أثر الخواص الميكانيكية للمطبوعات ثلاثية الأبعاد المنتجة بتقنية النمذجة بالراسب المنصهر على إختيار الخامات الملائمة لتطبيقاتها

The impact of the mechanical properties of 3D Prints produced by the Fused Deposition Modelling technique on proper selection for selected application

م.د/ سارة إبراهيم عبدالرحمن رمضان
مدرس بقسم الإعلان والطباعة والنشر، كلية الفنون التطبيقية، جامعة بنها
bu.sara.ramadan@gmail.com

ملخص البحث: Abstract

احتلت الطباعة ثلاثية الأبعاد فى الآونة الأخيرة مركز الصدارة فى مجالات التصنيع المختلفة لإنتاج العديد من المنتجات الحيوية والحساسة والتى تتطلب مرونة ومتانة وأبعاد معينة.
هناك أنواع مختلفة من طرق معالجة الخامات والتى تعتمد عليها تقنيات الطباعه ثلاثية الأبعاد لمعالجة مواد مختلفة بطرق مختلفة لصنع المجسم النهائي وهى: التلبيد (Sintering) - الصهر (Melting)- الترسيب بالبلمرة الضوئية (Stereolithography) بحيث تنبثق تحت كل طريقة منها عدة تقنيات للطباعة تختلف فيما بينها بنوعية المادة الخام والخواص المطلوبة للمنتج وتطبيقاته .
كما تلعب الخواص الميكانيكية دورا هاما فى تحديد جودة المطبوعات ثلاثية الابعاد ولتحقيق الأداء الأمثل لكل منتج يجب تحديد الخامة المناسبة لإنتاجه بحيث يفى المطبوع ثلاثى الأبعاد بالغرض المخصص لإستخدامه ؛ فى ظل تعرضه لمجموعه من الإجهادات الميكانيكية كقوى الشد والتآكل.
وتعتبر تقنية النمذجة بالراسب المنصهر من أكثر تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد شيوعا فى السوق المصرى نظرا لإنخفاض تكاليف الخامات والماكينات التى تعمل بهذه التقنية فضلا عن تنوع مطبوعاتها من حيث درجة المرونة أو الصلابة وتنوع إستخدامها فى العديد من المجالات.
يعد اختيار الخامة ميزة مهمة في تحقيق الأداء المطلوب في تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، ولاسيما للأداء الميكانيكي الذى يحدد أقصى قدرة للتحمل ومدى التوافق بين المطبوع ثلاثى الابعاد والغرض من إستخدامه.
من خلال استيفاء الخواص الميكانيكية الأساسية المطلوبة لتحمل ضغوط الإستخدام مما يحسن من فاعليه أداء المطبوع ثلاثى الأبعاد وطول عمره التشغيلى وبالتالى تحقيق الجودة المطلوبة.
وذلك من خلال رصد قيم (قوة الشد، معامل الشد، إجهاد الكسر، قوة الإنحناء (التمزق)، معامل الإنحناء، مقاومة الكسر) لمجموعه من العينات المطبوعه ثلاثية الأبعاد والمفاضلة بينهم عن طريق قيم قياس تلك الخواص وبالتالى تحديد التطبيقات الأنسب لكلا منها على حده.

كلمات دالة: Keywords

طباعة ثلاثية الأبعاد، النمذجة بالراسب المنصهر، قوى الشد، مقاومة التآكل

Paper received 27th January 2022, Accepted 15th April 2022, Published 1st of May 2023

المقدمة: Introduction

تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد هي تقنية تستخدم التصميم بمساعدة الكمبيوتر (CAD) وتعد من أحدث طرق التصنيع مؤخراً نظراً لإمكانياتها فى صناعة نماذج مختلفة بدون التقيد بشكل معين للتصميم، كذلك طباعة نماذج لها الخواص الميكانيكية المطلوبة بوزن أخف واستهلاك أقل للخامات فضلاً عن تنوع الخامات المستخدمة مما جعلها تجتاح معظم الصناعات الهامة بما يتناسب مع تطبيقاتها ولتحقيق ذلك لابد من الأخذ فى الإعتبار بالخواص الميكانيكية الأنسب لغرض الإستخدام بهدف تحقيق أعلى جودة طباعية كذلك توفير الوقت والجهد وتكاليف الإستبدال من خلال الإختيار المناسب للخامة الملائمة لكل تطبيق على حده.
تستخدم تقنية النمذجة بالراسب المنصهر خامات راتنجية مختلفة تختلف فيما بينها بخواصها الميكانيكية التى تجعل كلا منها مناسب لتطبيق معين.

مشكلة البحث: Statement of the Problem

وبذلك تتلخص مشكلة البحث كما يلي:

1- طباعة مطبوعات ثلاثيه الأبعاد بتقنيه النمذجة بالترسيب المنصهر بخامات بوليمرية لا يتم إختيارها بما يتناسب مع الإجهادات الميكانيكية التى يتعرض لها المطبوع ثلاثى الأبعاد فى التطبيقات المختلفة.
2- قصر العمر التشغيلى للمطبوعات ثلاثيه الأبعاد المنتجة بهذه التقنية نظرا لعدم قدرتها على تحمل الضغوط الميكانيكية للإستخدام من مقاومه الشد و التآكل الذى ينشأ عن الإحتكاك.

أهداف البحث: Research Objectives

1- طباعة مطبوعات ثلاثية الأبعاد ذات خواص ميكانيكية تفى بغرض استخدامها .
2- الاستفادة القصوى من الخواص الميكانيكية لكل خامة .
3- تحديد الخامة (البوليمر) المناسب لإنتاج المطبوعات ثلاثية الأبعاد بتقنية النمذجة بالراسب المنصهر بما يتناسب مع الإجهادات الميكانيكية للتطبيق .

أهمية البحث: Research Significance

1- تكمن أهمية تحديد الخامات الأمثل لطباعة منتجات ذات خصائص ميكانيكية ملائمة لاستخدامها مؤشراً هاماً على فاعلية المطبوعات ثلاثيه الأبعاد فى الأداء الوظيفى المنوطة به مما يحقق كفاءة أفضل وملائمه أعلى لتحمل الضغوط وبالتالى تحقيق الجودة العالية.
2- زيادة العمر التشغيلى للمطبوع ثلاثى الأبعاد نظرا لقدرته على تحمل اجهادات قوى الشد والتأكل لفترات أطول وبالتالى طول فترة تشغيله أو إستهلاكه وبالتالى توفير تكاليف الإستبدال وطباعة مطبوع جديد يحل محله.

منهج البحث: Research Methodology

استخدام المنهج الوصفى والتجريبى لقياس القيم المتغيرة لقوى الشد والتأكل وتحليلها بهدف الوصول إلى قيم تحدد إستخدام الخامات المناسبة لإنتاج كل تطبيق حسب متطلبات الإستخدام وذلك بطباعه مجموعه من العينات ثلاثيه الأبعاد بخامات مختلفة وإختبار بعض الخواص الميكانيكية (مقاومه الشد - التآكل) للعينات بجهاز قياس.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

محاورالبحث: Research limited

المحور النظري:

أولاً: تقنيات المعالجة فى الطباعه ثلاثيه الأبعاد (3D printing technologies):

تتنوع تقنيات المعالجة فى الطباعه ثلاثيه الأبعاد حسب نوعية المجسمات المنتجة وخامتها وطبيعه الإستخدام إلا إنها تشترك فى طرق معالجة ثابتة؛ وهى كالتالى:

1- التلبيد (Sintering): يقتصر التلبيد على تسخين الخامات فقط (دون أن تصل إلى درجة الإنصهار) وذلك لإنتاج عناصر (مجسمات) عاليه الجودة بحيث :

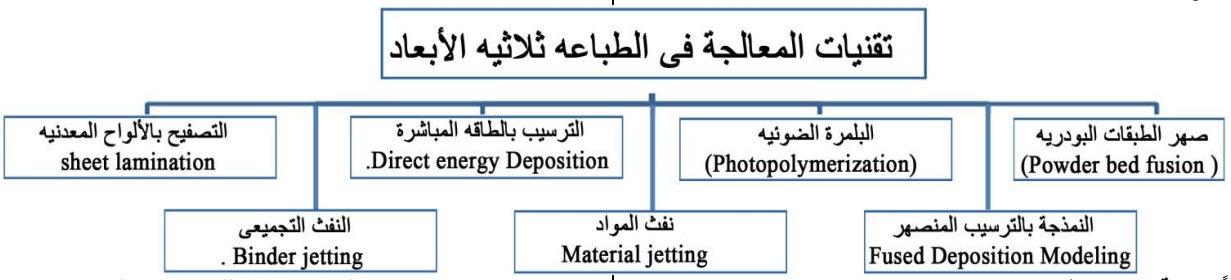
1/1 - يستخدم المسحوق المعدنى فى تقنيه التلبيد بالليزر المعدنى المباشر .

1/ 2 - يستخدم مسحوق الثرموبلاستيك للتلبيد بالليزر الإنتقائي.

2- الصهر (Melting): تعتمد هذه الطريقة على إستخدام مسحوق بودرى وشعاع إلكترونى للصهر بحيث تتم عملية ترسيب مباشر بالطاقه بإستخدام ليزر أو شعاع إلكترونى لطباعه المجسمات بصهر الخامات معا فى درجات حرارة عاليه .

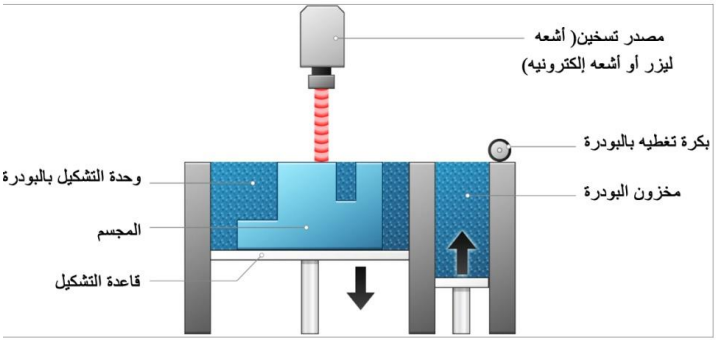
3- الترسيب بالبلمرة الضوئيه (Stereolithography): حيث تستخدم البلمرة الضوئية لتشكيل الأجزاء أو المجسمات عن طريق مصدر ضوئي مناسب لمعالجة الخامة بطريقة معينه بحيث تترسب طبقات رقيقه منها والتى تكون المجسم.

وفيما يلى إستعراض لتقنيات الطباعه ثلاثيه الأبعاد كما فى المخط التالى:



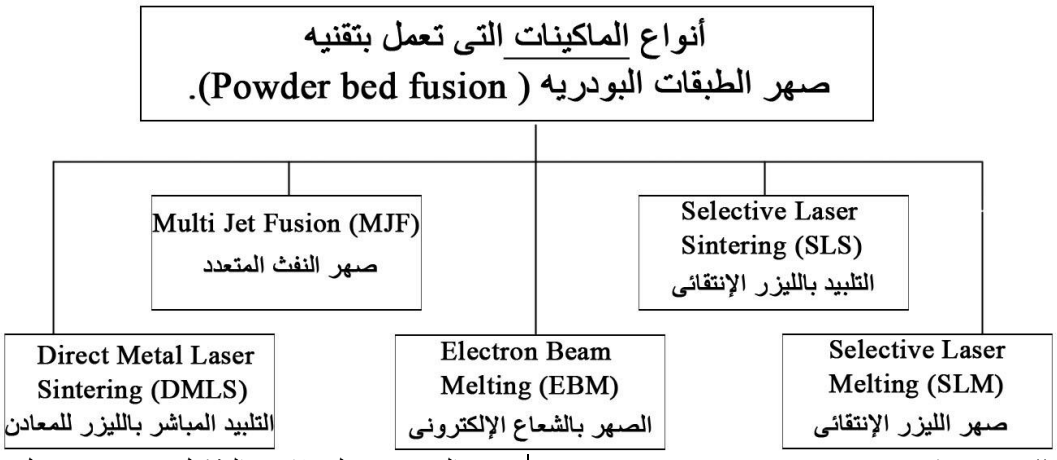
أولاً: تقنية صهر الطبقات البودريه Powder bed fusion:

يتم دمج كل طبقة من طبقات البودرة بشكل انتقائي باستخدام مصدر طاقة مثل الليزر أو شعاع الإلكترون، وتعتبر من أكثر تقنيات التصنيع التي يمكن استخدامها لتصنيع الأجزاء المعدنية المعقدة والصغيرة الحجم ؛ وتعمل على إنتاج أجزاء معدنية كثيفة بالكامل في وقت قصير وبدقة عالية. حيث تمتلك ميزات التصنيع الإضافي مثل حرية تصميم الأجزاء وتعقيد الأجزاء والوزن الخفيف وتوحيد الأجزاء في تصنيع الإضافات المعدنية لتطبيقات الطيران والنفط والغاز والتطبيقات البحرية والسيارات.



شكل يوضح تقنيه صهر الطبقات البودريه

أنواع الماكينات التى تعمل بتقنية صهر الطبقات البودريه:



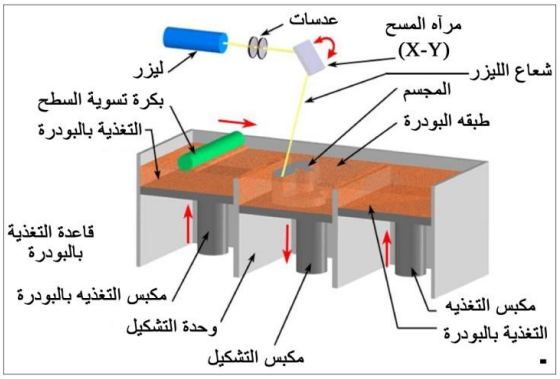
1- صهر الليزر الإنتقائى (selective laser melting) (SLM):

تشتمل الماكينة على وحدة مغلقة مليئة بغاز خامل (إما الأرجون أو النيتروجين بمستويات أكسجين أقل من 500 جزء في المليون)، كما تطلب هذه التقنية وجود بكرة أو كاشط لإعادة التغطية بطبقة رقيقة من المسحوق على قاعده التشكيل بحيث يتم عمل مسح ضوئي بمصدر حرارى على سطح طبقه المسحوق المعدنى فى مناطق محددة لترتبط جزيئات المسحوق فيها معا بروابط تقاطعيه وبمجرد عمل المسح الضوئي الحرارى لطبقه المسحوق تتحرك قاعدة التشكيل لأسفل استعدادا لإستقبال طبقة بودريه جديدة لينتج عن ذلك

شكل ثلاثى الأبعاد يتضمن جزء واحد أو عدة أجزاء منصهرة محاطه بمسحوق بودرى غير مستخدم وبمجرد الإنتهاء من تشكيل المجسم كله ترتفع القاعدة للنهايه لتسمح بإزاله المسحوق المعدنى غير المستخدم وعمل أى معالجة نهائيه مطلوبة .

2- تقنية التلبيد بالليزر الانتقائي Selective Laser Sintering (SLS) :

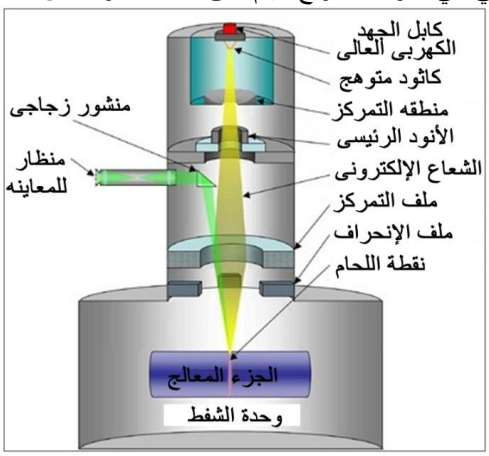
تستخدم الليزر لتلبيد أو دمج مادة بودريه طبقة تلو طبقة لإنشاء



شكل يوضح تقنيه صهر الليزر الإنتقائى

3- تقنيه الصهربالشعاع الإلكترونى Electron Beam Melting (EBM)

تعد هذه التقنيه مناسبه لمعالجة خامات معدنيه لإنشاء نماذج أولية سريعة التصنيع تصل درجة الحرارة المستخدمة فى هذه التقنية ما بين (700: 1000)°، مما يزيل الضغط المتبقي على المجسم ، ولن يحتاج إلى معالجة حرارية بعد تشكيله . يتم بثق مسحوق المعدن من خلال فوهة على هيئه طبقات. ثم صهر كل طبقة بواسطة شعاع إلكتروني في غرفة التفريغ. يتم بثق طبقة أخرى من المسحوق



شكل يوضح تقنيه الصهربالشعاع الإلكترونى

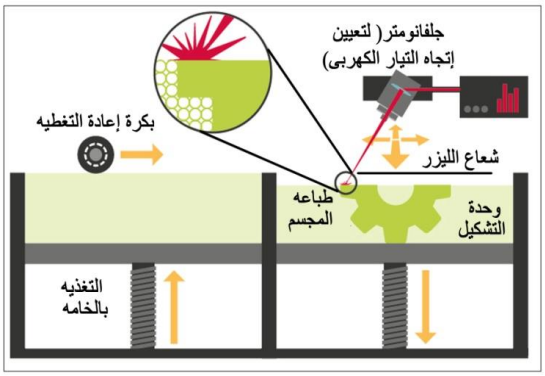
5- تقنية تلبيد المعادن بالليزر المباشر Direct Metal Laser Sintering(DMLS)

يتم تلبيد جزيئات مسحوق المعادن ودمجها معًا وتختلف هذه الطريقة عن التلبيد بالليزر الإنتقائى فى درجة حرارة التلبيد؛ حيث يجب تلبيد مادة البولي أميد في درجات حرارة تتراوح من (160: 200) °، في حين يذوب المعدن في درجات حرارة تتراوح من (1510: 1600)° ؛ مما يستلزم استخدام ليزر أعلى قوة كهربائية .

عندما تتحرك الإسطوانه يتم وضع طبقة من المسحوق المعدني، يلي ذلك تلبيد المسحوق بالليزر وخفض قاعدة التشكيل قبل إضافة طبقة جديدة من المسحوق، وهكذا حتى إكتمال طباعه المجسم.

تتطلب كلا التقنيتين (التلبيد المباشر بالليزر للمعادن والصهر بالليزر الإنتقائى) إلى داعم للمجسمات ويرجع ذلك إلى الحرارة العاليه المطلوبه لهذه الطريقه ويتم إزاله هذا الداعم فى عمليه المعالجة النهائيه سواء يدويا أو ميكانيكيا ليتم عمل معالجة حراريه بعدها للتخلص من أى ضغوط شد متبقيه .

مجسم صلب يتم بعد ذلك تنظيف المنتج النهائي، المغلف في مسحوق سائب بالفرشاة والهواء المضغوط. تشمل المواد الرئيسية المستخدمة في عملية الطباعة بهذه التقنية مادة البولي أميد (النايلون)، والألوميد (مزيج من مسحوق الألمنيوم الرمادي والبولي أميد)، والمواد الشبيهة بالمطاط متينه ولكنها تتميز ببعض المرونة، مما جعلها ممتازة للمقاسات المعقدة كالزنبركات.

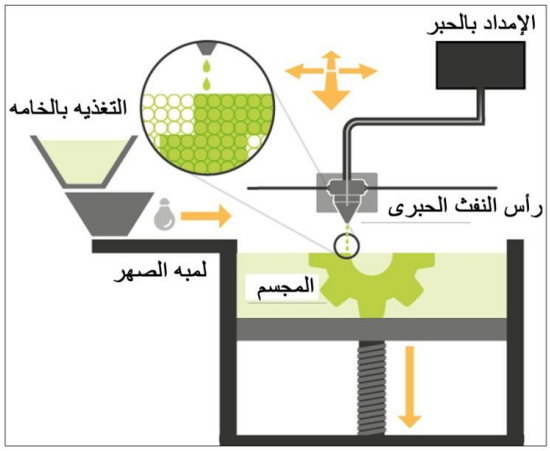


شكل يوضح تقنية التلبيد بالليزر الانتقائي

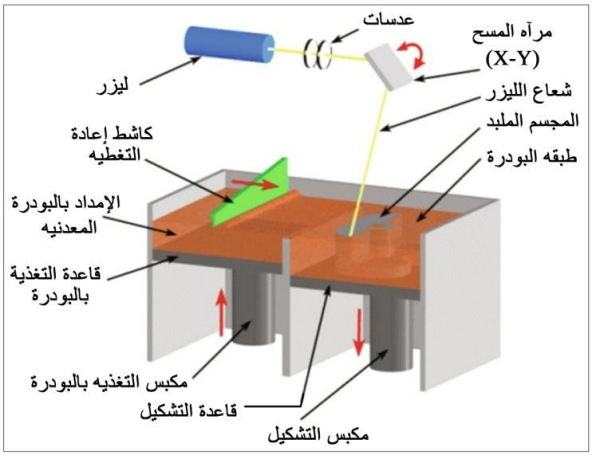
وصهرها بواسطة الحزمة الإلكترونية. تتكرر هذه العملية حتى اكتمال طباعه المجسم.

4- تقنية صهر النفث المتعدد Multi Jet Fusion (MJF):

تستخدم هذه التقنية المتطورة رأس نفث الحبر لتطبيق حبر ماص للحرارة عبر سطح طبقة المسحوق في المناطق التي سيتم تليبدها لإنشاء أجزاء. ثم يمتص هذا الحبر الحرارة من مصباح الأشعة تحت الحمراء وسلسلة من السخانات داخل الطابعة لتشكيل أجزاء مطبوعة ثلاثية الأبعاد.



شكل يوضح تقنية صهر النفث المتعدد

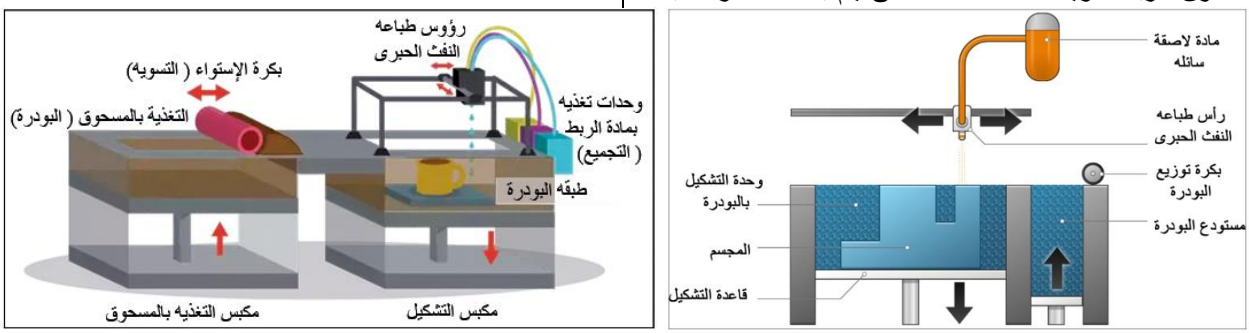


شكل يوضح تقنيه تلبيد المعادن بالليزر المباشر

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

ثانياً: تقنية النفث التجميعى (Binder jetting):

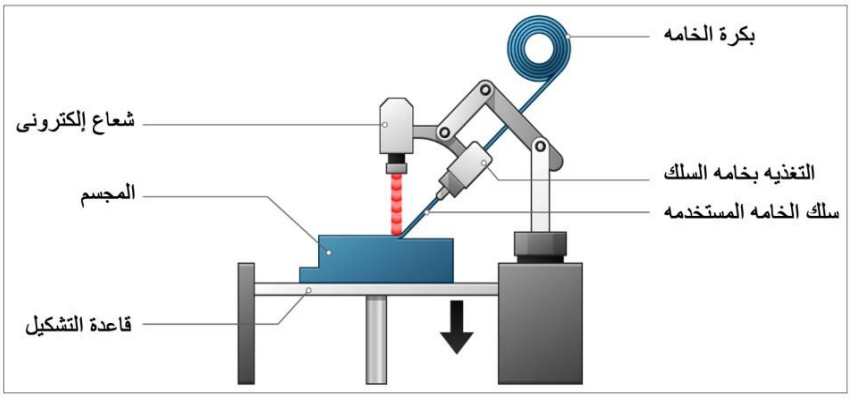
تقوم هذه التقنية على ترسب طبقة رقيقة من مسحوق معدنى على قاعدة (منصة) التشكيل وتغطى بعد ذلك بمادة لاصقة سائلة يتم توصيلها من خلال فوهات نفاثة لتعمل كمواد لاصقة لجزيئات المسحوق لتربط جزيئات الشكل معا؛ حتى يتم بناء كل جزء طبقه طبقه وبمجرد الإنتهاء من التشكيل تبدأ مرحله المعالجة النهائيه بتلبيد الاجزاء المعدنيه حرارياً أو خلطها بمعدن ذو نقطه إنصهار منخفضة كالبرونز.



شكل يوضح تقنيه النفث التجميعى (Binder jetting) للطباعه ثلاثيه الأبعاد

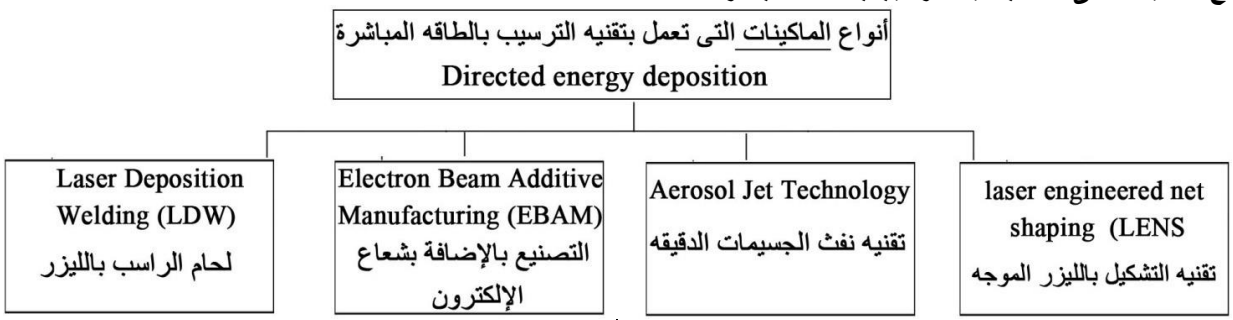
ثالثاً: الترسيب بالطاقة المباشرة (Direct energy Deposition):

تعتمد هذه التقنيه على إستخدام طاقة حرارية مركزة مثل شعاع الليزر أو شعاع إلكترونى لصهر السلك أو المسحوق بحيث يتم ترسيبه باتجاه أفقى لبناء الطبقات لتتراص الطبقات رأسياً مكونة المجسم وتستخدم نطاق واسع من الخامات (المعادن والسيراميك والبوليمرات).



شكل يوضح تقنيه الترسيب بالطاقة المباشرة

أنواع الماكينات التى تعمل بتقنية الترسيب بالطاقه المباشرة:



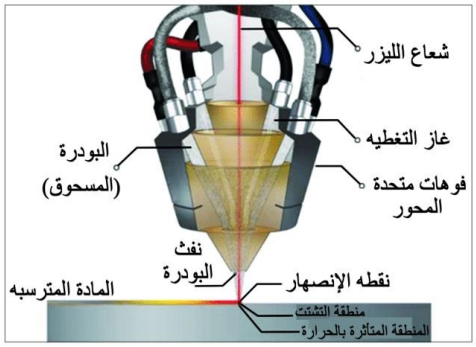
أولاً: تقنية التشكيل بالليزر الموجه LENS (laser shaping) engineered net

تستخدم هذه التقنية الليزر لبناء المجسمات طبقة تلو الأخرى مباشرةً من مسحوق المعادن أو السبائك أو السيراميك أو المواد المركبة. يجب أن تتم عملية التصوير في وحدة مغلقه ومملوءة بالأرجون بحيث تظل مستويات الأكسجين والرطوبة منخفضة جدًا. هذا يحافظ على نظافه المجسم ويمنع الأكسدة. يتم وضع المسحوق المعدني فى رأس الطبع (ترسيب المواد) ،يمكن معالجة المجسم بالحرارة أو الضغط عليه أو تشكيله آليًا بعد التشكيل.

ثانياً تقنية نفث الجسيمات الدقيقة Aerosol Jet Technology

تستخدم عملية Aerosol Jet التركيز الديناميكي الهوائي لإيداع الأحبار بدقة على المجسم. يتم وضع الحبر في رذاذ، مما ينتج عنه ضباب كثيف من قطرات محملة بالمواد يتراوح قطرها بين 2-5 ميكرومتر، ثم يتم تسليم رذاذ الهباء الجوي إلى رأس الترسيب، عندما يمر غلاف الغاز والهباء الجوي عبر الفوهة ، فإنهما يتسارعان ويتركزان في تيار ضيق من القطرات المتدفقة داخل غلاف من الغاز.

تعتبر أنظمة Aerosol Jet مناسبة بشكل مثالي لتطوير وتصنيع وإصلاح الأجهزة الإلكترونية والبيولوجية عالية الأداء للإلكترونيات الاستهلاكية كما يمكنها تشغيل مجموعة كبيرة من المواد بما في ذلك أحبار جزيئات النانو المعدنية الموصلة، ومعاجين عازلة للكهرباء، وأشباه الموصلات .

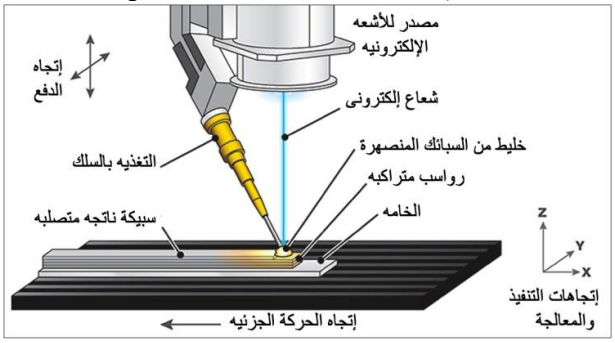


شكل يوضح تقنيه التشكيل بالليزر الموجه

ثالثاً: التصنيع بالإضافه بالشعاع الإلكتروني (Electron Beam Additive Manufacturing):

تقنية تصنيع بالإضافه تنتج هياكل معدنية كبيرة الحجم، يتم التغذية بالخامة على شكل سلك ،يرسب المعدنطبقة تلو الأخرى ، حتى يصل المجسم إلى شكل قريب من الشبكة ويكون جاهزًا للمعالجة النهائية. تتراوح معدلات ترسب المواد من (3: 9) كجم من المعدن/ الساعة. تشمل المعادن التيتانيوم والنيكل. يمكن أيضًا استخدام هذه التقنيه لإصلاح الأجزاء التالفة.

رابعاً: تقنيه لحام الراسب بالليزر Laser Deposition

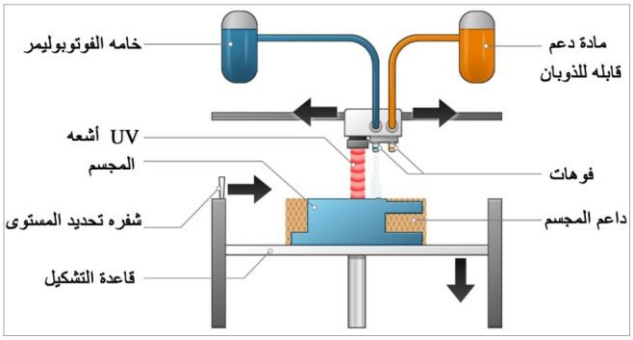


شكل يوضح التصنيع بالإضافه بالشعاع الإلكتروني

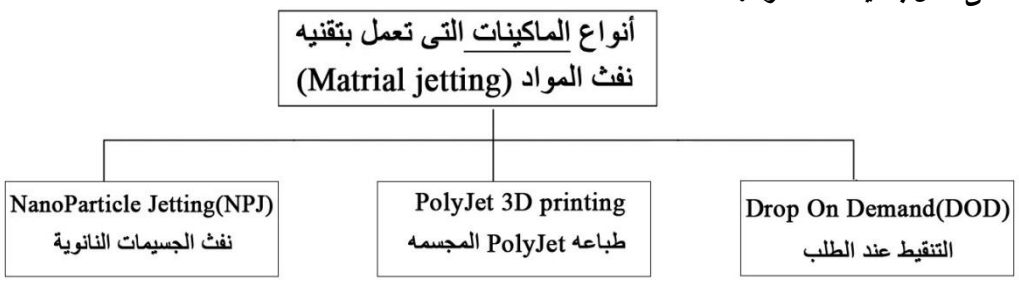
رابعاً: نفث المواد (Material jetting):

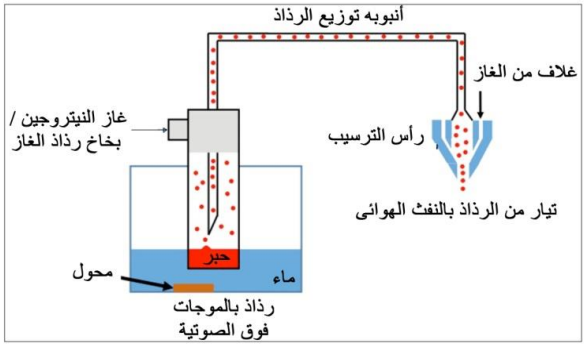
تعمل هذه التقنية بشكل مشابه لتقنية الطباعة بالنفث الحبرى بإختلاف استقرارالحبر على سطح الورق حيث يتم ترسيب طبقات الخامة السائله من واحدة أو أكثر من الرؤوس الطباعيه ليتم معالجة الطبقات بعد ذلك قبل ترسيب الطبقة التالية وتتطلب هذه التقنية وجود دعامة يتم تصنيعها من خامات قابله للذوبان فى الماء بحيث تذوب عند غسيلها بالماء بمجرد الإنتهاء من التشكيل.

تتميز هذه التقنية بالدقه العاليه إلا أن تكلفتها العالية من أهم التحديات التى تواجهها كما أن الأجزاء المنتجه بهذه التقنية تصبح ضعيفة وهشة مع مرور الوقت ومع ذلك فإن هذه التقنية لها القدرة على إنتاج أجزاء ملونه من الخامات المختلفة.



أنواع الماكينات التى تعمل بتقنيه نفث المواد:

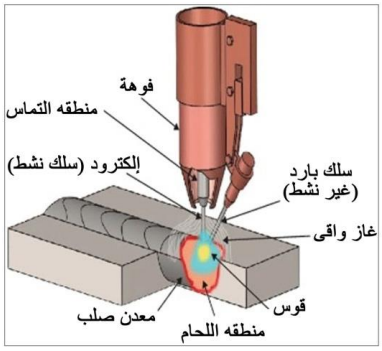




شكل يوضح تقنية نفث الجسيمات الدقيقة

Welding:

اللحام بالليزر هو عملية دمج المعادن أو اللدائن الحرارية معًا باستخدام شعاع الليزر، ويعمل ترسيب المعادن بالليزر عن طريق ترسيب مسحوق المعدن عبر فوهة واستخدام الليزر لإنتاج حوض لحام على السطح؛ في حين أن اندماج المعدن بالليزر يبني منتجًا طبقة تلو طبقة في طبقة مسحوق حيث يذوب الليزر المسحوق المعدني في المواضع المحددة وقد تكون المادة الخام على شكل سلك أو قوس كهربى.



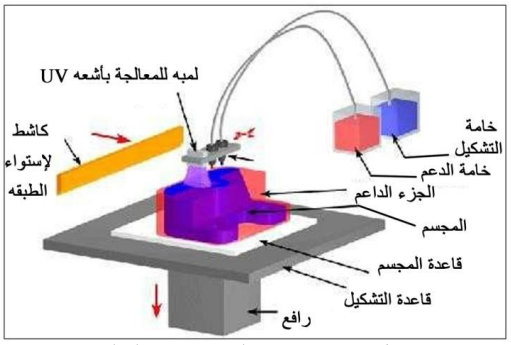
شكل يوضح تقنيه لحام الراسب بالليزر

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

1- تقنية التنقيط عند الطلب Drop On Demand (DOD)

تحتوي طابعة نفث المواد التي تعمل بنظام DOD على وحدتين نفث للطباعة :

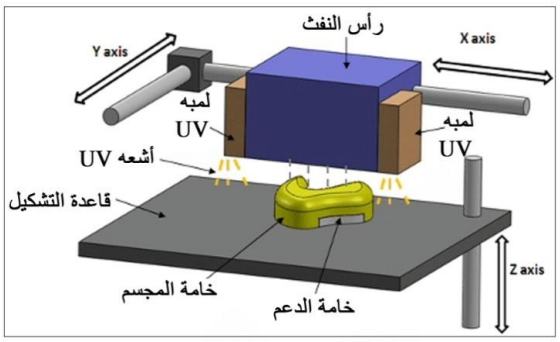
واحدة لإيداع مواد التشكيل والأخرى لمواد الدعم القابلة للذوبان، وتتبع طابعات DOD ثلاثية الأبعاد مسارًا محددًا وترسب المواد بطريقة نقطية لبناء طبقه طبقه للمجسم . تحتوى الماكينه على كاشط يقوم بالمسح بعد ترسيب كل طبقة لضمان سطح مستوٍ تمامًا قبل طباعة الطبقة التالية. تُستخدم هذه التقنية عادةً لإنتاج مجسمات تشبه الشمع، مما يجعلها تقنية طباعة ثلاثية الأبعاد غير مباشرة.



شكل يوضح تقنية النفث تحت الطلب

2- طباعة PolyJet المجسمة PolyJet 3D printing technology:

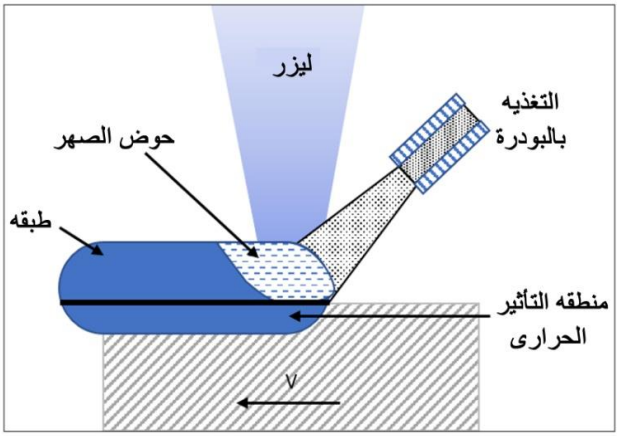
يتم نفث مواد فوتوبوليمريه على هيئه طبقات رقيقة جدًا. وتعالج كل طبقة بواسطة ضوء الأشعة فوق البنفسجية مباشرة بعد نفثها. تكررخطوات النفث والمعالجة، إلى أن يتم إنتاج نماذج معالجة بالكامل . يمكن بسهولة إزالة مادة الدعم الشبيهة بالهلام (المصممة خصيصًا لدعم الأشكال الهندسية المعقدة) باليد أو بالغسيل بالماء.



شكل يوضح تقنيه البولى جيت

ثالثا: نفث الجسيمات النانوية NanoParticle Jetting (NPJ)

تستخدم تقنية نفث المواد سائلًا يحتوي على جزيئات نانوية أو جزيئات نانوية داعمة، يتم وضعه في مستودع وضخه على شكل طبقات رقيقة للغاية. تؤدي درجات الحرارة المرتفعة داخل ماكينة الطبع إلى تبخرالسائل تاركًا وراءه أجزاء مصنوعة من مواد التشكيل.هذه التقنية مناسبة لخامات المعادن والسيراميك.

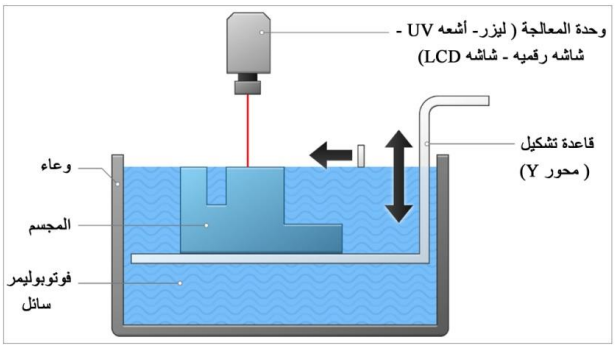


شكل يوضح تقنية نفث الجسيمات النانوية

خامساً: تقنيه البلمرة الضوئية (photopolymerization):

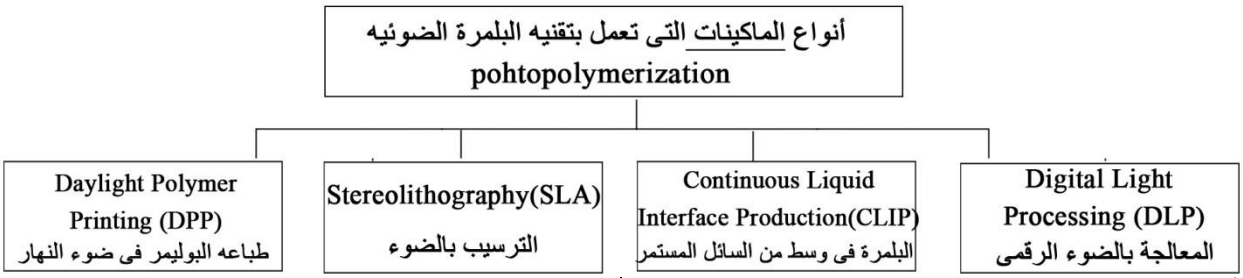
يتم معالجة البوليمر الضوئي السائل الموجود في وعاء (أو خزان) بشكل انتقائي بواسطة مصدر حراري. طبقة تلو الأخرى، يتم بناء مجسم مادي ثلاثي الأبعاد حتى اكتماله.

توجد أنواع متعددة من أجهزة المعالجة بالإضافة إلى أقدم تقنية تعتمد على الليزر. تعد أجهزة عرض المعالجة الرقمية للضوء وحتى شاشات LCD طريقة شائعة الآن في بلمرة المواد الضوئية نظرًا لتكلفتها المنخفضة ودقتها العالية جدًا. تتمثل إحدى مزايا هاتين التقنيتين مقارنةً بأشعة الليزر في قدرتها على معالجة طبقة كاملة من الراتينج في نفس الوقت، بينما يحتاج الليزر إلى إضاءة السطح بالكامل تدريجيًا عن طريق رسمه.



شكل يوضح تقنية البلمرة الضوئية

أنواع الماكينات التى تعمل بتقنيه البلمرة الضوئية:



أولاً: تقنية الترسيب بالضوء StereoLithograAphy (SLA)

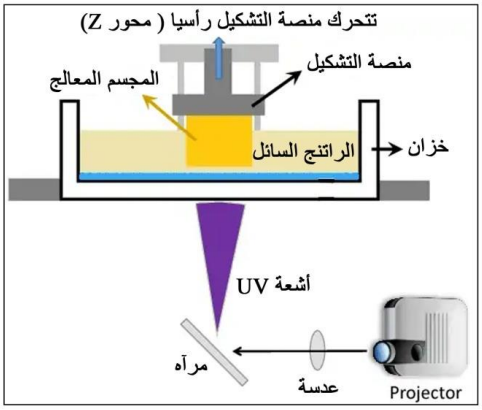
تعرف هذه التقنيه أيضًا باسم SL أو التصنيع البصري أو التصلب الضوئي أو طباعة الراتنج.

أثناء عملية التصنيع يتم تركيز حزمة مركزة من ضوء الأشعه فوق البنفسجية أو الليزر على سطح وعاء مملوء ببوليمر ضوئي سائل. يتم تركيز شعاع UV أو الليزر، مما يؤدي إلى إنشاء كل طبقة من المجسم ثلاثي الأبعاد المطلوب عن طريق ربط البوليمر أو تحطيمه.

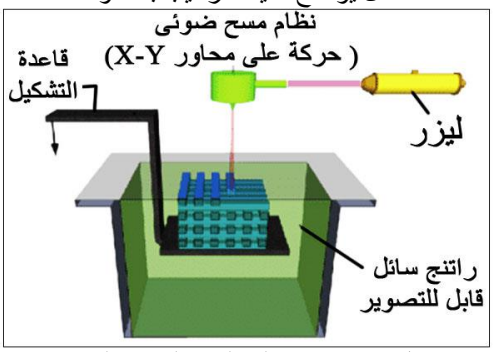
ثانياً: تقنية المعالجة بالضوء الرقمي Digital Light (DLP)

Processing

يتم استخدام شاشة جهاز عرض رقمي لإصدار وميض صورة واحدة لكل طبقة عبر النظام الأساسي بأكمله مرة واحدة. نظرًا لأن جهاز العرض عبارة عن شاشة رقمية، فإن صورة كل طبقة تتكون من وحدات بكسل مربعة، يمكن أن تحقق تقنيه DLP سرعه طبع أكبر لبعض الأجزاء، حيث يتم كشف كل طبقة بأكملها مرة واحدة، بدلاً من سحبها باستخدام الليزر.



شكل يوضح تقنية الترسيب بالضوء



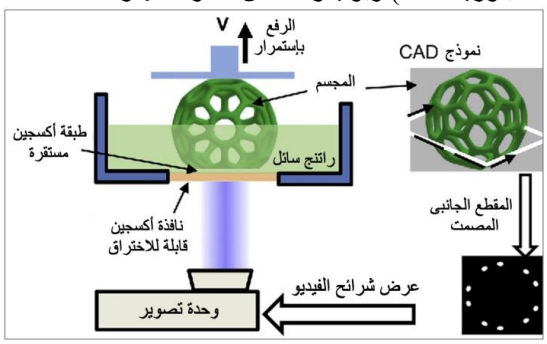
شكل يوضح تقنية المعالجة بالضوء الرقمى

ثالثاً: البلمرة في وسط من السائل المستمر Continuous Liquid Interface Production (CLIP)

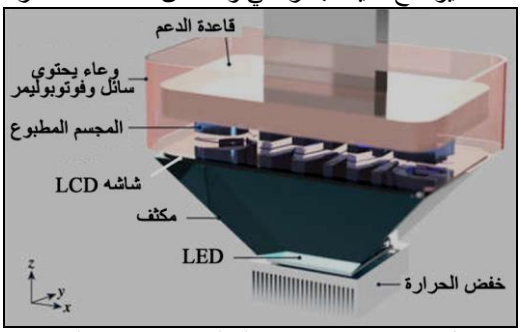
تحدث البلمرة الضوئية بإستخدام حوض الماء (خزانً) من الراتنج كمادة أساسية ؛جزء من قاع الحوض شفاف للأشعة فوق البنفسجية وبالتالي يسمى النافذة. يضيء شعاع من الأشعة فوق البنفسجية عبر النافذة ، مما يضيء المقطع العرضي الدقيق للمجسم . يتسبب الضوء في تصلب الراتنج (بلمرة ضوئية). يرتفع الجسم ببطء بما يكفي للسماح للراتنج بالتدفق تحته والحفاظ على الاتصال بقاع المجسم. يوجد غشاء منفذ للأكسجين أسفل الراتنج، تمنع هذه الواجهة السائلة الثابتة الراتنج من الالتصاق بالنافذة، مما يعني أن البلمرة الضوئية تمنع بين النافذة والبلمرة. على عكس تقنية الترسيب بالضوء (SLA)، فإن عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد مستمرة فى هذه التقنيه وأسرع بما يصل إلى 100 مرة من طرق الطباعة ثلاثية الأبعاد التجارية.

رابعاً: طباعة البوليمر فى ضوء النهار(DPP) Daylight Polymer Printing

تتم المعالجة لراتنجات تم تصنيعها لتكون أعلى حساسيه لضوء النهار بواسطة مركزية ضوئية بدلاً من استخدام ليزر أو جهاز عرض لمعالجة البوليمر، تستخدم عملية تصنيع DPP شاشة LCD (شاشة بلورية سائلة) وبوليمر حساس لضوء النهار.



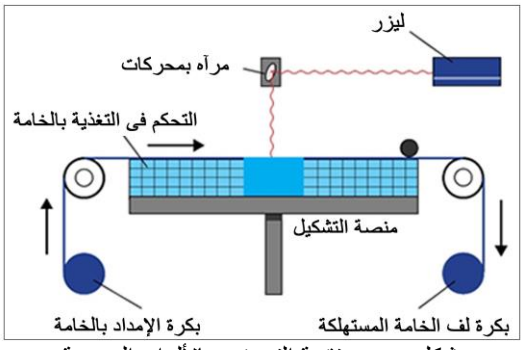
شكل يوضح تقنيه البلمرة في وسط من السائل المستمر



شكل يوضح تقنيه طباعة البوليمر فى ضوء النهار

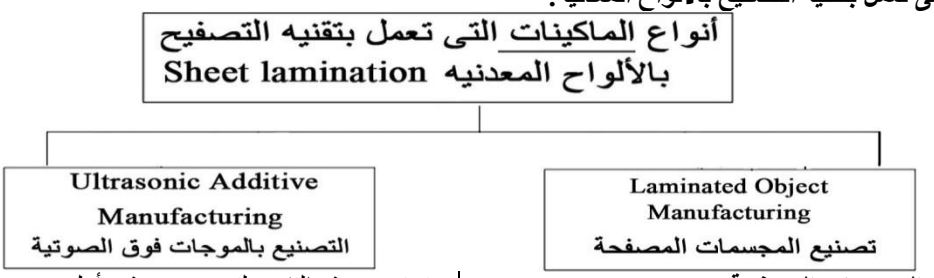
سادساً: تقنية التصفيح بالألواح المعدنية (sheet lamination)

إحدى طرق التصنيع المضاف (AM) حيث يتم ربط الصفائح الرقيقة من المواد (التي يتم توفيرها عادةً عبر نظام بكرات التغذية) معًا طبقة تلو الأخرى لتشكيل قطعة واحدة يتم قطعها إلى مجسم ثلاثي الأبعاد.



شكل يوضح تقنية التصفيح بالألواح المعدنية

أنواع الماكينات التى تعمل بتقنيه التصفيح بالألواح المعدنية:

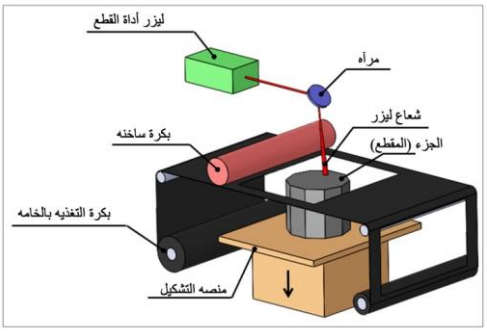


أولاً: تقنية تصنيع المجسمات المصفحة (laminated object manufacturing):

تستخدم هذه التقنيه لتصنيع نموذج أولي عن طريق التلوين وقطع المواد بالليزرمثل خامات الورق والأغشية البوليمرية والرقائق

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

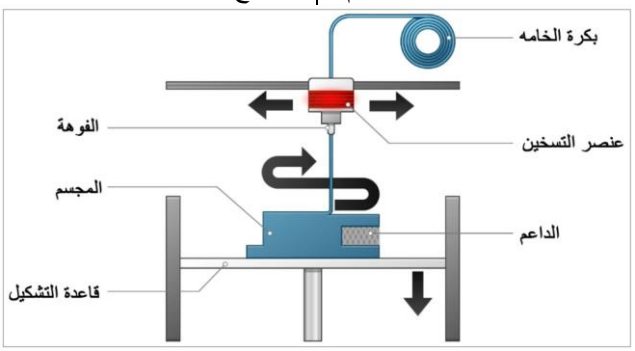
المعدنية مع رقائق البوليمر و التى تحقق خصائص ميكانيكية أفضل من الورق. حيث تكون الألواح مغلفة داخل كتل صلبة من خلال الالتصاق والتثبيت واللحام بالموجات فوق الصوتية. باستخدام الحرارة والضغط، يتم لصق كل رقاقة بالكتلة ويتم تشكيل طبقة جديدة. يتم توفير المواد عن طريق بكرة على جانب واحد من الماكينة ويتم سحبها إلى الجانب الآخر. توفر الأسطوانة المسخنة الضغط والحرارة اللازمين للطبقة الجديدة ليتم لصقها على النموذج الأولي المنتج بالفعل.



شكل يوضح تقنية تصنيع المجسمات المصفحة

سابعاً: النمذجة بالترسيب المنصهر (FDM) Fused deposition modeling

تعتمد هذه التقنية على استخدام بكرة من السلك والتى تغذى رأس الطبع التى تحتوى على فوهات ساخنه تلين الخامة الساخنة لتتساقط لأسفل وتستقر فى مكانها بمجرد تسخين رؤوس النفث وعند ذلك يتم



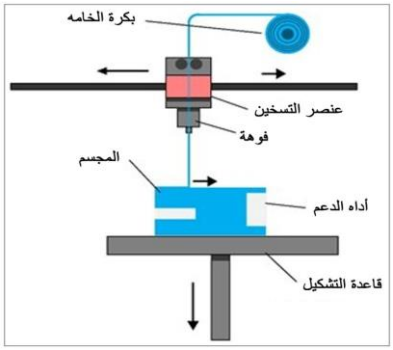
شكل يوضح تقنيه النمذجة بالترسيب المنصهر

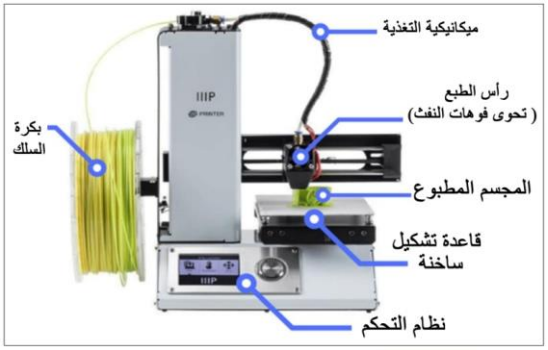
أنواع الماكينات التى تعمل بتقنيه النمذجة بالترسيب المنصهر:

أنواع الماكينات التى تعمل بتقنيه تدفق المواد Material Extrusion → التشكيل بالراسب المنصهر Fused deposition melting

تقنية تدفق المواد (Material Extrusion):

تتكون المواد الخام المستخدمة في هذه التقنيه من سلك صلب مصنوع من اللدائن الحرارية المملوءة وغير المعبأة، وتسمى أيضًا "الخيوط". يتم دفعه إلى رأس الطباعة، يسخن وينصهر في مستودع معين يسمى Hotend. عند ذوبان المادة الخام (Filament) يتم استخدام خيوط صلبة إضافية يتم دفعها في رأس الطبع، مما يخلق الضغط داخل المستودع ويستلزم خروج البوليمر المنصهر من خلال فوهة المستودع. بينما يستمر الأمداد بالسلك باستمرار إلى رأس الطباعة وتخرج الخيوط المنصهرة من نقطة التوصيل الساخنة، ويتحرك رأس الطباعة على طول المسار بهذه الطريقة ليتم ترسيب المواد بشكل مستمر، مما يشكل المجسم طبقة بعد طبقة.



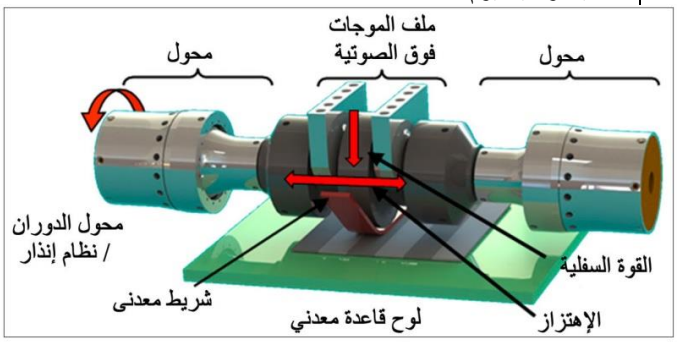


شكل يوضح تقنيه النمذجة بالترسيب المنصهر

حيث تعتمد طريقه تصنيع الأجزاء المصفحة على تتابع تراص طبقات من الخامه والمادة اللاصقه لتكوين المجسم.

ثانياً: تقنيه التصنيع بالإضافه بالموجات فوق الصوتية Ultrasonic additive manufacturing)

تقوم تقنية التصنيع بالإضافة بالموجات فوق الصوتية بربط شرائح رقيقة من المعدن عن طريق لحامهم معاً بالموجات فوق الصوتيه؛ وتتطلب طاقة وحرارة أقل عند تشغيل خامات الألمونيوم والإستنلس ستيل والتيتانيوم.



شكل يوضح تقنية التصنيع بالإضافة بالموجات فوق الصوتية

تبريدها لتتشكل طبقة من الخامة لتتحرك قاعدة التشكيل لأسفل لإستقبال طبقة جديدة. على الرغم من أن هذه التقنية أقل تكلفة كما تحتاج لوقت أقل للإعداد إلا أن من أهم عيوبها عدم الدقة فى أبعاد المجسم علاوة على ضرورة عمل معالجة نهائيه لتحسين صقل أسطح المجسمات.

الخامات الأكثر استخداماً فى تقنية النمذجة بالراسب المنصهر فى السوق المصرى:

1- حمض البولي لاكتيك PLA (Polylactic Acid):

يعتبر أكثر استخداماً من بين مواد الطباعة ثلاثية الأبعاد المستخدمة لكونه مستمد من مصادر متجددة مثل نشا الذرة وقصب السكر مما جعله أكثر انتشاراً لأنه صديق للبيئة (قابل للتحلل)، متوافق حيويًا (غير سام)، وقابل للمعالجة (خصائص حرارية أفضل). توفر خصائص بوليمر PLA العديد من المزايا مقارنة بالبوليمر التقليدي مثل الأكريلونيتريل بوتادين ستيرين (ABS). حيث يعتبرأكثر صلابة من ABS. ومع ذلك، فيعيبه ضعف قدراته على تحمل الحرارة ومقاومة المذيبات. ويميزه أن خيوط PLA لديها مقاومة جيدة للأشعة فوق البنفسجية وقوة شد جيدة.

2- أكريلونيتريل بوتادين ستيرين Acrylonitrile butadiene ABS styrenen) :

عبارة عن مادة طباعة ثلاثية الأبعاد صلبة ومقاومة للصدمات والحرارة. يتمتع ABS بمقاومة أعلى لدرجات الحرارة. نظرًا لأنه غير متبلور ، فإنه لا يذوب تمامًا

تشمل التطبيقات الشائعة لـ ABS أدوات الاستخدام النهائي، والأجزاء المتحركة، والأجزاء التي يجب أن تتحمل الضغط الميكانيكي العالي.

3- بولي كربونات + أكريلونيتريل بوتادين ستايرين polycarbonate +Acrylonitrile butadiene styrenen) PC/ABS:-

عبارة عن مزيج من اللدائن الحرارية المصنوعة من البولي كربونات (PC) والأكريلونيتريل بوتادين ستايرين (ABS)؛ تظهر خصائص قوة ممتازة، وصلابة عالية ومقاومة للحرارة وقوة انثناء جيدة.

يعد PC-ABS مناسبًا لمجموعة متنوعة من التطبيقات التي تشمل النماذج الأولية والأدوات والإنتاج بكميات قليلة.

4- (بولي ايثيلين تيريفثالات"جليكول معدل") ("modified Polyethylene Terephthalate "glycol-PETG:

إحدى الخامات الأكثر شيوعا فى الإستخدام وتكون الإختيار الأمثل لتصنيع الأجزاء التى تتحمل الإجهادات الميكانيكية كما تستخدم فى الأجزاء المقاومه للماء نظرًا لقوة الإلتصاق بين الطبقات عند التصنيع ، مقارنه بخامة PLA فإنها أكثر مرونة ومقاومة للحرارة وأقل هشاشة وهى غير ملائمة لتصنيع الأجزاء الدقيقة.

5- خشب عديد حمض اللبنيك (Polylactic Acid wood) الخيوط الخشبية PLA Wood:

عبارة عن PLA معدل مع 30٪ من ألياف الخشب. تبدو الأشياء المطبوعة مثل خشب وعند الطباعة تنبعث منها أيضًا رائحة الخشب. الفتيل هش قليلاً ولكنه أكثرنقاوة من PLA، ويتميز بالمتانة العالية.

أهم الخواص الميكانية المؤثرة على أداء المطبوعات ثلاثية الأبعاد بتقنية الطبع بالراسب المنصهر:

1- قوة الشد (Tensile Strength):

تعرف قوة الشد للمادة على أنها نسبة الحمل الأقصى الذي يمكن للمادة أن تدعمه إلى منطقة المقطع العرضي الأصلية. كلما زادت قوة الشد لجزء ما زادت صعوبة تمدده وتطلب المزيد من القوة لتمديده. وتعتبر قوى الشد ضمن معاييرالحكم على جودة المواد ويحدث إجهاد الشد عندما يتعرض الجسم إلى قوى سحب أو شد.

معامل الانحناء هو مقياس لقوة المواد اللاصقة. غالبًا ما تُستخدم بيانات المعامل في تحليل الإجهاد (لنمذجة ثلاثية الأبعاد).

كما تعتبرقوة الانحناء، والمعروفة أيضًا بقوة التمزق المستعرض تُعرَّف بأنها أقصى إجهاد عند الألياف الخارجية على جانب الضغط أو التوتر للعينة. تمثل قوة الانحناء أعلى ضغط تتعرض له المادة في لحظة إنتاجها.

الاستطالة عند الكسر، والمعروفة أيضًا باسم إجهاد الكسر أو استطالة الشد عند الكسر، هي النسبة بين الطول المتزايد والطول الأولي بعد كسر العينة المختبرة عند درجة حرارة مضبوطة. وتشير إلى قدرة عينة بلاستيكية على مقاومة تغيرات الشكل دون تشقق.

وتعد خصائص الشد والانثناء هما العاملان الأساسيان لقياس قوة المواد.

ثانياً: مقاومه التآكل (Corrosion resistance) :

لا تعاني المواد البلاستيكية من معدل تآكل محدد. فهى عادة تكون مقاومة للهجوم الكيميائي أو تتدهور بسرعة. وتتعرض للهجوم إما عن طريق تفاعل كيميائي أو عن طريق الذوبان؛ والذوبان هو اختراق البلاستيك بواسطة مادة تآكل . يمكن تصنيف تآكل البلاستيك (البوليمر) بالطرق التالية فيما يتعلق بـظهور المشكلة :

1- تفكك أو تدهور طبيعته المادية بسبب نفاذية مذيب، أو عوامل أخرى.
2- الإشعاع.
3- الأكسدة ، حيث يتم مهاجمة الروابط الكيميائية.
4- الجفاف (غير شائع إلى حد ما).
5- التحلل المائي، حيث يتم مهاجمة روابط الإستر.
6- التدهور الحراري الذي ينطوي على إزالة البلمرة وربما إعادة البلمرة.

ستظهر نتائج هذه التأثيرات على هيئة (تليين، تفتيت، تلون، تذويب، إنتفاخ) .

يتأثر أيضًا تآكل مركبات البوليمر بعاملين آخرين :

1- طبيعة اللامينيت، ففي حالة الراتنجات المتصلدة بالحرارة، سيؤثر وقت المعالجة غير الكافي سلبًا على مقاومة التآكل، بينما سيؤثر وقت وإجراءات العلاج المناسب بشكل عام تحسين مقاومة التآكل.

يتم مزج المكونات الأخرى مع البوليمر لتعزيزها ببعض الخصائص والتي في كثير من الحالات تقلل من قدرة البوليمر على مقاومة هجوم بعض عوامل التآكل ولذلك من الضروري معرفة مكونات أي بوليمر قبل استخدامه.

2- النفاذية: جميع المواد قابلة للاختراق إلى حد ما للجزيئات الكيميائية، وخاصة فى البلاستيك تميل المواد إلى أن تكون ذات نفاذية أكبر من حيث الحجم وعليه تتعرض البوليمرات لإختراق الغازات أو السوائل أو الأبخرة.

ثانياً: الجزء التطبيقى:

أولاً: الخامات المستخدمة:

تم إختيار 5 عينات الأكثر استخداماً فى السوق المصرى فى الطباعة بتقنيه النمذجة بالراسب المنصهر ووجد أنهم (APS - PETG - ABS - PC/ABS - PLA Wood) والتى لها المواصفات الفنية الآتية:

	APS	PETG	ABS	PC/ABS	PLA Wood
الحد الأقصى لدرجة حرارة النفث (الطبع)	220 : 260 ℃	230 : 260 ℃	230 : 260 ℃	260 : 290 ℃	180 : 230 ℃
أقصى درجة حرارة لقاعدة التشكيل	80 : 110 ℃	70 : 100 ℃	90 : 110 ℃	100: 120 ℃	60 : 75 ℃

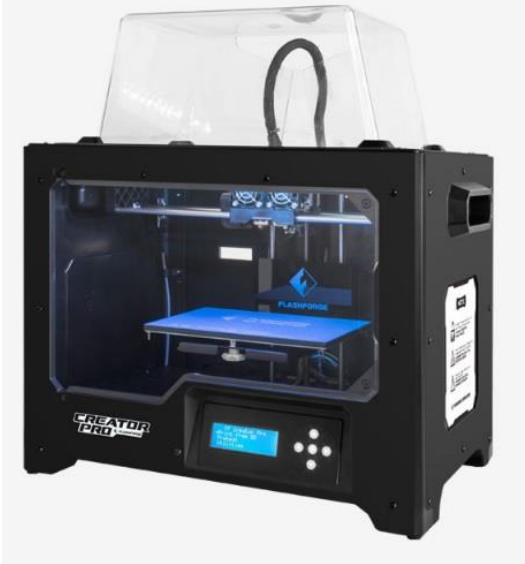
ثانياً: ماكينة الطباعة المستخدمة:

تم طباعة (5) مطبوعات ثلاثيه الأبعاد من الخامات البوليمرية (المحددة للتجربة) على ماكينة طبع ثلاثية الابعاد تعمل بتقنية النمذجة بالترسيب المنصهر طراز (Creator Pro flashforge) ومواصفاتها الفنية كالآتي:

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

توصيف الخواص الفنية لماكينة (Creator Pro flashforge)

التقنية الطباعية	النمذجة بالترسيب المنصهر	عدد فوهات النفث	2
		سرعة الطباعة	30 -100 مم / ثانية
الحد الأقصى لدرجة حرارة النفث (الطبع)	240 ℃ (464 °F)	قطرالخامة (السلك)	1.75مم (0.069 بوصة)
مقاس الطبع	(227 X 148X 150) مم (8.9 X 5.8 X5.9) بوصة	قطر فوهة	0.4 مم
أقصى درجة حرارة لقاعدة التشكيل:	120℃ (248°F)	سمك الطبقة	0.1 مم - 0.4 مم
الخامات المتاح إستخدامها	PETG، ABS ، TPU95A،PLA	دقة الطباعة	± 0.2 مم

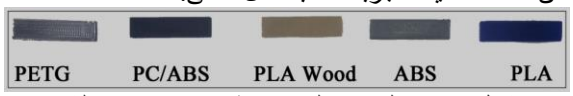


ماكينة طباعة ثلاثية الأبعاد طراز (Creator Pro flashforge)

ثالثاً: التجارب العمليه وأجهزة القياس المستخدمة:

1- قياس مقاومة الشد:

طباعة 5 عينات ثلاثية الأبعاد على شكل شرائط قصيرة (Dumbbell shape samples) أبعادها (1 × 4) سم؛ سمك 1 مم من الخامات قيد التجربة كما بالشكل التالى:



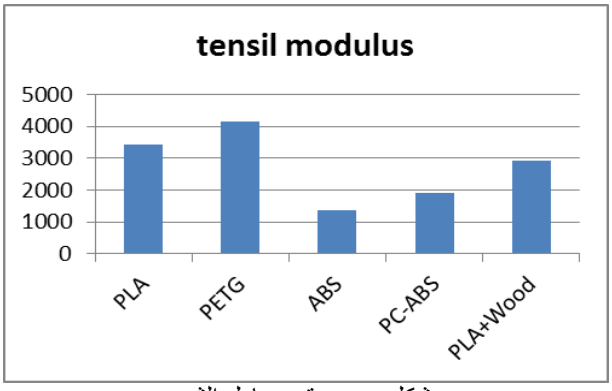
شكل يوضح العينات المستخدمة فى إختبار قوة الشد

يتم تركيب العينة على جهاز الشد (Tensile strength) الموضح بالصورة والذى يعمل بطريقة قياس DIN 53504 (48) كالتالى: الجهاز عبارة عن رأسين متقاطعين كما موضح بالشكل يتم تطبيق حمل شد متزايد لتمديد العينة حتى تنكسر. يتم رسم الاستطالة مقابل القوة المطبقة تلقائيًا بواسطة الأداة التي يتم من خلالها إنشاء منحنى الإجهاد وقياسها باستخدام جهاز قياس قوه الشد وتم القياس ورصد النتائج التالية:

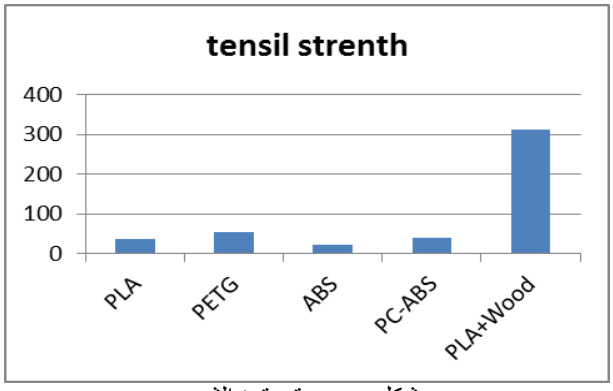
شكل يوضح جهاز قياس قوى الشد

		PLA	PETG	ABS	PC-ABS	PLA+Wood
قوة الشد	tensil strenth	35.6	53	22	40.651	312
معامل الشد	tensil modulus	3420	4150	1360	1915.42	2915
إجهاد الكسر	elongation at break	4.20%	5%	6%	3%	3%
قوة الانحناء	flexural strength	85.2	91	75	67.522	71.1
معامل الانحناء	flex modulus	2378	2230	2500	1929.2	1920

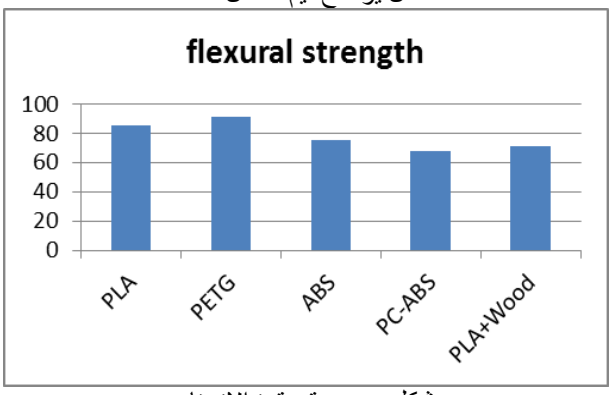
تمثيل قيم الجدول السابق والتى تمثل العلاقة بين المطبوعات ثلاثية الأبعاد المصنعة من الخامات سالفة الذكر وبين (قوة الشد / معامل الشد/ الإستطالة عند الكسر/ قوة الإنحناء/ معامل الإنحناء) فى الرسم البيانى التالى:



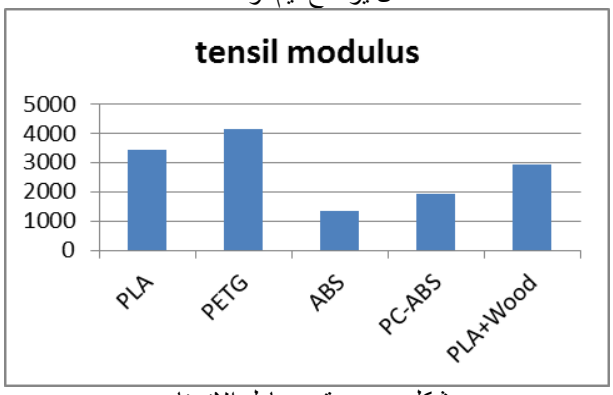
شكل يوضح قيم معامل الشد



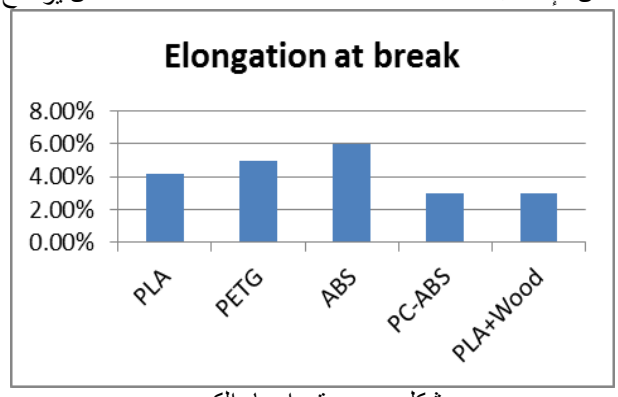
شكل يوضح قيم قوة الشد



شكل يوضح قيم قوة الإنحناء



شكل يوضح قيم معامل الإنحناء



شكل يوضح قيم إجهاد الكسر

نتائج القياس والمفاضلة:

1- أعلى قوة شد فى المطبوعات ثلاثية الأبعاد المنتجة بتقنيه النمذجة بالراسب المنصهر المطبوعات المنتجة بخامات راتنجية (أعلاهم PLA Wood يليه PETG يليه PC-ABS يليه PLA ويعتبر ABS أقلهم على الإطلاق).
2- الترتيب حسب أعلى معامل شد (أعلاهم BETG ثم PLA ثم PLA Wood ثم PC- ABS وABS أقلهم)
3- الترتيب تبعا لقوة الإنحناء (BETG الأعلى ثم PLA ثم ABS يليه PLA Wood وأقلهم PC- ABS)
4- الترتيب تبعا إجهاد الكسر (ABS يليه BETG ثم PLA ثم PC- ABS وأقلهم PLA Wood)
5- الترتيب تبعا لمعامل الإنحناء (ABS يليه PLA ثم BETG ثم PC- ABS وأقلهم PLA Wood).

تجربة قياس التآكل:

طباعة 5 عينات ثلاثية الأبعاد على شكل مقاطع دائريه قطرها (4) سم؛ سمك (0.5) سم من الخامات قيد التجربة كالشكل التالى:

شكل يوضح العينات المستخدمة فى إختبار مقاومة التآكل

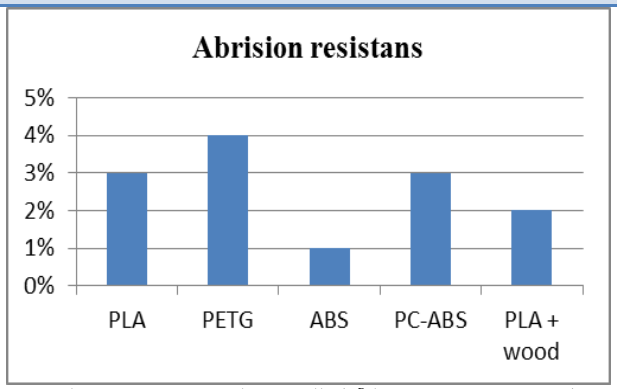
جهاز قياس التآكل Abrasion test الموضح بالصورة والذى يعمل بطريقة قياس DIN 53516 (77) كالتالى:

شكل يوضح جهاز قياس التآكل

يتم فرك العينة بورق صنفرة مثبت بعجلة دوارة بينما تتحرك العينة علي محور افقي مثبت بالجهاز حاملاً وزن قياسي فوق العينة لضمان استمرار الاحتكاك و الضغط علي سطحها الاوزان من 2.5 إلى 10 نيوتن وينتهى الاختبار عندما يظهر شكل يوضح جهاز قياس التآكل سطح العينة تاكلاً يلبي المتطلبات القياسية وتم رصد النتائج التالية:

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

	PLA	PETG	ABS	PC-ABS	PLA + wood
Abrision resistans	3%	4%	1%	3%	2%



شكل يوضح قيم مقاومة التآكل للعينات المطبوعه بخامات التجربة

نتيجة قياس مقاومة التآكل:

أعلى عينة لها القدرة على مقاومة التأكل بالترتيب كالتالى (BETG ثم تتساوى PC- ABS مع PLA يليهم PLA Wood ثم ABS أقلهم)

النتائج: Results

1- تتميز المطبوعات ثلاثيه الأبعاد المطبوعه بخامة PLA بأنها:
- أعلى قوة شد من ABS
- أعلى معامل إنحناء من BETG ، ABS ، PLA Wood
- أعلى فى قوة الإنحناء ومعامل الشد من PC- ABS، PLA (ABS ، Wood)
- أعلى إجهاد كسر من PC- ABS ، PLA Wood.
- أكثر مقاومة للتآكل من PLA Wood ، ABS.

2- تتميز المطبوعات ثلاثيه الأبعاد المطبوعه بخامة BETG بأنها :
- أعلى معامل شد وقوة إنحناء ومقاومة للتآكل على الإطلاق من كل الخامات.
- أعلى قوة شد من PC- ABS، ABS، PLA.
- أعلى فى إجهاد الكسر من PLA Wood، PC- ABS، (PLA Wood)
- أعلى فى معامل الإنحناء من (PLA Wood، PC-ABS)

3- تتميز المطبوعات ثلاثيه الأبعاد المطبوعه بخامة ABS بأنها:
- الأعلى فى تحمل إجهاد الكسر ومعامل الإنحناء على الإطلاق.
- الأقل فى مقاومة التآكل وقوة الشد ومعامل الشد على الإطلاق.
- أعلى فى قوة الإنحناء (التمزق) من (PLA Wood ، PC- ABS).

4- تتميز المطبوعات ثلاثيه الأبعاد المطبوعه بخامة PC- ABS بأنها:
- أعلى قوة شد من ABS، PLA.
- أعلى معامل شد من ABS .
- الأقل على الإطلاق فى قوة الإنحناء.
- أعلى مقاومة للتآكل من PLA Wood، ABS
- أعلى فى إجهاد الكسر ومعامل الإنحناء من PLA Wood

5- تتميز المطبوعات ثلاثيه الأبعاد المطبوعه بخامة PLA Wood بأنها:
- أعلى قوة شد على الإطلاق.
- أعلى معامل شد من PC- ABS ، ABS
- أعلى فى قوة الإنحناء من PC- ABS.
- أعلى مقاومة للتآكل من ABS
- الأقل على الإطلاق فى إجهاد الكسر ومعامل الإنحناء.

التوصيات: Recommendation

وفقاً لنتائج قياس العينات المطبوعه ثلاثية الأبعاد وترتيب أولويات الإستخدام حسب قيم خواصها الميكانيكية نوصى بالإستخدام الأنسب لكلا على حدة كالأتى:

1- استخدام المطبوعات المنتجة بخامة PLA للإستخدامات الجمالية بدلاً من الاستخدامات الميكانيكية وتصنيع الأغشية البلاستيكية والزجاجات والمستلزمات الطبية القابلة للتحلل، بما في ذلك البراغي والمسامير والألواح والقضبان المصممة للتحلل الحيوي في غضون 6 إلى 12 شهرًا.

2- استخدام المطبوعات المنتجة بخامةِ ABS في صناعة أغطية الرأس الواقية مثل القبعات الصلبة والخوذات وفى الطابعات والمكانس الكهربائية وأدوات المطبخ والفاكسات والآلات الموسيقية والألعاب البلاستيكية.

3- استخدام المطبوعات المنتجة بخامةِ PETG في زجاجات المياه وحاويات الطعام. ولصنع الأشياء التي تلامس الطعام، مثل الإكسسوارات الخاصة بالمطبخ أو أواني التقديم والحاويات .

4- استخدام المطبوعات المنتجة بخامة PC-ABS فى المصابيح اليدوية، والهواتف، ولوحات المفاتيح، والشاشات، وحافظات IP للسيارات، وأغطية العجلات، وأغطية الجرارات وبعض خوذات الأمان.

5- استخدام المطبوعات المنتجة بخامة PLA Wood فى تطبيقات البناء والتشييد، تليها مكونات السيارات. كما تُستخدم المركبات الخشبية والبلاستيكية على نطاق واسع في التزيين، والقولبة والانزلاق، والسياج.

وذلك بهدف رفع كفاءة المطبوع ثلاثى الأبعاد عن طريق الإستغلال الأمثل لإمكانياته ومنها (زيادة العمر التشغيلى له وعدم الحاجة للإستبدال فى فترات زمنية قصيرة وبالتالى توفير فى الوقت والتكلفة، تحمل ظروف التشغيل، كفاءه الأداء) بما يحقق الجودة العالية للمطبوعات والأداء الأمثل فى الاستخدام.

المراجع: References

1- Alaa Jabbar Almaliki, The Processes and Technologies of 3D Printing,Universiti Utara Malaysia, October 2015

2- Ahmad Adnan Bin Abu Bakar and 7 authors,The study of mechanical properties of poly(lactic) acid PLA-based 3D printed filament under temperature and environmental

University of Technology, 2015
14- John R. Tumbleston and others , Continuous liquid interface production of 3D objects, 2015
15- Dilan Ezgi DÜZGÜN and others , Continuous liquid interface production (CLIP) method for rapid prototyping, Journal of Mechanical and Energy Engineering, 2018
16- Yanis Gueche , Selective Laser Sintering (SLS), a New Chapter in the Production of Solid Oral Forms (SOFs) by 3D Printing, Université de Montpellier, 2021
17- Ali I. Al-Mosawi, Study of some mechanical properties for polymeric composite material reinforced by fibers , Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences , 2009.
18- Wenjun Xie and others, Corrosion Resistance of Stainless Steel and Pure Metal in Ternary Molten Nitrate for Thermal Energy Storage, 10th International Conference on Applied Energy , 2018, Hong Kong, China.
19- Rajan Kumaresan , Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications , The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022
20- Anup Kumar Deyin , What is Tensile Strength, Civil, Mechanical, Piping Stress Analysis, Piping Stress Basics
21- https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2020_03_23!09_45_39_PM.pdf
22- https://cdn02.plentymarkets.com/pvdtyofq45f2/propertyItems/43/material%20data%20sheet%20wood%20filament%20purefil.pdf
23- Ahmad Adnan Bin Abu Bakar and 7 authors,The study of mechanical properties of poly(lactic) acid PLA-based 3D printed filament under temperature and environmental conditions, June 2022
24- https://www.stratasys.com/contentassets/0cbbbe43e9ab4200a16c507eb99ebe7e/mds_fdm_pc-abs_0222a2.pdf
25- https://www.bcn3d.com/pla-vs-abs-comparing-3d-printing-filament/
26- https://prusament.com/media/2020/01/PETG_TechSheet_ENG.pdf
27- https://www.flashforge.com/product-detail/flashforge-creator-pro-3d-printer

conditions, June 2022
3- José Luis Dávila , Algorithms-aided design applied to the tool-paths generation for hybrid manufacturing, Dec 2020, Fundação de Apoio à Capacitação em Tecnologia da Informação Campinas, Brazil
4- Adam Hehr and others , Smart Build-Plate for Metal Additive Manufacturing Processes, , 2020, USA
5- Yayue Pan and others , Machine learning for continuous liquid interface production: Printing speed modeling, Journal of Manufacturing Systems, January 2019
6- Mattias Miedzinski, Materials for Additive Manufacturing by Direct Energy Deposition, Master's thesis in Materials Engineering, Department of Materials and Manufacturing Technology, chalmers university of technology, Gothenburg, Sweden 2017
7- R. Hedrick and others , Fused Deposition Modeling Design Rules for Building Large, Complex Components, CAMufacturing Solutions Inc, USA, 2016
8- M. Shellabear and others , DMLS – DEVELOPMENT HISTORY AND STATE OF THE ART, EOS GmbH Electro Optical Systems, Germany; 2004.
9- Marek Pagac , A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing, technical University of Ostrava, 2021.
10- Yi Suping and others , Accuracy Study on Laminated Object Manufacturing for the Metallic Functional Parts with Complex Surface, Chongqing University, Japan.
11- Ahmed Selema and others , Metal additive manufacturing for electrical machines : technology review and latest advancements, Department of Electromechanical, Systems and Metal Engineering, 2022
12- Jigang Huang , A Review of Stereolithography: Processes and Systems , Sichuan University , 2020
13- Ż. A. Mierzejewska and others , Selective Laser Sintering – Binding Mechanism And Assistance In Medical Applications, Bialystok

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License