

# Effect of Particle Size and Shape on Properties of Copper – Graphite Composites

**Dr. Farouk M. Mahdi**

Colleg of Engineering, University of Tikrit  
Email: farouk\_engineering @yahoo.com

**Dr. Raed N. Razooki**

Colleg of Engineering, University of Tikrit

**Abbas Abdulkareem Hussein**

Colleg of Engineering, University of Tikrit

## Abstract

The present work aims to study the effect of particles shape and size of copper powder on physical, mechanical properties and wear resistance of copper-13vol% graphite composites prepared by powder metallurgy technique. Spherical and dendritic copper powder particles were used as matrix besides a mixture of both shapes with three particle size ranges [(25>),(38-45),(53-63)] $\mu\text{m}$ . 13vol% graphite powder with grain size of ( $63\mu\text{m}\geq$ ) was added as reinforcement. All powder mixtures were mixed mechanically for 2 hour. The mixed powders were cold pressed uniaxially at (700Mpa) for 30seconds and sintered at (900 °C) for one hour.

The results showed that the relative density, both electrical and thermal conductivities and compressive strength of dendritic copper composites are higher than those of spherical copper composites, for example, the maximum values for both electrical and thermal conductivities for dendritic copper (53-63) $\mu\text{m}$ +13vol% graphite composite were  $36.01 (\mu\Omega.\text{m})^{-1}$ ,  $295.55 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$  respectively, while wear rate of dendritic copper composites was lower than that of spherical copper composites where the minimum value for dendritic copper composites was ( $1.068\times 10^{-9} \text{ g/cm}$ ) for dendritic copper (53-63) $\mu\text{m}$ +13vol% graphite composite. It was found through the results of the present work that relative density, hardness and compressive strength increases with decreasing copper particle size. On the other hand an improvement in wear resistance was found on decreasing the particle size.

**Keywords:** Copper-Graphite Composites, Particle Shapes, Particles Size

تأثير حجم وشكل دقائق مسحوق النحاس على خواص المواد المترابكة (نحاس-  
كرافيت)

## الخلاصة

يهدف البحث الحالي إلى دراسة تأثير شكل وحجم جسيمات مسحوق النحاس على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية ومقاومة البلى للمواد المترابكة نحاس-13vol% كرافيت المحضرة بطريقة ميتالورجيا المساحيق. تم استخدام مسحوق النحاس الكروي والشجري كمادة أساس علاوة على خليط من الاثنين وبحجوم مختلفة [(25>),(38-45),(53-63)] $\mu\text{m}$ . تم اضافة الكرافيت بنسبة ثابتة (13vol%) وبحجم دقائق ( $63\mu\text{m}\geq$ )

<https://doi.org/10.30684/etj.33.7A.17>

2412-0758/University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq

This is an open access article under the CC BY 4.0 license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

لتكوين المواد المترابكة. بعدها اجري الخلط بخلط ميكانيكي لمدة ساعتين وكبس المزيج على البارد من اتجاه واحد بضغط (700 Mpa) لمدة (30sec) وأجري التليد عند درجة حرارة (900°C) لمدة ساعة واحدة. اظهرت النتائج أن الكثافة النسبية والموصليتين الكهربائية والحرارية ومقاومة الانضغاط للمواد المترابكة المكونة من النحاس الشجيري أعلى من نظيراتها المكونة من النحاس الكروي إذ بلغت أقصى قيم لهذه الخواص للمادة المترابكة (نحاس شجيري (63-53)μm+كرافيت) على سبيل المثال [(36.01) (μΩ.m)<sup>-1</sup>], (295.55 (W/m.°K) على التوالي. كما اظهرت النتائج ان معدل البلى للمواد المترابكة المكونة من النحاس الشجيري اقل من نظيراتها المكونة من النحاس الكروي إذ بلغ أقل معدل بلى (1.068×10<sup>-9</sup> g/cm) للمادة المترابكة (نحاس شجيري (63-53)μm+كرافيت). تم التوصل كذلك إلى أن الكثافة النسبية والصلادة ومقاومة الانضغاط تزداد بنقصان حجم دقائق النحاس. أما معدل البلى فإنه يقل بنقصان حجم دقائق النحاس.

**الكلمات الدالة:** المواد المترابكة نحاس-كرافيت, شكل الدقائق, حجم الدقائق

## المقدمة

يعد النحاس واحدا من أكثر المواد الهندسية ملائمةً للتطبيقات الكهربائية والحرارية. وكحال بقية المعادن فإن النحاس يعاني من مشكلة التليد عند الدرجات الحرارية العالية كما أن له مقاومة بليان واطنة أثناء الانزلاق لذلك فإن تقوية النحاس تعد احدى الطرائق للتغلب على تلك المشاكل إذ يتم تقوية النحاس بالكرافيت الذي يمثل مادة التدعيم (Reinforcement) والتي يمكن أن تكون على شكل دقائق (Particles) أو ألياف مستمرة (Continuous Fibers) وبذلك ظهرت المواد المترابكة النحاس- الكرافيت التي تمتلك موصلية كهربائية وحرارية عالية كما تمتلك خواص تزييت لحالات التماس الإنزلاقي الجاف, وجاءت هذه الخواص نتيجة للتأثير المشترك لكل من النحاس والكرافيت ولذلك فهي تستخدم بشكل واسع في الأجزاء الإنزلاقية مثل الفرش الكهربائية (Electrical Brushes) والركائز الإنزلاقية (Sliding Bearings) والأجزاء الهندسية التريبولوجية وكذلك في بعض اجزاء المولدات والمحركات والسيارات والحلقات الإنزلاقية Slip (Rings) [3,2,1].

قام الباحثان (Yech-Ju Lin and Kuen-Shyang Hwang) في العام 2009 بدراسة تأثير كل من شكل دقائق مسحوق النحاس والمتغيرات العملية على التشتيت الحراري للأنايبب الحرارية إذ تم استخدام ثلاثة اشكال من دقائق مساحيق النحاس وهي المسحوق ذو الشكل الكروي والمسحوق ذو الشكل الشجيري والمسحوق ذو الشكل غير المنتظم وقد توصلوا إلى أن الشكل الكروي للنحاس (للعينات الملبدة بدون ضغط) يمتلك أعلى نفاذية وأعلى سرعة شعيرية وأفضل تشتيت حراري يليه الشكل غير المنتظم ثم الشكل الشجيري [4].

كما قام الباحث (Sheikh M. Uddin) وآخرون عام 2010 بدراسة تأثير حجم وشكل دقائق مسحوق النحاس على الصلادة والخواص الكهربائية للمواد المترابكة ذات اساس النحاس المقواة بانابيب الكربون النانوية والمواد المترابكة لسبائك النحاس وتوصل إلى أن صلادة النحاس ازدادت بنسبة (47%) بعدإضافة (0.1wt% Multiwall Nanocarbon Tube MWNC). كما تحسنت الموصلية الكهربائية للبرونز بنسبة (20%) بعد إضافة (0.1wt% Singlewall Nanocarbon Tube SWNCT) [6].

كذلك درس الباحث (Montasser Dewidar) وآخرون عام 2011 تأثير المتغيرات العملية وكمية الإضافات على الخواص الميكانيكية ومقاومة البلى للمواد المترابكة ذات اساس من النحاس وتوصل الى إن زيادة ضغط الكبس للمواد المترابكة نحاس – كرافيت يؤدي إلى زيادة كل من الكثافة الخضراء والكثافة الملبدة وكذلك تحسين الخواص الميكانيكية. كما توصل الى ان زيادة درجة حرارة التليد تؤدي إلى خواص ميكانيكية ومقاومة بلى عاليين [7].

أما الباحث (C. Vincent) فقد درس عام 2012 تأثير المسامية على الموصلية الحرارية للنحاس المحضر بطريقة ميتالورجيا المساحيق إذ أستخدم مسحوق النحاس الكروي والشجيري وتوصل الى ان المسامية تتأثر بطبيعة السطح وشكل المساحيق المستخدمة كما ان الموصلية الحرارية تقل بزيادة النسبة الحجمية للمسامية [5].

## طرائق العمل والمواد المستخدمة

### 1- تحضير المواد المترابكة

تم تحضير المواد المترابكة باستخدام مسحوق النحاس كمادة اساس ذي الشكل الكروي والشجيري وبحجم دقائق (63μm) وبنقاوة (99.7%) مع إضافة مسحوق الكرافيت بحجم جسيمات (63μm) وبنقاوة (99.8%) ونسبة ثابتة (13vol%).

لقد تم تصنيف مساحيق النحاس بنوعها الكروي والشجيري باستعمال جهاز هزاز المناخل (Automatic Sieve Shaker) طراز (15-D0 403) وباستخدام المقياس العالمي (B 214-99) وبذلك تم الحصول على

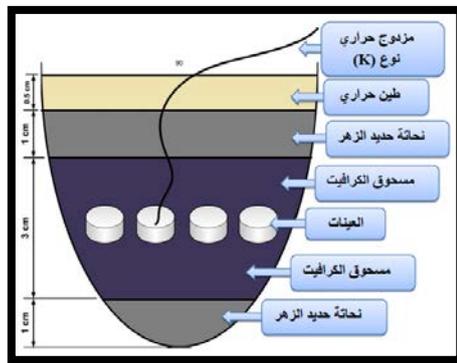
ثلاث تدرجات حجمية متطابقة من كل نوع وهي (>25 مايكرومتر, (38-45) مايكرومتر, (53-63) مايكرومتر)[8].  
تم تجفيف مسحوق الكرافيت بدرجة حرارة (200°C) ولمدة ساعتين للتخلص من الرطوبة والمواد الطيارة, ومن ثم تهيئة الاوزان الخاصة لكل نوع من أنواع المواد المترابكة وكما موضح في الجدول (1).

الجدول (1) أنواع المواد المترابكة ( نحاس-كرافيت )

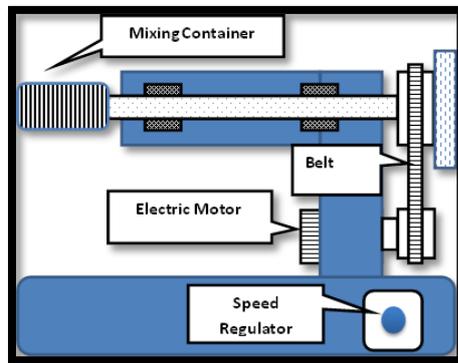
رمز النموذج	شكل وحجم ونسب مساحيق النحاس في المواد المترابكة	نسبة الكرافيت في المواد المترابكة vol%
1	87% كروي (>25µm)	13%
2	87% كروي (38-45)µm	13%
3	87% كروي (53-63)µm	13%
4	87% شجري (>25µm)	13%
5	87% شجري (38-45)µm	13%
6	87% شجري (53-63)µm	13%
7	43.5% (>25µm) شجري + 43.5% (38-53)µm كروي	13%
8	43.5% (38-53)µm شجري + 43.5% (>25µm) كروي.	13%
9	43.5% (>25µm) كروي + 43.5% (>25µm) شجري.	13%

لقد تم تحديد أوزان المساحيق المكونة لكل نوع من المواد المترابكة كما موضح في الجدول (1) داخل الحاوية الفولاذية لماكنة الخلط الموضحة في الشكل (1) والمصنعة محليا ومن ثم خلطت المساحيق لمدة ساعتين وبسرعة خلط (124) دورة / دقيقة. بعد ذلك اجريت عملية الكبس للمساحيق باستخدام قالب كبس فولادي تبلغ صلادته (60HRC) بضغظ أحادي الإتجاه مقداره (700 Mpa) والإبقاء على الضغظ لمدة (30) ثانية لتفادي احتمال الإرجاع المرن واستخدمت لهذا الغرض ماكنة الاختبارات الجامعة ( Universal Testing Machine) نوع (HOYTOM) وبسعة كبس (170KN). تم الحصول على نماذج اسطوانية الشكل قطرها (10) ملم وارتفاعها (5) ملم.

استخدمت حاوية خزفية لإجراء عملية التليد للنماذج حيث وضعت طبقة من نحادة حديد الزهر الرمادي في قاع الحاوية بسمك (1cm) ثم طبقة كرافيت بسمك (1.5cm). بعد ذلك تم ترتيب النماذج فوق طبقة الكرافيت مع تثبيت مزدوج حراري نوع (K) قرب النماذج لمراقبة درجة الحرارة والسيطرة عليها, ثم تغطية النماذج بطبقة أخرى من مسحوق الكرافيت بسمك (1.5cm) تلتها طبقة من نحادة حديد الزهر الرمادي بسمك (1cm). بعد ذلك تم غلق الحاوية بطبقة من الطين الحراري (Fire Clay) وقد اثبتت هذه الترتيبية فاعليتها في منع تأكسد النماذج [8] وكما مبين بالشكل (2). بعد جفاف الطين الحراري وضعت الحاوية داخل الفرن الكهربائي ثم رفع درجة حرارة التليد إلى (900°C) تدريجيا وبمعدل (12°C/min) ومن ثم الإبقاء على الحاوية عند تلك الدرجة لمدة ساعة واحدة يتبع ذلك التبريد البطيء داخل الفرن إلى درجة حرارة الغرفة [9].

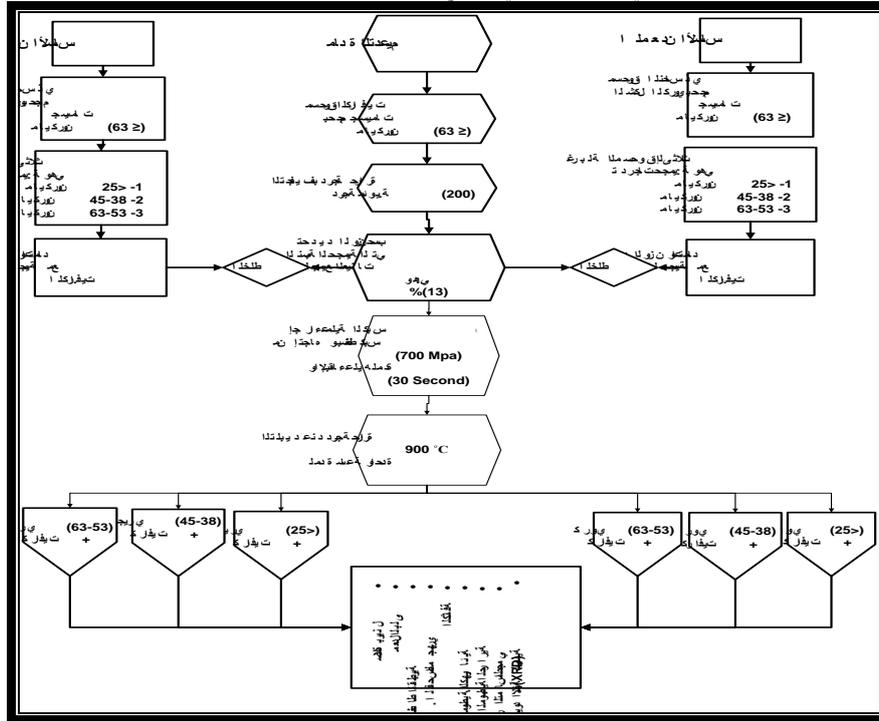


الشكل (2) الحاوية الخزفية ومحتوياتها أثناء عملية التليد [9].



الشكل (1) ماكنة الخلط [9].

والشكل (3) يمثل المخطط الانسيابي للجزء العملي المتبع.



الشكل (3) المخطط الانسيابي للجزء العملي

### الفحوصات والإختبارات الميكانيكية

#### 1- اختبار الصلادة

لغرض قياس صلادة النماذج تم تنعيمها بورق تنعيم متدرج من كاريبيد السيلكون (2000,1200,600) من أجل التهيئة السطحية المناسبة ثم استخدم جهاز صلادة برينل نوع (Proceq Equotip2) المبرمج والذي يعطي قيم الصلادة بشكل مباشر على شاشة الجهاز. تم أخذ خمس قراءات للصلادة لكل وجه من أوجه النموذج ومن ثم أخذ معدل الصلادة للوجهين للحصول على قيمة الصلادة للنموذج.

#### 2- اختبار مقاومة الانضغاط القطرية

تم إجراء اختبار مقاومة الانضغاط القطرية باستخدام ماكينة الاختبارات الجامعة نوع (HOYTOM) الموجودة في قسم الهندسة الميكانيكية بجامعة تكريت والمبينة بالشكل رقم (4) إذ تم وضع العينة على منصة الفحص وسلط الحمل على قطر العينة لحين حدوث الفشل وتم قراءة الحمل الأقصى وللجهاز قابلية على تخزين القيمة القصوى للحمل قبل الفشل وبعد ذلك تم حساب مقاومة الانضغاط باستخدام العلاقة الآتية [10]:

$$\sigma_D = \frac{2F}{\pi dh} \quad \dots (1)$$

إذ أن:-

$\sigma_D$ : مقاومة الكسر الانضغاطية (MPa).

F: القوة المسلطة (N).

d: قطر العينة (mm).

H: سمك العينة (mm).



الشكل (4) ماكينة الكبس الجامعة

### 3- اختبار البلى

أجري اختبار البلى باستخدام جهاز اختبار البلى نوع (Ed-201 Wear And Friction Monitor) وباستعمال تقنية المسمار-على-القرص (Pin-on-Disk) وكانت متغيرات الفحص (السرعة الدورانية (470r.p.m), نصف قطر الإنزلاق (3cm), الحمل العمودي المسلط 20N, زمن الفحص (30Min), صلادة القرص ((62HRC).

بعد ذلك تم حساب معدل البلى باتباع الطريقة الوزنية وذلك بوزن العينة قبل وبعد الإختبار باستخدام ميزان حساس وبدقة ( $0.0001g \pm$ ) وباستخدام العلاقة الآتية [11]:

$$\text{wear rate} = \frac{\Delta w}{s} \text{ (gm/cm)} \quad \dots (2)$$

حيث أن:-

$\Delta w$ : مقدار التغير بالوزن (gm):

$$\Delta w = w_1 - w_2 \quad \dots (3)$$

$W_1$ : وزن العينة قبل الإختبار (gm).

$W_2$ : وزن العينة بعد الإختبار (gm).

وان المسافة الانزلاقية (cm) وتحسب من المعادلة الآتية [11]:

$$S = 2\pi rnt \quad \dots (4)$$

حيث أن:-

r: نصف قطر الإنزلاق (cm).

n: السرعة الدورانية للقرص (R.P.M).

t: زمن الاختبار (Min).

### 4- الفحوصات الفيزيائية

- الكثافة الحقيقية (كثافة التليد) والكثافة النسبية

تم حساب قيم الكثافة الحقيقية للمواد المترابكة باتباع قاعدة ارخميدس (Archimedes Principle) وفق المعيار العالمي (ASTM C373-88) وباستعمال ميزان كهربائي حساس ذي دقة ( $0.0001 \pm$ ) غرام [12].

تم حساب الكثافة الحقيقية بتطبيق العلاقة الآتية [14,13,12]:

$$\rho_s = \frac{w_d}{w_s - w_i} \times \rho_w \quad \dots (5)$$

حيث أن:

$\rho_s$ : الكثافة الحقيقية (كثافة التليد) للعينة ( $\text{gm/cm}^3$ ).  
 $w_d$ : الوزن الجاف للنموذج ( $\text{gm}$ ).  
 $W_s$ : الوزن المشيع للنموذج ( $\text{gm}$ ).  
 $W_i$ : وزن النموذج وهو معلق بالماء ( $\text{gm}$ ).  
 $\rho_w$ : كثافة الماء ( $1 \text{ gm/cm}^3$ ).

تم حساب كثافة النموذج النظرية باستخدام قاعدة الخليط من المعادلة الآتية [12]:-

$$\rho_{th} = \sum_{i=1}^n (\rho_i \cdot X_i) \quad \dots (6)$$

حيث أن:

$\rho_i$ : الكثافة النظرية للعناصر المكونة للنموذج الواحد ( $\text{g/cm}^3$ ).

$X_i$ : نسبة كل عنصر في النموذج الواحد.

ومن ثم حساب الكثافة النسبية من قيم الكثافة النظرية والكثافة الحقيقية وتطبيق العلاقة الآتية [12]:-

$$\rho_r = \frac{\rho_s}{\rho_{th}} \times 100\% \quad \dots (7)$$

حيث أن:

$\rho_r$ : الكثافة النسبية (%).

#### - الموصلية الكهربائية

قيست المقاومة الكهربائية للنماذج (Electrical Resistivity) حسب المقياس العالمي (B193-87) واعتماد طريقة المجسات الأربعة (Four Probe Method) وباستخدام جهاز قياس المقاومة الكهربائية نوع (Megger MT0210-DC) [15].

حيث تم تثبيت النماذج أثناء الإختبار بواسطة مثبتات خاصة (Special Jigs) مصممة لهذا الغرض لضمان التماس الكهربائي الجيد خلال الفحص وبعد غلق الدائرة الكهربائية يتم عرض قيمة المقاومة للنموذج على شاشة الجهاز الرقمية.

تم حساب المقاومة الكهربائية للنماذج من قيم المقاومة الكهربائية بتطبيق العلاقة الآتية: [17,16,15]:-

$$\rho = R \cdot \left(\frac{A}{L}\right) \quad \dots (8)$$

حيث أن:

$\rho$ : المقاومة الكهربائية ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ).

$R$ : المقاومة الكهربائية ( $\mu\Omega$ ).

$A$ : مساحة مقطع النموذج ( $\text{cm}^2$ ).

$L$ : طول النموذج ( $\text{cm}$ ).

تم حساب الموصلية ( $\sigma$ ) الكهربائية من قيم المقاومة الكهربائية وحسب العلاقة الآتية [15,12]:-

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \dots (9)$$

حيث أن:

$\sigma$ : الموصلية الكهربائية ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ )<sup>-1</sup>.

#### - الموصلية الحرارية

تم حساب الموصلية الحرارية للنماذج من قيم الموصلية الكهربائية بتطبيق معادلة ويدمان – فرانز (Wiedmann-Franz Equation) التي اوجدت علاقة تربط بين الموصلية الحرارية والموصلية الكهربائية.

إن معادلة ويدمان – فرانز كالاتي [18,17,16]:

$$\frac{\lambda}{\sigma T} = L = 2.443 \times 10^{-8} \left(\frac{w \cdot \Omega}{k^2}\right) \quad \dots (10)$$

حيث أن:

$\lambda$ : الموصلية الحرارية للنماذج (w/m.k).  
 $\sigma$ : الموصلية الكهربائية للنماذج  $(\mu\Omega.m)^{-1}$ .  
 $T$ : درجة الحرارة المطلقة (كلفن).  
 $L$ : رقم لورنز  $(\frac{w.\Omega}{k^2}) \times 10^{-8} (2.443)$ .

#### - حساب كسر التماس الحجمي بين مكونات التركيب المجهري

تم حساب كسر التماس الحجمي بين مكونات التركيب المجهري باستخدام طريقة العد النقطي ( Point Count Method) والتي تمتاز بالدقة والسهولة وتتلخص هذه الطريقة برسم شبكة من الخطوط المتقاطعة بشكل مربعات على الصورة المجهرية للمتراكب المراد حساب كسره الحجمي وعلى هذا الأساس تم رسم شبكة متقاطعة مكونة من (12) خطاً عمودياً و(12) خطاً أفقياً لتكوين (100) نقطة تقاطع وبمربعات أبعادها  $10 \times 10$  ملم.

بعد ذلك يتم عد نقاط التقاطع الواقعة داخل الطور المعين بالإضافة إلى النقاط الواقعة على الحدود الحبيبية إذ يتم احتساب نقطة التقاطع الواقعة داخل الطور المعين على انها نقطة كاملة بينما يتم احتساب النقطة الواقعة عند الحدود الحبيبية على أنها نصف نقطة ومن ثم تطبيق المعادلة الاتية [18]:

$$P_p = \frac{P + \alpha}{P_T} \dots (11)$$

حيث أن:

$P_p$ : الكسر النقطي (Point Fraction).

$P$ : عدد نقاط التقاطع الواقعة داخل الطور المعين.

$P_T$ : عدد النقاط الكلية

يعتبر الكسر النقطي مساويا لكسر المساحة (Area Fraction) وكذلك يكون مساويا للكسر الحجمي [18].  
 وبذلك فان:

$$P_p = A_A = V_V \dots (12)$$

حيث أن:

$V_V$ : الكسر الحجمي للتماس بين المكونات .

$A_A$ : كسر المساحة للتماس بين المكونات.

#### النتائج والمناقشة

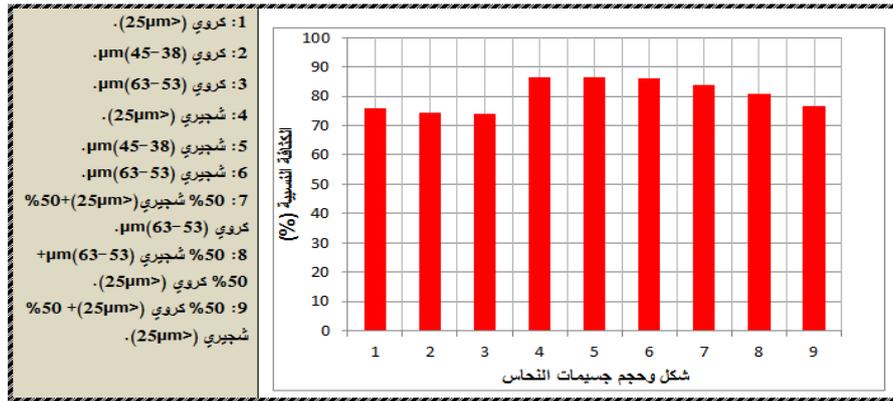
##### \*تأثير شكل وحجم دقائق مسحوق النحاس على الكثافة النسبية للمواد المترابطة

يبين الشكل (5) العلاقة بين شكل وحجم دقائق مسحوق النحاس والكثافة النسبية للمواد المترابطة ويلاحظ من خلال الشكل أن المواد المترابطة المكونة من النحاس ذي الشكل الشجري تمتلك كثافة نسبية أعلى من نظيراتها المكونة من النحاس ذي الشكل الكروي وذلك بسبب زيادة المساحة السطحية لدقائق مسحوق النحاس الشجري وزيادة مساحة التماس فيما بين تلك الدقائق نتيجة تعرجها السطحي مقارنة بالدقائق الكروية والشكل (6) يوضح الصور المجهرية للمساحيق المستخدمة في هذه الدراسة، ومن خلال الصور المجهرية للمساحيق يمكن فهم الفارق في الكثافة النسبية بين المواد المترابطة ذات الشكل الشجري والمواد المترابطة ذات الشكل الكروي لجسيمات النحاس إذ إن المساحة السطحية ومقدار التعرجات لجسيمات الشكل الشجري أكبر بكثير مما هي عليه في الشكل الكروي ذي الحجم المتماثل، هذه الحالة تجعل التداخل الميكانيكي ومساحة التماس بين الجسيمات الشجرية أعلى مما في الجسيمات الكروية أثناء الكبس، أما أثناء عملية التلييد فإن مساحة التماس العالية هذه ستجعل كل أنواع وآليات التلييد تعمل بفاعلية وتزيد نسبة التكتيف بتقليل المسامية ومن ثم الحصول على مادة مترابطة ذات كثافة نسبية عالية [19]. والشكل (7) يوضح الصور المجهرية لجميع المواد المترابطة بعد التلييد. كما يلاحظ من الشكل (5) أن الكثافة النسبية للمواد المترابطة المكونة من النحاس ولكلا الشكلين الشجري والكروي تزداد بنقصان حجم الدقائق والسبب في ذلك يعود أيضا إلى زيادة المساحة السطحية للدقائق بنقصان حجم الدقائق وفاعلية عمليات الإنتشار والتكتيف المرافقة لها وقد توصل (Sheikh M. Uddin) [6] إلى نفس النتيجة للمواد المترابطة نحاس- أنابيب الكربون النانوية.

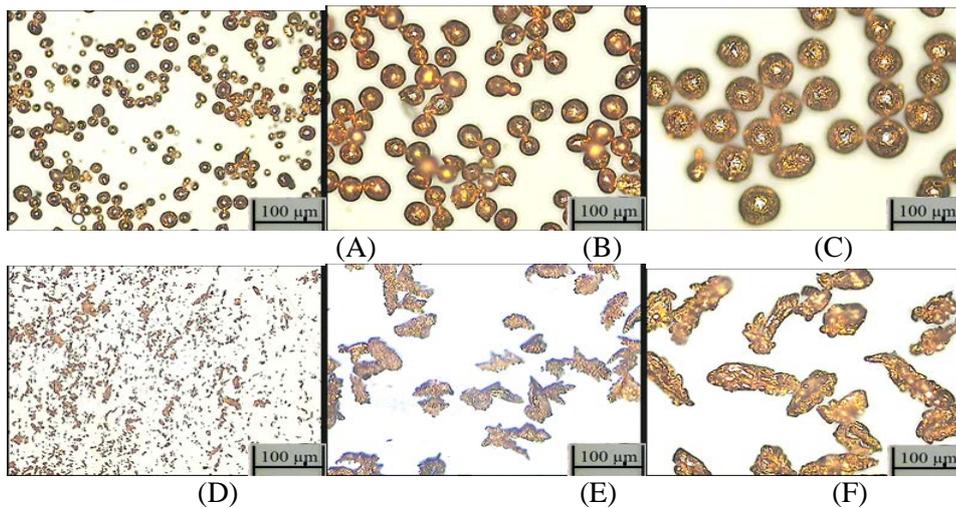
كذلك يلاحظ من الشكل (5) أن المادة المترابطة رقم (7) والتي تتكون من (43.5% شجري  $(25\mu m >)$  + 43.5% كروي (53-63)  $\mu m$  + 13vol% كرافيت) تمتلك كثافة نسبية أعلى من المادتين المترابكتين (8,9) المكونتان من (43.5% كروي  $(25\mu m >)$  + 43.5% شجري (53-

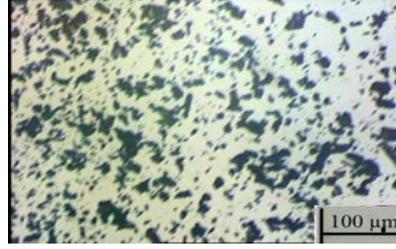
(63  $\mu\text{m}$  + 13vol% كرافيت) و (43.5% كروي  $>25\mu\text{m}$ ) + 43.5% شجري (25  $\mu\text{m}$  + 13vol% كرافيت) على التوالي. ويعود سبب ذلك إلى أن دقائق النحاس الشجري الصغيرة ( $>25\mu\text{m}$ ) تعمل كمادة حشو لدقائق النحاس الكروية الكبيرة (53-63  $\mu\text{m}$ )، أما في المادة المترابكة رقم (8) فالعكس هو الصحيح، وحيث أن نسبة المسامية في المادة المترابكة ذات الدقائق الكروية رقم (3) الداخل في تكوين المادة المترابكة رقم (7) قد بلغت (25.91%) وهي نسبة عالية تتيح لدقائق الحشو الشجرية الصغيرة ( $>25\mu\text{m}$ ) أن تعمل بفاعلية في ملئ الفراغات البينية والحصول على كثافة نسبية عالية مقارنة بالمادة المترابكة رقم (8) التي تمتلك الدقائق الشجرية الكبيرة المكونة لها مسامية منخفضة نسبياً (13.86%) وهو ما يقلل من فاعلية الدقائق الكروية الصغيرة ( $>25\mu\text{m}$ ) في حشو الفراغات البينية ومن ثم فإن فاعليتها في زيادة الكثافة تكون أقل، يعزز ذلك صور البنية المجهرية للمواد المترابكة والمبينة في الشكل (7)، إذ يتبين من الشكل (C-7) وجود ضعف كبير في عملية الإندماج في أثناء التليد وبقاء الكثير من الدقائق الكروية على وضعها دون اندماج بخلاف الشكل (G-7) لنفس المادة المترابكة بعد إضافة دقائق الحشو الشجرية الصغيرة التي عملت على ملئ الفراغات وزيادة مساحة التماس مما أدى إلى تحقق اندماج شبه تام وتقليل المسامية وزيادة الكثافة. أما في الشكل رقم (H-7) فإن بقاء عدد كبير من دقائق الحشو الكروية الصغيرة على حالها دون اندماج أو تكوين تجمعات فيما بينها، يشير إلى عدم إمكانية الفراغات البينية لدقائق المادة المترابكة الشجرية الكبيرة على استيعابها مما أدى إلى تقليل فاعليتها في رفع كثافة المادة المترابكة.

أما بالنسبة للمادة المترابكة رقم (9) والمكونة من (43.5% كروي  $>25\mu\text{m}$ ) + 43.5% شجري ( $>25\mu\text{m}$  + 13vol% كرافيت) فإن خليط من دقائق بنفس الحجم ومختلفة بالشكل يؤدي إلى عدم حدوث عمليات ملئ الفراغات وانخفاض الكثافة النسبية عن قيمتها للمادتين المترابكتين (7,8) اللتين حدث فيهما ملئ للفراغات.



الشكل (5) العلاقة بين شكل وحجم دقائق مسحوق النحاس والكثافة النسبية للمواد المترابكة.

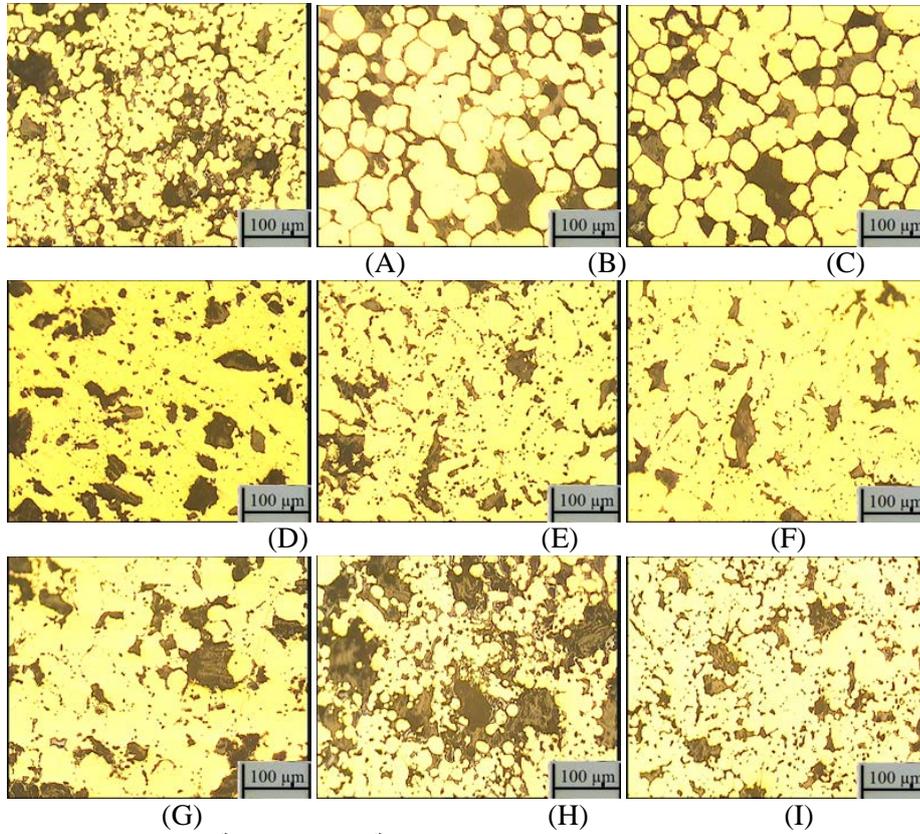




(G)

الشكل (6) الصور المجهرية للمساحيق المستخدمة.

- A- نحاس كروي ( $25\mu\text{m} >$ ) B- نحاس كروي ( $45-38\ \mu\text{m}$ ) C - كروي ( $63-53\ \mu\text{m}$ ) - نحاس شجيري ( $25\mu\text{m} >$ ) E- نحاس شجيري ( $45-38\ \mu\text{m}$ ) F - شجيري ( $63-53\ \mu\text{m}$ ).  
G- مسحوق الكرافيت.



الشكل (7) الصور المجهرية للمواد المتراكبة.

- A-المادة المتراكبة رقم (1). B- المادة المتراكبة رقم (2). C - المادة المتراكبة رقم (3)  
D- المادة المتراكبة رقم (4). E- المادة المتراكبة رقم (5). F- المادة المتراكبة رقم (6).  
G- المادة المتراكبة رقم (7). H- المادة المتراكبة رقم (8). I- المادة المتراكبة رقم (9).

تأثير شكل وحجم دقائق مسحوق النحاس على الموصلية الكهربائية والحرارية للمواد المتراكبة  
يبين الشكلان (8) و (9) العلاقة بين شكل وحجم دقائق مسحوق النحاس وبين الموصلية الكهربائية  
والموصلية الحرارية للمواد المتراكبة نحاس-13vol% كرافيت على التوالي. ويلاحظ من خلال الشكلين أن  
الموصلية الكهربائية والحرارية للمواد المتراكبة المكونة من النحاس ذي الشكل الشجيري أكبر بكثير من  
نظيراتها للمواد المتراكبة المكونة من النحاس ذي الشكل الكروي. هناك عدة أسباب أدت إلى انخفاض

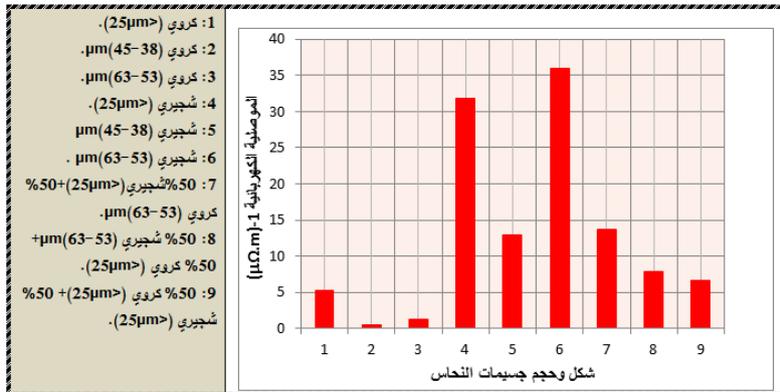
الموصليتين الكهربائيتين والحرارية للمواد المترابكة المكونة من النحاس الكروي الشكل مقارنة بنظيرتها في المواد المترابكة المكونة من النحاس الشجري وهي :-

**أولاً:** الفارق الكبير في قيم المسامية بينهما، إذ أن نسبة المسامية في المواد المترابكة المكونة من النحاس الكروي أعلى بكثير من نسبتها في المواد المترابكة المكونة من النحاس الشجري. إن وجود المسامية التي ترافق منتجات ميتالورجيا المساحيق تعمل كمواقع عازلة للحرارة والكهربائية [18] وتعمل زيادتها على خفض قيم الموصليتين الكهربائيتين والحرارية معا كما يلاحظ بالرجوع إلى الأشكال (5) و (8) و (9) أن أثر المسامية في خفض الموصليتين الكهربائيتين والحرارية أكبر في المادة المترابكة ذات الدقائق الكروية مما في المادة المترابكة ذات الدقائق الشجرية، وهذه النتائج تتفق مع [4] الذي توصل إلى أن الموصلية الحرارية تتأثر كثيرا بنسبة المسامية حيث قارن بين الموصلية الحرارية للنحاس النقي بشكليته الشجري والكروي وتوصل إلى أن الموصلية الحرارية للنحاس النقي كروي الشكل تقل من (350W/m.K) عند مستوى مسامية (5%) إلى (125W/m.K) عند مستوى مسامية (22%) أي قلت بمقدار (64.28%) وتوصل كذلك إلى أن الإنخفاض في الموصلية الحرارية للنحاس الكروي أكبر بكثير من انخفاض الموصلية الحرارية للنحاس الشجري عند نفس نسبة المسامية وهذا الإنخفاض في الموصلية الحرارية يعكس تماما على الموصلية الكهربائيتين لارتباطهما الوثيق .

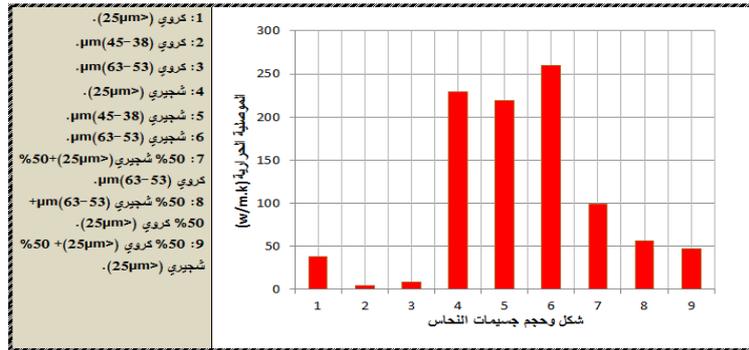
**ثانياً:** الفارق الكبير في كسر التماس الحجمي (Volume Fraction) لدقائق النحاس للمادتين المترابكتين أي أن مساحة التماس بين دقائق النحاس في المقطع العرضي للمواد المترابكة المكونة من النحاس الكروي أقل بكثير من مساحتها في المواد المترابكة المكونة من النحاس الشجري إذ بلغت أقصى مساحة تماس للمواد المترابكة المكونة من النحاس الكروي (39%) للمترابك رقم (1) بينما بلغت أقصى مساحة تماس للمواد المترابكة المكونة من النحاس الشجري (92%) للمادة المترابكة رقم (6) أي أن ثلثي دقائق النحاس الكروية تقريبا لا يوجد بينها تماس مباشر وتتصل ببعضها عن طريق الكرافيت أو ربما تعزل عن بعضها تماما بسبب المسامية وبذلك فإن هذا الفرق الكبير في مساحة التماس لدقائق النحاس أدى أيضا إلى تقليل كبير في قيمة الموصليتين الكهربائيتين والحرارية.

**ثالثاً:** حدوث اندماج تام بين دقائق المواد المترابكة الشجرية وحدث اندماج جزئي ضعيف بين دقائق المواد المترابكة الكروية كما تبينه الأشكال (7-F, E, D) و (7-A, B, C) الأمر الذي يقلل تشتت الكثرونات التوصيل الكهربائي في المواد المترابكة ذات الدقائق الشجرية مقارنة بالمواد المترابكة ذات الدقائق الكروية، ويدعم هذه النتيجة ما توصل إليه الباحث [20] ، علاوة على ذلك فإن حالة الاندماج الجزئي بين دقائق المواد المترابكة الكروية يجعل تماسه غير محكما أو رخوا وهو ما يجعل المقاومة الكهربائيتين والحرارية عالية في هذا النوع من المواد المترابكة مقارنة بحالة الاندماج التام في المواد المترابكة الشجرية وهو ما يعزز الفرق الكبير في قيم الموصلية الكهربائيتين والحرارية بينهما.

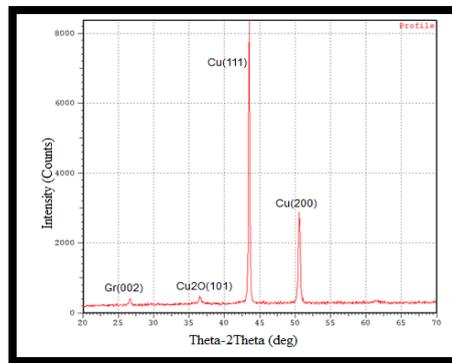
**رابعاً:** إرتفاع نسبة أكسيد النحاس ( $Cu_2O$ ) في المواد المترابكة المكونة من النحاس الكروي مقارنة بنسبته في المواد المترابكة المكونة من النحاس الشجري إذ تم ملاحظة ذلك بعد تحليل نماذج حيود الأشعة السينية (XRD) والموضحة بالشكل (10) وبالتالي فإن وجود أكسيد النحاس ( $Cu_2O$ ) بنسبة أعلى يؤدي إلى انخفاض الموصلية الكهربائيتين والحرارية نتيجة رداءة موصليته الكهربائيتين والحرارية والبالغة  $(10.47 \mu\Omega.m)^{-1}$  و (75W/m.K). وبذلك فإن كل هذه الأسباب مجتمعة أدت إلى هذا الانخفاض في الموصليتين الكهربائيتين والحرارية للمواد المترابكة المكونة من النحاس الكروي.



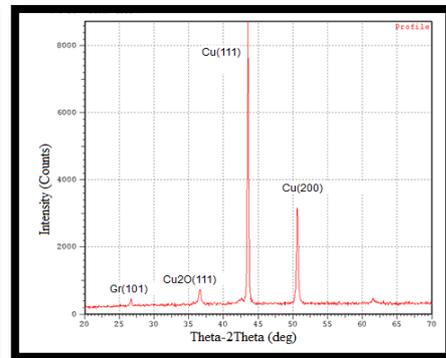
الشكل (8) العلاقة بين شكل وحجم دقائق مسحوق النحاس والموصلية الكهربائيتين للمواد المترابكة نحاس-13vol% كرافيت.



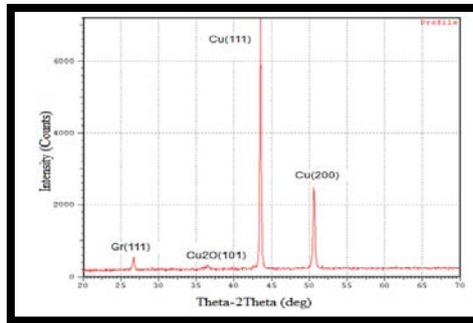
الشكل (9) العلاقة بين شكل وحجم دقائق مسحوق النحاس والموصلية الحرارية للمواد المترابطة نحاس-13vol% كرافيت.



(B)



(A)



(C)

الشكل (10) نماذج حيود الأشعة السينية لنماذج مختارة من المواد المترابطة. A- المادة المترابطة رقم (1) B- المادة المترابطة رقم (4) C- المادة المترابطة رقم (6)

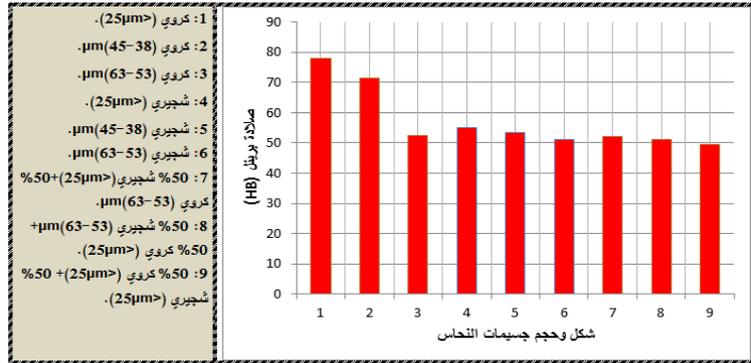
### – الخصائص الميكانيكية

#### تأثير شكل وحجم دقائق النحاس على الصلادة للمواد المترابطة

يبين الشكل (11) تأثير شكل وحجم دقائق مسحوق النحاس على صلادة برينل للمواد المترابطة نحاس-كرافيت إذ يلاحظ من خلال الشكل أن صلادة برينل تزداد بنقصان حجم جسيمات النحاس ولكلا الشكلين الشجري والكروي والسبب في ذلك هو أن نقصان حجم جسيمات النحاس يؤدي إلى زيادة كل من المساحة السطحية ومساحة التماس للدقائق وبالتالي تحسين الترابط بينها نتيجة انتشار الحالة الصلبة في أثناء عملية التليد وتحقيق الاندماج وهذا يتفق مع ما ذهب إليه كل من [6] و [21] كما أن السبب الآخر لزيادة الصلادة بنقصان حجم دقائق النحاس هو زيادة الكثافة النسبية بنقصان حجم الدقائق إذ أن زيادة الكثافة النسبية تعني زيادة كمية الدقائق لنفس الحجم وهو ما يقود بدوره إلى زيادة مقاومة المادة المترابطة لأي قوة خارجية [7].

كما يلاحظ من خلال الشكل (11) أن قيم الصلادة للمواد المترابكة المكونة من النحاس الكروي أكبر من نظيرتها المكونة من النحاس الشجيري ويعزى ذلك إلى أن نسبة اوكسيد النحاس ( $Cu_2O$ ) في المواد المترابكة المكونة من النحاس ذي الشكل الكروي أكبر من نسبته في المواد المترابكة المكونة من النحاس الشجيري كما مبين في الشكل (10) إذ يسهم اوكسيد النحاس في رفع قيمة الصلادة للمواد المترابكة [21].

يلاحظ من خلال الشكل (11) كذلك أن قيم الصلادة للمواد المترابكة المكونة من خليط من مسحوقي النحاس الشجيري والكروي تاخذ الترتيب ( $7 < 8 < 9$ ) وهو نفس ترتيب الكثافة النسبية لهذه المواد المترابكة حيث إن الصلادة تزداد بزيادة الكثافة النسبية كما ذكر سابقا.

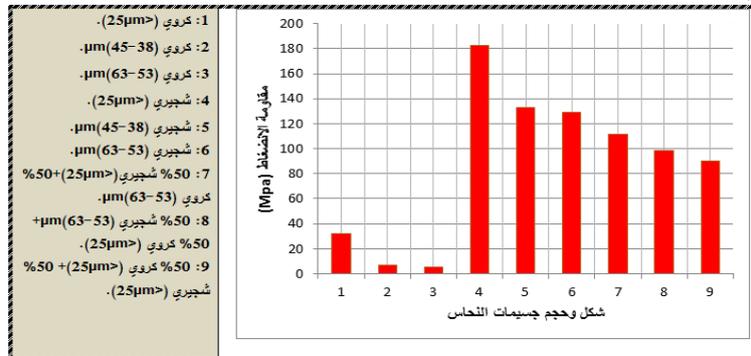


الشكل (11) العلاقة بين شكل وحجم دقائق النحاس وصلادة برينل للمواد المترابكة نحاس-13vol% كرافيت.

تأثير شكل وحجم دقائق مسحوق النحاس على مقاومة الانضغاط للمواد المترابكة

يبين الشكل (12) العلاقة بين شكل وحجم دقائق مسحوق النحاس ومقاومة الانضغاط للمواد المترابكة نحاس-13vol% كرافيت ويلاحظ من خلاله أن مقاومة الانضغاط تزداد بنقصان حجم دقائق النحاس ولكلا الشكلين الكروي والشجيري والسبب في ذلك هو زيادة كل من المساحة السطحية ومساحة التماس بين الدقائق بنقصان حجم دقائق النحاس مما يؤدي إلى زيادة الترابط الميكانيكي بين الدقائق وحصول الالتحام البارد في أثناء الكبس وما يلي ذلك من تحقق حالة الاندماج بدرجة عالية عند التلييد وبالتالي زيادة مقاومة الانضغاط، كما أن السبب الآخر هو زيادة مقاومة الانضغاط بزيادة الكثافة النسبية وبعبارة أخرى انخفاض مستوى المسامية ودورها في تقليل مساحة المقطع العرضي الساندة للحمل من جهة وتوفير نوى الشقوق من جهة أخرى.

كما يلاحظ من خلال الشكل (12) أن مقاومة الانضغاط للمواد المترابكة المكونة من النحاس الشجيري أكبر بكثير من نظيرتها في المواد المترابكة المكونة من النحاس الكروي والسبب في ذلك هو تكوين الكرافيت شبكة محيطة بجسيمات النحاس الكروية والإنخفاض الحاد في مساحة التماس بين تلك الدقائق كما يلاحظ بوضوح في الشكل (7-C) وعدم اتاحة الفرصة لتحقيق حالة الاندماج في أثناء التلييد والحصول على ترابط رخو بين الجسيمات، يعزز ذلك السطح الأملس للجسيمات وشكلها الكروي الذي يجعلها تنزلق على بعضها البعض وتدور حول أنفسها في أثناء الكبس الأمر الذي يقلل فرص الالتحام البارد أو الترابط الميكانيكي بينها. بالإضافة إلى الفارق الكبير في الكثافة النسبية بينهما.



الشكل (12) العلاقة بين شكل وحجم دقائق النحاس ومقاومة الانضغاط للمواد المترابكة نحاس-13vol% كرافيت.

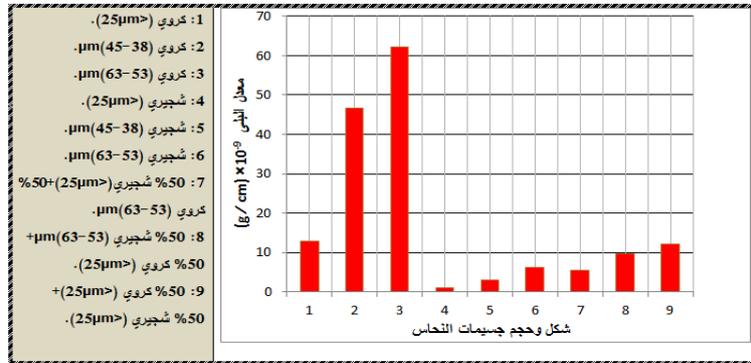
تأثير شكل وحجم دقائق مسحوق النحاس على معدل البلى للمواد المترابكة نحاس-13vol% كرافيت

يبين الشكل (13) العلاقة بين شكل وحجم دقائق النحاس ومعدل البلى للمواد المترابكة ويلاحظ فيه أن معدل البلى لها يقل بنقصان حجم دقائق النحاس ولكلا الشكلين وهذا السلوك هو الصورة المعكوسة لسلوك الصلادة إزاء الحجم والشكل الدقائقي للنحاس والمبين في الشكل (11) وبعبارة أخرى فإن انخفاض معدل البلى بانخفاض الحجم الدقائقي هو نتيجة لزيادة صلادة المواد المترابكة بانخفاض الحجم الدقائقي [22,23].

كما يتبين من خلال الشكل (13) أن معدل البلى للمواد المترابكة المكونة من النحاس الشجري أقل من معدل البلى في نظيرتها المكونة من النحاس الكروي. يُعزى سلوك البلى هذا إلى درجة الترابط والاندماج الحاصل بين دقائق المادتين المترابكتين ذات الشكل الكروي والشجري والذي ظهر بجلاء في الصور المجهرية (7-7) (C,B,A) و (F, E, D) وانعكس بشكل مباشر على مقاومة الانضغاط لتلك المواد المترابكة والمبين في الشكل (12). وبملاحظة الأشكال (11) و (12) و (13) نجد أن مقاومة الانضغاط يمكن أن تعد معياراً معبراً عن سلوك البلى كما هو الحال مع الصلادة. إن ضعف الترابط بين دقائق المادة المترابكة الكروية يؤدي بالضرورة إلى خلعها جراء الحمل المسلط والاجهاد القصي بين عينة المادة المترابكة والقرص بخلاف المادة المترابكة ذات الشكل الشجري الذي وجد أن الترابط بين دقائقها كان تاماً في أثناء التليد الأمر الذي يعيق عملية خلع الدقائق وبدلاً من ذلك فإن الحمل المسلط في اختبار البلى سيعصر الكرافيت إلى الخارج مكوناً طبقة فصل زيتية بين عينة المترابك والقرص الفولاذي.

هنالك سبب آخر قد أسهم في هذا السلوك ألا وهو درجة تجانس توزيع الكرافيت في نوعي المواد المترابكة الكروية والشجرية إذ يلاحظ من الشكل (7) عدم تجانس توزيع الكرافيت وحصول انعزال في المواد المترابكة ذات النحاس الكروي (3,2,1) الأمر الذي قلل فاعلية الكرافيت على التزيت وقد وجدت نتيجة مماثلة من قبل الباحث [24] , بخلاف المواد المترابكة ذات الدقائق الشجرية المبينة في الشكل (7) إذ أن تجانس توزيع الكرافيت في المواد المترابكة قد حقق فاعلية التزيت الجاف وتحويل حالة الاحتكاك من حالة معدن لمعدن إلى حالة وجود طبقة فصل كرافيتية بين المعدنين.

يلاحظ من الشكل (13) كذلك أن سلوك المواد المترابكة المكونة من خليط كروي وشجري متوافق تماماً مع سلوك مقاومة الانضغاط وأن العلاقة بينهما عكسية وهو ما يعزز ما ذهبنا إليه من اعتبار سلوك مقاومة الانضغاط في المواد المترابكة المكونة من نحاس-كرافيت معبرة عن سلوك البلى.



الشكل (13) العلاقة بين شكل وحجم دقائق النحاس ومعدل البلى للمواد المترابكة نحاس-13vol% كرافيت. الاستنتاجات

- 1- تجانس توزيع الكرافيت في المواد المترابكة المكونة من النحاس الشجري أفضل بكثير من تجانس توزيعه في المواد المترابكة المكونة من النحاس الكروي.
- 2- الكثافة النسبية للمواد المترابكة المكونة من النحاس الشجري أكبر من قيمتها للمواد المترابكة المكونة من النحاس الكروي.
- 3- تزداد الكثافة النسبية للمواد المترابكة عند خلط مساحيق مختلفة بالحجم.
- 4- تزداد الموصليتين الكهربائية والحرارية وكذلك الصلادة ومقاومة الانضغاط بزيادة الكثافة النسبية.
- 5- انخفاض الموصليتين الكهربائية والحرارية للمواد المترابكة المكونة من النحاس الكروي.
- 6- زيادة الكثافة النسبية والصلادة ومقاومة الانضغاط ولكلا الشكلين من أشكال النحاس بنقصان حجم الدقائق.

7- انخفاض معدل البلى للمواد المترابكة بنقصان الحجم الدقائقى للنحاس نتيجة زيادة صلادة المواد المترابكة.

#### المصادر

- [1] K. Rajkumar, S. Aravindan, "Tribological Performance of Microwave – Heat – Treated Copper–Graphite Composites", Journal of Tribol. vol.37,PP.131–139, 2010.
- [2] R. Roudolf , I. Anžel , V. Lazić , D. Stojić,"The New Approach of The Production Technique of Discontinuous Cu-Composite", Journal of Metallurgy,Vol.38 , PP. 784-411, 2009.
- [3] Abid A. K., Khulief Z. T., "The Effect of Iron Addition on The Dry Sliding Wear and Corrosion of Cu Al Ni Shape Memory Alloy", Journal of Engineering & Technology, Vol.28, No.24, PP.6888-6902, 2010.
- [4] Y. Lin and K. Hwang, "Effect of Powder Shape and Processing Parameters on Heat Dissipation of Heat Pipes With Sintered Porous Wickes", Materials Transactions, Vol.50 , PP. 2427-2434, 2010.
- [5] C. Vincent , J. Silvain , J. Heintz , N. Chandra, "Effect of Porosity on The Thermal Conductivity of Copper Processed by Powder Metallurgy", Journal of Physics and Chemistry of Solids, Vol.7, PP.499–504, 2012.
- [6] Sheikh M. U, Tanvir M., Christoph W, Carsten G., Ivica K., Chirstoph V., Helmut H., Ulirch W., siegmar Roth and Hans-Jörg Fecht,"Effect of Size and Shape of Metal Particles to Improve Hardness and Electrical Properties of Carbon Nanotube Reinforced Copper and Copper Alloy Composites, Composites Science and Technology,PP.1-22, 2010.
- [7] Montasser Dewidar, G.T. Abdel-Jaber, Mahmoud Bakrey, and Hussien Badry, "Effect of Processing Parameters and amount of additives on the Mechanical Properties and Wear Resistance of Copper-based Composite", International Journal of Mechanical & Mechatronics, Vol.10,PP.25-40, 2011.
- [8] ASTM B 214-99, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Metal Powder", 2003.
- [9] Farouk M. Mahdi , Raed N. Razooqi , Saif S. Irhayyim, "Effect of Graphite Content and Milling Time on Physical Properties of Copper-Graphite Composites Prepared By Powder Metallurgy Route", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol.12,PP.245-255, 2013.
- [10] تحضير مادة مترابكة من نظام ( المنيوم – كارييد البورون ) ودراسة بعض خواصها "احمد حسين علي, 2010, الميكانيكية", المجلة العراقية للهندسة الميكانيكية والمعادن, العدد10, الصفحة492-501.
- [11] Hani Aziz Ameen , Khairia Salman Hassan and Mohamed Mhdi Mubarak, "Effect of Loads , Sliding , Speeds and Times on The Wear Rate for Different Materials", American Journal of Scientific and Industrial Research, Vol.7, PP.99-106, 2001.
- [12] ASTM C373 – 88, "Standard Test Method For Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, And Apparent Specific Gravity of Fired White Ware Products", 2006.
- [13] Goutam Dutta , Dipankar Bose, " Effect of Sintering Temperature on Density, Porosity and Hardness of a Powder Metallurgy Component, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering" ,Vol.2,PP.2250-2459, 2012.
- [14] Ahmed Z. S., Mousa A. M., Younis S. B., "Studying the Properties of Cu-Al-SiC Composites Prepared by P/M Technique", Journal of Engineering &Technology, Vol.30, No.7, PP.1240-1248, 2012.

- [15] ASTM B193, "Standard Test Method For Resistivity of Electrical Conductor Materials", American Society for Testing and Materials.
- [16] Zeinb Abdel Hamid , Sayed F. Moustafa , Fatma A. Morsy , Nevien Abdel Atty Khalifa , Fatma Abdel Mouez, "Fabrication and Characterization Copper / diamond Composites For Heat Sink Application Using Powder Metallurgy", Natural Science, Vol.3 ,PP936-947, 2011.
- [17] Li M.and Zinkle S.J, "Physical and Mechanical Properties of Copper and Copper Alloys", Elsevier, PP.667-690, 2012.
- [18] Alton D. Romig , Michael J. Dehaemer, "Metals Handbook", Copyright by ASM International, 1998.
- [19] P. W. Lee, "Powder Metal Technologies and Applications", Copyright by ASM International , Vol.7, 1998.
- [20] H. Zuhailawati , Y. Mahani , "Effects of Milling Time on Hardness And Electrical Conductivity of in Situ Cu–NbC Composite Produced by Mechanical Alloying", Journal of Alloys and Compounds , PP.142-146 , 2009.
- [21] سيف صباح ارحيم, "دراسة تأثير متغيرات مينالورجيا المساحيق على الخواص الميكانيكية والفيزيائية لمتراكبات نحاس-كرافيت", رسالة ماجستير - جامعة تكريت, 2013.
- [22] Huijun Yang, Ruiying Luo, Suyi Han, Midan Li, "Effect of The Ratio of Graphite/Pitch Coke on The Mechanical and Tribological Properties of Copper–Carbon Composites", Journal of Wear ,No.268 , PP.1337–1341, 2010.
- [23] S.F. Moustafa , S.A. El-Badry , A.M. Sanad , B. Kieback, "Friction and Wear of Copper–Graphite Composites Made With Cu-Coated and Uncoated Graphite Powders", Journal of Wear, No.253, PP.699–710, 2002.
- [24] Jaroslav Kováčik , Stefan Emmer, Jozef Bielek , L'ubomír Keleš, "Effect of Composition on Friction Coefficient of Cu–Graphite Composites", Journal of Wear, No. 265, PP.417-421, 2008.