

دراسة خاصية الكلال لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ.م. د. خالد رشاد الراوي أ. د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله

دراسة خاصية الكلال لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ. د. حارث إبراهيم جعفر

قسم الفيزياء ،كلية العلوم ، جامعة بغداد

أ.م. د. خالد رشاد الراوي

قسم الفيزياء ،كلية العلوم للبنات ، جامعة بغداد

هند وليد عبد الله

قسم الفيزياء ،كلية العلوم ، جامعة ديالى

الخلاصة

في هذا البحث تم دراسة سلوك الكلال لراتنج الايبوكسي المدعم بثلاث طبقات من الألياف الكفلر مرة وثلاث طبقات من الألياف الزجاج مرة أخرى وباتجاه (0° - 90°) بطريقة ألحني الدوار وذلك من خلال المنحني (S-N) والذي من خلاله يحدد عمر الكلال وحد الكلال وقوة الكلال للمترابكات .

حضرت العينات بطريقة التشكيل اليدوي من مادة الايبوكسي نوع (Quick mast 105) كمادة أساس في تحضير المادة المترابكة حيث دعم هذا الراتنج بنوعين من الألياف (كفلر-49) والزجاج نوع (woven roving) والمبينة خواصهما في الجدول (1-1) . تم فحص الكلال بتسليط جهد جيبي بسعات مختلفة وبتردد حمل ثابت 15Hz وبانحراف (Deflection) قدره (10mm) وصولاً إلى عدد الدورات حد الفشل . وقد أظهرت النتائج إن للتدعيم دور مهم في زيادة مقاومة الكلال مقارنة بالعينات غير مدعمة هذا من جانب ومن جانب آخر إن العينات المدعمة بألياف الزجاج لها مقاومة كلال وعمر كلال أفضل من العينات المدعمة بألياف الكفلر .

الكلمات المفتاحية: الكلال، راتنج الايبوكسي المدعم، الياف الكفلر، الياف الزجاج، طريقة التشكيل اليدوي، مقاومة الكلال.

The study of fatigue behavior of epoxy composites reinforced by glass and Kevlar fibers

Abstract

Fatigue behavior for three layer glass and Kevlar woven roving ($0^\circ - 90^\circ$) fibers have been studied by rotary bending method by S-N curves these curves have determined fatigue life and fatigue limit and fatigue strength of composite .

The test specimens were prepared by hand lay-up method the epoxy resin used as a matrix type (Quick mast 105) in prepared material composite where reinforced this matrix by two types of fibers(Kevlar -49) and woven roving glass that we can see it in (1-1) table

Sinusoidal wave which is formed of variable stress amplitudes at 15 Hz cycles was employed in the fatigue test and (10 mm) deflection arrival to numbers of cycle failure limit.

The results show us the reinforcement has important act to increased resistance to the fatigue compared with specimens have not reinforcement this side the specimens reinforcement of glass fiber have resistance to fatigue and fatigue life better than the specimens reinforcement of Kevlar fiber .

مقدمة Introduction

نتيجة للتطور الصناعي والتكنولوجي الكبير الذي شهده العالم في السنوات الأخيرة وتعويسا للمواد المستخدمة في الصناعات المختلفة كالمعادن والسبائك، اكتسبت المواد المتراكبة المدعمة بالألياف الكثير من الاهتمام والانتباه بسبب الاستعمالات العديدة منها في الفضاء وصناعة السيارات والطائرات والصواريخ والزوارق وكذلك في الاستخدامات البحرية والطبية والكثير من المجالات لما تتمتع به هذه المواد من خصائص ميكانيكية عالية وخفة وزنها ومقاومتها للظروف البيئية المختلفة بحيث يمكن استخدامها في مختلف التصاميم الهندسية [1] .

إن أهم الخصائص الميكانيكية التي تميز المواد المتراكبة عن المعادن هي نسبة الصلابة إلى الكثافة (stiffness to density ratio) ونسبة المقاومة إلى الكثافة (strength to density ratio) بالإضافة إلى مقاومتها العالية للكلل [2] .

دراسة خاصة الكلال لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ.م.د. خالد رشاد الراوي أ.د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله

لقد أصبحت المواد المتراكبة أكثر المواد المستخدمة في صناعة الطائرات حيث دخلت متركبات (ايبوكسي اراميد - ايبوكسي زجاج) في صناعة عدد كبير من أجزاء الطائرات مما أدى إلى تقليل وزن الطائرة وأصبحت اقتصادية أكثر [3].

جدول (1-1) خصائص الألياف (الكفلر 49 - الزجاج) [4]

Fiber	Density (g/cm ³)	Diameter (μm)	Tensile Strength (GPa)	Young's Modulus (E,GPa)	Fracture Strength (σ,GPa)
E-glass	2.6	11	3.33	76	2
Kevlar49	1.45	12	3.26	130	3

الجانب النظري

المواد المتراكبة Composite material

المواد المتراكبة هي مواد تتكون من عنصرين أو أكثر تخلط بطريقة بحيث ينتج منها ارتباط ميكانيكي أو التصاق في مابين المواد المكونة ، فالمتراكب البوليمري يتكون من عنصرين أساسيين هما [5,6] :

1- المادة الأساس (Matrix)

وتعمل على ضم وربط مادة التقوية (كألياف و الدقائق) حيث تلتصق معها وبقوة تعمل على تثبيتها وتحافظ عليها من التلف ، والمادة الأساس إما تكون معدنية أو لدائنية أو سيراميكية . وتعتبر اللدائن من أكثر الأنواع الشائعة الاستخدام وذلك لما تمتلكه من خواص ميكانيكية جيدة والمواد الأساسية الداخلة في صناعة اللدائن هي الراتنجات (Resins) ومن أشهر الراتنجات صناعياً راتنج الايبوكسي والمستخدم في بحثنا الحالي

دراسة خاصة الكلال لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ.م.د. خالد رشاد الراوي أ.د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله

• راتنج الايبوكسي (Epoxy Resin)

وهي البوليمرات المتصلدة بالحرارة (Thermosetting Resins) وتكون بهيئة سوائل معقدة ويمكن تحويلها إلى مادة صلبة بطرائق فيزيائية وكيميائية ويعد راتنج الايبوكسي من أهم أنواع الراتنجات المستخدمة في الصناعة ويستخدم في معالجة تصلدها البولي امين العضوي لتحويلها إلى راتنج لدن يتصلد بالحرارة . [6]

ويعد من المواد المتعددة الاستعمال واهم استخداماتها في التغطية والتي تعطي متانة ومطاطية ومقاوميه للكيماويات و كذلك من أهم مميزاته انكماش منخفض وقوة كلال جيدة معدل زحفه واطئ وحماية تآكل جيدة و تعددية الاستعمال في المعالجة. مما لا يمكن الوصول إليه من أي بوليمر آخر وكذلك يستعمل للطلاء واللواصق [8]

و تمتاز المتراكبات المشكلة لراتنج الايبوكسي بخاصيتها الجيدة للعزل الكهربائي لقلة الالكترونات الحرة بسبب التركيب الكيميائي للراتنجات، ولكن مرونتها الواطنة و هشاشتها العالية وحساسيتها للرطوبة أدت إلى تقييد في استعمالها في هذا المجال وهناك طريقتان لتحضير راتنج الايبوكسي الأولى بوساطة تفاعلات التكثيف (Condensation) والثانية بالإضافة (Addition)، فباستخدام تفاعل التكثيف والتي هي أكثر الطرق شيوعاً لتحضير راتنج الايبوكسي وهي بتفاعل مركب (Epichlorohydrin) مع (Bisphenol A) ومن مميزات هذا التفاعل هو إجراء المعالجة الحرارية بدرجة حرارة (°C) 120-175 وبدون نواتج عرضية . [6]

• مواد التقوية Reinforcement Materials

وهي المواد التي تعمل على تقوية المادة الأساس، وقد تكون مادة سيراميكية أو معدنية أو بوليمرية وتتصف بصورة عامة بمعامل قطع ومرونة عاليتين عالية، أما مطيائيتها فهي مختلفة فقد تكون عالية أو منخفضة اعتماداً على نوع المادة والغرض المستعمل لأجله، وتصنف اعتماداً على الشكل والإبعاد إلى : ألياف (Fibers) أو دقائق (Particles) أو قشور (Flakes) أو بهيئة شبكة من المواد [10] .

• المتراكبات الليفية

تتميز المواد المتراكبة المقواة بالألياف بأدائها العالي وذلك بسبب امتلاكها معاملات ميكانيكية عالية من مرونة وشدة في المادة الأساس التي تعمل على توزيع الحمل على الألياف ، إضافة إلى منع نمو الشقوق الصغيرة (Cracks) التي تحدث نتيجة الاجهادات الميكانيكية وكذلك مقاومتها للظروف البيئية وتحملها الحراري ، وتختلف أشكال الألياف فمنها : متقطعة ، مستمرة ، أو محاكاة بشكل حصيرة . يمكن تصنيف المواد المتراكبة المدعمة بالألياف إلى :-

- متراكبات ذات طبقة واحدة Single- Layer

- متراكبات متعددة الطبقات Multi layer

دراسة خاصة الكلال لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ.م. د. خالد رشاد الراوي أ. د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله

فيما يخص النوع الأول تتكون المتراكبات من الطبقات المميزة وكل واحدة منها لها الخصائص والاتجاه نفسيهما فالمتراكبات التي تصنع من الألياف المقطعة (Discontinuous Fiber) أو من الألياف المستمرة (Continuous Fiber)، والأخير تكون فيه الألياف مرتبة باتجاه واحد يكون ما يدعى بالمتراكبات ذات الاتجاه الواحد (Unidirectional Composite) أما النوع الثاني (Multilayer) فإنها الأكثر استخدام في التطبيقات العملية وتتكون من عدة طبقات من المادة المتراكبة المدعمة بالألياف، ومن أكثر المواد المتراكبة شيوعاً في الاستخدام ألياف الزجاج، الكفلر، الكربون والبورون كألياف عضوية بالإضافة إلى الألياف المعدنية مثل ألياف النحاس والحديد والألمنيوم. [11]

العوامل المؤثرة في سلوك المتراكبات الليفية :

1- الكسر الحجمي

2- طول الليف الفعال

3- توجيه الألياف

4- السطح البيني

• اختبار الكلال Fatigue Test

نظراً للتطور التكنولوجي الحديث والحاجة إلى إدخال مواد جديدة في الصناعة ذات خواص ميكانيكية عالية أفضل أو تضاهي خواص المعادن ومنها المواد المتراكبة التي تمتلك مقاومة عالية للكلل الذي يعتبر من المشاكل الخطرة للفشل الذي يحدث فجأة كما هو الحال في المعادن حيث يُعتبر الكلال أحد أنواع الفشل الذي يحدث للأجزاء الهندسية التي تعاني من الإجهاد الديناميكي والمتقلب كما في الطائرات، السفن والجسور والأجزاء الهندسية الأخرى .

إن سلوك الكلال يعبر عنها غالباً بمصطلح بأنها عدد الدورات المؤدية للفشل عند المستويات الإجهاد العالية ، ويعبر عن سلوك الكلال من خلال منحنى (الإجهاد - عدد الدورات)

(The S/N Curve)

ويعرف مستوى الإجهاد الذي لا يحصل عنده الفشل وإن استمر عدد الدورات إلى ما لا نهاية بحد الكلال (Fatigue Limit) ، لذا يمكن تحديد حد الكلال من خلال اختبار عدة نماذج تحت قيم ساعات إجهاد مختلفة (ثابتة أو متناوبة)

قوة الكلال (Fatigue strength) تعرف بأنها أقصى عدد دورات الإجهاد يمكن أن تتحملها المادة [12] .

دراسة خاصة الكلال لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ.م.د. خالد رشاد الراوي أ.د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله

عمر الكلال (Fatigue Life) هو العدد الكلي لدورات الكلال إذا كانت المادة موضوعة تحت (انفعال أو إجهاد) دوري (stresses or strained) cycles [13].

حيث تعتمد ظاهرة الكلال في المواد المتراكبة المدعمة بالألياف على عدة عوامل هي (الانحراف الناتج من عزم الانحناء، نوع الألياف، اتجاه الألياف، الكسر الحجمي و عدد طبقات الألياف) وهناك عوامل أخرى منها (الرطوبة، درجة الحرارة، الحمل المسلط، استمرارية الحركة) وغيرها من العوامل الأخرى [14].

الجزء العملي (Experimental Part)

المادة الأساس (Matrix Materials)

استخدم في هذا البحث راتنج الايبوكسي (Quick mast 105) الأردني المنشأ حيث يتصلب الايبوكسي بإضافة مادة مصلدة (Hardener) وبنسبة 3:1 من كمية الايبوكسي، أن مدة التصلب لراتنج الايبوكسي المستعمل تستغرق أكثر من 3 ساعات عند درجة حرارة الغرفة ثم يترك لمدة أسبوعين لغرض إكمال المعالجة Full curing وبعد هذا يتم تقطيع العينات ضمن المواصفات القياسية للاختبارات المستخدمة خلال هذا البحث. وكما موضح في الشكل (1-1) إما المصلد المستخدم فهو مادة سائلة تمتاز بلزوجتها الواطئة جداً وتكون ذات لون اصفر شفاف. إذ إن المصلد يضاف إلى الراتنج مما يؤدي إلى حدوث تفاعل بينهما عند درجة حرارة الغرفة.

مواد التدعيم (Reinforcement Materials)

لقد استخدمت نوعين من الألياف كمواد للتدعيم وهي

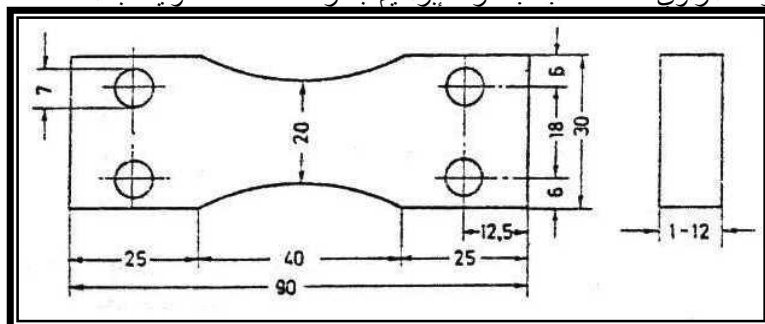
- 1- ألياف الكفلر 49- والمحاكة بشكل حصيرة (Woven Roving).
- 2- ألياف الزجاج نوع E-Glass بشكل حصيرة (Woven Roving).

• تحضير العينات

حضرت النماذج المدعمة بثلاث طبقات من ألياف الكفلر مرة و ثلاث طبقات ألياف الزجاج مرة أخرى وبكسر حجمي 25% من المادة الأساس حيث تم تقطيع العينات كما في الشكل أدناه الذي يوضح عينة اختبار الكلال وحسب التعليمات الواردة في دليل الجهاز، حيث تم تقطيع العينات باستخدام منشار ترددي وبعد عملية التقطيع تم تنقيب العينات باستخدام مثقب كهربائي.

دراسة خاصية الكلال لمترابكات الایبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ.م.د. خالد رشاد الراوی أ.د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله



شكل (1-1) نموذج اختبار الإعياء بالأبعاد في mm .

حيث نُفِّدَ اختبار الكلال بإخضاع جميع النماذج إلى تردد حمل ثابت مقداره (15 Hz) وبثلاث قيم للانحراف (U=10 mm) لعينات الایبوكسي بدون تدعيم ، مدعمة بألياف الكفلر مرة و مدعمة بألياف الزجاج مره أخرى . وباستخدام ماكينة الكلال من نوع التبادلي (PWON) والمصنع من قبل شركة (CARL SCHNCH AG) ألماني المنشأ وصمم هذا الجهاز لتسليط قوة الكلال لعينات مصنوعة من الفولاذ (Steel) ومواد غير فولاذية وأخرى مصنعة .

هذه الماكينة تعمل بواسطة اختبار الانحناء المتناوب (Fatigue Machine Alternating Bending) للنماذج المستوية ومكونات هذه الماكينة موضحة في الشكل (1-2) وان إجهاد الانحناء (σ) للنايظ يحدد من العلاقة :-

$$\sigma = \frac{m_b}{W} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$W = \frac{b^2 h}{6} \quad \dots\dots\dots(2)$$

عزم الانحناء m_b :

عرض خصر العينة b :

سمك العينة h :

دراسة خاصة الكلال لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ.م.د. خالد رشاد الراوي أ.د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله



شكل (1-2) جهاز اختبار الكلال

مناقشة النتائج

وتعد مشكلة الكلال أحد أنماط الفشل الأكثر شيوعاً في كل المواد الهيكلية، يضمنها المتراكبة البوليمرية التي تخضع في أغلب الأحيان إلى تحميل دوري، حيث إن آلية فشل الكلال معقدة جداً بسبب خصائص (anisotropic) في قوة وتصلب [15].

في المواد المتراكبة الكلال يسبب ضرر شامل في كافة أنحاء حجم النموذج وهذا يختلف عن ما هو في المعادن حيث يكون الفشل بشق منفرد يؤدي إلى انهيار النموذج [16]

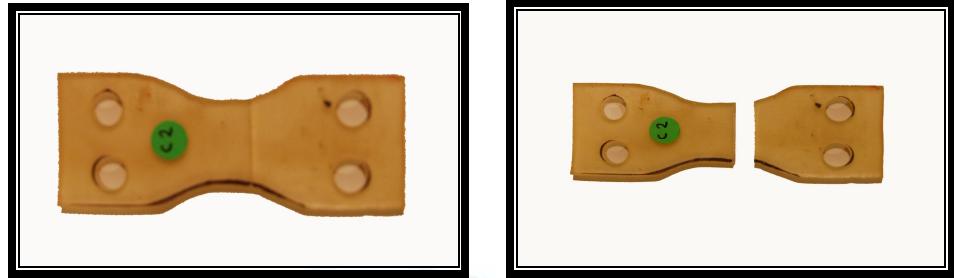
1- عينات الايبوكسي قبل التدعيم

لقد أظهرت النتائج والفحوصات المختبرية لراتنج الايبوكسي الغير مدعمة والمسلط عليها حمل خارجي بانحراف قدره (10 mm) عن مستوى العينة الثابتة إجهاده (25 MPa) بعدد دورات (6.92×10^4) موديا إلى كسر العينة ويعزى سبب ذلك إلى إن راتنج الايبوكسي يتميز بسلاسل جزيئية طويلة والتي تتشابك مع بعضها عند التصلب، حيث تلعب تلك النظامية والتوجيه في السلاسل ودرجة التشابك دور مهم فعند تسليط حمل خارجي يؤدي إلى تمدد تلك السلاسل عند الأحمال العالية و خلال الفحص سيزداد المدى المؤثر على العينة لقوة (الشدة _ الانضغاط) الذي يعجل في تكوين الشقوق الأولية في راتنج

دراسة خاصية الكلال لمترابكات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ.م. د. خالد رشاد الراوي أ. د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله

الايبوكسي بسبب الزيادة الموضعية الحادة في الطاقة الداخلية وبالتالي يحدث انهيار في المناطق التي تتجاوز فيها طاقة التقلبات الحرارية طاقة الأواصر الكيميائية فيحدث الكسر [17].



الصور الفوتوغرافية لمترابكات الايبوكسي بعد اختبار الكلال.

2 - عينات الايبوكسي المدعمة بالألياف

أ- العينات المدعمة بألياف الزجاج

أظهرت النتائج المخبرية لهذه العينة من خلال المنحني (S-N) تحمل إجهاد ابتدائي قدره (50MPa) والمبين من خلال المنحني A (1-3)، وباستمرار الإجهاد الدوري المسلط حيث نلاحظ بدءاً عملية الضرر بابتداء شقوق صغيرة (micro cracks) للراتنج وذلك بعمر كلال (Fatigue Life) قدره 13×10^6 دورة ونلاحظ في خسر العينة ظهور بقع بيضاء اللون، ويرجع سبب ذلك إلى إضعاف الترابط بين الألياف والراتنج (fiber/matrix bonding).

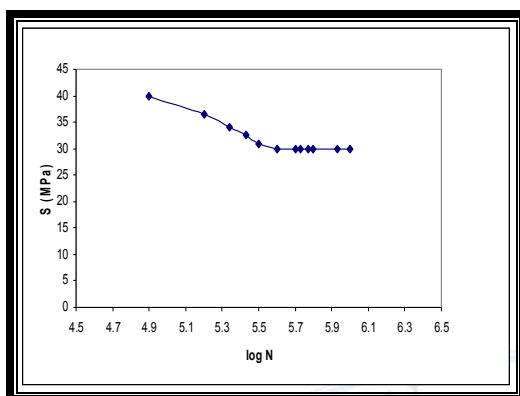
إن دور الألياف يبين مدى مقاومة المترابك للشقوق ومقاومة استمرار الشقوق للمترابك ككل ويرجع ذلك امتلاك ألياف الزجاج سطح بيني ممتاز. [18]

ب- العينات المدعمة بالألياف الكفلر-49

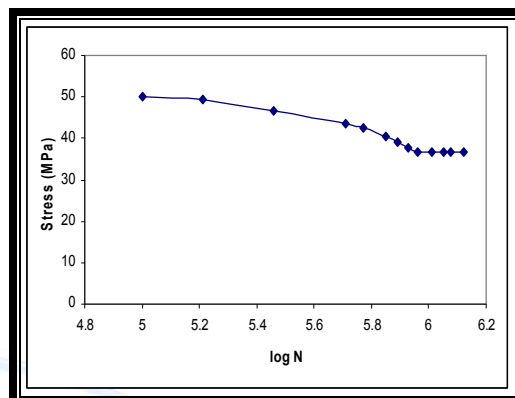
حيث أظهرت نتائج المنحني (S-N) تحمل إجهاد ابتدائي قدره (40 MPa) وباستمرار الإجهاد الدوري المسلط لهذه العينات نلاحظ إن هنالك انحدار في السلوك وهذا واضح من خلال الشكل B (1-3) ومن ثم الثبات بعدد دورات تجاوز 10^6 دورة حيث تقوم الألياف بتوزيع الإجهاد بالتساوي عبر منطقة السطح البيني (interface) بين الألياف والراتنج وذلك يعتمد على قوة التماسك بين الألياف والراتنج رغم إن العينة تحت حمل دوري متغير حيث إن الطبقات تعاني انزلاق واحتكاك (slipping and friction) مع بعضها خلال الفحص الذي يسبب انسلاخاً في الطبقات السطحية في الاجهادات العالية (delamination). [18]

دراسة خاصية الكلال لمترابكات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ.م. د. خالد رشاد الراوي أ. د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله



B



A

الشكل (1-3) (S-N) منحنى لمترابك الايبوكسي المدعمة بثلاث طبقات من الألياف

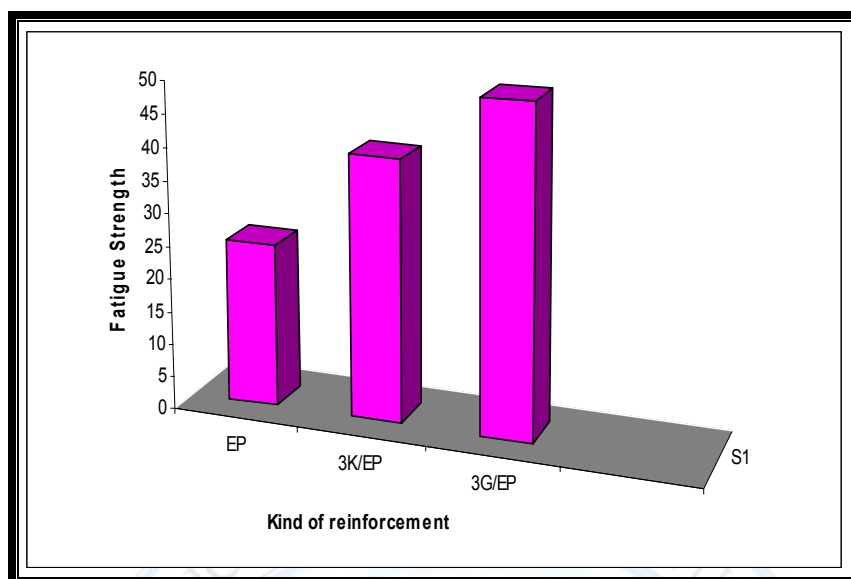
A – ألياف الكفلر B – ألياف الزجاج

الاستنتاجات Conclusions

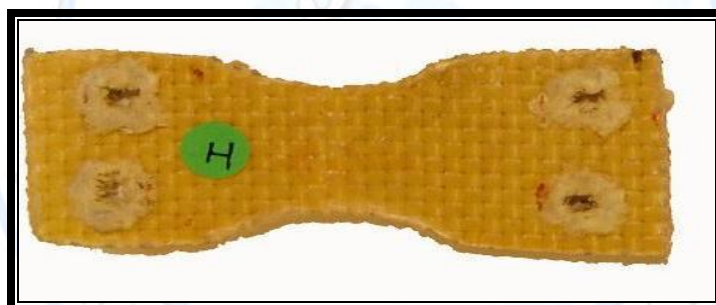
- 1- لوحظ تأثير التدعيم بالألياف في تحسين مقاومة الكلل مما يؤكد التأثير الايجابي لعملية التدعيم .
- 2- من خلال الشكل (1-4) إن ألياف الزجاج أعلى قوة كلل (fatigue strength) من ألياف الكفلر.
- 3- هنالك انحدار في المنحني بالنسبة لألياف الكفلر قبل الوصول إلى مرحلة الثبات بينما في العينات المدعمة بألياف الزجاج هنالك نوع من الثبات والاستقرار قبل الثبات والذي يتمثل ب (Fatigue Life) ، ويعود ذلك إلى
 - امتلاك ألياف الزجاج سطح بيني أفضل من السطح البيني لألياف الكفلر
 - الملازمة الكيميائية العالية لألياف الزجاج حيث تطلى سطوح الألياف بمواد كيميائية تساعد على الترابط الجيد بين الراتنج والليف في منطقة السطح البيني (Interface) .
- 4- نلاحظ من خلال المنحني (S-N) إن قيمة (Fatigue Life) للعينات المدعمة بألياف الزجاج أعلى من العينات المدعمة بالألياف الكفلر بشكل بسيط نسبياً مما يدل على العمر الطويل في الأداء لكلا الليفين .

دراسة خاصية الكلال لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

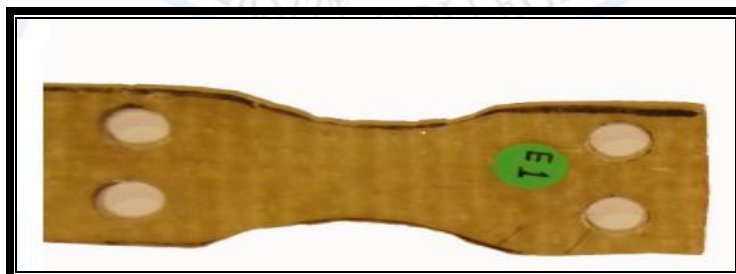
أ.م.د. خالد رشاد الراوي أ.د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله



الشكل (1-4) قيم أقصى إجهاد لمتراكب الايبوكسي قبل وبعد التدعيم بألياف الكفلر والزجاج لقيم انفعال (def=10mm)



(A) الصور الفوتوغرافية لمتراكب الايبوكسي المدعمة بثلاث طبقات من ألياف الكفلر بعد اختبار الكلال



(B) الصور الفوتوغرافية لمتراكب الايبوكسي المدعمة بثلاث طبقات من ألياف الزجاج بعد

اختبار الكلال

دراسة خاصة الكلال لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ.م.د. خالد رشاد الراوي أ.د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله

المصادر Reference

- 1-Michael F.Ash & David R.H. Jones " Engineering Materials 2" Cambridge University , England 1999 .
- 2- James F.Shackelford " Introduction Material Science for Engineers " Califon University by Peason Enduction 2009 .
- 3- خليل ثابت الراوي " تأثير الكسر الحجمي على الخواص الميكانيكية والحرارية لمادة وأخرى هجينة " رسالة ماجستير ، الجامعة التكنولوجية 2000 .
- 4- Hull D. & Clyne T.W., " An Introduction to Composite Materials", 2nd edition, Cambridge University Press, Great Britain (1996).
- 5- [http : // WWW . Performance Composites .Com](http://WWW.PerformanceComposites.Com) " Fiber Glass & Composite Material Design Guide " 2010
- 6- M. Biron " Thermo sets And Composites " Elsevier Science Ltd ,2003
- 7- Joel R .Fried " Polymer Science And Technology " 2Edition ,2009 .
- 8- [http : // WWW.dhs.ca.gov/ohb/HESIS/epoxy .htm](http://WWW.dhs.ca.gov/ohb/HESIS/epoxy.htm) 2008
- 9- S.C.Sharma " Composite Material " Narasa Pub. House ,2000.
- 10 - P.K. Mallick " Fiber Reinforced Composite " 3rd Edition ,Taylor & Francis Group ,LLC, 2008 .
- 11- William D. Callister,Jr, " Material Science & Engineering An Introduction " John Wiely & Sons, Inc., (USA) ,2010 .
- 12-Bryan Harris," Fatigue In Composites " CRC Press, CambridgeEngland , (2003) .
- 13- John C. R. & Donald R.A., " Materials Science, The Science & Engineering of Materials", 4th edition, University of Pittsburgh,PA, Brooks/Cole (Thomson Learning), (2003).

دراسة خاصية الكلال لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بألياف الكفلر والزجاج

أ.م.د. خالد رشاد الراوي أ. د. حارث إبراهيم جعفر هند وليد عبد الله

14- David Roylance " Introduction To Composite Materials " Institute of Technology Cambridge 2000 .

15- Sunil Singh &Emile Greenholgh " Delamination Growth In Epoxy _ Matrix Composites Under Cyclic Loading " 8th European Conference Of Composite Materials , Italy , June 1998

16 احمد فرحان احمد الجنابي " دراسة تأثير إضافة الجسيمات على خاصية الكلال لراتنج الايبوكسي " رسالة ماجستير في علوم الفيزياء ، جامعة بغداد ، 2005 .

17- A. Bezazi, A. El Mahi, J.-M. Berthelot, A. Kondratas "Investigation of Cross-Ply Laminates Behavior in Three Point Bending Tests. Part II: Cyclic Fatigue Tests " ISSN 1392-1320 MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA). Vol. 9, No. 1. 2003.

18 - K. J. Majeed "Fatigue Behavior of E-glass Fibers/EpoxyComposites" Ph. D. Thesis, University of Baghdad, Iraq, 2005