكتروني powder fed.
- تغذية الأسلاك Wire مقابل تغذية مسحوق powder.

٣. **نفث المادة الرابطة Binder Jetting:**
- الترسيب Infiltration.
- الدمج Consolidation.

٤. **تصفيح الرقائق Sheet Lamination:**
- تصنيع المواد المضافة بالموجات فوق الصوتية Ultrasonic (UAM).

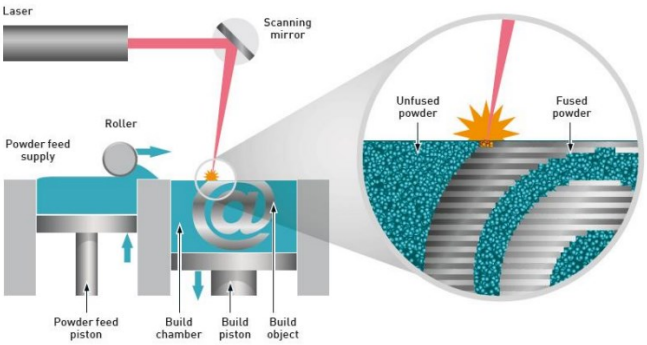
وفيما يلي توضيح لتقنيات التشكيل المباشر للطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد المباشرة (Direct Metal-3DP):

١. انصهار طبقة المسحوق Powder bed fusion (PBF):

يشمل انصهار طبقة المسحوق PBF جميع العمليات التي تستخدم فيها الطاقة المركزة (شعاع الإلكترون أو شعاع الليزر) لصهر أو تلبيد طبقة من طبقة المسحوق بشكل انتقائي. بالنسبة للمعادن، يستخدم الصهر عادةً بدلاً من التلبيد. تسمح إعادة انصهار الطبقات السابقة أثناء ذوبان الطبقة الحالية بالتصاق الطبقة الحالية ببقية الجزء. (Sames & et.al., 2016)

- **الإذابة بالليزر الانتقائي Selective laser melting (SLM).**

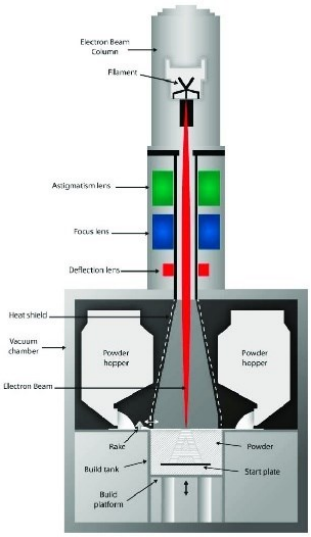
تستخدم عملية الإذابة بالليزر الانتقائي SLM الليزر laser كمصدر حرارة لصهر المسحوق المعدني بالكامل لإنشاء طبقة جزئية ثلاثية الأبعاد (Bhavar & et.al., 2014). ,في هذه العملية، يتم إنشاء طبقة المسحوق عن طريق جرف مسحوق معدني عبر مساحة العمل (Frazier, 2014). ويتم استخدام مصدر طاقة من الليزر لمسح كل طبقة من طبقة المسحوق المعدنية لإذابة المادة بشكل انتقائي وفقًا للمقطع العرضي للجزء الذي تم الحصول عليه من نموذج CAD. بعد مسح طبقة واحدة، يتجه المكبس الموجود أسفل المنتج إلى أسفل ويتجه مكبس تسليم المسحوق إلى أعلى بسمك الطبقة المحددة. تتكرر الدورة طبقة تلو الأخرى، حتى يتم تكوين الجزء الكامل؛ أخيرًا، يكون الجزء مرئيًا بعد إزالة المسحوق المعدني الزائد؛ عادة ما يتم إجراء عملية SLM في جو خامل مثل الأرجون أو النيتروجين لحماية المعدن المنصهر (Ninpetch & et.al., 2020). شكل (٣) (Duffy, 2023).



شكل (٣): الإذابة بالليزر الانتقائي Selective laser melting (SLM)..

- **ذوبان شعاع الإلكترون Electron beam melting (EBM):**

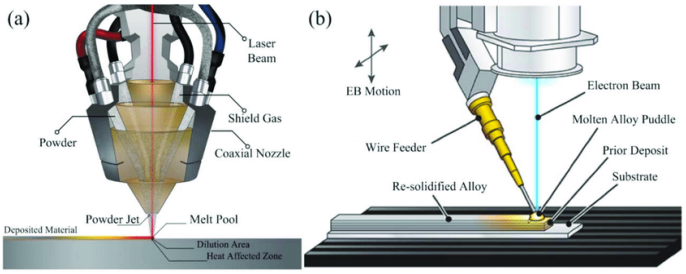
تشبه عملية EBM عملية SLM باستثناء مصدر الحرارة، شعاع الإلكترون، لصهر مسحوق المعدن (Yakout & et.al., 2018). يجب إجراء عملية EBM في جو فراغ بسبب محدودية التوصيل الكهربائي للمادة. يتم تطبيق العملية بشكل شائع للتطبيقات المعدنية خاصةً للتصميمات المعقدة، شكل (٤). (Lancaster & et.al., 2016)



شكل (٤): ذوبان شعاع الإلكترون Electron beam melting (EBM).

٢. ترسيب الطاقة المباشر Direct energy deposition (DED):

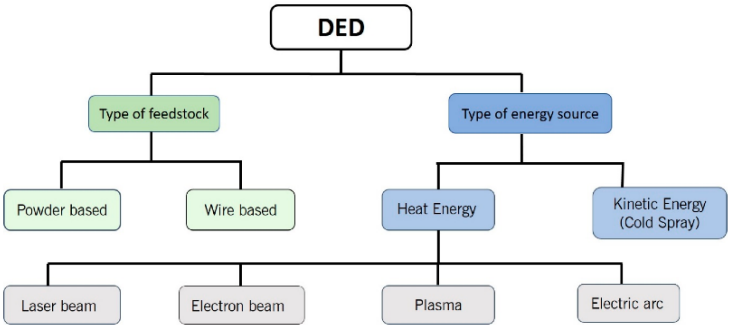
يضم ترسيب الطاقة المباشر DED جميع العمليات التي تولد فيها الطاقة المركزة حوضًا ذائبًا يتم فيه ترسيب المواد الأولية. يمكن أن تستخدم هذه العملية مصدر حرارة ليزر أو قوس أو شعاع إلكتروني. يمكن أن تكون المواد الأولية المستخدمة إما مسحوقًا أو سلكًا (Sames & et.al., 2016). شكل (٥). (Selema, 2022)



شكل (٥): ترسيب الطاقة المباشر Direct energy deposition (DED).

ويمكن تصنيفها في فئتين رئيسيتين من منظور الطاقة: الرش البارد Cold Spray والطاقة الحرارية Thermal Energy. يضيف الرش البارد المعروف أيضًا باسم الطاقة الحركية، مادة على شكل جزيئات دقيقة إلى طبقة سفلية ذات طاقة حركية كافية لإنشاء طبقة أو طبقة كثيفة (Villafuerte, 2014)؛ وتركز المجموعة الأخرى من أنظمة DED على الطاقة الحرارية، وتصنف من حيث القائم على الليزر laser–based، والقائم على شعاع الإلكترون electron–beam based، والقائم على البلازما plasma–based، والقائم على القوس

الكهربائ electric arc–based؛ وتقوم هذه المجموعة بإذابة المواد الخام بشكل انتقائي والتي تكون إما سلكًا أو مسحوقًا ثم تضيفها على التوالي إلى منصة التصميم (Dass & Moridi, 2019)، (Dass & Moridi, 2019). شكل (٦).

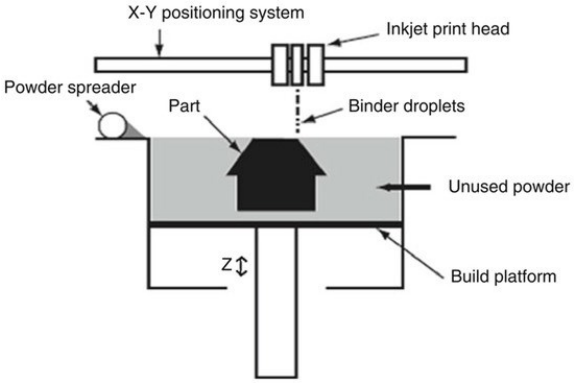


شكل (٦): ذوبان شعاع الإلكترون Electron beam melting (EBM).

ومن عمليات DED الشائعة كتصنيع المواد المضافة لشعاع الإلكترون (EBEAM) يكون مصدر الطاقة والمادة عبارة عن حزمة إلكترونية وفي شكل سلك على التوالي (Urhal et.al., 2019 &)؛ والتصنيع الإضافي للأسلاك والقوس (WAAM) هي طريقة عملية DED قائمة على الأسلاك حيث يتم صهر المواد الأولية السلك من خلال قوس كهربائي كمصدر للطاقة، ويتم ترسيب المادة المنصهرة على طبقة (Wu & et.al., 2018).

٣. نفث المادة الرابطة Binder Jetting:

هي تقنية تصنيع بالإضافة (Metal–AM) معدني قائمة على المسحوق وتشبه تقنية نفث المادة الرابطة Binder Jetting تقنية انصهار طبقة المسحوق PBF، ويكمن الاختلاف الرئيسي في الآلية المستخدمة لتشكيل الطبقات المتتالية (Li, 2020). وتتضمن عمليات Binder jet سبع خطوات: الطباعة Printing، المعالجة Curing، إزالة المسحوق De–Powdering، التلبيد Sintering، التسلل Infiltration، التلدين Annealing، والتشطيب Finishing (Mirzababaei & Pasebani, 2019). شكل (٧).



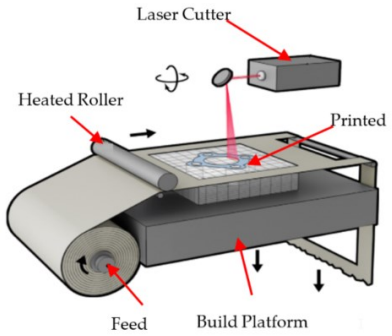
شكل (٧): نفث المادة الرابطة Binder Jetting.

ومن نفث المادة الرابطة Binder Jetting عمليات كالنفث المعدني السائل Liquid Metal Jetting (LMJ) هي تقنية تصنيع ذات شكل حر صلب لصنع الأجزاء المعدنية وكذلك الوصلات الإلكترونية؛ ونفث الهباء (AJP) هي تقنية رش الحبر المكون من قطرات صغيرة الحجم مشتتة في السائل، وتشتمل هذه التقنية على مكونين: رذاذ ورأس ترسيب. المرذاذ البخاخ عبارة عن جهاز يعمل بالهواء المضغوط أو فوق صوتي ينتج بخارًا كثيفًا من القطرات. يتحرك غاز حامل مثل النيتروجين. (Tebianian & et.al., 2023)

٤. تصفيح الرقائق Sheet Lamination:

يستخدم تصفيح الرقائق Sheet Lamination، شكل (٨)، تكديس الرقائق أو الصفائح المعدنية المقطوعة بدقة إلى شرائح ثنائية الأبعاد من كائن ثلاثي الأبعاد (Sames & et.al., 2016). يشترك تصفيح الرقائق في مبادئ بناء مماثلة مع عمليات التصنيع بالإضافة الأخرى، ولكن بدلاً من استخدام مسحوق أو سلك كمواد وسيطة، يستخدم تصفيح الألواح رقائق معدنية لصنع شيء ما. وهناك ثلاثة أنواع من العمليات باستخدام تقنية تصفيح الرقائق بما في ذلك التصفيح الورقي Paper–Based Lamination، والتصفيح المركب Composite–Based، والتصفيح الانتقائي Selective Lamination، ففي التصفيح الورقي يتم لصق الأوراق / الرقائق معًا طبقة تلو الأخرى ويتم قصها بدقة حسب الشكل الهندسي المصمم لعمل الكائن النهائي ويتم استخدام أي مادة من الألواح التي يمكن قطعها بدقة باستخدام أدوات القطع (الليزر أو القاطع الميكانيكي) والتي يمكن ربطها لبناء الأجزاء، أما التصفيح المركب له مبدأ مماثل ولكن يمكن إضافة بعض التعزيزات إلى مادة buck لتحسين قوة الجزء المصنّع بدلاً من

وضع الغراء لإضافة طبقات معًا، وفي عملية التصفيح الانتقائي يمكن تطبيق مادة رابطة بشكل انتقائي في مواقع معينة لتصنيع الجزء. (Zhang & Liou, 2021)



شكل (٨): تصفيح الرقائق Sheet Lamination.

ثانيًا: تقنيات التشكيل غير المباشر للطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Indirect Direct Metal-3DP):

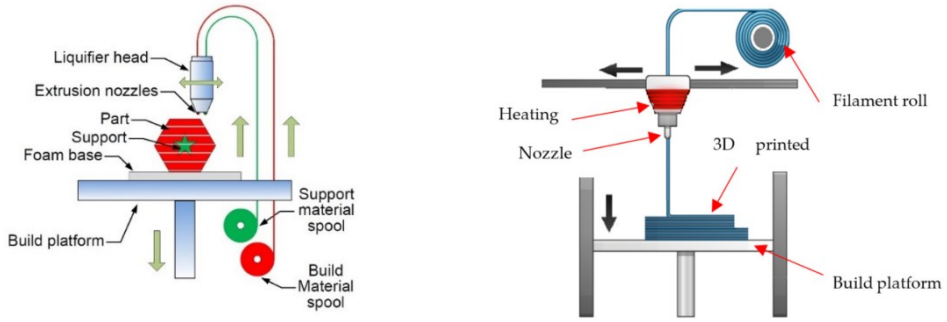
كطريقة بديلة لتقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP)، والتي يمكنها التغلب على بعض معوقات تقنيات التصنيع بالإضافة للمعادن المباشرة (Direct Metal-AM)، يمكن دمج الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP) الخاصة بالبوليمرات مع طرق الصب casting التقليدية، ويطلق عليها الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد غير المباشرة (Indirect Direct Metal-3DP). (Mun & et.al., 2015)

تتعلق الفئات الثلاث التالية من الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد بتقنيات التشكيل غير المباشر (Indirect Direct Metal-3DP):

١. بثق المواد Material extrusion:

يشير بثق المواد Material extrusion إلى تقنيات التصنيع بالإضافة (AM) التي تستخدم طريقة البثق لتوزيع مواد البناء بشكل انتقائي. وتعرف هذه التقنية باسم نمذجة الترسيب المنصهر Fused Deposition Modeling (FDM)، وأيضًا باسم نمذجة الطبقة المنصهرة Fused Layer Modeling (FLM) أو تصنيع الفتيل المنصهر Fused Filament Fabrication (FFF) (Jorge, 2012). ونمذجة الترسيب المنصهر (FDM) هي عملية تصنيع بالإضافة (AM) يتم فيها استخدام خيوط مستمرة من بوليمر لدن بالحرارة لطبقات

الطباعة ثلاثية الأبعاد من المواد حيث يتم تسخين الفتيل عند الفوهة للوصول إلى حالة شبه سائلة ثم يتم بثقها على المنصة أو فوق الطبقات المطبوعة مسبقًا (Ngo, 2018)، شكل (٩-أ). أو استخدام فتحتين منفصلتين، واحدة لمواد النموذج والأخرى لمواد الدعم، لبناء نموذج ثلاثي الأبعاد مصمم باستخدام أداة CAD، شكل (٩-ب). (Yakout & et.al., 2018)



(ب) (أ)

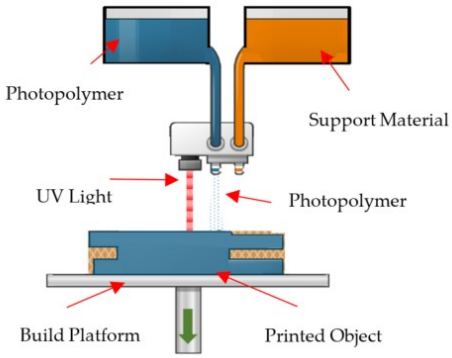
شكل (٩): نمذجة الترسيب المنصهر Fused Deposition Modeling.

وتتميز نمذجة الترسيب المنصهر (FDM) بانخفاض التكنولوجيا وتكلفة التشغيل لأنها لا تتطلب مكونات باهظة الثمن مثل الليزر أو مصادر الإلكترون ومضخات التفريغ في الآلات القائمة على الحزمة والقدرة على بناء مكونات تجمع بين كل من اللدائن الحرارية والمعادن داخل نفس البنية وهو أمر غير ممكن مع الأنظمة المعدنية المباشرة الأخرى (Mireles & et.al., Mar 2013,)؛ وأيضًا تحقيق معدلات بناء أعلى بكثير مقارنة بتقنيات التلبيد والصهر (Fang & et.al., 2017).

٢. نفث المواد material jetting (MJ):

تعد عمليات نفث المواد (MJ) طريقة تصنيع مضافة بارزة في مجال طباعة البوليمر نظرًا لمزاياها مقارنة بتقنيات طباعة البوليمر الأخرى، حيث تسمح بتكييف سماكة الطبقة الرقيقة مما يسمح بطباعة أجزاء عالية الجودة وتأثيرات أقل وضوحًا للسلالم وميزات الجدار الرقيق. (Gülcan & et.al., 2021) وتستخدم عمليات نفث المواد (MJ) البوليمرات الضوئية كمادة وتطبق ضوء الأشعة فوق البنفسجية لعلاج الطبقة المطبوعة بشكل انتقائي، شكل (١٠)؛ وتعتبر تقنية النفث النانوي للجسيمات Nano Particle Jetting (NPJ) إحدى تقنيات نفث المواد

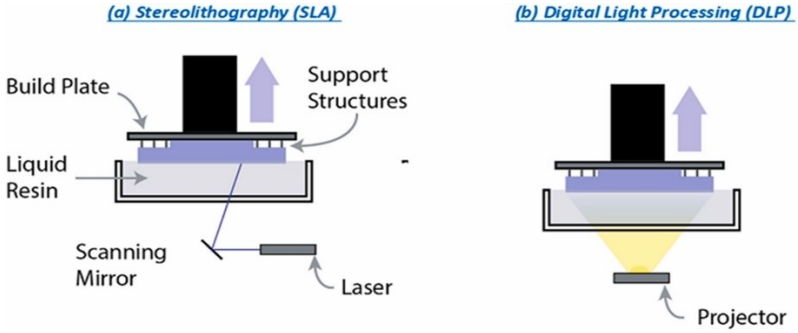
التي تتيح إنتاج الأجزاء المعدنية من خلال استخدام الراتنجات المركبة التي يتم غمرها بالجسيمات النانوية المعدنية مثل الفولاذ المقاوم للصدأ.(Vafadar & et.al., 2021)



شكل (١٠): نفث المواد material jetting (MJ).

٣. البلمرة الضوئية بالحوض vat photopo-lymerization:

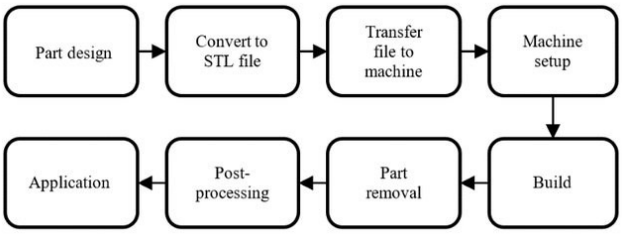
تستخدم عمليات البلمرة الضوئية بالحوض vat photopo-lymerization الراتنجات السائلة القابلة للمعالجة بالإشعاع أو البوليمرات الضوئية كموادها الأولية، تتفاعل معظم البوليمرات الضوئية مع الإشعاع في نطاق الأطوال الموجية للأشعة فوق البنفسجية، ولكن يتم استخدام بعض أنظمة الضوء المرئي أيضًا، عند التشعيع تخضع هذه المواد لتفاعل كيميائي لتصبح صلبة؛ ويسمى هذا التفاعل بلمرة ضوئية photopolymerization، وعادة ما يكون معقدًا، ويشتمل على العديد من المركبات الكيميائية.(Rouf & et.al., 2022) واعتمادًا على الاختلاف في مصدر المعالجة، يمكن تصنيف عمليات البلمرة الضوئية بالحوض vat photopo-lymerization إلى الطباعة الحجرية المجسمة stereolithography (SLA) والمعالجة الرقمية للضوء digital light processing (DLP) (Bernal & et.al., 2019؛ شكل (١١)، (Rashid & et.al., 2021).



شكل (١١): البلمرة الضوئية بالحوض vat photopo-lymerization.

خطوات عملية الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد Metal-3DP Process:

يتضمن الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد عددًا من الخطوات التي تنتقل من وصف CAD الظاهري إلى الجزء الناتج الفعلي. وتتضمن معظم عمليات التصنيع بالإضافة AM، إلى حد ما، على الأقل الخطوات الثماني، شكل (١٢)، التالية: (Gibson & et.al., 2015)، (Leirmo & Martinsen, 2019)



شكل (١٢): عملية الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد Metal-3DP Process.

الخطوة (١) CAD: يجب أن تبدأ جميع أجزاء عملية الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد Metal-3DP من نموذج برمجي يصف الهندسة الخارجية بشكل كامل، ويمكن أن يتضمن ذلك استخدام أي برنامج احترافي للنمذجة الصلبة CAD تقريبًا، ولكن يجب أن يكون الإخراج ثلاثي الأبعاد صلبًا أو تمثيلًا سطحيًا. يمكن أيضًا استخدام المعدات الهندسية العكسية (مثل الليزر والمسح الضوئي) لإنشاء هذا التمثيل.

- **الخطوة (٢) التحويل إلى STL:** تقبل كل آلة طباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) تقريبًا تنسيق ملف STL، والذي أصبح معيارًا واقعيًا، وفي الوقت الحاضر ويمكن لكل نظام CAD تقريبًا إخراج تنسيق ملف كهذا، يصف هذا الملف الأسطح الخارجية المغلقة لنموذج CAD الأصلي ويشكل الأساس لحساب الشرائح.
- **الخطوة (٣) النقل إلى جهاز AM ومعالجة ملفات STL:** يجب نقل ملف STL الذي يصف الجزء إلى جهاز AM. وخلال هذه الخطوة يتم تحرير الملف بحيث يكون الحجم والموضع والاتجاه الصحيحين للبناء.

- **الخطوة (٤) إعداد الجهاز:** يجب إعداد جهاز AM بشكل صحيح قبل عملية الإنشاء. ترتبط مثل هذه الإعدادات بمعلمات البناء مثل قيود المواد، ومصدر الطاقة، وسمك الطبقة، والتوقيت، وما إلى ذلك.
- **الخطوة (٥) البناء:** يعد بناء الجزء عملية آلية بشكل أساسي ويمكن للآلة أن تستمر إلى حد كبير دون إشراف. يجب إجراء المراقبة السطحية للجهاز فقط في هذا الوقت لضمان عدم حدوث أخطاء مثل نفاد المواد أو الطاقة أو مواطن الخلل في البرامج، وما إلى ذلك.
- **الخطوة (٦) الإزالة:** بمجرد انتهاء آلة AM من البناء، يجب إزالة الأجزاء. قد يتطلب ذلك التفاعل مع الماكينة، والتي قد تحتوي على أقفال أمان لضمان على سبيل المثال أن تكون درجات حرارة التشغيل منخفضة بدرجة كافية أو أنه لا توجد أجزاء متحركة بشكل نشط.
- **الخطوة (٧) المعالجة البعدية:** بمجرد إزالة النموذج من الجهاز، قد تتطلب الأجزاء قدرًا من التنظيف الإضافي قبل أن تصبح جاهزة للاستخدام. قد تكون الأجزاء ضعيفة في هذه المرحلة أو قد تحتوي على ميزات داعمة يجب إزالتها. لذلك غالبًا ما يتطلب ذلك وقتًا ومعالجة يدوية دقيقة وذات خبرة.
- **الخطوة (٨) التطبيق:** قد تكون الأجزاء جاهزة الآن للاستخدام. ومع ذلك، قد يحتاجون أيضًا إلى علاج إضافي قبل قبولهم للاستخدام. على سبيل المثال، قد تتطلب طلاءًا أوليًا لإعطاء ملمس سطح وتشطيب مقبول. قد تكون العلاجات شاقة وطويلة إذا كانت متطلبات التشطيب متطلبة للغاية. قد يُطلب أيضًا تجميعها مع مكونات ميكانيكية أو إلكترونية أخرى لتشكيل نموذج أو منتج نهائي.

وظائف الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد Metal-3DP:

تتعدد وظائف تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد Metal-3DP نتناول فيما يلي أهم تلك الوظائف في مجال التعليم والفنون:

(أ). التعليم Education: تُستخدم الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) في المدارس ومؤسسات التعليم العالي والمكتبات العامة والمتاحف كاستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) في لمشاريع القائمة على حل المشكلات، والتثقيف حول التكنولوجيا وممارسات التصميم، وإنشاء أو استخدام النماذج المطبوعة باستخدام تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) كوسائل

تعليمية، وإنتاج التقنيات والأساليب المساعدة للمتعلمين ذوي الاحتياجات الخاصة. (Novak, 2022)

(ب). الفنون Arts: تُستخدم تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد 3DP في الحفظ والترميم، حيث تعتبر الطباعة ثلاثية الأبعاد(3DP) مفيد في المساعدة خلال مراقبة حالة القطع الأثرية في الماضي والحاضر والمستقبل، مما يجعل من الممكن البحث في السلوك المادي للعمل الفني (Beentjes, 2019). وكذلك دراسة الأعمال الفنية فحقيقة أن النسخ الفردية للأعمال الفنية والتحف ذات الطبيعة الهشة يمكن لتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) نسخها وإنتاجها بدقة وبكميات تتيح دراسة هذه الأعمال الفنية على نطاق أوسع وبطرق مختلفة (Ballarin & et.al., 2018). وأيضًا دراسة التراث الثقافي حيث يحفز استخدام تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد 3DP بشكل فعال العملية الإبداعية للدارسين والمختصين ويمكن أن تزيد من سهولة فهم عناصر التراث الثقافي والتعامل معها بحرية وبشكل مختلف، وبالتالي تحفيز أنواع مختلفة من الأساليب وطرق تحليلها. (Tissen, 2022)

دوافع استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) في التربية الفنية:

هناك حاجة عامة في نظام التعليم لتعليم المعلمين حول تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد 3DP ودعم تطويرهم المهني، وتمكين قدرتهم على تعليم الآخرين حول الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP).(Maloy & et.al., 2017)

١. **التعلم من خلال الإنشاء:** تُعرف الأنشطة البنائية والإنشائية باسم Makerspace التي تتعامل مع العالم من خلال الأنشطة العليا. ترتبط الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) مباشرة بمفهومين تربويين ناشئين آخرين: مساحات التصنيع والتفكير القائم على التصميم. يعد التعليم القائم على التصميم (DBL) للتجربة والخطأ عملية مفتوحة، وابتكار، وتكرار أنشطة Makerspaces وأنشطة DBL التي تهدف إلى تشجيع التعلم الذي يحركه الطلاب من خلال الاستكشاف وبناء المصنوعات اليدوية، كم تساعد هذه الأنشطة الطلاب في تطوير مهارات التفكير الإبداعي والتعلم الاستقصائي وحل المشكلات. (Abdulmajid, 2020)

٢. **إنتاج الوسائل التعليمية:** يعمل استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) للإنتاج الفني الذي تساعد على التعلم كوسائل التعليمية يمكن طباعتها لتشجيع المعلمين في كل نظام تعليمي تقريبًا. (Tillinghast & et.al., 2014)

٣. **التعلم الخاص:** استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) في إعداد وتهيئة بيئة تعليمية خاصة لأولئك الذين يعانون من الإعاقات، وذلك عندما يكون الإنتاج الفني مصمم بواسطة الطباعة ثلاثية الأبعاد 3DP لمن يحتاجون إلى تقنيات مساعدة، عندما يحتاج أولئك الذين لديهم تعليم معين إلى بيئة واقعية لمشروعات الطلاب.(Buehler & et.al., 2016)

٤. **تنمية مهارات الطالب:** تتيح تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) الفرص لإيجاد حلول لتنفيذ العمل الفني، واختبار مبدا الارجنوميه في التصميم، والدمج بين التقنيات والخامات، تنشيط التفكير الإبداعي والاتصالي، ..إلخ (المعداوي و حسين، ٢٠٢١)

القيم الجمالية للإنتاج الفني القائم على الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP):

تتحدد القيم الجمالية للإنتاج الفني المنفذ بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) بناءً على ثلاث قيم الجمالية سطحية مهيمنة للإنتاج الفني: (سليمان، ٢٠٢٤)

١. **الجمالية المستحيلة The Impossible Aesthetic:** تلك القطع التي تبدو وكأنها لا يمكن تصنيعها بأي طريقة أخرى، حيث استخدم الفنانون والصناع لتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) لإظهار أعمالهم الفنية الافتراضية، والتي كان من المستحيل عملياً تنفيذها حتى يتم تطوير هذه التكنولوجيا، أي ينصب تركيزهم على دفع الآلة إلى أقصى حدودها.

٢. **الجمالية الرمزية The Coded Aesthetic:** تلك القطع التي تعمل فيها تقنيات التصنيع بالإضافة (AM) في خدمة العمل الذي تم إنشاؤه بواسطة الحاسوب. وتعتبر تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) بالنسبة لهم أفضل عملية لالتقاط الصور المؤقتة والأثيرية – لتحويل رمز الافتراضي إلى عمل فني ملموس. وينصب التركيز هنا على استخدام تقنيات التصنيع بالإضافة (AM) في خدمة تصميمه وتوفير النسخ المتماثل – أو الصنعة.

٣. **جمالية البثق The Extruded aesthetic:** حيث تظل خطوط البثق مرئية – عن عمد؛ عرض العملية، حيث يتم عرض صنعة الجهاز وبصمات أصابعه؛ وينصب التركيز

على الأشياء الجديدة التي يمكن لتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) القيام بها، عندما تصبح أداة إبداعية، في حد ذاتها، أو حتى وسيلة فنية مشروعة.

تحليل لبعض الأعمال الفنية المعدنية باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP):

لدراسة وتحديد الاساليب التشكيلية للأشغال المعدنية في ضوء الطباعة ثلاثية الأبعاد (3DP) نستعرض بعض الأعمال الفنية المعدنية باستخدام تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP) المباشرة وغير المباشرة.

أولًا: الأشغال المعدنية باستخدام تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد المباشرة (Direct Metal–3DP):

العمل الأول: نيم جوزيفي Naim Josefi، مجوهرات Jewelry:

شكل (١٣): نيم جوزيفي Naim Josefi، مجوهرات (jewelry)، ٢٠١٧م. (Ålgårdh & et.al., 2017)

الأبعاد التقنية:

- **الخامة المستخدمة:** البرونز
- **التقنية المستخدمة:** الطابعة المعدنية ثلاثية الأبعاد المباشرة.
- **الأسلوب التشكيلي:** الصهر الانتقائي بالليزر (SLM).

القيم الفنية والجمالية:

- **الاتزان:** تصميم القطعة متزن في توزيع الكتلة والفراغ.
- **الإيقاع:** استخدام التكرار المنتظم للنقوش يعزز الإيقاع البصري.

- **التناظر:** يظهر تناظرًا هندسيًا دقيقًا، مما يضفي طابعًا كلاسيكيًا مميزًا.

العمل الثاني: ماريان فورست Marianne Forrest، "باليوليث "Paleolith:

شكل (١٤): ماريان فورست Marianne Forrest، "باليوليث "Paleolith، ٢٠٠٩م، الفولاذ المقاوم للصدأ. (Hoskins, 2018)

الأبعاد التقنية:

- **الخامة المستخدمة:** الفولاذ المقاوم للصدأ.
- **التقنية المستخدمة:** الطابعة المعدنية ثلاثية الأبعاد المباشرة.
- **الأسلوب التشكيلي:** التلبيد الانتقائي بالليزر (DMLS)

القيم الفنية والجمالية:

- **التوازن:** القطعة تحقق توازنًا بين الأشكال المائلة والخطوط المستقيمة.
- **الانسجام:** الأشكال الهندسية تتكامل مع خامة المعدن المصقول.
- **الملمس:** السطح المعدني اللامع يعطي انطباعًا بصريًا يوحي بالحداثة.

العمل الثالث: ليونيل دين Lionel Dean، خاتم ذهبي:

شكل (١٥): ليونيل دين Lionel Dean، خاتم ذهبي ، ٢٠١٥م. (Hoskins, 2018)

الأبعاد التقنية:

- **الخامة المستخدمة:** الذهب.
- **التقنية المستخدمة:** الطابعة المعدنية ثلاثية الأبعاد المباشرة.
- **الأسلوب التشكيلي:** الصهر الانتقائي بالليزر (SLM).

القيم الفنية والجمالية:

- **التكرار:** تصميم الحلقة يتميز بتكرار العناصر الزخرفية بشكل دائري.
- **الفراغ:** الاستخدام الذكي للفراغات في التصميم يزيد من خفة القطعة ويضيف طابعًا ديناميكيًا.
- **التنوع:** مزيج من الأشكال العضوية والهندسية يعطي توازنًا بصريًا.

العمل الرابع: بثشبع غروسمان Bathsheba Grossman، "هايبروين Hyperwine":

شكل (١٦): بثشبع غروسمان Bathsheba Grossman، "هايبروين Hyperwine" ، ٢٠٠٨ . (Mongeon, 2015)

الأبعاد التقنية:

- **الخامة المستخدمة:** البرونز.
- **التقنية المستخدمة:** الطابعة المعدنية ثلاثية الأبعاد المباشرة.
- **الأسلوب التشكيلي:** الصهر الانتقائي بالليزر (SLM).

القيم الفنية والجمالية:

- **الترابط:** الأشكال المتداخلة تعكس وحدة التصميم وتكامله.
- **الحركة:** التصميم يوحي بالديناميكية من خلال الأشكال المنحنية والملتوية.

ثانيًا: الأشغال المعدنية باستخدام تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد غير المباشرة (Indirect Metal-3DP):

العمل الأول: صوفي كان Sophie Kahn، "رئس امرأة شابة" Head of a Young Woman:

شكل (١٧): صوفي كان Sophie Kahn، "رئس امرأة شابة" Head of a Young Woman، ٢٠٠٤. برونز (Hoskins, 2018)

الأبعاد التقنية:

- **الخامة المستخدمة:** البرونز.
- **التقنية المستخدمة:** الطابعة المعدنية ثلاثية الأبعاد غير المباشرة.
- **الأسلوب التشكيلي:** الطباعة بالبوليمر كأساس، متبوعة بتقنية الصب التقليدي لإنتاج الشكل النهائي.

القيم الفنية والجمالية:

- **التوازن** :العمل يظهر توزيعًا متساويًا بين الكتلة والفراغ.
- **الملمس** :الملمس البرونزي الخام يضفي طابعًا كلاسيكيًا.

العمل الثاني: جوشوا هاركر Joshua Harker، تشابك Tangle:

شكل (١٨): جوشوا هاركر Joshua Harker، تشابك Tangle، ٢٠٠٤م، (Scott, 2018)

الأبعاد التقنية:

- **الخامة المستخدمة:** النحاس.
- **التقنية المستخدمة:** الطابعة المعدنية ثلاثية الأبعاد غير المباشرة.
- **الأسلوب التشكيلي:** الطباعة بالبوليمر كأساس، متبوعة بتقنية الصب التقليدي لإنتاج الشكل النهائي.

القيم الفنية والجمالية:

- **الإيقاع** :استخدام التكرار المتقن للعناصر الشبكية يخلق انسجامًا بصريًا.
- **التداخل:** التكوين الهندسي يبرز المهارات التقنية في تصميم الأشكال المعقدة.

العمل الثالث: جوشوا هاركر Joshua Harker، Crania Anatomica Filigre:

شكل (١٩): جوشوا هاركر Joshua Harker، Crania Anatomica Filigre، ٢٠١١م.

(Mongeon, 2015)

الأبعاد التقنية:

- **الخامة المستخدمة:** النحاس.
- **التقنية المستخدمة:** الطابعة المعدنية ثلاثية الأبعاد غير المباشرة.
- **الأسلوب التشكيلي:** الطباعة بالبوليمر كأساس، متبوعة بتقنية الصب التقليدي لإنتاج الشكل النهائي.

القيم الفنية والجمالية:

- **الاتزان** :العمل يظهر توازنًا بصريًا قويًا بين الأشكال المتكررة والمساحات المفتوحة.
- **الإيقاع** :استخدام التكرار المتقن للعناصر النخرفية يخلق انسجامًا بصريًا.

المناقشة والإستنتاجات:

أولًا: المناقشة:

يستعرض البحث موضوع الأبعاد التقنية والجمالية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية في مجال الأشغال المعدنية، مع تسليط الضوء على الإمكانيات الإبداعية والفنية التي تقدمها هذه التقنية، حيث أبرزت الدراسة دور هذه التقنية في تحقيق تطورات ملموسة في التصميم والتنفيذ الفني. كما استعرض البحث العمليات التقنية والتطبيقات العملية المرتبطة بالطباعة ثلاثية الأبعاد، مع التركيز على إمكانياتها الإبداعية في مجالات التعليم والفنون. كما أستعرض البحث الجوانب التقنية للطباعة ثلاثية الأبعاد بما في ذلك التصنيفات والعمليات المباشرة وغير المباشرة، وكيفية توظيف هذه العمليات في الأعمال الفنية المعدنية. ومن أبرز النقاط التي تمت مناقشتها تشمل:

١. تطرق البحث إلى التصنيفات المختلفة للطباعة ثلاثية الأبعاد، بما في ذلك العمليات المباشرة والعمليات غير المباشرة.
٢. أوضح البحث كيف تتجاوز الطباعة ثلاثية الأبعاد الحدود التقليدية للتصنيع، مما يتيح للفنانين أساليب تساعد في إنتاج أشكال معقدة ودقيقة.
٣. تناول البحث الأبعاد الجمالية التي تضيفها الطباعة ثلاثية الأبعاد للأعمال الفنية المعدنية، مثل الجمالية المستحيلة، والجمالية الرمزية، والجمالية المبثوقة.

٤. ركز البحث على كيف يمكن للتقنية أن تعيد تعريف مفاهيم الإبداع الفني من خلال توفير حرية تصميم غير مسبوقة.

ثانيًا: الإستنتاجات:

١. توفر الطباعة ثلاثية الأبعاد إمكانيات إبداعية غير محدودة للأعمال المعدنية، مما يسمح بتنفيذ تصاميم معقدة ومخصصة بسهولة.
٢. تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد تسهم في تقليل الوقت اللازم من مرحلة التصميم إلى الإنتاج، مع تقليل الفاقد في المواد.
٣. إضافة أسلوب الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الأشغال المعدنية بكليات الفنون والتربية الفنية في المناهج الفنية يساعد على تعزيز مهارات الطلاب ويتيح لهم تطبيقات عملية لأفكارهم.
٤. تعد التكنولوجيا محركًا للابتكار في الفنون والصناعات، مما يفتح آفاقًا جديدة للبحث في مجالات التصميم والإنتاج.
٥. تقلل الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP) من التكلفة الزمنية والمادية المرتبطة بعمليات التصنيع التقليدية، مما يجعلها خيارًا مستدامًا اقتصاديًا.
٦. تساهم الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP) في تقليل النفايات، مما يدعم الاستدامة البيئية.

النتائج:

١. تعزيز لتقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP) نهج متعدد التخصصات بين معلمي الفنون والفنانين والفنيين لدعم دمجها في العملية التعليمية.
٢. توفر الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP) الكثير من الوقت والجهد من مراحل التصميم وصولًا إلى النموذج النهائي، وكذلك المناخ الإبداعي للفنانين وطلاب الفنون.
٣. تتيح تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal-3DP) المزيد من الالتزام والتحفيز والمشاركة والوصول إلى مستويات أعلى من الإبداع الفني في مجال الأشغال المعدنية.

٤. ستساعد تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP) في مجال الأشغال المعدنية في تغطية عددًا كبيرًا ونطاقًا كاملاً من الأسئلة حول كيفية دمجها وتوظيفها.
٥. توفر تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP) قدر كبير من المرونة في تنفيذ التصميمات التي كان يصعب تنفيذها بتقنيات التشكيل التقليدية.
٦. تؤدي تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP) لتطور كبير في الاحتمالات التصميمية بدلا من التفكير في قيود التصميم المعدني.
٧. تفتح الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP) مجالًا واسعًا لتطوير سبائك معدنية جديدة تتكيف مع المتطلبات الفنية والجمالية، مما يدعم الابتكار في استخدام المواد

التوصيات:

١. الاستفادة من دراسة تقنيات الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد (Metal–3DP) في مجال الأشغال المعدنية وتطبيقها كاتجاهات جديدة في العملية التعليمية.
٢. العمل على نشر الوعي الأشغال المعدنية أكاديميًا وفنيًا في المتاحف واستوديوهات الفن لإلهام التفكير النقدي والإبداعي وتمكينه.
٣. تشجيع مشاريع البحث الإجرائي التي يجريها معلمي الفنون والفنانون للتحقيق في تكامل الأشغال المعدنية والفن والتعاون عبر مجالات الموضوع.

المصادر والمراجع:

المصادر والمراجع العربية:

١. أحمد رشا فوزي. وعبدالموجود، ابراهيم دسوقي. (٢٠٢٣). دراسة تطبيقية لتصميم وتنفيذ طابعة خزفية ثلاثية الأبعاد. مجلة جامعة جنوب الوادى الدولية للعلوم التربوية، المجلد ٦، العدد ١١، ٢١١–٢٥٠. doi: https://doi.org/10.21608/musi.2023.330547
٢. سليمان، ابراهيم دسوقي عبد الموجود. (٢٠٢٤). معالجة الطينات المحلية لإنتاج خزفيات معاصرة باستخدام تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد. رسالة دكتوراة، كلية التربية النوعية، جامعة جنوب الوادي، مصر. doi: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35203.11047

٣. العامري، محمد حمود. (٢٠١٦). الاتجاهات المعاصرة في التربية الفنية. جامعة السلطان قابوس، كلية الآداب والعلوم الاجتماعية، *مجلة الآداب والعلوم الاجتماعية، مج٧, ع١* ، ص ٢٣٧.، ص. ٢٢١-٢٤١.

٤. عبدالموجود، ابراهيم دسوقي. وأخرون. (٢٠٢٣). الأبعاد التقنية لتكنولوجيا الطباعة ثلاثية الأبعاد في مجال الخزف. مجلة جامعة جنوب الوادى الدولية للعلوم التربوية، المجلد ٦، العدد ١١، ١٥٣-١٨٦. doi: https://doi.org/10.21608/musi.2023.227395.1132 .

٥. محسن، وميض عبد الكريم. (٢٠١٨). تكنولوجيا التصنيع بالإضافة وانعكاساتها في التصميم الصناعي المعاصر. الجمعية العلمية للمصممين، مجلة التصميم الدولية، المجلد ٨، العدد ١، ٦٣-٦٩.

٦. المعداوي، غادة دسوقي. وحسين، واسماء عبد المنعم. (٢٠٢١). الطباعة الرقمية الثلاثية الأبعاد وآثارها على تطوير مهارات التفكير الإبداعي لطلاب كليات الفنون التطبيقية. مجلة الفنون والعلوم الإنسانية، العدد ٧. doi: https://doi.org/10.21608/mjas.2021.187601

المصادر والمراجع الأجنبية:

7. Abdulmajid, M. (2020). Technical Dimensions Of 3d Printing Techniques in The Field of Arts And The Education System. Research Journal Specific Education, Faculty of Specific Education, Mansoura University Issue No. 59. doi: https://dx.doi.org/10.21608/mbse.2020.129497
8. Ahangar, P., & ey.al. (2019). Current Biomedical Applications of 3D Printing and Additive Manufacturing. MDPI, Applied Sciences, Volume 9, Issue 8, pp. 1-23. doi: https://doi.org/10.3390/app9081713
9. Ålgårdh, J., & et.al. (2017). Stateof-the-Art for Additive Manufacturing of Metals. Swedish: report 2016- 03898—State-of-the-art—Version 2.1, Swedish Arena for Additive Manufacturing of Metals, 22 June 2017.
10. Ansell, T. Y. (2021). Current Status of Liquid Metal Printing. Journal of Manufacturing and Materials Processing, vol. 5, no. 2. doi: https://doi.org/10.3390/jmmp5020031
11. Ballarin, M., & et.al. (2018). Replicas in cultural heritage: 3D printing and the museum experience. Int. Arch. Photogramm.

Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2, pp. 55-62. doi: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-55-2018

12. Beaman, J., & Traver , A. (1986). Part Generation by Layerwise Selective Sintering. Austin, Texas, United States: University of Texas Austin.
13. Beentjes, T. P. (2019). Casting Rodin's Thinker: Sand mould casting, the case of the Laren Thinker and conservation treatment innovation. PhD thesis. Netherlands: Faculty of Humanities, University of Amsterdam.
14. Bernal, P. N., & et.al. (2019). Volumetric Bioprinting of Complex Living-Tissue Constructs within Seconds. Advanced Materials, 31(42), 1904209. doi: https://doi.org/10.1002/adma.201904209
15. Bhavar, V., & et.al. (2014). A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing. 4th International conference and exhibition on Additive Manufacturing Technologies-AM-2014, Septeber 1 &2. Banglore, India.
16. Buehler, E., & et.al. (2016). Investigating the Implications of 3D Printing in Special Education. ACM Transactions on Accessible Computing, Volume 8, Issue 3, 11. doi: https://doi.org/10.1145/2870640
17. Citarella, R., & Giannella, V. (2021). Additive Manufacturing in Industry. Appl. Sci, 11, 840. doi: https://doi.org/10.3390/app11020840
18. Dass, A., & Moridi, A. (2019). State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design. Coatings 9, no. 7: 418. doi: https://doi.org/10.3390/coatings9070418
19. Duffy, J. (2023, August 13). Characterizing metal powders for Additive Manufacturing. Retrieved from Malvern Panalytical Ltd is a Spectris company: https://www.materials-talks.com/analytical-tools-for-characterizing-metal-powders-for-additive-manufacturing/
20. Fang, X., & et.al. (2017). An investigation on effects of process parameters in fused-coating based metal additive manufacturing. Journal of Manufacturing Processes, 28. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.01.008

21. Frazier, W. E. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance volume 23. doi: https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z
22. Gibson, I., & et.al. (2015). Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing (Second Edition ed.). New York, USA: Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3
23. Gülcan, O., & et.al. (2021). The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review. Polymers, 13(16), 2829. doi: https://doi.org/10.3390/polym13162829
24. Hoskins, S. (2018). 3D Printing for artists, designers and makers (2nd edition ed.). USA: Bloomsbury Visual Arts.
25. ISO/ASTM 52900. (2015). Additive manufacturing — General principles — Terminology. USA: ASTM Compass.
26. ISO/ASTM 52910. (2018). Additive Manufacturing—Design—Requirements, guidelines and recommendations. . ISO; ASTM.: ISO: Geneva, Switzerland; ASTM: West Conshohocken, PA, USA.
27. Jorge, M. (2012). Fused Deposition Modeling of Metals. In International Solid Freeform Fabrication Symposium (pp. 836–845). Austin, TX, USA: The University of Texas Press. doi: http://dx.doi.org/10.26153/tsw/15394
28. Lancaster, R., & et.al. (2016). Structural Integrity of an Electron Beam Melted Titanium Alloy. Materials, 9(6), 470. doi: https://doi.org/10.3390/ma9060470
29. Leirmo, T. S., & Martinsen, K. (2019). Evolutionary algorithms in additive manufacturing systems: Discussion of future prospects. Procedia CIRP, 81. doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.174
30. Li, M. (2020). Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Volume 142, Issue 9. doi: https://doi.org/10.1115/1.4047430
31. Maloy, R. W., & et.al. (2017). 3D Modeling and Printing in History/Social Studies Classrooms: Initial Lessons and Insights. Contemporary Issues in Technology and Teacher Education,Vol. 17, Issue 2, 229 - 249.

32. Menano, L., & et.al. (2019). Integration of 3D Printing in Art Education: A Multidisciplinary Approach. *Computers in the Schools, Interdisciplinary Journal of Practice, Theory, and Applied Research, Vol. 36*, 222-236. doi: https://doi.org/10.1080/07380569.2019.1643442
33. Mireles, J., & et.al. (Mar 2013). Development of a Fused Deposition Modeling System for Low Melting Temperature Metal Alloys. J. Electron. Packag, Volume 135, Issue 1: 011008. doi: https://doi.org/10.1115/1.4007160
34. Mirzababaei, S., & Pasebani, S. (2019). A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel. Journal of Manufacturing and Materials Processing 3, no. 3: 82. doi: https://doi.org/10.3390/jmmp3030082
35. Mongeon, B. (2015). 3D Technology in Fine Art and Craft. England, UK: Routledge.
36. Mun, J., & et.al. (2015). Indirect additive manufacturing based casting of a periodic 3D cellular metal – Flow simulation of molten aluminum alloy. Journal of Manufacturing Processes, 17. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.11.001
37. Ngo, T. D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering, Volume 143. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012
38. Ninpetch, P., & et.al. (2020). A review of computer simulations of metal 3D printing. The Second Materials Research Society of Thailand International Conference,AIP Conf. Proc. 2279, 050002-1–050002-24. doi: https://doi.org/10.1063/5.0022974
39. Novak, E. (2022). 3D Printing in Education. Routledge. doi: https://doi.org/10.4324/9781138609877-REE81-1
40. Rashid, A. A., & et.al. (2021). Vat of polymers and polymer composites: Processes and applications. photopolymerization Additive Manufacturing, 47, 102279. doi: https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102279
41. Redwood, B., & et.al. (2017). The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. Amsterdam, Netherlands: 3D Hubs B.V.

42. Ron, T., & et.al. (2023). Additive Manufacturing Technologies of High Entropy Alloys (HEA): Review and Prospects. Materials, Volume 16, Issue 6 , 2454. doi: https://doi.org/10.3390/ma16062454
43. Rouf, S., & et.al. (2022). Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing . Sustainable Operations and Computers, 3, 258-274. doi: https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.05.001
44. Ruscitti, A. F., & et.al. (2020). A review on additive manufacturing of ceramic materials based on extrusion processes of clay pastes. Cerâmica, 66, pp. 354-366. doi:10.1590/0366-69132020663802918
45. Sames, W., & et.al. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. International Materials Reviews, Volume 61,Issue 5, 315-360. doi: https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649
46. Scott, C. (2018). The legitimacy of the 3D printer as both artistic tool and artistic medium: assessing the nature and aesthetics of 3D printing artistic output and the effect that 3D-printing may have on the borders of the creative landscape. Master's Thesis. London, UK: Faculty of Art, Design & the Built Environment, Ulster University.
47. Selema, A. (2022). Metal Additive Manufacturing for Electrical Machines: Technology Review and Latest Advancements. Energies 15, no. 3: 1076. doi: https://doi.org/10.3390/en15031076
48. Tebianian, M., & et.al. (2023). A Review on the Metal Additive Manufacturing Processes. Preprints, 2023080173. doi: https://doi.org/10.20944/preprints202308.0173.v1
49. Tillinghast, R. C., & et.al. (2014). Integrating three dimensional visualization and additive manufacturing into K-12 classrooms. IEEE Integrated STEM Education Conference. Princeton, NJ, USA: IEEE. doi: https://doi.org/10.1109/ISECon.2014.6891051
50. Tissen, L. N. (2022). 3D Printing and the Art World: Current Developments and Future Perspectives. IntechOpen. doi: https://doi.org/10.5772/intechopen.109107
51. Urhal, P., & et.al. (2019). Robot assisted additive manufacturing: A review. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 59.

doi: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.05.005
52. Vafadar, A., & et.al. (2021). Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. Applied Sciences, 11(3), 1213. doi: https://doi.org/10.3390/app11031213
53. Villafuerte, J. (2014). Considering cold spray for additive manufacturing. AM&P Technical Articles 172 (5). doi: https://doi.org/10.31399/asm.amp.2014-05.p050
54. Wohlers Report. (2022). Analysis. Trends. Forecasts. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. USA: Wohlers.
55. Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering Volume 2012, Article ID 208760, 1-10. doi: https://doi.org/10.5402/2012/208760
56. Wu, B., & et.al. (2018). A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. ournal of Manufacturing Processes, 35. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001
57. Yakout, M., & et.al. (2018). A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies. SSP;278. doi:https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.278.1
58. Zhang, X., & Liou, F. (2021). Introduction to additive manufacturing. In Additive Manufacturing A volume in Handbooks in Advanced Manufacturing (pp. 1-31). Amsterdam, Netherlands: Elsevier Inc. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00009-4
59. Zhong, J. L., & et.al. (2019). Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing. Int. J. Automation Technol., Vol.13 No.3. doi: https://doi.org/10.20965/ijat.2019.p0346