تحسين الخصائص الميكانيكية لبوليمير الإيبوكسي بإضافة حبيبات كربيد السيليكون المكروية

[1] د. يمن الأتاسي

[2] د. عيسى خضر

[3] م. محمد ديوب

الملخص

تمّ في هذا البحث دراسة تأثير حبيبات كربيد السيليكون المكروية بأقطار (4-2 µm) على الخصائص الميكانيكية لراتنج الإيبوكسي. حيث تم تشكيل المادة المركبة (إيبوكسي- كربيد السيليكون) وفق نسب تدعيم متدرجة من حبيبات الكربيد بالنسبة للمادة المركبة (35%-30-25-20-15-10-5) باستخدام جهاز المجانسة بالأمواج فوق الصوتية ذات التردد (30-35 KHz) ومن ثم التشكيل في قوالب محددة.

تم بعد ذلك دراسة تأثير نسب متدرجة (5,10,15,20,25,30,35%) من

[1] مُدرِّسة في قسم الفيزياء التطبيقية – المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا – دمشق – سوريا.
yomen.atassi@hiast.edu.sy

[2] مُدّرس في قسم الفيزياء التطبيقية – المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا – دمشق – سوريا.

[3] طالب ماجستير في قسم الفيزياء التطبيقية – المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا- دمشق- سوريا.
dayoub1991@gmail.com

كربيد السيليكون المعدّلة بـ (1%) من عامل ربط سيلاني على الخصائص الميكانيكية لراتنج الإيبوكسي.

أجري التوصيف البنيوي والميكانيكي للحاضنة البوليميرية وللمادة المركبة، حيث بيّنت نتائج التوصيف البنيوي باستخدام مطيافية الاشعة تحت الحمراء ذات تحويل فوريه (FTIR) أهم الزمر الوظيفية الموجودة في الحاضنة البوليميرية والمادة المركبة، وكشفت عن عدم وجود أي أثر تهديمي للأمواج فوق الصوتية على بنية راتنج الإيبوكسي. كما دلّ طيف الامتصاص عند طول الموجة cm^{-1} (1120) الى تشكّل ترابط كيميائي بين عامل الربط وحبيبات الكربيد المعالجة.

بيّنت نتائج التوصيف الميكانيكي تحسّناً ملحوظاً في الخصائص الميكانيكية المدروسة لراتنج الإيبوكسي المدعم بحبيبات كربيد السيليكون، حيث ازدادت قيم كلٍّ من مقاومة الصدم (Impact Strength) ومقاومة الشد (Tensile Strength) ومعامل يونغ (Young modules) للمادة المركبة مقارنةً مع الخصائص الموافقة لها في راتنج الإيبوكسي، وقد كانت نسبة التدعيم المثلى25%. لوحظ أيضاً تحسن في خصائص القساوة ومعامل الاحتكاك ومعدل الاهتراء للمادة المركبة بزيادة نسبة كربيد السيليكون.

أظهرت نتائج الاختبارات الميكانيكية العالية للمادة المركبة المعدّله بعامل الربط السيلاني الدور المهم لعامل الربط في تحسين الترابط والتوافق (compatibility) بين بوليمير الإيبوكسي وحبيبات الكربيد. إضافةً الى تحسّن خصائص تبعثر الكربيد في الحاضنة البوليميرية.

كلمات مفتاحية: راتنج الإيبوكسي– كربيد السيليكون– المواد المركبة– عامل ربط سيلاني– تقوية – حاضنة بوليميرية.

Enhancement of the mechanical properties of the epoxy polymer by adding silicon carbide micro- grains

[1] Yomen atassi

[2]Issa khoder

[3] Mohammad dayoub

ABSTRACT

In this research the effect of (2-4 μm) microscopic silicon carbide grains on the mechanical properties of epoxy resin has been studied. The composite material (epoxy-silicon carbide) was formed according to graded reinforcement ratios of carbide grains to the composite material (5, 10, 15, 20, 25, 30, and 35%), using an ultrasound homogenizing device with a frequency (30-35 KHz), then specific molds have been formed.

The effect of graded proportions of silicon carbide grains (5, 10, 15, 20, 25, 30, and 35%) modified with (1%) of silane bonding agent (3-Aminopropyltriethoxysilane) on the mechanical properties of the epoxy resin also was studied.

The structural and mechanical characterization of the polymeric matrix and the composite material were performed. The results of the structural characterization using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) showed the most important functional groups present in the polymeric incubator and the composite material. It

[1] Lecture in the Department of Applied Physics - Higher Institute for Applied Sciences and Technology - Damascus - Syria. **yomen.atassi@hiast.edu.sy**.

[2] Lecture in the Department of Applied Physics - Higher Institute for Applied Sciences and Technology - Damascus – Syria.

[3] Master's student in the Department of Applied Physics - Higher Institute of Applied Sciences and Technology – Damascus – Syria. **dayoub1991@gmail.com**

revealed that there was no destructive effect of ultrasound on the structure of the epoxy resin. The absorption spectrum at (1120 cm^{-1}) wavelength also indicated the formation of a chemical bond between the bonding agent and the treated carbide grains.

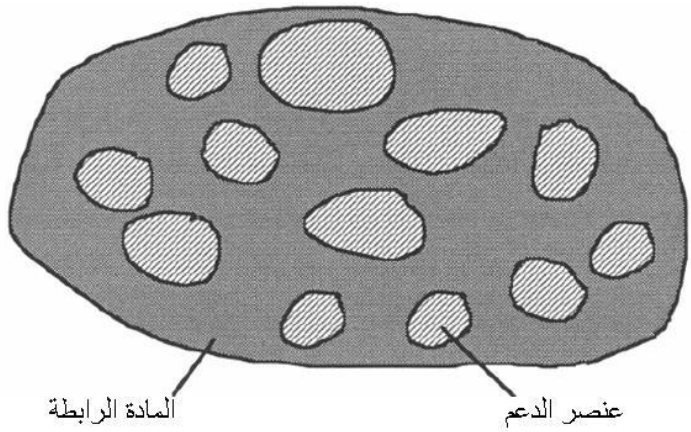
The results of the mechanical characterization showed a significant improvement in the mechanical properties of the epoxy resin reinforced with silicon carbide granules. The values of Impact Strength, Tensile Strength and Young Modules of the composite material has increased compared to the corresponding properties of the epoxy resin. The optimum reinforcement ratio was 25%. An improvement in the toughness, friction coefficient and wear rate of the composite material was also observed with an increase in the proportion of silicon carbide.

High mechanical test results of the modified composite material with silane bonding agent showed the important role of the bonding agent in improving the bonding and compatibility between the epoxy polymer and the carbide grains. In addition, the carbide scattering properties were improved in the polymer incubator.

Key words: Epoxy Resin - Silicon Carbide - Composites - Silane Bonding Agent - reinforcement - Polymeric matrix.

1- المقدمة:

تتألف المواد المركبة من مادتين مختلفتين متمايزتين أو أكثر كما يبين الشكل (1)، علماً أنه لا يوجد تفاعل كيميائي بين هذا الخليط، إنما تكامل بخصائص المكونات وكل مادة تحتفظ بخواصها الأساسية التي كانت تملكها منفردة وتكون الخواص الميكانيكية للمنتج النهائي مغايرة لخواص أي من المواد المؤلفة له [1].



الشكل (1) مكونات المادة المركبة

تحتل المواد المركبة مكانة مرموقة في هندسة المواد كما أنها تملك انتشاراً واسعاً على مستوى العالم وتنال أقصى درجات الاهتمام في كثير من الدول المتطورة على المستوى البحثي والأكاديمي وحتى الصناعي وذلك بسبب استخدامها في مجال واسع من التطبيقات.

بدأ انتشار المواد المركبة في الستينات من القرن الماضي، وقد انتشرت المواد المركبة انتشاراً هائلاً خلال فترة قصيرة من الزمن نظراً لخواصها الميكانيكية الممتازة مقارنةً

بوزنها المنخفض، فدخلت في كل المجالات الهندسية، رغم أنها ولدت أصلاً في عالم صناعة الطائرات ومركبات الفضاء، حيث تلعب خفة الوزن دوراً رئيسياً في اختيار المواد.

تزايد الطلب على المواد المركبة في السنوات الماضية لما تمتلكه من خصائص فريدة وأداء عالي، وبشكلٍ خاص المواد المركبة التي تكون فيها المادة الرابطة (الحاضنة) بوليميراً، ونخص بالذكر بوليميرات الإيبوكسي عالية الأداء التي تملك خصائص ميكانيكية وحرارية وكهربائية متقدمة وسهولة في التطبيق والإستخدام مما جعلها تدخل في تطبيقات متعددة وأصبحت تأخذ مكانةً مرموقةً في المجال الصناعي، وهذه الراتنجات هي عبارة عن سوائل منخفضة اللزوجة يتم تحضيرها من تفاعل مركب البيسفينول –A مع مركب إيبيكلورهيدرين، وتلعب عدة عوامل في جودة الخصائص النهائية لهذه البوليميرات كالبنية الجزيئية وظروف المعالجة اللاحقة ونسبة عامل التقسية المضاف.

ومع التطور الصناعي، أصبح لابد من استخدام مواد تعزّز من خصائص راتنجات الإيبوكسي وخاصةً في التطبيقات التي تتطلب أداءً وظيفياً عالياً للمواد وهنا برزت المواد اللامعدنية التي تُعتبر من أهم هذه المضافات وخصوصاً الكربيدات اللامعدنية مثل(كربيد السيليكون) والتي تتمتع بخصائص ميكانيكية عالية وقيم موصلية وثباتية حرارية مرتفعة، وإن استخدام مثل هذه المواد كمادة تقوية (reinforcement) في المادة المركبة من شأنه أن يُحسن الأداء الوظيفي للبوليمير ويعزز خصائصه، وهذا التحسّن بالخصائص يتم بطرق تشكيل وتقانات ملائمة لا تؤثر سلباً على قابلية تشغيل وتطبيق الحاضنة البوليميرية.

كما أن التطور الكبير للمواد المركبة أصبح يتنامى بشكل كبير وخاصة في ميزة تضافر الخصائص بين المادة الرابطة ومادة التدعيم للحصول على مادة مركبة عالية الأداء وتلبي كافة درجات الأداء الوظيفي بدءاً من المنخفض وصولاً إلى المتقدم منها.

1-1- الدراسة المرجعية:

تعد المواد المركبة ذات الأساس البوليميري والتي تتم تقويتها بحبيبات من كربيدات لامعدنية، من المواد الهامة والتي لاقت اهتماماً كبيراً من قبل الباحثين، حيث تم التوجه الى دراسة تحسين الخصائص الميكانيكية كمعامل يونغ والقساوة ومقاومة الصدم ومقاومة الانعطاف ومقاومة الشد ومعامل الاحتكاك ومعدل الاهتراء لراتنج الإيبوكسي كحاضنة بوليميرية، حيث حضّر كل من **محمد رضا نعيمي** و **رسول اسماعيلي** عدة عينات من مواد مركبة تحوي الإيبوكسي وتمت تقويتها بنسب مختلفة من حبيبات كربيد السيلكون النانوية وتوصلوا بعد التوصيف الميكانيكي الى نتائج أهمها [2]:

عند نسبة التدعيم المثلى (1%wt) من حبيبات الكربيد النانوية سوف تتحسّن مقاومة الشد (Tensile strength) بنسبة تصل الى 27% وتتحسن قيمة معامل المرونة بنسبة 16.5%

أما مقاومة الانعطاف (flexural strength) فتصل الى تحسن بنسبة 43% عند القيمة المذكورة.

قيمة تحسن القساوة(Hardness) تصل الى نسبة 7% في حال التدعيم بالحبيبات (4%wt).

وبالنسبة لخصائص معامل الاحتكاك ومعدل الاهتراء فلقد تحسنت بنسبة30% و50% على الترتيب وذلك عند نسبة التدعيم العظمى 4% من حبيبات كربيد السيليكون النانوية.

أما بالنسبة لمقاومة الصدم فلقد حضّر كل من **Junwei Gu** و **Qiuyu Zhang** و **Jing Dang** عدة عينات من مواد مركبة تحوي الإيبوكسي وتمت تقويتها بنسب مختلفة من حبيبات كربيد السيلكون المكروية سواء المعدّلة او غير المعدّلة بعامل ربط سيلاني وتمت دراسة خصائص الصدم وبلغت أعلى قيمة لمقاومة الصدم $14.3\ KJ/m^2$ بالنسبة للمادة المركبة التي تم فيها استخدام حبيبات كربيد السيليكون الغير معدّلة بعامل

ربط وذلك عند نسبة تدعيم مثلى بلغت 10% من حبيبات الكربيد وبنسبة تحسّن 10%، أما بالنسبة للمادة المركبة التي تم فيها استخدام حبيبات كربيد السيليكون المعدّلة بعامل ربط فلقد بلغت قيمة مقاومة الصدم $15.5\ KJ/m^2$ بنسبة تحسّن 19.23% [3].

2- أهمية البحث وأهدافه:

2-1- مشكلة البحث:

لا تؤمّن راتنجات الإيبوكسي لوحدها الخصائص الميكانيكية والحرارية المطلوبة في الصناعات الفضائية والتطبيقات عالية الأداء مما يتطلب إدخال مواد تحسن من خصائص راتنج الإيبوكسي ومن هذه المواد الكربيدات اللامعدنية التي تتمتع بخواص ميكانيكية وحرارية عالية والتي تكون متوافقة مع ريزين الإيبوكسي وتشكل مادة مركبة تفوق خصائصها مواصفات راتنج الإيبوكسي لوحده وتفي بالغرض المطلوب.

2-2- أهمية البحث:

تأتي أهمية هذا البحث من التطبيقات الواسعة والمهمة جداً للمواد المركبة ذات الرابط البوليميري والتي تدخل في العديد من الصناعات المتفاوتة في درجة الأداء الوظيفي المطلوب ومن أهم التطبيقات العملية لهذه المواد:

- ✓ في مجال اللواصق النوعية.
- ✓ الطلاءات الحرارية والصناعات الفضائية.

2-3- أهداف مشروع البحث:

يتناول هذا البحث تحضير مواد مركبة وتوصيفها وتم استخدام نوع محدد من الحواضن البوليميرية وهو بوليمير الإيبوكسي (Epoxy Resin) ويتضمن العمل:

1- دراسة تأثير محتوى كربيد السيليكون على الخصائص الميكانيكية وإيجاد النسبة الوزنية المثلى للكربيد والتي تتحسن عندها الخصائص الميكانيكية.
2- دراسة تأثير معالجة حبيبات كربيد السيليكون بعامل ربط سيلاني على الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة المعدّلة الناتجة.

3- مواد وطرائق البحث:

3-1- المواد والمحاليل المستخدمة:

- بوليمير الإيبوكسي Epoxy Araldite LY5052 وهذا البوليمير من إنتاج شركة (HUNTSMAN) الألمانية، وهو عبارة عن سائل منخفض اللزوجة(1500-1000 cp) وذو كثافة ($1.1-1.2\ g/cm^3$) من الممكن تحضيره من تفاعل مركب البيسفينول A- مع مركب إبيبكلورهيدرين ولا يحتوي على محلات ويسمى كيميائياً دي غليسيديل إيتر بيس فينولA (DGEBA).
- المقسي الأميني (Aradur 5052) المرافق من شركة Huntsman الألمانية وهو عبارة عن بولي أمينات ثلاثية ويكون مادة سائلة بني اللون، ويمزج المقسي مع بوليمير الإيبوكسي Epoxy Araldite LY5052 بنسبة مزج (100:38) وزناً كما هو موصى به من الشركة المصنّعة.
- حبيبات كربيد السيليكون (β-SiC) من شركة (Merck) وهي عبارة عن حبيبات ميكروية (2-4 μm) بأشكال كروية وذات بنية بلورية من النمط المكعبي مركزي الوجه(FCC) ذات لون رمادي وتبلغ كثافتها ($3.2-3.3\ g/cm^3$).
- عامل ربط سيلاني من شركة (Merck) وهو عبارة عن أمينو بروبيل تري ميتوكسي سيلان ويكون سائلاً شفافاً ذي كثافة منخفضة ($1.01-1.02\ g/cm^3$) ودرجة نقاوة 99.7%.

- إيثانول مخبري من شركة (Merck).
- ماء مقطر.

3-2- الأجهزة والأدوات:

3-2-1- الأجهزة الخاصة بالتوصيف والاختبار:

A- جهاز الاختبارات الميكانيكية العامة من شركة (ADAMEL LHOMARGY).

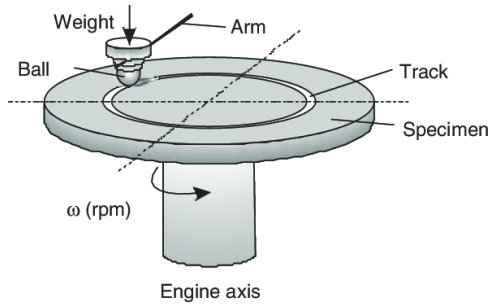
B- جهاز المطيافية تحت الحمراء من شركة Brucker نوع VECTOR22.

C- جهاز قياس القساوة (shore D) من شركة FRANK.

D- جهاز اختبار الصدم (Charpy) من شركة FRANK.

E- جهاز قياس معامل الاحتكاك ومعدل الاهتراء:

وهو جهاز تصنيع محلي بالمعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا ويعتمد على آلية Pin on disc أي مدى مقاومة العينة التي تكون على شكل قرص متحرك لانغراس وحك ابرة الجهاز ويتم معالجة النتيجة عبر حاسب الجهاز، كما يوضح الشكل (2):



الشكل (2) آلية عمل جهاز اختبار معامل الاحتكاك

3-2-2- الأجهزة الخاصة بتحضير العينات:

A- جهاز المزج بالأمواج فوق الصوتية (Ultrasonic) من شركةDRAWELL :

وهو عبارة عن جهاز ألماني الصنع يولد أمواج فوق صوتية يبلغ ترددها حوالي (30-35 KHz)، حيث تقوم هذه الأمواج بتفكيك تجمعات دقائق المواد الصلبة ضمن السوائل وذلك للحصول على التبعثر الجيد في المزائج المختلفة أو لزيادة سرعة الانحلال في المحاليل الكيميائية المختلفة ويظهر الشكلين (3,4) هذا الجهاز:

الشكل (3) جهاز Ultrasonic

الشكل(4) رأس التشتيت

B- محراك مغناطيسي من شركة Harmony نوع HTS-1003.

C- فرن التجفيف من شركة (Memert).

D- آلة جلخ وصقل العينات (PHOENIX 3000) من شركة (Joan Wiriz):

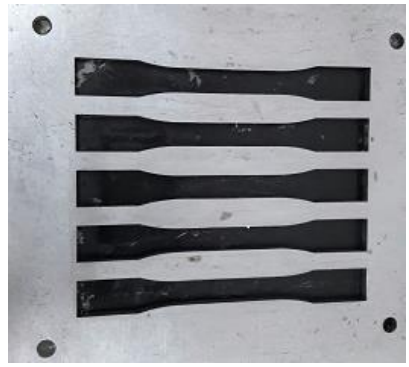
تتألف هذه الآلة من قرصي جلخ قابلين للدوران بمحرك واحد وبسرعة دوران أعظمية (1200 rpm) يبلغ قطر قرصي الجلخ 25cm،30cm، ويتوضع على سطح كل منهما طبقة رقيقة من ورق الجلخ متعدد درجات النعومة والقابلة للتغيير والتبريد الآلي بالماء، حيث يتم اختيار القرص حسب درجة النعومة المطلوبة.

E- ميزان إلكتروني حساس (LS1200) من شركة (Sartorius):

يتميز هذا الميزان بدقة تبلغ (0.001gr) ويمكنه قياس الأوزان ضمن المجال (0.001-1200 g) مع إمكانية إجراء معايرة ذاتية وتصفير في أي وقت.

F- قوالب من الفولاذ لتحضير العينات (تصنيع محلي):

تم تحضير قوالب خاصة لتحضير عينات المواد المركبة المدروسة وإجراء الاختبارات الميكانيكية الخاصة بها كالشد والقساوة والصدم، تُصب المادة المحضرة في هذه القوالب المعدنية على شكل متوازي مستطيلات مخصور من الوسط متوافق مع اختبار الشد وذلك حسب المواصفات القياسية (ASTM-D638)، يبين الشكل (5) هذا القالب المستخدم:



الشكل (5) قوالب معدنية خاصة بتحضير عينات اختبار الشد

G- مضخة تفريغ (WP6122050) من شركة (MILIPORE):

هي عبارة عن مضخة تفريغ (vacuum) إيطالية الصنع مزودة بمقياس للتفريغ ومقياس للضغط وصمام لإلغاء التفريغ وصمام لإلغاء الضغط تتميز بقوة تفريغ متوسطة تبلغ حتى (100KPa-) ويتم وصلها مع حجرة زجاجية أو معدنية توضع العينات داخلها.

H- محرك متغير السرعات صنع شركة (IKA) – (RW20.n):

هو عبارة عن محرك ماليزي الصنع يعطي مجال كبير من سرعات التحريك تتراوح من (50 rpm) وحتى (2000 rpm)، ويتم تغيير سرعة التحريك بواسطة مفتاح السرعة الذي يتدرج من (1) وحتى (10) ضمن مجالين من سرعات التحريك حسب نوع المسنن المستخدم، حيث يتراوح المجال الأول بين (5-500 rpm) في حين يتراوح المجال الثاني بين (500-2000 rpm).

3-3- تحضير العينات:

3-3-1- طريقة تحضير عينات المادة المركبة (إيبوكسي- كربيد السيليكون):

تم تحضير عينات المادة المركبة وفق الخطوات التالية:

1- وزن المواد (حبيبات الكربيد وراتنج الإيبوكسي والمقسي المرافق) وذلك بميزان دقيق وحسب نسب التدعيم المراد تشكيل المادة المركبة وفقها كما يبين الجدول (1):

الجدول (1) كتل المواد المستخدمة في تشكيل العينات

رقم العينة	Epoxy resin (g)	Hardner (g)	SiC (g)	نسبة التقوية (%)
1	95	36.1	5	5
2	90	34.2	10	10
3	85	32.3	15	15
4	80	30.4	20	20
5	75	28.5	25	25
6	70	26.6	30	30
7	65	24.7	35	35

2- إدخال حبيبات الكربيد الى فرن تجفيف وتعريضها لدرجة حرارة (100C°) وذلك لمدة (2hr) لطرد أي آثار للرطوبة.

3- إضافة حبيبات الكربيد بالتدريج الى راتنج الإيبوكسي وذلك في بيشر زجاجي، ونضع البيشر في وعاء يحوي على الثلج المجروش وذلك لتخفيض درجة الحرارة الناتجة عن الخلط، ويتم تعريض المادة المركبة للأمواج فوق الصوتية لمدة ساعة.

4- بعد الانتهاء من الخلط بجهاز المجانسة تتم إضافة النسبة المحددة من المقسي (المصالب الشبكي) والتي تكون الشركة قد زودتنا بها ما بين الراتنج والمقسي (مثلاً في حالة Epoxy Ly 5052 تكون النسبة 38g من المقسي لكل 100g من الراتنج) ومن ثم تتم عملية الخلط باستخدام خلاط ميكانيكي لمدة حوالي (5 min).

5- ومن ثم يتم سكب المادة المركبة في القالب المخصص وتُعالج بالفرن المجهّز بمضخة تفريغ لمدة ساعة عند درجة(70-75C°).

6- ومن ثم تؤخذ وتُجهّز العينات للاختبارات المطلوبة (شد – صدم – القساوة – الاحتكاك والاهتراء) وذلك بعد إجراء عمليات التشذيب والإنهاء المناسب.

3-3-2- طريقة تحضير عينات المادة المركبة (إيبوكسي-كربيد السيليكون- عامل ربط سيلاني):

1- يتم وزن حبيبات كربيد السيليكون المجففة وفق نسبة التدعيم المطلوبة في المادة المركبة كما هو مبين في الجدول (1)، وتوضع في بيشر زجاجي.

2- توزن كمية عامل الربط السيلاني والتي تشكل نسبة 1% [4] من وزن حبيبات كربيد السيليكون المستخدم وتضاف الى البيشر.

3- نضيف الى البيشر 15g من الإيتانول المخبري و15g من الماء المقطر.

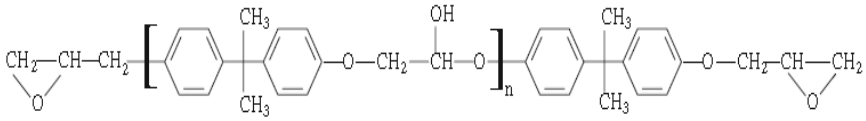
4- يوضع البيشر المغطى على محراك مغناطيسي عند درجة حرارة 75C° لمدة 4hr، ومن ثم يتم ازالة الغطاء وتترك العينة بدرجة حرارة الغرفة لمدة 24hr.

5- توضع العينة بعد ذلك في الفرن لمدة 15-18 hr عند الدرجة 100C° لإزالة اي أثر للرطوبة، وبذلك تكون حبيبات الكربيد المغلّفة بعامل الربط السيلاني جاهزة للدخول في المادة المركبة.

6- بعد ذلك يتم تحضير المادة المركبة (إيبوكسي - كربيد) باستخدام جهاز التشتيت بالأمواج الفوق صوتية بالطريقة المذكورة في الفقرة السابقة.

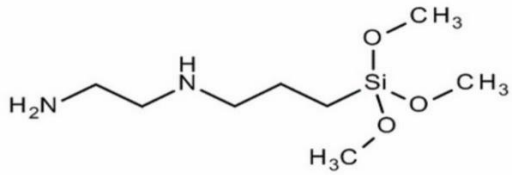
7- بعد الانتهاء من خلط وسكب عينة المادة المركبة وانتهاء التصلّب تؤخذ العينة لتكون جاهزة للاختبار الميكانيكي المطلوب (شد - صدم - القساوة - الاحتكاك والاهتراء).

فيما يلي الشكل (6) يوضح البنية الكيميائية لراتنج الإيبوكسي:



الشكل (6) البنية الكيميائية لراتنج الإيبوكسي

أما البنية الكيميائية لعامل الربط المستخدم 3-Aminopropyltriethoxysilane موضحة كما في الشكل (7):



الشكل (7) البنية الكيميائية لعامل الربط السيلاني المستخدم

3-4- الطرائق المستخدمة في البحث:

3-4-1- التوصيف البنيوي:

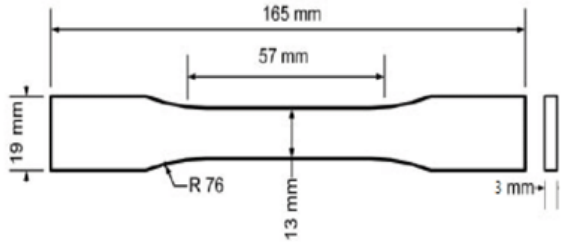
تم إجراء اختبار المطيافية تحت الحمراء لبوليمير الإيبوكسي قبل وبعد عملية المزج بالأمواج فوق الصوتية (sonication)، ولحبيبات كربيد السيليكون لوحدها ومن ثم إجراء التوصيف البنيوي لحبيبات الكربيد المعالجة بعامل الربط السيلاني، حيث تم استخدام KBr كحامل للعينات الصلبة.

3-4-2- التوصيف الميكانيكي:

جرى تحضير العينات الخاصة بمادة الإيبوكسي والمواد المركبة المحضّرة وذلك وفق التالي:

- **عينات اختبار الشد (Tensile strength):**

تم تحضير العينات الخاصة باختبار الشد وفق المواصفة (ASTM-D638)، حيث تكون العينة المحضرة على شكل متوازي مستطيلات متخصّر أبعاده كما في الشكل (8):



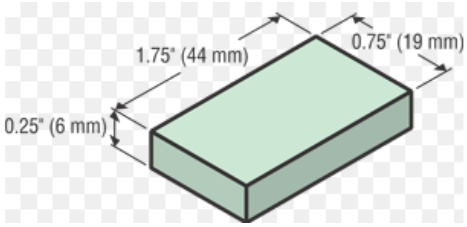
الشكل (8) أبعاد عينة الشد وفق المواصفة (ASTM-D638)

ويظهر الشكل (9) بعض من عينات اختبار الشد التي تم تحضيرها:

الشكل (9) عينة اختبار شد محضرة وفق مواصفة ASTM

●**عينات اختبار القساوة (Hardness-shore D)**:

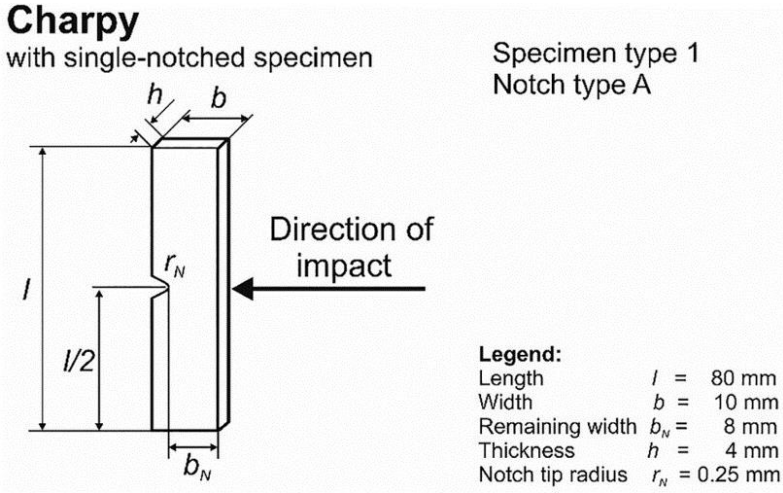
تم تحضير العينات الخاصة باختبار القساوة وفق المواصفة (ASTM- D2240)، حيث يطبق وزن 4Kg على العينة وتكون أبعادها كما في الشكل (10):



الشكل (10) شكل وأبعاد عينة اختبار القساوة

●**عينات اختبار الصدم (Impact test-Charpy)**:

تم تحضير العينات الخاصة باختبار الصدم وفق المواصفة (ISO 179)، حيث تكون أبعاد العينة المحضرة كما في الشكل (11):



الشكل (11) أبعاد عينة اختبار الصدم وفق مواصفة ISO 179

●عينات اختبار معامل الاحتكاك (Friction coefficient) ومعدل الاهتراء (Wear rate):

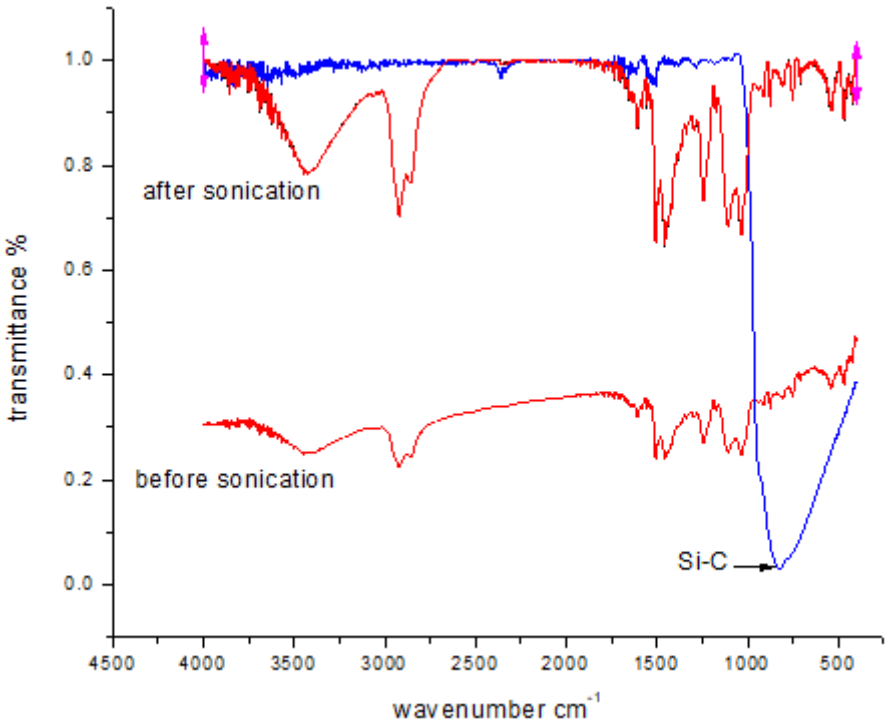
تم تحضير العينات الخاصة بهذا الاختبار وفق المواصفة (ASTM- G99)، حيث تكون أبعاد العينة الإسطوانية المحضرة mm (10×10).

4- النتائج والمناقشة:

4-1- التوصيف البنيوي:

4-1-1- دراسة وتوصيف المادة المركبة المكونة من بوليمير الإيبوكسي (Araldite LY5052) وكربيد السيليكون:

يبين الشكل (12) المطيافية تحت الحمراء لبوليمير الإيبوكسي وذلك قبل وبعد عملية التشتيت باستخدام الأمواج فوق الصوتية :



الشكل (12) المطيافية تحت الحمراء لبوليمير الإيبوكسي وذلك قبل وبعد عملية التشتيت ونلاحظ من الشكل القمم الرئيسية التالية والموافقة للروابط الكيميائية المبينة في الجدول (2):

الجدول (2) القمم المميزة لراتنج الإيبوكسي قبل وبعد عملية التشتيت

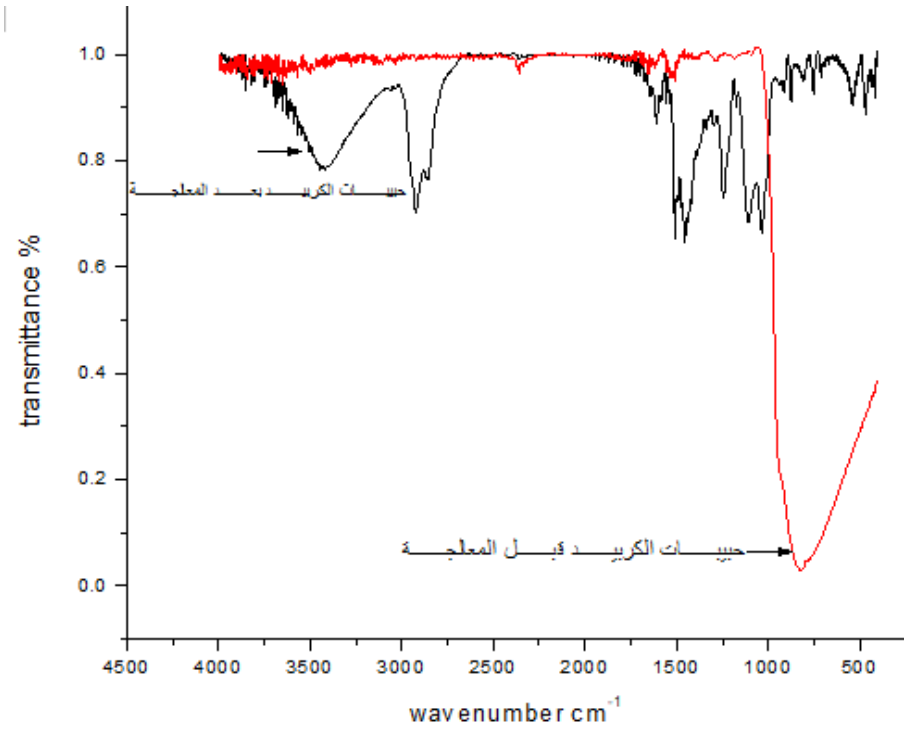
Chemical bond	Wavenumber cm^{-1} بعد التشتيت	Wavenumber cm^{-1} قبل التشتيت
C-H stretch in aromatics	3050	3050
C-H stretch of –CH 3	2964	2964
C-H stretch of –CH 2	2925	2925
C-H stretch of –CH 3	2868	2868
C-C stretching vibration in aromatic	1581,1606,1456,1508	1581,1606,1456,1508
aromatic C-O stretch	1243	1243
aliphatic C-O stretch aromatic C-O stretch	1180 1031	1180 1031
epoxide ring	914 ،970	914 ،970
Si-C	862	862

حيث تم التعرّف على القمم الرئيسة في بوليمير الإيبوكسي والروابط الكيميائية الموافقة لها، والتحقق من عدم وجود أي أثر تهديمي (degrading effect) من قبل الأمواج

الفوق صوتية على بنية راتنج الإيبوكسي، كما أنه بقيت ذرات حلقة الإيبوكسيد الثلاثية محافظةً على ترابطها.

4-1-2- دراسة وتوصيف المادة المركبة المكونة من (بوليمير الإيبوكسي - كربيد السيليكون المعدّل بعامل ربط سيلاني):

يبين الشكل (13) طيوف ال FTIR والقمم الرئيسية لكل من كربيد السيليكون قبل وبعد معالجته بعامل الربط السيلاني:



الشكل (13) مطيافية FTIR للمادة المركبة (إيبوكسي- عامل ربط -كربيد سيليكون)

ونلاحظ من الشكل (13) القمم الرئيسية التالية والموافقة للروابط الكيميائية المبينة في الجدول (3):

الجدول (3) القمم المميزة كربيد السيليكون المعالج بعامل الربط السيلاني

Chemical bond	Wavenumber cm^{-1}
C-H stretch in aromatics	3050

C-H stretch of –CH 3	2964
C-H stretch of –CH 2	2925
C-H stretch of –CH 3	2868
C-C stretching vibration in aromatic	1581,1606,1456,1508
N-H stretch	1573,776
aromatic C-O stretch	1245
C-N stretch	1105,1166
Si-O-Si stretch	1120
Si-O-C stretch	1080
aliphatic C-O stretch aromatic C-O stretch	1184 1033
epoxide ring	914 ،970
Si-C	862

حيث نلاحظ ظهور قمم امتصاص بالإضافة لقمم الامتصاص الموجودة في طيف الإيبوكسي، وهي:

ظهور قمتي امتصاص عند cm^{-1} (1573–776) مما يدل على امتطاط الرابطة N–H للوظيفة الأمينية.

ظهور قمتي امتصاص عند cm^{-1} (1105–1166) مما يدل على امتطاط الرابطة C–N.

ظهور قمة امتصاص عند cm^{-1} (1080) مما يدل على امتطاط الرابطة Si–O–C.

ظهور قمة امتصاص عندcm^{-1} (1120) مما يدل على امتطاط الرابطة Si–O–Si وهذا ما يشير الى حدوث ارتباط كيميائي على سطح الحبيبات بين كربيد السيليكون وعامل الربط السيلاني.

تم التعرّف على القمم المميزة لمكونات المادة المركبة والروابط الكيميائية الموافقة لها وكذلك تم التعرف على الروابط المتشكلة على سطح حبيبات الكربيد بعد معالجتها بعامل الربط السيلاني.

4–2– التوصيف الميكانيكي:

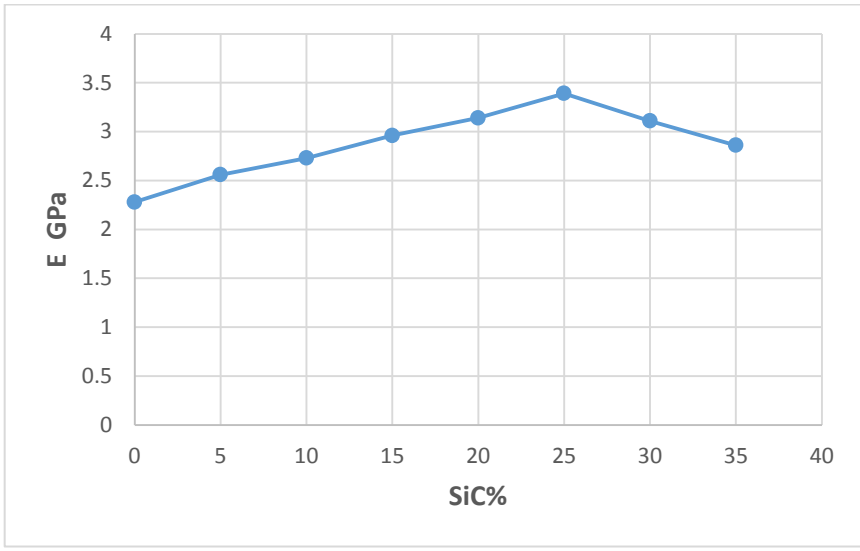
4–2–1– دراسة تأثير زيادة نسبة كربيد السيليكون على معامل يونغ وإجهاد الشد الأعظمي(σ_{max}) لراتنج الإيبوكسي:

يعطي الجدول (4) نتائج تغير معامل يونغ وإجهاد الشد الأعظمي(σ_{max}) لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون في المادة المركبة ذات الحاضنة البوليميرية Araldite LY5052:

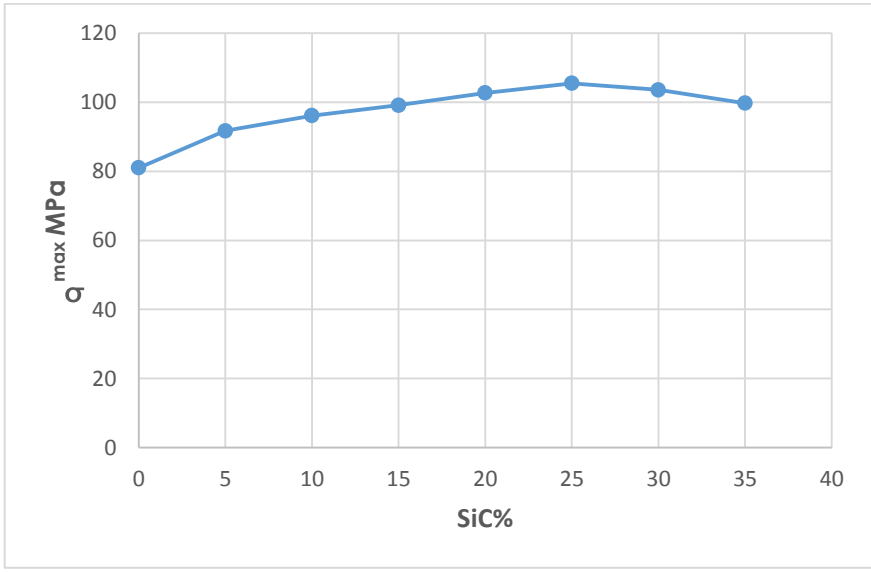
الجدول (4) نتائج تغير معامل يونغ وإجهاد الشد الأعظمي لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون

رقم التجربة	عدد العينات	نسبة SiC%	متوسط معامل يونغ E (GPa)	النسبة المئوية للتحسن%	متوسط إجهاد الشد الأعظمي σ_{max}(MPa)	النسبة المئوية للتحسن%
1	10	0	2.28	–	81	–
2	10	5	2.56	12.2%	91.72	13.24%
3	10	10	2.73	19.7%	96.09	18.63%
4	10	15	2.96	29.8%	99.1	22.35%
5	10	20	3.14	37.7%	102.66	26.74%
6	10	25	3.39	48.6%	105.47	30.21%
7	10	30	3.11	36.4%	103.56	27.86%
8	10	35	2.86	25.4%	99.71	23.11%

ويبين الشكلين (14,15) تغيرات معامل المرونة (معامل يونغ) وإجهاد الشد الأعظمي بدلالة نسبة كربيد السيليكون:



الشكل (14) تغير معامل يونغ لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون



الشكل (15) تغير إجهاد الشد لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون

نلاحظ من الشكلين (14) , (15) تحسّن الخصائص الميكانيكية لراتنج الإيبوكسي بعد تدعيمه بحبيبات كربيد السيليكون، حيث أن بنية كربيد السيليكون تسمح بنقل الإجهادات

المطبّقة على العينة، وتمنع تمدد التصدعات داخل البنية، كما أنها تعالج بعض العيوب الناتجة أثناء تشكل (تصالب) الإيبوكسي، كما أن كربيد السيليكون يتمتع بجساءة وصلابة مرتفعتين، كما نلاحظ أنه بزيادة نسبة الكربيد في المادة المركبة تتحسّن الخصائص الميكانيكية حتى الوصول الى نسبة تدعيم 25% والتي تمثل نسبة التدعيم المثلى لراتنج الإيبوكسي بحبيبات الكربيد، ثم يبدأ الانحدار والانخفاض قليلاً في الخصائص مع بقاء التحسّن في الخصائص الميكانيكية واضحاً عما هو عليه فيما لوكانت الحاضنة لوحدها ويُعزى ذلك الى أن زيادة نسبة الكربيد تزيد من لزوجة الجملة وهذا ما يؤثر سلباً على تبعثر وتشتت كربيد السيليكون ضمن الحاضنة البوليميرية كما أن هذه الزيادة في النسبة تقود الى تشكّل المزيد من الفقاعات الهوائية ومن ثم تشكل نقاط ضعف في البنية تؤثر عليها الإجهادات بشكل نوعي ومن ثم عدم الحصول على تجانس في الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة.[3]

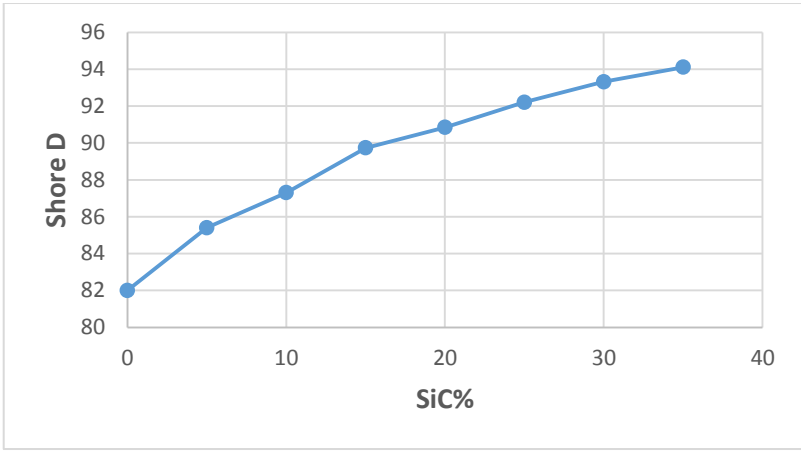
4-2-2- دراسة تأثير زيادة نسبة كربيد السيليكون على قساوة راتنج الإيبوكسي:

يعطي الجدول (5) نتائج تغير قساوة راتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون في المادة المركبة:

الجدول (5) تغير قساوة راتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون

رقم التجربة	عدد العينات	نسبة SiC%	متوسط القساوة (Shore D)	النسبة المئوية للتحسن%
1	10	0	82	–
2	10	5	85.4	4.14%
3	10	10	87.3	6.46%
4	10	15	89.73	9.24%
5	10	20	90.84	10.78%
6	10	25	92.21	12.45%
7	10	30	93.32	13.8%
8	10	35	94.11	14.76%

ويبين الشكل (16) تغيرات قساوة راتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون:



الشكل (16) تغير القساوة لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون

نلاحظ أن حبيبات الكربيد حسّنت من قساوة بوليمير الإيبوكسي وذلك بشكل مطّرد مع نسبة التدعيم، وذلك وصولاً الى نسبة تحسّن بلغت 15% تقريباً وذلك عند نسبة تدعيم 35% من حبيبات الكربيد، وذلك بسبب زيادة نسبة حبيبات الكربيد في المادة المركبة (ايبوكسي–كربيد) والتي تتميز بقساوة عالية ، والتي من شأنها كذلك أن تعالج العيوب الناتجة عن تقسية و معالجة (curing) راتنج الإيبوكسي.[3]

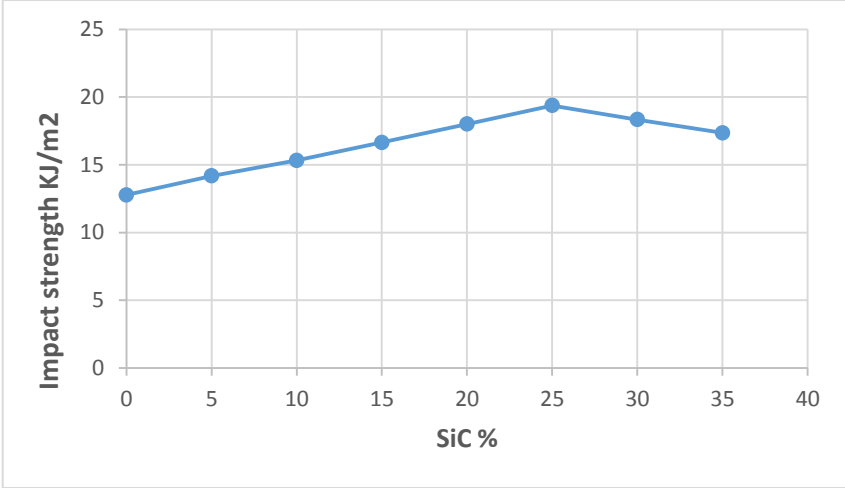
4-2-3- دراسة تأثير زيادة نسبة كربيد السيليكون على مقاومة الصدم لراتنج الإيبوكسي:

يعطي الجدول (6) نتائج تغير مقاومة الصدم لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون في المادة المركبة:

الجدول (6) مقاومة الصدم لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون

رقم التجربة	عدد العينات	نسبة SiC%	طاقة الصدم (J)	مقاومة الصدم (KJ/m^2)
1	10	0	0.511	12.77
2	10	5	0.567	14.175
3	10	10	0.613	15.325
4	10	15	0.666	16.65
5	10	20	0.720	18
6	10	25	0.7752	19.38
7	10	30	0.733	18.33
8	10	35	0.694	17.36

ويبين الشكل (17) تغير مقاومة الصدم بدلالة نسبة كربيد السيليكون:



الشكل (17) تغير مقاومة الصدم بدلالة نسبة كربيد السيليكون

نلاحظ من الشكل السابق أن مقاومة الصدم لراتنج الإيبوكسي تزداد بزيادة الكسر الوزني لحبيبات الكربيد في المادة المركبة، وذلك بما يتوافق مع الخصائص الميكانيكية المدروسة سابقاً كإجهاد الشد ومعامل يونغ من حيث الوصول الى نسبة التدعيم المثلى وهي 25% وزناً من حبيبات الكربيد في المادة المركبة، حيث أن بنية كربيد السيليكون تسمح بنقل الإجهادات المطبّقة على العينة، وتمنع تمدد التصدعات داخل البنية.

4-2-4- دراسة تأثير زيادة نسبة كربيد السيليكون على معامل الاحتكاك (Friction coefficient) ومعدل الاهتراء (Wear rate):

يعطي الجدول (7) نتائج تغير معامل الاحتكاك **μ** ومعدل الاهتراء W للمادة المركبة (إيبوكسيLY5052- كربيد السيليكون) بدلالة نسبة كربيد السيليكون في المادة المركبة:

الجدول (7) تغير معامل الاحتكاك μ ومعدل الاهتراء W لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون

رقم التجربة	عدد العينات	نسبة SiC%	معامل الاحتكاك μ ($\times 10^{-4}$)	معدل الاهتراء W($\times 10^{-4}$) mm^3/Nm
1	10	0	812	55
2	10	5	730	48
3	10	10	683	40
4	10	15	613	32
5	10	20	566	23
6	10	25	483	17
7	10	30	412	11
8	10	35	389	6

نلاحظ من الجدول السابق أن زيادة نسبة حبيبات الكربيد تحسن وبشكل طردي خصائص الاحتكاك والاهتراء لراتنج الإيبوكسي، حيث تشارك حبيبات الكربيد البوليمير في الحمولة المطبقة وبالتالي تُطبق على الحاضنة الحمولة الأقل وتخفف من اهتراء السطح كون هذه الحبيبات تتمتع بقساوة أعلى كما أن انخفاض قيمة معامل الاحتكاك تكون بسبب تشكل

غشاء (film) بيني بين الإيبوكسي وحبيبات الكربيد وتعتمد سماكة هذا الغشاء على محتوى وشكل وأبعاد حبيبات الكربيد. [2]

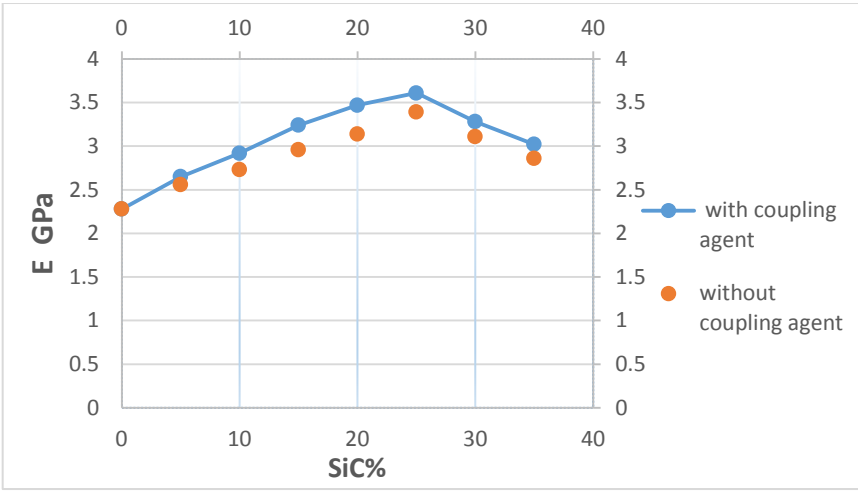
4-2-5- دراسة تأثير إضافة كربيد السيليكون المعالج بعامل الربط السيلاني على معامل يونغ وإجهاد الشد الأعظمي (σ_{max}) لراتنج الإيبوكسي:

يبين الجدول (8) نتائج تغير معامل يونغ وإجهاد الشد الأعظمي لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون المعالج بعامل الربط السيلاني:

الجدول (8) نتائج تغير معامل يونغ وإجهاد الشد الأعظمي لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون المعالج بعامل الربط السيلاني

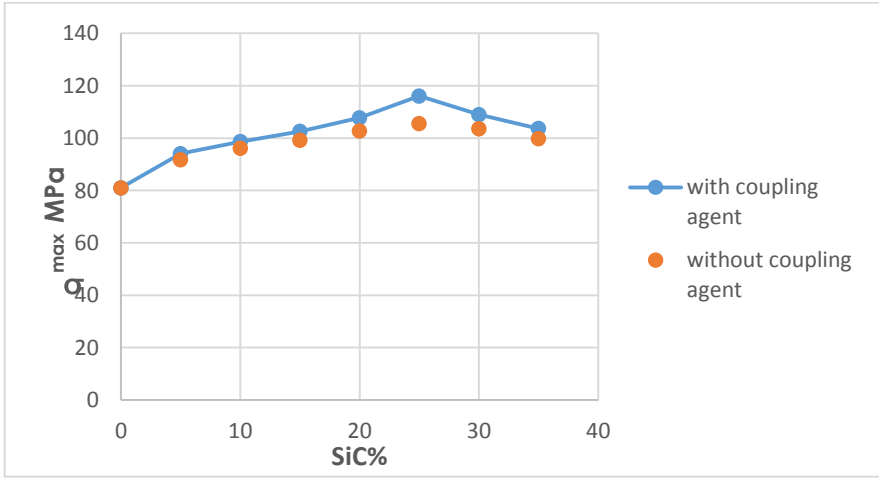
رقم التجربة	عدد العينات	نسبة SiC%	متوسط معامل يونغ E (GPa)	النسبة المئوية للتحسن%	متوسط إجهاد الشد الأعظمي σ_{max}(MPa)	النسبة المئوية للتحسن%
1	10	0	2.28	-	81	-
2	10	5	2.65	16.22%	94.02	16.07%
3	10	10	2.92	28.07%	98.63	21.76%
4	10	15	3.24	42.10%	102.54	26.59%
5	10	20	3.47	52.19%	107.71	32.97%
6	10	25	3.61	58.33%	116.03	43.24%
7	10	30	3.28	43.85%	108.98	34.54%
8	10	35	3.02	32.45%	103.66	27.97%

يوضح الشكل (18) تأثير إضافة حبيبات كربيد السيليكون المعالجة بعامل ربط سيلاني على معامل يونغ:



الشكل (18) تغير معامل يونغ لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون المدعم بعامل الربط السيلاني

ويوضح الشكل (19) تأثير إضافة حبيبات كربيد السيليكون المعالجة وغير المعالجة بعامل ربط سيلاني على إجهاد الشد الأعظمي:



الشكل (19) تغير إجهاد الشد لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون المدعم بعامل الربط السيلاني

نلاحظ من الشكلين (19) , (18) الدور البارز والمهم لحبيبات كربيد السيليكون في تحسين الخصائص الميكانيكية لراتنج الإيبوكسي، ونلاحظ بقاء النسبة 25% كنسبة تدعيم مثلى لحبيبات الكربيد في المادة المركبة، كما نلاحظ أن نسبة التحسن في اجهاد الشد الأعظمي للمادة المركبة التي تم فيها استخدام حبيبات كربيد السيليكون المدعمة بعامل ربط سيلاني قد بلغت 45% تقريباً عما هي عليه في راتنج الإيبوكسي لوحده، أما في حالة المادة المركبة التي تم فيها استخدام حبيبات كربيد السيليكون لوحده فقد بلغت نسبة التحسن في اجهاد الشد الأعظمي 30.21% ، وهذا ما يُعزى الى الدور الهام الذي يلعبه عامل الربط السيلاني في تسهيل عملية تبعثر وتشتت مادة التقوية في الحاضنة البوليميرية، ويحسن من خاصية التبلل لحبيبات الكربيد وبالتالي التقليل من التجمعات ومناطق التكتل في المادة المركبة، وكذلك تحسين خصائص نقل الإجهادات على كامل المادة المركبة وبشكلٍ منتظم ومتجانس، وهذا متوافق مع الأدبيات العلمية المنشورة [3].

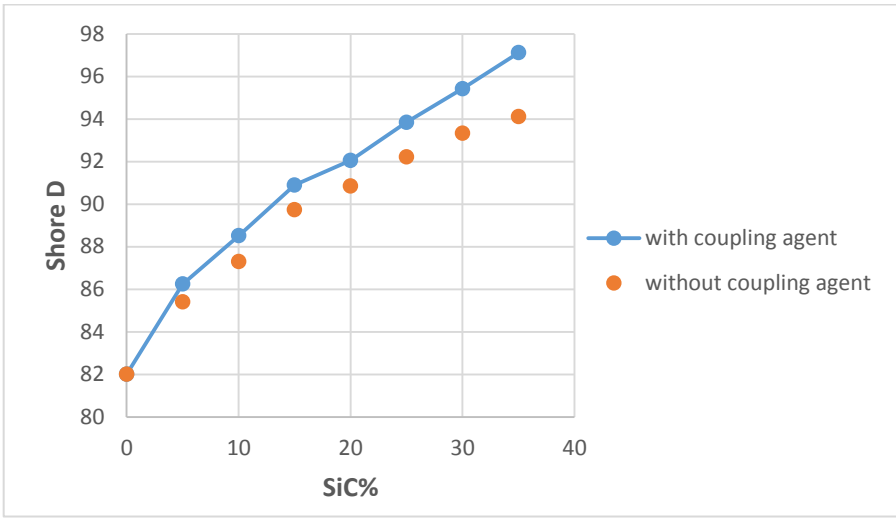
4-2-6- دراسة تأثير إضافة كربيد السيليكون المعالج بعامل الربط السيلاني على قساوة راتنج الإيبوكسي:

يوضح الجدول (9) نتائج اختبار القساوة للعينات المحضرة:

الجدول (9) نتائج تغير القساوة بدلالة نسبة كربيد السيليكون المعالج بعامل ربط سيلاني

رقم التجربة	عدد العينات	نسبة SiC%	متوسط القساوة (Shore D)	النسبة المئوية للتحسن%
1	5	0	82	-
2	5	5	86.24	5.17%
3	5	10	88.51	7.93%
4	5	15	90.89	10.84%
5	5	20	92.05	12.25%
6	5	25	93.84	14.43%
7	5	30	95.42	16.36%
8	5	35	97.11	18.42%

يوضح الشكل (20) تأثير إضافة حبيبات كربيد السيليكون المعالجة وغير المعالجة بعامل ربط سيلاني على قساوة راتنج الإيبوكسي:



الشكل (20) تغير القساوة راتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون المدعم وغير المدعم بعامل الربط السيلاني

نلاحظ من الشكل (20) أن استخدام حبيبات الكربيد المعالجة بعامل ربط سيلاني في المادة المركبة يزيد من نسبة التحسّن في قساوة راتنج الإيبوكسي، وذلك بسبب زيادة متانة المادة المركبة وخصوصاً الطبقات السطحية التي تعبّر عن قساوة هذه المواد.

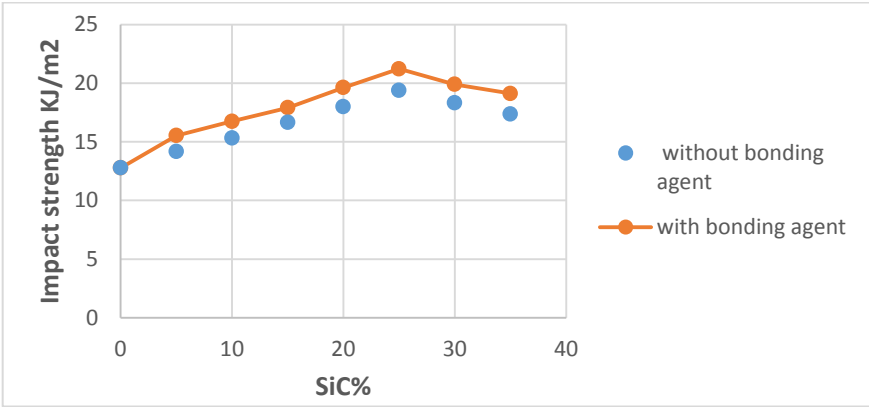
4-2-7- دراسة تأثير إضافة كربيد السيليكون المعالج بعامل الربط السيلاني على مقاومة الصدم لراتنج الإيبوكسي:

يعطي الجدول (10) نتائج تغير مقاومة الصدم لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون في المادة المركبة (إيبوكسي- كربيد السيليكون-عامل ربط سيلاني):

الجدول (10) نتائج تغير مقاومة الصدم لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون المعالج بعامل ربط سيلاني

رقم التجربة	عدد العينات	نسبة SiC%	طاقة الصدم (J)	مقاومة الصدم (KJ/m^2)
1	10	0	0.511	12.775
2	10	5	0.621	15.525
3	10	10	0.670	16.75
4	10	15	0.716	17.9
5	10	20	0.785	19.63
6	10	25	0.849	21.225
7	10	30	0.796	19.9
8	10	35	0.765	19.125

ويبين الشكل (21) تأثير إضافة حبيبات الكربيد المعالجة وغير المعالجة بعامل ربط سيلاني على مقاومة الصدم لبوليمير الإيبوكسي:



الشكل (21) مخطط تأثير إضافة حبيبات الكربيد على مقاومة الصدم لبوليمير الإيبوكسي

تزداد مقاومة الصدم لراتنج الإيبوكسي في حال تدعيمها بحبيبات كربيد السيليكون المعالجة بعامل ربط سيلاني، وذلك أكثر مما هو عليه في حال استخدام حبيبات كربيد لوحدها، حيث بلغت نسبة التحسن في مقاومة الصدم في حالة التدعيم بحبيبات معالجة بعامل ربط سيلاني نسبة 66.14%، أما في حال استخدام حبيبات الكربيد لوحدها فقد بلغت نسبة التحسن 51.77%، ويعزى هذا التحسّن في الخصائص الميكانيكية للإيبوكسي بوجود كربيد السيليكون المعالج بعامل الربط السيلاني، الى تشكل رابطة كيميائية Si–O–Si بين عامل الربط وحبيبات كربيد السيليكون، كما وتتشكل رابطة فيزيائية H–O–H بين عامل الربط وراتنج الإيبوكسي حيث تتفاعل مجموعات الألكوكسي الموجودة في عامل الربط مع مجموعات الهيدروكسيل في الإيبوكسي .

4–2–8– دراسة تأثير إضافة كربيد السيليكون المعالج بعامل الربط السيلاني على معامل الاحتكاك ومعدل الاهتراء لراتنج الإيبوكسي:

يعطي الجدول (11) نتائج تغير معامل الاحتكاك μ ومعدل الاهتراء W للمادة المركبة (إيبوكسيLY5052– كربيد السيليكون– عامل ربط سيلاني) بدلالة نسبة كربيد السيليكون في المادة المركبة:

الجدول (11) نتائج تغير معامل الاحتكاك μ ومعدل الاهتراء W لراتنج الإيبوكسي بدلالة نسبة كربيد السيليكون المعالج بعامل الربط سيلاني

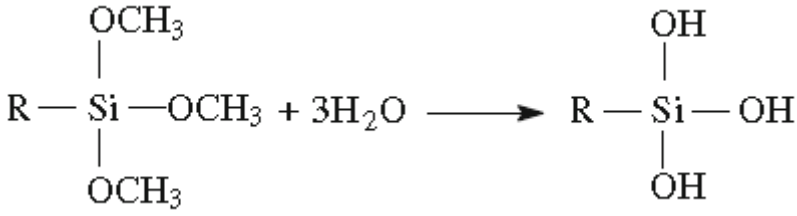
رقم التجربة	عدد العينات	نسبة SiC%	معامل الاحتكاك μ $(\times 10^{-4})$	معدل الاهتراء $W(\times 10^{-4})$ mm^3/Nm
1	10	0	812	55
2	10	5	718	41
3	10	10	668	33
4	10	15	594	27
5	10	20	551	20
6	10	25	469	13
7	10	30	396	8
8	10	35	371	2

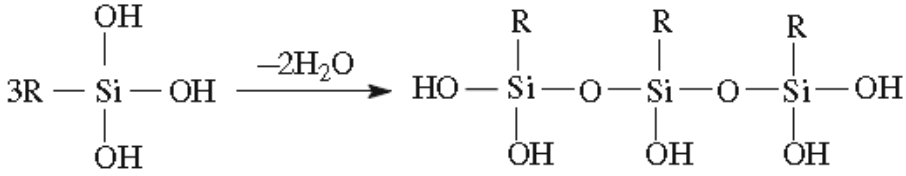
نلاحظ من الجدول (11) الدور الواضح لحبيبات كربيد السيليكون المعالجة بعامل ربط سيلاني في تحسين خصائص مقاومة الاهتراء وخفض معامل الاحتكاك لراتنج الإيبوكسي، وذلك بسبب التحسّن البنيوي في المادة المركبة العائد الى الدور الهام لعامل الربط السيلاني في الجملة.

4-3- آلية التفاعل وتشكل الروابط:

- يتم التعبير عن آلية التفاعلات الحاصلة بالمعادلات التالية [3]:

في البداية تتم عملية الإماهة والتكاثف لعامل الربط بوجود الماء كما في المعادلات التي يوضحها الشكل (22):

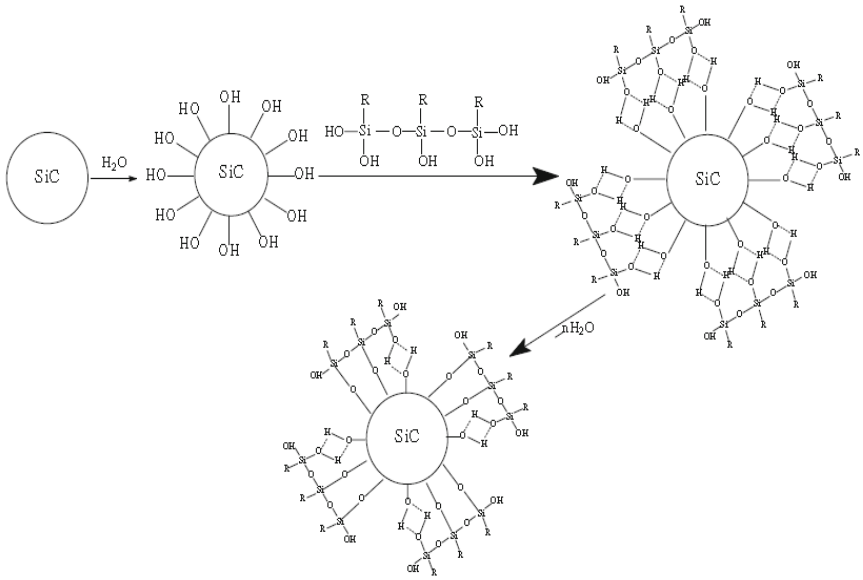




الشكل (22) عمليات الإماهة والتكاثف لعامل الربط بوجود الماء

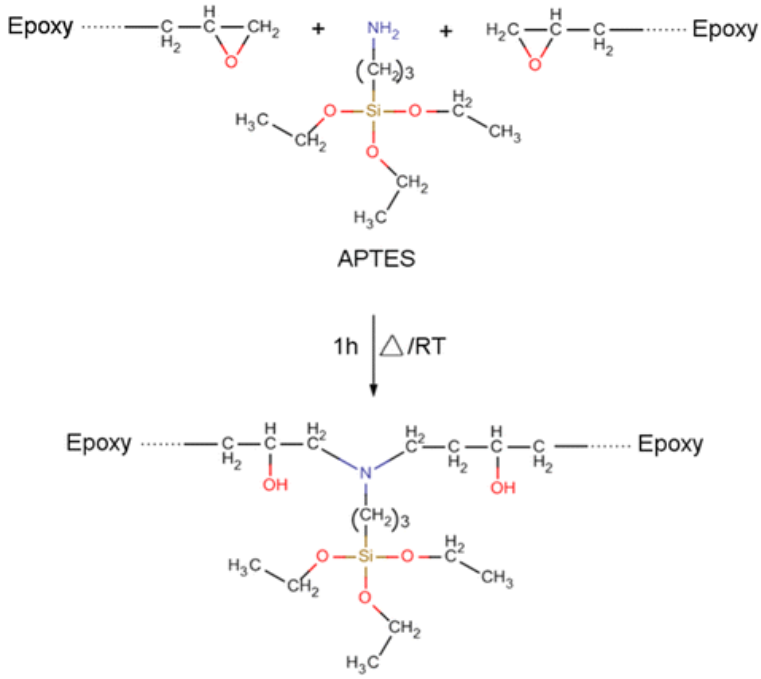
حيث R هي جذر الأمينو بروبيل الموجودة في عامل الربط السيلاني.

● أما آلية تشكل الروابط بين كربيد السيليكون وعامل الربط فتكون وفق نموذج Arkles model كما يبين الشكل (23)[3] :



الشكل (23) آلية تشكل الروابط بين كربيد السيليكون وعامل الربط السيلاني

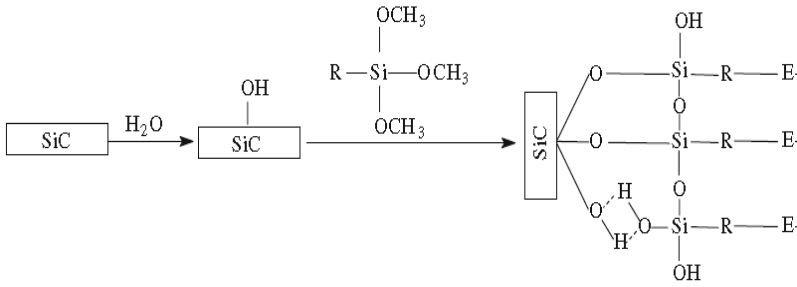
● ويمكن التعبير عن التفاعل الحاصل بين راتنج الإيبوكسي وعامل الربط بالمعادلة التالية كما يوضح الشكل (24)، حيث تتفاعل مجموعات الأمين في عامل الربط مع مجموعات الغليسيديل بيس فينول–A الموجودة في الإيبوكسي:



الشكل (24) التفاعل الحاصل بين راتنج الإيبوكسي وعامل الربط [6]

APTES هو أمينوبروبيل تري ايتوكسي سيلان.

- ويمكن التعبير عن تسلسل التفاعلات بالمجمل كما يوضح الشكل (25): [3]



الشكل (25) تسلسل التفاعلات الحاصلة في جملة (إيبوكسي–كربيد السيليكون– عامل ربط)

حيث **E** هي رمز لراتنج الإيبوكسي.

5- الاستنتاجات:

يبين الجدول (11) مقارنة نتائج الاختبار الميكانيكي للمواد المركبة التي تم تحضيرها وهي:

(إيبوكسي-كربيد السيليكون- عامل ربط سيلاني) و (إيبوكسي-كربيد السيليكون) حيث تبين أن أفضل الخصائص الميكانيكية نحصل عليها من خلال معالجة حبيبات كربيد السيليكون ذات النسبة **25%** في المادة المركبة بعامل ربط سيلاني قبل إدخالها في الجملة وبلغت نسبة التحسّن في معامل يونغ 58.3% باستخدام الحبيبات المعدّلة و48.6% باستخدام الحبيبات الغير معدّلة، أما بالنسبة لمقاومة الشد فبلغت نسبة التحسّن 43.2% باستخدام الحبيبات المعدّلة و29.6% باستخدام الحبيبات الغير معدّلة أما مقاومة الصدم بلغت نسبة التحسّن 66.1% باستخدام الحبيبات المعدّلة و51.7% باستخدام الحبيبات غير المعدّلة، أما بالنسبة للقساوة ومعامل الاحتكاك ومعدل الاهتراء فقد كان التحسّن طردي مع زيادة نسبة حبيبات كربيد السيليكون، حيث بلغت نسبة التحسن(18.4,54.3,96.3%) على الترتيب وذلك باستخدام الحبيبات المعدّلة، و(14.7,52.1,89.1%)على الترتيب باستخدام الحبيبات غير المعدّلة وذلك عند أعلى نسبة تدعيم وصلنا لها من حبيبات الكربيد 35% ويبين الجدول التالي مقارنة ببعض الخصائص وأثر استخدام حبيبات الكربيد المعدّلة بعامل الربط في تحسين الخصائص الميكانيكية:

الجدول (11) مقارنة ببعض الخصائص الميكانيكية للمواد المركبة المحضّرة

المادة / الخاصية	Epoxy5052	Epoxy–25%SiC	Epoxy–silane–25% SiC
E (GPa)	2.28	3.39	3.61
σ_{max}(MPa)	81	105.47	116.03
مقاومة الصدم (kJ/m^2)	12.775	19.38	21.225

6-التوصيات:

- إن هذا البحث فتح طريق عمل متنوع في مجال تحضير مواد مركبة أساسها حاضنة بوليميرية من حيث البحث عن إدخال بوليميرات تلبي الأداء الوظيفي المطلوب من المادة المركبة سواء كان كهربائي أو حراري أو ميكانيكي أو ضوئي ومن البوليميرات المعروفة: الفينوليك (تحمل حراري عالي وخصائص ميكانيكية جيدة)، البولي أنيلين المشاب (خصائص كهربائية ممتازة)، البولي فينيل بوتيرال (خصائص ميكانيكية والتصاقيه جيدة).

- العمل ضمن المجال النانوي لحبيبات مادة التقوية في تدعيم الحاضنة البوليميرية وخصوصاً مع التطور والاهتمام الكبير في هذا المجال.

– البحث عن عوامل ربط أكثر ملاءمة وتوافقية مع الحاضنة البوليميرية المستخدمة فيما يعكس التحسّن في الخصائص المرجوة.

7- المراجع:

1- HULL D. and CLARKE R. 1996 – An introduction to composite materials. Cambridge University Press, Second Edition. NewYork, pp. 326.

2- Naeimirad M . and Esmaeely R. 2015 – Fabrication and characterization of silicon carbide/epoxy nanocomposite using silicon carbide nanowhisker and nanoparticle reinforcements. Journal of Composite Materials, pp:1-13.

3- Gu J., Zhang Q., Dang J., Zhang J. and Chen S. 2009 - Preparation and mechanical properties researches of silane coupling reagent modified β-SiC filled epoxy composites, Polymer Bulletin, Vol. 62, pp:689-697.

4- ARKLES B. 2014 – Silane Coupling Agents Connecting Across Boundaries. Gelest, Third Edition, Morrisville-USA, 76p.

5- Jun-wei G., Qiu-yu Z., Hong-chun L., Jun-ping Z., Jie K., Yu-sheng T., Guang-cheng Z. 2007– Study on structure and mechanical properties of celluloid composites filled with titanate coupling reagent modified nano-β-SiC, Modern Chem Indust, Issue 07, pp:38-41.

6- Gonzales M.G., Cabanelas J.C. and Baselga J. 2012 - Application of FTIR on Epoxy Resins–Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake, Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology, Chapter 13, pp:261-284.