

## دراسة آلية تغير الاهتراء في المساند المصنعة من مركبات الإيبوكسي كتابع للقساوة في ظروف احتكاك جافة

الدكتور محمد نهاد علي كردية\*  
الدكتور ربيع أحمد حبيب\*\*

(تاريخ الإيداع 30 / 3 / 2008. قُبِلَ للنشر في 25/5/2008)

### □ الملخص □

تمت دراسة تغير قساوة مادة الإيبوكسي ومركباته التي تحوي على نسب وحجوم مختلفة من حبيبات مادة التدعيم عند درجة حرارة المختبر الثابتة وقيم مختلفة لزمن الاختبار والسرعة، وكذلك نسبة الاهتراء وتحديد آلية نشوئه في هذه المركبات. تم إجراء التجارب على جهاز قلم على قرص (Pin-on-disc) تحت ظروف جافة وبتأثير الحمل. أظهرت النتائج أن نمط الاهتراء تعتمد بشكل رئيس على الحمل المطبق ونسبة حبيبات مادة التدعيم وحجمها. فقد بينت النتائج أن النسبة الأفضل والأقل لتآكل مركبات الإيبوكسي هي عند استخدام حبيبات بقطر صغير (0.4 mm) ونسبة أقل في المادة الأساسية (تقريباً أقل من 2%)، حيث يظهر تآكل الالتصاق الأقل خطورة على العينات في المرحلة الأولى من الاختبار تحت تأثير حمل منخفض (5 نيوتن) وسرعة متوسطة، بينما تآكل الاحتكاك يحدث عند الحمل العالي (10 نيوتن)، وأن القساوة تزداد بزيادة نسبة حبيبات مادة التدعيم وحجمها. في نهاية الاختبار تصل العينة لبداية الانهيار نتيجة الوصول لتآكل التعب (الكلل) فتظهر تشققات في سطح العينة ويحدث هذا تحت تأثير الأحمال والسرعات العالية.

**الكلمات المفتاحية:** الإيبوكسي - المواد المتصلبة حرارياً - حبيبات الكربون - حجم مادة التدعيم - نسبة مادة التسلح - قساوة المواد المركبة البوليميرية - الاهتراء - الحمل.

\* مدرس - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.  
\*\* مدرس - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Wear Mechanisms in bearing Epoxy Composites as a Function of Hardness under Dry Sliding Conditions

Dr. Mohammad Nihad Ali Ghassan Kurdieh \*

Dr. Rabie Ahmed Habeeb \*\*

(Received 30 / 3 / 2008. Accepted 25 / 5 / 2008)

### □ ABSTRACT □

This paper studies the change of hardness of epoxy and its composites that contain different size, volume fraction of carbon at constant temperatures, different time and velocity, and the wear rate and its mechanisms. A pin-on-disc machine is used to perform the experimental work under dry sliding conditions of various loads. The results obtained indicate that the wear rate depends on load,  $V_f$ , and carbon particles size. They also indicate that the optimum wear rate is (less than 2%) and (0.4 mm) for particles size, so adhesive wear has occurred in the running-in period of test at low load (5N) and slow velocity, whereas, the abrasive wear has occurred at high load (10 N), and hardness has increased with the increase in the size and volume fraction of carbon particles. In the final stage of the test, the specimen undergoes fatigue wear due to the cracks formed on the specimen's surface under the influence of high velocity and load.

**Keywords:** Epoxy, Thermosetting Materials, Reinforced Materials, Carbon particles, Size of Reinforced Material, Hardness of Polymeric Materials, Wear rate, Load.

---

\* Assistant Professor, Department of Production & Design Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\* Assistant Professor, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

## مقدمة:

ظهرت الحاجة العملية حديثاً لمعرفة مدى مقاومة المواد للتآكل بانتشار الآلات الحديثة في الصناعة، والتي تعاني بين أجزائها المتلامسة من مشكلتي التآكل والاحتكاك المسببتين لانتهيار بعض أجزائها. يتم تصميم هذه الأجزاء بحيث تكون مقاومة التآكل أعظمية؛ ليكون عمر الجزء العامل من الآلة كبيراً، وقد حلت المواد البلاستيكية محل العديد من المعادن في بعض أجزاء الآلات ولاسيما التي تكون على تماس مباشر مع الأجزاء الدوارة. استخدمت مركبات المواد البوليميرية لتحسين الخواص الميكانيكية للأجزاء المصنعة منها، فاستخدم العديد من هذه المواد ولاسيما المتصلبة حرارياً. أظهرت التجارب أن نسبة التآكل تزداد في الظروف كلها بزيادة الحمل المطبق وزمن الاختبار، لكن بزيادة نسبة الكربون في هذه المركبات تزداد نسبة الاهتراء تحت تأثير الحمل نفسه وخلال الزمن نفسه؛ وذلك نتيجة لزيادة مقاومة التآكل للمادة الأساسية (الإيبوكسي). من جهة أخرى، أظهرت التجارب أن معامل الاحتكاك يزداد فقط تحت تأثير زمن الانزلاق وذلك خلال الفترة الأولى من الاختبار، ثم يتناقص تدريجياً حتى يبلغ قيمة منخفضة جداً مع زيادة نسبة حبيبات الكربون في المادة الأساسية [1]. أظهرت النتائج أن نمط التآكل يعتمد على حجم حبيبات مادة التدعيم والحمل المطبق، فباستخدام حبيبات الكربون بقطر (0.4mm) وتأثير حمل صغير (5 نيوتن) يسيطر تآكل الالتصاق في المرحلة الأولى من الاختبار، بينما تآكل الاحتكاك يحدث عند الحمل العالي (10N)؛ ولكن توجد مرحلة يكون فيها التآكل بقيمة شبه ثابتة، ثم تصل العينة لبداية الانتهيار نتيجة الوصول لتآكل التعب (الكلل) وظهور تشققات في سطح العينة. تزداد نسبة التآكل بشكل بسيط بزيادة حجم حبيبات الكربون في نمطي التآكل (الالتصاق والاحتكاك)؛ وذلك عند النسب العالية لمادة التدعيم. تزداد نسبة التآكل مع الحمل عند كل النسب العالية من مادة التدعيم ( $V_f$ )، النسبة الأعلى لـ  $V_f$  تعطي قيمة نسبة التآكل الأكبر، وأيضاً الحجم الأكبر للحبيبات يعطي القيم الكبرى عند أحمال منخفضة وعالية [2]. تصنف العوامل التي تؤثر في الاهتراء إلى نوعين: عوامل خارجية (التحميل، السرعة، زمن التفاعل، منطقة التماس، درجة الحرارة ودرجة إنهاء السطوح) وعوامل داخلية (الروابط الكيميائية، درجة حرارة الانصهار، القساوة، مقاومة الخضوع والانتهيار، مقاومة الزحف والكلل، والخواص الحرارية)، بالإضافة إلى الظروف تماس الاحتكاك والتفاعلات عند السطوح والتي تنتج تبديداً بالطاقة وفقدان جزء من المادة خلال الاحتكاك وآليات التآكل [3]. تبلغ نسبة التآكل في مساند الآلة ومعامل الاحتكاك أقل القيم لمركبات البوليميرات المدعمة ببودرة الغرافيت (10%) وكذلك نسبة التآكل لمركبات الإيبوكسي/غرافيت، والإيبوكسي/زجاج/غرافيت وتعتمد على زمن الانزلاق والحمل المطبق وتزداد بازديدهما. ويصل معامل الاحتكاك لقيمة ثابتة تقريباً بالنسبة إلى الأحمال الأعلى [4]. بلغت نسبة التآكل وقيمة معامل الاحتكاك لمركبات الإيبوكسي/غرافيت (ألياف) أقل قيمة عندما تم تدعيمها باتجاه عمودي على سطح الانزلاق، حيث بلغت نسبة التآكل أقل قيمة، لكن معامل الاحتكاك كان بأعلى قيمة له من أجل مركبات الإيبوكسي/ألياف الغرافيت وتكون الألياف موجهة بالاتجاه نفسه [5]. تتناقص نسبة التآكل ومعامل الاحتكاك مع زيادة النسبة المئوية لمعدن الميكا عند أي زمن، فمن أجل ألياف الزجاج العشوائية (48%) مع الإيبوكسي. وتبلغ القساوة أعلى قيمة لها ونحصل عليها في المركبات بإضافة وزنية من الميكا (5%). إن نسبة التآكل ومعامل الاحتكاك تزداد بزيادة درجة الحرارة، وتقل بزيادة قساوة المواد، ولها قيمة منخفضة عند نسبة 5% ميكا، وهذا يعود لتشكّل طبقة رقيقة منتقلة لسطح المقابل [6]. إن نسبة التآكل ومعامل الاحتكاك تصل إلى قيمة دنيا باختبار العينات على جهاز pin-on-disc مع زيادة نسبة الألياف في الفولاذ المستمر غير الموجه، وألياف النحاس والألمنيوم مع الإيبوكسي. وتآكل السطح المقابل يزداد مع زيادة قساوة الألياف المعدنية [7].

تزداد نسبة التآكل لمركبات البولي تيترافلوروايثيلين المسلحة بألياف كربون مع زيادة الحمل الطبيعي (نسبة ألياف كربون 15%)، وإن إضافة ألياف الكربون تقلل من نسبة التآكل بسبب الصعوية في نسبة تشكل الفقاعات [8]. يبلغ التآكل قيمة عالية لمركبات الإيبوكسي/ألياف الغرافيت المستمرة وذلك عندما توجه بزوايا  $30^{\circ}$  عن سطح الانزلاق. إن درجة التآكل تؤدي دوراً مهماً بتأثيرها في التآكل، التآكل الأكثر للألياف يوافق التآكل الأقل للمادة. إن تآكل الألياف الأعظمي يحدث عند القيمة الأقل للتآكل [9]. تؤثر مسافة الانزلاق في ضغط المساند المصقولة وعند سرعات منخفضة ومتوسطة على الاحتكاك والتآكل (نسبة 60% bronze على PTFE). وأظهرت التجارب أن معامل الاحتكاك ونسبة التآكل تتأثر بشكل بثخانة هذه الطبقات الرقيقة وتركيبها معتمدة على الالتصاق بين الفولاذ وسطح المركبات، وعلى خصائص التماسك للبوليمير المستخدم، وكذلك الضغط ومسافة الانزلاق [10]. يزداد معامل الاحتكاك لمواد البولي فينيل كلورايد والبولي كاربونات بشكل بسيط بزيادة توجيهه الجزئيات عندما يحدث الانزلاق باتجاه عمودي على الجزئيات الموجهة. إن قيمة معامل الاحتكاك تزداد بشكل موافق عندما يحدث الانزلاق باتجاه عمودي على الجزئيات ما قبل توجيهه [11]. لا تبدي مركبات البولي تيترا فلورو إيثيلين (30%) من ألياف الكربون زيادة بنسبة التآكل عند السرعات العالية، بعكس مركباتها (45%) من ألياف الزجاج. بقايا التآكل لمركبات مادة البولي ستيرين تحت تأثير سرعات انزلاق منخفضة ظهرت بشكل دائري، و لكن تحت تأثير السرعات العالية تظهر بشكل أسطواني طويل. ومعامل الاحتكاك لا يتأثر بنسبة التآكل النسبية عند السرعات العالية لكلا النوعين من المركبات [12]. تقل نسبة التآكل مع زيادة نسبة ألياف الكربون والزجاج لغاية (12.5%)، وبعدها تبقى ثابتة عند السرعات المنخفضة (قيمة منخفضة للعامل الضغط في السرعة)، لكن عند السرعات العالية (القيمة المنخفضة للعامل P.V) تقل نسبة التآكل بشكل أكبر بكثير منه في المرحلة الأولى لمركبات البولي إيثير إيثير كيتون مع ألياف الكربون والزجاج. يحسن إضافة ألياف زجاج قصيرة لهذه المادة من مقاومة تآكل الانزلاق [13]. انتشر في السنوات الأخيرة استخدام اللدائن في معظم الصناعات بشكل كبير، نتيجة لخواصها التريبولوجية (تآكل واحتكاك وتزييت)، وخاصة نسبة المقاومة/الوزن، وسهولة إنتاج هذه المواد وتشغيلها. وحلت عناصر الآلات المصنوعة منها محل عدد كبير من العناصر الهندسية المماثلة والمصنوعة من مواد أخرى كالمسندات والجلب....، تتعرض عناصر الآلات المصنوعة من اللدائن لمشاكل كثيرة تؤدي إلى فشلها بأدائها لعملها، وبعد التآكل بوجود قوى صدم أحد مسببات فشل هذه العناصر. إن حجم التآكل يزداد بزيادة الحمل الاستاتيكي المطبق. البولي إيثيلين له أكبر مقاومة للتآكل ثم مادة البولي فينيل كلورايد، وأخيراً البولي تيترا فلورو إيثيلين. ويزداد حجم التآكل بزيادة حمل الصدم [14].

### هدف البحث وأهميته:

ينحصر هدف البحث في دراسة تحسين قساوة المسند المصنوع من مركبات الإيبوكسي تحت تأثير نسبة حبيبات مادة التدعيم وحجمها، وتغير نسبة الاهتراء الناتجة عند الاحتكاك مع الفولاذ، ويركز بشكل أساسي على دراسة تأثير حجم حبيبات الكربون ونسبتها في المادة الأساسية على قيم نسبة التآكل وتغير آليته، لتحسين القساوة ومقاومة الاهتراء لهذه المركبات تحت تأثير الحمل والسرعة في ظروف الاحتكاك الجاف لاستخدامها كمحامل في الآلات التي تصنع المواد الغذائية.

### طرائق البحث ومواده:

**1- تحضير العينات:**

تم تصميم قالب خاص لصب العينات المستخدمة وتنفيذه كما في الشكل (1)، كحامل دفع تستخدم في أجزاء الآلات التي تصنع المواد الغذائية (التي لا تحتاج إلى تزييت) لتقليل نسبة التآكل والسرعة في تغيير الحمل نتيجة العمل من دون تزييت.



الشكل (1): قالب الصب

تم استخدام مادة الإيبوكسي (Araldite CR-39) - هو مجموعات من الإيثوكسيلين والأوكسيران المتفاعل مع مواد التقسية Hardener وأساس الإيبوكسي هو الفينول المتكرر ويحضر بالبلمرة بالتكثيف - ومركباته، حيث أضيفت إليه مادة تقسية (بروكسيد) بنسبة  $\left(\frac{1}{2}\right)$  وزناً. تم إضافة حبيبات الكربون الأسود كمادة تدعيم للإيبوكسي وذلك بأحجام ونسب مختلفة، والوصول لحالة التجانس التامة بالمزج من دون تطبيق ضغط أو حرارة على المزيج قبل صبه (درجة حرارة المختبر). بعد ذلك صب المزيج ضمن القالب وترك ليتصلب خلال 24 ساعة تحت درجة حرارة المختبر ( $32^{\circ}\text{C}$ ).

ويتم تحضير العينة وفق الخطوات التالية:

- 1- نضع طبقة رقيقة جداً من مادة عازلة كالشمع على السطح الداخلي للقالب، ويجب ألا تزيد كميتها حتى لا تسبب عيوباً في الثخانة عند ارتفاع درجة الحرارة المتولدة خلال مرحلة المزج.
- 2- استخدام أجهزة دقيقة ونظيفة كالموازين لتحديد نسب الأوزان لمادة الإيبوكسي والمحفز (Catalyst)، وهو البيروكسيد البنزيني، إضافة إلى الكوبالت وذلك بنسبة 1:2 (إيبوكسي/بيروكسيد).
- 3- تخلط مادة الإيبوكسي بواسطة قضيب زجاجي منعاً للاتصاق، ويتم التحريك ببطء من دون تولد فقاعات هواء لضمان التجانس التام بين الإيبوكسي والمحفز خلال دقيقتين.
- 4- يتم إضافة مادة التدعيم بالكمية المطلوبة، ثم تحرك وتمزج مع مراعاة عدم وجود خثرات (عقد) خلال 2 إلى 3 دقيقة ويزيد زمن المزج مع زيادة نسبة مادة التدعيم.
- 5- يتم المزج عند حرارة المعمل، ثم يصب المزيج في فجوة القالب عند الأطراف وليس بالوسط منعاً لحبس فقاعات الهواء.

6- يوضع القالب على طاولة أفقية تماماً.

7- يترك المزيج في القالب لمدة يوم، ثم يؤخذ من القالب ويترك لمنع أي تشوه في أطراف العينة.

بتغيير أبعاد حبيبات الكربون بالإيبوكسي (0.4, 0.8, and 1.5 mm) والمزيج المقسى ونسب هذه المادة (من 0% حتى 25%)، تم تجهيز عينات الدفع لمركبات الإيبوكسي/المسلح بالكربون.

8- تم تجهيز العينة بشكل مساند دفع، وتترك هذه العينات لمدة سبعة أيام قبل تشغيلها واختبارها.

**2- الخواص الميكانيكية للعينه المختبره:**

- الخواص العامة للمادة المختبره إيبوكسي CR-39 من شركة Ciba – Gigge هي:

- مقاومة الشد:  $(280 \div 910) kg/cm^2$
- الكثافة:  $(1.11 \div 1.4) g/cm^3$
- القساوة: 100 – 112 M حسب روكويل
- درجة حرارة الانصهار:  $290^{\circ}C$  وتحافظ على خواصها لغاية  $149^{\circ}C$ .
- تعدّ العينه من المواد القاسية، ولها سطح مقاوم نسبياً للتآكل، ولها خواص انزلاق جيدة، وتتميز بخواص حرارية ثابتة عند الدرجة  $87^{\circ}C$ ، كما أن لها مقاومة كيميائية ممتازة.

**3- مادة التدعيم:**

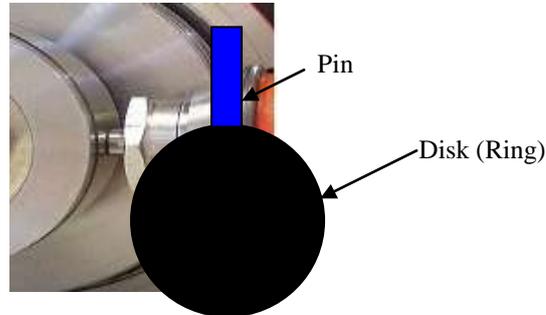
مادة التدعيم هي حبيبات الكربون الأسود، وقد اختيرت لتحسين الخواص التريبولوجية للإيبوكسي؛ إذ إن لها عامل إحصالية حرارية ومقاومة احتكاك ممتازة. ونتيجة لتمتعها بمواصفات احتكاكية عالية ومقاومة للتآكل وخواص حرارية ممتازة جعلت منها مادة أساسية للاستخدام في المحامل والمكابح. تم أخذ ثلاثة نماذج من الحبيبات ذات أبعاد مختلفة (0.4, 0.8, and 1.5 mm)، وبنسب متعددة للكربون. يوضح الشكل (2) شكل عينة الاختبار.



الشكل (2): شكل عينة الاختبار

**4 - اختبار الاهتراء والاحتكاك:**

تم استخدام جهاز Pin-on-Disk (قلم على قرص) لإجراء هذه الاختبارات ضمن الشروط الموافقة لتشغيل المحامل من دون تزييت عملياً. ويبين الشكل (3) آلة الاختبار المستخدمة، وقد تم تثبيتها على جهاز الصقل (Polishing) لدراسة التآكل تحت تأثير أحمال وسرعات مختلفة.



الشكل (3): جهاز الاختبار المستخدم للاختبار

يتم السماح للمحمل للعمل بظروف جافة، ويتم خلالها قياس التآكل تحت تأثير أحمال، أزمنة، وسرعة انزلاق متغيرة. تؤخذ العينة من القالب بعد الصقل والتنظيف وتوزن (قبل الاختبار)، ثم يعاد وزنها بعد الاختبار على ميزان حساس بدقة 0.1mg (Mettler) تحت الظروف نفسها حتى نهاية الاختبار، ثم يحسب الفرق بين وزن العينة قبل كل اختبار وبعده وهو ما يعبر عنه بنسبة التآكل.

#### 5- المؤشرات الأساسية:

سرعة الانزلاق: 0.11 [m/s] و 0.294 [m/s].

الحمل المطبق : 5, 10, 20, 30 نيوتن.

زمن الانزلاق: 50, 150, 250, 320, 400 دقيقة.

نسبة مادة التدعيم: 2%, 5%, 10%, 15%, 20% وزناً، وإيبوكسي حر من دون مادة تدعيم.

حجم حبيبات مادة التدعيم 0.4, 0.8, 1.5 mm.

يتم حساب ضغط التماس من العلاقة:

$$P = \frac{W}{A_{app}}$$

حيث:

$W$  - الحمل المطبق

$A_{app}$  - مساحة سطح التماس الظاهرية

تحسب قيمة التآكل من المعادلة:

$$W_r = \frac{\Delta m}{\rho t}$$

حيث:

$\Delta m$  - فرق الوزن قبل الاختبار وبعده.

$\rho$  - كثافة المادة.

$t$  - زمن الاختبار.

قيم P-V (عامل الضغط x السرعة) تعطى بالجدول رقم (1) حسب قيم الحمل والسرعة.

الجدول (1): قيم P x V استناداً لقيم الضغط والسرعة

V= 0.294 [m/s]	V= 0.11 [m/s]	الضغط P [MPa]	الحمل W [N]
P x V	P x V		
0.0013524	0.000506	0.0046	5
0.00271	0.00101	0.0092	10
0.00541	0.00202	0.0184	20
0.008114	0.00304	0.0276	30

## النتائج و المناقشة:

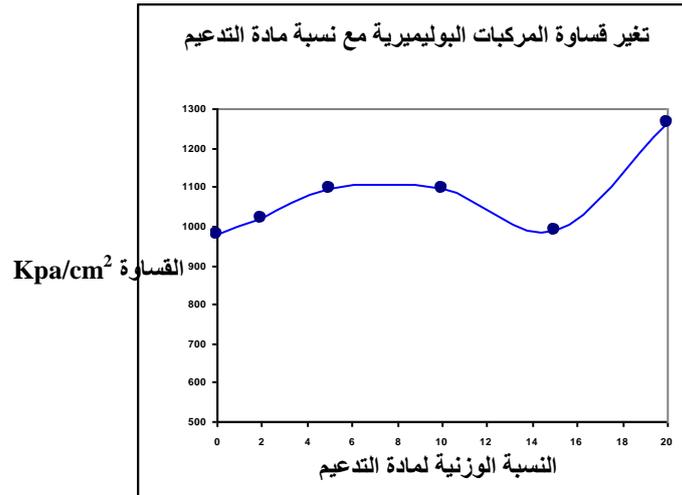
**ملاحظة:** أجريت الاختبارات في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة تشرين وفي مخابر كلية الهندسة بجامعة الملك خالد بالسعودية على جهاز مصمم خصيصاً لغرض إجراء البحث، وبالإستعانة بجهاز صقل السطوح Polishing.

أظهرت الاختبارات والتجارب النتائج التالية:

### 1. تغير القساوة كتابع لمادة التدعيم:

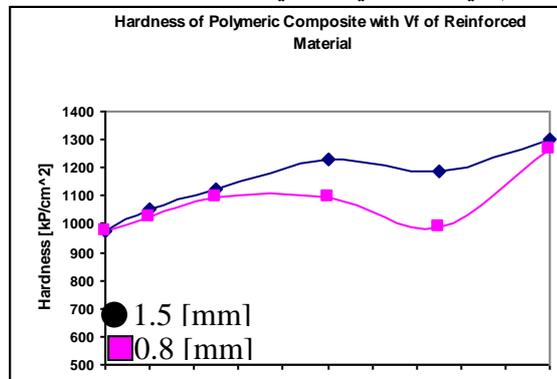
أظهرت النتائج أن قساوة المادة المركبة المدروسة تزداد بزيادة نسبة مادة التدعيم في الإيبوكسي؛ أي كلما ازدادت نسبة حبيبات الكربون تحسنت قساوة المادة، إضافة إلى هذا ازدادت القساوة بزيادة حجم حبيبة الكربون المستخدمة كمادة تدعيم.

يبين الشكل (4) تغير قيمة القساوة مع تغير نسبة مادة التدعيم لحجم حبيبات ثابت بقيمة صغيرة  $0.4 \text{ [mm]}$ ، تبين النتائج أن القساوة تكون بأقل قيمة لها عندما تكون المادة إيبوكسي حر، وتزداد بزيادة نسبة حبيبات الكربون فيها، ولكن عند النسبة  $15\%$  تقل هذه النسبة من قيمة  $1092$  حتى القيمة  $833 \text{ [kPa/cm}^2]$ ، وذلك نتيجة وصول المادة لحالة شبه عجيانية من الداخل، ثم تعود لتزداد القساوة عند النسبة  $V_f = 20\%$  حتى القيمة  $1266 \text{ [kPa/cm}^2]$  نتيجة عودتها لحالتها القصفة والقاسية من جديد.



الشكل (4): تغير القساوة مع نسبة مادة التدعيم في مركبات الإيبوكسي (عند قطر  $0.4 \text{ mm}$  لحبيبات الكربون).

يبين الشكل (5) تغير قيمة القساوة مع تغير نسبة مادة التدعيم لأقطار حبيبات بقيم مختلفة  $0.8, 1.5 \text{ [mm]}$ ، تبين النتائج أن القساوة تكون بأقل قيمة لها عندما تكون المادة إيبوكسي حر، وتزداد بزيادة حجم حبيبات الكربون ونسبتها في المادة الحرة، وتسلق السلوك نفسه لمختلف حجوم حبيبات مادة التدعيم، وتمر أيضاً عند النسبة  $15\%$  بالحالة نفسها، ثم تعود لوضعها عند زيادة هذه النسبة. ولكن هذا السلوك بعكس السلوك الذي يبينه معامل الاحتكاك الذي يقل بزيادة نسبة حبيبات التدعيم في الإيبوكسي ويعطي قيماً أفضل عند النسبة العالية.



الشكل (5): تغير القساوة مع نسبة مادة التدعيم في مركبات الإيبوكسي (عند حجوم مختلفة لحبيبات الكربون).

## 2. التآكل في مركبات ايبوكسي/كربون:

### \* الظواهر العامة نتيجة التآكل:

تم اختبار خمس عينات بنسب مختلفة من حبيبات الكربون، وهي على التوالي (2, 5, 10, 15, and 20%) من حبيبات الكربون. وقد تبين بالفحص المجهرى ان الحبيبات كبيرة البعد (1.5 mm) تترك بينها فراغات كبيرة، وتظهر واضحة على سطح العينة الخارجي مما يدل على أن الروابط بين المادتين (الإيبوكسي وحبيبات الكربون) غير كبيرة مما يزيد من نسبة التآكل تحت الظروف القاسية من سرعة وحمل.

نتيجة لدراسة تأثير عناصر التدعيم على اختبارات نمط التآكل فإننا طبقناها لدراسة تغير نسبة التآكل مع زمن الانزلاق تحت حمل انزلاق متغير وأحجام ونسب مختلفة لحبيبات الكربون لمعرفة مدى تأثير هذا المؤشر، بالإضافة إلى معرفة تأثير سرعة الانزلاق في نسبة التآكل، وحجم هذه المشكلة في المحامل. وأيضاً، هدفت هذه الاختبارات إلى التعرف على نمط التآكل لهذه المواد المركبة عن طريق فحص سطح المادة بواسطة المجهر الإلكتروني.

في البداية وفي مرحلة Running-in (مرحلة البداية) كان نمط الاهتراء التصاقاً (Adhesive) رغم أن نسبة التآكل كانت عالية وسريعة، ولكنها لا تؤثر بشكل كبير في مراحل الاختبار الأخرى، وبعد زمن معين يتم إنتاج سلسلة من البودرة البيضاء التي تدل على تغير نمط التآكل؛ ليصبح اهتراءً حاتاً (Abrasive)، وهو ما يسمى بتآكل (body) نتيجة للاحتكاك بين الجسمين الأساسيين وتكون البودرة بينهما. وهذا النوع من التآكل يسبب خطأً على سطح العينة الخارجي، ويسبب شقوقاً في الطبقة الداخلية لهذا النوع من المركبات. إن ارتفاع درجة الحرارة نتيجة الاحتكاك زاد من الشقوق وعمقها، إضافة إلى ظهور رائحة ناتجة عن الوصول لدرجة حرارة بداية انصهار هذه المركبات؛ لأن الحرارة زادت عن الحد الذي تتحملة المركبات، فتصبح بالحالة اللدنة، ثم تعود لتتصلب بعد أن تبرد لعدة دقائق.

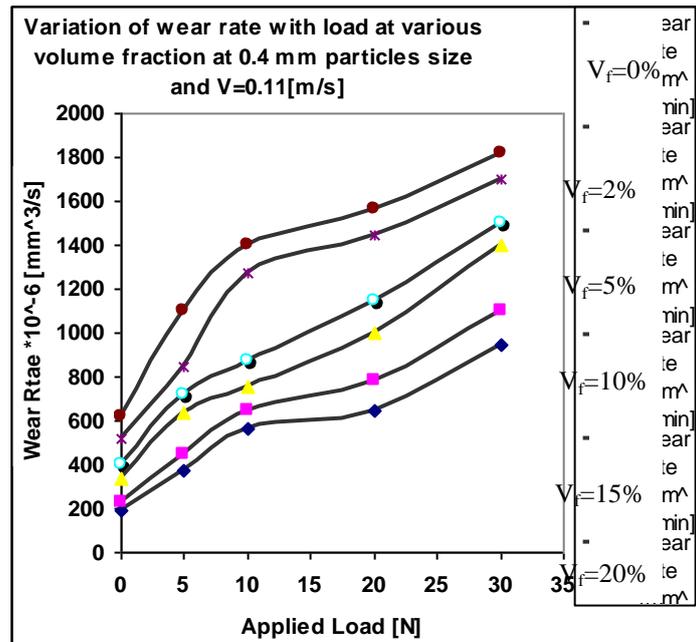
يزداد التآكل في المرحلة الأولى من مخططه بسرعة؛ لأن سطح التماس بين الجسمين يكون أكبر ما يمكن تبين جميع الأشكال أن التآكل يزداد مع الحمل تحت الظروف غير الجافة، مع وجود منطقة شبه ثابتة خلال زمن قصير في مخطط التآكل في المرحلة الأولى من التآكل عندما يكون التماس كاملاً بين المعدن والمادة البوليميرية المركبة يبدو السطح مشققاً ومخدداً، وهذا يعطي ارتفاعاً بفقدان حبيبات الكربون التي تأتي بين الجسمين المحتكين وتبدأ بحك سطح المادة المركبة على طولها كله مسببة تخدداً وتشققاً، وهذه الحبيبات الحاكة تعطي ارتفاعاً لفقدان أكثر لحبيبات الكربون وبأطراف حادة. لكن في نهاية المرحلة الأولى تصبح الحبيبات المزالة بحجم أصغر فتتشكل وتنتشر بين السطحين

المتماسين. وبالتالي تتكون طبقة رقيقة الثخانة من الحبيبات، تسبب تقريباً الفقدان بالوزن في المرحلة الثانية من مخطط التآكل. مع استمرار زمن الاختبار يزداد الوزن المزال من العينة في المنطقة الثانية، وفي المرحلة الثالثة الأخيرة يزداد التآكل بشكل سريع وبقيمة كبيرة حتى نهاية التجربة.

### \* دراسة التآكل:

يبين الشكل (6) تزايد الاهتراء مع الحمل من 0 حتى 30N تحت سرعة انزلاق ثابتة  $0.11m/s$  وزمن 50min لعينات إيبوكسي حر والنسب المختلفة لحبيبات مادة التدعيم (الكربون). إن نسبة التآكل تزداد بشكل كبير بزيادة الحمل في المرحلة الأولى من عمر العينة، ولكن عند حمل  $(10 \div 20N)$  (المرحلة II) تصبح الزيادة شبه ثابتة تقريباً؛ أي يمر التآكل بمرحلة (Steady-state)، وهي مرحلة قصيرة جداً (تآكل بسيط خلال زمن قصير)، ثم تزداد بشكل حاد مرة ثانية وتختلف عن المرحلة الأولى بطول عمرها تحت تأثير الحمل الأكبر لقيمة أعلى من  $22[N]$ . كما يوضح تغير نسبة التآكل مع الحمل تحت تأثير نسب مختلفة لمادة التدعيم من 0 حتى 20% بقطر ثابت 0.4 mm.

تبين التجارب أن مخططات التآكل متقاربة مع بعضها بعضاً عند النسب المختلفة الصغيرة لمادة التدعيم والإيبوكسي بشكل حر، ولكنها تتباعد وتكون نسبة التآكل متزايدة أكثر عند النسب العالية من الكربون (20%, 15%). والمخططات (الإيبوكسي الحر والنسبة المنخفضة لحبيبات الكربون 2%) تكون متقاربة جداً وبالميل نفسه ويلاحظ وجود منطقة صغيرة يكون فيها ازدياد نسبة التآكل شبه ثابتة، بينما في النسب الأعلى (5%, 10%) نلاحظ عدم وجود هذه المنطقة (Steady-State)، إذ إن قيمة التآكل تزداد ولكن بميل أقل من المنطقة الأولى ثم يزداد بحدة حتى نهاية الاختبار (من حمل 22 نيوتن حتى نهاية الاختبار). بينما عند النسب العالي (20%, 15%) يمر مخطط التآكل بمراحله الثلاث ويمر بمرحلة ازدياد نسبة تآكل ثابتة بين الحمل 10N و20N.



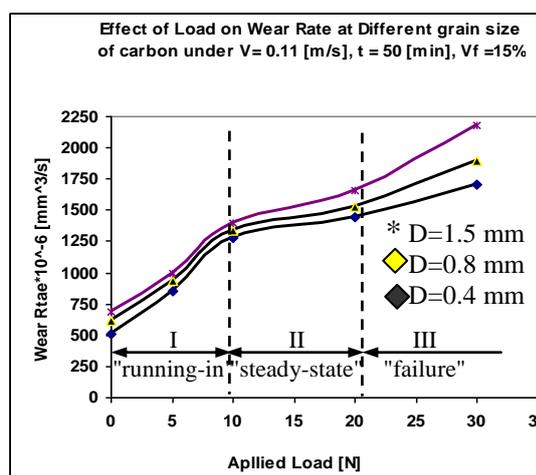
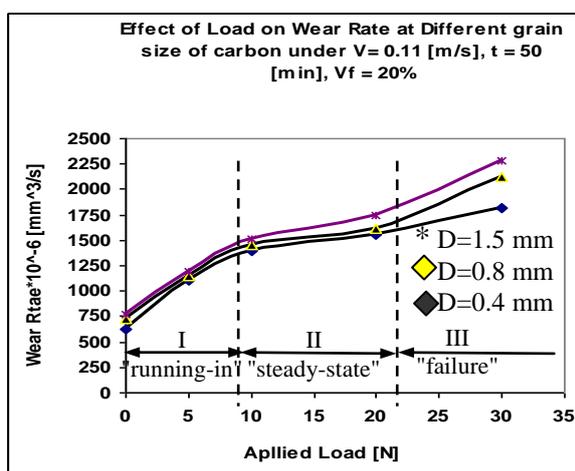
الشكل (6): تأثير الحمل في نسبة التآكل لمركبات الإيبوكسي بحبيبات كربون بقطر 0.4 مم ونسب مختلفة

## من مادة التدعيم وتحت تأثير سرعة انزلاق عالية (0.11[m/s])

يبين الشكل (7) تزايد الاهتراء مع الحمل تحت تأثير نسب عالية (20%، 15) لمادة التدعيم؛ وذلك لحجوم مختلفة من حبيبات الكربون؛ أي أن المخطط يدرس تأثير حجم حبيبات مادة التدعيم في نسبة التآكل بالاعتماد على قيمة الحمل المطبق.

نلاحظ أن مخططات الاهتراء متوافقة مع بعضهما بعضاً في مراحله الثلاث ونسب زياده تحت تأثير الحمل المطبق، حيث يمر في البداية بمرحلة Running-in حيث تكون نسبة ازدياد التآكل كبيرة خلال فترة زمنية قصيرة في هذه المرحلة حتى الحمل  $8[N]$ ، وتتقارب المخططات حتى تكاد تكون النسبة واحدة عند الحجوم المختلفة، بعدها يمر المخطط بالمرحلة الثانية Steady-State الشبه ثابتة، حيث تكون نسبة ازدياد التآكل ثابتة تقريباً حتى الحمل  $22[N]$ ، وهنا يتقارب المخططان لنسبتي الكربون بشكل أكبر. في المرحلة الثالثة تزداد نسبة التآكل بشكل أكبر من المرحلة الأولى ويتباعد المخططان حيث تكون زيادة التآكل أكبر بالنسبة إلى القيمة الأعلى.

نلاحظ أن المنحنيات الثلاثة تمر بالمراحل الثلاث مرحلة Initiation و Steady-State قليلة ومرحلة التعب الأطول؛ أي تغير نسبة التآكل باستخدام أحجام مختلفة لحبيبات مادة التدعيم عند نسبة عالية من هذه المادة (15%) تحت تأثير الحمل المتغير.



الشكل (7): تأثير حجم حبيبات الكربون تحت تأثير الحمل المطبق على نسبة التآكل لمركبات الإيبوكسي بحبيبات كربون بأقطار مختلفة وعند نسبة 15% من مادة التدعيم

يبين الشكل (7) تأثير حجم حبيبات مادة التدعيم (الكربون) تحت تأثير الحمل المطبق في تغيير نسبة التآكل تحت تأثير الحمل وثبات الزمن وسرعة الانزلاق. نلاحظ أن الخطوط الثلاثة تتقارب بشكل كبير عند النسبة الأعلى

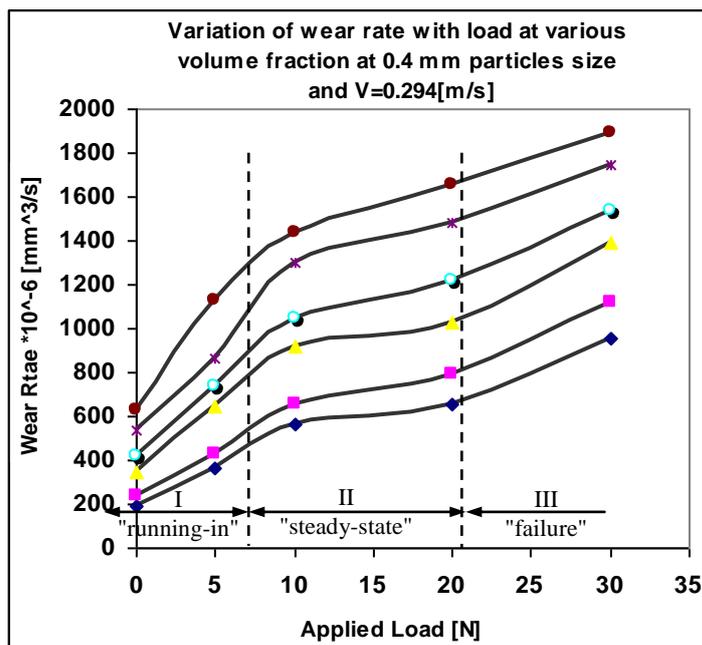
لمادة التدعيم 20%، وتصل لحالة الانطباق، ولكن بقيم تآكل أكبر مما كانت عليه عند استخدام نسبة 15% من مادة التدعيم، وأكثر ما تكون نسب التآكل متساوية عند الأحمال الصغيرة  $[N] 5$ . في مرحلة الـ steady-State تكون نسب التآكل مساوية لحجم الحبيبات (0.4 and 0.8 mm)، بينما تزداد قيمة التآكل أكثر ويتباعد خطه بميل أكبر عند الحجم الكبير لحبيبة مادة التدعيم (1.5 mm).

يبين الشكل (8) تزايد التآكل مع الحمل بازدياد الحمل من 0 إلى 30 N تحت سرعة انزلاق ثابتة كبيرة قيمتها  $0.294[m/s]$  وزمن ثابت 50 دقيقة ولعينات تحوي على نسب مختلفة لمادة التدعيم ومقارنة مع الإيبوكسي الحر. إن نسبة التآكل تزداد بشكل حاد بزيادة الحمل، ولكن عند حمل  $(10 \div 30N)$  تصبح الزيادة ثابتة تقريباً، ثم تزداد مرة ثانية، ولا نرى مرحلة ثبات بالتآكل خلال عملية التآكل بالنسبة إلى كافة النسب.

تبين جميع المنحنيات أن التآكل يزداد مع الحمل، تحت ظروف عدم تشحيم توجد طبقة غير ثابتة من التآكل بالمرحلة الأولى. ومع استمرار التجربة يزداد التآكل بالمرحلة الثانية، وأخيراً يزداد بشكل حاد حتى نهاية (الاختبار) التجربة. والزيادة في نسبة التآكل تحت تأثير السرعة العالية ظروف العمل الجاف نفسه كانت أكبر ولا تمر العينة بمرحلة التآكل شبه الثابت.

بالفترة التحضيرية (بداية الاختبار) الأولى حيث كان التماس بين المعدن والمادة المركبة كاملاً فإن السطح يتآكل بشكل كبير وبالتالي يتشقق ويتحدد. هذا يعطي ارتفاعاً بفقدان حبيبات الكربون التي تأتي بين سطحي التماس للمادتين، وهذا الفقدان عند سطح التماس يبدأ يحك سطح المادة المركبة على طول مع قص وتحفير (تخديد). هذه الحبيبات الحاكة تعطي ارتفاعاً أكثر بفقدان الحبيبات التي لها أطراف حادة. بنهاية الفترة البدائية، تصبح حبيبات الكربون أصغر حجماً نتيجة الحك مع السطح المقابل (المعدن). عند تشكل هذه الحبيبات الصغيرة من الكربون وانتشارها بين سطوح التماس، يبدأ تشكل طبقة بثخانة منتظمة من الحبيبات والتي تسبب تقريباً فقداناً بالوزن بالمرحلة الثانية من 10N إلى 20N .

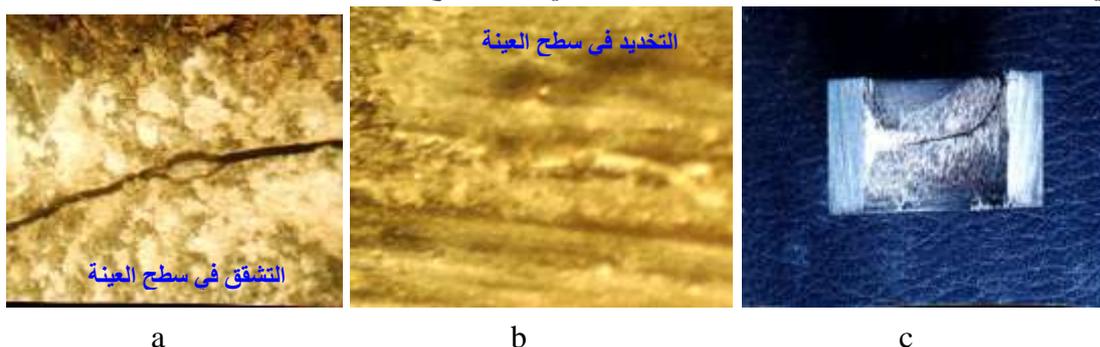
يبين الشكل السابق أن نسبة التآكل تزداد في البداية بشكل حاد مع زيادة الحمل لغاية (5N)، بعد ذلك نلاحظ أن أي تزايد في الحمل يرافقه تناقص في التآكل، ولكن بقيمة أكبر منه عند السرعات الصغيرة؛ لأن عامل السرعة من العوامل المهمة التي تؤثر في نسبة التآكل وميكانيزمه لارتباطها التام مع الحمل  $(P \times V)$ .



الشكل (8): تأثير الحمل في نسبة التآكل لمركبات الإيبوكسي بحبيبات كربون بقطر 0.4 مم وبنسب مختلفة من مادة التدعيم وتحت تأثير سرعة انزلاق عالية (0.294[m/s])

ويبين الشكل أيضاً أن التآكل يزداد بشكل كبير جداً في المرحلة الأولى من الاختبار عند النسب كلها وتحت تأثير النسب المختلفة لمادة التدعيم وذلك لغاية الحمل 10N. بعد هذه المرحلة يزداد التآكل، ولكن بنسب ازدياد أقل بكثير من المرحلة الأولى لنهاية الاختبار. عند الأزمنة القصيرة للاختبار نرى أنه لا يوجد فرق بين نسب التآكل عند النسب المختلفة لمادة التدعيم تقريباً.

في هذه الاختبارات ونتيجة للتماس الجاف بين المادتين، فإن سطح العينة يتشقق ويتخذد كما في الشكل (9)، (a) يبين تشققاً بالعينة نتيجة التآكل الحاد، بينما (b) يبين الأخاديد في العينة. أما (c) يبين سطح العينة الخارجي، هذا يعطي ارتفاعاً بفقدان حبيبات الكربون من المادة المركبة التي تحك سطح التماس بين المادتين.

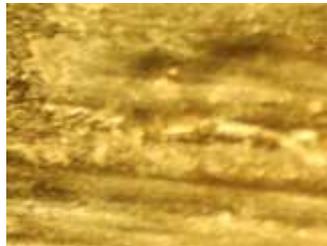


الشكل (9): العينة تظهر التشقق والتخدّد فيها نتيجة التآكل الجاف

تشير النتائج إلى أن نسبة التآكل تعتمد على الحمل الطبيعي مع تغير الزمن بطرق متعددة معتمدة على قيمة سرعة الانزلاق.

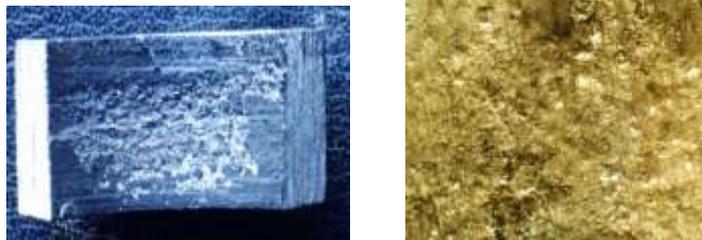
ف عند سرعة منخفضة، تزداد نسبة التآكل مع زيادة الحمل الطبيعي لكل نسب المادة  $V_f$  وعند أحمال عالية، وتكون نسبة التآكل أقل حساسة بكثير لتغير سرعة الانزلاق مقارنة مع الحالة عند حمل منخفض طبيعي. وعند نسب

عالية 15, 20% تتأثر العينات بالتآكل بشكل أكبر مما هو في النسب المنخفضة (2,5, and 10%)، حيث تحتوي هذه العينات بعض الفراغات نتيجة الصب والتي تزيد من نسبة التآكل. تزداد هذه الفراغات عند العينات مع  $V_f$  =20% والتي تسبب زيادة نسبة تآكل أكثر منها في العينات عند نسب منخفضة ل  $V_f$  % لكل العينات مع حجم حبيبات مختلفة لمادة التسليح. وجدنا أيضاً أن تشكل حبيبات الكربون بين سطحي التماس ونسبة الناقل للمواد تعتمد على كمية الكربون الموجودة برا تتج الإيبوكسي. هذا يسبب تشققاً وتحقراً أقل للسطح. يعطي ال  $V_f$  الأعلى من الكربون بالمادة المركبة تشققاً أقل وتحقراً أقل وفقداناً للحبيبات القليل ودرجة حرارة تماس أقل. وبالتالي كان التركيز الأعلى للكربون مناسب التأثير وأفضلية أكثر لتشكيل الطبقة المنتقلة. بالفترة التحضيرية (بداية الاختبار) يكون التماس بين العمود (المعدن) والمادة المركبة (العينة) كاملاً؛ لذلك يكون التآكل بنسبة كبيرة مما يؤدي إلى تشقق وتحدد سطح التماس للعينة، كما في الشكل (9)، وهذا النوع من التآكل هو تآكل التصاق يبين أثره بالتصوير بشكل خطوط مستقيمة متوازية (تخديد)، كما في الشكل (10).



الشكل (10): ميكانيزم تآكل الالتصاق

هذا يعطي ارتفاعاً بفقدان حبيبات الكربون والتي تأتي بين سطحي التماس للمادتين، وهذا الفقدان عند سطح التماس يبدأ يحك سطح المادة المركبة على طوله مع تحفير السطح، وهذا يسمى تآكلاً حائماً أو تآكل احتكاك بين ثلاثة أجسام (المعدن والعينة والحبيبات المتشكلة بينهما) "3-body"، كما في الشكل (11).

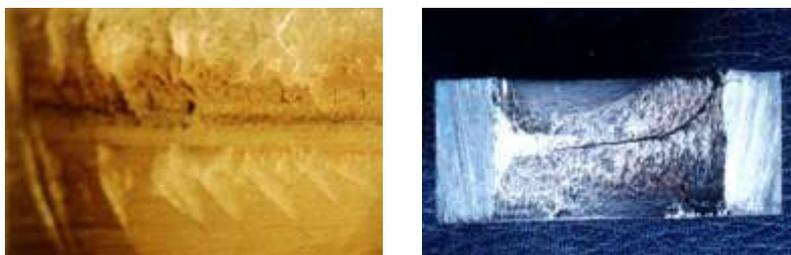


الشكل (11): ميكانيزم تآكل الاحتكاك (3-body)

هذه الحبيبات الحاكة تعطي ارتفاعاً أكثر بفقدان الحبيبات التي لها أطراف حادة. بنهاية الفترة البدائية، تصبح حبيبات الكربون أصغر حجماً نتيجة الحك مع السطح المقابل (المعدن). عند تشكل هذه الحبيبات الصغيرة من الكربون وانتشارها بين سطوح التماس، يبدأ تشكل طبقة بثخانة منتظمة من الحبيبات والتي تسبب تقريباً فقداناً بالوزن في المرحلة الثانية من 10N إلى 20N .

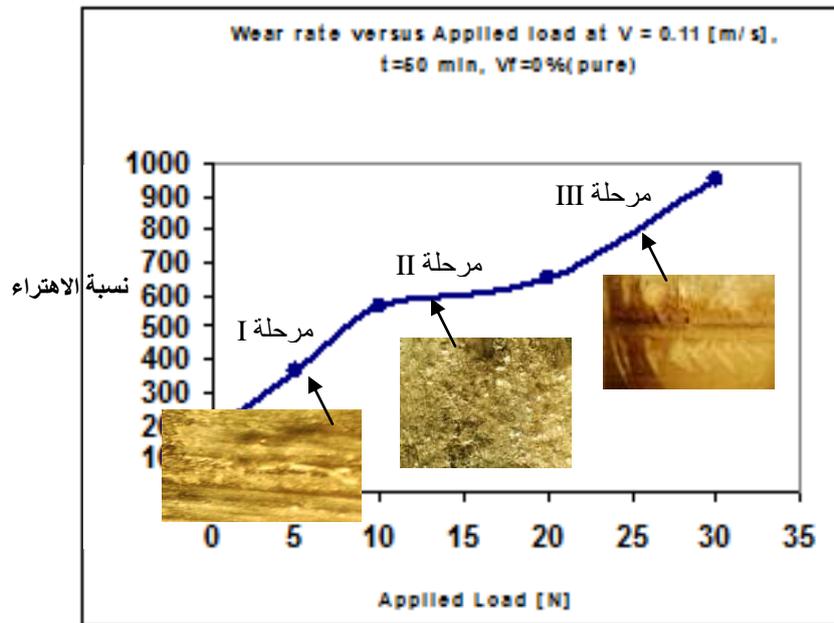
تزداد نسبة التآكل مع زيادة الحمل عند أي نسبة للكربون مع اعتبار حجم حبيبة الكربون؛ إذ إنه كلما ازداد حجم حبيبة الكربون ازداد التآكل نتيجة وجود الفراغات بين الحبيبات في سطح العينة سواء الداخلي أم الخارجي و نتيجة عدم التجانس بين المادة الأساسية (الإيبوكسي) ومادة التدعيم (الكربون).

عند الأزمنة القصيرة (50 min) للاختبار نرى أنه لا يوجد فرق بين نسب التآكل عند النسب المختلفة لمادة التدعيم تقريباً؛ أي نلاحظ أن خطوط التآكل تكون متقاربة في أكثر من مرحلة. مع زيادة حجم حبيبة الكربون، المادة المركبة عند  $V_f$  عالٍ لها تآكل أكبر بكثير. في المرحلة الثانية، تزداد نسبة التآكل مع الحمل وحجم حبيبات الكربون، ولكن بنسبة أقل لغاية نهاية المرحلة الثانية عند الحمل  $[N]22$ ؛ أي أن النسبة تستقر وتبقى ثابتة حتى بداية المرحلة الثانية. إن حبيبات الكربون تصبح أصغر حجماً نتيجة الاحتكاك مع السطح المعدني، طالما أن الحبيبات أصبحت أصغر فإنها تتحرك وتنتشر بين سطح التماس والمعدن، وبالتالي فإن طبقة من الحبيبات بثخانة منتظمة تبدأ بالتشكل والتي تسبب فقداناً ثابتاً بالوزن تقريباً. مع استمرار الاختبار تبدأ الشروخ بالتشكل نتيجة تركيز الإجهادات عند مساحة تماس حقيقية صغيرة، ولا سيما عند حجم الحبيبات الكبيرة عند نسبة الكربون العالية في الإيبوكسي، وهنا تظهر - بشكل بسيط - المرحلة الثالثة وهي النوع الثالث من أنماط التآكل (الكلل)، كما في الشكل (12).



الشكل (12): ميكانيزم تآكل الكلل

وفي هذه المرحلة تظهر فراغات بين الحبيبات، وهذه الفراغات تزداد عند العينات مع  $V_f = 20\%$  ، التي تسبب زيادة نسبة التآكل أكثر منها في العينات عند نسب منخفضة ل  $V_f$  % لكل العينات مع حجم حبيبات الكبيرة لمادة التسليح. يعطي ال  $V_f$  الأعلى من الكربون بالمادة المركبة تشققات أقل وتحفرراً وفقدان الحبيبات القليل، ولكن تعطي النتائج العكس عند استخدام حبيبات كربون بأحجام أكبر حيث تصبح التشققات أكثر والفراغات أكبر. الشكل (13) يبين المراحل الثلاث للتآكل وتغير ميكانيزم التآكل خلال عمر العينة (عينة من الإيبوكسي الحر).



الشكل (13): يبين مخطط التآكل وميكانيزماته خلال عمر عينة

### الاستنتاجات والتوصيات:

- من خلال المعطيات والملاحظات التجريبية، حصلنا على النتائج التالية:
- 1) يتغير نمط التآكل من التصاقى عند النسب القليلة لمادة التدعيم والحمل الصغير، وبعد المرحلة الأولى تتشكل حبيبات بين السطحين المتماسين فيتشكل الميكانيزم الثاني وهو الحات (3-body)، وفي المرحلة الأخيرة تظهر الشقوق دليل حدوث ميكانيزم الكلل.
  - 2) تمتلك المادة الأساس الحرة قيم تآكل أقل.
  - 3) تزداد نسبة التآكل مع الحمل عند كل  $V_f$  عالية. النسبة الأعلى لـ  $V_f$  تعطي قيمة نسبة التآكل الأكبر، وأيضاً الحجم الأكبر للحبيبات يعطي القيم الأكبر عند أحمال منخفضة وعالية.
  - 4) خلال الفترة الأولى من التآكل فإنه يحدث تآكل سريع لكل المركبات عند قيم مختلفة لـ  $V_f$ . تآكل بحالة ثابتة بعد هذه المرحلة عندما تتشكل وتتطور طبقة رقيقة من الكربون بين سطوح التماس.
  - 5) تزداد نسب التآكل بشكل كبير عند السرعات العالية أكبر مما كانت عنده في السرعات المنخفضة؛ لذا نوصي:

باستخدام مركبات الإيبوكسي والكربون في المساند ولا سيما في أجزاء الآلات التي لا تحتاج لتزيت وذلك بنسب صغيرة من الكربون، وبأبعاد حبيبات أصغر ما يمكن من أجل تقليل الاهتراء وعدم الوصول إلى مرحلة التعب والكلل.

### المراجع:

- 1- KURDIEH, M. N. and DAYOB, M.S., *The Effect of Volume Fraction of Carbon Particle-Reinforced Epoxy Composites in Dry Sliding*, Teshreen Journal, Vol. , No. , 2008.

- 2- KURDIEH, M. N. and DAYOB, M.S., *The Effect of Carbon Particles Size on Wear Pattern and its Rate in Epoxy /Carbon Composites in Dry Sliding*, Teshreen Journal, 2008.
- 3- LUDEMA, K.C., *Introduction to Wear*, in S.D. Henry (ed), *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, Vol. 18, ASM International, New York, 1992,1.
- 4- SOMIT NEOGI, HASHMI,S.A.R, and NAVIN CHAND, *Role of PET in Improving Wear Properties of PP in Dry Sliding Condition*, Bull, Mater, Sci., V 26, No. 6, October 2003, 579-583.
- 5- SRIVASTAVA, V.K. and PATHAK, J.P., *Friction and Wear Properties of Bushing Bearing of Graphite Filled Short Glass Fiber Composites in Dry Bearing*, Wear, 197 (1996), 145-150.
- 6- ALI, W.Y., *Friction Behaviour of Composite Material*, Metall 51 Jahrgang, (1997), 324-329.
- 7- SUNG, N.H. and SUH, N.P., *Effect of Fiber Orientation on Friction and Wear of Fiber Reinforced Polymeric Composites*, Wear, 53 (1979), 129-141.
- 8- SRIVASTAVA, V.K. and PATHAK, J.P., *Wear and Friction Characteristics of Mica-Filled Fiber-Reinforced Epoxy Resin Composites*, Wear, 152 (1992), 343-350.
- 9- EL-SAYED, A.A., EL-SHERBINY, M.G., ABO-EZZ, A.S. and AGGAG G.A., *Friction and Wear Properties of Polymeric Materials for Bearing Applications*, Wear, 184 (1995), 45-53.
- 10- TEVRUZ, T., *Tribological Behaviour of Bronze-Filled Polytetrafluoroethylene Dry Journal Bearings*, Wear, V 230, No. 1, May 1999, 61-69.
- 11- ALEICHI, A.M. and AMIN, G.M., *The Effect of Molecular Orientation Through Uniaxial Prestraining in (PVC) and (PC) on The Friction and Wear Characteristics*, Wear, 112 (1986), 57-66.
- 12- ELIECHI, A.M. and AMIN, G. M., *The Effect of Unidirectional Cotton Fiber Reinforcement on The Friction and Wear Characteristics of Polyester*, Wear, 113 (1987), 67-78.
- 13- HEH-WON CHANG, *Wear Characteristics of Composite: Effect of Filler Orientation*, Wear, 85 (1983), 81-91.
- 14- M.S. ZAAMOUT and M.W. AL-HAZMI, *Effect of Static and Impact Loading on the Wear Behaviour of Some Polymers*, Emirates Journal for Engineering Research, 11(2), 99-104 (2006), Umm Al-Qura university, Makkah, Saudi Arabia, pp. 99-104.

