

تأثير سرعة وزاوية الصدم على سلوك التعرية للمواد البوليمرية المترابطة

عبدالحق عبدالقادر حامد**
abdulhaqqhamid@yahoo.com

احمد وليد خالد*
awk_meceng@yahoo.com

* طالب ماجستير، قسم الهندسة الميكانيكية، جامعة الموصل، موصل/العراق.
** قسم الهندسة الميكانيكية، جامعة الموصل، موصل/العراق.

تاريخ القبول: 2020-1-19

تاريخ الاستلام: 2019-10-13

الخلاصة

نظراً للتأثير الملحوظ لظاهرة التعرية ودخولها في كثير من التطبيقات الهندسية والصناعية، فمن هنا أتت أهمية دراسة التعرية وبالأخص عاملي سرعة الصدم وزاوية الصدم وذلك لتأثيرها الواضح على ظاهرة التعرية. فتم صناعة جهاز فحص التعرية حسب مواصفات (ASTM G76)، وصناعة جهازي تدوير قوالب الصب وتفرغ الهواء، وصناعة نماذج البولستر الغير المشبع ومتراكباته المعززة بنوعين من المواد المعززة (خبيبات كربيد السيليكون (SiC) والألياف الزجاجية) بنسبة (5 wt.%) و(44 wt.%) على التوالي. وتم دراسة عاملي سرعة الصدم (3.3, 25.2 m/s) وزاوية الصدم (30°, 60° and 90°) المؤثرة على عملية التعرية. ومن النتائج المستحصلة يلاحظ أنّ سلوك البولستر هو سلوك هش وسلوك متراكباته يكون شبه مطيبي، وأن أقصى معدل تعرية للبولستر يكون عند زاوية صدم (90°) وأقصى معدل تعرية لمتراكبات البولستر تكون عند زاوية صدم (60°). وأنخبيبات كربيد السيليكون حسنت من مقاومة البولستر النقي للتعرية عند زاوية الصدم (30°, 90°) لكن عند الزاوية (60°) خفضت من مقاومة البولستر النقي للتعرية، أمّا الألياف فرفعت من معدل تعرية البولستر عند جميع الزوايا المدروسة. ويلاحظ أنّ العلاقة بين سرعة الصدم ومعدل التعرية علاقة طردية وأن تأثير زيادة السرعة على زاوية الصدم (60°) أكبر من تأثيرها على الزاويتين (30°, 90°).

الكلمات الدالة:

بولستر غير المشبع (UP)، خبيبات كربيد السيليكون، ألياف زجاجية، معدل التعرية، سرعة الصدم، زاوية الصدم.

<https://rengj.mosuljournals.com>
Email: alrafidain_engjournal1@umosul.edu.iq

1- المقدمة

آلية التعرية بالخبيبات الحاكة بصورة واضحة في الكثير من التطبيقات مثل الأنابيب الناقلة لموائع محملة بخبيبات صلبة، أو في تطبيقات أخرى مثل أجنحة الطائرات وأغلب أجزاء طائرات الدرون وريش توربينات الماء وأجزاء السيارات والمركبات.

في العصر الحالي، بدأت المواد الهندسية المترابطة والتي أساسها المادة البوليمرية (composite materials) تأخذ مكان المواد المعدنية في العديد من التطبيقات، وخصوصاً فيما يتعلق منها بالطائرات والفضاء وذلك لخفة وزنها وسهولة تصنيعها. فبدأت المواد المترابطة تلاقي اهتماماً واسعاً من

تُعد ظاهرة التعرية (erosion) أحد أنواع الفشل للمواد الهندسية والتطبيقية وهي أحد أنواع البلى (wear). وتعد التعرية بالخبيبات الحاكة (Solid Particle Erosion - SPE) أحد أكثر أسباب الفشل الحاصل نتيجة الفشل بالتعرية [1]. والبلى حالة غير مرغوب فيها حيث تقلل من موثوقية الأجزاء والمعدات الهندسية والصناعية مما يؤثر سلباً على التكلفة من حيث كلفة الخسائر والصيانة المستمرة وهذا يؤدي الى تقليل الإنتاجية والأخطر من هذا هو حصول انهيار للأجزاء أو المعدات نتيجة البلى، وكذلك من الممكن حدوث خسائر بشرية بعد ذلك. وبالرغم من الأبحاث العديدة في هذا المجال إلا أنّ الفشل مازال يحدث في معظم الأجزاء والمعدات [2] وخطورة البلى تكمن في عدم ظهوره للعيان في بعض الأجزاء المتداخلة [3]. وتظهر

البوليمرات المعززة بالألياف نقل مقاومتها للتعرية. كما قام الباحثان (Yogesh and Hari 2016) [5] بعمل مراجعة عن استجابة المواد البوليمرية المعززة بالألياف والخبيبات للتعرية، حيث بينا أن إضافة الألياف تزيد من هشاشة المتراكب مما يقلل من مقاومته للتعرية.

أما دراسة التعرية للمتراكبات المعززة بالخبيبات فأجريت عليها بحوث ولكنها تكاد تكون قليلة مقارنة مع بحوث التعرية للمتراكبات الهجينة والمعززة بالألياف. فقد قام الباحثون (Zhenlin Lu, et al. 2010) [12] بدراسة سلوك متراكب مكون من إيبوكسي معزز بخبيبات كربيد السيليكون بأحجام مختلفة (14, 80, 120, 250 and 600 μm) حيث تمت دراسة المتراكب تحت تأثير التعرية، ووجدوا أن أعلى معدل تعرية كان عند زاوية صدم (60°)، كما أن الخبيبات المعززة تحسن من مقاومة التعرية والبلية السطحي للمتراكب، وفي براءة اختراع للمخترع (Oslen 2015) [13] حسن من مقاومة البلية لسطح رأس حفارة وذلك بطلاها بمتراكب مكون من مسحوق لمادة صلدة مع مادة بوليمرية رابطة.

إن إضافة الخبيبات المعززة السيراميكية الصلدة تحسن من صلادة المتراكب مما يقلل من معدل التعرية إذ تكمن فائدة وجود الخبيبات المعززة أولاً في زيادة صلادة المتراكب وثانياً امتصاص الطاقة الحركية للخبيبات الحاكة [14]. إن الهدف من البحث هو دراسة تأثير سرعة الصدم عند القيم (33, 25.2, 30, 60 and 90 m/s) وزاوية الصدم عند القيم (30° , 60° and 90°) على عملية التعرية لمتراكبات البولستر الغير المشبع المعززة بكربيد السيليكون بنسبة (5wt.%) وألياف زجاجية بنسبة (44 wt.%) المصنعة مختبرياً.

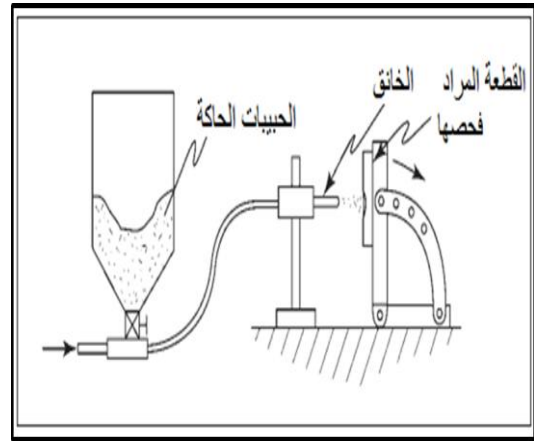
2- الجانب النظري

1.2- سلوك التعرية (Erosion Behavior)

إن سلوك المادة عند التعرية يصف نوع الفشل الذي يحدث للمادة أما بصورة مطيلية أو بصورة هشية، وزاوية التعرية القصوى (التي يكون عندها أقصى معدل تعرية) هي من تحدد نوع سلوك المادة [15]، فالمواد التي يكون أقصى تعرية لها عند الزوايا المنخفضة (30° – 15°) يعد سلوكها مطيلي (ductile) وطريقة تعريتها مشابهة لعملية بلى القشط (abrasion wear)

مهندسي التصميم مما دعى الى عمل بحوث ودراسات عنها، ثم أن المواد المتراكبة غزت حالياً قطاعات واسعة من المجالات الهندسية وغيرها من المجالات الزراعية والطبية. لذلك توجب الاهتمام بالمتراكبات البوليمرية ومعرفة كيفية استجابتها للتعرية سواء أكانت معززة بألياف أو بخبيبات، أو هجينة أو غيرها من مواد التعزيز المستخدمة لهذا الغرض، فضلاً عن ذلك تعد المواد البوليمرية أضعف من المواد المعدنية في مقاومة التعرية بنسبة تتراوح من مرتين الى ثلاث مرات، كما وأن المواد المتراكبة البوليمرية تُظهر سلوكاً أكثر تعقيداً عند الفشل والكسر [4]، ومن هنا تأتي أهمية دراستها وكذلك أن بعض من المواد المتراكبة تصبح أضعف في مقاومة التعرية مقارنة مع أرضيتها النقية [5].

وتعرف التعرية بالخبيبات الحاكة: هي عملية انتزاع لجزء من المادة المعرضة لخبيبات حاكة وحصول فقدان لكتلة المادة بسبب تأثير الخبيبات الصادمة لسطح المادة بطرف وشروط معينة [6][7]، فالشروط الواجب توفرها لحصول التعرية هو وجود خبيبات صلدة ووجود وسط مائع لحمل الخبيبات (سائل، غاز) وبسرعة كافية لحدوث قصف لسطح المادة [8]، والشكل (1) يوضح عملية التعرية بالخبيبات الحاكة.



شكل (1): طريقة فحص التعرية بالخبيبات الحاكة. [9]

أخذت المتراكبات البوليمرية المعززة بالألياف حيزاً كبيراً في مجال البحوث، وفي غالب البحوث كان تأثيرها سلبياً على مقاومة التعرية، حيث أثبت كل من (Takeda 1992 Miyazaki) [10] أن الألياف تقلل من مقاومة التعرية للمتراكب وأن معدل التعرية يزداد بزيادة نسبة الألياف. وكذلك لاحظ الباحثون (Mathias, et al. 1989) [11] أن

تظهر بسبب تجاوزها اثناء عملية الفحص [22]، والوصول الى مرحلة الحالة المستقرة (steady state) يتغير بتغير نوع المادة المعرضة للصدم أو بتغير ظروف الفحص حيث تزداد سرعة الوصول اليها بزيادة سرعة الصدم عند جميع زوايا الصدم [25]. فترة الحضانة لا تظهر عند السرعة العالية، تقريباً اعلى من 24 (m/s) [23]، كما وجد أن المواد عالية المطيلية مثل بولي ايثيلين (polyethylene) والبولي بروبيلين (polypropylene) تمتلك فترة حضانة قبل أن يستقر معدل التعرية، بينما المواد الهشة مثل البولستيرين (polystyrene) لا تمتلك فترة حضانة [24].

3- الجانب العملي

1.3- المواد المستخدمة

تم استخدام راتنج البولستر غير المشبع كمادة أرضية للمتراكب، وتم اختيار حبيبات كربيد السيليكون كمادة معززة للمتراكب الأول، اما المتراكب الثاني فتم اختيار الألياف الزجاجية (E - glass) كمادة معززة.

البولستر غير المشبع: هو مادة بوليمرية راتنجية من نوع البوليمر المتصلد حرارياً [25]. يتكون البولستر غير المشبع من كلايكون وحامض ويتم اختيارهما حسب المواصفات المراد الحصول عليها [26]. والجدول (1) يبين مواصفات البولستر المستخدم والمصنعة من شركة (TURKUAZ POLYESTER) التركية من نوع (TP100)، والجدول (2) يبين مواصفات كربيد السيليكون المستخدم المصنع من شركة (Avonchem) البريطانية. والجدول (3) يبين مواصفات الألياف المستخدمة والمصنعة من قبل شركة (BDL) الصينية.

جدول (1): قيم ومواصفات البولستر حسب الشركة المصنعة.

الخاصية	قيمتها أو وصفها
الكثافة	1.15 – 1.20 g/cm ³
اللزوجة	350 – 500 cp
نسبة المونومر	31 – 36 wt.%
نوع الحامض	اورثوفثاليك (orthophthalic)
نوع الكلايكون	كلايكون قياسي

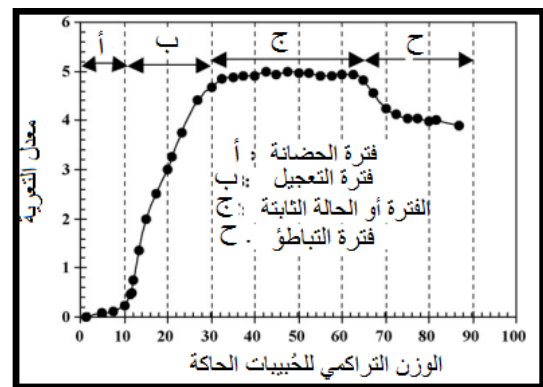
[4][16]، أما المواد التي يكون أقصى تعرية لها عند الزاوية (90°) فيعد سلوكها هشاً (brittle) [17]، والمواد التي يكون أقصى تعرية لها عند الزوايا (45°-60°) يعد سلوكها شبه مطيلي (semi ductile) [18][19]. ويتم حساب معدل التعرية من حاصل قسمة كتلة المادة المفقودة الى كتلة المادة الحاكة (الحبيبات) [20] وكما مبينة المعادلة التالية:

$$E = (\text{removed mass} / \text{total mass of particles impinging}) \dots (1)$$

2.2- الحالة المستقرة (Steady State)

هي الحالة التي يكون عندها معدل التعرية ثابت تقريباً أثناء عملية التعرية، وتعد منطقة مهمة لأن فترة التعرية الفعلية تكون ضمن هذه المنطقة، وتوصف بأنها الحالة التي تستقر عندها استجابة المادة للتعرية [21].

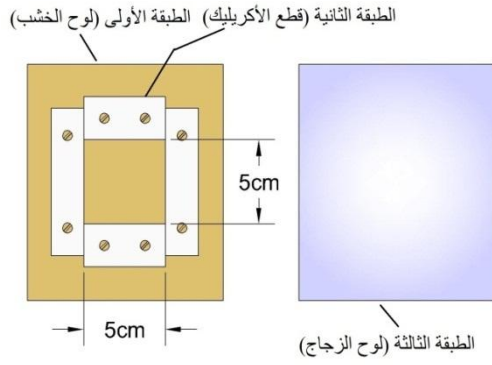
والشكل (2) يوضح مراحل التعرية، حيث تبدأ بفترة الحضانة (incubation period) وهي فترة قليلة لا يحدث عندها فقدان بالمادة وفي بعض الحالات يحصل زيادة بوزن القطعة المعرضة للصدم اذا كانت المادة مطيلية كما في الالمنيوم، إذ تتغرس حبيبات الحك بسطح المادة المطيلية مما يضيف وزناً الى وزن المادة الأصلي، ثم فترة التعجيل (acceleration period) عندما تحصل زيادة سريعة بمعدل التعرية الى أن تصل قمة التعرية، وعند الوصول الى قمة معدل التعرية تعرف هذه المنطقة أو الحالة بالحالة المستقرة (steady state) وبعد ذلك تأتي فترة التباطؤ (deceleration period).



الشكل (2): المنحنى النموذجي لسلوك التعرية للمواد البوليمرية.

[22]

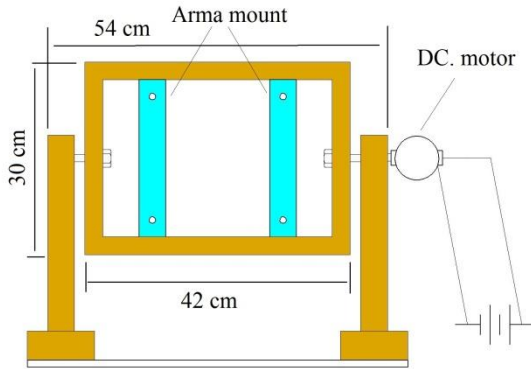
هذه الفترات ليس من الضروري أن تظهر جميعها أثناء دراسة معدل التعرية، وفي بعض الحالات لا تظهر اصلاً كما في المواد الهشة إذ لا تظهر فيها فترة الحضانة أو احياناً لا



شكل (3): رسم تخطيطي يوضح قالب الصب وابعاده.

2.2.3 - جهاز التدوير (Rotational Rig)

تم صناعة وتركيب جهاز التدوير مختبرياً، لغرض تدوير قالب الصب للمترابك الحبيبي ومحاولة عدم ترسب حبيبات كربيد السيليكون على جهة واحدة من القالب اثناء عملية التصلب. كما موضح في الشكل (4).



شكل (4): رسم تخطيطي لجهاز التدوير يوضح المساند واذرع تثبيت قالب الصب.

3.2.3 - جهاز تفريغ الهواء (Vacuum Rig)

تم صناعة جهاز تفريغ الهواء مختبرياً، لغرض عمل تفريغ للهواء (vacuum) للتخلص من فقاعات الهواء المحصورة داخل الراتنج قبل عملية الصب، لأن جزءاً من الهواء يدخل اثناء عملية الخلط وصب الراتنج لذا لابد من التخلص من فقاعات الهواء قدر الإمكان لأنها تضعف من خواص المترابك.

جدول (2): قيم ومواصفات كربيد السيليكون حسب الشركة المصنعة.

الخاصية	قيمتها
نسبة كربيد السيليكون	98.5 – 99.4 wt. %
نسبة Fe_2O_3	0.05 – 0.1 wt. %
الكثافة	3.2 g/cm ³
صلادة (Mohs)	9.15
قطر الحبيبة	150–210 μ m

جدول (3): مواصفات الألياف المستخدمة حسب الشركة المصنعة.

الخاصية	قيمتها أو وصفها
نوع الألياف	E – glass (MC450)
الكثافة	g/cm ³ 2.85

2.3 - الأجهزة والمعدات

1.2.3 - قالب الصب (Casting Mold)

تم صناعة قالب الصب مختبرياً على شكل نموذج بسيط سهل التصنيع والتجميع ومن مواد رخيصة الثمن، لغرض صناعة نماذج البولستر ومترابكات البولستر المعززة بحبيبات كربيد السيليكون، حيث يتكون القالب من ثلاث طبقات كما موضح في شكل (3)، الطبقة الأولى عبارة عن لوح خشبي، كما ويتم وضع صفيحة معدنية رقيقة مطلية بدهان ويطبقه بسيطة جداً من الزيوت المعدنية، بين لوح الخشب والراتنج المصبوب، والغرض منه لمنع التصاق مادة الراتنج بلوح الخشب وكذلك لتسهيل انتزاع المصبوبة من داخل القالب.

والطبقة الثانية عبارة عن اربع قطع من مادة الأكريليك الشفاف (transparent acrylic) أو الاسم العلمي (Poly methyl methacrylate – PMMA) بسمك (4 mm).

أما الطبقة الثالثة فهي عبارة عن لوح زجاجي سمكه (4 mm)، والغرض منه مقاومة الحرارة المتولدة والحصول على سطح صقيل وسهولة مراقبة المصبوبة من توزيع حبيبات كربيد السيليكون وغيرها. ويتم تثبيت ومسك القالب بماسكات حديدية.

4.3-عملية تحضير وقولبة المتراكب الليفي (The Process of Preparing and Molding of Fabric Composites)

في البداية، تم تحديد مساحة الألياف بأبعاد ورقة (A4)، حيث تم أخذ ست قطع من الألياف لعمل لوحة المتراكب، وُحددت نسبة الألياف حسب حاجة الدراسة وعلى أساسها تم اختيار نسبة البولستر المضاف، وقد تم اختيار نسبة للألياف (44 wt.%).

ثم حضرت منطقة قولبة المتراكب من خلال تجهيز لوح زجاجي ذي مساحة أكبر من مساحة الألياف المقطعة ثم دُهنّت بطبقة خفيفة جداً من الشمع. بعدها وزن مستويا للوح لتأكد من مستويا للوح موضوع بصورة أفقية بواسطة توراً نال مستوى (level)، ثم وضعت طبقة (PVC) الشفافة وبعدها سكب البولستر على الطبقة الشفافة بعد إضافة المصلد للبولستر ووزع البولستر بواسطة فرشاة دهان يدوياً، ثم وضعت الطبقة الأولى من الألياف ووضع بعدها البولستر مرة أخرى ووزع بصورة جيدة وتكرر العملية حتى النهاية، ثم وضعت في النهاية طبقة (PVC) الثانية ويوضع فوقها اللوح الزجاجي العلوي لضمان استواء السطح العلوي، ثم يترك القالب لمدة أكثر من (20) ساعة لضمان تصلبه بالكامل، وتدعى هذه الطريقة بالطريقة اليدوية (hand lay-up). ثم قطع لوح المتراكب بشكل قطع صغيرة (5*5 cm).

5.3-إجراء فحص التعرية

تم صناعة جهاز فحص التعرية محلياً حسب مواصفات ASTM G76 لتخمين مقدار التعرية الحاصل.

تتم معايرة الجهاز قبل البدء بعملية الفحص، ففي البداية نقوم بمعايرة سرعة الهواء التي ستعد هي نفسها سرعة الخبيبات الحاكة [30]، وتم حساب سرعة الهواء بالاعتماد على مقياس الضغط (pressure gage) وجهاز قياس سرعة الهواء (testo) ألماني المنشأ، موديل (416) والجدول (4) يبين مواصفات وخصائص مقياس السرعة. ووزنت القطعة المراد فحصها بميزان رقمي دقيق ذو ثلاث مراتب، ألماني المنشأ شركة (DENVER INSTRUMENT)، موديل (214). وسجلت قيمة

3.3-عملية تحضير وقولبة المتراكب الخبيبي (The Process of Preparing and Molding of Particulate Composites)

في هذه العملية تتم صناعة قوالب (عينات) البولستر ومتراكبه الخبيبي بأبعاد (5*5 cm) وسمك (4 mm)، حيث تبدأ بعملية التحضير وذلك بتجفيف كربيد السيليكون من الرطوبة العالقة بواسطة الفرن الكهربائي عند حوالي درجة حرارة (140°C) لمدة نصف ساعة، لأن الرطوبة تضعف من تلاحق الخبيبات بالراتج. ثم يتم تحضير راتج البولستر بأخذ الكمية المناسبة من خلال وزنها وإضافة المعجل (cobalt naphthenate-) $\text{CoC}_{22}\text{H}_{14}\text{O}_4$ للبولستر بحوالي (0.2 wt.%) من وزن البولستر الكلي، وتضاف الخبيبات بنسب (5 wt.%) من وزن الخليط السابق ثم يمزج الخليط جيداً، وسبب اختيار هذه النسب السابق ذكرها، هو توصل بعض البحوث الى ان تجاوز (SiC) حد نسبة (10 wt.%) يؤدي الى انخفاض بمعدل التعرية [27]، وفي بحث آخر اثبتت أنّ أفضل نسبة هي (6 wt.%) من مدى (1-9 wt.%) وكما أنّ النسبة العالية تؤدي الى لزوجة عالية مما يصعب من عملية الصب [28].

تمت صناعة المتراكبات حسب النظام (ASTM D5687/D5687M)، حيث يوضع الخليط داخل حجرة التفريغ الهوائي لمدة (25) الى (30) دقيقة لضمان خروج الهواء ثم يستخرج الخليط ويضاف إليه المصلد بنسبة (2wt.%) ثم يخلط المزيج بريشة المزج التي تكون على شكل مروحة صغيرة (impeller)، وتثبت الريشة برأس مثقب كهربائي لغرض تدويرها بزمن لا يتجاوز (5) دقائق [29]، ويتم تدوير الريشة بسرعة حوالي (270 to 332 rpm) حيث تكون سرعة مناسبة، وتمت العملية عند درجات حرارة الغرفة.

وبعد الصب توضع طبقة (PVC) الشفافة بصورة بطيئة جداً ثم يوضع اعلاها لوح الزجاج (الطبقة الثالثة) ومن بعدها يمسك القالب بالماسكات الحديدية. ويحمل ليثبت على جهاز التدوير ليترك يدور لمدة لا تزيد عن (10) دقائق. ثم يترك ليكتمل التصلب لمدة (12) ساعة بعد ذلك يكون قد أصبح جاهزاً للاختبار.

6.3- النتائج والمناقشة

1.6.3- معدل التعرية للبولستر النقي

الشكل (7) يوضح العلاقة بين وزن الرمل التراكمي ومعدل التعرية للبولستر النقي عند سرعة صدم (25.2 m/s) وزوايا صدم مختلفة (30°, 60° and 90°). حيث يلاحظ أن أعلى تعرية له تكون عند الزاوية (90°) وأقل تعرية عند الزاوية (30°), مما يدل على السلوك الهش للبولستر, حيث أن أغلب المواد المتصدلة حرارياً تظهر سلوكاً هشاً عند تعرضها للتعرية [32][15][33][34].

2.6.3- معدل التعرية لمترابكات كربيد السيليكون المعززة بنسبة (SiC5 wt.%)

والشكل (8) فيوضح العلاقة بينوزنالرملالتراكميومعدلاتعريهلمترابك كربيد السيليكون المعززة بنسبة (5 wt.%) المعرض لسرعة صدم (25.2 m/s) وزوايا صدم مختلفة (30°, 60° and 90°), فيلاحظ السلوك الشبه مطيبي للمترابك, حيث يتبين أن أعلى معدل تعرية يكون عند الزاوية (60°) وأن أقل معدل تعرية يكون عند الزاوية (30°) [12], ويعزى ذلك الى صلادة المترابك التي يظهر تأثيرها عند الزوايا المنخفضة. كما يلاحظ تقارب في معدل التعرية بين الزاوية (60°) والزاوية (90°) وذلك بسبب هشاشة المترابك وحدوث انخلاعات للحبيبات مما يزيد من معدل التعرية عند الزاوية (90°). فمن الصورة المجهرية الموضحة في الشكل (أ)-(12) حيث يلاحظ عند الزاوية (60°) حدوث قطع وكسر عند سطح حبيبة كربيد السيليكون, فعند تعرض الحبيبة الى صدم وقشط في ان واحد بسبب القوى المؤثرة المائلة بزوايا تعمل على قلع الحبيبة مما يسرع من عملية تعرية سطح المترابك. لكن في الشكل (ب)-(12) عند الزاوية (90°) فيلاحظ ان العملية السائدة هي عملية النقر (pitting) حيث يحدث صدم مباشر للحبيبة بدون تأثير القشط لذلك يعطي نوع من التأخير لأنخلاع الحبيبة مقارنة مع الزاوية (60°).

أما الشكل (9) فيوضح العلاقة بينوزنالرملالتراكميومعدل التعرية لمترابك معززة بحبيبات كربيد السيليكون بنسبة (5 wt.%) والمعرض لسرعة صدم (33 m/s) وزوايا صدم مختلفة (30°, 60° and 90°). فيلاحظ السلوك السابق نفسه مع زيادة بقيم معدل التعرية [35], وملاحظة اقتراب معدل التعرية عند الزاوية (90°) من معدل التعرية عند الزاوية (30°) مما يعطي مؤشراً لتأثير زيادة السرعة على معدل التعرية عند الزاوية (60°) بشكل أكبر مقارنة مع معدل التعرية

الوزن ثم ثبتت القطعة على منصة التثبيت وبعدها ضخ الهواء بالضغط المطلوب ثم تم التغذية بالرمل لمدة دقيقتين بمعدل (10 g/min), والجدول (5) يبين مواصفات رمل التعرية المستخدم, ثم وزنت القطعة مرة أخرى لحساب مقدار الفرق ومما يشار إليه يجب تنظيف القطعة بمادة الاسيتون للتخلص من الأتربة العالقة للوصول الى نتيجة أفضل, وتمت التجارب عند درجات حرارة الغرفة والجدول (6) يبين قيم العوامل المستخدمة في عملية الفحص الحالية.

الجدول (4): مواصفات وخصائص مقياس السرعة المستخدم بالبحث الحالي.

الخاصية	قيمتها أو وصفها
درجة حرارة العمل	<70 ° C
مدى السرعة الممكن قياسها	0.6 to 40 m/sec
الدقة (accuracy)	0.2 m/sec
الوزن	325 g
الأبعاد	40*64*182 mm

جدول (5): خواص رمل التعرية المستخدم في البحث الحالي.

الخاصية	قيمتها
التركيب الكيميائي	رمال سيليكات، حصى مسحوق (gravel)، أملاح، ثلاثي اوكسيد الكبريت (So ₃)
الأملاح	2.4 wt.%
ثلاثي اوكسيد الكبريت	0.30016 wt.%
الكثافة	g/cm ³ 2.727
الصلادة (Mohs)	[31]5-6
قطر حبيبات الرمال	350-500 μm

جدول (6): قيم العوامل والمتغيرات.

الخاصية	قيمتها أو وصفها
نوع الحبيبات الحاكة	رمال السيليكا
شكل الحبيبات الحاكة	غير منتظم
زوايا الصدم	(90°, 60°, 30°)
نسبة المعززة	5,لياف زجاجية % 44 كربيد السيليكون wt. %
سرعة الصدم	25.2 , 33 m/sec
معدل تغذية الرمل	[24] g10/min
فترة الفحص	كل دقيقتين

صدم (33 m/s) وزوايا صدم مختلفة (30° and 60° و90°)، فيلاحظ هنا السلوك السابق نفسه (أي المترابك عند الشكل (11)) يوضح العلاقة بين وزن الرمال التراكمي ومعدل التعرية المترابك (الأيافزجاجية 44 wt.% عند سرعة صدم (25.2 m/s)) مع ارتفاع بقيم معدل التعرية [37]. وتكون تعرية الألياف عند الزاوية (30°) بنتائج تكون حفر ثم حدوث انفصال للألياف وبعدها يتم نزع لليف والشكل (أ)-(13) يوضح تكون حفر صغيرة عند بدء التعرية والشكل (ب)-(13) يوضح حدوث انفصال للألياف بعد تكون الحفر، وعند الزاوية (60°) فالشكل (أ)-(14) يبين بدء التعرية بحفر نوعاً ما أكبر من تلك عند الزاوية (30°)، أما الشكل (ب)-(14) فيبين حدوث فصل لليف بشكل أسرع وأجزاء كبيرة من الليف مما يعطي معدل تعرية أكبر. وعند الزاوية (90°) فتحدث التعرية نتيجة الصدم المباشر للألياف مما يسبب كسر لها نتيجة لتأثير إجهاد الانحناء.

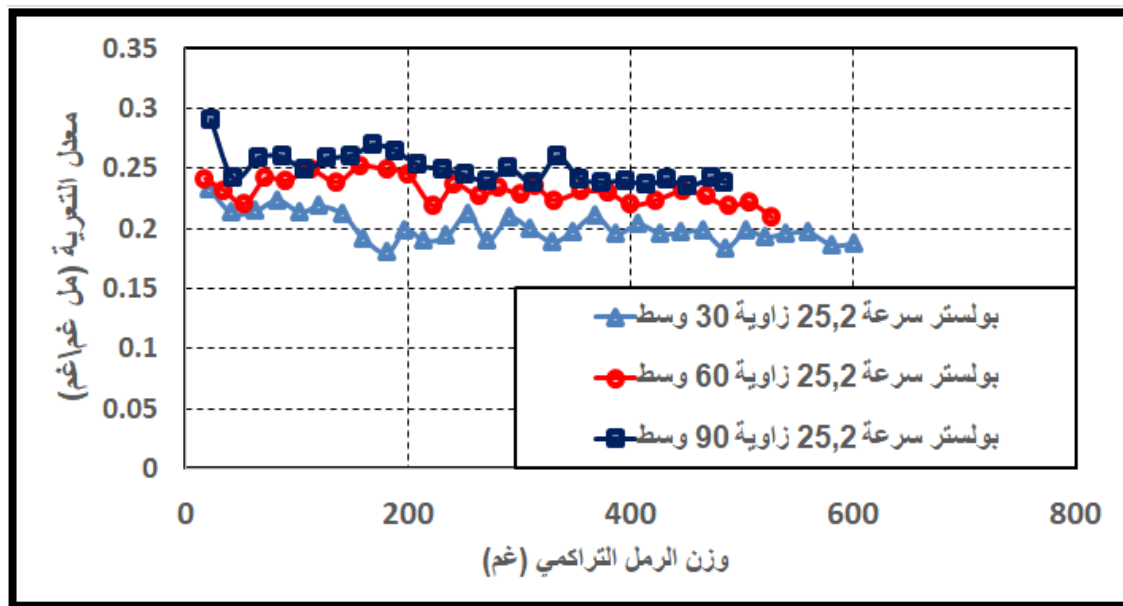
يلاحظ من مجموع الحالات السابقة أن معدل التعرية لمترابكات البولستر عند الزاوية (90°) يكون مرتفعاً مقارنةً مع الزاوية (30°) ما يدل على هشاشة المترابك.

عند الزاويتين (30°) و(90°). ويلاحظ أيضاً عند السرعة الأعلى يكون الوصول إلى الحالة المستقرة (steady state) بشكل أسرع.

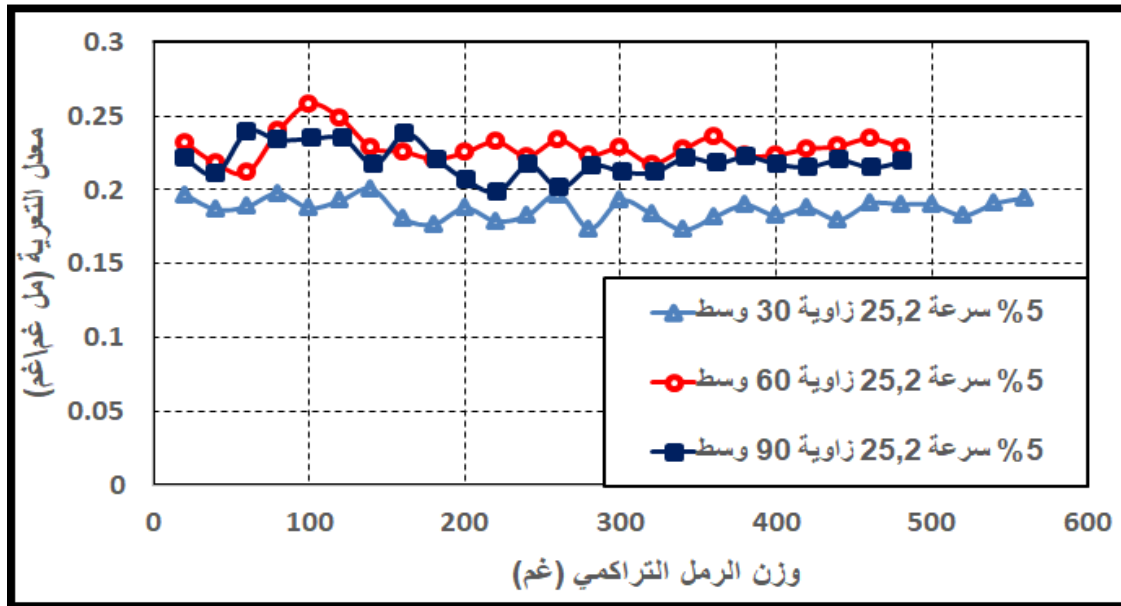
3.6.3- معدل التعرية لمترابكات الألياف الزجاجية المعززة بنسبة (ألياف زجاجية 44 wt.%)

وفي الشكل (10) يوضح المقارنة العلاقة بين وزن الرمال التراكمي ومعدل التعرية لمترابكات ذات (ألياف زجاجية 44 wt.% عند سرعة صدم (25.2 m/s) وعند زوايا صدم مختلفة (30°, 60° and 90°)، حيث يلاحظ أن أعلى معدل تعرية يحدث عند الزاوية (60°) [36] وأقل معدل تعرية يحدث عند الزاوية (30°) ما يدل على أن سلوك المترابك هو سلوك شبه مطيبي. ويلاحظ أحياناً حدوث انخفاض بمعدل التعرية وذلك بسبب حصول تصدق انفعالي للمنطقة المعرضة للصدم، لكن بعد عدة ضربات يحصل تفكك للألياف أو انخلاع لليف مما يسبب قفز في منحنى معدل التعرية.

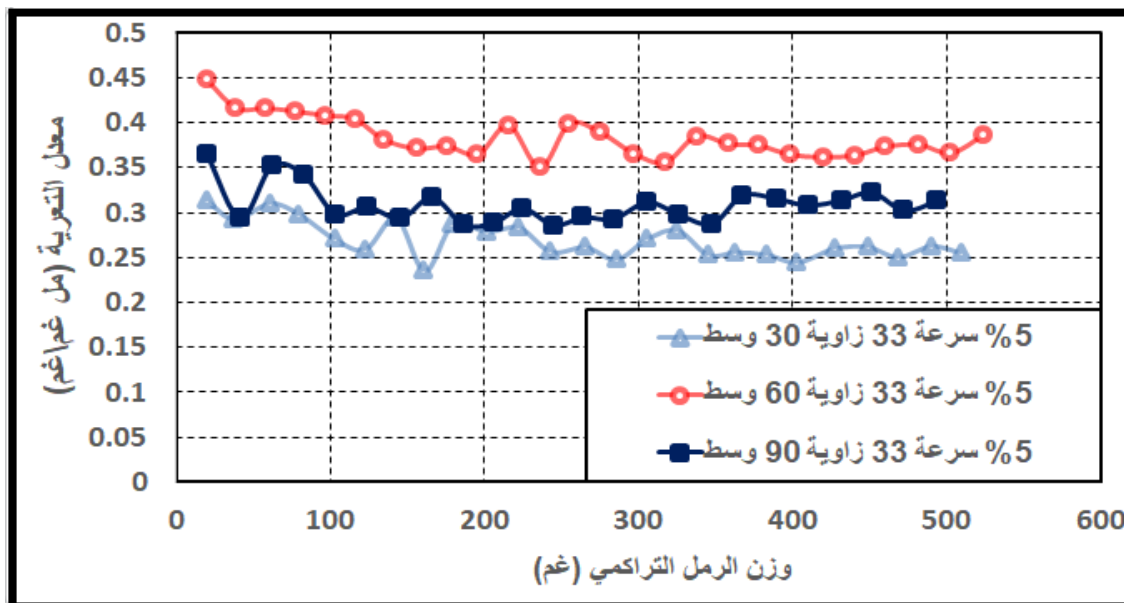
كما يلاحظ أن سرعة الوصول للحالة المستقرة (steady state) تكون عالية بالنسبة للمترابك عند الزاوية (60°) وقليلة للمترابك عند الزاوية (30°)، أي كلما كان معدل التعرية أعلى كلما كان وصوله إلى الحالة المستقرة بشكل أسرع.



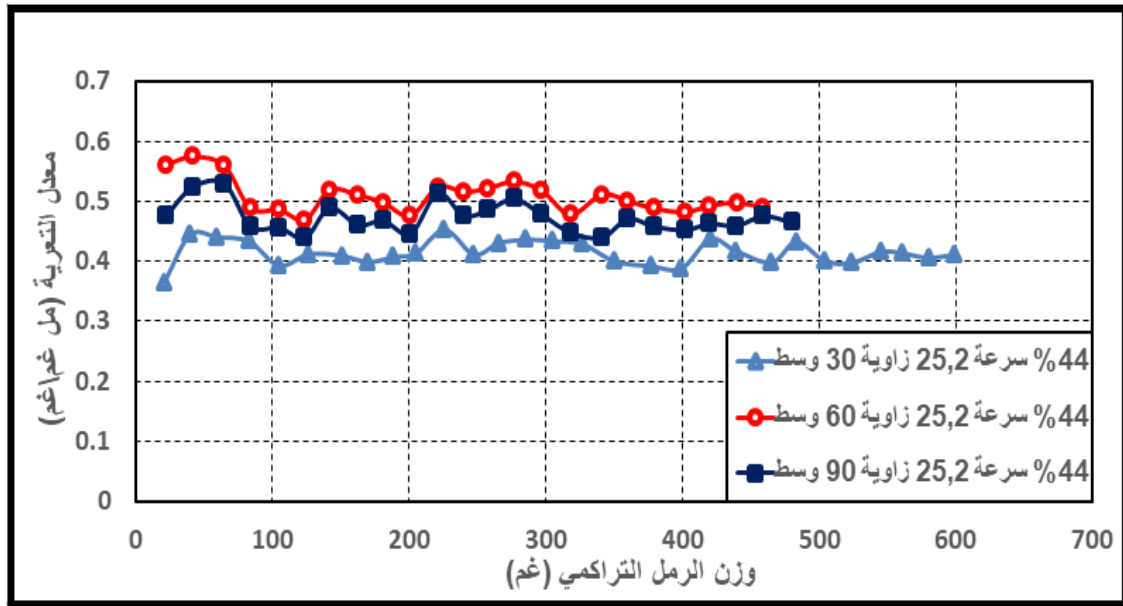
شكل (7): معدل التعرية للبولستر النقي عند سرعة صدم (25.2 m/s) وزوايا صدم مختلفة.



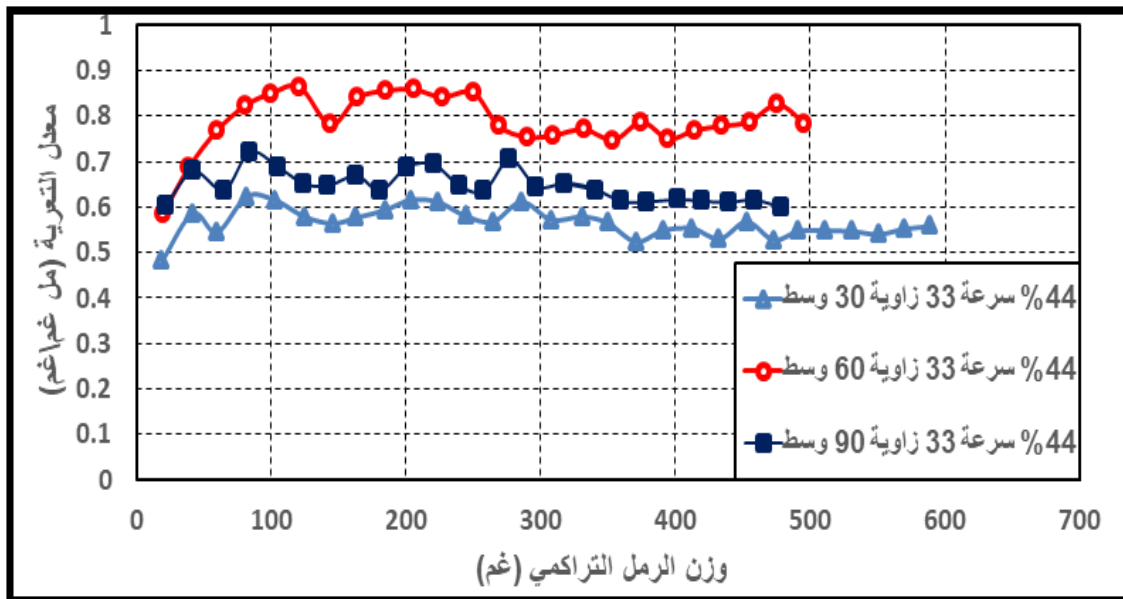
شكل (8): معدل التعرية للمتراكبات الحبيبية المعززة بنسبة (5 wt.%) من كربيد السيليكون عند سرعة صدم (25.2 m/s) وزوايا صدم مختلفة.



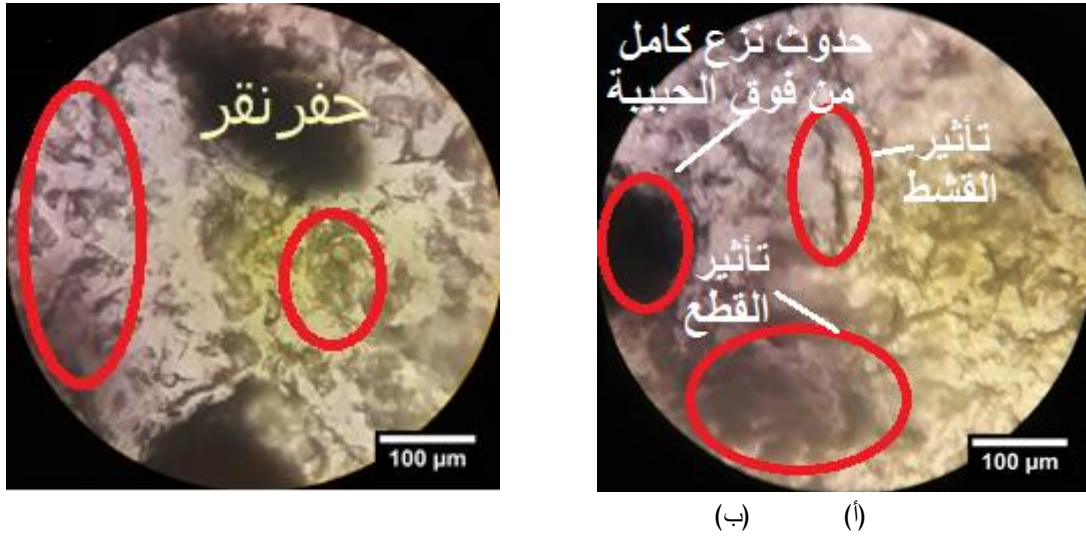
شكل (9): معدل التعرية للمتراكبات الحبيبية المعززة بنسبة (5 wt.%) من كربيد السيليكون عند سرعة صدم (33 m/s) وزوايا صدم مختلفة.



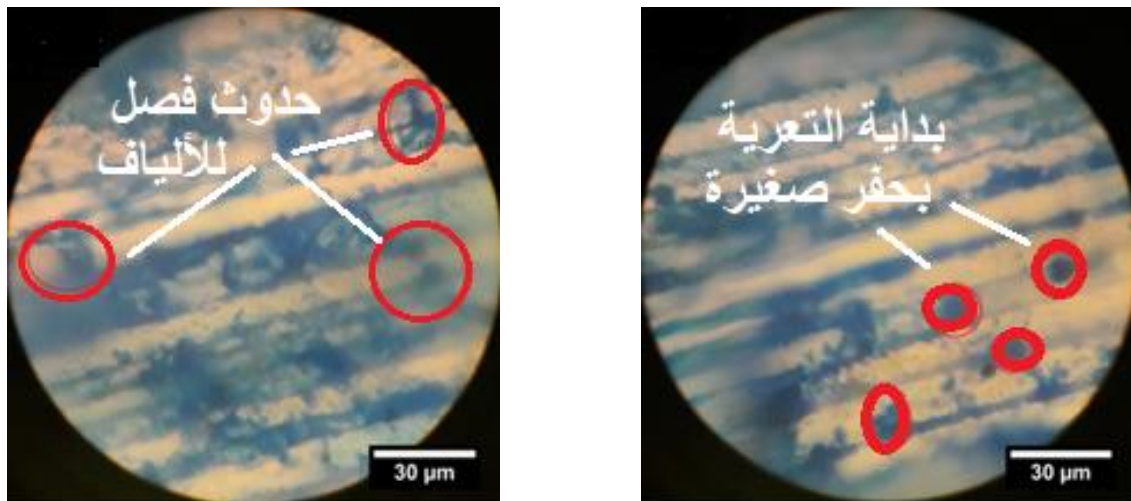
شكل (10): معدل التعرية لمتراكبات الألياف المعززة بنسبة (44 wt.%) من الألياف الزجاجية عند سرعة صدم (25.2 m/s) وزوايا صدم مختلفة.



شكل (11): معدل التعرية لمتراكبات الألياف المعززة بنسبة (44 wt.%) من الألياف الزجاجية عند سرعة صدم (33 m/s) وزوايا صدم مختلفة.

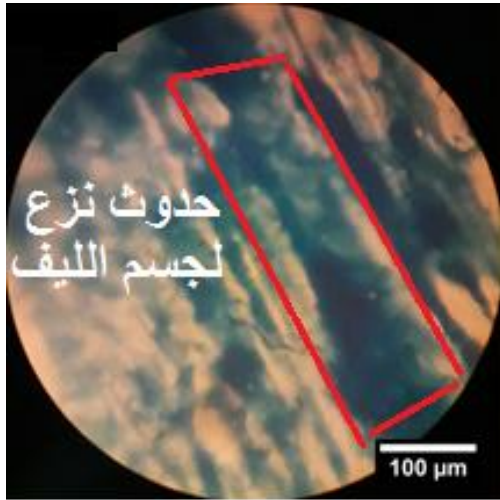


شكل (12): صورة مجهرية لمتراكب كبريد السيليكون (5%wt.) عند سرعة تصدم (25.2m/s) (أ) عند الزاوية تصدم (60°), (ب) عند الزاوية (90°).

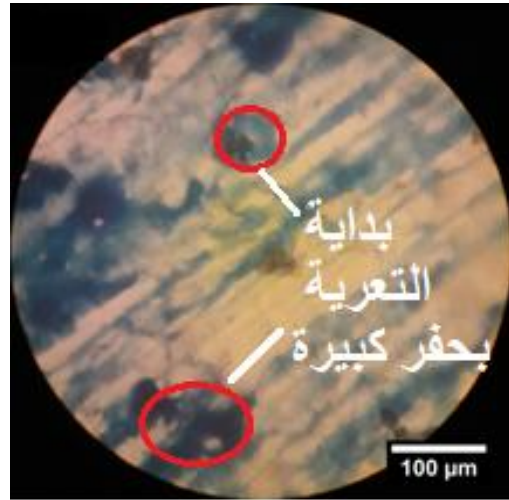


(أ)(ب)

شكل (13): صورة مجهرية لمتراكب الألياف الزجاجية (44 wt.%) عند سرعة تصدم (25.2m/s) عند الزاوية (30°). (أ) عند بداية التعرية (ب) بعد فترة من التعرية.



(ب)



(أ)

شكل (14): صورة مجهرية لمترابكاً بالألياف الزجاجية (44 wt.%) عند سرعة صدم (25.2 m/s) عند الزاوية (60°). (أ) عند بداية التعرية (ب) بعد فترة من التعرية.

5. تأثير زيادة السرعة على زاوية الصدم (60°) أكبر من تأثيرها على الزاويتين (30°) و (90°).

6. تتأثر سرعة الوصول للحالة المستقرة (steady state) بسرعة وزاوية الصدم.

References

- [1] K. G. Budinski, Friction, wear, and erosion atlas. CRC Press, 2013.
- [2] A. Patnaik, A. Satapathy, N. Chand, N. M. Barkoula, and S. Biswas, "Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites: A review," *Wear*, vol. 268, no. 1–2, pp. 249–263, 2010.
- [3] G. W. Stachowiak, *Wear: materials, mechanisms and practice*. John Wiley & Sons, 2006.
- [4] N.-M. Barkoula and J. Karger-Kocsis, "Review processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 18, pp. 3807–3820, 2002.
- [5] Yogesh Ma, Dr. Hari Rao A N, "Solid Particle Erosion response of fiber and particulate filled polymer based hybrid composites: A review", *Yogesh M Int. Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 6, pp.25-39,2016.

4- الاستنتاجات

تضمنت هذه الدراسة تصنيع نماذج لمادة مترابكة ذات مادة اساس من البولستر غير المشبع والمعزز بحبيبات كربيد السيليكون بنسبة وزنية (5 wt.%) ومعزز بألياف زجاجية بنسبة وزنية (44 wt.%) مرة أخرى. فمن اهم النتائج التي يمكن استنتاجها ما يلي:

1. نلاحظ أن سلوك البولستر هو سلوك هش وسلوك مترابكاته يكون شبه مطيلية , حيث يلاحظ أن جميع المترابكات المدروسة تكون أقصى تعرية لها عند الزاوية (60°), وربما يعزى ذلك الى وجود الطور الثاني داخل الأرضية الذي يكون أقل استقراراً عند الزاوية (60°), حيث يتعرض لمركبة قوى عمودية وأفقية مما تجعله يتخلخل عن موضعه ويسهل بعد ذلك نزعهُ.
2. مترابكات كربيد السيليكون (5 wt.%) أظهرت مقاومة تعرية أفضل من البولستر ومترابكاته عند الزوايا (30°) و (90°) , لكن عند الزاوية (60°) يزداد معدل التعرية.
3. الألياف الزجاجية رفعت من معدل التعرية ضمن النسبة المدروسة (44 wt.%).
4. علاقة السرعة مع معدل التعرية هي علاقة طردية.

- short glass fiber reinforced polyester composite," *Am. J. Mater. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 22–27, 2012.
- [17] C. R. Mahesha, N. M. Shivarudraiah, and R. Suprabha, "Solid particle erosion of basalt fiber and glass fiber-epoxy composite," *Int. J. Mech. Prod. Eng.*, vol. 2, pp. 30–34, 2014.
- [18] G. Arena et al., "Solid particle erosion and viscoelastic properties of thermoplastic polyurethanes.," vol. 9, no. 3, 2015.
- [19] M. A. Chowdhury, U. K. Debnath, D. M. Nuruzzaman, and M. M. Islam, "Experimental analysis of aluminum alloy under solid particle erosion process," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 230, no. 12, pp. 1516–1541, 2016.
- [20] J. A. C. Humphrey, "Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact," *Int. J. heat fluid flow*, vol. 11, no. 3, pp. 170–195, 1990.
- [21] K.-H. Kim, G. Chahine, J.-P. Franc, and A. Karimi, *Advanced experimental and numerical techniques for cavitation erosion prediction*, vol. 106. Springer, 2014.
- [22] A. P. Harsha and A. A. Thakre, "Investigation on solid particle erosion behaviour of polyetherimide and its composites," *Wear*, vol. 262, no. 7–8, pp. 807–818, 2007.
- [23] V. K. Srivastava and A. G. Pawar, "Solid particle erosion of glass fibre reinforced flyash filled epoxy resin composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, no. 15, pp. 3021–3028, 2006.
- [24] K. Friedrich, "Erosive wear of polymer surfaces by steel ball blasting," *J. Mater. Sci.*, vol. 21, no. 9, pp. 3317–3332, 1986.
- [25] David Cripps, *Polyester Resins, net composites*, Gurit, 2018.
- [26] J P Agrawal, "Composite Materials", *Defense Research and Development Organization Ministry of Defense*, Delhi, 110 054, 1990.
- [27] R. KAUNDAL, A. PATNAIK, and A. S. Biswas and A. Satapathy, "Triboperformance analysis of red mud filled glass-epoxy composites using Taguchi experimental design," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 8, pp. 2841–2853, 2009.
- [7] A. Patnaik, A. Satapathy, S. S. Mahapatra, and R. R. Dash, "Erosive wear assesment of glass reinforced polyester-flyash composites using taguchi method," *Int. Polym. Process.*, vol. 23, no. 2, pp. 192–199, 2008.
- [8] A. Patnaik, "Development, characterization and solid particle erosion response of polyester based hybrid composites." 2008.
- [9] K. G. Budinski, *Guide to friction, wear and erosion testing*. ASTM international West Conshohocken, PA, 2007.
- [10] N. Miyazaki and N. Takeda, "Solid particle erosion of fiber reinforced plastics," *J. Compos. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 21–31, 1993.
- [11] P. J. Mathias, W. Wu, K. C. Goretta, J. L. Routbort, D. P. Groppi, and K. R. Karasek, "Solid particle erosion of a graphite-fiber-reinforced bismaleimide polymer composite," *Wear*, vol. 135, no. 1, pp. 161–169, 1989.
- [12] Z. L. Lu, Z. G. Xing, H. Xie, and Y. X. Zhou, "Effect of SiC Particle Sizes on Erosion Wear Behaviour of SiC/Epoxy Resin Composite," 2010, vol. 658, pp. 368–371.
- [13] Garrett T. Olsen. "Erosion Resistant Hard Composite Materials", *Halliburton Energy Services, Inc.*, U.S. Patent Document, 2015.
- [14] S. Biswas, A. Satapathy, and A. Patnaik, "Erosion wear behavior of polymer composites: a review," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 29, no. 19, pp. 2898–2924, 2010.
- [15] S. Arjula and A. P. Harsha, "Study of erosion efficiency of polymers and polymer composites," *Polym. Test.*, vol. 25, no. 2, pp. 188–196, 2006.
- [16] R. Kaundal, A. Patnaik, and A. Satapathy, "Solid particle erosion of

- vol. 252, no. 1–2, pp. 80–87, 2002.
- [33] A. Patnaik, A. Satapathy, S. S. Mahapatra, and R. R. Dash, "A modeling approach for prediction of erosion behavior of glass fiber–polyester composites," *J. Polym. Res.*, vol. 15, no. 2, pp. 147–160, 2008.
- [34] H. Jena, A. K. Pradhan, and M. K. Pandit, "Study of solid particle erosion wear behavior of bamboo fiber reinforced polymer composite with cenosphere filler," *Adv. Polym. Technol.*, vol. 37, no. 3, pp. 761–769, 2018.
- [35] V. K. Srivastava and A. G. Pawar, "Solid Particle Erosion of Glass Fiber Reinforced Fly ash Filled Epoxy Resin Composites" *Composites Science and Technology* 66(15):3021–28, 2006.
- [36] Amar Patnaik, Alok Satapathy, S. S. Mahapatra, and R. R. Dash, "Implementation of Taguchi Design for Erosion of Fiber-Reinforced Polyester Composite Systems with SiC Filler" *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 27(10):1093–1111, 2008.
- SATAPATHY, "Effect of SiC particulate on short glass fiber reinforced polyester composite in erosive wear environment," *Walailak J. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 49–64, 2012.
- [28] J. Abenojar, J. C. Del Real, M. A. Martinez, and M. C. de Santayana, "Effect of silane treatment on SiC particles used as reinforcement in epoxy resins," *J. Adhes.*, vol. 85, no. 6, pp. 287–301, 2009.
- [29] زينب حازم حميد, عواد هלוوش خضر, "التوصيف فوق الصوتي لمترابكات متدرجة الخواص ذات قاعدة بوليمرية", رسالة ماجستير, جامعة الموصل, 2017.
- [30] I. Kleis and P. Kulu, *Solid particle erosion: occurrence, prediction and control*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [31] www.gritco.com "Moh's scale of relative hardness".
- [32] N.-M. Barkoula and J. Karger-Kocsis, "Effects of fibre content and relative fibre-orientation on the solid particle erosion of GF/PP composites," *Wear*,

Effect of Impact Velocity and Angle on Erosion Behavior for Polymeric Composite Materials

Ahmed W. Khalid*
awk_meceng@yahoo.com.

Abdullhaqq A. Hamid **
abdullhaqqhamid@yahoo.com.

*M.Sc. research student, Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Mosul, Mosul-IRAQ.

** Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Mosul, Mosul-IRAQ.

Abstract

Due to significant effect of the phenomenon of erosion and its entry in many engineering and industrial applications, hence the importance of the study of erosion, especially the key factors of impingement velocity and impingement angle, because of their high effect on the phenomenon of erosion. The erosion testing device was manufactured according to ASTM G76 specifications, and devices rotating molds casting and vacuum equipment were manufactured, and unsaturated polyester specimens and its composites were reinforced with two types of reinforcing materials silicon carbide particles (SiC) and fiberglass (5 wt. %) and (44% wt. %) respectively. The impingement velocity (25.2, 33 m / s) and impingement angles (30°, 60° and 90°) affecting erosion were studied. From the results obtained, it is noted that the behavior of polyester was brittle behavior and the composites behaves semi-ductile. And that the maximum erosion rate of polyester is at an impingement angle (90°) and the maximum erosion rate of polyester composites is at an impingement angle (60°). Silicon carbide particles improved erosion resistance at the impingement angles (90°, 30°), but at an angle (60°) they reduced pure polyester resistance to erosion, while fibers increased the rate of erosion. It was noted that the relationship between the impingement velocity and the rate of erosion is a direct relationship and that the effect of increasing the impingement velocity on the angle of impingement (60°) is greater than its impingement on the angles (90°, 30°).

Key words:

Unsaturated Polyester (UP), Silicon Carbide Particles, Fiberglass, Rate of Erosion, Impingement Velocity, Impingement Angle.