

مقارنة القساوة الميكروية لخليطة كوبالت كروم المصنعة بطريقة الصهر بالليزر أو طريقة الصب التقليدية

طالبة الدراسات العليا: د. نورا زيدان كلية طب الأسنان - جامعة دمشق
إشراف أ. د. مهند السعدي

ملخص:

جعلت تقنيات التصنيع بالإضافة الجديدة (Additive Manufacturing Techniques) تصنيع التعويضات المتحركة الجزئية أقل تكلفة وأقل استهلاكاً للوقت. ومع ذلك، من غير الواضح فيما إذا كانت الخصائص الميكانيكية التي تنتجها هذه التقنيات قابلة للمقارنة. الهدف من هذه الدراسة المخبرية تقييم الخواص الميكانيكية لهياكل كوبالت-كروم المستعملة في التعويضات المتحركة الجزئية والمصنعة بطريقتين من طرق تصنيع الهياكل المعدنية. تم تصنيع 8 عينات لكل طريقة، بشكل متوازي المستطيلات (1×10×20 مم) وذلك باستعمال طريقة الصهر بالليزر Selective Laser Melting (SLM) وطريقة الصب التقليدية، وتم إجراء اختبار قساوة السطح الميكروية من نوع فيكرز. كانت قيم قساوة السطح (المتوسط ± الانحراف المعياري) لعينات SLM والعينات المصبوبة 4.644 ± 30.176 GPa و 2.994 ± 21.011 GPa، على التوالي. وبالتالي كانت عينات SLM أكثر قساوة من العينات المصبوبة بالطريقة التقليدية وبفارق مهم إحصائياً ($P= 0.0003$). إذاً، ضمن حدود هذه الدراسة، أعطت طريقة SLM نماذج مخبرية أكثر قساوة من النماذج التقليدية لهياكل الأجهزة السنية الجزئية المصنوعة من الكوبالت-كروم مما يجعلها طريقة واعدة لصنع هذه الهياكل.

كلمات مفتاحية: هياكل كوبالت-كروم ، الصهر بالليزر SLM، الصب التقليدية.

A comparison of micro-hardness of cobalt chromium alloy fabricated by selective laser melting or traditional casting technique

N. Zidan, M. H. AL-Saadi

Department of Removable prosthodontics, Faculty of Dentistry,
Damascus University, Syria

Abstract

New additive manufacturing techniques have made the fabrication of Removable Partial Dentures (RPDs) less expensive and less time consuming. However, whether the mechanical properties produced by these techniques are comparable is unclear.

The purpose of this in vitro study was to evaluate the mechanical properties of cobalt chromium frameworks for RPDs fabricated by 2 techniques.

8 Specimens were fabricated for each technique, with rectangular shape (20×10×1 mm) using selective laser melting technique (SLM) and casting technique. Surface hardness testing was carried out to evaluate the surface properties of the specimens. The surface hardness values (Mean) of SLM and cast specimens were 30.176 GPa and 21.011 GPa, respectively; SLM specimens showed higher values than cast ones in hardness with a statistically significant difference (P = 0.0003).

Within the limits of this study, SLM Technique is useful and promising technique for fabricating RPD Frameworks.

Keywords: cobalt-chromium frameworks, selective laser melting, casting.

المقدمة Introduction

تختلف الطرق التي يصنع منها الهيكل المعدني، حيث تعتبر طريقة الصب التقليدية من أول الطرق في صنع الهياكل المعدنية إذ تعتمد على إذابة الشمع ليحل محله الذهب المصهور الذي كان أول خليطة تستعمل لصنع هياكل التعويضات المتحركة الجزئية، ومن ثم حلت خليطة كوباتل كروم (Co-Cr) بدلاً من الذهب.

ومع الثورة الرقمية التي أحدثت في عالم طب الأسنان تم تزويد المختبرات السنية بطرق جديدة لتصنيع الهياكل المعدنية، إذ سمحت تقنية التصميم والتصنيع بمساعدة الحاسوب (CAD/CAM) Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing الطباعة ثلاثية الأبعاد بصنع الهيكل المعدني على مثال افتراضي دون اللجوء إلى الشمع [1].

ففي نهاية الثمانينيات، بدأ المصممون الصناعيون باستعمال تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد لعمل نماذج أولية لمشاريعهم من أجل تقييم المشكلات المتعلقة بشكلها وملاءمتها ووظائفها، فضلاً عن سهولة استعمالها [1].

وفي أواخر التسعينيات و بداية العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، بدأ استعمال تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في إنتاج النماذج النهائية، وذلك بفضل الدقة العالية وقابلية إعادة الإنتاج، أما بالنسبة للمعادن كما في حالتنا هذه فقد تم استعمال مصادر طاقة قوية كأشعة الليزر للحصول على قطع ذات مواصفات جيدة [2].

لعل أبرز الطرق التي تستعمل تقنية (CAD/CAM) طريقة الصهر بالليزر (SLM) Selective Laser Melting التي تعتمد على دمج طبقات دقيقة من مسحوق المعدن باستعمال حزمة أشعة ليزرية عالية التركيز [3] [4].

يمكن لهذه الطريقة أن تعطينا خواصاً ميكانيكية مشابهة أو أفضل من خواص الطريقة التقليدية فضلاً عن البنية الداخلية المتجانسة التي تحسن من الأداء السريري للمادة، إلا أنها تتطلب تجهيزات مكلفة لذلك تقتصر على المختبرات الكبيرة [5] [4].

تعتبر هذه الطريقة هي الأكثر استعمالاً في طب الأسنان التعويضي [6]. وقد ظهرت طريقة الصهر بالليزر لأول مرة عام 1995، كما استعملت في صناعات الفضاء والدفاع والفن والتصميم وتم إدخالها بدور فعال في الجراحة، ولها أصداء هامة ومميزة في مجال طب الأسنان مع سابقتها في هذا المجال كالصور ثلاثية الأبعاد وتقنيات صناعة الأمثلة وكذلك التصوير الطبقي المحوسب ذو الحزمة المخروطية Cone Beam Computed Tomography (CBCT)، والمسح داخل الحجرة الفموية، بالإضافة إلى التاريخ الطويل الأمد نسبياً لاستعمال التصميم والتصنيع ثلاثي الأبعاد بمساعدة CAD/CAM في طب الأسنان، وستصبح ذات شأن في هذا المجال. من أهم استعمالاتها في مجال التعويضات تصنيع هياكل التعويضات فوق الغرسات السنية [7]. إن الفارق بين طريقة الصهر بالليزر (SLM) وطريقة التليد بالليزر Selective Laser Sintering (SLS) هو أن طريقة الصهر بالليزر متخصصة بصهر مسحوق المعدن [4].

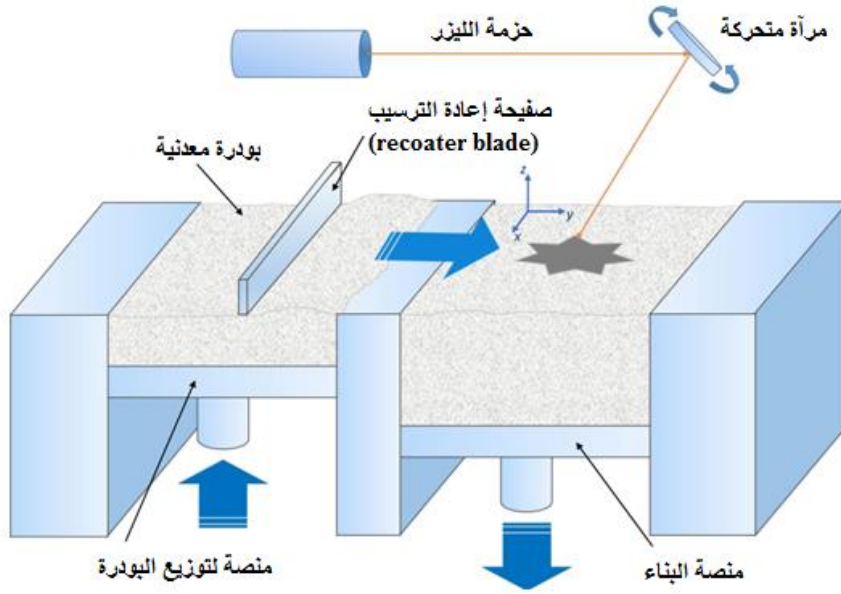
يتكون جهاز SLM كما في الشكل (1) من ليزر ليف ضوئي عالي الطاقة ومسحوق معدن حيث تتم عملية الصهر ضمن حجرة تحوي غاز خامل كالنيتروجين

أو الآرغون لمنع المعدن من التفاعل مع الغازات الأخرى عند درجات الحرارة المرتفعة، يسخن شعاع الليزر ذرات المسحوق وذلك باستعمال نظام انحراف الشعاع (مرايا غلفانية) [8]، حيث يعتمد الجهاز في عمله على ملف رقمي ثلاثي الأبعاد للتعويض المطلوب الذي يقسم إلى مقاطع عرضية، حيث تقوم المساحة الليزرية بمسح السطح ويبدأ شعاع الليزر بتوليد حرارة كافية لصهر جزيئات مسحوق المعدن [9] وتصلبها لتشكل طبقة بثخانات مختلفة وتتخفف أرضية الحجرة بنفس ثخانة الطبقة المحددة ليتم وضع مسحوق مرة أخرى وصهر هذه الجزيئات مع جزيئات الطبقة التي تحتها وهكذا حتى نحصل على الشكل المطلوب [8].

درس Zhang و زملاؤه في عام 2012 المساواة الميكروية لعينات الصهر بالليزر وعينات الصب التقليدية ليتم وضع الخزف عليها، و ردوا سبب تفوق طريقة الصهر بالليزر إلى حجم الجزيئات الدقيق لمسحوق طريقة SLM والبنية المتجانسة [19]. كذلك عرض Han و زملاؤه في عام 2018 في بحث موسع شمل دراسة مقارنة بين طريقة الصهر بالليزر والخراطة والصب التقليدية فكانت طريقة الصهر بالليزر أكثر قساوة من طريقتي الصب التقليدية والخراطة، ربما يعود ذلك إلى المسامية العالية وحجم الجزيئات الكبير في كلتا الطريقتين [20].

مقارنة القساوة الميكروية لخليطة كوبات كروم المصنعة بطريقة الصهر الانتقائي بالليزر أو
طريقة الصب التقليدية

وهنا كان لابد للبحث العلمي أن يحكم فيما إذا كانت هذه الطرق الحديثة تعطي فعلاً
مواداً ذات خواص ميكانيكية أفضل أم أن التجهيزات المكلفة التي تستعمل هذه
الطرق تبقى غير مبررة.



الشكل (1) مخطط آلية صهر المعدن وترسيبه على شكل طبقات بواسطة شعاع ليزري في
طريقة صهر المعدن بالليزر.

هدف البحث Aim Of Study

مقارنة القساوة الميكروية لخليطة كوبالت كروم (Co-Cr) عند معاملتها بالطريقة التقليدية أو طريقة الصهر بالليزر لتصنيع الهيكل المعدني.

: مواد وطرائق البحث Materials And Methods

- تحضير العينات:

خطوات تحضير العينات:

• تحضير العينات المصنوعة وفق الطريقة التقليدية:

أخذت 8 قطع شمعية بأبعاد $1 \times 10 \times 20$ مم بشكل متوازي المستطيلات، تم كسوها ضمن بوتقة الإكساء بمادة الإكساء ذات الرابطة الفوسفاتية.

بعد تصلب مادة الإكساء تم وضع البوتقة في الفرن لحين تبخر الشمع، بعدها بدأت عملية صب المعدن حيث دارت الفتالة الموجودة في جهاز الصب (Ducatron S3, Ugin`Dentaire, Seyssing, France). وقذف المعدن المصهور و توزع في الفراغ، بعد الصب تركت البوتقة لمدة ساعة حتى تصلب المعدن ومن ثم استخرجت القطع المعدنية.

• تحضير العينات المصنوعة وفق طريقة صهر المعدن بالليزر

جرى اختيار أبعاد العينات حسب شكلها (متوازي مستطيلات أو أسطواني) بالاستعانة بالدراسات السابقة حيث أدخلت هذه الأبعاد إلى برنامج MYSINT100 RM وأرسل الأمر إلى الطابعة من نوع Sisma MYSINT100 لتشكيل العينات. بدأ التنفيذ برش مسحوق المعدن من نوع Starbond CoS powder 30 ذات بعد جزئي حوالي 10-30 ميكرومتر على أرضية حجرة الطابعة ثم يحرك الرأس الليزري ليصهر الجزيئات فتشكلت لدينا الطبقة الأولى من معدن العينة ثم جرى رش

الطبقة الثانية وتحرك الرأس الليزري ليصهر الجزيئات وهكذا حتى تم الانتهاء من البناء والحصول على القطع بالأشكال والأبعاد المطلوبة.

كانت إعدادات الطابعة كالتالي:

طاقة شعاع الليزر 92 واط و سرعة المسح 0.8 م/ثا و الغاز الخامل المستعمل نيتروجين (Nitrogen) و ثخانة الطبقات 20-40 ميكرومتر و بُعد بقعة تركيز شعاع الليزر 55 ميكرومتر .

- العمليات التالية لصنع العينات

➤ الإنهاء Finishing

تم استعمال أوراق تنعيم بدرجات نعومة مختلفة (150-200-400-600-800-1000-1200-2000) لإزالة النتوءات جميعها بحيث يصبح السطح أملساً وناعماً قدر الإمكان.

➤ الصقل Polishing

استعمل جهاز صقل (Beta, Buehler, Lake Bluff, IL, USA) مكون من قرص دوار مغطى باللباد يدور بواسطة محرك كهربائي، تم وضع معجون الألماس (Diamond Paste) على اللبادة وبنعومات مختلفة (1-3 ميكرومتر) حتى الحصول على أسطح تشبه المرآة.

➤ تنظيف العينات Cleaning

تم تنظيف العينات بالأسيتون ضمن حوض تنظيف بالأموح فوق الصوتية لمدة 10 دقائق.

- قياسات القساوة الميكروية **Micro-hardness measurements**

أُجريت قياسات القساوة الميكروية على القطع ذات شكل متوازي المستطيلات باستعمال جهاز اختبار القساوة الميكروية HX-1000 micro-hardness (tester) الموجود في قسم الفيزياء-هيئة الطاقة الذرية والمزود برأس انغماس فيكرز وهو رأس ماسي هرمي الشكل زاويته (136) وعند قوى تحميل (50- 100 - 150) غرام، كل حمل تم تطبيقه ثلاث مرات على كل عينة، مع زمن انغماس ثابت 10 ثانية كما تم حساب قساوة فيكرز من المعادلة بعد إدخال قيمة حمل الانغماس p مقدراً بـ كيلو غرام ثقلي (Kilogram-force) و d هو المتوسط الحسابي للقطرين d_1 و d_2 مقدر بـ (مم) :

$$HV = 1.8544 P/d^2$$

- التحليل الإحصائي (Statistical Analysis) باستخدام برنامج

MS-Excel

تم استخدام الاختبار الاحصائي T-test ثنائي الجهة لإيضاح الاختلاف واختبار T-test أحادي الذيل لإيضاح الأفضلية وذلك بهدف المقارنة الاحصائية بين بيانات عينات SLM والعينات المصبوبة (CST) وذلك عند درجة معنوية $\alpha = 0.05$ ومستوى ثقة $1-\alpha = 0.95$.

استعمل اختبار T-test لمقارنة الفروق بين نوعي العينات حيث اعتبرت الفروق معنوية إحصائياً عند $p\text{-value} \leq 0.05$ وعند درجة معنوية $\alpha = 0.05$.

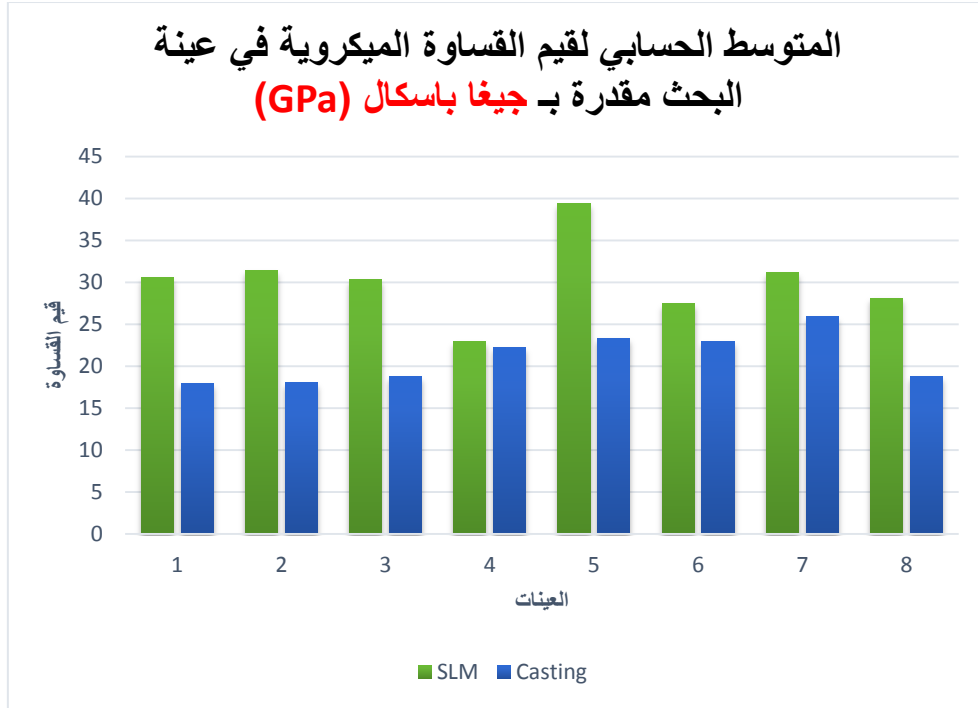
النتائج Results

القساوة الميكروية

جرى قياس القساوة الميكروية لعينات طريقة الصب التقليدية و طريقة الصهر بالليزر (SLM) وتبين أن قيمة المتوسط والانحراف المعياري لقساوة عينات SLM هي 4.644 ± 30.176 وأن قيمة المتوسط والانحراف المعياري لعينات الصب التقليدية 2.944 ± 21.011 (الجدول 1). عند إجراء الاختبار الإحصائي المذكور آنفاً تبين وجود فرق معنوي إحصائياً بين عينات الطريقتين. بلغت قيمة $(p\text{-value} = 0.0003)$ وهي نتيجة أقل بكثير من 0.05 مما يدل على وجود فرق معنوي بين عينات الطريقتين عند مستوى ثقة 0.95 وبالتالي فعينات SLM تمتلك قساوة أكبر من عينات الصب التقليدية.

الجدول (1) قيم قساوة عينات طريقتي الصهر بالليزر والصب التقليدية بالإضافة إلى المتوسط الحسابي والانحراف المعياري لمجمل عينات الطريقتين.

طريقة الصب التقليدية		طريقة الصهر بالليزر	
العينات	قيمة قساوة العينة	العينات	قيمة قساوة العينة
1	17.915	1	30.585
2	18.055	2	31.422
3	18.811	3	30.384
4	22.263	4	22.935
5	23.339	5	39.362
6	22.951	6	27.474
7	25.92	7	31.116
8	18.827	8	28.122
الوسطي والانحراف المعياري	21.011 ±2.994	الوسطي والانحراف المعياري	30.176 ±4.644



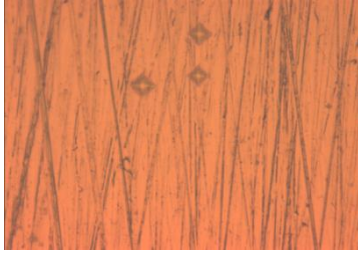
المخطط البياني (1) مخطط يوضح قيم القساوة الميكروية وفقاً للطريقتين الصهر

بالليزر SLM والصب التقليدية Cast .

تعرض الأشكال من 2 إلى 7 صور للعينات المستعملة في هذا البحث و التي

أخذت بالمجهر الضوئي باستخدام ثلاثة أحمال (50-100-150 غرام ثقلي) و

التي تم تطبيقها برأس انغماس فيكرز على عينات الطريقتين المتبعيتين.



الشكل (2) عينة Cast عند قوة تحميل

50 غرام ثقلي.

الشكل (3) عينة SLM عند قوة تحميل



الشكل (4) عينة Cast عند قوة تحميل

100 غرام ثقلي.

الشكل (5) عينة SLM عند قوة تحميل



الشكل (6) عينة Cast عند قوة تحميل

150 غرام ثقلي.

الشكل (7) عينة SLM عند قوة تحميل

المناقشة Discussion

وجد تبعاً للنتائج التي تم الحصول عليها عند مستوى الثقة 95 % أن القساوة الميكروية لعينات طريقة الصهر بالليزر أفضل من قساوة عينات طريقة الصب التقليدية. يمكن تعليل اختلاف الخواص الميكانيكية لخليطة كوبالت-كروم باختلاف التركيب الكيميائي، حيث إن التغييرات الطفيفة في التركيبات الأولية للعناصر المكونة للكربيد، مثل التنغستن W، والكروم Cr، والمولبيدينيوم Mo، أو عناصر ذات نصف قطر ذري صغير، مثل الكربون C أو النيتروجين N، قد تؤثر لاحقاً على الخواص الميكانيكية [4]. كما تعتبر الإجهادات المتبقية والمعالجة الحرارية التالية لعملية التصنيع بطريقة الصهر بالليزر SLM من العوامل التي يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار من أجل تحسين الخواص الميكانيكية للقطع الناتجة بهذه الطريقة، و تعتبر الإجهادات المتبقية عامل سلبي إذا كانت أكبر من 0.5 GPa [4].

من المعروف أنه في علم المعادن يعمل كل من المولبيدينيوم Mo والتنجستن W على تثبيت الطور السداسي (hcp) من البنية البلورية وتقوية الخليطة من خلال تكوين كربيدات المولبيدينيوم Mo والتنجستن W، ومع ذلك، فقد أظهرت الدراسات الحديثة أن إضافة التنغستن W إلى خليطة كوبالت-كروم يمكن أن تثبط تكوين طور سيغما (σ) الهش وغير المرغوب فيه، خاصة بعد المعالجة الحرارية المناسبة [4].

وفي الدراسة الحالية فإن العينات التي حضرت بطريقة الصهر بالليزر SLM لم تخضع لمعالجة حرارية لاحقة لعملية التصنيع كما أوصى Yan باستعمال درجة حرارة 1100° لضمان التخلص من الإجهادات الداخلية وذلك بالنسبة للهياكل المستعملة في التعويضات المتحركة الجزئية [10].

تتمتع الخلطات المصنعة بطريقة SLM ببنية مجهرية أكثر تجانساً بسبب الصهر والتبريد السريع للمسحوق المعدني، في حين أن الخلطات المصبوبة تكون ذات بنية غير متجانسة، و وفقاً لـ Qiu و زملاؤه في عام 2011 تبين أنه كلما كانت البنية أكثر تجانساً كلما ازدادت قساوة السطح [11]، وهذا يؤيد نتائج الدراسة الحالية.

من المعروف أنه في طريقة الصهر بالليزر SLM يتم بناء الطبقات طبقةً تلو الأخرى مما يمنح الخليطة كثافةً وارتباطاً جيداً بين طبقاتها أي مسامات قليلة، بينما في طريقة الصب فإن المسامية تعتبر نقطة الضعف الرئيسية حيث تحدث أثناء عمليات الكسو والصب، إذ يمكن أن تتشكل المسامات أثناء سير المعدن المصهور عبر مجاري الصب فينحصر الهواء فيها أو نتيجة زيادة أو انخفاض القوة أثناء قذف المعدن، وهذا ممكن أن يفسر نتائج الدراسة الحالية [12] [13] [14].

قد يكون سبب الاختلافات في الخواص الميكانيكية وهو اختلاف طريقة معالجة الجزئيات بين الطريقتين فطريقة الصهر بالليزر تبدأ من مسحوق المعدن بينما طريقة الصب تبدأ من قطع بأشكال مختلفة [15] [16].

اتفقت نتائج الدراسة الحالية مع نتائج بعض الدراسات السابقة مثل دراسة Xin وزملاؤه في عام 2013 و Øilo و زملاؤه في عام 2018، حيث تم تأكيد أن عينات طريقة الصهر بالليزر SLM أظهرت قساوة ميكروية أعلى من عينات طريقة الصب، وقد تم رد ذلك إلى الاختلافات البنوية بين نوعي العينات حيث امتلكت عينات الصب التقليدية بنية غير متجانسة على عكس عينات SLM [5][17].

كما أظهرت نتائج الدراسة الحالية توافق مع دراسة قام بها Zeng و زملاؤه في عام 2014 الذين عرّضوا عينات طريقة الصهر بالليزر والطريقة التقليدية إلى معالجة حرارية تالية للتصنيع وقيست القساوة الميكروية فقد كانت طريقة الصهر بالليزر متفوقة على الطريقة التقليدية وتم تفسير هذا الاختلاف إلى كون حجم جزيئات مسحوق المعدن بطريقة SLM أصغر بكثير من الطريقة التقليدية [18].

الاستنتاجات والتوصيات

ضمن حدود هذه الدراسة نستنتج أنه تمتلك طريقة الصهر بالليزر قساوة ميكروية أكبر من طريقة الصب التقليدية و نوصي باستعمال طريقة الصهر بالليزر في تصنيع الهياكل المعدنية للأجهزة المتحركة الجزئية كونها توفر الوقت وتعطينا خواص أفضل من خواص الخلطات المصنوعة بطريقة الصب التقليدية وتجنبنا الأخطاء الناتجة عن اليد البشرية.

شكر وتقدير

نود أن نشكر كلية طب الأسنان بجامعة دمشق، كما ونتوجه بالشكر الجزيل إلى هيئة الطاقة الذرية (قسم الفيزياء) للمساعدة الكبيرة التي قدمت لنا أثناء دراسة و توصيف العينات المستخدمة في هذا البحث.

المراجع

1. Al Jabbari YS, Barmpagadaki X, Psarris I, Zinelis S (2019) Microstructural, mechanical, ionic release and tarnish resistance characterization of porcelain fused to metal Co–Cr alloys manufactured via casting and three different CAD/CAM techniques. Journal of prosthodontic research, **63**:150-6
2. Trevisan F, Calignano F, Lorusso M, Pakkanen J, Aversa A, et al (2017) On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties. Materials, **10**:76
3. Kim HR, Jang SH, Kim YK, Son JS, Min BK, et al (2016) Microstructures and Mechanical Properties of Co-Cr Dental Alloys Fabricated by Three CAD/CAM-Based Processing Techniques. Materials (Basel) **9**
4. Koutsoukis T, Zinelis S, Eliades G, Al-Wazzan K, Rifaiy MA, Al Jabbari YS (2015) Selective laser melting technique of Co-Cr dental alloys: a review of structure and properties and comparative analysis with other available techniques. Journal of Prosthodontics **24**:303-12
5. Øilo M, Nesse H, Lundberg OJ, Gjerdet NR (2018) Mechanical properties of cobalt-chromium 3-unit fixed dental prostheses fabricated by casting, milling, and additive manufacturing. The Journal of prosthetic dentistry, **120**:156. e1-. e7
6. Kim HR, Jang S-H, Kim YK, Son JS, Min BK, et al (2016) Microstructures and mechanical properties of Co-Cr dental alloys fabricated by three CAD/CAM-based processing techniques. Materials, **9**:596
7. Dawood A, Marti BM, Sauret-Jackson V, Darwood A (2015) 3D printing in dentistry. British dental journal, **219**:521-9
8. Kruth J-P, Van der Schueren B, Bonse J, Morren B (1996) Basic powder metallurgical aspects in selective metal powder sintering. CIRP annals, **45**:183-6

9. Yadroitsev I, Bertrand P, Smurov I (2007) Parametric analysis of the selective laser melting process. Applied surface science, **253**:8064-9
10. Yan X, Lin H, Wu Y, Bai W (2018) Effect of two heat treatments on mechanical properties of selective-laser-melted Co-Cr metal-ceramic alloys for application in thin removable partial dentures. The Journal of prosthetic dentistry, **119**:1028. e1-. e6
11. Qiu J, Yu WQ, Zhang FQ, Smales RJ, Zhang YL, Lu CH (2011) Corrosion behaviour and surface analysis of a Co-Cr and two Ni-Cr dental alloys before and after simulated porcelain firing. European journal of oral sciences, **119**:93-101
12. Dharmar S, Rathnasamy RJ, Swaminathan T (1993) Radiographic and metallographic evaluation of porosity defects and grain structure of cast chromium cobalt removable partial dentures. The Journal of prosthetic dentistry, **69**:369-73
13. Kruth J-P, Vandenbroucke B, Van Vaerenbergh J, Mercelis P. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. Proc. Proceedings of the International Conference Polymers & Moulds Innovations PMI, 2005, 2005:
14. Takaichi A, Nakamoto T, Joko N, Nomura N, Tsutsumi Y, et al (2013) Microstructures and mechanical properties of Co-29Cr-6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, **21**:67-76
15. Chen Z, Phan M, Darvish K (2017) Grain growth during selective laser melting of a Co-Cr-Mo alloy. Journal of Materials Science, **52**:7415-27
16. Wu L, Zhu H, Gai X, Wang Y (2014) Evaluation of the mechanical properties and porcelain bond strength of cobalt-chromium dental alloy fabricated by selective laser melting. The Journal of prosthetic dentistry, **111**:51-5
17. Xin X-z, Chen J, Xiang N, Wei B (2013) Surface properties and corrosion behavior of Co-Cr alloy

- fabricated with selective laser melting technique. Cell biochemistry and biophysics, **67**:983-90
18. Zeng L, Xiang N, Wei B (2014) A comparison of corrosion resistance of cobalt-chromium-molybdenum metal ceramic alloy fabricated with selective laser melting and traditional processing. The Journal of prosthetic dentistry, **112**:1224-17
19. Zhang B, Huang Q, Gao Y, Luo P, Zhao C (2012) Preliminary study on some properties of Co-Cr dental alloy formed by selective laser melting technique. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. **27**:665-8
20. Han X, Sawada T, Schille C, Schweizer E, Scheideler L, et al (2018) Comparative analysis of mechanical properties and metal-ceramic bond strength of Co-Cr dental alloy fabricated by different manufacturing processes. Materials, **11**:1801