

تأثير زمن التليد الحراري على الكثافة الظاهرية والأبعاد النهائية للمدمج المنتج بتقانة المساحيق المعدنية

منهل تفاحة*

معلا معلا**

(تاريخ الإيداع 22 / 7 / 2015. قُبل للنشر في 7 / 2 / 2016)

□ ملخص □

دُرِسَ في هذا البحث مجموعة من التجارب لعملية تدميج (Compacting) عدة مساحيق معدنية (Powder Metal) تشكل خليطة معدنية من مادة المساحيق ذات الأساس الحديدي لشكل هندسي أسطواني ، وتم القيام بعدة اختبارات من أجل الوصول إلى العلاقة التي تربط الكثافة الظاهرية النهائية للمدمج مع زمن التليد الحراري، ودراسة مدى تغير الأبعاد الهندسية للمدمج النهائي بعد الانتهاء من عملية التليد الحراري خلال فترات زمنية مختلفة. بينت نتائج الاختبارات والقياسات أن زمن التليد الحراري يؤثر بشكلٍ إيجابي على الكثافة الظاهرية للمدمج النهائي المصنع بتقانة المساحيق المعدنية، وبالتالي ستزداد متانته، حيث التناسب يكون طردياً حتى الوصول إلى حد معين. وأيضاً تأثيره كان واضحاً على تقلص أقطار العينات المستخدمة في الاختبارات. وتغير (زيادة ونقصان) في ارتفاع العينات. أظهرت نتائج البحث الأهمية الكبيرة لمتابعة دراسة وتحليل العلاقات التي تربط متغيرات تقانة تدميج المساحيق المعدنية مع بعضها البعض، وتأثيراتها المختلفة على المدمج النهائي الناتج.

الكلمات المفتاحية: التليد الحراري - المساحيق المعدنية - عملية التدميج - الكثافة الظاهرية.

* قائم بالأعمال - قسم المعدات والآليات - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - سورية.
** قائم بالأعمال / معاون - قسم التصميم المكنيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - سورية.

Effect of sintering time on the apparent density and the final dimensions of the produced compact by technique metal powders

Manhal Tefaha*
Mala Mala**

(Received 22 / 7 / 2015. Accepted 7 / 2 / 2016)

□ ABSTRACT □

In this search, has been studied set of practical experiences for compacting several metal powders composed a metallic alloy based iron from powders with a proposed geometric shapes (cylindrical). Several tests were done in order to reach the relationship between the final apparent density for the compact with a sintering time, and study changing the geometric dimensions of the final compact after the completion of sintering process during different time periods.

The tests and Measurement results had been demonstrated that sintering time affect positively on the apparent density of the final compact which Manufactured by technique metal powders, and thus will increase its strength, where proportionality is directly proportional access even to a certain extent. And also its effect was an obvious shrinking diameters samples used in the tests. And changing (increase or decrease) in height samples.

Search has shown the great importance of the follow-up studying and analyzing the relationships which associate that variables of metal powders technique each other, and their different effect on the final compact.

Key words: Sintering - Metal powders – Compacting process – apparent density.

*Engineer Assistant Work Doer-Department of Agricultural Mechanization-Faculty of Technical Engineering- Tartous University -Tartous-Syria.

**Engineer Assistant Work Doer, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

مقدمة:

يُطلق مصطلح ميتالورجيا المساحيق (Powder Metallurgy) أو (PM) اختصاراً على مجمل العمليات التقنية التي يتم بموجبها الحصول على مساحيق معدنية، ثم الاستفادة من هذه المساحيق أو خلأئطها، أو خلأئط المساحيق المعدنية مع مساحيق أو مواد غير معدنية، أو شبه معدنية، وذلك بتشكيلها ومعالجتها للحصول منها مباشرة على منتجات جاهزة أو نصف جاهزة للاستعمال من دون اللجوء إلى تقنيات التعدين المألوفة مثل الصهر والسكب وما يعقبا من عمليات التشكيل والتشغيل [1].

هناك العديد من المزايا والخصائص لعملية (PM) الناجحة وخاصةً عند تصنيع الأشكال الهندسية المعقدة. ومنها إزالة خطوات التشغيل، إزالة الرايش الناتج عن عمليات التشغيل المختلفة، وكذلك القدرة على الاحتفاظ بتسامحاتٍ متكررة، وقابلية الحصول على خلأئط مختلفة لتراكيب من المواد النادرة. أُستعملت هذه المزايا في الصناعة الآلية، والتي تستهلك تقريباً (70%) من مساحيق الحديد المنتج (PM). [2]

وتتميز هذه التقنية باختصار معظم عمليات التشغيل اللاحقة التي تلي عمليات الإنتاج كالخرأطة والتسوية والتفريز والجلخ.....إلخ، وبالتالي فهي تقانة اقتصادية من الدرجة الأولى. [3] إضافةً إلى تميزها بالمرونة التصميمية والقدرة على إنتاج وتصنيع العناصر المعقدة والتي عادةً ما يكون الحصول عليها بالطرق التقليدية المعروفة عملية مكلفة جداً، كالمسنتات والمحمل الإنزلاقية.....إلخ. [4] تتألف عملية الإنتاج في تقانة صناعة المساحيق من ثلاث مراحل أساسية: مرحلة المزج والخلط - مرحلة التدميج - مرحلة التلييد.

أهمية البحث وأهدافه:

إن الأبحاث السابقة الخاصة بما يحدث أثناء عملية التلييد كدراسة شكل الحبيبات أثناء القيام بعملية التلييد وقياس أقطار وشكل الأعناق التي تظهر خلال التلييد.....إلخ، بالرغم من أهميتها العلمية الكبيرة، فإنها لاترضي تساؤلاتنا الكثيرة عن الخواص التي سنحصل عليها بعد الانتهاء من عملية التلييد الحراري، سواء كانت خواص ميكانيكية أو فيزيائية أو كيميائية.....إلخ.

من هنا نشأت فكرة هذا البحث بأهمية دراسة الكثافة الظاهرية الناتجة عن عملية التلييد الحراري، واستنتاج شكل العلاقة التي تربطها مع زمن التلييد، ودراسة العلاقة التي تعبر عن تغير الأبعاد النهائية الناتجة للمدمجات المنتجة بتقانة المساحيق المعدنية مع تغير زمن التلييد الحراري، لما لها من تأثير على متانة المدمج النهائية وتحسين خواصه الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية.....إلخ.

يركز هذا البحث على تحسين بعض الخواص الفيزيائية الخاصة بالمدمج المنتج بتقانة المساحيق المعدنية (الكثافة الظاهرية وتغير الأبعاد الهندسية) لخليطة عيارية مختارة.

حيث قمنا بإجراء هذا البحث ضمن مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة دمشق.

طرائق البحث ومواد:

تم إجراء الاختبارات التجريبية على إحدى خلأئط الفولاذ السبائكي المكونة من مساحيق لعدة معادن مختلفة نظراً لاستخداماتها الواسعة في مجالات الصناعة المختلفة. ويبين الجدول (1) التركيب الكيميائي لهذه الخليطة.

الجدول (1): التركيب الكيميائي للخليطة المختبرة من المساحيق المعدنية

التركيب الكيميائي للخليطة				
FLC2-	Fe%	C%	Cu%	Ni%
4808	Rest	0.8	2	1.4

وكان حجم الحبيبات المستخدمة بحدود (100-150) ميكرومتر، أما الكثافة الظاهرية بعد النقر فقد تم حسابها وفق العلاقة التالية:

$$\rho_0 = \frac{M}{V}$$

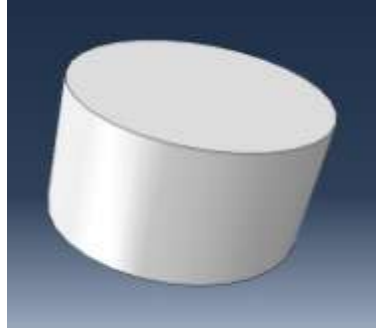
حيث: M: وزن المسحوق بعد النقر أو الهز.

V: حجم تجويف القالب.

وكانت الكثافة الظاهرية بعد النقر تساوي $[3.11 \text{ g/cm}^3]$.

1. العينة المختبرة:

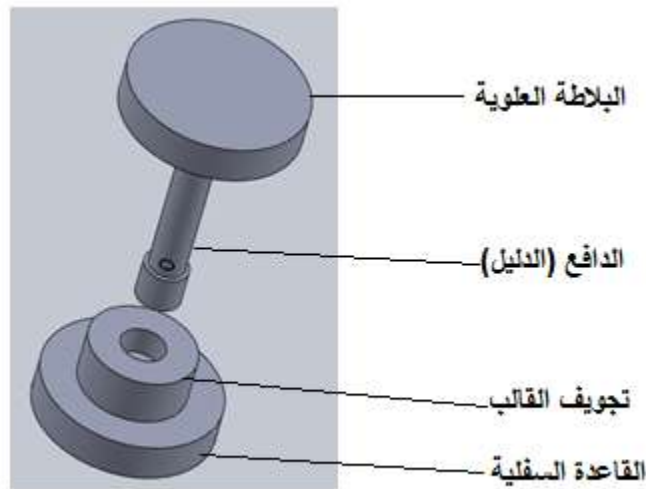
تم تشكيل عينات أسطوانية الشكل كما هو موضح في الشكل (1)، أبعادها (D=30 [mm], H=15 [mm])، وذلك لإجراء الاختبارات اللازمة لاستنتاج العلاقة ما بين الكثافة الظاهرية النهائية وزمن التليد الحراري، بالإضافة إلى تغير الأبعاد الهندسية بعد الانتهاء من عملية التليد الحراري، وإيجاد علاقتها التي تربطها مع زمن التليد الحراري.



الشكل (1): العينة الأسطوانية المختبرة

وتم تصميم قالب التشكيل للعينة الأسطوانية المختارة أعلاه من خلال برنامج (solid works 2014)، والذي يعتبر أحد أهم برامج التصميم الميكانيكي بمساعدة الحاسب (CAD)، حيث يمتاز بالرسم ثلاثي الأبعاد (3D) وقابلية التعديل على التصاميم المختلفة. [7]

وكما هو موضح بالشكل (2). يتألف قالب التشكيل من قسمين: قاعدة (Matrix) ودليل (Pench) وبلاطة علوية وتجويف القالب. حيث تم رسم كل جزء بمفرده ثم تم تجميع هذه الأجزاء (Assembly) مع بعضها البعض لتصميم قالب التشكيل المقترح في الشكل (2). مع مراعاة عملية إخراج المدمج الأخضر من قالب التشكيل، حيث اخترنا أن تتم عملية الإخراج للمدمج من خلال فك السالبة (قاعدة تجويف القالب)، بحيث نضمن عدم تشوه المدمج الأخضر أو انهياره، كونه لا يتحمل قوى لفظ كبيرة. [5] (مع العلم كان لدينا عدة خيارات لإخراج المدمج واخترنا أفضلها لتجاربتنا وظروف البحث).



الشكل (2): قالب التشكيل المقترح

بعد ذلك تم وزن العناصر الداخلة بالسبيكة حسب نسبته ا المئوية المبينة في الجدول (1) بوساطة ميزان رقمي دقته (0.001 g) الموضح في الشكل (3).



الشكل (3): وزن المكونات على الميزان الرقمي

وُمزجت هذه المكونات بالطريقة التالية: تم تعبئة مكونات الخليطة ضمن وعاء محكم الإغلاق وتم تثبيت هذا الوعاء على محور دوراني مقاد بمحرك كهربائي (800 r.p.m)، حيث بقي الدوران لمدة نصف ساعة بهدف الحصول على تجانس جيد في الخليطة المختبرة.

ومن أجل تحضير الشحنة اللازمة لعملية التشكيل، فقد قمنا بدهن (تزييت) جدران قالب التدميج وقاعدته السفلى قبل تعبئة المسحوق المعدني بداخله بمادة النفط، وذلك لضمان عدم التصاق حبيبات السطح الجانبي للمدمج الأخضر بجدار القالب وتسهيل لفظ المدمج من القالب بسهولة. [6]

بعد ذلك قمنا بتعبئة المساحيق المعدنية المكونة للخليطة بداخله بعد مزجها جيداً وبذلك أصبح قالب التشكيل جاهزاً لعملية التدميج.

ويبين الشكل (4) القالب أثناء القيام بعملية التدميج حيث قمنا بتطبيق ضغط إيزوستاتيكي باستخدام مكبس هيدروليكي مقداره (400 [MPa])، حيث تم حساب الضغط بوحدة [MPa] بعد أخذ قيمة مؤشر المكبس وكانت

(28[ton]) موضح في الشكل (5)، بغية الحصول على كثافة خضراء جيدة قبل الدخول إلى فرن التلييد الحراري. (نطلق مصطلح الكثافة الخضراء على كثافة المدمج بعد الانتهاء من عملية التدميج وقبل دخوله إلى فرن التلييد).

وقمنا بعدها بحساب مساحة المقطع العرضي للعينة الأسطوانية المختبرة كما يلي:

$$A = \pi r^2 = 3.14(15)^2 = 706.5 [mm^2]$$

وقمنا بتحويل (28 [ton]) إلى (280000 [N]) تقريباً، وبعدها تم حساب الضغط المطبق بقسمة القوة على

السطح:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{280000}{706.5} \approx 400[N / mm^2] \approx 400[MPa]$$



الشكل (5): مؤشر الضغط الخاص بالمكبس الهيدروليكي



الشكل (4): القالب أثناء القيام بعملية التدميج

وبعد الانتهاء من عملية التدميج قمنا بلفظ المدمج الأخضر الأسطواني الشكل من خلال تحرير تجويف القالب من القاعدة السفلى له وقد تم الحصول على المدمج الأخضر الأسطواني كما هو مبين في الشكل (6).



الشكل (6): صور للمدمج الأخضر الأسطواني الناتج

بعد ذلك قمنا بحساب الكثافة الخضراء للمدمج الأخضر الناتج، بحيث حسبنا حجمه بعد التدمج، ووزنه على الميزان الرقمي. فكانت قيمة الكثافة الخضراء الناتجة هي (6.22 [g/Cm³]):

الكثافة النهائية [ρ, g/Cm ³]	حجم المدمج [V, Cm ³]	كتلة المدمج [M , g]	ضغط التدمج المطبق [P , MPa]
6.22	10.5975	65.94	400

بعد الانتهاء من عملية التدمج ولفظ المدمج الأخضر، قمنا بوضع المدمج الأخضر على قطعة سيراميكية وتم شحنها إلى فرن التليد الحراري. كان الفرن بوضع التشغيل منذ حوالي ساعتين وذلك بهدف ثبات درجة الحرارة واستقرارها عند الدرجة المطلوبة وهي (1000°C). تم وضع عدة مدمجات خضراء بنفس الضغوط ولكن بأزمنة تليد مختلفة تراوحت ما بين (1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 [hours]).

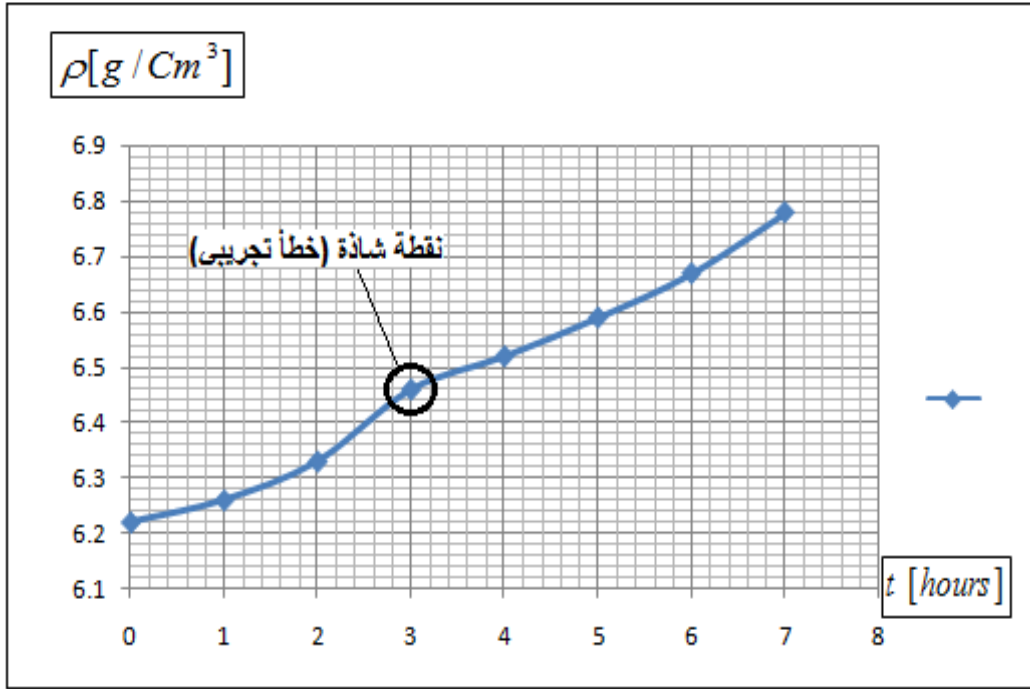
النتائج والمناقشة:

بعد الانتهاء من عملية التليد الحراري لكافة المدمجات الخضراء بالأزمنة المذكورة أعلاه، قمنا بقياس الكثافة النهائية لهذه المدمجات التي حصلنا عليها. وذلك بقياس أبعاد المدمج بعد التليد ثم حساب حجمه، ثم قياس وزنه بواسطة الميزان الرقمي.

ويبين الجدول (2) قيم الكثافات النهائية المختلفة عند تطبيق أزمنة تليد مختلفة.

الجدول (2): النتائج المقاسة للكثافات الظاهرية النهائية المختلفة

الكثافة الظاهرية النهائية [ρ, g/Cm ³]	حجم المدمج [V, Cm ³]	كتلة المدمج [M , g]	زمن التليد المطبق [t, S]
6.22	10.5975	65.94	صفر (قبل البدء بعملية التليد)
6.26	10.524	65.88	1
6.33	10.413	65.91	2
6.46	10.192	65.84	3
6.52	10.106	65.89	4
6.59	10.003	65.92	5
6.67	9.882	65.91	6
6.78	9.715	65.87	7



الشكل (9): العلاقة ما بين الكثافة الظاهرية النهائية للمدمج مع زمن التليد الحراري

نلاحظ من الشكل أنّ شكل العلاقة قريبة من العلاقة الأسية (Exponential Function) على المجال $[0, 7]$ ووجود نقطة شاذة لا يفي وجودها. وسبب ظهورها قد يعود إلى مقدار الاحتكاك ما بين جدران القالب والمدمج الناتج عن حركة الدافع العلوي أو عدم كفاية دهن القالب قبل البدء بعملية التدمج، أو عدم كفاية مزج العناصر المكونة للخليطة بشكل جيد إلخ...

وبإجراء عملية ملائمة (Fitting) ما بين أشكال المنحنيات المعروفة، نجد أن شكل الخط البياني الناتج قريب

$$Y = a_0 e^{a_1 X} \quad *$$

من التابع الأسّي ذو الشكل: حيث Y : يمثل الكثافة الظاهرية النهائية.

X : يمثل زمن التليد الحراري المطبق.

(a_0, a_1) : ثوابت تتعلق بنوع الخليطة وضغط التدمج المطبق أثناء عملية التدمج. حيث يمكننا مناقشتها كما

يلي:

نلاحظ من شكل المنحني بأنه متزايد تماماً على مجال $[0, 7]$ (وهو محور الفواصل الذي يمثل زمن التليد الحراري)، وبالتالي فإن الثابت (a_0) موجب تماماً $(a_0 > 0)$.

ولنفس السبب سيكون الثابت الثاني (a_1) موجب تماماً $(a_1 > 0)$.

وبأخذ نقطتين تنتميان للمنحني وتعويضهما في العلاقة الأسية (*)، وبالحل المشترك للمعادلتين سنستطيع

حساب الثابتين (a_0, a_1) .

سنأخذ النقطتين $(1, 6.26)$ و $(6, 6.67)$ ونعوضهما بالعلاقة (*)، وبالحل المشترك نستنتج قيم الثابتين

الموجبين (a_0, a_1) الخاصين بتجارينا هذه:

$$a_0 = +6.181$$

$$a_1 = +0.0127$$

وبالتالي تكون العلاقة (ما بين الكثافة الظاهرية النهائية وزمن التلييد الحراري) التي تعبر عن شكل المنحني في الشكل (6) على المجال [0 , 7] هي العلاقة التجريبية التالية:

$$\rho_{final} = 6.181e^{0.0127t}$$

حيث: ρ_{final} : الكثافة الظاهرية النهائية [g/Cm³]

t: زمن التلييد الحراري [hours].

يظهر المخطط المبين بالشكل (7) استمرار ازدياد الكثافة بزيادة زمن التلييد الحراري، ولكن استمرار زيادة الكثافة سيتوقف بعد زمن تلييد حراري معين، حيث مهما قمنا بزيادة زمن التلييد لن تتغير كثافة المنتج، ولن نصل إلى كثافته وهو مصمت (أي لن تتعدم المسامية بشكل كامل)، بل سيبقى ذو مسامية ولكن بنسب متفاوتة. وهنا تكمن أهمية تقانة المساحيق المعدنية من حيث إنتاج بعض المدمجات ذات مسامية مقبولة بهدف تحقيق وظيفتها العملية مثل المحامل الانزلاقية ذاتية التشريب (التزييت).

وبالتالي نستنتج أن شكل المنحني حتى زمن تلييد حراري محدود سيكون قريباً من شكل التابع الأسّي (في بحثنا هذا 7 ساعات)، ولكن بعد الوصول إلى زمن تلييد معين (في بحثنا هذا لم نصل له) سيتحول شكل المنحني إلى تابع من الدرجة الثانية حيث سيقبل مستقيماً مقارباً له معادلته من الشكل: $y = \rho_{final}$

لذا بإمكاننا القول بأن الخط البياني في الشكل (7) على مجال محدود (في بحثنا هذا [0 , 7]) يسلك سلوك التابع الأسّي وبالتالي سيؤثر على العلاقة ما بين الكثافة الظاهرية النهائية وزمن التلييد الحراري ضمن هذا المجال. ولكن عند تجاوز حد معين من زمن التلييد فإن العلاقة الأسية لن تؤثر على المنحني، بل سيغير المنحني جهة تقعره ويسلك سلوك تابع تربيعي (من الدرجة الثانية).

بشكل عام عند القيام بعملية التلييد الحراري للمدمجات الخضراء، فيجب علينا الإجابة على بعض التساؤلات

الهامة:

أولاً: من الضروري معرفة هل تحقق المستوى المطلوب من الخواص الفيزيائية والميكانيكية (Physical and Mechanical Properties) لهذه المواد بعد عملية التلييد الحراري.

ثانياً: من الضروري توضيح كيفية تغير أبعاد المنتجات الملبدة، وإمكانية تأمين الدقة المطلوبة لها. يبين الجدول رقم (3) تغير الأبعاد والمسامية النهائية بعملية التلييد الحراري عند $T = 1000^{\circ}\text{C}$ مع تغير زمن التلييد الحراري.

حيث قمنا بحساب المسامية النهائية للمنتج بعد الانتهاء من عملية التلييد الحراري من القانون:

$$\Omega = \left(1 - \frac{\rho_{compact}}{\rho_{solid}} \right) * 100 \quad [\%] \quad [1]$$

حيث: Ω : المسامية النهائية [%]

$\rho_{compact}$: الكثافة الظاهرية النهائية للمدمج بعد الانتهاء من عملية التلييد الحراري.

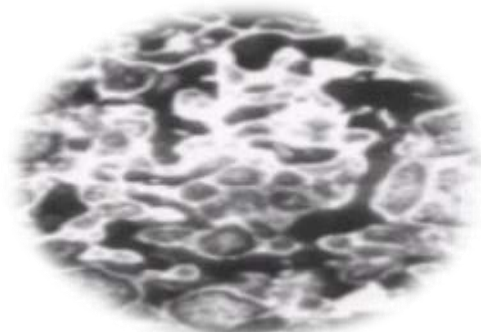
ρ_{solid} : كثافة معدن المنتج وهو مصمت (كثافة الحديد تقريباً [7.85 g/cm³])

الجدول (3): علاقة تغير الأبعاد (القطر والارتفاع) بزمن عملية التلييد الحراري عند $T = 1000^{\circ}\text{C}$

رقم العينة	القطر قبل التلييد [mm]	الارتفاع قبل التلييد [mm]	زمن التلييد [h]	القطر بعد التلييد [mm]	الارتفاع بعد التلييد [mm]	المسامية النهائية [%]
1	30.016	14.985	1	29.647	15.253	20.25
2	30.011	14.99	2	29.475	15.268	19.36
3	30.002	14.998	3	29.223	15.195	17.7
4	30.009	14.991	4	29.184	14.974	16.94
5	30.011	14.993	5	29.112	15.025	16.05
6	30.013	15.012	6	29.084	14.369	15.03
7	30.008	15.006	7	29.078	15.114	15.63

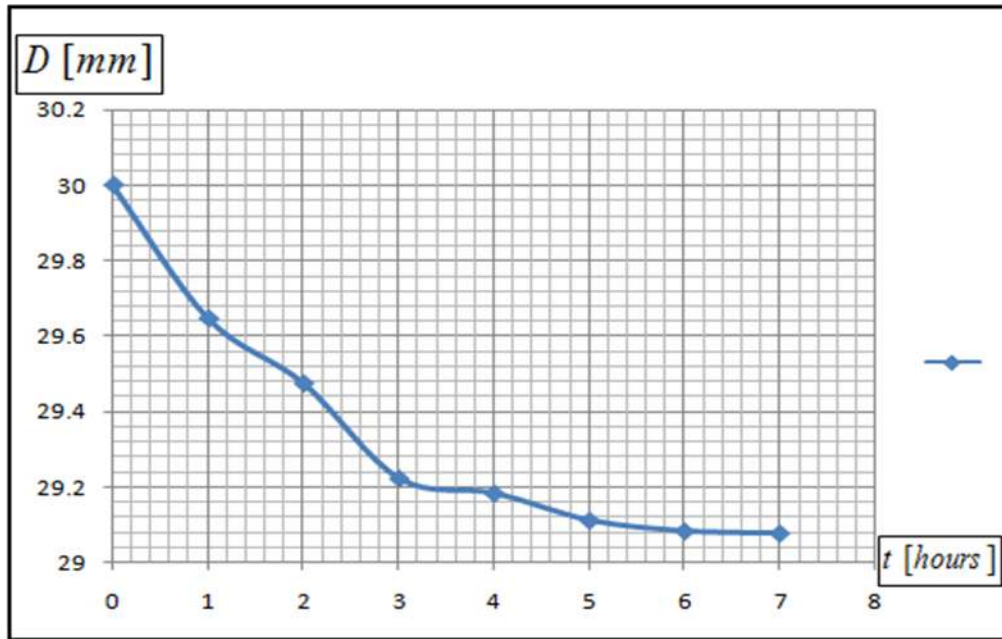
تشير نتائج البحث إلى أن التغير في الأبعاد الهندسية، كالارتفاع والقطر للنماذج المختبرة تتعلق بالمسامية Porosity وبنظام عملية التلييد. إن هذه التغيرات في الأبعاد لا تحمل دائماً خواصاً متشابهة لأن عملية التلييد الحراري تؤثر في تغير الأبعاد في اتجاهات مختلفة، ومن الصعب سابقاً التنبؤ بالتأثيرات كلها، وتشير دلائل البحث إلى تغير في الارتفاع باتجاه الزيادة أو النقصان بسبب الانكماش الحاصل بينما ينقص القطر بشكل واضح، ويكون المعدل النسبي في الزيادة أو النقصان للأبعاد بحدود $\pm(1-3)\%$.

حيث يتناسب هذا التغير والتفاوت المسموح به Tolerance مع المرتبة الثانية أو الثالثة من دون أي عملية تشغيل إضافية مثل الجليخ أو الصقل..... إلخ، كما نلاحظ تناقصاً في المسامية أي زيادة في الكثافة الظاهرية كما هو مبين في الجدول (3) بسبب تشكل الرقاب (Necks) بين الحبيبات عند نقاط التلامس، وهذه الرقاب تأخذ في الكبر بصورة متزايدة. ونتيجة لذلك فإن الزوايا الحادة بين الحبيبات تأخذ في الاستدارة وفي النهاية فإن الفراغات البينية تصبح على هيئة مسام كروية. [8].



الشكل (9): صورة للمجهر الضوئي موصولاً إلى الحاسب المستخدم في أخذ البنية الميكروية للمنتجات

الشكل (8): البنية الميكروية لمنتج المساحيق المعدنية المقترح عند شروط $(T=1000^{\circ}\text{C}, 2\text{hours})$



الشكل (10): العلاقة ما بين تغير بُعد قطر العينة بعد كل عملية تلييد حراري (اختلاف زمنها)

يوضح الشكل (8) تناقصاً حاداً في قطر العينة الأسطوانية المختبرة على المجال [0 , 3 hours]، بينما يقل هذا التناقص الحاد بعد تطبيق زمن 3 ساعات على المجال [3 , 7 hours]، وبالتالي يجب علينا الأخذ بعين الاعتبار مقدار التغير في الأبعاد الحاكمة للمنتجات النهائية المراد تشكيلها بتقانة المساحيق المعدنية، ووضع مجل للتسامحات المقبولة في الأبعاد النهائية للمنتجات.

حيث نلاحظ أن العلاقة ما بين تغير قطر العينة مع زمن التلييد الحراري هي من الدرجة الثانية، وتقبل هذه العلاقة مقارياً بوزني المحور الأفقي معادلته من الشكل:

$$D = D_{final} \cong (97 - 98\%) D_{initial}$$

حيث: D_{final} : القطر بعد الانتهاء من عملية التلييد الحراري.

$D_{initial}$: القطر قبل البدء بعملية التلييد الحراري.

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث دراسة تأثير زمن التلييد الحراري على الكثافة الظاهرية النهائية، وعلى مقدار تغير قطر العينات خلال فترات زمنية مختلفة للخليطة الأكثر استخداماً في تقانة ميتالورجيا المساحيق وقد استخلصنا من هذه الدراسة مايلي:

- 1 بينت نتائج الاختبارات والقياسات أن زمن التلبيد الحراري يؤثر بشكلٍ إيجابي على الكثافة الظاهرية للمدمج النهائي المصنع بتقانة المساحيق المعدنية، حيث التناسب يكون طردياً حتى الوصول إلى حد معين. وأيضاً تأثيره كان واضحاً على تقلص أقطار العينات المستخدمة في الاختبارات. وتغير (زيادة ونقصان) في ارتفاع العينات.
- 2 - تم الحصول على علاقة بيانية تجريبية تقريبية يمكن بواسطتها التنبؤ بالكثافة الظاهرية النهائية المتوقع الحصول عليها عند تطبيق أي فترة زمنية لعملية التلبيد الحراري نختارها وذلك اختصاراً للوقت والجهد بدون الحاجة لحسابها عملياً من خلال التجارب. وكذلك الأمر بالنسبة لأقطار العينات المستخدمة.
- 3 تقول علاقة الكثافة الظاهرية النهائية بزمن التلبيد الحراري إلى صفة الدالة الأسية حتى حدٍ معين ثم تتغير لشكلٍ آخر، أما علاقة تغير القطر للعينات المستخدمة مع زمن التلبيد الحراري فتحمل صفة دالة من الدرجة الثانية (قطع مكافئ).
- 4 يمكن إيجاد الكثافات الظاهرية النهائية لأي منتج مراد تصنيعه من الخليطة العيارية المستخدمة مهما بلغت درجة تعقيد شكله الهندسي.
- 5 تم تحسين بعض الخواص الفيزيائية (الكثافة الظاهرية والأبعاد الهندسية) للمدمجات المنتجة بتقانة المساحيق المعدنية، بحيث ازدادت كثافتها وبالتالي زاد من متانتها.
- 6 أظهر البحث الأهمية الكبيرة لمتابعة إيجاد ودراسة وتحليل العلاقات ما بين متغيرات عملية التدمج والتلبيد الحراري مع بعضها البعض، وتأثيراتها المختلفة على المدمج الأخضر والنهائي الناتج، نظراً لما تسهله لعمليات الإنتاج المؤتمتة الخاصة بالمساحيق المعدنية.

المراجع:

1. د. مجيد، عبد الله يوسف "ميتالورجيا المساحيق"، جامعة دمشق (2013) ص 387.
- 2- Powder metal technologies and applications, vol.7 of , ASM metals Handbook, USA 1998, p2762.
- 3- SRIDHAR,I.A ;FLEC,N.A. Yield Behaviour of Cold Compacted Composite Powders, Acta Metallurgica Inc, vol 48 (2000) 3341-3352.
- 4- ORBA,R.L.: New Research Directions in powder metallurgy, Reports in physics, Romanian, 2004 Volume 56, NO.3, P.505 – 516,.
- 5- CALLISTER,W.S. Materials Science and Engineering An Introduction.USA ,2000, p871.
- 6- KLOCKE ,E.N. Powder Metallurgy, Fraunhofer Institute Productions technologies. USA, 2009, 18-20.
- 7- SolidWorks Fundamentals – 2014.
- 8- COLTON, J.S.: Metal Powder Processing-Powder Compaction and Sintering. ME 4210: Manufacturing Processes and Engineering, Georgia Institute of Technology, 2009, p 19-26.