مجلة الشرق الأوسط للنشر العلمي
المجلد (٧) العدد (٢)
الإصدار الثاني والعشرون
٢٠٢٤ (١٥-١)

تصميم وتصنيع قطعة معيارية بأحدث قواعد التصميم للتصنيع بالليزر الانتقائي لقياس الأداء و تقييم الدقة البعدية في التصنيع الإضافي

مُحَمَّد أمين داود ، مريم الحياني المشكوري
خديجة بكاي هاوري ، كمال الركلاوي
جامعة عبد المالك السعدي، كلية العلوم والتقنيات، طنجة، المغرب

نشر إلكترونياً بتاريخ: ١٦ نوفمبر ٢٠٢٤م

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

الملخص

هذا المقال يقدم دراسة تفصيلية حول تقنية الصهر بالليزر الانتقائي (Selective Laser Melting, SLM) لتصنيع قطع هندسية معيارية، مع التركيز على تقييم الدقة البعدية وجودة السطح والقيود التقنية للنظام. تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف الخصائص النهائية للأجزاء المصنعة باستخدام هذه التقنية، حيث يعتبر التصنيع الإضافي خطوة هامة نحو تحقيق الحرية الهندسية والتخصيص لمنتجات مبتكرة. ومع ذلك، تواجه هذه التقنية تحديات بارزة في طباعة الأشكال الهندسية المعقدة دات الاحجام الصغيرة و المركبة.

الهدف الأساسي لهذه الدراسة يتمثل في تصميم وإنتاج نموذج معياري يشتمل على ميزات مختلفة بأشكال وأحجام متنوعة في جميع الأبعاد الثلاثة يستخدم لتقييم القدرات القصوى لأنظمة SLM في تصنيع الأجزاء بأقصى دقة بعدية ممكنة من الفولاذ المقاوم للصدأ ٣١٦ L . من خلال تحليل توجه البناء بالتزامن مع الخصائص المادية المستخدمة وفحص الأشكال الهندسية المعقدة بأحجام وتوجيهات متنوعة، تم التوصل إلى تحديد القابلية لإعادة الإنتاج البعدي. استخدم نظام قياس بصري لحساب نطاق الأخطاء، وأظهرت النتائج أن دقة الأبعاد للميزات في الجزء المطبوع كانت ضمن حدود التسامح المقبولة، مما يدل على فعالية وكفاءة تقنية SLM في التصنيع الدقيق.

تقدم هذه النتائج إسهامات هامة في فهم الإمكانيات والتحديات المتعلقة بتقنية الصهر بالليزر الانتقائي، معرفية بأن هذه التقنية ليست فقط قادرة على تحقيق دقة عالية، بل أيضا تواجه قيوداً يمكن التغلب عليها من خلال البحث و التطوير المستمر.

الكلمات المفتاحية:الطباعة ثلاثية الأبعاد ، الصهر بالليزر الانتقائي، ٣١٦، الأشكال الهندسية المعقدة، النموذج المعياري، الدقة البعدية.

Abstract

This article presents a detailed study on Selective Laser Melting (SLM) technology for manufacturing standardized engineering parts, focusing on assessing dimensional accuracy, surface quality, and the technical constraints of the system. This study aims to explore the final characteristics of the parts manufactured using this technology, as additive manufacturing is an important step towards achieving engineering freedom and customization for innovative products. However, this technology faces prominent challenges in printing complex geometric shapes of small and composite sizes.

The primary goal of this study is to design and produce a modular prototype that includes various features in different shapes and sizes across all three dimensions, used to evaluate the ultimate capabilities of SLM systems in manufacturing parts with the highest possible dimensional accuracy from stainless steel 316L. Through analyzing the orientation of the build in conjunction with the physical properties used and examining complex geometric shapes in various sizes and orientations, reproducibility in dimension was identified. An optical measurement system was used to calculate the range of errors, and the results showed that the dimensional accuracy of the features in the printed part was within acceptable tolerance limits, demonstrating the effectiveness and efficiency of the SLM technique in precision manufacturing.

These results provide significant contributions to understanding the capabilities and challenges associated with Selective Laser Melting technology, recognizing that this technique is not only capable of achieving high precision but also faces limitations that can be overcome through continuous research and development.

Keywords: Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, 316L, Benchmark artifact, Complex geometric profiles, Dimensional accuracy.

*** المقدمة**

التصنيع الإضافي ، المعروف أيضا باسم الطباعة ثلاثية الأبعاد، هو تقنية تنتج الأشياء عن طريق إضافة مواد في طبقات باستخدام بيانات من نموذج ثلاثي الأبعاد بمساعدة بمساعدة الكمبيوتر، على عكس عمليات التصنيع الطرحية التقليدية [١]. يتمتع التصنيع الإضافي بالعديد من الفوائد

مثل القدرة على تصنيع أشكال هندسية معقدة مع تقليل هدر المواد، واستيعاب مجموعة واسعة من أحجام الأجزاء، وتقديم مجموعة متنوعة من خيارات المواد [٢]. على مدى العقود القليلة الماضية، شهدت تكنولوجيا التصنيع الإضافي توسعا سريعا ووجدت تطبيقات في مختلف القطاعات، بما في ذلك الطب والسيارات والفضاء والهندسة الحيوية وغيرها من الصناعات.

تم ابتكار العديد من العمليات، ترتكز كل منها على مبادئ متميزة مثل البثق والصهر والبوليمر الضوئي والتلبيد.

توفر هذه العمليات ميزة العمل مع مجموعة واسعة من المواد بدقة عالية، خاصة بالنسبة للأشكال الهندسية المعقدة [٣]، وهذه العمليات لا تقدم فقط دقة استثنائية في إنتاج الأشكال الهندسية المعقدة، بل توفر أيضا مرونة محسنة في التصميم ، ما يساهم غالبا في صناعة مكونات أخف وزناً [٤].

من بين مختلف عمليات تصنيع الإضافات المعدنية، تبرز تقنية الصهر بالليزر الانتقائي باعتبارها تقنية دمج طبقة المسحوق الأكثر تقدما؛ وقد اكتسب اعتماداً واسع النطاق، لا سيما في التطبيقات الطبية الحيوية وتطبيقات الفضاء الجوي [٥]. يتضمن SLM استخدام ليزر عالي الكثافة لإذابة ودمج المساحيق المعدنية بشكل انتقائي، مما يؤدي إلى إنتاج أجزاء شبه شبكية بكثافة كاملة تقريبا (تصل إلى ٩٩.٩٪ كثافة نسبية). [٦،٧].

يسمح الصهر بالليزر الانتقائي بتصنيع أجزاء فردية ذات أشكال هندسية معقدة تتوافق مع الخصائص الميكانيكية للمكونات المصنعة تقليديا في سلاسل كبيرة. نظرا لأن العملية العملية تشتمل على مواد معدنية مثل الفولاذ والألومنيوم والتيتانيوم والسبائك القائمة على النيكل، فغالبا ما يتم ملء البناء بالنيتروجين أو غاز الأرجون لإنشاء بيئة خاملة، مما يمنع يمنع القطع المعدنية الساخنة من الخضوع للأكسدة.

على غرار تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد الأخرى، تشتمل عملية الصهر بالليزر الانتقائي (SLM) على سلسلة من المراحل، بدءا من تقطيع بيانات CAD وتنتهي بإزالة القطع المطبوعة من لوحة البناء [٨].

تعتبر إرشادات التصميم حاسمة لزيادة كفاءة وجودة الأجزاء المصنعة باستخدام عملية SLM. وقد تطورت هذه المبادئ التوجيهية جنبا إلى جنب مع التقدم في تقنيات التصنيع، وهي تستخدم الآن كأداة فعالة للمصممين لاختيار طريقة الإنتاج وإنشاء التصاميم المثلى. علاوة على ذلك، تستخدم قواعد التصميم لتوصيل قدرات المعالجة الجديدة إلى المصممين والمهندسين، مما يسمح باستكشاف أكثر تعمقًا لعملية التصنيع.

وقد دعا العديد من الباحثين إلى استخدام أجزاء قياس الأداء، والمعروفة أيضا باسم "الأعمال الفنية للاختبار"، لتحسين الدقة وتقييم قدرة عمليات التصنيع AM في إنتاج أجزاء خالية من العيوب باستمرار وبأبعاد مقصودة [٩]. تعمل المصنوعات اليدوية كنماذج تمثيلية لتقييم عملية التصنيع بالإضافة إلى أداء الماكينة. يمكن تخصيصها لتقييم الدقة ودقة الأبعاد والتكرار وخشونة السطح [١٠، ١١].

علاوة على ذلك، فإن إنشاء قواعد تصميم مصممة خصيصا لمختلف عمليات إدارة الأعمال يمكن أن يعزز فهم هذه التقنيات، مما يوفر للمستخدمين حريات تصميم جديدة [١٢]. بالاعتماد على قواعد تصميم محددة ومواصفات المعايير الدولية. هذا النهج يمهد الطريق لتحسين

إمكانات التصنيع الإضافي، موفرا بدائل تصنيع مبتكرة تلبي متطلبات الصناعات الحديثة.

في هذا البحث، في هذه الورقة، قدم تصميم وتصنيع قطعة اختبار معيارية هندسية وفقًا لقواعد التصميم للتصنيع بالليزر الانتقائي ، ومعايير ISO/ASTM المتعلقة بالتصنيع الإضافي. وبالتالي، نَظهر أن الجزء التجريبي مصمم بميزات هندسية مختلفة لتوصيف الدقة البعدية لتقييم قدرة نظام SLM في تصنيع ميزات مختلفة بجودة سطحية جيدة. الهدف هنا هو فحص الأداء الهندسي لنظام SLM من خلال تقييم دقة الأبعاد للأشكال الهندسية المعقدة المنتجة من الفولاذ المقاوم للصدأ L٣١٦. ومن خلال تجنب قيود القياس، ستمكن هذه التكنولوجيا من إنتاج منتج عالي الجودة قد يلبي حتى التفاوتات المسموح بها في الآلات التقليدية.

*** أهمية البحث**

البحث الحالي يسلط الضوء على الأهمية البالغة لتطوير وتحديث قواعد التصميم المخصصة لتعزيز كفاءة التصنيع الإضافي باستخدام تقنية الصهر بالليزر الانتقائي (SLM). وذلك بالاعتماد على معايير دقيقة تمكّن من إنتاج قطع بمواصفات عالية الدقة، ويعزز بشكل ملموس الفهم العميق لهذه التقنيات الحديثة بالإضافة إلى معرفة حدود وإمكانياتها.

هذا النهج الشامل يفتح الباب أمام تحسين كبير في إمكانيات التصنيع الإضافي، موفرا بدائل تصنيع مبتكرة وفعالة تلبي متطلبات الصناعات الحديثة والمتقدمة. من خلال الاستفادة القصوى من هذه التقنية، يمكن للشركات والمؤسسات الصناعية تحقيق مستويات أعلى من الكفاءة والدقة في الإنتاج، مما يسهم في دفع عجلة التقدم الصناعي والبحث العلمي.

إن الاستثمار في البحث والتطوير لتحسين تقنيات التصميم والتصنيع بالليزر الانتقائي يمثل خطوة استراتيجية نحو الابتكار الصناعي الذي يواكب التطورات التكنولوجية العالمية، ويدعم تحقيق أعلى معايير الجودة والفعالية في إنتاج المعدات والأجزاء الصناعية.

*** أهداف البحث**

البحث الذي نُجريه يستهدف تعزيز قواعد التصميم المستخدمة في التصنيع الإضافي خاصة بتقنية الصهر بالليزر الانتقائي(SLM) ، لضمان إنتاج قطع بدقة متناهية تتوافق مع المعايير الدولية وتلبي الحاجات الصناعية المعاصرة. وكذا تعميق الفهم العلمي لديناميكيات الصهر بالليزر الانتقائي و دقة الأبعاد للمكونات المصنعة ، وذلك من خلال دراسات تجريبية مفصلة. و تقديم معرفة عميقة ومفصلة للمجتمع العلمي والصناعي حول أفضل الممارسات.

من خلال تحقيق هذه الأهداف، يسعى البحث لتقديم مساهمات مهمة في مجال التصنيع الإضافي، وتحديداً في استخدام تقنية الصهر بالليزر الانتقائي، والتي من شأنها دعم الابتكار وتعزيز التنافسية في الصناعات العالية التقنية على المستوى العالمي.

*** حدود البحث**

على الرغم من الإمكانيات الواسعة التي يقدمها هذا البحث ، فإنه يواجه عدة تحديات وقيود قد تؤثر على نطاق ونتائج الدراسة أبرزها تعقيد تقنية SLM إذ تعتبر عملية معقدة تتطلب دقة عالية في التحكم بالعديد من

المتغيرات مثل الطاقة، السرعة، ودرجة الحرارة. الأخطاء في أي من هذه العوامل يمكن أن تؤثر سلبا على دقة الأبعاد و جودة القطع النهائية. وكدا الحاجة لمزيد من الفهم النظري والعملي لتأثيرات المعالجات ما بعد الطباعة مثل السفع الرملي، التلميع، والمعالجة الحرارية على الخصائص للمنتجات يحتاج إلى دراسة معمقة.

مشاكل التوافق والتقييس وعدم وجود معايير موحدة للعمليات والمواصفات في تقنية SLM يمكن أن يؤدي إلى تحديات في التوافق بين مختلف الأنظمة والماكينات، مما يعيق التبادلية والفعالية.

إن التعامل مع هذه القيود يتطلب تركيزا مكثفًا على البحث والتطوير، وفهم التقنيات المستخدمة، والتعاون لتحقيق التقدم المطلوب في هذا المجال.

*** منهج البحث**

في إطار دراستنا ل لتقييم القدرات القصوى لتقنية الصهر بالليزر الانتقائي (SLM) في تصنيع الأجزاء بأقصى دقة بعدية ممكنة تم تبني منهج تجريبي حيث صمم مكون معياري بناء على الأعمال ذات الصلة وقواعد التصميم التي تعكس التعقيدات و التحديات الحقيقية المتوقعة في الاستخدامات الصناعية . تمت طباعة هذا المكون باستخدام تقنية SLM لتقييم قابلية إعادة الإنتاج وقدرة النظام على إنتاج الخصائص الهندسية المحددة بدقة عالية.

لضمان الدقة والتحقق من النتائج، تم استخدام المجهر الرقمي لقياس جميع الميزات الهندسية للجزء المختبر. ولتعزيز الثقة في النتائج المستخلصة، أُجري كل قياس أربع مرات على الأقل، لضمان الدقة الإحصائية.

*** التصنيع بالليزر الانتقائي**

يمكّن التصنيع بالليزر الانتقائي من إنتاج قطع فردية بأشكال هندسية معقدة تتطابق مع خصائص الميكانيكية للقطع المصنعة تقليديا في سلاسل الإنتاج. نظرا لأن العملية تتعامل مع مواد معدنية مثل الصلب، الألومنيوم، التيتانيوم، وسبائك قائمة على النيكل، فإن غرفة البناء غالبا ما تُملأ بغاز النيتروجين أو غاز الأرجون لتوفير جو خامل لحماية القطع المعدنية المسخنة من الأكسدة.

يتميز SLM بقدرته على تحقيق نسبة كثافة مادية عالية جدًا، مما يجعل المكونات المنتجة مثالية للتطبيقات التي تتطلب متانة وأداء عالي، مثل في صناعات الفضاء، الطيران، الطبية والدفاع. علاوة على ذلك، يسمح التصميم القائم على الكمبيوتر بتحسينات كبيرة في الأداء الوظيفي والكفاءة المادية عبر تقليل الوزن دون التضحية بالقوة، من خلال الاستفادة من الهياكل الفراغية وتصميمات الشبكة المعقدة . بالإضافة إلى ذلك، يمكن لـ SLM تقليل الهدر المادي وتقصير دورات الإنتاج عن طريق الحد من الحاجة إلى العمليات اللاحقة والتجميع، وذلك بفضل قدرته على إنتاج قطع معقدة كقطعة واحدة. ومع ذلك، تتطلب هذه التقنية فهما عميقًا لخصائص المواد وديناميكيات الليزر لتحقيق الجودة المطلوبة والتحكم في العيوب مثل الشقوق الناتجة عن الإجهاد الحراري.

تتضمن عملية التصنيع بالليزر الانتقائي سلسلة من الخطوات مثل تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد الأخرى. يتم توضيح مفهوم عملية البناء بالليزر الانتقائي في الشكل ١ حيث يمكن تقسيم خطوات العملية إلى:

١- تصميم القطعة باستخدام برنامج التصميم بمساعدة الحاسوب (CAD).

٢- استيراد بيانات CAD كملف للتصنيع بالترسيب الضوئي (STL) إلى برنامج التقطيع لإنتاج بيانات الشرائح وتوفير هياكل دعم لأي عناصر معلقة.

٣- رفع نموذج D٣ إلى معدات الصهر بالليزر الانتقائي.

١- تبدأ عملية البناء بتطبيق طبقة رقيقة من مادة البودرة على لوحة الأساس.

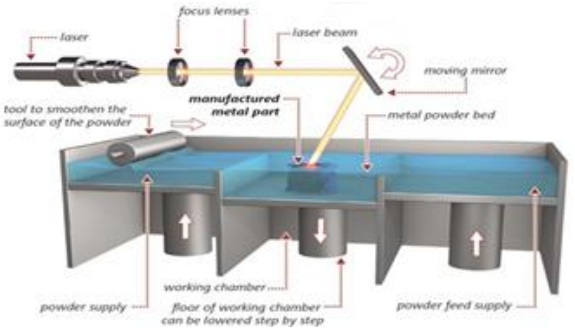
٢- يقوم شعاع الليزر بمسح البودرة ويذوب المناطق المحددة باتباع النمط الذي تحدده البيانات، مما يسمح بإنتاج الطبقة الأولى من القطعة.

٣- يتم خفض منصة البناء، ويتم وضع طبقة جديدة من البودرة فوقها بواسطة بكرة ويقوم الليزر بمسح طبقة جديدة.

٤- يتكرر العملية حتى يتم بناء القطعة بالكامل.

٥- زال القطعة المبردة من خزان البودرة لتنظيفها من الدعامات وجزيئات البودرة غير المنصهرة.

قوة الليزر، سرعة المسح، مسافة الفقس، وسمك الطبقة، جميعها منظمة بحيث يمكن لمتجه الذوبان الواحد أن يندمج تماما مع متجهات الذوبان المجاورة والطبقة السابقة. بعد انتهاء عملية مسح الليزر، يتم إزالة الجزيئات الفضفاضة من غرفة البناء، ويمكن تفريغ العنصر يدويا أو كهربائيا وفصله عن لوحة الأساس) باستخدام تقنية التفريغ الكهربائي .(EDMالعملية بأكملها آلية، باستثناء تحضير البيانات وإزالة المكونات المنتجة من منصة البناء.



شكل١: مبدأ عملية الصهر بالليزر الانتقائي.

*** تصميم الجزء المعياري**

*** قواعد التصميم**

تلعب قواعد التصميم دورا رئيسيا في تحسين كفاءة وتحسين جودة القطع التي ينتجها العملية. لقد تطورت هذه القواعد مع تقدم عمليات التصنيع وتَستخدم كطريقة فعالة للمصمم لاختيار عملية التصنيع وإنشاء تصاميم مَحسنة. كما تَستخدم قواعد التصميم كطريقة فعالة لتقديم قدرات عملية جديدة للمصممين والمهندسين بحيث يمكن استكشاف العملية بشكل كامل.

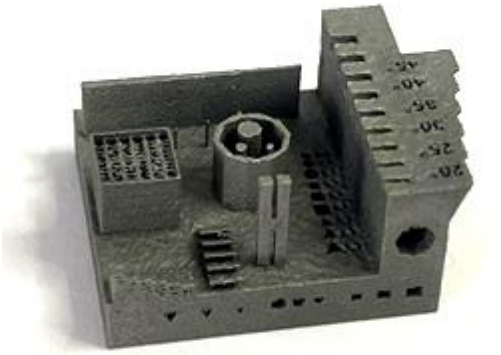
كان دانيال توماس (توماس بدون تاريخ) من بين الأوائل الذين طوروا قواعد التصميم للتصنيع الإضافي للمعادن وبالتحديد لعملية التصنيع بالليزر الانتقائي، لتقييم عملية التصنيع بالليزر الانتقائي وتحديد القيود الهندسية لها. قواعد التصميم المستخدمة لتصميم قطعتنا التجريبية المعيارية ملخصة في الجدول ١.

*** تصميم القطعة المعيارية**

تم تصميم القطعة المعيارية وفقًا للخصائص المقترحة من قبل بيون وآخرون (بيون ولي ٢٠٠٣)، بالإضافة إلى المعايير الدولية القائمة على التسامحات الهندسية) مثل ISO/ASTM DIS 52904، ISO/ASTM

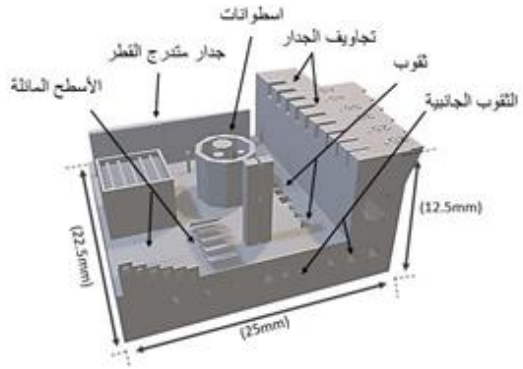
52911-1، ISO 12780للستقامة، ISO 12781للمسطحة، ISO 12180للدائرية، و ISO 12181للجولة .(وتشمل أحجاما مختلفة (صغيرة، متوسطة، كبيرة) وأشكالًا مختلفة من الميزات (مكعب، حفرة، جدار، أسطوانة...إلخ) موضوعة في جميع الاتجاهات الثلاثة، بالإضافة إلى المكونات الداخلية والخارجية. الخطوة الأولى من إجراءات التصميم لدينا تتكون من تحليل الأدبيات ومقارنة أكثر القطع التجريبية تطورا، ثم يتم اختيار نوع الميزات وحجمها بناء على الأعمال ذات الصلة وقواعد التصميم، وأخيرا، تم تصميم القطعة التجريبية.

تم تصميم القطعة التجريبية باستخدام برنامج التصميم CATIA بمساعدة الكمبيوتر بأبعاد ٢٥مم × ٢٢.٥مم × ١٢.٥مم.



شكل ٢: (أ) نموذج CAD للقطعة المعيارية. (ب) القطعة المعيارية المطبوعة.

	وصف	تصميم للتصنيع
حجم الفجوة	- يجب تطبيق الحد الأدنى لحجم الفجوة لتجنب الانصهار السطحي. - الحد الأدنى لحجم الفجوة = 0.3 mm - أقل من 0.3 مم واتجاه 45 درجة، ستكون هناك حاجة إلى دعامات وسيتم إغلاق الفجوة.	
سمك الحائط	- الحد الأدنى لسمك الجدار =0.4 mm - يجب أن تكون دقة الجدار ±0.02 mm - لا يتم تصنيع الحوائط التي يقل سمكها عن0.4 mm على الجزء المعدني النهائي	
التجويف العمودي	- الحد الأدنى لقطر التجويف الرأسي =0.7 mm - أقل من الحد، يتم سد التجويف بواسطة حبيبات مسحوق غير منصهرة بالكامل	
التجويف الأفقي	- أكبر ثقب يمكن صنعه بدون دعامة يبلغ قطر7 mm - أصغر ثقب يمكن صنعه بدون دعامة يبلغ قطر1 mm - الثقوب التي يبلغ نصف قطرها1 مم و2 مم لها تسامح قدره ± 0.3 mm - ستكون الثقوب التي يبلغ نصف قطرها3 مم و4 مم دقيقة في حدود ± 0.2 mm - جميع الثقوب التي يصل نصف قطرها إلى15 مم يتم قياسها بتفاوت قدره ± 0.1 mm	
تشطيب السطح	تموضع القطعة وزاويتها - الأسطح بزاوية 45 درجة تحتاج إلى دعم - الأسطح ذات الاتجاه الأقل من45 درجة ذات جودة سطحية رديئة. - الاتجاه الأمثل هو 90 درجة	



كما هو موضح في الشكل ٢، يتكون جزء الاختبار من مجموعة من الميزات مرتبة على لوحة القاعدة. الخصائص التي تم فحصها بواسطة كل ميزة هي: فتحات بأشكال مختلفة (مثلث، دائرة، مربع) وأقطار مختلفة (٠,٧ mm ، ٠,٩ mm، ١,١ mm)، ثلاثة جدران بأبعاد مختلفة (٠.٤ mm، ٠.٦ mm، ٠.٨ mm)) ، شقوق مختلفة متتالية من ٠.٢ مم إلى ١ مم وثلاثة أسطوانات بأقطار مختلفة (٠.٧ mm، ١ mm، ٢ mm)

mm) مفصولة عن بعضها البعض بمسافات ٠.٣ mm، ٠.٧ mm، ١.١٥ mm.

لا يوفر المسحوق الموجود في غرفة التصميم أي دعم للجزء أثناء بنائه، لذلك ستكون جميع الأسطح المائلة مدعومة ذاتيا بشكل مثالي، وبهذا نكون قد حققنا زعانف مائلة بزوايا مختلفة (٢٠°، ٢٥°، ٣٠°، ٣٥°، ٤٠°، ٤٥°) إلى المحور الأفقي.

*** مسحوق الفولاذ**

في هذه الدراسة، تم استخدام مسحوق معدني من الفولاذ المقاوم للصدأ L٣١٦، تم شراؤه من E-Plus-3D (بكين، الصين) لإنتاج الأجزاء باستخدام SLM. يحظى هذا الفولاذ المقاوم للصدأ بشعبية كبيرة بين الصناعات المختلفة مثل الكيماويات والبتروكيماويات والأدوية والأجهزة المنزلية [٢٠].wt.%

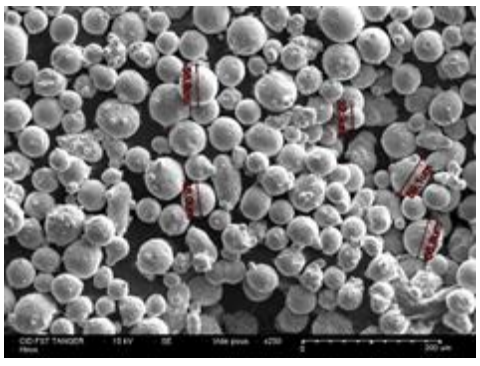
التركيب الكيميائي(wt.%)								
C	Mn	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	O
<0.03	<2	<0.005	<1	16 -19	9 -13	1.5 -3	<0.003	<0.002

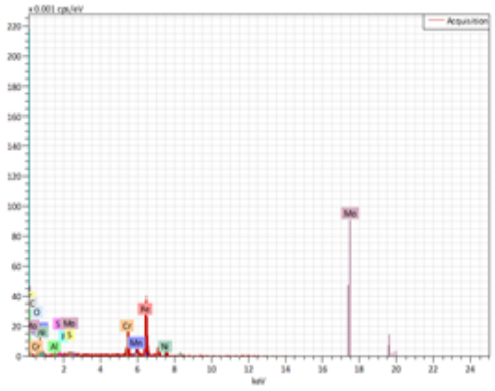
الجدول ٢. التركيب الكيميائي للفولاذ المقاوم للصدأ L٣١٦.

للحصول على نظرة ثاقبة لخصائص مسحوق الفولاذ المقاوم للبقع ٣١٦ لتر، استخدمنا الفحص المجهري للإلكترون (SEM) لفحص شكله وبنيته الدقيقة، مما يوفر معلومات قيمة لمختلف تطبيقات التصنيع. قدم تحليل SEM رؤى شاملة حول خصائص المسحوق المعدني. كما هو مبين في الشكل ٣ أ، كشف فحص مورفولوجيا الجسيمات عن شكل كروي أو غير منتظم في الغالب، بما يتوافق مع السمات المرتبطة عادة بالمساحيق المعدنية المنتجة من خلال الذرات أو الطرق المماثلة. كشف تقييم توزيع حجم الجسيمات عن نطاق يمتد من ٢٥,٨ ميكرومتر إلى ٦١,٨ ميكرومتر.

تم استخدام التحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة من الطاقة (EDS) لفحص التركيب الكيميائي لعينة الفولاذ المقاوم للصدأ ٣١٦ لتر. تم إجراء الفحص بجهد تسارع قدره ١٥ كيلو فولت ومدة اكتساب قدرها ٦٠ ثانية. يشير طيف EDS، الموضح في الشكل ٣ ب، إلى وجود العديد من المكونات الأساسية في عينة الفولاذ المقاوم للصدأ ٣١٦ لتر. تم تلخيص كل هذه المكونات في الجدول ٢.

وكانت المكونات الأساسية المؤكدة هي الحديد (Fe) والكروم (Cr)، وهو ما يتوافق مع تكوين السبائك. تم تحديد النسبة المئوية لوزن Fe وCr بحوالي ٦٨% و١٧% على التوالي. بالإضافة إلى الحديد والكروميوم، تم اكتشاف كميات ضئيلة من العناصر الأخرى، بما في ذلك النيكل (Ni)، والموليبدينوم (Mo)، والمنغنيز (Mn). كان Ni وMo موجودين بمستويات تبلغ حوالي ١٢% و٢% على التوالي، مما يؤكد التركيب المتوقع للفولاذ المقاوم للصدأ ٣١٦ لتر.





شكل ٣: تحليلات مجهرية لمسحوق الفولاذ ٤٣١٦ المقاوم للصدأ: (أ) صور تفصيلية بالمجهر الإلكتروني الماسح للمورفولوجيا (SEM)، (ب) طيف الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX) لتحليل التركيب الكيميائي.

*** الطباعة وما بعد المعالجة**

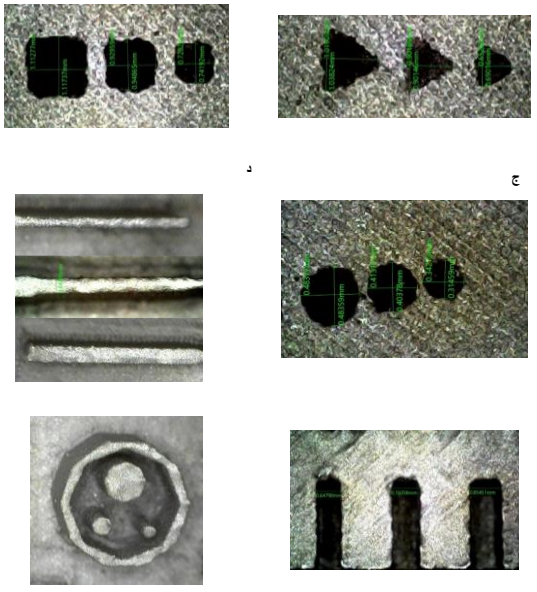
تمت طباعة الأجزاء باستخدام طابعة SHINING 3D EP-M250 SLM ثلاثية الأبعاد، ومجهزة بليزر ألياف بقدرة ٥٠٠ واط، وحجم موضعي ٧٠ ميكرومتر، وسرعة مسح تبلغ ٨ م/ث، وحجم بناء ٢٦٢ × ٢٦٢ × ٣٥٠ مم مكعب. لتجنب أكسدة العينات، تم إدخال غاز الأرجون إلى غرفة SLM مع الحفاظ على مستوى الأكسجين المتبقي أقل من ١٪.

استخدمت عملية الطباعة معلمات محددة على النحو التالي: سماكة الطبقة التي تم تكوينها عند ٥٠ ميكرومتر، مع ضبط طاقة الليزر على ١٥٠ واط وسرعة المسح الضوئي على ٧٠٠ مم/ثانية.

بعد تصنيع SLM، خضعت المكونات لإجراءات السفع الرملي الشاملة. تضمنت هذه العملية قذف جزيئات كاشطة بسرعة عالية على أسطح أجزاء SLM. يعمل السفع الرملي على تحسين الملمس الخارجي وإزالة جزيئات المسحوق المتبقية، مما يؤدي إلى الحصول على منتج نهائي أكثر سلاسة ونظافة. لعب هذا التدخل الإضافي دورا مهما في تعزيز المظهر الجمالي والتشطيب السطحي والخصائص الوظيفية للأجزاء المصنعة من خلال SLM.

*** النتائج والمناقشة**

*** دقة الأبعاد**



الشكل ٤. الميزة المطبوعة: (أ) ثقوب مثلثة، (ب) ثقوب مربعة، (ج) ثقوب دائرية، (د) قطر الجدار ، (هـ) تجاويف الجدار، (و) أسطوانات.

*** ثقوب مثلثة**

ويبين الشكل 4 أ الثقوب المثلثية المطبوعة، والتي تشير إلى أن البروز عند نقطة التقاطع بين الخطين الهندسيين المائلين يتحول من الشكل المدبب إلى الشكل الدائري. ويمكن تفسير الظاهرة المرصودة بالنظر إلى تأثير بركة النوبان على المنطقة الحادة، مما يؤدي إلى تحولها إلى شكل كروي.

ويعرض الجدول 3 الأبعاد المقاسة للثقوب الثلاثية الشكل، ويوضح الشكل ٥ متوسط الانحرافات الأبعادية عن الأبعاد المصممة. تشير انحرافات متوسط العمر إلى أن

مستوى الاستنساخ كان ضمن النطاق المقبول لخطأ الأبعاد، بانحراف قدره ٠٤٧

*** ثقوب مربعة**

يوضح الشكل ٤ ب الثقوب المربعة المطبوعة، مما يشير إلى تغيير كبير في حدتها عند تقاطع حافتي الخط المتعامدين، من تشكيل مدبب إلى مظهر مستدير، وهو ما يمكن تفسيره بنفس الظاهرة التي لوحظت في الثقوب المثلثية . تم قياس أبعاد جميع العينات التسع وترد في الجدول 4. ويمكن ملاحظة أن للانحراف قدره ٠.٠١٤٧ مم.

*** فتحات دائرية**

يتم توضيح الفتحات الدائرية المطبوعة في الشكل ٤ ج. يتم سرد جميع الأبعاد المقاسة للمكونات التي تم اختبارها في الجدول ٥. حيث تقدم العينة انحراف قدره ٠,٠٣٨٣مم.

Features	Designed dimensions (mm)	Measured dimensions (mm)
Triangular holes	0,7	0,704
	0,9	0,908
	1,1	1,102
Average deviations		0,0047

الجدول 3. قياسات الثقب الثلاثية

Features	Designed dimensions (mm)	Measured dimensions (mm)
Square holes	0,7	0,707
	0,9	0,927
	1,1	1,11
Average deviations		0,0147

الجدول ٤. قياسات الثقب المربعة

Features	Designed dimensions (mm)	Measured dimensions (mm)
Circular holes	0,7	0,694
	0,9	0,877
	1,1	1,014
Average deviations		0,0383

الجدول ٥. قياسات الثقب الدائرية

*** قطر الجدار**

ويصور الشكل ٤ د الجدران المطبوعة، ويقدم الجدول ٦ قياسات جميع العينات، إلى جانب متوسط انحرافات الأبعاد عن أبعادها الاسمية. تتميز الجدران التي يبلغ سمكها ٠.٦ مم بدقة أبعاد فائقة مع الحد الأدنى من الانحراف. وعلى العكس من ذلك، تمت طباعة الجدران بسماكة ٠.٤ ملم و ٠.٨ ملم بأحجام أقل وأعلى من أبعادها الاسمية، على التوالي. يمكن أن تعزى هذه الظاهرة إلى المسحوق المنصهر الذي قد يتراكم بسبب عوامل مختلفة، مثل مثل تقلبات درجات الحرارة أو عدم الاتساق في عملية الطباعة، مما يتسبب في انسداد آلية إعادة الطلاء. ونتيجة لذلك، يفشل جهاز إعادة الطلاء في توزيع طبقة المسحوق بالتساوي، مما يؤدي إلى ترسيب غير متساوي للمادة. يمكن أن يؤثر هذا الترسيب غير المتساوي سلبا على جودة ودقة المادة المطبوعة، وبالتالي يمنع تكوين الطبقة المناسبة ويسبب عيوبا في المنتج النهائي مع انحراف قدره ٠.٠٤١٧ مم.

*** تجاويف الجدار**

تظهر تجاويف الجدار المطبوعة في الشكل ٤ هـ. يتم تمثيل قياسات جميع أجزاء الاختبار في الجدول ٧، بما في ذلك متوسط انحرافات الأبعاد عن الأبعاد الاسمية. تمت طباعة الجدران بسماكة تتراوح من ٠.٣ ملم إلى ١ ملم بدقة أبعاد مرضية. ومع ذلك، لم تتم طباعة الجدران التي يبلغ سمكها ٠.٢ مم بشكل صحيح، مما يظهر انحرافًا كبيرا في الأبعاد يبلغ حوالي ٥٧٪ خطأ، وهو ما يمكن تفسيره بنفس الظاهرة التي تمت مناقشتها سابقًا.

ويرد الرسم البياني الذي يعرض انحرافات الأبعاد المتوسطة في الشكل ٥، مما يدل على دقة مقبولة ، حيث بلغ قياس انحراف ٠.٠٣١ ملم.

*** اسطوانات**

يعرض الشكل ٤ و الأسطوانات المطبوعة، موضحا موضحا أن الأسطوانة الأصغر تمت طباعتها بشكل بيضاوي، هذا التشوه يمكن أن يكون ذلك بسبب التوزيع غير المتساوي للحرارة أثناء عملية الطباعة أو التبريد السريع، مما قد يؤدي إلى تشوهات حرارية تؤدي إلى اتخاذ الشكل الأسطواني شكلاً بيضاويا.

يوفر الجدول ٨نظرة شاملة على القياسات لجميع العينات، ومن الجدير بالذكر أن متوسط الانحرافات البعدية كان ضمن نطاق مقبول ٠.٠٩٤٧ مم .

الجدول ٦. قياسات قطر الجدار

Features	Designed dimensions (mm)	Measured dimensions (mm)
Wall extrusions	0,4	0,386
	0,6	0,61
	0,8	0,901
Average deviations		0,0417

الجدول ٧. قياسات تجاويف الجدار

Features	Designed dimensions (mm)	Measured dimensions (mm)
Wall cavities	1	1,01
	0,9	0,92
	0,8	0,802
	0,7	0,73
	0,6	0,611
	0,5	0,521
	0,4	0,458
	0,3	0,329
	0,2	0,301
Average deviations		0,0313

الجدول ٨. قياسات الاسطوانات

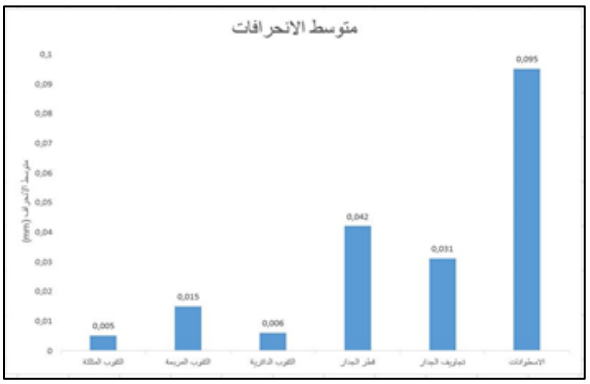
Features	Designed dimensions (mm)	Measured dimensions (mm)
Cylinders	0,7	0,704
	1	1,02
	2	2,26
Average deviations		0,0947

* النتائج والآفاق

تقدم هذه الدراسة رؤى قيمة حول دقة أبعاد المكونات المنتجة باستخدام النوبان بالليزر الانتقائي (SLM) تم تطوير جزء اختباري لتقييم الدقة البعدية، قيود النظام، وجودة السطح للأجزاء المصنعة. تشتمل القطعة الاختبارية المقترحة على ميزات مختلفة بأشكال وأحجام متنوعة في جميع الأبعاد الثلاثة مع التركيز على جوانب مثل الجدران، والأسطوانات، والفتحات، والمساحات المجوفة.

تحول الشكل الهندسي للميزات الحادة، مثل الانتقال من التكوينات المدببة إلى المستديرة في الثقوب المثلثة والمربعة، بالإضافة إلى التباينات في سمك الجدران، يمكن أن يعزى إلى تأثير بركة النوبان. هذا يبرز أهمية فهم ديناميكيات الحرارة وتوزيع المسحوق خلال عملية التصنيع الإضافي.

لقد أظهرت الأبعاد المقاسة للميزات المطبوعة انحرافاً بعدياً مقبولاً مقارنةً بالأبعاد المصممة. يمكن تفسير هذه هذه الدقة البعدية الملحوظة بالتوزيع الفعال لتدفق الغاز داخل داخل غرفة البناء و التحكم الدقيق في عملية البناء والبيئة داخل طابعة SLM، مما يدل على القدرة العالية لهذه التقنية على إنتاج قطع بمواصفات دقيقة وجودة عالية.



شكل٥: رسم بياني لمتوسط الانحرافات البعدية

تعتبر المعلمات الفعالة مثل سرعة المسح ومسافة الفتحة وقوة الليزر وسمك الطبقة ونقطة شعاع الليزر وغيرها مهمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد. ومع ذلك، ظلت هذه المعلمات ثابتة لتحديد دقة الأبعاد للجزء المعياري لتقييم تأثيرات ميزات التصميم على إمكانية طباعة باستخدام النوبان بالليزر الانتقائي. كما هو مبين في الشكل ٥ الميزات المعقدة المطبوعة بواسطة النوبان بالليزر الانتقائي لها نفس الطوبولوجيا الهندسية فيما يتعلق بالنموذج المصمم.

كانت الأبعاد المقاسة للميزات المطبوعة ضمن نطاقات الخطأ المقبولة. أثبت تحليل الأبعاد أن هناك دقة كبيرة للميزات الكبيرة ذات الأبعاد الأكبر من ١ مم. وقد لوحظ من التجربة أن الميزات ذات الأبعاد التي تقل عن ٠.٦ مم بها تشويه كبير إذا لم يتم دعم الجزء بشكل صحيح. يتحول شكل الدائري إلى الشكل الإهليلجي عند حدوث تغيير في الزاوية الحلزونية.

يتمتع المقطع العرضي الإهليلجي في الاتجاه الرأسي بأداء أفضل من الاتجاه الأفقي الإهليلجي والمقطع العرضي الدائري. على الرغم من أن تدفق الماء كان غير مقيد في قناة

التبريد وتمت إزالة المسحوق المتبقي في هذه العملية. علاوة على ذلك، يمكن اعتبار التعديل في المقطع العرضي لتحسين المقطع العرضي المطلوب بشكل فعال لتصميم القالب المحدد.

سيتمحور العمل المستقبلي حول تطوير وتنفيذ تجارب معقدة لفهم أعمق لتفاعلات العملية وتأثيرها على الدقة البعدية. ستسعى الدراسات اللاحقة إلى استكشاف عوامل إضافية تؤثر على الدقة البعدية لأجزاء الصهر بالليزر الانتقائي وتعميق الفهم للعلاقات المعقدة بين معاملات العملية وموقع البناء. بالإضافة إلى ذلك، سنعكف على تحسين معاملات عملية نظام SLM من خلال طباعة عينات متنوعة تستند إلى تصميم تجارب مدروس لاستكشاف قدرات إنتاج تفاصيل محكمة وتحقيق أجزاء ذات جودة عالية. كما سيتم أخذ وقت البناء، التكلفة، وخصائص المواد في الاعتبار ضمن الدراسة.

*** المراجع**

Bártolo, Paulo, Ana de Lemos, Ana Tojeira, António Pereira, Artur Mateus, Ausenda Mendes, Cyril dos Santos, Dino Freitas, Helena Bártolo, Henrique Almeida, Igor dos Reis, Juliana Dias, Marco Domingos, Nuno Alves, Ruben Pereira, Tatiana Patrício, et Telma Ferreira, éd. 2011. Direct Manufac-turing Design Rules. CRC Press.

Bremen, Sebastian, Wilhelm Meiners, et Andrei Diatlov. 2012. « Selective Laser Melting: A Manufac-turing Technology for the Future? » Laser Technik Journal 9(2):33-38. doi: 10.1002/latj.201290018.

Byun, Hong-Seok, et Kwan Heng Lee. 2003. « Design of a New Test Part for Bench-marking the Ac-curacy and Surface Finish of Rapid Prototyping Pro-cesses ». P. 731-40 in Computational Science and Its Applications — ICCSA 2003. Vol. 2669, Lecture Notes in Computer Science, édité par V. Kumar, M. L. Gavri-lova, C. J. K. Tan, et P. L'Ecuyer. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Dobrzański, L. A., L. B. Dobrzański, et A. D. Do-brzańska-Danikiewicz. 2020. « Additive and Hybrid Technologies Forproducts Manufacturing Using Pow-dersof Metals, Their Alloys and Ceramics ». Archives of Materials Science and Engineering 2(102):59-85. doi: 10.5604/01.3001.0014.1525.

Calignano, F., M. Lorusso, J. Pakkanen, F. Trevi-san, E. P. Ambrosio, D. Manfredi, et P. Fino. 2017. « Investigation of Accuracy and Dimensional Limits of Part Produced in

Mortágua. 2016. « Selective Laser Melting (SLM) and Topology Optimization for Lighter Aero-space Componentes ». Procedia Structural Integrity 1:289-96. doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.039.

Moylan, Shawn, John Slotwinski, April Cooke, Kevin Jurrens, et M. Alkan Donmez. 2014. « An Addi-tive Manufacturing Test Artifact ». Journal of Re-search of the National Institute of Standards and Tech-nology 119:429. doi: 10.6028/jres.119.017.

Rebaioli, Lara, et Irene Fassi. 2017. « A Review on Benchmark Artifacts for Evaluating the Geomet-rical Performance of Additive Manufacturing Process-es ». The International Journal of Advanced Manufac-turing Technology 93(5-8):2571-98. doi: 10.1007/s00170-017-0570-0.

Subbaian Kaliamoorthy, Paridhi, Rajkumar Sub-biah, Joseph Bensingh, Abdul Kader, et Sanjay Nayak. 2019. « Benchmarking the Complex Geometric Pro-files, Dimensional Accuracy and Surface Analysis of Printed Aluminum Alloy by Selective Laser Melting ». The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 88(1-4):451-58. doi: 10.1007/s00170-016-8788-9.

Harun, Wan Sharuzi Wan, Kumaran Kadirgama, Mahendran Samykano, Devarajan Ramasamy, Iswadi Ahmad, et Mahmoud Moradi. 2019. « Mechanical Be-havior of Selective Laser Melting-Produced Metallic Biomaterials ». P. 101-16 in Mechanical Behavior of Biomaterials. Elsevier.

Kim, G. D., et Y. T. Oh. 2008. « A Benchmark Study on Rapid Prototyping Processes and Machines: Quantitative Comparisons of Mechanical Properties, Accuracy, Rough-ness, Speed, and Material Cost ». Proceedings of the Institution of Mechanical Engi-neers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 222(2):201-15. doi: 10.1243/09544054JEM724.

Seabra, Miguel, José Azevedo, Aurélio Araújo, Luís Reis, Elodie Pinto, Nuno Alves, Rui Santos, et Jo-ão Pedro

Filler Mate-rial by TIG Welding ». Journal of Materials Research and Technology 21:220-36. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.09.016.

Pal, Snehashis, Nenad Gubeljak, Tonica Bončina, Radovan Hudák, Teodor Toth, Jozef Zivcak, Gorazd Lojen, Niko Leben, et Igor Drstvenšek. 2021. « The Ef-fects of Locations on the Build Tray on the Quality of Specimens in Powder Bed Additive Manufacturing ». The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 112(3-4):1159-70. doi: 10.1007/s00170-020-06563-5.

Veetil, Jithin Kozhuthala, Mahyar Khorasani, AmirHossein Ghasemi, Bernard Rolfe, Ivo Vrooijink, Karin Van Beurden, Sebastiaan Moes, et Ian Gibson. 2021. « Build Position-Based Dimensional Deviations of Laser Powder-Bed Fusion of Stainless Steel 316L ». Precision Engineering 67:58-68. doi: 10.1016/j.precisioneng.2020.09.024.

Thomas, Daniel. s. d. « The Development of De-sign Rules Parts ». Rapid Prototyping Journal 26(2):319-29. doi: 10.1108/RPJ-01-2019-0024

Rupal, Baltej Singh, Rafiq Ahmad, et Ahmed Ja-wad Qureshi. 2018. « Feature-Based Methodology for Design of Geometric Benchmark Test Artifacts for Additive Manufacturing Processes ». Procedia CIRP 70:84-89. doi: 10.1016/j.procir.2018.02.012.

Bayat, Mohamad, Aditi Thanki, Sankhya Mohan-ty, Ann Witvrouw, Shoufeng Yang, Jesper Thorborg, Niels Skat Tiedje, et Jesper Henri Hattel. 2019. « Key-hole-Induced Porosities in Laser-Based Powder Bed Fusion (L-PBF) of Ti6Al4V: High-Fidelity Modelling and Experimental Validation ». Additive Manufactur-ing 30:100835. doi: 10.1016/j.addma.2019.100835.

Ghumman, Khubaib Zafar, Sadaqat Ali, Emad Ud Din, Aamir Mubashar, Niaz Bahadur Khan, et Syed Waqar Ahmed. 2022. « Experimental Investigation of Effect of Welding Parameters on Surface Roughness, Micro-Hardness and Tensile Strength of AISI 316L Stainless Steel Welded Joints Using 308L

for Selective Laser Melting ». 318.

Yadroitsev, I., L. Thivillon, Ph. Bertrand, et I. Smurov. 2007. « Strategy of Manufacturing Compo-nents with Designed Internal Structure by Selective Laser Melting of Metallic Powder ». Applied Surface Science 254(4):980-83. doi: 10.1016/j.apsusc.2007.08.046.

ISO/ASTM standards (ISO/ASTM DIS 52904, ISO/ASTM 52911-1, ISO 12780, ISO 12781, ISO 12180, and ISO 12181)

M A Daoud, M H Mechkouri, Chairi Youssef , Kh B Haouari, Kamal Reklaoui. 2024. « Impact of build location on dimensional accuracy of 316L parts using SLM». Ar-chives of Materials Science and Engineering. doi: 10.5604/01.3001.0054.4683.

Khadija Bekkay Haouari, Mustapha Ouardouz. 2022. « Investigating the capability of low-cost FDM printers in producing microfluidic devices». Ar-chives of Materials Science and Engineering. doi: 10.5604/01.3001.0016.0670.

Król, M., J. Mazurkiewicz, et S. Żołnierczyk. 2018. « Optimization and analysis of porosity and roughness in selective laser melting316L parts ». Ar-chives of Materials Science and Engineering 1(90):5-15. doi: 10.5604/01.3001.0012.0607..