

## تأثير حجم حبيبات الكربون على نمط التآكل ونسبته في مركبات إيبوكسي كربون في ظروف الانزلاق الجاف

الدكتور محمد نهاد علي كردية\*

الدكتور محمد صقر ديوب\*\*

تاريخ الإيداع 13 / 12 / 2007. قُبل للنشر في 2008/3/17

### □ الملخص □

الهدف من هذا البحث هو دراسة نمط التآكل لمادة الإيبوكسي ومركباته، عند درجة حرارة ثابتة عند قيم مختلفة للعامل (PxV) "السرعةxالضغط". تم إجراء التجارب على جهاز قلم على قرص (Pin-on-disc) صمم خصيصاً لهذا النوع من التجارب والاختبارات تحت ظروف جافة وذلك بتأثير الحمل وتأثير حجم حبيبات الكربون (مادة التدعيم) والزمن وتأثيرها على نمط التآكل.

أظهرت النتائج أن نمط التآكل يعتمد بشكل أساسي على الحمل وحجم حبيبات مادة التدعيم، فعند استخدام حبيبات بحجم صغير (0.4 مم) وتحت تأثير حمل صغير (5 نيوتن) فإن تآكل الالتصاق يظهر في المرحلة الأولى من الاختبار، بينما تآكل الاحتكاك يحدث عند الحمل العالي (10 نيوتن).

يوجد مرحلة يكون فيها التآكل بقيمة شبه ثابتة، ثم تظهر تشققات في سطح العينة دليل بدء الانهيار (تآكل التعب). تم دراسة أنماط التآكل بتحليل السطح المتآكل باستخدام مجهر الكتروني. إن نسبة التآكل تزداد بشكل بسيط بزيادة حجم حبيبات الكربون في نمطي التآكل (الالتصاق و الاحتكاك) عند النسب العالية لمادة التدعيم.

**الكلمات المفتاحية:** الإيبوكسي، مواد التسلح، حبيبات الكربون، حجم مادة التدعيم، المواد المركبة البوليميرية، التآكل، 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.

## The Effect of the Size of Carbon Particles on Erosion Pattern and its Rate in Epoxy/Carbon Composites in Conditions of Dry Sliding

Dr. Mohammad Nihad Ali Kurdieh \*  
Dr. Mohamad Saker Dayob \*\*

(Received 13 / 12 / 2007. Accepted 17 / 3 / 2008)

### □ ABSTRACT □

The objective of this work is to investigate the erosion behaviour of Epoxy and its composites at a constant (T) with different (P.V). A pen-on-disc apparatus is used to perform this experiment under dry sliding circumstances affected by load, size of carbon particle, and duration of experiment. The results obtained indicate that the erosion pattern depends on the size carbon particles; when a small size of reinforced materials (0.4 mm) is used under low pressure (5 N), adhesive erosion has been observed during running-in period, whereas abrasive erosion occurs at (10 N). There is a steady-state region. At the end of the test, the specimen passes through the fracture stage (fatigue); at this stage, cracks show up. The erosion patterns have been analyzed by an electronic microscope. Also, the obtained results indicate that the wear rate increases with the size of carbon particle in both (adhesive and abrasive erosions).

**Keywords:** Epoxy, Reinforced Materials, Carbon particles, Polymeric Composite Materials, Erosion rate, Load, Size of grain.

---

\*Assistant Professor, Department of Production and 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.

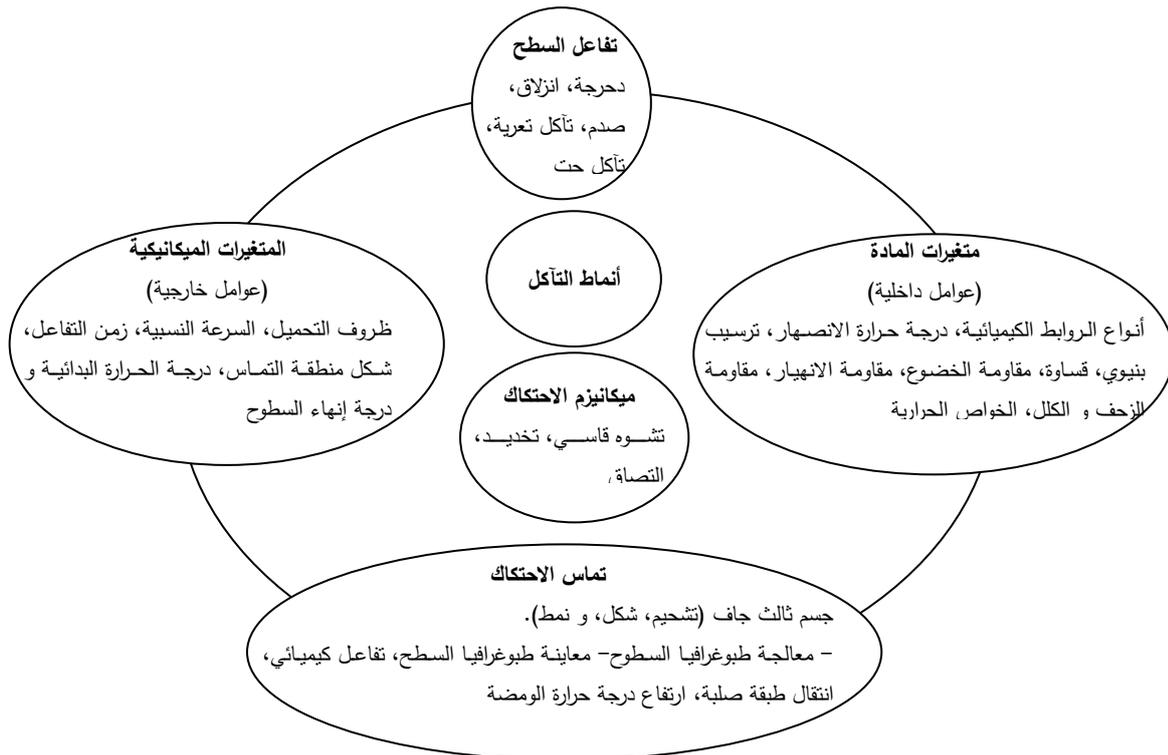
## مقدمة:

إن نمط التآكل في مركبات الإيبوكسي يعتمد بشكل كلي على الحمل، فتحت تأثير الحمل المنخفض نلاحظ وجود تآكل احتكاكي خلال المرحلة الأولى من عمر التآكل، بينما يحدث تآكل الالتصاق عند الأحمال العالية في المراحل الأخيرة من مخطط التآكل، لكن يوجد مرحلة انتقالية بين المرحلتين، أي يوجد منطقة غير ثابتة بين منطقتي التآكل [1].

أظهرت التجارب أن نسبة التآكل تزداد تحت تأثير كل الظروف بزيادة الحمل المطبق واستمرار زمن الاختبار، لكن بزيادة نسبة الكربون في هذه المركبات تزداد نسبة التآكل تحت تأثير الحمل نفسه وخلال نفس الزمن، 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 [2].

يظهر الشكل (1) مخطط يبين الظواهر التريبولوجية. بشكل عام تصنف أنواع التآكل إلى قسمين أساسيين: عوامل خارجية وعوامل (متغيرات) داخلية، بالإضافة لظروف تماس الاحتكاك والتفاعلات عند السطوح والتي تنتج تبدد بالطاقة وفقدان جزء من المادة خلال الاحتكاك وأنماط التآكل [3].



الشكل (1): ميكانيزمات التآكل و العوامل المؤثرة عليه

إن نسبة تآكل ألياف الأراميد المستمرة ( بنسبة 60% ) مع الإيبوكسي تبدي قيمة دنيا عند توجيه الألياف بشكل عمودي على سطح الانزلاق، لكن تأخذ قيمة أعظمية إذا تم توجيهها بشكل عرضي مع سطح الانزلاق ويكون نمط التآكل المسيطر هو الأخاديد المجهرية [4].

إن نسبة التآكل في محامل الآلة ومعامل الاحتكاك بلغ أقل قيم لمركبات البوليميرات المسلحة ببودرة الغرافيت (بنسبة 10%) وكذلك نسبة التآكل لمركبات الإيبوكسي/غرافيت، و الإيبوكسي/زجاج/غرافيت تعتمد على زمن الانزلاق والحمل المطبق، بينما تزداد هذه النسبة بازدياد الحمل والزمن. إن معامل الاحتكاك يصل لقيمة ثابتة تقريباً بالنسبة للأحمال الأعلى [5].

إن نسبة التآكل وقيمة معامل الاحتكاك لمركبات الإيبوكسي/غرافيت (ألياف) هو أقل قيمة إذا تم التسليح باتجاه عمودي على سطح الانزلاق، وتبلغ نسبة التآكل أقل قيمة، لكن معامل الاحتكاك له القيمة الأعلى من أجل مركبات الإيبوكسي/ألياف الغرافيت وتكون الألياف موجهة بالاتجاه نفسه [6].

إن نسبة التآكل ومعامل الاحتكاك تتناقص مع زيادة النسبة المئوية للميكا عند أي زمن انزلاق، من أجل ألياف الزجاج غير الموجهة (نسبة 48%) مع الإيبوكسي. أعلى قيمة للقساوة نحصل عليها للمركبات بإضافة وزنية من الميكا (5%). إن نسبة التآكل ومعامل الاحتكاك تزداد بزيادة درجة الحرارة ويقبل بزيادة قساوة المواد، وله قيمة منخفضة عند نسبة 5% ميكا، وهذا يعود لتشكّل طبقة رقيقة منتقلة للسطح المقابل [7].

إن نسبة التآكل ومعامل الاحتكاك ينقص لقيمة دنيا باختبار العينات على جهاز pin-on-disc مع زيادة نسبة الألياف في الفولاذ المستمر غير الموجه، ألياف النحاس والألمنيوم مع الإيبوكسي. إن تآكل السطح المقابل يزداد مع زيادة قساوة الألياف المعدنية [8].

إن التآكل يبلغ قيمة أعلى لمركبات الإيبوكسي/ألياف الغرافيت المستمرة وذلك عندما توجه بزاوية  $30^0$  عن سطح الانزلاق. إن درجة التآكل تلعب دوراً هاماً بتأثيرها على التآكل، التآكل الأكثر للألياف يوافق التآكل الأقل للمادة. إن تآكل الألياف الأعظمي يحدث عند القيمة الأقل للتآكل [9].

تزداد نسبة التآكل لمركبات البولي تيترافلوروايثيلين المسلحة بألياف كربون مع زيادة الحمل الطبيعي (نسبة ألياف كربون 15%)، و ذلك نتيجة لتوليد حرارة احتكاكية، و إن ريش التآكل المزال يظهر عند أطراف العينة. وإن إضافة ألياف الكربون تقلل من نسبة التآكل بسبب الصعوبة بنسبة تشكل الفقاعات [10].

إن لمسافة الانزلاق تأثير على ضغط المحامل وعند سرعات منخفضة ومتوسطة على الاحتكاك والتآكل بالمحامل الـ Journal المصقولة (نسبة 60% bronze على PTFE). أجريت التجارب على جهاز pin-on-disc وأظهرت بأن معامل الاحتكاك ونسبة التآكل تتأثر بشكل كبير بنخانة وتركيب هذه الطبقات الرقيقة معتمدة على الالتصاق بين الفولاذ وسطح المركبات وعلى خصائص التماسك والترابط للبوليمير المستخدم، وكذلك الضغط ومسافة الانزلاق [11].

يزداد معامل الاحتكاك لمواد البولي فينيل كلورايد والبولي كاربونات بشكل بسيط بزيادة توجيه الجزيئات عندما يحدث الانزلاق باتجاه عمودي على الجزيئات الموجهة. إن قيمة معامل الاحتكاك تزداد بشكل موافق عندما يحدث الانزلاق باتجاه عمودي على الجزيئات ما قبل التوجيه [12].

لا تبدي - مركبات البولي تيترا فلورو إيثيلين مع (30%) من ألياف الكربون - زيادة بنسبة التآكل عند سرعات الانزلاق العالية، بعكس مركبات البولي تيترافلورو إيثيلين مع (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 اسطواني طويل. و معامل الاحتكاك لا يتأثر بنسبة التآكل النسبية عند السرعات العالية لكلا النوعين من المركبات [13].

تقل نسبة التآكل مع زيادة نسبة المادة المضافة لغاية (12.5%) وبعدها تبقى ثابتة عند السرعات المنخفضة (قيمة منخفضة للعامل الضغط في السرعة)، لكن عند السرعات العالية (القيمة المنخفضة للعامل P.V "السرعة×الضغط") تقل نسبة التآكل بشكل أكبر بكثير منه في المرحلة الأولى لمركبات البولي إيثر إيثر كيتون مع ألياف الكربون والزجاج. يحسن إضافة ألياف زجاج قصيرة لهذه المادة من مقاومة تآكل الانزلاق [14].

بالاعتماد على الخواص الجيدة لاتحاد مادة بوليميرية أساسية مع مادة تدعيم (ألياف) تم استخدام هذه المواد المركبة البوليميرية لإنتاج عدد كبير من المنتجات الميكانيكية كالمسننات، الكامات، العجلات، الفرامل، المحامل وسدادات الإحكام. هذه المواد المركبة تبدي كثافات منخفضة نسبياً ويمكنها أن تصنع حسب المتطلبات الصناعية بتغيير سلسلة تكديس لتجنب المقاومة العالية والجساءة في اتجاه التحميل العالي [15].

هناك العديد من المواد المركبة التي شكلت تستخدم لتحسين مقاومة التآكل للبوليميرات. المواد المركبة البوليميرية المدعمة بألياف الزجاج تبدي مقاومة تآكل ضعيفة جداً واحتكاك عالي نتيجة لطبيعة ألياف التدعيم القصيفة. هذا يحدث العديد من الباحثين لصب البوليميرات مع الأخذ بعين الاعتبار ألياف التدعيم المستخدمة [16].

### هدف البحث وأهميته:

ينحصر هدف البحث في دراسة تغير نمط التآكل التي تصيب مواد البلاستيك المتصلب حرارياً (مادة الإيبوكسي) ومركباتها، ويركز بشكل أساسي على دراسة تأثير حجم حبيبات مادة التدعيم (حبيبات كربون) على قيمة نسبة التآكل وأنماطه باستخدام حجوم مختلفة للحبيبات، وذلك لتحسين مقاومة التآكل لهذه المركبات تحت تأثير الحمل والسرعة في ظروف الاحتكاك الجاف.

### طرائق البحث ومواده:

#### تحضير العينات:

تم تصميم وتنفيذ قالب خاص لصب العينات المستخدمة كمحامل دفع تستخدم في أجزاء الآلات التي تصنع المواد الغذائية (التي لا تحتاج إلى تزييت) لتقليل نسبة التآكل.

تم استخدام مادة الإيبوكسي المتوسطة اللزوجة من النوع (Araldite CR- 39) و مركباته، حيث أضيفت (HY- 95) كمادة مقسية "البروكسيد" إليه بنسبة  $\left(\frac{1}{2}\right)$  وزناً.

تم إضافة حبيبات الكربون الأسود كمادة تدعيم للإيبوكسي وذلك بأحجام مختلفة، وتم المزج جيداً حتى الوصول إلى حالة التجانس التامة.

كل العينات المختبرة في هذه الدراسة تم تصنيعها يدوياً تحت ظروف جافة وتم اختبار العينات في المخبر تحت درجة حرارة (32°م).

بتغيير حجم حبيبات الكربون بالإيبوكسي (0.4 و 0.8 مم) والمزيج المقسى، تم تجهيز عينات الدفع لمركبات الإيبوكسي/المسلح بالكربون.

### الخواص الميكانيكية للينة المختبرة:

- الخواص العامة للمادة المختبرة إيبوكسي هي:

- مقاومة الشد:  $(280 \div 910) kg/cm^2$
- الكثافة:  $(1.11 \div 1.4) g/cm^3$
- القساوة:  $(85 \div 120) \mu$
- درجة حرارة الانصهار:  $290 ^\circ C$  وتحافظ على خواصها لغاية  $149 ^\circ C$ .
- تعتبر العينة من المواد القاسية، ولها سطح مقاوم للتآكل الحاك نسبياً. ولها خواص انزلاق جيدة، وتتميز بثباتية حرارية عند الدرجة  $87 ^\circ C$ ، كما أن لها مقاومة كيميائية ممتازة.

#### مادة التدعيم (التسليح):

المادة الداعمة لمركبات الإيبوكسي هي حبيبات الكربون الأسود، وقد اختيرت لتحسين خواص الإيبوكسي كما هو مطبق في المكابح، وله موصلية حرارية ومقاومة احتكاك ممتازة. ونتيجة لتمتعه بمواصفات احتكاكية عالية ومقاومته للتآكل وخواصه الحرارية الممتازة جعلت منه مادة أساسية للاستخدام في المحامل والمكابح. ولقد تم أخذ ثلاث نماذج من الحبيبات ذات أحجام مختلفة (0.4، 0.8، 1.5 مم)، وينسب متعددة للكربون. يوضح الشكل (2) شكل عيّنتين (أ) إيبوكسي حر (Pure)، (ب) مدعمة بالكربون.



ب. إيبوكسي/كربون



أ. إيبوكسي حر

شكل (2): شكل عينة الاختبار

#### اختبار التآكل والاحتكاك:

تم استخدام جهاز عمود/دفع لإجراء هذه الاختبارات ضمن الشروط الموافقة لتشغيل المحامل بدون تزييت عملياً.

يبين الشكل (3) آلة الاختبار المستخدمة، وقد تم تثبيتها على مخرطة في مخبر آلات التشغيل لدراسة التآكل عند سرعات مختلفة.



شكل (3): جهاز الاختبار مثبت على مخرطة

يتم السماح للمحمل للعمل بظروف جافة ويتم خلال هذه الفترة قياس التآكل تحت تأثير عدة أحمال وزمن وسرعة انزلاق ثابتة.

تؤخذ العينة من الحامل وتوزن بعد الاختبار (توزن قبل الاختبار) على ميزان حساس بدقة 0.1mg (Mettler) تحت نفس الظروف حتى نهاية الاختبار، ثم يحسب الفرق بين وزن العينة قبل وبعد كل اختبار وهو ما يعبر عنه بنسبة التآكل.

#### المؤشرات الأساسية:

سرعة الانزلاق ثابتة: 0.11 م/ثا

الحمل المطبق : 5، 10، 20، 30 نيوتن.

زمن الانزلاق ثابت: 50 دقيقة.

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

حجم حبيبات مادة التدعيم 0.4 مم، 0.8 مم، و 1.5 مم.

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 وبعد الاختبار

$\rho$  - كثافة المادة

$t$  - زمن الاختبار

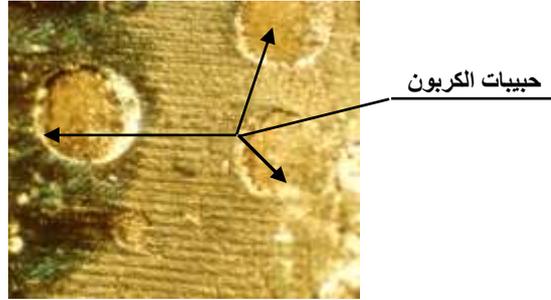
#### النتائج و المناقشة:

**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:

#### التآكل في مركبات إيبوكسي/كربون:

العينات المختبرة كانت من مادة الإيبوكسي بشكل حر (Pure) بالإضافة لمركباته التي تحتوي على 5 نسب من مادة التدعيم (حبيبات الكربون) وهذه النسب هي: (2%، 5%، 10%، 15%، 20%). و يبين الشكل (4) توزيع حبيبات الكربون على سطح العينة بعد تصويره بمجهر إلكتروني بتكبير جيد.



شكل (4): توزيع حبيبات الكربون في عينات الإيبوكسي

نتيجة لدراسة تأثير عناصر التدعيم على اختبارات نمط التآكل فإننا طبقناها لدراسة تغير نسبة التآكل مع زمن الانزلاق تحت حمل انزلاق متغير وأحجام مختلفة لحبيبات الكربون لمعرفة مدى تأثير هذا المؤشر. وأيضاً، هدفت هذه الاختبارات إلى التعرف على نمط التآكل لهذه المركبات.

تم إنجاز الاختبارات عند أحمال متغيرة، وعند سرعة انزلاق ثابتة هي  $0.11m/s$  مع زمن انزلاق ثابت 50 دقيقة.

ولقد أجريت بعد الاختبار صور لسطح العينات كافة. وتم فحص سطح المادة المركبة لدراسة نمط (ميكانيزم) التآكل خلال زمن الانزلاق الكلي.

تشكلت بودة جافة بيضاء من الكربون نتيجة لتآكل هذه المواد المركبة، وهي تدل على حدوث ما يسمى بالتآكل الحات (3-body). وهذه البودة تشبه سلسلة من حبيبات الكربون تلتصق بالعمود ثم تزال منه بسهولة، كما في الشكل (5).



شكل (5): البودة المتشكلة نتيجة تآكل سطح مركبات الإيبوكسي/كربون

في البداية كان نموذج التآكل التصاقاً ثم بعد أن نتجت هذه السلسلة من البودة أصبح حات abrasive . هذه تسبب شروخاً بالطبقة الداخلية لمركبات إيبوكسي/كربون. إن ارتفاع درجة الحرارة نتيجة الاحتكاك زاد من الشروخ

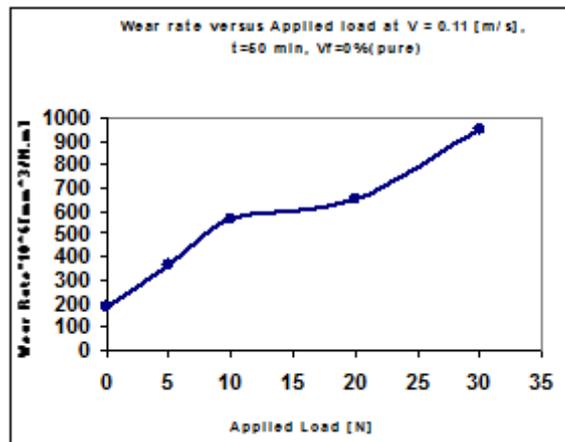
وعمقها، إضافة لظهور رائحة ناتجة عن انصهار هذه المركبات، لأن الحرارة زادت عن الحد الذي تتحملة هذه المركبات، فتصبح بالحالة اللدنة، ثم تعود لتتصلب بعد أن تبرد (بعد عدة دقائق).

بالبدائية يزداد التآكل بسرعة لأن التماس يكون كاملاً على الأسطح كافة.

تبين جميع الأشكال أنّ التآكل يزداد مع الحمل تحت الظروف غير الجافة، مع عدم وجود منطقة غير ثابتة في مخطط التآكل. مع استمرار الاختبار يزداد الوزن المزال من العينة في المنطقة الثانية، وفي النهاية يزداد التآكل بشكل سريع وبقيمة كبيرة حتى نهاية التجربة.

في المرحلة الأولى من التآكل عندما يكون التماس كاملاً بين المعدن والمادة البوليميرية المركبة يبدو السطح مشققاً ومخدداً. وهذا يعطي ارتفاعاً بفقدان حبيبات الكربون والتي تأتي بين الجسمين المحتكين وتبدأ بحك السطح على كامل طوله مسببة تحدد وتشقق. هذه الحبيبات الحاكة تعطي ارتفاعاً لفقدان أكثر لحبيبات الكربون وبأطراف حادة. في نهاية المرحلة الأولى تصبح الحبيبات المزالة بحجم أصغر تتشكل وتنتشر بين السطحين المتماسين. عند تشكل الحبيبات الصغيرة الحجم وانتشارها بين السطحين تتكون طبقة رقيقة الثخانة من الحبيبات، والتي تسبب تقريباً الفقدان بالوزن في المرحلة الثانية من مخطط التآكل.

يبين الشكل (6) تزايد التآكل مع الحمل بازدياد الحمل من 0 إلى 30 N تحت سرعة انزلاق  $0.11\text{ m/s}$  وزمن 50 دقيقة لعينات لا تحوي على مادة التدعيم (أي إيبوكسي بشكل حر). إنّ نسبة التآكل تزداد بشكل كبير بزيادة الحمل في المرحلة الأولى من عمر العينة، ولكن عند حمل  $(10 \div 20\text{ N})$  تصبح الزيادة شبه ثابتة تقريباً أي يمر التآكل بمرحلة (Steady state)، ثم تزداد بشكل حاد مرة ثانية وبنسبة كبيرة خلال زمن أطول من المرحلة الأولى تحت تأثير الحمل الأكبر لقيمة أعلى من  $22\text{ N}$ .



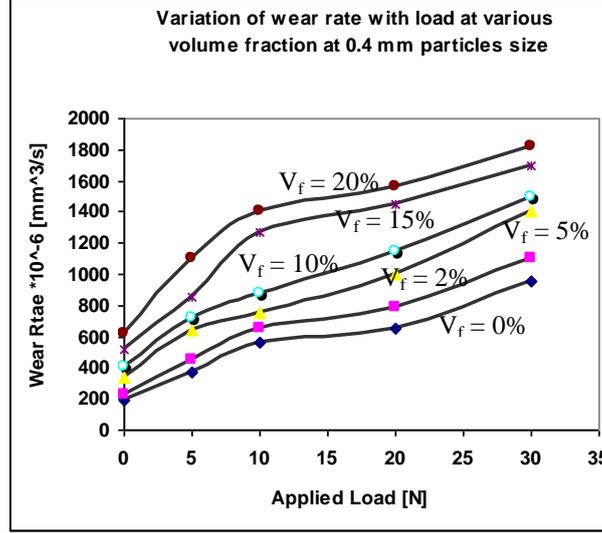
شكل (6): تأثير الحمل على نسبة التآكل لمادة الإيبوكسي الحر

يبين الشكل (7) تزايد التآكل مع الحمل تحت تأثير نسب مختلفة لمادة التدعيم (حبيبات الكربون) من 0% حتى 20% بحجم 0.4 مم.

نلاحظ أنّ مخططات التآكل متقاربة مع بعضها للنسب المختلفة الصغيرة لمادة التدعيم وكذلك الإيبوكسي بشكل حر، ولكن المخططات تتباعد وتكون نسبة التآكل متزايدة أكثر عند النسب العالية من الكربون (15 و 20%). والمخططات (الإيبوكسي الحر والنسبة المنخفضة لحبيبات الكربون 2%) تكون متقاربة جداً وبنفس الميل ويلاحظ وجود منطقة صغيرة يكون فيها ازدياد نسبة التآكل شبه ثابتة، بينما في النسب الأعلى (5 و 10%) نلاحظ

عدم وجود هذه المنطقة (Steady-State)، حيث أن قيمة التآكل تزداد ولكن بميل أقل من المنطقة الأولى ثم يزداد بحدّة حتى نهاية الاختبار (من حمل 22 نيوتن حتى نهاية الاختبار).

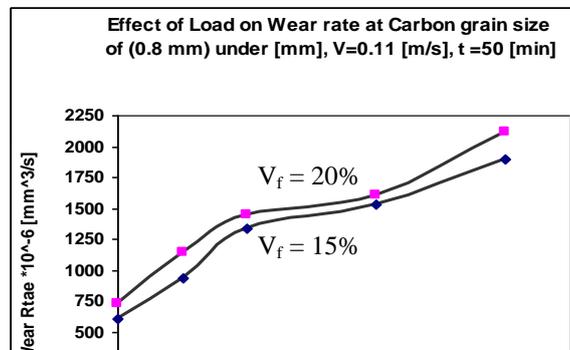
بينما عند النسب العالي (15 و 20%) يمر مخطط التآكل بمراحله الثلاثة ويمر بمرحلة ازدياد نسبة تآكل ثابتة بين الحمل 10 نيوتن و 20 نيوتن.



شكل (7): تأثير الحمل على نسبة التآكل لمركبات الإيبوكسي بحبيبات كربون بقطر 0.4 مم وبنسب مختلفة من مادة التدعيم

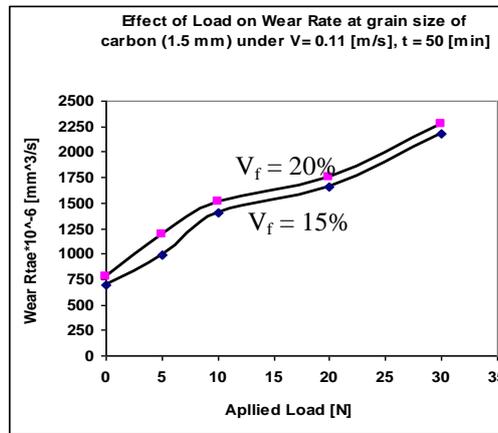
يبين الشكل (8) تزايد التآكل مع الحمل تحت تأثير نسب عالية لمادة التدعيم (حبيبات الكربون) 15% و 20% وذلك بحجم 0.8 مم.

نلاحظ أن مخططي التآكل متسايران مع بعضهما في مراحله الثلاثة و نسب ازدياده تحت تأثير الحمل المطبق، حيث يمر في البداية بمرحلة Running-in حيث تكون نسبة ازدياد التآكل كبيرة في هذه المرحلة حتى الحمل 10[N]، بعدها يمر المخطط بالمرحلة الثانية Steady- State حيث تكون نسبة ازدياد التآكل ثابتة تقريباً حتى الحمل 22[N] و هنا 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 للقيمة الأعلى.



شكل (8): تأثير الحمل على نسبة التآكل لمركبات الإيبوكسي بحبيبات كربون بقطر 0.8 مم و بنسب عالية من مادة التدعيم

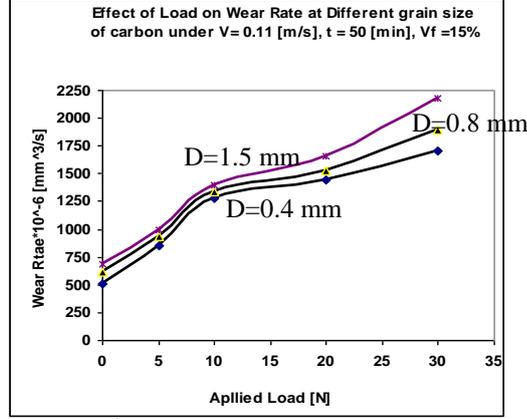
يبين الشكل (9) تغير قيمة التآكل مع الحمل تحت تأثير نسب عالية لمادة التدعيم (حبيبات الكربون) 15% و 20% و ذلك بحجم 1.5 مم. نلاحظ أنّ مخططي التآكل متسايران مع بعضهما في مرحلته الثلاثة ومتقاربان كثيراً، حيث يمر في البداية بمرحلة Running-in حيث تكون نسبة ازدياد التآكل بشكل كبير خلال فترة قليلة من الزمن وتحت تأثير أحمال صغيرة. ثم يمر المخطط بالمرحلة الثانية Steady- State حيث تكون نسبة ازدياد التآكل شبه ثابتة وأكثر مما كانت عليه بالنسبة لحجم حبيبات مادة التدعيم (كربون) حتى الحمل  $22[N]$  وهنا يتقارب المخططان أكثر من المرحلة الأولى. في المرحلة الثالثة تزداد نسبة التآكل بشكل أكبر من المرحلة الأولى ويكون ميل المخططين بشكل متوازٍ تماماً.



شكل (9): تأثير الحمل على نسبة التآكل لمركبات الإيبوكسي بحبيبات كربون بقطر 1.5 مم و بنسب عالية من مادة التدعيم

يبين الشكل (10) تغير نسبة التآكل باستخدام أحجام مختلفة لحبيبات مادة التدعيم (0.4، 0.8، و 1.5 مم) عند نسبة عالية من هذه المادة (15%) و ذلك تحت تأثير الحمل المطبق المتغير من الحمل الميت dead load حتى الأحمال العالية (30 نيوتن). نلاحظ أنّ المخططات الثلاثة تمر بالمرحلتين الأولى Steady- State و الثانية State قليلة ومرحلة التعب (ازدياد نسبة التآكل بشكل حاد).

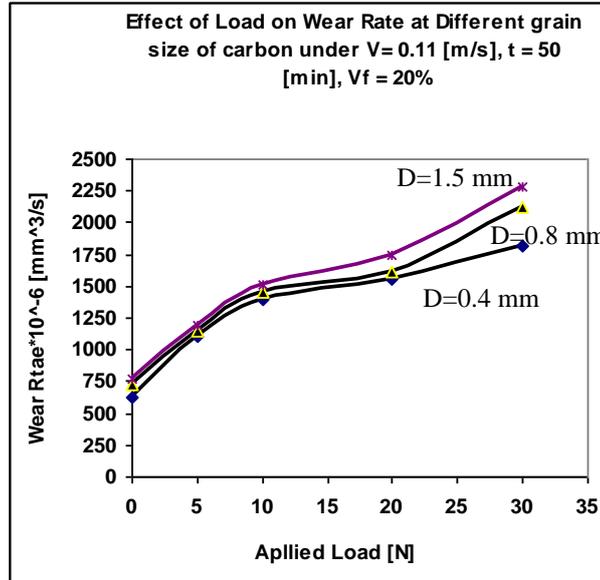
نلاحظ أيضاً أن الخطوط الثلاثة تكون متقاربة ومتساوية، وكذلك نلاحظ أن المخططات الثلاثة تتقارب بشكل كبير تحت تأثير الحمل من  $\{7N\}$  وحتى  $13N$ ، ثم تتباعد الخطوط الثلاثة حيث تكون نسبة ازدياد التآكل أكبر كلما كان حجم حبيبات الكربون المستخدمة أكبر.



شكل (10): تأثير الحمل على نسبة التآكل لمركبات الإيبوكسي بحبيبات كربون بأقطار مختلفة وعند نسبة 15% من مادة التدعيم

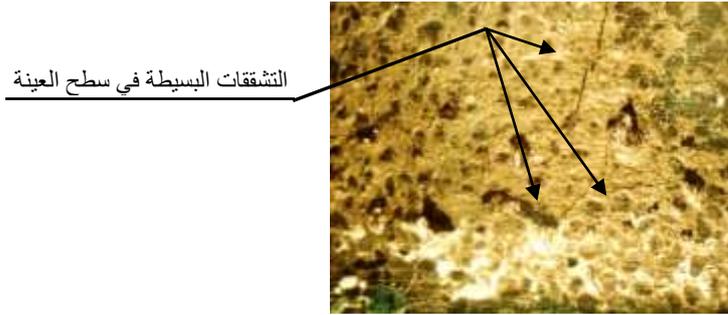
يبين الشكل (11) تأثير حجم حبيبات مادة التدعيم (الكربون) على تغيير نسبة التآكل تحت تأثير الحمل وثبات الزمن و سرعة الانزلاق.

نلاحظ أن الخطوط الثلاثة متقاربة بشكل كبير (بحالة استخدام 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  $5N$ . في مرحلة الـ steady-State تكون نسب التآكل متساوية لحجم الحبيبات (0.4 و 0.8 مم)، بينما تزداد قيمة التآكل أكثر ويتباعد خطه بميل أكبر عند الحجوم الكبيرة لحبيبة مادة التدعيم (1.5 مم).

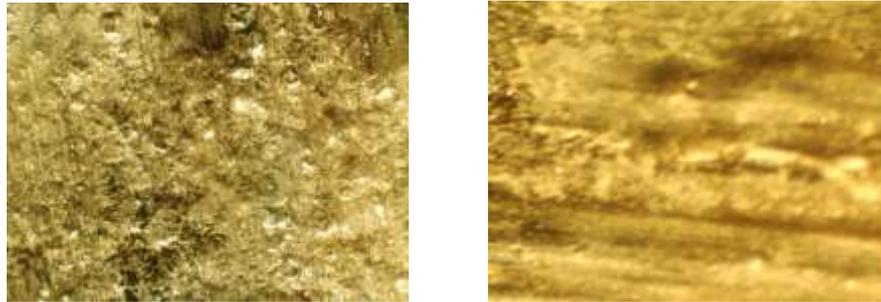


شكل (11): تأثير الحمل على نسبة التآكل لمركبات الإيبوكسي بحبيبات كربون بأقطار مختلفة وعند نسبة 20% من مادة التدعيم

تبين جميع المنحنيات أنّ التآكل يزداد مع الحمل. تحت ظروف عدم تشحيم يوجد طبقة غير ثابتة من التآكل بالمرحلة الأولى. ومع استمرار التجربة يزداد التآكل بالمرحلة الثانية بشكل بسيط أي تكون هذه المرحلة مرحلة شبه ثابتة لازدياد نسبة التآكل، وأخيراً يزداد بشكل حاد حتى نهاية (الاختبار) التجربة. 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 (12)، وهذا النوع من التآكل هو تآكل التصاق يبين أثره بالتصوير بشكل خطوط مستقيمة متوازية (تحدد)، كما في الشكل (13).

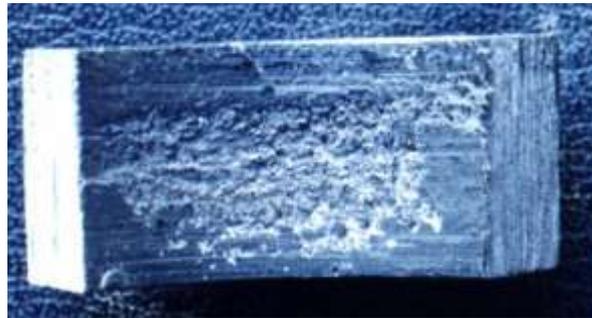


شكل (12): التشققات في العينة بعد المرحلة الأولى نتيجة التآكل السريع والكبير في المرحلة التحضيرية



شكل (13): ميكانيزم تآكل الالتصاق

هذا يعطي ارتفاع بفقدان الحبيبات الكربون والتي تأتي بين سطحي التماس للمادتين، وهذا الفقدان عند سطح التماس يبدأ يحك سطح المادة المركبة على طوله مع تحفير السطح وهذا يسمى تآكل حات أو تآكل احتكاك بين ثلاثة أجسام (المعدن والعينة والحبيبات المتشكلة بينهما) "3-body"، كما في الشكل (14).



شكل (14): 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

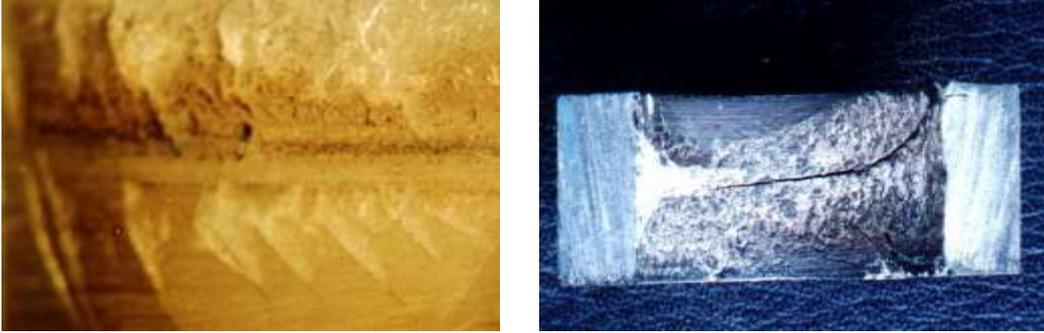
وانتشارها بين سطوح التماس، يبدأ تشكل طبقة بثخانة منتظمة من الحبيبات والتي تسبب تقريباً فقدان بالوزن بالمرحلة الثانية من 10N إلى 20N .

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

عند الأزمنة القصيرة (50 دقيقة) 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  $V_f$  عالي لها تآكل أكبر بكثير.

في المرحلة الثانية، تزداد نسبة التآكل مع الحمل وحجم حبيبات الكربون ولكن بنسبة أقل لغاية نهاية المرحلة الثانية عند الحمل  $22[N]$ ، أي أن النسبة تستقر وتبقى ثابتة حتى بداية المرحلة الثانية. إن حبيبات الكربون تصبح أصغر حجماً بنتيجة 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 فقدان ثابت بالوزن تقريباً. مع استمرار الاختبار تبدأ الشروخ بالتشكل نتيجة تركيز الاجهادات 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 (15).



شكل (15): ميكانيزم تآكل الكلل

وفي هذه المرحلة تظهر فراغات بين الحبيبات وهذه الفراغات تزداد عند العينات مع 20%  $V_f$  والتي تسبب زيادة نسبة التآكل أكثر منها في العينات عند نسب منخفضة لـ %  $V_f$  لكل العينات مع حجم حبيبات الكبيرة لمادة التسليح.

يعطي الـ  $V_f$  الأعلى من الكربون بالمادة المركبة تشقق أقل وتحفر أقل وفقدان الحبيبات القليل، ولكن تعطي النتائج العكس عند استخدام حبيبات كربون بأحجام أكبر حيث تصبح التشققات أكثر والفراغات أكبر.

### الاستنتاجات والتوصيات:

- من خلال المعطيات والملاحظات التجريبية، فقد 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 الكال.
  - 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.

ونوصي باستخدام نسب قليلة لمادة التدعيم (حبيبات الكربون) والحجم الأصغر لها ليضمن التجانس في مركبات هذه المواد واستخدامها في التطبيق العملي ولاسيما في المكابح والمحامل المستخدمة في الآلات الغذائية لتعطي أقل قيمة للتآكل

## المراجع:

- 1- KURDIEH, M. N., *Wear Properties of Polymeric Composites for Oilless Bearings*, Master of Science, Production and Design Engineering, Alexandria- Egypt, 1999.
- 2- KURDIEH, M. N. and Dayob, M.S., *The Effect of Volume Fraction of Carbon Particle-Reinforced Epoxy 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- SHAIN, Y. and MURPHY, S., *Wear performance of Aluminum Alloy Composites Containing Unidirectionally Oriented Silicon Carbide Boron Fibers*, *Wear*, 197, 1996, 248-254.
- 5- 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.
- 6- 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.
- 7- ALI, W.Y., *Friction Behaviour of Composite Material*, *Metall 51 Jahrgang*, (1997), 324-329.
- 8- 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.
- 9- SRIVASTAVA, V.K. and PATHAK, J.P., *Wear and Friction Characteristics of Mica-Filled Fiber-Reinforced Epoxy Resin Composites*, *Wear*, 152 (1992), 343-350.
- 10- 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.
- 11- TEVRUZ, T., *Tribological Behaviour of Bronze-Filled Polytetrafluoroethylene Dry Journal Bearings*, *Wear*, V 230, No. 1, May 1999, 61-69.
- 12- 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.
- 13- 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.
- 14- HEH-WON CHANG, *Wear Characteristics of Composite: Effect of Filler Orientation*, *Wear*, 85 (1983), 81-91.
- 15- PASCOA, M. W., *Plain an Filled Plastics Materials in Bearing: a review*, *Tribology*, Vol. 6, No. 5, (1973), 184-190.
- 16- SUNG, N. H., and SUH, N. p., *Effect of Fiber Orientation on Friction and Wear of Fiber Reinforced Polymeric Composites*, *Wear*, Vol. 53, (1979), 129-141.