



جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة بابل - كلية الهندسة
قسم هندسة المواد

تأثير تحفير الألياف على الخواص الميكانيكية للمواد المركبة الناتجة

رسالة تقدم بها

ذوالفقار كريم مزعل

إلى كلية الهندسة - جامعة بابل

وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير في علوم هندسة المواد

١٤٢٧ هـ

٢٠٠٦ م



إلى ينبوع المحبة والتضحية..... والدتي

إلى البسمة المشرقة في دنياي والدي

إلى من أزرني في هموميأصدقائي

أهدي ثمرة جهديحباً ووفاءً

ذوالفقار

توصية الأساتذة المشرفين

نشهد بان إعداد هذه الرسالة جرى تحت إشرافنا في قسم هندسة المواد – كلية الهندسة – جامعة بابل وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير في تخصص هندسة المواد .

التوقيع :

الاسم : د. حيدر عبد الحسن

المرتبة العلمية : أستاذ مساعد

التاريخ :

التوقيع :

الاسم : د. جليل كريم احمد

العداري

المرتبة العلمية : رئيس باحثين

التاريخ :

توصية رئيس القسم

إشارة إلى توصية الدكتور حيدر عبد الحسن العذاري والدكتور جليل كريم احمد
أحيل هذه الرسالة إلى لجنة المناقشة لدراستها وبيان الرأي فيها .

التوقيع :

الاسم : د. فاضل محمد حسون

المرتبة العلمية : أستاذ مساعد

التاريخ :

قرار لجنة المناقشة

نشهد بأننا أعضاء لجنة المناقشة اطلعنا على الرسالة الموسومة (تأثير تحفير الألياف على الخواص الميكانيكية للمواد المركبة الناتجة) , وقد ناقشنا الطالب الذي أعدها (ذوالفقار كريم مزعل) في محتوياتها وفيما له علاقة بها ونقر بأنها جديرة لنيل شهادة الماجستير في هندسة المواد .

التوقيع : التوقيع :

الاسم : د. جليل كريم احمد الاسم : د. حيدر عبد الحسن العذاري

المرتبة العلمية : رئيس باحثين المرتبة العلمية : أستاذ مساعد

التاريخ : التاريخ :

التوقيع :

الاسم : د. قحطان الخزرجي

المرتبة العلمية : أستاذ

التاريخ :

التوقيع : التوقيع :

الاسم : د. علاء محمد حسين الاسم : د. نجم عبد الامير سعيد

المرتبة العلمية : أستاذ مساعد المرتبة العلمية : مدرس

التاريخ : التاريخ :

مصادقة رئيس قسم هندسة المواد

أ.م.د. فاضل محمد حسون

مصادقة عميد كلية الهندسة

أ.د. عبد الواحد كاظم راجح

شكر وتقدير

بعد الانتهاء من متطلبات هذا البحث أشكر الله عز وجل على توفيقه لي في إنجازه ، كذلك أتقدم بجزيل الشكر وفائق التقدير إلى أستاذي الفاضلين الدكتور جليل كريم احمد والدكتور حيدر عبد الحسن العذاري على إشرافهما على بحثي وما أبدياه من جهود متميزة ومتواصلة وبشكل فعّال في إغناء هذا البحث وإخراجه إلى حيز الوجود ، سائلاً المولى تبارك وتعالى أن يوفقهما في خدمة البحث العلمي في قطرنا العزيز.

كما وأشكر كل من منتسبي قسمي هندسة المواد والهندسة المدنية والورش الهندسية – جامعة بابل ومنتسبي قسم هندسة الإنتاج والمعادن – الجامعة التكنولوجية كما وأقدم شكري إلى منتسبي قسم علوم الحياة – جامعة بابل فضلاً عن منتسبي قسم المكائن والغزل – معهد التقني بابل لما قدموه من عون كبير وإتاحتهم الفرصة في استخدام المختبرات المتوفرة لديهم .

الباحث

المحتويات

Contents

I	.....	قائمة الأشكال
V	.....	قائمة الجداول
VII	.....	الخلاصة

١ الجزء النظري

٢	.....	١-١ المقدمة
٣	.....	١-٢ المواد الأساس
٥	.....	١-٣ ألياف التقوية
٧	.....	١-٤ المواد المركبة البوليمرية المقواة بألياف الزجاج
١٠	.....	١-٥ الربط بين الألياف والأرضية
١٣	.....	١-٦ المعاملة السطحية
١٤	.....	١-٧ التحفير
١٨	.....	١-٨ العوامل المؤثرة على معدل التحفير الرطب
٢٠	.....	١-٩ ألياف الزجاج
٢١	.....	١-١٠ تحفير الألياف

٢ البحوث والدراسات السابقة

٢٨	.....	٢-١ البحوث والدراسات السابقة
٣٢	.....	٢-٢ ملخص البحوث السابقة

٣٢ ٢-٣ هدف البحث الحالي

٣ الجزء العملي

٣٥ ٣-١ المقدمة

٣٥ ٣-٢ المواد المستخدمة

٣٦ ٣-٣ الأجهزة والمعدات المستخدمة في البحث الحالي

٤٠ ٣-٤ النماذج والاختبارات المعتمدة في الدراسة الحالية

٤٠ ٣-٤-١ نماذج الألياف المحفرة واختباراتها

٤٦ ٣-٤-٢ نماذج الاختبارات الميكانيكية للمواد المركبة

٤ النتائج والمناقشة

٥٣ ٤-١ المقدمة

٥٣ ٤-٢ تأثير محلول التحفير (كحول مثيلي + هيدروكسيد الصوديوم)

على الياف الزجاج .

٥٥ ٤-٣ نتائج اختبار فقدان بالوزن

٥٩ ٤-٤ تأثير إضافة هيدروكسيد الصوديوم إلى محلول التحفير

٦٠ ٤-٥ تأثير محلول التحفير على عامل الربط

٦١ ٤-٦ نتائج التصوير المجهرية

٧١ ٤-٧ نتائج اختبار الشد للألياف

٧٣ ٤-٨ نتائج اختبار القص البيني

٧٦ ٤-٩ نتائج اختبار الانحناء للمواد المركبة

٧٨ ٤-١٠ نتائج اختبار الشد للمواد المركبة

٥ الاستنتاجات والتوصيات

٨٣ ٥-١ الاستنتاجات

٨٥ المصادر

٩١ الملحق (B) الملحق (A)

٩٢

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

((یرفع اللّٰهُ الذّٰینَ اٰمنوا مِنکُمْ والذّٰینَ

اوتوا العِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللّٰهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِیْرٌ))

صدق اللّٰهُ العلی العظیم

المجادلة (II)

Republic of Iraq
Ministry of Higher Education
and Scientific Research
College of Engineering
Materials Department



The Effects of Etching of Fibers on The Mechanical Properties of The Resulting Composite Materials

A Thesis

**Submitted to the College of Engineering of the
University of Babylon in Partial Fulfillment
of the Requirements for the Degree of Master
of Science in Materials Engineering**

By

ThoalFegar Kareem Mezel

١٤٢٧ A. H.

٢٠٠٦ A. D.

Abstract

The mechanical properties of fibers - reinforced composite materials depend on bonding strength between fibers and matrix because the good bonding between fibers and matrix allows to transfer the applied load from the matrix to fibers . Improving the bonding strength can be achieved by surface treatment of fibers . Etching is one of the methods of this treatment . Several searches and studies are applied to knowledge the etching effects on physical and mechanical properties of fibers and that of composite materials which reinforced with them .

This search aims to : the wet etching for the glass fibers by using two solution , first ($\text{CH}_3\text{OH} + \text{NaOH}$) and the second ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) to get pits on surface fibers to increase the surface roughness subsequently increases the bonding between fibers and matrix . The effect studying of glass fibers etching by using first solution on tensile strength of it . On the mechanical properties (tensile and bending) for composite materials matrix identity from unsaturated polyester which reinforced by etched glass fibers . On debonding force between etched fibers bundle and drop from Unsaturated polyester .

Glass fibers bundles of type (E-glass) treated by both of etching solution first and second for weight loss test and microscopic Photographing , also bundles of glass fibers treated by first etching solution to tensile test for fibers and interfacial shear test between fibers and drop from unsaturated polyester , add on mat of glass fibers treated by first etching solution after samples affectation from composite materials matrix identity from unsaturated polyester which reinforced by (20 % wt) of etched glass fibers to both tests tensile and bending of composite materials .

Microscopic Photographing has been made for untreated glass fibers and treated glass fibers chemically and thermally , weight loss test for treated fibers by etching two solution first and second , tensile test of treated fibers by first etching solution , Both tests of bending and tensile of composite materials that have matrix from unsaturated polyester reinforced with etched glass fibers by first etching solution and interfacial shear test between bundle of

etched glass fibers by first etching solution and drop from unsaturated polyester .

The results have shown etching happened for treated glass fibers by the solution ($\text{CH}_3\text{OH} + \text{NaOH}$) or the treatment by solution ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) . Increasing of weight loss proportion of treated fibers by the second etching solution comparatively with weight loss proportion of treated fibers by first etching solution . The weight loss proportion of fibers increased with increasing temperature and treatment period and weight proportion increasing of etching solution to fibers . The etched fibers by first etching solution and immersed in unsaturated polyester , drops of polyester hungs on all out the surface which indicates increasing of bonding between the etched fibers and matrix . Decreasing the values of tensile strength and Modulus of Elasticity of etched fibers comparatively with its values of untreated fibers and this Decreasing increase with increasing of temperature and treatment period . Increasing of debonding force magnitude between etched fibers bundle and drop from unsaturated polyester and the treatment under temperature (30°C) for (3 days) gives the highest magnitude of debonding force . Increasing of flexural rupture strength of composite materials samples that reinforced by etched glass fibers and the treatment under temperature (30°C) for (3 days) gives the highest of flexural rupture strength . Increasing of tensile strength and Modulus of Elasticity of composite materials samples that reinforced by etched glass fibers and the treatment under temperature (30°C) for (3 days) gives the highest of tensile strength and the treatment under temperature (30°C) for (3 days) gives the highest of ($E_{\text{composite of reinforced with etched fiber}} / E_{\text{composite of reinforced with untreated fiber}}$) .

الخلاصة

تعتمد الخواص الميكانيكية للمواد المركبة المقواة بالألياف على مقاومة الربط بين الألياف والأرضية لان الربط الجيد بين الألياف والأرضية يسمح لانتقال الحمل المسلط من الأرضية إلى الألياف , ويتم تحسين مقاومة الربط من خلال المعاملة السطحية للألياف , فالتحفير احد أساليب هذه المعاملة وعليه جرت الكثير من البحوث والدراسات لمعرفة تأثير التحفير على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للألياف والخواص الميكانيكية للمواد المركبة المقواة بتلك الألياف .

يهدف البحث الحالي إلى : التحفير الرطب لألياف الزجاج باستخدام محلولين الأول (CH_2OH) والثاني محلول ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) وذلك لغرض انشاء حفر على سطح الألياف لزيادة خشونة السطحية بالتالي زيادة الربط بين الألياف والأرضية . دراسة تأثير تحفير ألياف الزجاج باستخدام المحلول الأول على مقاومة الشد لها وتأثيره على الخواص الميكانيكية (الشد والانحناء) للمواد المركبة ذات أساس من البولي استر غير المشبع والمقواة بألياف زجاج محفرة , على قوة فك الربط بين حزمة الألياف المحفرة وقطرة من البولي استر غير المشبع .

تمت معالجة حزم من ألياف زجاج نوع (E-glass) بمحلول التحفير الأول والثاني لاختبار الفقدان بالوزن والتصوير المجهرى , وتم أيضاً معالجة حزم من ألياف زجاج بمحلول التحفير الأول لاختباري الشد للألياف والقص البيني بين الألياف وقطرة من البولي استر غير المشبع , إضافة إلى معالجة حصيرة من ألياف الزجاج بمحلول التحفير الأول , بعد ذلك تصنع عينات من المواد المركبة ذات أساس من البولي استر غير المشبع مقواة ب(٢٠ %wt) ألياف زجاج محفرة لاختباري الشد والانحناء للمواد المركبة .

تم إجراء تصوير مجهرى لألياف الزجاج غير المعالجة والألياف المعالجة كميائياً أو حرارياً واختبار الفقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلولي التحفير الأول والثاني واختبار شد للألياف المعالجة بمحلول التحفير الأول , اختباري الشد والانحناء للمواد المركبة ذات أساس من البولي استر غير المشبع والمقواة بألياف زجاج محفرة بمحلول التحفير الأول واختبار القص البيني بين حزمة من ألياف الزجاج المحفرة بمحلول التحفير الأول وقطرة من البولي استر غير المشبع .

أظهرت النتائج حدوث تحفير لألياف الزجاج المعالجة بمحلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) والمعالجة بمحلول ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) . ارتفاع نسبة الفقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول التحفير الثاني بالمقارنة مع نسبة الفقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول التحفير الأول . إن نسبة الفقدان بالوزن للألياف تزداد مع زيادة درجة حرارة وفترة المعالجة وزيادة النسبة الوزنية لمحلول التحفير إلى الألياف . الألياف المحفرة بمحلول التحفير الأول والمغمورة في البولي استر غير المشبع تعلقت قطرات من البولي استر على كامل السطح وهذا يدل على زيادة الربط بين الألياف المحفرة والأرضية . انخفاض قيم مقاومة الشد ومعامل المرونة للألياف المحفرة بالمقارنة مع قيمها للألياف غير المعالجة وهذا الانخفاض يزداد مع زيادة فترة ودرجة حرارة المعالجة . ارتفاع مقدار قوة فك الربط بين حزمة الألياف المحفرة وقطرة

من البولي استر غير المشبع والمعالجة في درجة حرارة (35 °C) ولمدة (3 days) تعطي أعلى مقداراً لقوة فك الربط . ارتفاع مقاومة كسر الانحناء لعينات المواد المركبة المقواة بألياف زجاج محفرة والمعالجة في درجة حرارة (35 °C) ولمدة (3 days) تعطي أعلى مقاومة . ارتفاع مقاومة الشد ومعامل المرونة لعينات المواد المركبة المقواة بألياف زجاج محفرة والمعالجة في درجة حرارة (35 °C) ولمدة (5 days) تعطي أعلى مقاومة شد والمعالجة في درجة حرارة (35 °C) ولمدة (3 days) تعطي أعلى (E composite of reinforced with etched fiber / E composite of reinforced with untreated fiber) .

يعود تاريخ تصنيع المواد المركبة (Composite Materials) إلى العصور القديمة حيث استخدم البابليون نشارة الخشب في تقوية طابوق الطين , كذلك استخدام الرومان قديماً الورق والخرسانة (Concrete) وكلاهما من المواد المركبة .

تتكون المواد المركبة بشكل عام من دمج مادتين أو أكثر للحصول على مادة ذات خواص هندسية وفيزيائية تختلف عن خواص المواد الداخلة في تركيبها وتكون خواص المادة الناتجة أفضل من مكوناتها . المادة المركبة تتكون من طورين هما طور الأرضية (Matrix Phase) وطور التقوية (Reinforcing Phase) , أما طور الأرضية فقد يكون مادة معدنية أو سيراميكية أو بوليمرية , أما طور التقوية فيشمل عدة أنواع هي الألياف (Fibers) , الدقائق (Particles) , المائئات (Fillers) , القشيرات الرقيقة (Flakes) والطبقات الرقيقة (Laminas) . وحديثاً ازداد الاهتمام بالمواد المركبة ذات الأساس البوليمري بسبب مواصفات هذه المجموعة من المواد الهندسية ولاسيما للتطبيقات التي تستخدم مقاومة نوعية عالية [١] .

المواد المركبة ذات الأساس البوليمري (Polymer Matrix Composites) تقسم إلى قسمين هما اللدائن المقواة (Reinforced plastics) والمواد المركبة المتقدمة (Advanced Composite Materials) .

اللدائن المقواة تمتاز بمقاومة (Strength) وجساءة (Stiffness) جيدتين , تعد المواد المركبة ذات الأساس من البولي استر والمقواة بألياف زجاج نوع (E-glass) احد أنواع هذه المواد . اللدائن المقواة هذه تمتاز برخص ثمنها لهذا فهي تستخدم في كثير من التطبيقات مثل التجهيزات الرياضية (Sporting Goods) , الأنابيب (Pipes) , هياكل الزوارق (Boats Hulls) وغيرها .

أما المواد المركبة المتقدمة فتمتاز بجساءة عالية ومقاومة خضوع فائقة (Superior Yield Strength) وهي عالية الثمن وذات اداء عالي الكفاءة ويتم تقويتها بألياف مستمرة مثل ألياف الزجاج نوع (S-glass) ذات المقاومة العالية , ألياف الكرافيت (Graphite Fibers) , ألياف الأرميد (Aramid Fibers) وألياف عضوية (Organic Fibers) أخرى , واشهر استخدام لها في الصناعات الفضائية (Aerospace Industries) [٢] .

تعتمد الخواص الميكانيكية للمواد المركبة المقواة بالألياف إلى حد كبير على مقاومة الربط (Bonding Strength) بين الألياف والأرضية (المادة الأساس) , إن الربط القوي بين مكونات المادة المركبة ضروري أثناء التحميل والخدمة [٣] . حيث أن وجود فجوات (Voids) بين الأرضية والألياف يقلل من مساحة الربط بين الألياف والأرضية ويخلق انتقال غير متوازن للاجهادات من الأرضية إلى الألياف كما انه يمثل منطقة لتمرکز الاجهادات [١] .

إن الربط بين الألياف والأرضية يمكن تحسينه باستخدام المعاملة السطحية (Surface Treatment) لسطح الألياف , هذه المعاملة تؤدي إلى زيادة مقاومة الربط بين الألياف والأرضية [٤] .

الخشونة السطحية (Surface Roughness) لسطح الليف مهمة في زيادة الربط بين الألياف والأرضية , لكن الخشونة العالية تسبب انخفاض الربط بين الألياف والأرضية لان المناطق المرتفعة المتكونة على سطح الألياف تمنع تغلغل (Penetrate) المادة الأساس إلى الانخفاضات (Depressions) على السطح [٣] . يمكن زيادة الخشونة السطحية للألياف باستخدام التحفير (Etching) , فالتحفير يكون حفر أو فجوات على سطح الألياف ومن ثم يؤدي إلى زيادة المساحة السطحية (Surface Area) للألياف وهذا بدوره يزيد التلاصق بينها وبين المادة الأساس , هذه الزيادة ناتجة عن التشابك البيئي الميكانيكي (Mechanical Interlocking) بين الألياف المحفرة والمادة الأساس [٥] .

التحفير نوعان نوع رطب (Wet Etching) والآخر جاف (Dry Etching) . الأول يتم باستخدام محاليل قاعدية (Basic Solutions) أو حامضية (Acidic Solutions) أما الثاني فيتم باستخدام ايونات الغازات . التحفير الرطب نوعان نوع موحد الخواص (Isotropic Wet Etching) والآخر غير موحد الخواص (Anisotropic Wet Etching) أما الجاف فهو غير موحد الخواص [٦] .

(Matrix Materials)

المواد الأساس

١-٢

تقسم المواد الأساس إلى ثلاثة مواد : مواد معدنية (Metal Materials) , مواد سيراميكية (Ceramic Materials) ومواد راتنجية (Resin Materials) .

المواد الأساس المعدنية هي إما معادن نقية مثل الحديد أو سبائك مثل السبائك الفائقة (Super Alloys) , سبائك الألمنيوم (Aluminum Alloys) , فضلاً عن سبائك (المغنيسيوم , التيتانيوم والنحاس (Alloys Of Magnesium , Titanium And Copper) .

المواد المركبة ذات الأساس المعدني (Metal- Matrix Composites) تمتاز بمقاومة صدم (Impact) وبمقاومة التأكسد (Oxidation Resistance) ممتازة في درجات الحرارة العالية وخواص زحف (Creep) جيدة في درجات الحرارة العالية , وهي تستخدم في صناعة السيارات والصناعات الفضائية وغيرها من الصناعات , ويمكن تقوية المواد الأساس المعدنية بأنواع مختلفة من مواد التقوية كالألياف والدقائق والجسيمات حيث يكون قطر الدقائق اكبر من ($1 \mu m$) في حين قطر الجسيمات اقل من ($1 \mu m$) , الجدول (١-١) يوضح مواد أساس معدنية مع تقوياتها [٧] .

أما المواد المركبة ذات الأساس السيراميكي (Ceramic-Matrix Composites) فتمتاز بمتانة كسر أعلى مما للمواد السيراميكية لوحدها وقد تصل إلى أربعة أضعاف ويمكن تقويتها بالألياف والدقائق ومن المواد السيراميكية المستخدمة كأرضية : ($Al_2O_3 - ZrO_2 - CaO$)
(MgO) , جدول (١-٢) يوضح متانة الكسر وحجم العيب الحرج لمواد أساس سيراميكية غير مقواة وأخرى مقواة [٢,٣] .

أما المواد الراتنجية فتشمل الراتنجات المتصلدة بالحرارة (Thermosetting Resins) والراتنجات الحرارية (Thermoplastic Resins) وهي تمتاز بخفة الوزن وسهولة التصنيع لذا لها تطبيقات عديدة ويفضل استخدامها في درجة حرارة الغرفة , كما أن كلفتها منخفضة مقارنة ببقية المواد الأخرى [٧] . الجدول (١-٣) يوضح مواد مركبة ذات أساس بوليمري [٣] .

جدول (١-١) يوضح بعض المواد المركبة ذات الأساس المعدني المقواة بألياف مستمرة ومستقيمة [٧]

Fiber	Matrix	Fiber Content (vol%)	Density (g/cm ³)	Longitudinal Tensile Modulus (GPa)	Longitudinal Tensile Strength (MPa)
Carbon	٦٠٦١ Al	٤١	٢.٤٤	٣٢٠	٦٢٠
Boron	٦٠٦١ Al	٤٨	-	٢٠٧	١٥١٥
SiC	٦٠٦١ Al	٥٠	٢.٩٣	٢٣٠	١٤٨٠
Alumina	٣٨٠.٠ Al	٢٤	-	١٢٠	٣٤٠
Carbon	AZ٣١ Mg	٣٨	١.٨٣	٣٠٠	٥١٠
Borsic	Ti	٤٥	٣.٦٨	٢٢٠	١٢٧٠

جدول (١-٢) متانة الكسر وحجم العيب الحرج لمواد أساس سيراميكية غير مقواة وأخرى مقواة [٢] .

Materials	Fracture Toughness (MPa . m ^{1/2})	Critical Flaw Size (micrometers)
Al ₂ O ₃	٣.٥ - ٤.٥	٢٥ - ٣٣
Sintered SiC	٣.٥ - ٣.٥	١٨ - ٢٥
Sintered Si ₃ N ₄	٦.٥ - ٤.٥	٣٣ - ٧٤
Al ₂ O ₃ - TiC (particulate dispersions)	٤.٢ - ٤.٥	٣٦ - ٤١
SiC - LAS Fibers (lithium aluminosilicate)	٢٥ - ١٥	
Si ₃ N ₄ - TiC (particulate dispersions)	٤.٥	٤١

جدول (١-٣) بعض الخواص للدائن المقواة بألياف زجاج غير مستمرة [٣].

Material	Glass Content (vol%)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)	Specific Gravity
Nylon ٦٦	٢٥	١٥٢	٨٢٨٥	١.٣١
	٤٥	٢٥٥	١١٥٤٥	١.٤١
	٧٥	٢٥٧	٢١٣٩٥	-
Polycarbonate	٢٥	١٥٧	٦٢١٥	١.٣١
	٤٥	١٣١	١٥٣٥٥	١.٤٤
Polystyrene	٣٥	٩٧	٨٢٨٥	١.٢٨
Polyester	٣٥-٤٥	١٥٤-١٧٣	٥٥٢٥-١٢٤٢٥	١.٥-١.٦
Epoxy	٦٥	١٧٣	٢٥٧٥٥	١.٨

(Reinforcing Fibers)

ألياف التقوية

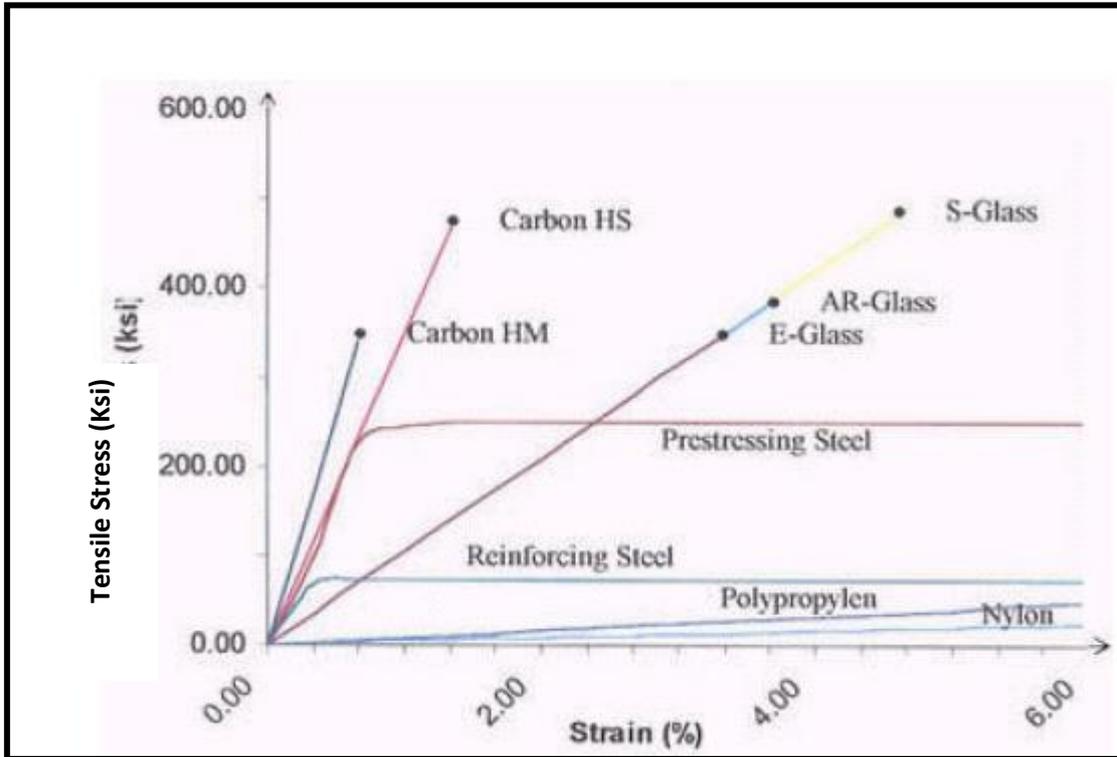
١-٣

ألياف التقوية تشمل ثلاثة أنواع رئيسية هي: الألياف العضوية (Organic Fibers), الألياف المعدنية (Metal Fibers) والألياف السيراميكية (Ceramic Fibers).

تشمل ألياف التقوية العضوية ألياف البولي أميد (Polyamide Fibers), ألياف البولي استر (polyester Fibers), ألياف البولي يوريثان (Polyurethane Fibers), ألياف الكرافيت (Graphite Fibers) وغيرها من الألياف. وتمتاز بوزن نوعي (Specific Gravity) منخفض حيث تستخدم في التطبيقات التي تحتاج خفة وزن, إن لألياف الكرافيت مقاومة جيدة للحرارة بالمقارنة مع الألياف العضوية الأخرى ولها استخدامات واسعة في تصنيع المواد المركبة ذات ألياف التقوية العضوية [١].

أما الألياف المعدنية فهي تستخدم للحصول على مواد مركبة تمتاز بخواص ميكانيكية مرغوبة , مقاومة بلى (Wear Strength) وسهولة في التشغيل . تستخدم الألياف المعدنية في تقوية اللدائن كالأيبوكسي بألياف مستمرة أو قصيرة أو عشوائية لتعطي مادة مركبة تمتلك مقاومة صدم وتوصيل حراري كبيرين يتجاوز ما موجود في المواد المركبة المقواة بالألياف الزجاج . هنالك بعض المحددات عند استخدام الألياف المعدنية ولاسيما الاختلاف في معامل التمدد الحراري (Coefficient Of Thermal Expansion) بين الألياف والمادة الأساس حيث يسبب اجهادات متبقية (Residual stresses) [١] .

أما ألياف التقوية السيراميكية فتشمل ألياف الزجاج (Glass Fibers) , ألياف الكوارتز (Quartz Fibers) وغيرها . حيث يمكن استخدام ألياف الكوارتز لتقوية اللدائن المتصلدة بالحرارة وألياف الزجاج تستخدم لتقوية اللدائن الحرارية والمتصلدة بالحرارة [١] . الشكل (١-١) يوضح سلوك (إجهاد شد-انفعال) لألياف تقوية معدنية , سيراميكية وعضوية [٨].



الشكل (١-١) يوضح سلوك (إجهاد شد- انفعال) لألياف تقوية معدنية , سيراميكية وعضوية [٨].

المواد المركبة البوليمرية المقواة بألياف الزجاج (Glass Fibers-Reinforced Polymer Composites)

١-٤

إن تقوية البوليمرات بألياف الزجاج يهدف إلى الحصول على مادة مركبة ذات مقاومة (Strength) وجساءة (Stiffness) جيدتين [٢]. هذا النوع من المواد المركبة ينتج بكمية كبيرة واغلب الزجاج المستخدم فيه هو من نوع (E-Glass) ويكون مسحوباً على شكل ألياف بقطر (٢٠ - ٣) μm . [٧]

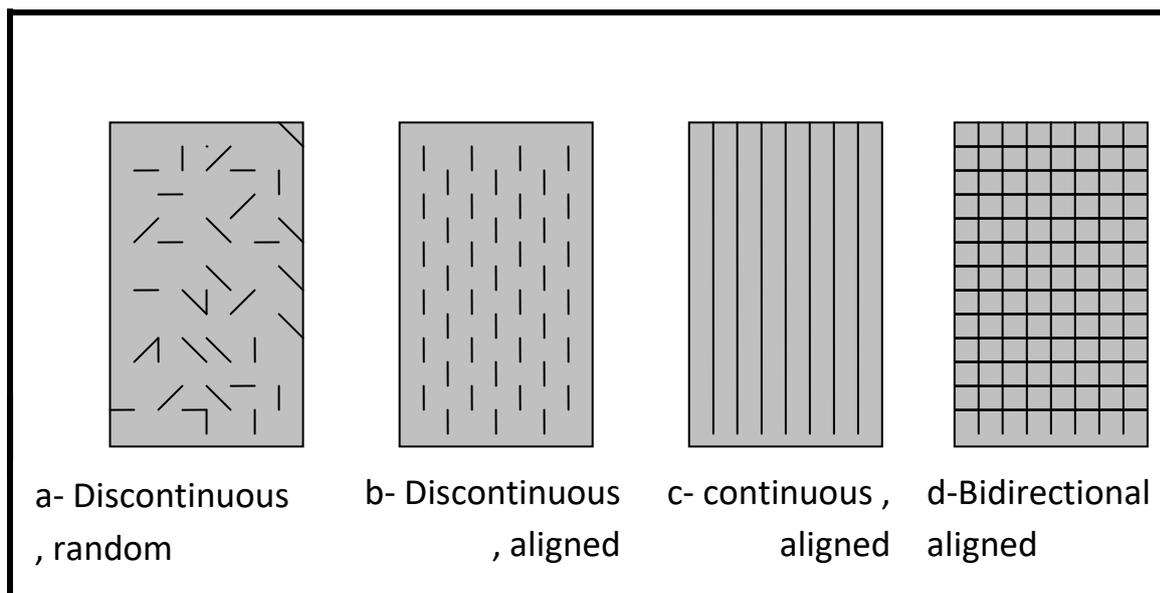
إن ألياف الزجاج المستخدمة مع البوليمرات تكون مرغوبة وواسعة الاستخدام لسهولة سحبها من المنصهر عند التصنيع وترابطها القوي مع الأرضية عندما تغمر فيها وإمكانية استخدامها مع أنواع مختلفة من البوليمرات فهي تمتلك خمولية كيميائية (Chemical Inertness) [٧].

تعتبر الألياف المسؤولة الرئيسي عن قابلية تحمل المادة المركبة للأحمال الخارجية. أما المادة الأساس فهي تعمل على ربط هذه الألياف، كما تعمل على نقل الجهود إلى الألياف ومن ليف إلى آخر وتكون درعاً لحماية كل ليف ومحافظاً على عزله ومنع حصول عملية احتكاك بين ليف وآخر مجاور له [٣].

ألياف التقوية إما طويلة مستمرة (Continuous) أو قصيرة غير مستمرة (Discontinuous) وفي الحالة الأولى ممكن أن تكون الألياف موحدة الاتجاه (Unidirectional) أو ذات اتجاهين (Bidirectional)، أما الألياف القصيرة فهي إما أن تكون موجهة بشكل عشوائي (Randomly) أو أن تكون مرتبة باتجاه معين (Preferred Orientation). الشكل (١-٢) يوضح بعض أصناف ألياف التقوية الشائعة الاستخدام في المواد المركبة البوليمرية الأساس.

إن ترتيب الألياف باتجاه واحد داخل المادة الأساس سوف يعطي مادة مركبة ذات خواص اتجاهية (Directional Properties) وعليه للحصول على مادة مركبة متماثلة في الخواص الاتجاهية يمكن ترتيب الألياف طولياً وعرضياً داخل المادة الأساس [٧, ٩].

يؤثر توجيه الألياف تأثيراً بالغاً في الصفات الميكانيكية للمادة المركبة والجدول (١-٤) يوضح ذلك التأثير على مقاومة الشد، مقاومة الانضغاط ومعامل المرونة لمادة مركبة بوليمرية الأساس [٣].



الشكل (١-٢) بعض أصناف ألياف التقوية الشائعة الاستخدام في المواد المركبة البوليمرية الأساس [٩] .

جدول (١-٤) يوضح تأثير توجيه الألياف على صفات المادة المركبة [٣] .

Material	Fiber Content (Vol%)	Specific gravity	Fibers parallel to load (%)	Tensile strength (psi)	Tensile modulus (10^6 psi)	Compressive strength (psi)
E-glass / epoxy	٧٣	٢.١٧	١٠٠	٢٣٨٠٠٠	٨.١	
E-glass / epoxy	٥٦	١.٩٧	١٠٠	١٤٩٠٠٠	٦.٢	٨٧٠٠٠
E-glass / epoxy	٥٦	١.٩٧	٥٤	٧٥٠٠٠	٣.٥	٧١٠٠٠
E-glass / epoxy	٥٦	١.٩٧	٠	٥٠٠٠	١.٥	٢٠٠٠٠
S-glass / epoxy	٧٢	٢.١٢	١٠٠	٢٧٥٠٠٠	٩.٦	٢٠٠٠٠٠
S-glass / epoxy	٧٢	٢.١٢	٠	٨٠٠٠		٢٠٠٠٠
Al ₂ O ₃ / epoxy	٥٧	٢.٧٥	١٠٠	٧٥٠٠٠	٣٠.٠	٣٤٠٠٠٠
	٥٧	٢.٧٥	٠	٨٠٠٠	٣.٠	١٧٥٠٠٠
Graphite / epoxy	٦٣	١.٦١	١٠٠	٢٥٠٠٠٠	٢٣.٠	١٩٨٠٠٠
	٦٣	١.٦١	٠	٦٠٠٠	١.٦	٣٣٠٠٠
Aramid / epoxy	٦٢	١.٣٨	١٠٠	١٩٠٠٠٠	١٢.٠	٤١٠٠٠
	٦٢	١.٣٨	٠	٥٧٠٠	٠.٨	٢٠٠٠٠

يمكن حساب الصفات الميكانيكية لمادة صفائحية بوليمرية مقواة بالألياف كما يلي :

- إذا كانت الألياف مستمرة وموحدة الاتجاه وموازية للحمل المستخدم وعلى افتراض أن الربط البيئي بين المادة الأساس والألياف تام فإن [٩,٧] :

$$\sigma_c = \sigma_m * V_m + \sigma_f * V_f \quad [١-١]$$

and

$$E_{cl} = E_m * (1 - V_f) + E_f * V_f \quad [١-٢]$$

حيث أن :

σ_c = الإجهاد في المادة المركبة (MPa) .

σ_f = الإجهاد في الألياف (MPa) .

σ_m = الإجهاد في الأرضية (MPa) .

V_m = الكسر الحجمي للأرضية.

V_f = الكسر الحجمي للألياف .

E_{cl} = معامل المرونة للمادة المركبة باتجاه التحميل (GPa).

E_f = معامل المرونة للألياف (GPa) .

E_m = معامل المرونة للأرضية (GPa) .

- أما إذا كانت ألياف التقوية مستمرة وموحدة باتجاه عمودي على اتجاه التحميل أي بالاتجاه العرضي للتحميل فإن الإجهاد العرضي للمادة المركبة يكون مساويا للإجهاد في الأرضية ومساويا للإجهاد في الألياف أي أن [٩,٧] :

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \quad [١-٣]$$

and

$$E_{ct} = E_m * E_f / (1 - V_f) * E_f + V_f * E_m \quad [1-4]$$

حيث أن (E_{ct}) تمثل معامل المرونة للمادة المركبة في الاتجاه العرضي .

إن الصفات الميكانيكية للمادة المركبة المقواة بالألياف لا تعتمد فقط على خواص الليف والأرضية لكن تعتمد أيضاً على درجة انتقال الإجهاد المطبق إلى الليف بواسطة الأرضية والمهم لانتقال الحمل أن يوجد ربط جيد بين الألياف والأرضية [٧] .

الترابط غير الكفوء بين الألياف والأرضية يؤدي إلى خفض انتقال الاجهادات من الأرضية إلى الألياف ويمكن تحسين الربط من خلال اجراء معاملة سطحية (Surface Treatment) للألياف تؤدي إلى زيادة الربط بين الأرضية والألياف وتحسن من انتقال الاجهادات من الأرضية إلى الألياف [٤] .

١-٥ الربط بين الألياف والأرضية

(Bond Between Fibers And Matrix)

مقاومة الربط (Bonding Strength) بين الألياف والأرضية هي من العوامل الرئيسية في تحديد السلوك الميكانيكي للمادة المركبة فالربط القوي بين مكونات هذه المادة ضروري لتكون فعالة أثناء التحميل والخدمة [٣] .

إن الربط البيني القوي جداً يكون مادة مركبة ذات جساءة عالية لكنها هشة , أما الربط الضعيف فيقلل من الجساءة ويزيد من المتانة . لذا يجب أن يكون الربط البيني مناسباً للحصول على مادة مركبة ذات جساءة جيدة ومتانة مناسبة [٢] .

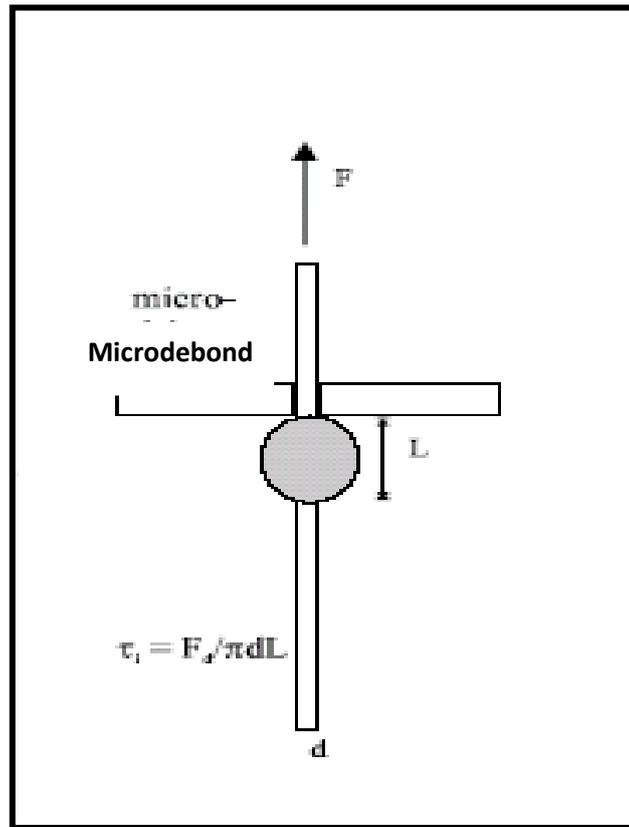
يمكن قياس مقاومة الربط باستخدام طريقة فك الربط (Microdebond) ويتم ذلك بسحب شعيرة من الألياف مغمورة في قطرة من المادة الأساس كما مبين في الشكل (١-٣) . يتم حساب مقاومة القص البينية بين الألياف والأرضية (τ_i , Interfacial Shear Strength) من المعادلة التالية [١٠] :

$$\tau_i = F_d / \pi d L \quad [1-5]$$

F_d = قوة فك الربط (Debonding Force) (g) .

d = قطر الشعيرة (μm) .

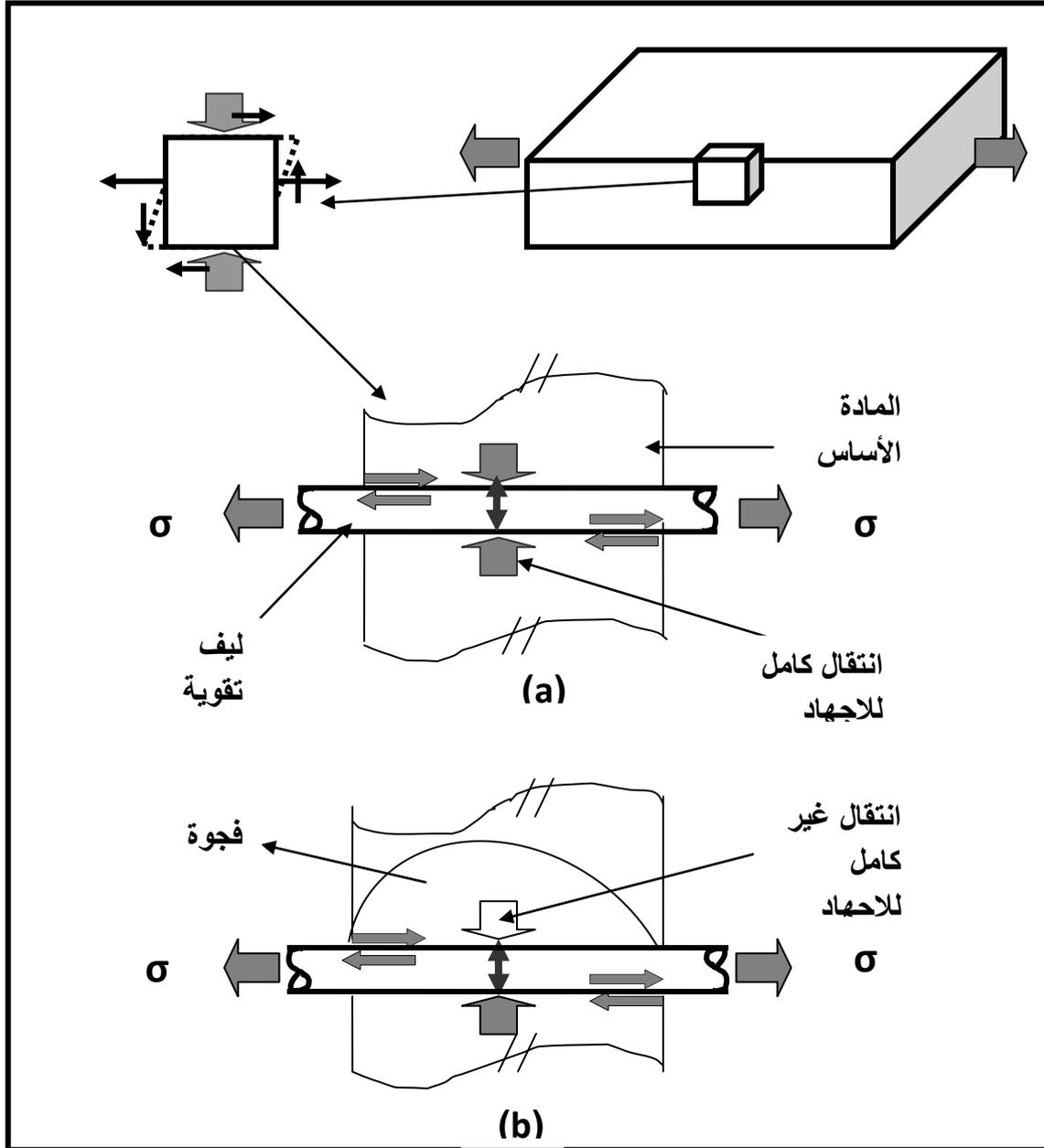
L = طول الجزء المغمور من الشعيرة في القطرة (μm) .



شكل (١-٣) طريقة (Microdebond) لقياس مقاومة القص البينية بين الألياف والأرضية [١٠].

الربط الجيد بين الألياف والأرضية يسمح لانتقال الحمل المسلط من الأرضية إلى الألياف .
الشكل (١-٤) يوضح نموذج من مادة مركبة مقواة بألياف مستمرة معرضة إلى حمل شد , فإذا كان
السطح البيني بين الليف والأرضية خال من الفجوات كما في الشكل (a ١-٤) يحدث انتقال كامل للحمل
والإجهاد , أما إذا كان الربط غير جيد مع وجود فجوات في السطح البيني بين الليف والأرضية كما في

الشكل (b ٤-١) فإن انتقالاً غير كامل للإجهاد المطبق سوف يحدث , بحيث إذا كان طول الفجوة (١٪) من طول السطح البيني تنخفض مقاومة القص البينية إلى (٧٪) [١] .



شكل (١-٤) يوضح حالة انتقال الإجهاد من الأرضية إلى الألياف عند تعرض مادة مركبة مقواة بالألياف إلى حمل شد وكان السطح البيني بين الليف والأرضية : (a) لا يحتوي على فجوات , (b) يحتوي على فجوات [١] .

وعلى العموم هنالك ثلاث نظريات يمكنها وصف الالتصاق بين الألياف والأرضية [٥] :

- الالتصاق بواسطة التشابك البيئي الميكانيكي

(Adhesion By Mechanical Interlocking)

يحدث الالتصاق عندما يلامس سطح صلب خشن أو مسامي سطح آخر قابل للانسياب (Flow) لذا يتولد الربط التشابكي البيئي الميكانيكي بينهما . التشابك البيئي الميكانيكي يمكن ان يلعب دوراً في ربط مواد كالخشب , الورق , الأنسجة (غزول أو خيوط) والألياف . تتم عملية تخشين سطوح هذه المواد بعدة تقنيات منها عملية التحفير (Etching) ويمكن تحسين التشابك البيئي الميكانيكي لمواد مثل المعادن واللدائن باستخدام هذه التقنيات [٥] .

- الالتصاق بواسطة الانتشار البيئي

(Adhesion By Interdiffusion)

يمكن لجزيئات السطح الأول الانتشار في السطح الثاني كما أن جزيئات السطح الثاني تنتشر إلى السطح الأول وبذلك ينشأ ما يسمى بالطور البيئي (InterPhase) وهو يمثل سطح الربط . هذا الربط يعتمد على فعالية (Affinity) جزيئات كلا السطحين على الانتشار من وإلى الآخر وبالعكس . يصل سمك الطور البيئي إلى $(10 \mu m)$. إن هذا الربط يحدث في المواد التي تمتلك جزيئات ذات حركية عالية (High Mobility) [٥] .

- الالتصاق بواسطة الامتزاز والتفاعل السطحي

(Adhesion By Adsorption And Surface Reaction)

يتم الربط بواسطة التفاعل السطحي من خلال الجذب الكيميائي (Chemical Attraction) لمواقع خاصة لكلا سطحي الألياف والأرضية لإنجاز الربط , الربط يتم نتيجة لقوى مثل قوى فاندرفال (Vander Waals Forces) , التفاعلات الأيونية (Ionic Reactions) والارتباطات التساهمية (Covalent Interactions) . الربط بواسطة الامتزاز يتم من خلال عملية الترطيب (Wetting) , السطح الصلب يرطب بواسطة سائل المادة الأخرى . عملية الترطيب للسطح الصلب بواسطة السائل تخلق التصاق بينهم إلا انه غير كاف للحصول على التصاق قوي . الشد السطحي (Surface Tension) والسلوك اللزج (Viscous Behavior) للسائل له تأثير كبير على عملية الترطيب [٥] .

تعد المعاملة السطحية مهمة بالنسبة للألياف المستخدمة لتقوية اللدائن ولاسيما الألياف غير المتلائمة مع المادة الأساس البوليمرية للحصول على التصاق جيد بين الألياف والأرضية [١,٤].

ألياف الزجاج يتم معاملة سطحها للحصول على التصاق جيد بين الألياف والأرضية لان الألياف غير العضوية (Inorganic) يكون التصاقها ضعيفاً بالأرضية البوليمرية العضوية (Organic). تشمل المعاملة السطحية عدة طرق منها الأكساء (Sizing) والتحفير (Etching) [١,١٠].

يتم أكساء ألياف الزجاج بطبقة رقيقة من مادة تسمى عامل الربط (Coupling Agent) وهي مركبات عضوية - غير عضوية تعمل كوسيط ربط بين مواد غير متشابهة عضوية وأخرى غير عضوية لزيادة الالتصاق بينها , وتستخدم لذلك مركبات السليكون العضوية (Organosilicon Compounds) ذات تركيب $(R'SiX_3)$, هذه المادة تتكون من مجموعتين الأولى مجموعة (R') تربط عامل الربط بالمادة الأساس البوليمرية من خلال أصرة تساهمية (Covalent Bond) أما المجموعة الثانية (X_3) فهي تتفاعل مع مواقع على سطح ألياف الزجاج وتربط عامل الربط مع سطح ألياف الزجاج ومن ثم يحصل ربط بين الألياف والأرضية [١٠].

مجموعة (R') هي عبارة عن احد البوليمرات فهي إما ايبوكسي (Epoxy) , فنيل (Vinyl) أو امين أولي (Primary Amine) , أما مجموعة (X_3) يمكن أن تكون $(OR)_3$ (تمثل مجموعة (R) إما مجموعة المثيل (Methyl) , الاثيل (Ethyl) أو غيرها ويطلق على هذا النوع من عامل الربط بـ (Silane Coupling Agent) [١٠].

المعادلة التالية توضح التفاعل الحاصل بين مجموعة السانول ($(OR)_3$ Silanol Group) مع مواقع على سطح ألياف الزجاج [١٠]:



حيث (Si.....Si) تعني ذرتي سليكون متجاورتين .

التحفير هو عملية تنقير (Pitting) وإحداث تغيير على سطح مادة معينة من خلال إزالة مناطق من على سطح المادة بفعل مادة أخرى أو مؤثر آخر . هنالك نوعان من عمليات التحفير النوع الأول التحفير الرطب والثاني التحفير الجاف [٦] .

(Wet Etching)

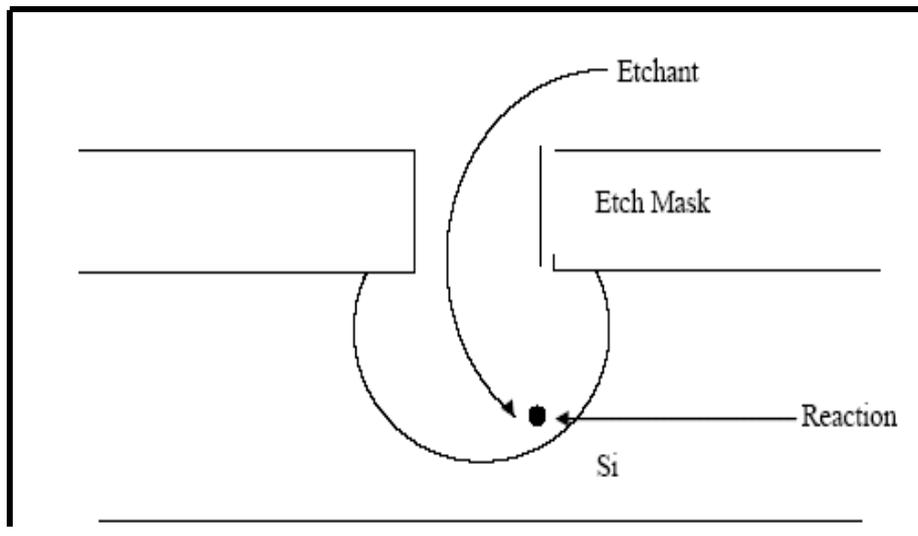
- التحفير الرطب

التحفير الرطب هو عملية تعريض سطح المادة إلى محاليل كيميائية قاعدية أو حامضية تعمل على إذابة مناطق من سطح المادة وإنشاء نقر أو حفر تزيد من خشونة السطح نتيجة تفاعل المحاليل الكيميائية مع سطح المادة المعرضة لتلك المحاليل [١١] . الشكل (١-٥) يوضح آلية التحفير الرطب لسطح السليكون [١٢] . عملية التحفير الرطب تتم على ثلاث مراحل [٦] :

١- انتقال للمتفاعلات (Reactants) إلى سطح التفاعل (سطح المادة المعرضة للمحلول) من خلال الانتشار (Diffusion) .

٢- التفاعلات الكيميائية على سطح المادة المعرضة للمحلول .

٣- انتقال نواتج التفاعل من سطح التفاعل بواسطة الانتشار .



الشكل (١-٥) آلية التحفير الرطب [١٢] .

هنالك نوعان من التحفير الرطب الأول تحفير رطب موحد الخواص (Isotropic Wet Etching) والآخر تحفير رطب غير موحد الخواص (Anisotropic Wet Etching) والشكل (١-٦) يوضح التحفير الرطب الموحد الخواص وغير موحد الخواص [١١] .

هنالك عوامل تؤثر وتحدد التحفير الرطب الموحد الخواص او غير موحد الخواص [١٢] :

- ١- نوع المحفرات (Etchants) .
 - ٢- طريقة التحريك (Stirring Method) .
 - ٣- درجة الحرارة المعالجة .
 - ٤- زمن المعالجة .
 - ٥- التوجيه البلوري فالتحفير في مستوي (١١١) أو (١٠٠) أو كليهما يكون التحفير غير موحد الخواص .
 - ٦- كون المادة المراد تحفيرها أحادية التبلور أو متعددة البلورات أو عشوائية التبلور فكلما زادت تعددية البلورات في المادة المراد تحفيرها زاد احتمالية كون التحفير موحد الخواص .
 - ٧- العيوب البلورية (Crystal Defects) .
- ويتم معرفة كون التحفير الرطب موحد الخواص أو غير موحد الخواص من خلال القانون الآتي [٦] :

$$A_f = 1 - V_l / V_v \quad [١-٧]$$

حيث إن :

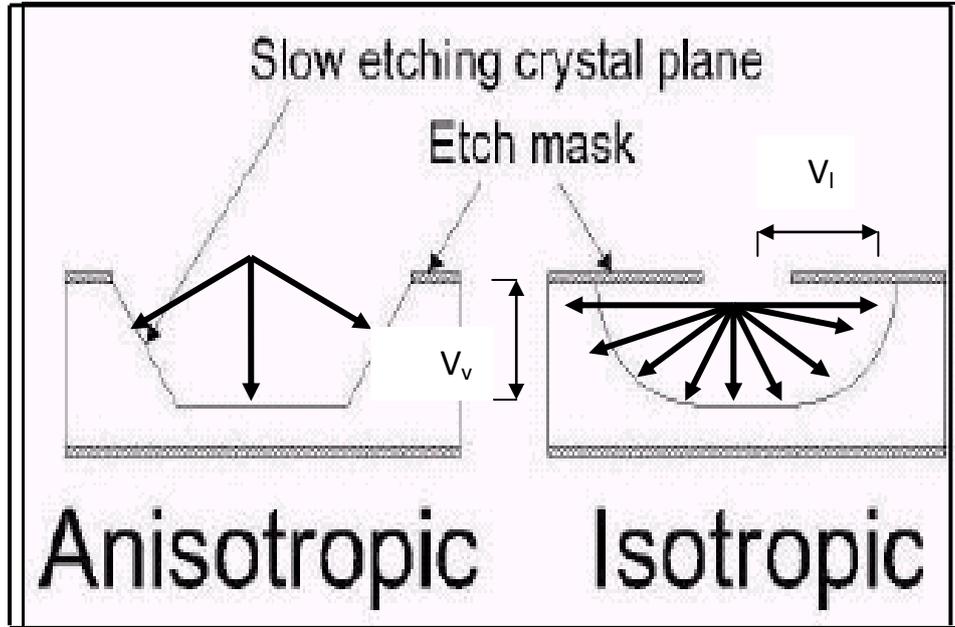
A_f = درجة عدم الانتظام .

V_l = معدل التحفير الجاني أو الفرعي ($\mu\text{m}/\text{min}$) .

V_v = معدل التحفير العمودي ($\mu\text{m}/\text{min}$) . ويكون التحفير موحد الخواص عندما تكون ($V_l = V_v$) او ($A_f = ٠$) [٦] .

التحفير الرطب الموحد الخواص يمتاز بمعدل تحفير عال , حساس للحرارة واقل تركيزاً للإجهاد (Stress Concentration) في منطقة التحفير مقارنة بالتحفير غير موحد الخواص أما التحفير غير موحد الخواص فله معدل تحفير بطيء , زيادة في تركيز الإجهاد في منطقة التحفير , حساس للحرارة واقل كلفة من التحفير الموحد الخواص [١٣,١٤] .

إن بعض المواد التي يتم تحفيرها تحتوي على طبقة سطحية رقيقة (Mask) وهي مادة تكون غير قابلة للذوبان في المحاليل الكيماوية المستخدمة للتحفير أو تكون اقل تحفيراً من المادة التي تغطيها. التحفير الرطب الموحد الخواص يكون حفراً نصف دائرية أو بيضوية ذات تركيز إجهاد اقل , أما التحفير الرطب غير موحد الخواص يكون حفراً بشكل هرم (Pyramid) تعتبر منطقة تركيز للإجهاد . [١١]



شكل (٦-١) التحفير الرطب موحد الخواص وغير الموحد الخواص [١١] .

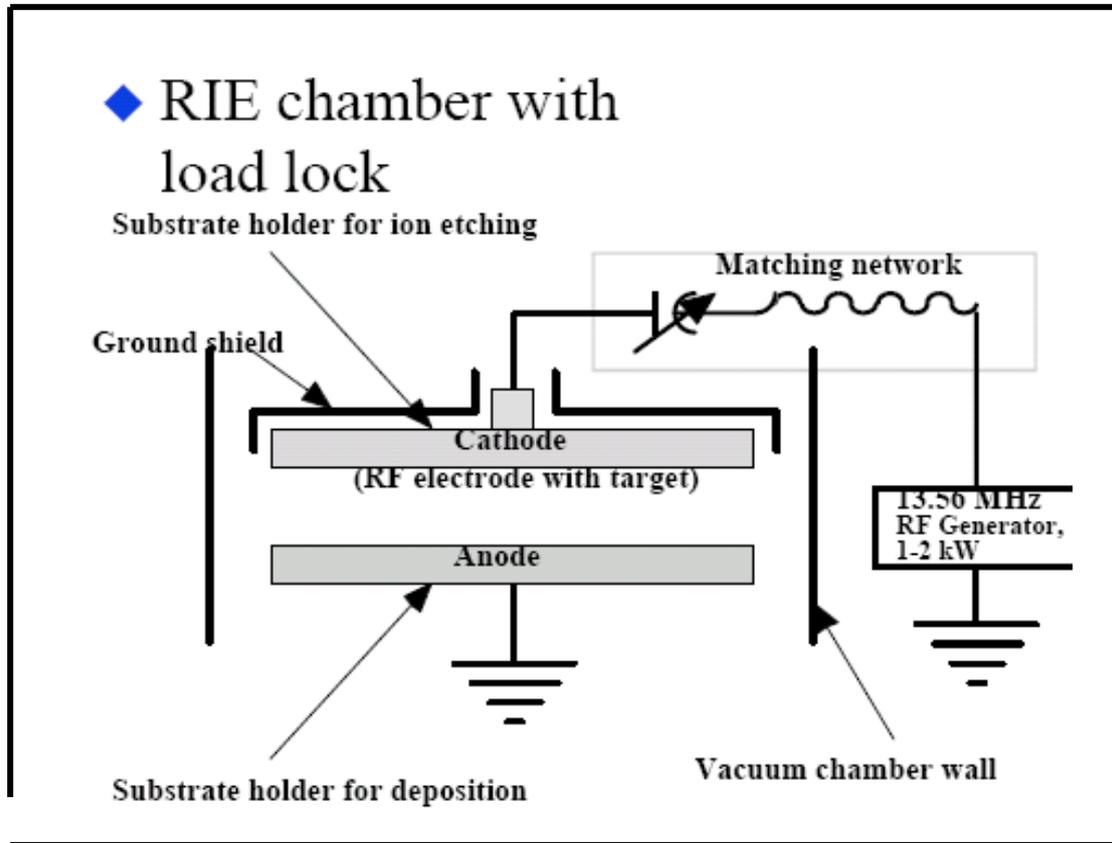
Dry)

- التحفير الجاف
(Etching)

الحفر ناتجة من التفاعل البيئي (Interaction) الفيزيائي أو الكيماوي بين ايونات الغازات وذرات المادة المراد تحفيرها [١٥] . نوع التحفير الجاف غير موحد الخواص (Anisotropic Dry Etching) , يمتاز بسيطرة جيدة على عملية التحفير , معدل تحفير مسيطر عليه لكنه بطيء , تركيز للإجهاد في منطقة التحفير وإمكانية تحفير أنواع مختلفة من المواد . معدل التحفير الجاف اقل من الرطب كما انه أكثر سهولة عند البدء أو التوقف [١٥, ١٣] . شكل (٧-١) يمثل مخططاً لطريقة التحفير الجاف [١٦] , أما جدول (٥-١) فيوضح بعض المواد التي يتم تحفيرها باستخدام بعض الغازات [١٥] .

هنالك ثلاث طرق للتحفير الجاف :

- ١- التحفير الجاف الفيزيائي (Physical Dry Etching) .
- ٢- التحفير الجاف الكيماوي (Chemical Dry Etching) .
- ٣- التحفير الجاف الكيماوي والفيزيائي (Physical and Chemical Dry Etching) .



شكل (١-٧) مخطط يوضح طريقة التحفير الجاف (RIE) (Reactive Ion Etching) [١٦].

جدول (١-٥) بعض الغازات المستخدمة في التحفير الجاف لبعض المواد [١٥].

Materials	Etch Gases	Etch Products
Si , SiO ₂ , Si ₃ N ₄	CF ₄ , SF ₆ , NF ₃	SiF ₄
Si	Cl ₂ , CCl ₂ F ₂	SiCl ₂ , SiCl ₄
Al	BCl ₃ , CCl ₄ , SiCl ₄ , Cl ₂	AlCl ₃ , Al ₂ Cl ₆
Organics	O ₂ , O ₂ + CF ₄	CO , CO ₂ , H ₂ O , HF
Other (W , Ta , MO...)	CF ₄	WF ₆ , ..

١-٨ العوامل المؤثرة على معدل التحفير الرطب (Factors Affecting The Wet Etching Rate)

يتأثر معدل التحفير الرطب بنوع وتركيز ودرجة الحرارة (Temperature) وزمن التحفير (Type And Concentration Of Etchants) , درجة الحرارة (Temperature) وزمن التحفير (Time Of Etching) .

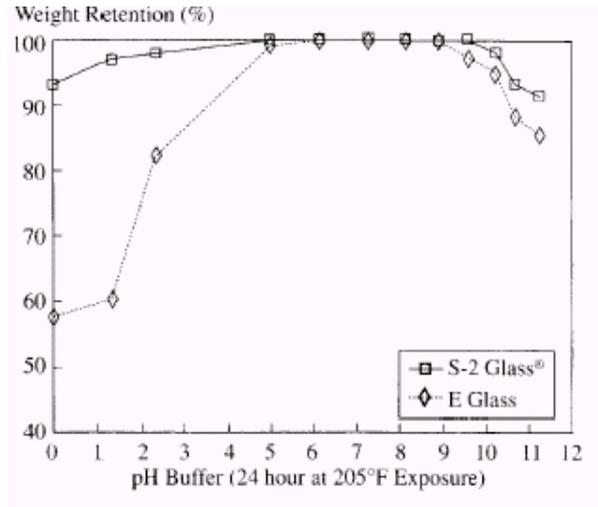
إن نوع المحلول المستخدم في التحفير وتركيزه له تأثير كبير على معدل التحفير , فمثلا يزداد معدل تحفير السيليكا (SiO_2) بتأثير حامض الهيدروفلوريك (HF) مع زيادة تركيز الحامض حيث ان معدل التحفير عند تركيز حامض (٤٩%) أعلى من معدل التحفير عند تركيز اقل من ذلك والمعادلة التالية توضح تفاعل (HF) مع (SiO_2) [١٤] :



إن نوع المادة المستخدمة في التحفير تحدد فيما إذا كان التحفير موحد الخواص أو غير موحد الخواص , فعند تعريض السيليكا إلى حامض الهيدروفلوريك (HF) وحامض الفسفوريك (H_3PO_4) , نحصل على تحفير موحد الخواص أما عند تعريضها إلى هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) فان التحفير الناتج يكون غير موحد الخواص [١٤] .

إن رقم الحمضية (pH) يؤثر كذلك في معدل التحفير أو الفقدان بالوزن . الشكل (١-٨) يوضح تأثير رقم (pH) على الاحتفاظ بالوزن لنوعين من ألياف الزجاج (E-glass) و (S-2 glass) معاملة بمزيج من محلول (Buffer) (NH_4F) مع محاليل ذات درجة حموضة (pH) مختلفة لمدة (٢٤ hr) ودرجة (٢٠٥ °F) [١٧] .

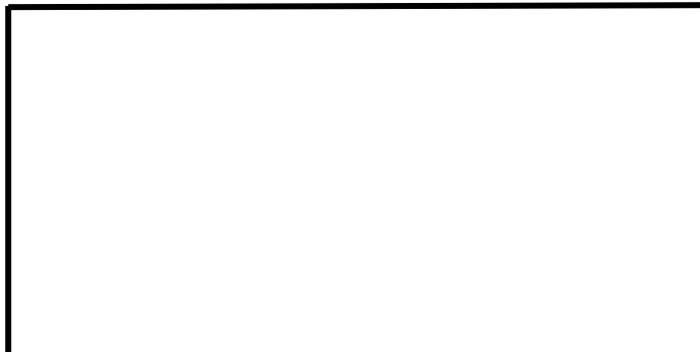


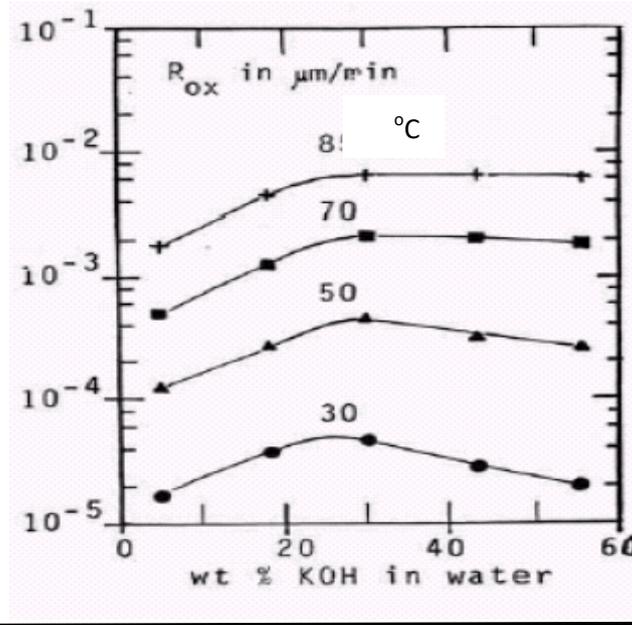


شكل (٨-١) العلاقة بين الاحتفاظ بالوزن وحامضية محلول (Buffer) عند معاملة ألياف زجاج نوع E-glass و (S-2 glass) [١٧].

أما الزمن فله تأثير على معدل التحفير فكلما ازداد زمن المعالجة ازداد معدل التحفير . فألياف الزجاج عند تعريضها إلى حامض الكبريتيك (H_2SO_4) بتركيز (١٠%) ولمدة (١٦٨ hr) بدرجة (٩٦ °C) يكون معدل التحفير أكثر مما لو تركت مدة (٢٤ hr) عند نفس التركيز ودرجة الحرارة [١٧].

أما درجة الحرارة فان معدل التحفير يزداد بزيادتها لان الحرارة تعجل من التفاعل الكيميائي الحاصل بين محلول التحفير و سطح المادة المراد تحفيرها وتزيد من ذوبانية المواد المهاجمة والنتيجة [١٨]. الشكل (٩-١) يوضح تأثير الحرارة على معدل التحفير لأكسيد السليكون (R_{ox}) باستخدام تراكيز مختلفة من هيدروكسيد البوتاسيوم [١٤].





شكل (١-٩) يوضح العلاقة بين معدل التحفير لأكسيد السليكون (R_{ox}) وتركيز (KOH) ودرجة الحرارة [١٤].

Glass)

١-٩ ألياف الزجاج

تستخدم ألياف الزجاج لتقوية المواد الأساس البوليمرية لتكوين مادة مركبة تدمج بين كلفة منخفضة ومقاومة نوعية عالية [٢]. وهناك أنواع عديدة من ألياف الزجاج تصنف بحسب تركيبها تشمل نوع (E-glass) وهو رخيص الثمن وذو مقاومة كافية ويستخدم للعزل الكهربائي (Electrical Insulation) ونوع (S-glass) ذو المقاومة العالية لكنه غالي الثمن، النوع الأول يستخدم في التطبيقات الاعتيادية التي تتطلب مواد مركبة اعتيادية أما النوع الثاني فله استخدام خاص لإنتاج مواد مركبة متقدمة ذات خواص فائقة ويستخدم في الصناعات الفضائية [١٩، ٢٠].

هنالك أنواع أخرى مثل نوع (A-glass) الذي يستخدم للعزل الحراري (Thermal Insulation) ونوع (ECR-glass) للمقاومة الكيماوية [٢١]. الجدول (١-٦) يوضح أنواع ألياف الزجاج وتركيبها [١٧]. وبشكل عام فإن ألياف الزجاج تمتاز بكلفة منخفضة، مقاومة عالية، مقاومة تآكل وبلية جيدة، مقاومة كيماوية، مقاومة صدم جيدة فضلاً عن ثبات بالإبعاد جيد [٢٢]. الجدول (١-٧) يوضح بعض الخواص لأنواع من ألياف الزجاج [٢١].

جدول (١-٦) يوضح التركيب الكيميائي لأنواع مختلفة من ألياف الزجاج [١٧].

	A Glass	C Glass	D Glass	E Glass	ECR Glass	AR Glass	R Glass	S-٢ Glass
Oxide	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO _٢	٦٣-٧٢	٦٤-٦٨	٧٢-٧٥	٥٢-٥٦	٥٤-٦٢	٥٥-٧٥	٥٥-٦٠	٦٤-٦٦
Al _٢ O _٣	٠-٦	٣-٥	٠-١	١٢-١٦	٩-١٥	٠-٥	٢٣-٢٨	٢٤-٢٥
B _٢ O _٣	٠-٦	٤-٦	٢١-٢٤	٥-١٠		٠-٨	٠-٠,٣٥	
CaO	٦-١٠	١١-١٥	٠-١	١٦-٢٥	١٧-٢٥	١-١٠	٨-١٥	٠-٠,٢
MgO	٠-٤	٢-٤		٠-٥	٠-٤		٤-٧	٩,٥-١٠
ZnO					٢-٥			
BaO		٠-١						
Li _٢ O						٠-١,٥		
Na _٢ O+K _٢ O	١٤-١٦	٧-١٠	٠-٤	٠-٢	٠-٢	١١-٢١	٠-١	٠-٠,٢
TiO _٢	٠-٠,٦			٠-١,٥	٠-٤	٠-١,٢		
ZrO _٢						١-١٨		
Fe _٢ O _٣	٠-٠,٥	٠-٠,٨	٠-٠,٣	٠-٠,٨	٠-٠,٨	٠-٥	٠-٠,٥	٠-٠,١
F _٢	٠-٠,٤			٠-١		٠-٥	٠-٠,٣	

جدول (١-٧) يوضح بعض الخواص لأنواع من ألياف الزجاج [٢١].

Glass	Density (g/cm ^٣)	Tensile Strength (MPa)	Modulus (GPa)
S	٢,٤٩	٤٥٨٦	٨٣-٨٦
E	٢,٥٨	٣٤٥٠	٧٢,٥
A	٢,٥٠	٣٠٤٠	٦٩
ECR	٢,٦٢	٣٦٢٥	٧٢,٥

(Etching Of Fibers)

تحفير الألياف

١-

للحصول على التصاق جيد بين الليف والأرضية يجب أن يمتاز سطح الليف بخشونة سطحية (Surface Roughness) مناسبة. بحيث تصبح المساحة السطحية للليف كافية لتعزيز الربط التشابكي البيني الميكانيكي (Mechanical Interlocking) بين الليف والأرضية [٥,٣].

يمكن تحفير ألياف الزجاج باستخدام الحوامض والقواعد حيث يحدث تفاعل بين سطح ألياف الزجاج والمحاليل الكيميائية يؤدي إلى حصول إذابة للسطح وتكون حفر عليه [٢٣]. جدول (١-٨) يوضح مجموعة من المحفرات القاعدية والحامضية المستخدمة في تحفير الزجاج وأليافه عند زمن

ودرجة حرارة معينة [٢٤] . أما جدول (١-٩) فيوضح نسبة فقدان بالوزن لأنواع من ألياف الزجاج معرضة إلى محاليل مختلفة ولفترات زمنية مختلفة [١٧] .

جدول (١-٨) مجموعة من المحاليل القاعدية والحامضية المستخدمة في تحفير الزجاج وألياف الزجاج [٢٤] .

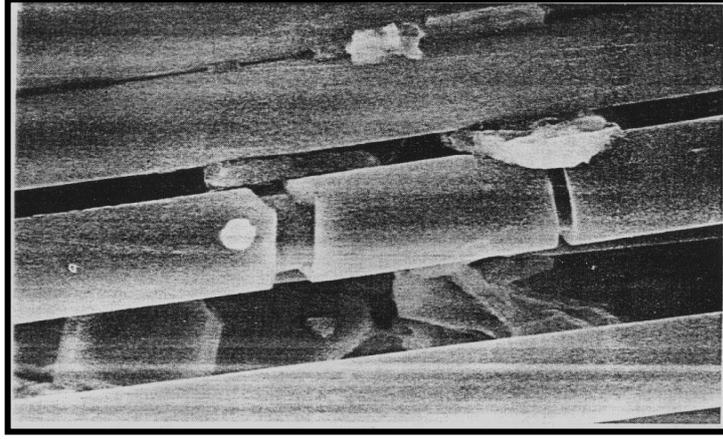
Etchant	Rinse	Etch time (s)	Temperature (°C)
NaOH(1 N)	RO water	180	80
NaOH(1 N)	Acetic acid, RO water	180	80
HF (100%)	RO water	1	25
HF (4%)	RO water	10	25
HF (1%)	RO water	5	25
NH ₄ OH	RO water	180	80
NH ₄ OH	Acetic acid, RO water	180	80

RO = Reverse Osmosis-filtered.

جدول (١-٩) النسبة المئوية للفقدان بالوزن لبعض أنواع ألياف الزجاج المعرضة لمحاليل مختلفة [١٧] .

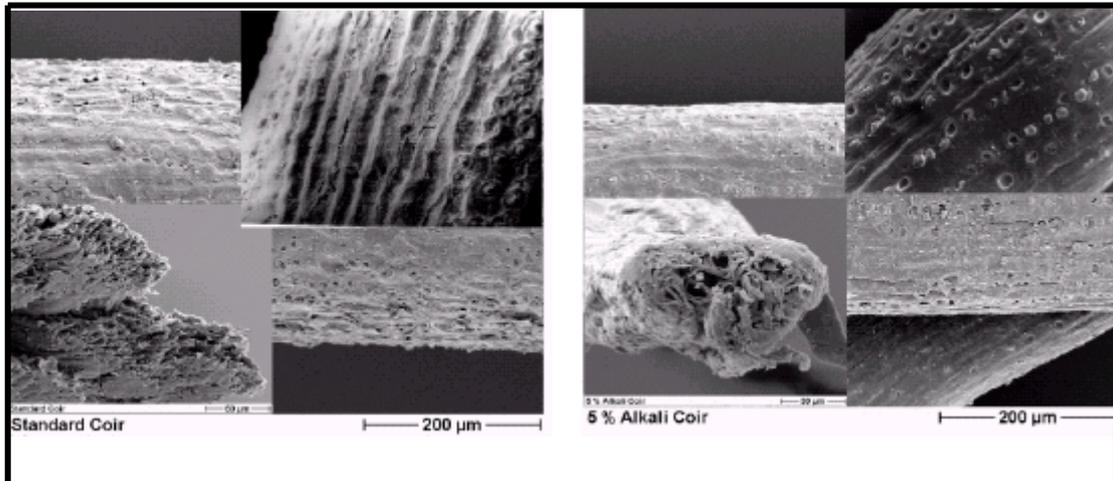
	A Glass	C Glass	D Glass	E Glass	ECR Glass	AR Glass	R Glass	S-٢ Glass
Weight Loss	%	%	%	%	%	%	%	%
H ₂ O : ٢٤ hr	١.٨	١.١	٠.٧	٠.٧	٠.٦	٠.٧	٠.٤	٠.٥
١٦٨ hr	٤.٧	٢.٩	٥.٧	٠.٩	٠.٧	١.٤	٠.٦	٠.٧
١٠% HCl : ٢٤ hr	١.٤	٤.١	٢١.٦	٤٢	٥.٤	٢.٥	٩.٥	٣.٨
١٦٨ hr		٧.٥	٢١.٨	٤٣	٧.٧	٣.٠	١٠.٢	٥.١
١٠% H ₂ SO ₄ : ٢٤ hr	٠.٤	٢.٢	١٨.٦	٣٩	٦.٢	١.٣	٩.٩	٤.١
١٦٨ hr	٢.٣	٤.٩	١٩.٥	٤٢	١٠.٤	٥.٤	١٠.٩	٥.٧
١٠% Na ₂ CO ₃ : ٢٤ hr		٢.٤	١٣.٦	٢.١		١.٣	٣.٠	٢.٠
١٦٨ hr		٣.١	٣٦.٣	٢.١	١.٨	١.٥		٢.١

فعند تعريض ألياف الزجاج (E-glass) إلى حامض الكبريتيك (H₂SO₄) بتركيز (٢٥ %) لمدة أربعة أيام ونصف (٤.٥ days) فإن التأثير القاسي للحامض على سطح الليف يكون واضحاً فيحدث تقشر لليف ونقصان في مساحة المقطع كما في شكل (١-١٠) [٢٥] .



شكل (١٠-١) صورة بالمجهر الالكتروني الماسح لألياف الزجاج (E-glass) بعد تعريضها إلى حامض الكبريتيك بتركيز (٢٥ %) لمدة (٤.٥ days) [٢٥].

عند معالجة ألياف جوز الهند (Coir Fibers) الحاوية على (٤٣ - ٣٦ %) سليولوز (Cellulose) بواسطة هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بتركيز (٥ %) لمدة (٣٠ min) وبدرجة (٣٠ °C) نلاحظ حدوث تحفير على سطح ألياف جوز الهند, شكل (١١-١) يوضح صورة لسطح ألياف جوز الهند المعاملة وغير المعاملة [٢٦].

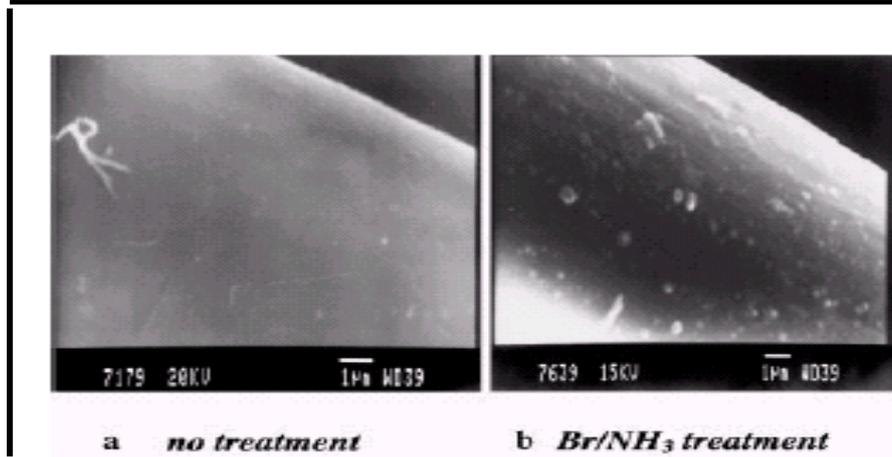


(a)

(b)

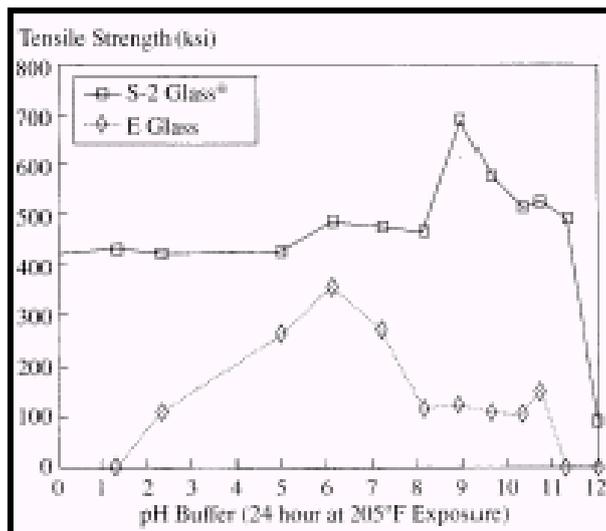
شكل (١١-١) (a) ليف جوز هند غير معاملة, منظر مستو ومقطع عرضي (X ٢٥٠) ومنظر مستو مكبر (X ٥٠٠) (b) ليف جوز هند معاملة ب(٥ % NaOH) لمدة (٣٠ min) بدرجة (٣٠ °C), منظر مستو, مقطع عرضي ومنظر مستو مكبر (X ١٠٠٠) [٢٦].

أما عند معاملة ألياف الكفلر (Kevlar ٤٩) بالمحلول المشبع المائي للبروم (Saturated Aqueous Bromine Solution) لمدة (١٥ s) ثم نقلها بعد ذلك إلى محلول الامونيا (٢٥% NH_٣) لمدة (٣٠ s) , فان ذلك يسبب تحفيراً لسطح الألياف وزيادة في خشونة سطحها والشكل (١-١٢) يوضح ذلك [٢٧] .



شكل (١-١٢) صورة بالمجهر الالكتروني الماسح لسطح ألياف الكفلر (a) غير معاملة (b) معاملة ب (Br / NH_٣) [٢٧] .

إن المعاملة الكيماوية لألياف الزجاج سوف تؤثر على خواصها الميكانيكية . إن مقاومة الشد لألياف الزجاج نوع (E-glass) و (S-٢ glass) تتأثر عند معاملةها بمزيج محلول (Buffer) من (NH_٤F) مع محاليل ذات أرقام حموضة (pH) مختلفة بدرجة (٢٠٥ °F) ولمدة (٢٤ hr) . حيث نلاحظ إن مقاومة الشد لألياف زجاج نوع (S-٢ glass) تكون أعلى من (٤٠٠ ksi) عند معالجتها بمحلول (Buffer) فقط في حين ترتفع إلى أعلى من (٦٥٠ ksi) عند معالجتها بمحلول (pH(٩)+Buffer) ولكنها تنخفض إلى اقل من (١٠٠ ksi) عند معالجتها بمحلول (pH(١٢)+Buffer) أما مقاومة الشد لألياف الزجاج نوع (E- glass) تكون (٠ ksi) عند معالجتها بمحلول (pH(١.٢)+Buffer) في حين ترتفع إلى أعلى من (٣٠٠ ksi) عند معالجتها بمحلول (pH(٦)+Buffer) ولكنها تنخفض إلى (٠ ksi) عند معالجتها بمحلول (pH(١١.٢)+Buffer) . الشكل (١-١٣) يوضح ذلك [١٧] .



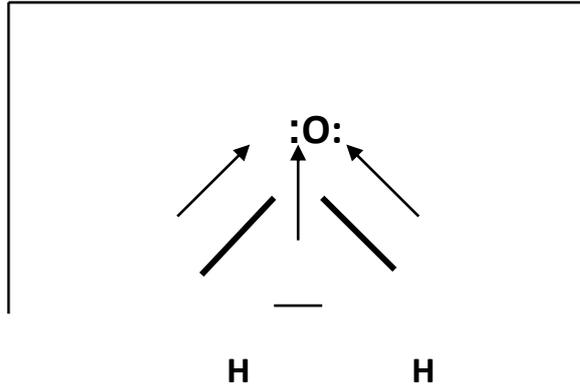
شكل (١٣-١) العلاقة بين مقاومة الشد ورقم (PH) لمحلول (Buffer) المستخدم في معاملة ألياف زجاج نوع (S-2 glass) و (E-glass) (١٧) .

يمكن استخدام الكحول الميثيلي (CH_3OH) في معالجة ألياف الزجاج , درجة غليان الكحول الميثيلي (64.7°C) وكثافته (0.792 g/cc) في درجة (20°C) ويمتلك ثابت عزل كهربائي (Dielectric Constant) يبلغ (32.6 at 25°C) وعزم استقطاب (Dipole Moment) يبلغ (1.71 D) [٢٨,٢٩,٣٠,١٠] .

ليس للكحولات خواص حامضية أو قاعدية واضحة تماماً وتعتبر الأواصر بين الذرات فيها تساهمية مستقطبة بدرجة اقل من درجة استقطاب أواصر ذرات الماء , وتتميز الرابطة بين الأوكسجين والهيدروجين في مجموعة الهيدروكسيل بالقطبية ($\text{H}^{\delta+} - \text{O}^{\delta-}$) وتبلغ طاقة الأصرة ($\text{H}_2\text{C} - \text{OH}$) (383 kJ mol^{-1}) [٣١,٣٢] .

كما يمكن استخدام الماء في معالجة ألياف الزجاج , يمتلك الماء جزيئة مستقطبة ($\text{H}^{\delta+}$ $-\text{O}^{\delta-} - \text{H}^{\delta+}$) , عزم الاستقطاب (1.82 D) , ثابت عزل كهربائي (78.54 at 25°C) وتبلغ طاقة الأصرة ($\text{H} - \text{OH}$) (498 kJ mol^{-1}) , شكل (١٤-١) يوضح عزم الاستقطاب للماء [٣٣,٢٩,٣٢] .

هيدروكسيد الصوديوم قاعدة قوية لها قابلية عالية للذوبان في الماء لكن قابلية ذوبانه في الكحول الميثيلي ضعيفة جداً , يتأين هيدروكسيد الصوديوم في الماء بسهولة في حين لايتأين في الكحول الميثيلي كما في الماء [٣١,٣٤] .



شكل (١-١٤) يوضح عزم الاستقطاب للماء .

(Literature Review)

٢-١ البحوث والدراسات السابقة

تعد المواد المركبة من المواد المهمة في التطبيقات الصناعية والهندسية ولاسيما المواد المركبة المقواة بالألياف [٣٥] ولذلك أجريت بحوث مكثفة لدراسة سطح الألياف لكونها تتحمل معظم الحمل المسلط على الأرضية . تعتبر عملية التحفير إحدى الاتجاهات التي تبنها كثير من الباحثين بهدف تحسين الصفات الميكانيكية للمواد المركبة هذه وزيادة كفاءة استخدامها .

في عام (١٩٧٩) قام الباحثان (Hujo H. and Tsuda K.) بغمر عينات من مواد مركبة ذات اساس من الفينيل مقواة بالألياف الزجاج (E-glass) في الماء , هيدروكسيد الصوديوم (١٠ % NaOH) , كلوريد الصوديوم (١٠ % NaCl) , حامض الهيدروكلوريك (HCl ١٠ %) وحامض الكبريتيك (H₂SO₄ ١٠ %) لمدة ستة اشهر . أظهرت نتائج الفحص تحفير سطح ألياف الزجاج نتيجة المعاملة هذه , بحيث ان فترة المعالجة الطويلة أدت إلى تحفير سطح الألياف إلى درجة التلف الكامل وبالنتيجة سبب انخفاضاً في مقاومة الشد ومعامل الشد للمادة المركبة [٣٦] .

في عام (١٩٩٢) أجرى الباحث (David Biro A.) واخزون معاملة لسطح ألياف الكفلر وألياف البولي اثلين باستخدام البلازما . أظهرت نتائج الفحص ارتفاع مقاومة القص البينية بين ألياف البولي اثلين المحفرة والمغمورة في الايبوكسي إلى (١١٨ %) عن مثيلتها غير المعاملة أما ألياف الكفلر المحفرة والمغمورة في الايبوكسي فقد ارتفعت مقاومة القص بنسبة (٤٥ %) عن مثيلتها غير المعاملة [٣٧] .

في عام (١٩٩٧) قام الباحث (Chin J.W.) واخرون بغمر عينات من المواد المركبة ذات اساس بوليمري مقواة بالألياف الزجاج في ماء ملحي ومحلول قاعدي ولمدة (٤٨٠٠ hr) بدرجة حرارة الغرفة ,

وبعد إكمال المعالجة أظهرت نتائج الفحص أن المواد المركبة المغمورة في ماء ملحي يحدث انخفاض طفيف في مقاومتها في حين المغمورة في محلول قلوي يحدث انخفاض ملحوظ في المقاومة والجساءة [٣٨] .

في عام (١٩٩٧) قام الباحث (Rajeev Karnani) واخرون بأكساء سطح ألياف التيل (Kenaf Fibers) بمادة عامل الربط (Maleic Anhydride grafted Poly Propylene) (MAPP) وبنسبة (٢ %) و(٥ %). أظهرت نتائج الفحص ارتفاع مقاومة الشد , مقاومة الصدم , مقاومة كسر الانحناء (Flexural Strength) والمتانة لعينات المواد المركبة ذات أساس من البولي بروبيلين (PP) والمقواة بألياف التيل المكسية مقارنة بمثيلتها المقواة بألياف غير معاملة , كما ان مقاومة الشد للمواد المركبة المقواة بألياف مكسية بنسبة (٥ %) أعلى من مثيلتها المكسية بنسبة (٢ %) [٣٩] .

في عام (١٩٩٨) قام الباحث (Kin Liao) واخرون بغمر عينات من مواد مركبة ذات أساس من الفانيل استر والمقواة بألياف الزجاج في ظروف مختلفة تشمل : ماء لمدة (٣٩٤٠ hr) , (٥ % NaCl) لمدة (٤٩٥٠ hr) و(١٠ % NaCl) لمدة (٦٥٧٠ hr) وبدرجة حرارة الغرفة فضلاً عن تعريضها للماء بدرجة (٧٥ °C) ولمدة (٢٤٠٠ hr). أظهرت نتائج الفحص انخفاضاً بسيطاً في معامل كسر الانحناء (Flexural Modulus) لعينات المواد المركبة المعاملة بالماء والمحاليل الملحية بدرجة حرارة الغرفة مقارنة بالعينات غير المعاملة في حين يحدث انخفاض كبير في معامل كسر الانحناء لعينات المواد المركبة المعاملة بالماء بدرجة (٧٥ °C) ولمدة (٢٤٠٠ hr) مقارنة بالعينات غير المعاملة , كما أن مقاومة كسر الانحناء (Flexural Strength) تنخفض بنسبة (١٣ - ٥ %) لعينات المواد المركبة المعاملة بالماء والمحاليل الملحية بدرجة حرارة الغرفة مقارنة بالعينات غير المعاملة في حين تنخفض مقاومة كسر الانحناء بنسبة (٤٠ %) للعينات المعاملة بالماء بدرجة (٧٥ °C) ولمدة (٢٤٠٠ hr) مقارنة بالعينات غير المعاملة [٤٠] .

في عام (١٩٩٩) أجرى الباحث (Tao C. Chang) معاملة سطحية باستخدام بلازما الأوكسجين والامونيا (Oxygen And Ammonia Plasma) لسطح ألياف الكربون لتحسين الالتصاق البيئي بين ألياف الكربون والراتنج (Bismaleimide) (BMI). بينت الدراسة أن بلازما الأوكسجين تحفر سطح الألياف أكثر من بلازما الامونيا . أظهرت نتائج الفحص ارتفاع مقاومة الشد العرضية (Transverse Tensile Strength) للمواد المركبة المقواة بالألياف المعاملة ببلازما الأوكسجين والامونيا عن مقاومة الشد العرضية للمواد المركبة المقواة بالألياف غير المعاملة , أما المعاملة ببلازما الأوكسجين فمقاومتها أعلى من تلك المعاملة ببلازما الامونيا , في حين تكون مقاومة الشد الطولية (Longitudinal Tensile Strength) للألياف المعاملة ببلازما الأوكسجين والامونيا اقل من مقاومة الشد الطولية للألياف الغير معاملة , ولتلك المعاملة بالأوكسجين أكثر انخفاضاً مقارنة بالمعاملة بالامونيا [٤١] .

في عام (١٩٩٩) قام الباحثان (Park R. and jang J.) بتحفير سطح ألياف البولي اثلين (Polyethylene Fibers) باستخدام بلازما الأوكسجين . بينت الفحوصات زيادة كبيرة في مقاومة كسر الانحناء (Flexural Strength) للمواد المركبة ذات اساس من الفانيل استر (Vinyl ester) المقواة بالياف البولي اثيلين المحفرة [٤٢] .

في عام (١٩٩٩) قام الباحثان (Van Den Abeele K. and Van De Velde K.) بمعاملة عينات من مواد مركبة ذات اساس من البولي استر المقواة باللياف الزجاج (E-glass) مع مائتات من كاربونات الكالسيوم بمحلول هيدروكسيد الصوديوم (٥% NaOH) و حامض الكبريتيك (١٠% H₂SO₄) لمدة (١٢ Months, ٦, ٣, ١). أظهرت الفحوصات انخفاضاً في مقاومة كسر الانحناء (Flexural Strength), مقاومة الشد (Tensile Strength) ومعامل الشد (Tensile Modulus) ومعامل الانحناء (Bending Modulus) مع زيادة وقت المعالجة وقد عزى الباحثان ذلك إلى انخفاض خواص الألياف نتيجة المعاملة وتكون شقوق وزيادة عمقها بزيادة الفترة الزمنية للمعالجة. والانخفاض في مقاومة الشد ومقاومة كسر الانحناء للمواد المركبة المعاملة بـ (NaOH) أعلى من تلك المعاملة بـ (H₂SO₄) [٤٣].

في عام (١٩٩٩) قام الباحث (Nils Berg Madsen) بمعاملة عينات من مواد مركبة ذات أساس من (Poly Phenylene Sulfide) (PPS) مقواة بألياف زجاج بمحاليل مائية ذات درجة حموضة (pH ٧) و بدرجات حرارة (١٤٠ °C and ١٢٥, ٩٠) ولفترات زمنية (٣٠٠, ١٠٠, ٠, ٩ and pH ١٢), وبدرجات حرارة (٩٠٠٠ and ٣٠٠٠, ١٠٠٠ hr). أظهرت نتائج الفحص ارتفاع مقاومة الصدم, مقاومة الشد والاستطالة لعينات المواد المركبة المسخنة إلى (١٤٠ °C) دون أي معاملة كيميائية مقارنة بالعينات المعاملة كيميائياً ولوحظ انخفاض في مقاومة الصدم, مقاومة الشد والاستطالة مع زيادة درجة الحرارة وزمن المعاملة [١٠].

في عام (٢٠٠١) قام الباحث (Alexander Bismarck) واخرون بتحفير سطح ألياف جوز الهند (Coir Fibers) بغمرها في محلول هيدروكسيد الصوديوم (٥% NaOH). حيث أظهرت الفحوصات ارتفاعاً في مقاومة الشد ومقاومة كسر الانحناء لعينات من مواد مركبة ذات اساس من البولي استر المقواة باللياف جوز الهند المحفرة بالمقارنة مع عينات المواد المركبة المقواة باللياف غير معاملة [٢٦].

في عام (٢٠٠١) قام الباحث (Debes Battacharyya) بمعاملة ألياف الخشب معاملة كيميائية (Chemical Treatment), أظهرت نتائج الفحص زيادة كبيرة في مقاومة الربط البيني بين ألياف الخشب المعاملة والبوليمرات المتلدنة بالحرارة (Thermoplastic Polymers) لان الربط بين اللدائن والألياف غير المعاملة ضعيف. كما أجرى الباحثون معاملة فيزيائية باستخدام بلازما غاز الارجون (Argon Gas) لتحفير سطح ألياف الخشب وكانت نتائج الفحص ارتفاعاً في مقاومة الربط (ليف - أرضية) [٤٤].

في عام (٢٠٠٣) قام الباحث (Alexander Feldman) واخرون بمعاملة سطح ألياف الكفلر (٤٩) بمحلول المشبع المائي للبروم (Saturated Aqueous Bromine Solution) لمدة (١٥ s) ثم بعدها تعامل بمحلول الامونيا (٢٥% NH₃) لمدة (٣٠ s) حيث أظهرت صور المجهر الالكتروني الماسح (Scanning Electron Microscope) تكون حفر على سطح الألياف زادت من خشونة السطح كما أظهرت نتائج الفحص لعينات من مواد مركبة ذات اساس من النايلون (٦٦) والمقواة باللياف الكفلر المحفرة انخفاض مقاومة الشد ومعامل الشد مقارنة بعينات من مواد مركبة مقواة باللياف كفلر غير معاملة [٢٧].

في عام (٢٠٠٣) أجرى الباحث (Panigrahi S.) واخرون معاملة كيميائية لألياف الكتان (Flax Fibers) باستخدام (Benzol Chloride) وعامل الربط (Triethoxy Silane). أظهرت نتائج الفحص ارتفاع مقاومة الشد ومقاومة الربط بين الليف والأرضية لعينات المواد المركبة ذات أساس من البولي اثلين واطئ الكثافة وعالي الكثافة والمقواة بألياف كتان معاملة بعامل الربط مقارنة بالعينات المقواة بألياف غير معاملة , أما عينات المواد المركبة المقواة بألياف معاملة بـ (Benzol Chloride) ترتفع مقاومة الشد , مقاومة الصدم ومقاومة كسر الانحناء مقارنة بالعينات المقواة بألياف غير معاملة . [٤٥]

في عام (٢٠٠٣) قام الباحث (Wang B.) واخرون بمعاملة ألياف الكتان معاملة كيميائية باستخدام (Triethoxy Vinyl Silane) , (Benzoyl Chloride) و (Dicumyl Peroxide). أظهرت نتائج الفحص ارتفاع مقاومة الشد لحزم ألياف الكتان المعاملة بـ (Triethoxy Vinyl Silane) و (Dicumyl Peroxide) مقارنة بتلك المقواة بألياف غير معاملة بينما تنخفض مقاومة الشد لحزم ألياف الكتان المعاملة بـ (Benzoyl Chloride) مقارنة بالألياف غير المعاملة [٤٦] .

في عام (٢٠٠٤) أجرى الباحث (Stefanie Feih) واخرون معاملة سطحية للياف الزجاج نوع (E-glass) باستخدام (Trimethoxysilypropyl Modified Polyethylenimine) (TMPP) و (Chloroform Extracted). أظهرت نتائج الفحص ارتفاع مقاومة الشد للألياف المعاملة مقارنة بالألياف غير المعاملة والمعاملة بـ (TMPP) أعلى من تلك المعاملة بـ (Chloroform Extracted) , كما ترتفع مقاومة القص البيئية بين الليف والأرضية للألياف المعاملة مقارنة بالألياف غير المعاملة والمعاملة بـ (TMPP) أعلى من تلك المعاملة بـ (Chloroform Extracted) [٤٧] .

في عام (٢٠٠٤) قام الباحث (Donghwan Cho) واخرون بأكساء ألياف الكاربون باستخدام مجموعة من المواد (Epoxy) , (Vinyl Ester) , (Poly Vinyl Alcohol) , (Poly Vinyl Butyral) و (Poly Etherimide) وكانت المعاملة بعدة نسب وهي (٢٠ , ١٠٠ and ٤٠٠) . أظهرت نتائج الفحص انخفاض معامل المرونة (Elastic Modulus) لعينات المواد المركبة ذات أساس من النايلون (٦) والمقواة بألياف الكاربون المعاملة مقارنة بالعينات المقواة بألياف غير معاملة . وأظهرت العينات المعاملة بنسبة (١٠٠ %) انخفاضاً أقل من تلك المعاملة بنسبة (٢٠ %) و (٤٠٠ %) أما تلك المعاملة بنسبة (٢٠ %) فهي أقل من تلك ذات نسبة (٤٠٠ %) [٤] .

٢-٢ ملخص البحوث السابقة

أظهرت البحوث السابقة توجيهين : الأول يتضمن معاملة الألياف قبل استخدامها كمادة تقوية في المواد المركبة أما الثاني فيتضمن معاملة المادة المركبة ككل .

إن أهم الفحوصات التي ركزت عليها البحوث السابقة هي : فحص الشد , فحص الانحناء , فحص القص البيني بين الألياف والأرضية وفحص الصدم إضافة إلى التصوير المجهرى .

كما لوحظ في البحوث السابقة ان المعاملة الكيماوية للألياف قبل استخدامها كمادة تقوية تؤدي إلى زيادة مقاومة الشد , مقاومة الانحناء ومقاومة الصدم للمواد المركبة المقواة بألياف معاملة كيميائياً كما تزداد مقاومة القص البينية بين الألياف المعاملة والأرضية في حين تنخفض مقاومة الشد للألياف المعاملة اذا كانت المعاملة الكيماوية لغرض اكساء الألياف . أما المعاملة بالمحاليل الكيماوية للمادة المركبة فتؤدي إلى خفض مقاومة الشد , مقاومة الانحناء ومقاومة الصدم للمادة المركبة المعاملة .

إن الألياف المعاملة بالبلازما (تحفير جاف) تؤدي إلى زيادة مقاومة القص البينية بين الألياف المعاملة والأرضية ومقاومة الانحناء للمواد المركبة المقواة بألياف معاملة لكنها تؤدي إلى انخفاض مقاومة الشد للألياف المعاملة .

٢-٣ هدف البحث الحالي

يهدف البحث الحالي إلى تحسين الربط البيني بين الألياف والأرضية من خلال تحفير سطح الألياف وإنشاء ربط تشابكي بيني بين الألياف والأرضية . كما يهتم بدراسة تأثير تحفير الألياف على الصفات الميكانيكية للألياف والمادة المركبة المقواة بها . اختيرت في الدراسة ألياف الزجاج (E-glass) على أساس أنها واسعة الاستخدام لتقوية البوليمرات ولرخص ثمنها ولمقاومتها وجسائها الجيدتين ولأنها متوفرة بكثرة , وتم استخدام البولي استر غير المشبع كمادة أساس لكونه متوفراً بكثرة وواسع الاستخدام . وقد تم اختيار التحفير الرطب باستخدام محاليل لمذيبات غير الماء إضافة إلى الماء لتحفير سطح الألياف لانخفاض كلفته ولكونه لا يحتاج إلى أجهزة معقدة كما في التحفير الجاف .

أما العوامل التي شملتها الدراسة الحالية والمؤثرة في عملية التحفير الرطب لألياف الزجاج فهي : درجة الحرارة , الزمن , نوع محلول التحفير والنسبة الوزنية بين الألياف ومحلول التحفير .

إن موضوع الدراسة المقدمة في البحث الحالي يتضمن :

١- التحفير الرطب لألياف الزجاج باستخدام مزيجين الأول من هيدروكسيد الصوديوم والكحول الميثيلي ($CH_3OH + NaOH$) والثاني من هيدروكسيد الصوديوم والماء ($H_2O + NaOH$) لغرض إنشاء حفر أو نقر لزيادة الخشونة السطحية من ثم زيادة الربط بين الألياف والأرضية .

٢- المقارنة بين نسبة الفقدان بالوزن لألياف الزجاج المعالجة باستخدام محلول التحفير الأول والمعالجة باستخدام محلول التحفير الثاني .

٣- دراسة تأثير تحفير سطح الألياف باستخدام محلول التحفير الأول على مقاومة الشد للألياف .

- ٤- دراسة تأثير التحفير على الخواص الميكانيكية للمادة المركبة ذات الأساس البولي استر غير المشبع والمقواة بألياف زجاج محفرة باستخدام محلول التحفير الأول .
- ٥- دراسة العوامل المؤثرة على فعالية المحلول الأول والثاني في التحفير.

المقدمة

٣-

يتناول هذا الفصل : المواد والأجهزة المستخدمة في الدراسة الحالية , الأسلوب العملي المتبع لتحضير نماذج الألياف , العمليات اللازمة لتهيئة النماذج للفحوصات الفيزيائية والاختبارات الميكانيكية , تحضير نماذج المواد المركبة والاختبارات الميكانيكية الخاصة بها .

Used)

المواد المستخدمة

٣-

تشمل المواد المستخدمة في البحث الحالي ما يلي :

١- راتنج البولي استر غير المشبع (Unsaturated Polyester Resin)

تم استخدام راتنج البولي استر غير المشبع الذي تم تأمينه من الأسواق المحلية وهو مجهز من شركة (Lonza S.P.A) .

٢- كحول مثيلي (ميثانول) (Methanol)

تم تأمين كحول الميثانول الصناعي من الأسواق المحلية واجري له تقطير حيث يبدأ الكحول بالغليان في درجة حرارة (٦٤.٧ °C) .

٣- الماء المقطر (Distilled Water)

استخدم في البحث ماء مقطر تم تأمينه في مختبرات - قسم هندسة المواد - كلية الهندسة .

٤ - هيدروكسيد الصوديوم (Sodium Hydroxide)

تم تأمين هيدروكسيد الصوديوم من الأسواق المحلية ويكون الهيدروكسيد على شكل قشور , حيث يلاحظ أن لهيدروكسيد الصوديوم قابلية عالية للذوبان في الماء لكن قابلية ذوبانه في الكحول المثيلي ضعيفة جداً .

٥ - ألياف الزجاج (Glass Fibers)

تم استخدام ألياف زجاج نوع (E-glass) وبشكل ظفائر محاكاة (٩٠ - ٠) (Woven Roving) وتم تأمينه من الأسواق المحلية وهي مجهزة من قبل شركة (Binani) . الجدول (٣-١) يوضح صفات ألياف الزجاج المستخدمة بحسب مواصفات الشركة المجهزة .

جدول (٣-١) يوضح صفات ألياف الزجاج (E-glass) المجهزة من شركة (Binani) وموقعها الإلكتروني (<http://www.binani.com>) .

Characteristics	Limits	Nominal Values
Standard Weight	± ١٠%	٦١٠ g/m ^٢
Rovings Linear Weight (Tex)	± ١٠%	١٢٠٠ g/m
Standard Widths (mm)	± ٢٥, -٠	١٥٠٠ / ١٢٥٠
Standard Lengths (meters)	± ٥	٦٠

٣-٣ الأجهزة والمعدات المستخدمة في البحث الحالي

لغرض اجراء المعاملات الخاصة بالتحفير الرطب للألياف المستخدمة في الدراسة الحالية وتحضير النماذج الخاصة بها وكذلك لغرض اجراء الفحوصات المطلوبة للألياف المعاملة وغير المعاملة والفحوصات لنماذج المادة المركبة المصنعة في الدراسة فقد تم استخدام الأجهزة والمعدات التالية :-

١- **جهاز التقطير** : يتألف من مسخن كهربائي نوع (EM ١٠٠٠) إنكليزي المنشأ أقصى درجة حرارة له (٤٥٠ °C) ومنظم قدرة نوع (SPK) صيني المنشأ إضافة إلى منظومة أنابيب زجاجية وذراع حامل لمسك المنظومة كما يحتوي على دورقين ومحرار لقياس درجة حرارة الغليان للسائل والشكل (a ٣-١) يوضح جهاز التقطير المستخدم في تقطير الكحول .

٢- **حمام مائي** : تحتاج المعاملة الكيماوية (التحفير الرطب) باستخدام المحاليل الكيماوية إلى حرارة ثابتة ولتحقيق ذلك تم استخدام حمام مائي تم تصنيعه خصيصاً لهذا الغرض , حيث تم تصنيع حوض معدني اسطواني الشكل من الصفائح المغلونة بارتفاع (٣٤ cm) وقطر (٢٩ cm) وثبت مسخن متوسط القدرة داخله واستخدم منظم حرارة (Thermostat) بأقصى تدرج (٥٠ °C) وأدنى تدرج (٥ °C) .

المتحسس الخاص بالمنظم يوضع داخل الحوض حيث يتحسس حرارة الماء ويتحكم بالفصل , وقد أجريت معايرة للحمام من خلال معايرة درجة حرارة الماء ومقارنتها مع ما مثبت على المنظم . يغلق الحوض المعدني باحكام بغطاء معدني والمنظومة بالكامل موضوعة داخل صندوق عازل من الفلين لكي لا يتأثر بتغير حرارة الجو . شكل (b ٣-١) يوضح الحمام المائي.

٣- حافظه زجاجية .

٤- أنابيب مختبرية بلاستيكية .

٥- فرن تجفيف : نوع (٣٠٠) موديل (D ١٥) درجة الحرارة (F ٥٥٠ - ١٠٠) من إنتاج شركة (Phoenix Products Company , inc) أمريكي المنشأ .

٦- فرن حرق : نوع (ثرموكيل) ألماني المنشأ .

٧- سلايدات زجاجية .

٨- ميزان حساس : ألماني المنشأ نوع (Sartorius Laboratory) موديل (D - **S ٢٢٠ L) رقم (٣٩٠٩٠٠٠٢) ذو دقة أربعة أصفار بعد الفارزة .

٩- مجهر ضوئي : نوع (Altay) موديل (١٠٠٧ - Biolab) بقوة تكبير قصوى (X ١٥٠٠).

١٠- قالب تصنيع عينات اختبار الانحناء للمواد المركبة : تم استخدام عينة الانحناء القياسية بالإبعاد (mm^٣ ١٦٠ * ١٥ * ٨) بحسب قياسات (ASTM) , ولإنتاج عينات اختبار الانحناء للمواد المركبة تم تصنيع قالب معدني يتكون من صفيحة معدنية مستوية بأبعاد (٣١ * ١٥ * ٠.٢٥ cm^٣) يتم تثبيت قضيبين مربعي المقطع من المعدن على سطح الصفيحة باللحام بحيث يكونان متوازيان ومستويان وتكون المسافة بينهما (١.٥ cm) وطول كل واحد (١٦ cm) وبارتفاع (٢ cm) , وعند نهاية كلا القضيبين توضع ثلاث صفائح معدنية سمك الواحدة (٢.٥ mm) وتكون حرة الحركة وتثبت باستخدام براغي تثبيت الفائدة منها تثبيت الألياف من كل طرف أثناء التقوية وفصل طبقات الألياف بعضها عن البعض ومنع تداخل حزم ألياف الطبقة العليا مع حزم الطبقة التي تحتها , شكل (c ٣-١) يوضح قالب عينة الانحناء للمواد المركبة .

١١- قالب تصنيع عينات اختبار الشد للمواد المركبة : تم استخدام عينة الشد القياسية (ASTM D ٦٣٨) , ولإنتاج نماذج اختبار الشد للمواد المركبة تم تصنيع قالب معدني يتكون من صفيحة معدنية مستوية أبعادها (mm^٣ ٢٣ * ١٨.٥ * ٠.٢٥) ثم ثبتت ست قطع معدنية صغيرة بسمك (٦ mm) باستخدام براغي وقد اجري تشغيل لجوانب هذه القطع بحيث تشكل مجتمعة شكل عينة اختبار الشد وعند الحافات توجد صفيحتان متحركتان عند كل طرف بسمك (٢.٥ mm) لكل واحدة تثبتت باستخدام براغي فائدة هذه الصفائح تثبيت الألياف أثناء تصنيع عينات المواد المركبة المقواة بالألياف لإجراء اختبار الشد . الشكل (d ٣-١) يوضح قالب عينة الشد للمواد المركبة .

١٢- جهاز الاختبارات العامة : المائي المنشأ نوع (PHYWE ١٧٥٧١.٩٣) المستخدم في اختبار الانحناء للمواد المركبة , (ملحق A) .

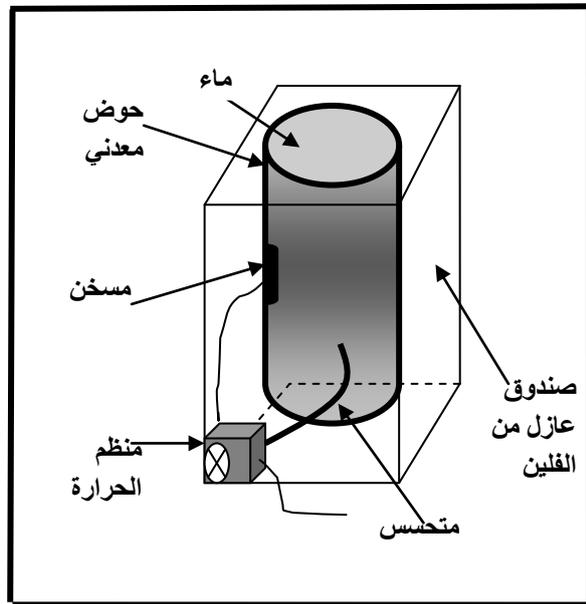
١٣- جهاز اختبار الشد للألياف : ياباني المنشأ نوع (UTM-١١-٢٠) بقوة تحميل قصوى مقدارها (٢٠ kg) حيث تسجل قراءة الاختبار على ورق بياني خاص نوع (SS-٥٠٥ D) , (ملحق A) .

١٤- جهاز اختبار الشد للمواد المركبة : بريطاني المنشأ نوع (Instron ١١٩٥) ويسجل قراءة الاختبار على ورق بياني خاص نوع (Instron ٣٧١٠ - ٠١٦) , (ملحق A) .

شكل (٢-٣) يوضح مخطط تسلسل البرنامج العملي المتبع في البحث .



(a)



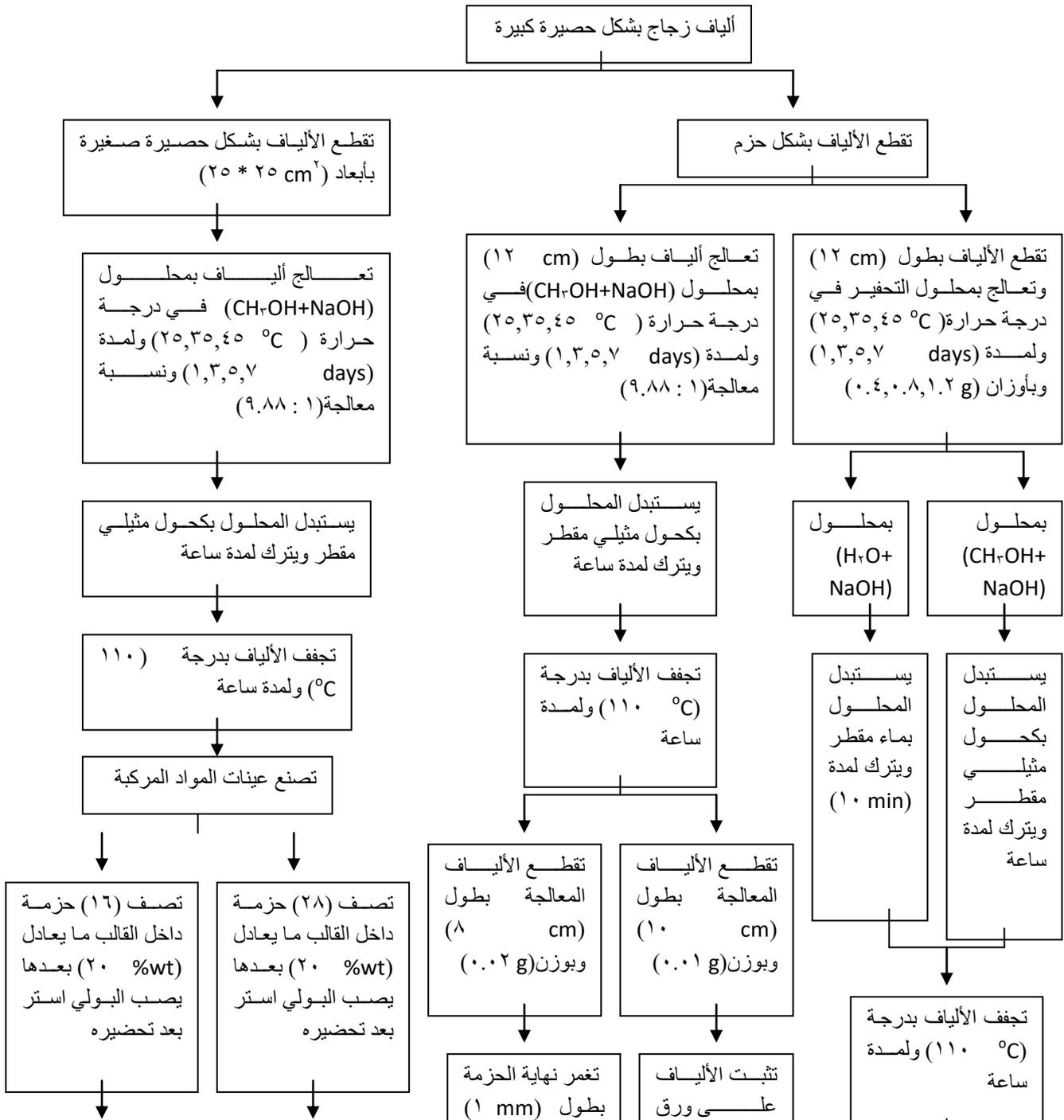
(b)



(c)

(d)

الشكل (٣-١) يوضح (a) جهاز التقطير المستخدم في تنقية الكحول المثيلي (b) حمام مائي (c) قالب عينة الانحناء للمواد المركبة (d) قالب عينة الشد للمواد المركبة .



٣-٤ النماذج والاختبارات المعتمدة في الدراسة الحالية

النماذج المحضرة في البحث الحالي نوعان : الأول يشمل نماذج من ألياف الزجاج نوع (E-glass) تجرى لها عمليات تحفير رطب , أما الثاني فيشمل نماذج للمواد المركبة المقواة بألياف محفرة وغير محفرة لغرض اجراء الاختبارات الميكانيكية .

٣-٤- نماذج الألياف المحفرة واختباراتها

(Etched Fibers Specimens and Their Tests) ١

لتحضير المحاليل الخاصة بعملية التحفير الرطب لألياف الزجاج يستخدم الكحول المثيلي المقطر , الماء المقطر وهيدروكسيد الصوديوم , حيث تجري عملية التقطير للكحول لغرض الحصول على كحول نقي . يتم ذلك بوضع الكحول في دورق زجاجي وإضافة القليل من هيدروكسيد الصوديوم لامتصاص الرطوبة الموجودة مع وضع قطعة صغيرة من الحصى بهدف تكسير الفقاعات الكبيرة المتولدة أثناء

الغليان . يسخن الدورق إلى أن يصل الكحول إلى درجة حرارة الغليان البالغة (64.7 °C) عندها يبدأ بالغليان والمرور خلال منظومة التبريد الملحقة بالدورق حيث يتكثف البخار ويخرج على شكل سائل يصب في دورق زجاجي آخر لجمع الكحول النقي . أما محلول التحفير فقد تم تحضيره بمزج (99.5 wt%) كحول مثيلي مقطر مع (0.5 wt%) هيدروكسيد الصوديوم ورج المحلول لمدة (5 min) لإذابة الهيدروكسيد كما تم مزج (99.5 wt%) ماء مقطر مع (0.5 wt%) هيدروكسيد الصوديوم ورج المحلول لمدة (30 s) لإذابة الهيدروكسيد لأنه أسرع ذوباناً في الماء مما هو في الكحول بعدها يتم غمر الألياف في المحلول المختار حسب الوقت والحرارة المحددين . تم تحضير الألياف وتحفيرها حسب الاختبارات التالية :

(Weight Loss Test)

١- اختبار الفقدان بالوزن

تم تقطيع ألياف الزجاج بطول (12 cm) وعلى شكل حزم بثلاثة أوزان مختلفة هي : (0.4 , 1.2 g and 0.8) لمعرفة تأثير النسبة الوزنية للألياف ومحلول التحفير . وضعت بعدها الحزم في أنابيب مختبرية (Test Tubes) حيث تم ملؤها بمحلول (CH₃OH + NaOH) . ثم وضعت الأنابيب على قاعدة اسطوانية مصممة لحمل الأنابيب حيث وضعت داخل الحمام المائي .

بعد إكمال المعالجة بمحلول (CH₃OH + NaOH) يستبدل المحلول بكحول مقطر وتترك الأنابيب لمدة ساعة لغرض غسل الألياف وإزالة محلول التحفير والمواد المترسبة أو نواتج عملية التحفير ثم يتم إخراج عينات الألياف من الأنابيب لتجفف داخل فرن تجفيف (Oven) لمدة ساعة وبدرجة حرارة (110 °C) يتم بعدها وزن عينات الألياف بعد عملية التحفير ومن ثم توضع العينات داخل حاوية زجاجية . كما أجريت معالجة لألياف الزجاج بمحلول (H₂O + NaOH) وبنفس الأسلوب المتبع في المعالجة بمحلول (CH₃OH + NaOH) لكن بعد المعالجة يستبدل محلول التحفير بماء مقطر وتترك الألياف لمدة (10 min) لان هيدروكسيد الصوديوم المترسب سهل الذوبان في الماء , ثم تجفف داخل فرن تجفيف لمدة ساعة وبدرجة حرارة (110 °C) ويتم حساب الفرق بالوزن . الجدول (٣-٢) يوضح درجات الحرارة والأوزان والفترات المعتمدة في هذا الاختبار , شكل (٣-٣) يوضح عينات ألياف الزجاج .

يتم حساب نسبة الفقدان بالوزن على أساس المعادلة التالية :

$$W \% = \frac{W_0 - W_1}{W_0} * 100 \quad [3-1]$$

W_0 = وزن عينة الألياف قبل المعاملة (g) .

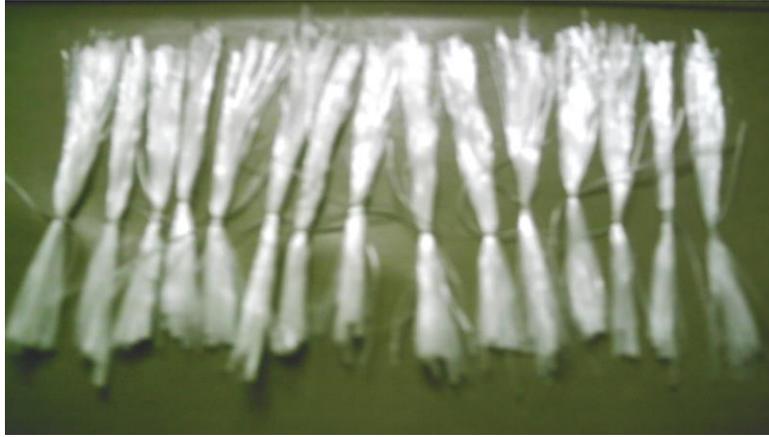
W_1 = وزن عينة الألياف بعد المعاملة (g) .

$W\%$ = النسبة المئوية للفقدان بالوزن .

للحصول على دقة عالية في نتائج الاختبار تم اعتماد معدل نتائج خمس عينات في الاختبار الواحد .

جدول (٣-٢) يوضح فترات , درجات حرارة , أوزان وعدد العينات المعالجة المستخدمة في اختبار الفقدان بالوزن لألياف الزجاج محفرة بمحلول $(CH_3OH + NaOH)$ أو محلول $(H_2O + NaOH)$.

Temp. (°C) of The Etching Solution	Weight(g) of Fiber Sample	Etching Time (days)	Number Of Samples
٢٥	٠.٤	١,٣,٥,٧	٢٠
٢٥	٠.٨	١,٣,٥,٧	٢٠
٢٥	١.٢	١,٣,٥,٧	٢٠
٣٥	٠.٤	١,٣,٥,٧	٢٠
٣٥	٠.٨	١,٣,٥,٧	٢٠
٣٥	١.٢	١,٣,٥,٧	٢٠
٤٥	٠.٤	١,٣,٥,٧	٢٠
٤٥	٠.٨	١,٣,٥,٧	٢٠
٤٥	١.٢	١,٣,٥,٧	٢٠



شكل (٣-٣) صورة لعينات ألياف الزجاج .

(Tensile Test Of Fibers)

٢- اختبار الشد للألياف

يتم تقطيع ألياف الزجاج بطول (12 cm) واختيرت معالجة الألياف بوزن (0.8 g) لتوسطها بين (1.2 , 0.4) وبنسبة وزنية (1 : 9.88) أي كل (1 g) من ألياف الزجاج تغمر في (9.88 g) من محلول (CH₃OH + NaOH). حيث توضع الألياف المقطعة بشكل حزم داخل الأنابيب المخترية ويضاف إليها محلول التحفير حسب النسبة الوزنية المذكورة وتجري المعالجة وفق درجات الحرارة والفترات الزمنية المثبتة في جدول (3-3). توضع الأنابيب داخل الحمام وتترك بحسب الوقت والحرارة بعدها يتم إخراج الأنابيب وتفريغ محلول التحفير واستبداله بكحول مقطر ويترك لمدة ساعة ثم تجفف الألياف داخل فرن تجفيف لمدة ساعة وبدرجة حرارة (110 °C) ومن ثم تحفظ في حاوية زجاجية لحين استخدامها في اختبار الشد .

أجري اختبار الشد لألياف بشكل حزمة بموجب مواصفة قياسية (Text.Inst.50) خاصة بذلك تعتمد حزمة من الألياف بطول (50 - 10 mm) مع تثبيت وزن كل عينة [46,48].

تقطع ألياف الزجاج المحفرة وغير المحفرة بطول (10 cm) ويتم وزن حزمة بمقدار (0.01 g) لكل عينة بعدها تثبت الحزمة على ورقة طولها بنفس طول الحزمة ويلصق طرفا الحزمة على الورقة بطول (2.5 cm) لكل طرف بحيث تبقى المسافة (5 cm) غير المثبتة لتمثل طول الاختبار . شكل (3-4) بين صورة لعينات الشد قبل الاختبار .

استخدم في هذا الاختبار جهاز اختبار الشد للألياف نوع (UTM-11-20) حيث يتم تسجيل الحمل ومقدار الاستطالة على ورق بياني خاص حتى حدوث الفشل . وتثبت أثناء الاختبار سرعة تسليط الحمل حيث بلغت (20 mm/min) وكذلك سرعة الورق البياني البالغة (10 mm/min) , ولتقليل نسبة الخطأ تم اعتماد معدل نتائج اختبار ثلاثة عينات شد لكل نوع من العينات .

يتم حساب الحمل من الورق البياني مباشرة وبالمعادلة التالية :

$$P = N * C$$

$$[3-2]$$

$$N = \text{عدد الوحدات المؤشرة على الورق البياني} .$$

$$C = \text{ثابت قيمته تساوي (0.2 kg) للوحدة الواحدة} .$$

$$P = \text{الحمل (kg)} .$$

أما الاستطالة فتحسب على أساس المعادلة التالية :

$$\text{Elongation amount} * H.S / C.S$$

$$\text{Elongation (\%)} = \frac{\text{Test Length} + \text{Looseness} * \text{H.S} / \text{C.S}}{\text{Test Length}} * 100 \quad [3-3]$$

$$\text{Test Length} + \text{Looseness} * \text{H.S} / \text{C.S}$$

Elongation amount = كمية الاستطالة (mm) تقرأ من نقطة الشد الابتدائي إلى نقطة القطع .

Test Length = طول عينة الاختبار (mm) .

Looseness = الارتخاء (mm) يقرأ من بداية هبوط الطربوش إلى نقطة الشد .

H.S = سرعة تسليط الحمل (mm/min) .

C.S = سرعة الورق البياني (mm/min) .

بما أن عينة اختبار الشد المستخدمة عبارة عن حزمة من الألياف وعليه تستخدم الكثافة الخطية (Linear Density) للعينة بدلاً من مساحة المقطع العرضي التي يعبر عنها بـ (Tex) ولحساب قيمة الإجهاد المسلط كما في المعادلة التالية [٤٦, ٤٨] :

$$\text{Stress (Mass Stress)} = \frac{\text{Load}}{\text{Linear Density}} \quad [3-4]$$

$$= (g / \text{Tex})$$

Tex = الوزن مقدراً بالغرام لطول ثابت قدره (١٠٠٠ m) , أي كل (١ Tex) تعني (١٠٠٠ m) تزن (١) (g) [٤٩] .

ويتم حساب معامل المرونة للألياف (Modulus of Elasticity) من خلال المعادلات التالية :

$$\text{Elongation (\%)} = \frac{\delta L_f}{L_{of}} * 100 \quad [3-5]$$

$$\text{Strain} = \frac{\delta L_f}{L_{of}} \quad [3-6]$$

$$\text{Modulus of Elasticity} = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} \quad [3-7]$$

δL_f = الزيادة الحاصلة في طول عينة الألياف (mm) .

L_{of} = طول الأصلي (Original Length) لعينة الألياف (mm) .



شكل (3-4) عينات شد لألياف الزجاج قبل الاختبار.

جدول (3-3) يوضح فترات , درجات حرارة وعدد الحزم المعالجة المستخدمة في اختبار الشد لألياف الزجاج المحفرة بمحلول (CH₃OH + NaOH) .

Temp. (°C) of The Etching Solution	Etching Time (days)	Number Of Samples
٢٥	١,٣,٥,٧	٢٠
٣٥	١,٣,٥,٧	٢٠
٤٥	١,٣,٥,٧	٢٠

٣- اختبار الشد واختبار الانحناء ثلاثي النقاط للمواد المركبة

(Tensile Test and Three - Points Bending Test For Composites)

لتحفير ألياف الزجاج لاستخدامها في تحضير عينات اختبار الشد واختبار الانحناء للمواد المركبة تم تقطيع الألياف بشكل حصيرة مربعة وبإبعاد (٢٥ * ٢٥ cm) تم غمرها في محلول (CH₂OH + NaOH) بنسبة وزنية (١ : ٩.٨٨) أي (١ g) من الألياف تغمر في (٩.٨٨ g) من محلول التحفير . توضع الحصيرة داخل عبوة بلاستيكية ويضاف إليها محلول التحفير وتوضع العبوة داخل الحوض المائي وتترك بحسب الفترات الزمنية ودرجات الحرارة المثبتة في جدول (٣-٤) . بعدها يتم استبدال محلول التحفير بكحول مقطر ويترك لساعة واحدة ومن ثم تستخرج العينات و تجفف داخل فرن تجفيف لمدة ساعة وبدرجة حرارة (١١٠ °C) ومن ثم تحفظ داخل حاوية لحين تصنيع عينات المواد المركبة الخاصة باختبار الشد والانحناء . شكل (٣-٥) يمثل صورة لحصيرة محفرة .



شكل (٣-٥) حصيرة من ألياف الزجاج المحفرة .

جدول (٣-٤) يوضح فترات , درجات حرارة وعدد حصائر ألياف الزجاج المعالجة بمحلول (CH₂OH + NaOH) والمستخدم في اختبار الشد واختبار الانحناء للمواد المركبة .

Temp. (°C) of The Etching Solution	Etching Time (days)	Number Of Mats for Bending Test	Number Of Mats for Tensile Test
٢٥	١,٣,٥,٧	٢٠	١٢
٣٥	١,٣,٥,٧	٢٠	١٢
٤٥	١,٣,٥,٧	٢٠	١٢

٤- المعاملة الحرارية لألياف الزجاج لإزالة عامل الربط

(Heat Treatment of Glass Fibers for Coupling Agent removed)

تقطع ألياف الزجاج بطول (١٢ cm) بشكل حزم بوزن (٠.٨ g) بعدها توضع العينات داخل فرن بحسب درجات الحرارة المختارة وهي : (٥٠٠ , ٢٠٠ , ١٥٠ , ١١٠ °C) ولمدة (٢ hr) ولكل درجة حرارة خمسة عينات للحصول على دقة في النتائج وتقليل نسبة الخطأ , ثم تترك العينات لتبرد داخل الفرن لتجنب الصدمة الحرارية ومن ثم توزن العينات بعد المعاملة الحرارية وبحسب الفرق بالوزن .

٥- التصوير المجهرى لألياف الزجاج

(Microscopic Photographing for Glass Fibers)

تؤخذ شعيرات من ألياف الزجاج المعاملة بوزن (٠.٨ g) كيميائياً أو حرارياً وغير المعاملة وبحسب الفترة الزمنية ودرجات الحرارة وبطول (٣ cm) وتوضع على شرائح زجاجية (Slides) ومن ثم توضع تحت عدسة المجهر الضوئي , التكبير المستخدم (X ٦٠٠ - X ١٥٠) . كما أن المجهر مزود بألة تصوير وجهاز حاسوب حيث يتم تسجيل الصور لسطح الألياف .

٣-٤-٢ نماذج الاختبارات الميكانيكية للمواد المركبة

تم إجراء ثلاثة اختبارات ميكانيكية للمواد المركبة المحضرة باستخدام ألياف زجاج محفرة وألياف زجاج غير محفرة .

(Tensile Test of Composite)

أولاً: اختبار الشد للمواد المركبة

تم استخدام عينة الشد القياسية (ASTM D ٦٣٨) [٤٣] , الشكل (٦-٣) يوضح أبعاد عينة الشد القياسية . لتصنيع نماذج الشد من المواد المركبة تفكك حصيرة ألياف الزجاج المحفرة أو غير المحفرة إلى حزم مستمرة بطول (٢٥ cm) وتصف الحزم بشكل متوازي ومستقيم داخل تجويف القالب المعدني ويتم توزيع الحزم توزيعاً منتظماً في القالب بشكل طبقة واحدة . يشكل مجموع وزن حزم ألياف الزجاج (٢٠ wt%) من وزن عينة الشد للمواد المركبة . قبل إجراء عملية التصنيع يدهن تجويف القالب لتسهيل عملية إخراج العينات ولمنع التصاقها بالقالب . بعد إكمال عملية تثبيت الألياف يتم تحضير البولي استر الغير مشبع وخلطه مع المصلد لمدة (٣ min) ومن ثم تركه دقيقة للسماح للفقاعات الغازية للخروج ومن ثم يصب البولي استر الغير مشبع في تجويف القالب ببطء كي نسمح لتغلغل الراتنج بين الألياف ومنع تكون مسامية عالية وفجوات بين الألياف والأرضية بعدها تترك العينة في القالب لمدة (١٢ hr) بعدها تستخرج العينة وتسخن داخل فرن تجفيف لمدة (٢ hr) في درجة حرارة (٧٠ °C) لإكمال التصلب وتترك لمدة أسبوع قبل إجراء الاختبار لها وبعد إخراج العينة من الفرن يسوى سطحها بورق تجليخ رقم (٤٣٤) ثم ينعم سطح العينة باستخدام ورق تنعيم رقم (P١٨٠) للحصول على سطح ناعم خال من العيوب . الشكل (٧-٣) يوضح عينات شد للمواد المركبة قبل الاختبار .

يستخدم في اختبار الشد جهاز اختبار الشد للمواد المركبة بريطاني المنشأ نوع (Instron ١١٩٥) , حيث توضع عينة الشد بين فكي الجهاز وتثبت ويتم تسليط الحمل المقاس بـ(kg) حيث يبدأ المؤشر بتسجيل الحمل والاستطالة على ورق بياني حتى حدوث الفشل وتثبت سرعة التحميل البالغة (١ mm/min) والأحمال المستخدمة في الاختبار وهي (٢٥٠٠ , ٥٠٠ kg) . لتقليل نسبة الخطأ اعتمد معدل نتائج اختبار عينتين من كل نوع من العينات . يتم حساب الحمل من الورق البياني مباشرة وبحسب المعادلة التالية :

$$P = N * e$$

[٣-٨]

$P =$ الحمل (kg) حيث يتم ضربه بالتعجيل (٩.٨) فنحصل على الحمل بـ(N) .

$N =$ عدد الوحدات المؤشرة على الورق البياني .

$e =$ ثابت قيمته تساوي (٥ kg) للوحدة الواحدة بالنسبة لعينات البولي استر غير المشبع غير المقواة لان الحمل المسلط الذي يمكن أن تتحمله العينة يكون اقل من (٥٠٠ kg) , في حين يساوي (٢٥ kg) للوحدة الواحدة بالنسبة لعينات البولي استر الغير مشبع المقواة بألياف الزجاج لان الحمل المسلط الذي يمكن أن تتحمله العينة يكون اقل من (٢٥٠٠ kg) وأعلى من (٥٠٠ kg) .

ويتم حساب مقاومة الشد (Tensile Strength) من المعادلة التالية :

$$\frac{P}{A} = \sigma_c$$

[٣-٩]

σ_c = مقاومة الشد القصوى (MPa) أو (N / mm^٢).

A = مساحة مقطع الجزء المتخسر من العينة (mm^٢).

ويتم حساب معامل المرونة للمواد المركبة (E_c) كما يلي :

$$E_c = \sigma_c / \epsilon$$

[٣-١٠]

حيث أن :

ϵ = الانفعال .

$$\epsilon = \frac{\delta L_c}{L_{oc}}$$

[٣-١١]

عندما :

δL_c = الزيادة الحاصلة في طول عينة المواد المركبة (mm) .

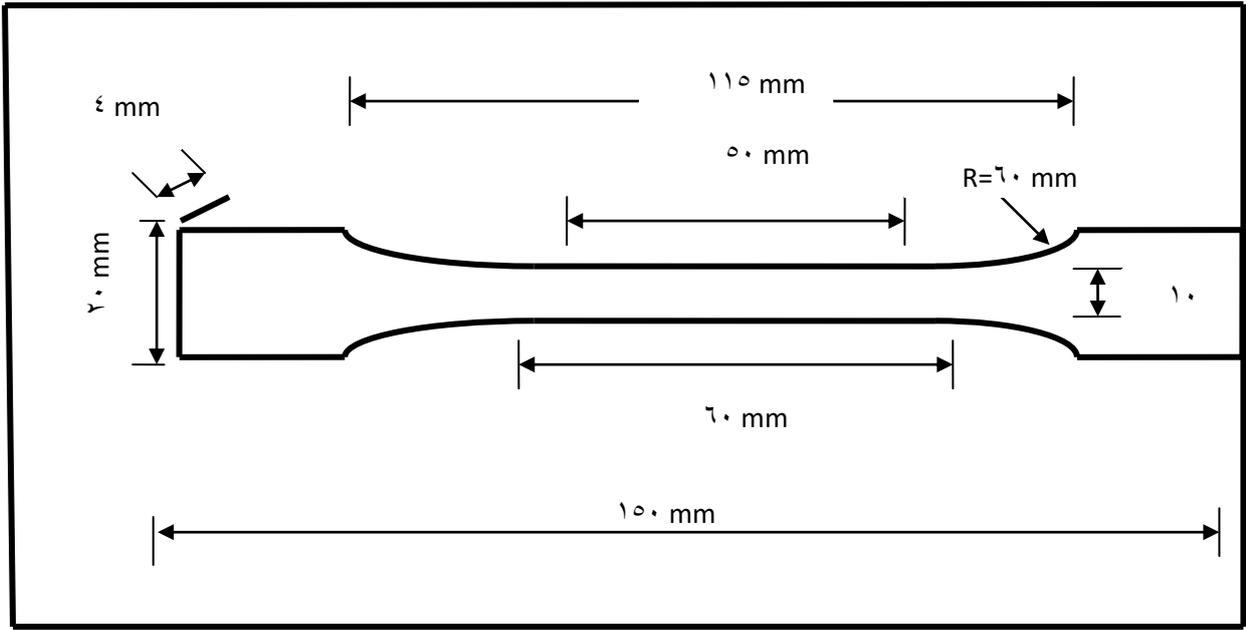
L_{oc} = طول عينة المواد المركبة المحصور بين فكي جهاز الشد (mm) .

$$\delta L_c = N * K$$

[٣-١٢]

N = عدد الوحدات المؤشرة على الورق البياني .

K = ثابت قيمته تساوي (٠.١ mm) للوحدة الواحدة .



شكل (٣-٦) يوضح أبعاد عينة الشد القياسية (ASTM D ٦٣٨) للمواد المركبة .



شكل (٣-٧) يوضح عينات شد للمواد المركبة قبل الاختبار .

ثانياً: اختبار الانحناء للمواد المركبة

(Bending Test For Composite)

تم تحضير عينات اختبار الانحناء بالإبعاد (160 * 10 * 8 mm³) بحسب قياسات (ASTM) [٥٠].

لتصنيع عينات اختبار الانحناء ثلاثي النقاط من مواد مركبة نفاكك حصيرة ألياف الزجاج المحفورة أو غير المحفورة إلى حزم مستمرة وبطول (25 cm) وتصف الحزم بشكل طبقتين داخل تجويف قالب معدني صمم لهذا الغرض ويتم دهن تجويف القالب قبل البدء بعملية التصنيع لمنع التصاق العينة ولتسهيل عملية إخراجها من القالب .

إن كلا طبقتي الألياف تحوي نفس عدد الحزم ونفس الوزن تقريبا بحيث تشكل كلا الطبقتين ما يساوي (20 %wt) من وزن عينة الانحناء أما الباقي (80 %wt) فيمثل النسبة الوزنية للأرضية البوليمرية . تكون المسافة بين الطبقة السفلى والطبقة التي تعلوها (2 mm) في حين كل طبقة تبعد عن سطح العينة القريب منها (2 mm) . بعد تثبيت الحزم يتم تحضير البولي أستر الغير مشبع وخلطه مع المصلد لمدة (3 min) ومن ثم تركه دقيقة للسماح للفقاعات الغازية للخروج ثم يتم صب البولي أستر الغير مشبع في تجويف القالب ببطء كي يتمكن البوليمر بالتغلغل بين الألياف ومنع تكون مسامية عالية وفجوات بين الألياف والأرضية ثم يترك لمدة (12 hr) داخل القالب ومن ثم تستخرج وتسخن داخل فرن تجفيف لمدة (2 hr) في درجة حرارة (70 °C) لإكمال التصلب وتترك لمدة أسبوع ويسوى سطحها بورق تجليخ رقم (٤٣٤) ثم ينعم سطح العينة باستخدام ورق تنعيم رقم (P180) للحصول على سطح ناعم خال من العيوب . شكل (٣-٨) يوضح عينات الانحناء للمواد المركبة قبل الاختبار .

تم قياس مقاومة الانحناء بطريقة اختبار الانحناء ثلاثي النقاط (Three - Points Bending Test) في درجة حرارة الغرفة , حيث تم تسليط حمل مركز في وسط العينة بسرعة (4 mm/min) إلى حين حدوث الفشل . لتقليل نسبة الخطأ اعتمد معدل نتائج اختبار ثلاثة عينات من كل نوع من العينات .

يمكن حساب مقاومة الكسر بالانحناء (Flexural Rupture Strength) للعينة في اختبار الانحناء بثلاثة نقاط من المعادلة التالية [٥٠] :

$$FS = \frac{3 * P * L}{2 * W * t^2} \quad [3-13]$$

FS = مقاومة الكسر بالانحناء (MPa) .

P = قوة كسر العينة (N) .

L = البعد بين نقطتي الارتكاز (100 mm) .

w = عرض العينة (10 mm) .

t = عمق العينة (8 mm) .



شكل (٨-٣) يوضح عينات الانحناء للمواد المركبة قبل الاختبار .

(Microdebond Test)

ثالثاً- اختبار فك الربط

تعتمد البحوث والدراسات اختبار فك الربط بين شعيرة وقطرة بوليمرية لحساب مقاومة القص البينية بين الليف والأرضية حيث تغمر نهاية الشعيرة في القطرة بطول يصل أحيانا إلى (500 μm) ويستخدم جهاز شد ذو تحميل قليل جداً وفكوك خاصة لمسك الشعيرة أثناء الاختبار [٤٧,١٠] . ولعدم توفر مثل هذه الأجهزة تم استخدام حزمة من الألياف بدلا عن الشعيرة لاجراء هذا الاختبار في الدراسة الحالية [٤٦,٤٨] .

تحضر ألياف الزجاج المحفرة بمحلول (CH₃OH + NaOH) والمستخدم في هذا الاختبار باعتماد طريقة التحفير لغرض اختبار شد الألياف والموضحة سابقاً .

تقطع ألياف الزجاج المحفرة أو غير المحفرة بطول (8 cm) ويتم وزن حزمة بقدر (0.02 g) لكل عينة بعدها تغمر نهاية الحزمة بطول (1 mm) في قطرة من البولي استر غير المشبع بعد تحضيره , بعدها تترك حزمة ألياف الزجاج والقطرة لمدة ثلاثة أيام لإكمال التصلب ثم تثبت الحزمة على ورقة ويلصق طرف الحزمة غير الحاوي على القطرة بواسطة لاصق وبطول (2.5 cm) . شكل (٩-٣) يوضح عينة فك الربط لحزمة ألياف الزجاج مغمورة في قطرة من البولي استر الغير مشبع قبل الاختبار .

يستخدم في اختبار فك الربط جهاز شد الألياف حيث يوضع طرف حزمة الألياف الحاوي على القطرة بين الفكين العلويين لجهاز الشد من دون تثبيت ودون السماح للقطرة من المرور بين الفكين أثناء

الشد كما يثبت الطرف الآخر للحزمة بواسطة الفكين السفليين بحيث يكون المحور الطولي للعيينة منطبقاً مع محور التحميل بعدها يسقط حمل الشد (kg) حيث يبدأ القلم بتسجيل الحمل على ورق بياني خاص حتى حدوث الفشل حيث تنفصل قطرة البولي استر عن حزمة ألياف الزجاج . تثبت أثناء الاختبار سرعة الورق البياني (10 mm/min) وكذلك سرعة التحميل (20 mm/min) . لتقليل نسبة الخطأ اعتمد معدل نتائج اختبار ثلاثة عينات من كل نوع من العينات .

يتم حساب الحمل من الورق البياني مباشرة من المعادلة التالية :

$$F_d = N * C$$

[٣-١٤]

N = عدد الوحدات المؤشرة على الورق البياني .

C = ثابت قيمته تساوي (0.2 kg) للوحدة الواحدة .

F_d = قوة فك الربط (kg) .



شكل (٣-٩) عينة فك الربط قبل الاختبار .

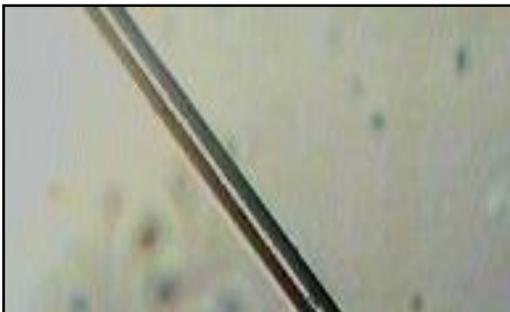
يتضمن الفصل النتائج المختبرية التي تم التوصل إليها من خلال الدراسة الحالية والتي شملت دراسة تأثير العوامل (درجة حرارة المعالجة , فترة المعالجة , طبقة عامل الربط , نوع محلول التحفير والنسبة الوزنية لمحلول التحفير إلى الألياف) على خواص الألياف وخواص المواد المركبة المقواة بألياف معالجة .

٤-٢ تأثير محلول التحفير (كحول مثيلي + هيدروكسيد الصوديوم) على ألياف الزجاج

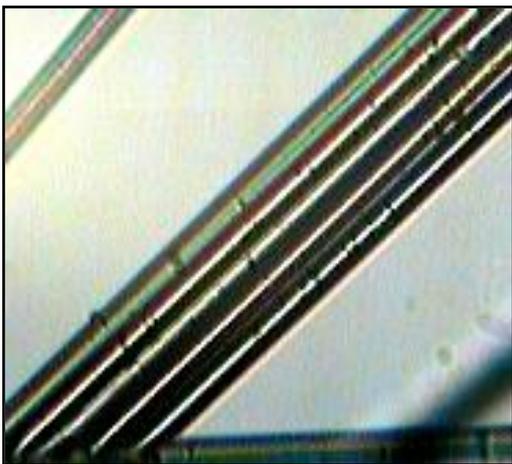
أغلب البحوث والدراسات استخدمت في عمليات التحفير الرطب للألياف المحاليل المائية القلوية [٤٣, ٣٦, ٢٦] , أما في الدراسة الحالية فقد تم استخدام المحاليل المائية القلوية والمحاليل العضوية (الكحول المثيلي) . ولعدم توفر معلومات حول استخدام وفعالية محلول التحفير الناتج ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) في تحفير ألياف الزجاج نوع (E-glass) اجري اختبار أولي حيث وضعت حزم من ألياف الزجاج في المحلول لفترات زمنية مختلفة هي (١١ and ٨ , ٧ , ٣) وبدرجة حرارة الغرفة وبعد أكمل المعالجة لوحظ فقدان في وزن الألياف المعالجة وبالاستعانة بالتصوير من خلال استخدام المجهر الضوئي لسطح هذه الألياف لوحظ تكون حفر على السطح مقارنة بالألياف غير المعالجة بحيث يزداد عدد الحفر مع زيادة فترة المعالجة . شكل (٤-١) يوضح صوراً لسطح ألياف زجاج نوع (E-glass) معالجة وأخرى غير معالجة .

تم إجراء اختبار شد أولي للألياف المحفرة لمعرفة مدى تأثير المعالجة حيث لوحظ أن الألياف المعالجة لمدة (١١ days) تتمزق بسهولة والمعالجة لمدة (٨ days) تظهر مقاومة قليلة للشد في حين المعالجة لمدة (٣ , ٧ days) تظهر مقاومة أعلى من الفترتين أعلاه لذا اختيرت فترات المعالجة بحيث لا تتعدى سبعة أيام , وعليه فان اختيار فترات المعالجة (١ , ٣ , ٥ , ٧ days) تتطابق مع اختبارات مؤسسة (AGY) الأمريكية (World Headquarters / Americas) حيث عالجت ألياف زجاج باستخدام ماء وحوامض ولمدة (١ , ٧ days) [١٧] .

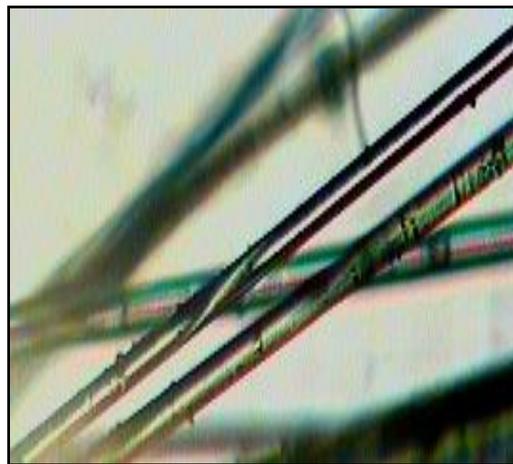
إن محلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) سبب تحفيراً لسطح ألياف الزجاج إذ أن المحلول يعمل على إذابة جزء من طبقة الأكسدة (عامل الربط) [١٠] , مما يتسبب في مهاجمة هيدروكسيد الصوديوم لسطح الألياف ومن ثم تتولد الحفر . ان معدل التحفير يزداد مع زيادة فترة المعالجة ومن ثم فإن الحفر يزداد عددها مع هذه الزيادة [١٧] .



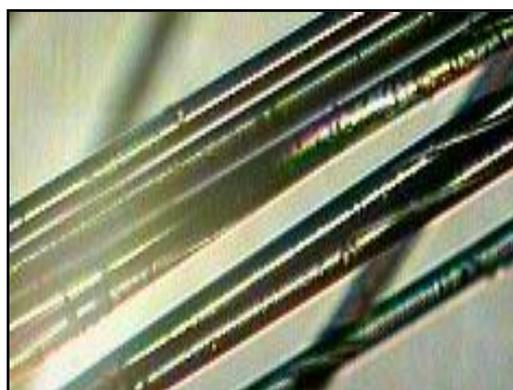
(a)



(b)



(c)



(d)

(e)

شكل (٤-١) يوضح صوراً بقوة تكبير (X ١٥٠) لسطح ألياف الزجاج غير معالجة وأخرى محفرة تمت معالجتها باستخدام (CH₂OH + NaOH) وبدرجة حرارة الغرفة (a) غير معالجة (b) معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة سبعة أيام (d) معالجة لمدة ثمانية أيام (e) معالجة لمدة احد عشر يوماً .

٤-٣ نتائج اختبار فقدان الوزن

اجري اختبار فقدان بوزن ألياف الزجاج نتيجة لمعالجتها باستخدام محلول (CH₂OH + NaOH) ومحلول (H₂O + NaOH) لمعرفة مدى فعالية المحلول في تحفير سطح الألياف ضمن ظروف الاختبار المختارة .

الأشكال من (٤-٢) إلى (٤-٧) توضح مقارنة بين نتائج المعالجة بمحلول (CH₂OH + NaOH) ونتائج المعالجة بمحلول (H₂O + NaOH) . أجريت المعالجات في درجات حرارة (٢٥ , ٣٥ and ٤٥ °C) لفترات زمنية مختلفة هي (١ , ٣ , ٥ and ٧ days) لكل درجة حرارة , وقد استخدم ثلاث أوزان للألياف هي (٠.٤ , ٠.٨ and ١.٢ g) لكل درجة حرارة وفترة معالجة . يلاحظ من نتائج الاختبار ما يلي :

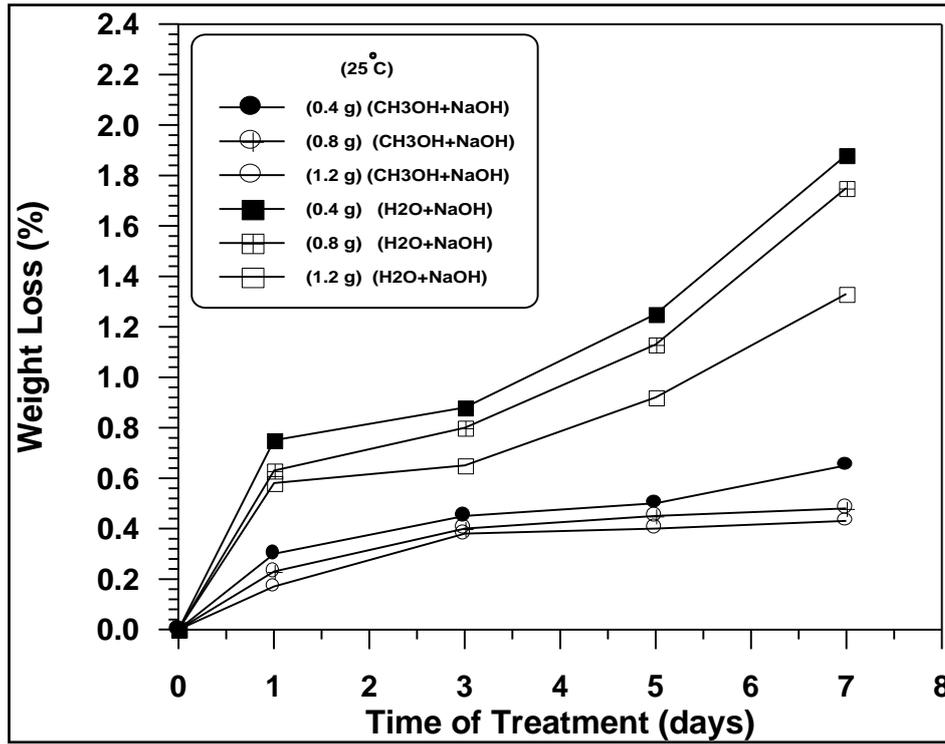
- حدوث فقدان بوزن الألياف المعالجة بمحلول (CH₂OH + NaOH) والمعالجة بمحلول (H₂O + NaOH) ويكون الفقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول (H₂O + NaOH) أكثر من الفقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول (CH₂OH + NaOH) لان محلول (H₂O + NaOH) سبب تحفيراً لسطح ألياف الزجاج حيث يعمل الماء على تأين كامل لهيدروكسيد الصوديوم مما يؤدي إلى مهاجمة طبقة عامل الربط ومهاجمة سطح الألياف ومن ثم تتولد الحفر . كما أن محلول (CH₂OH + NaOH) سبب تحفيراً لسطح

ألياف الزجاج إذ يعمل الكحول على إذابة عامل الربط مما يتسبب في مهاجمة هيدروكسيد الصوديوم غير المتأين لسطح الألياف ومن ثم تتولد الحفر . إن محلول ($H_2O + NaOH$) أكثر تحفيراً لألياف الزجاج من محلول ($CH_3OH + NaOH$) والسبب في ذلك هو أن هيدروكسيد الصوديوم يتأين بالماء أكثر لذا يهاجم ألياف الزجاج بشكل أكبر [٣١,٣٤] .

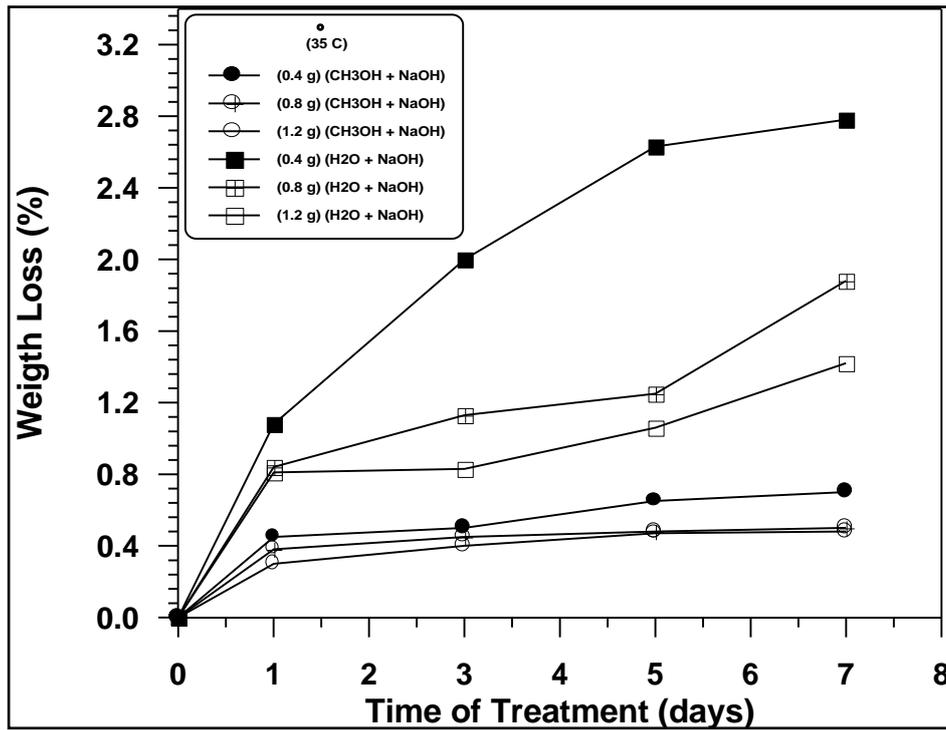
- إن نسبة فقدان الوزن تزداد مع زيادة فترة المعالجة , لان معدل التحفير يزداد بزيادة فترة المعالجة لذا فان أعلى نسبة للفقدان بالوزن كانت للعينات المعالجة لفترة (٧ days) [١٧] .

- إن نسبة فقدان الوزن تزداد مع زيادة درجة حرارة المعالجة , لان معدل التحفير يزداد بزيادة درجة حرارة المعالجة لذا فان أعلى نسبة فقدان بالوزن كانت للعينات المعالجة في درجة حرارة ($٤٥\text{ }^\circ\text{C}$) لان الحرارة تسرع التحفير [١٨,١٤] .

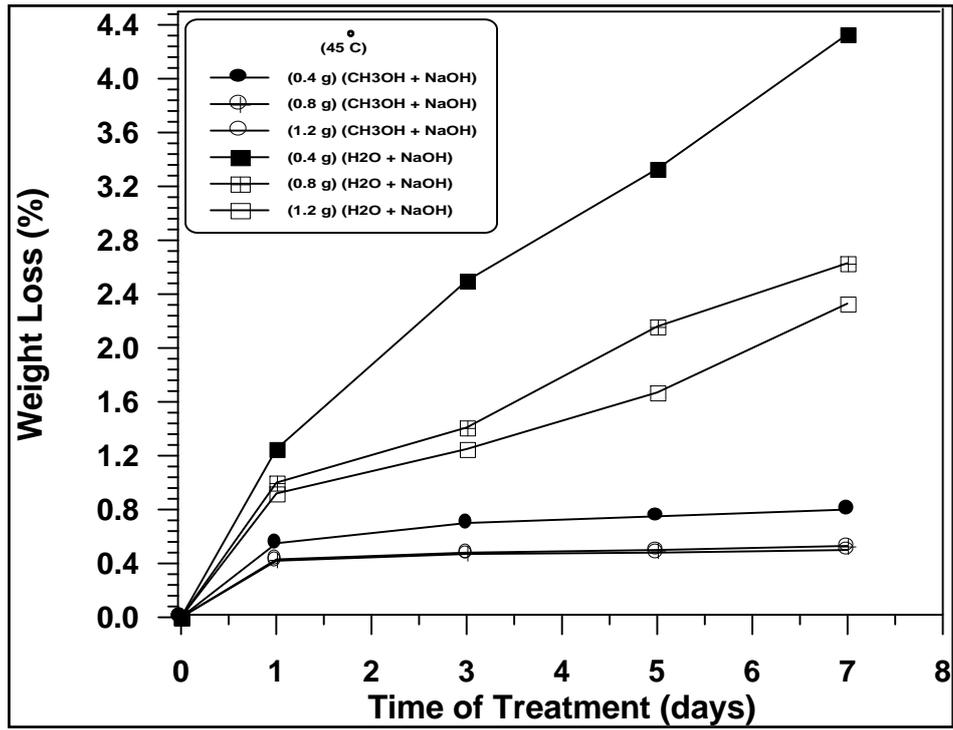
- إن نسبة فقدان الوزن تزداد مع انخفاض وزن عينات الألياف أي مع زيادة النسبة الوزنية لمحلول التحفير , لأنه كلما زادت النسبة الوزنية لمحلول التحفير إلى الألياف ازداد معدل التحفير وازداد الفقدان بالوزن فعند وزن (٠.٤ g) تكون النسبة الوزنية لمحلول التحفير أكبر مما لو كان وزن العينة (٠.٨ , ١.٢ g) ومن ثم فان الفقدان بالوزن أكبر .



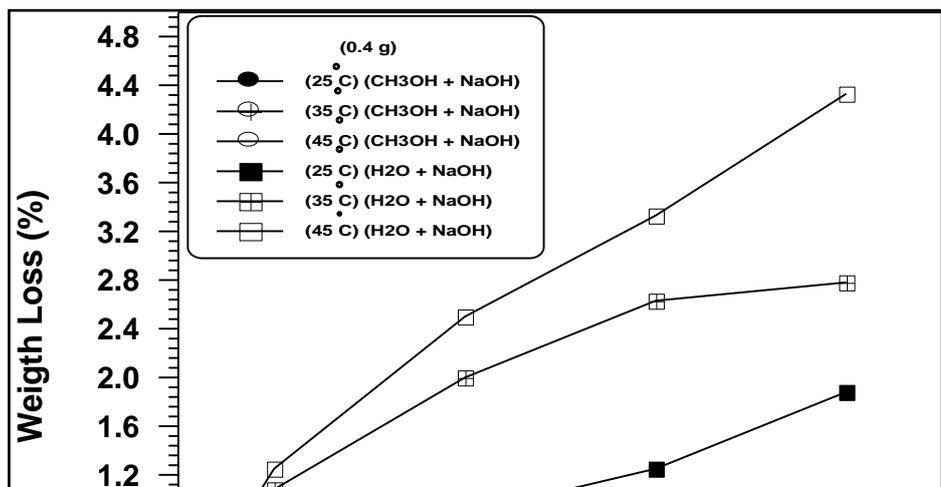
شكل (٤-٢) يوضح العلاقة بين نسبة الفقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بمحلول (CH₃OH + NaOH) ومحلول (+NaOH) و (H₂O + NaOH) في درجة حرارة (٢٥ °C) .



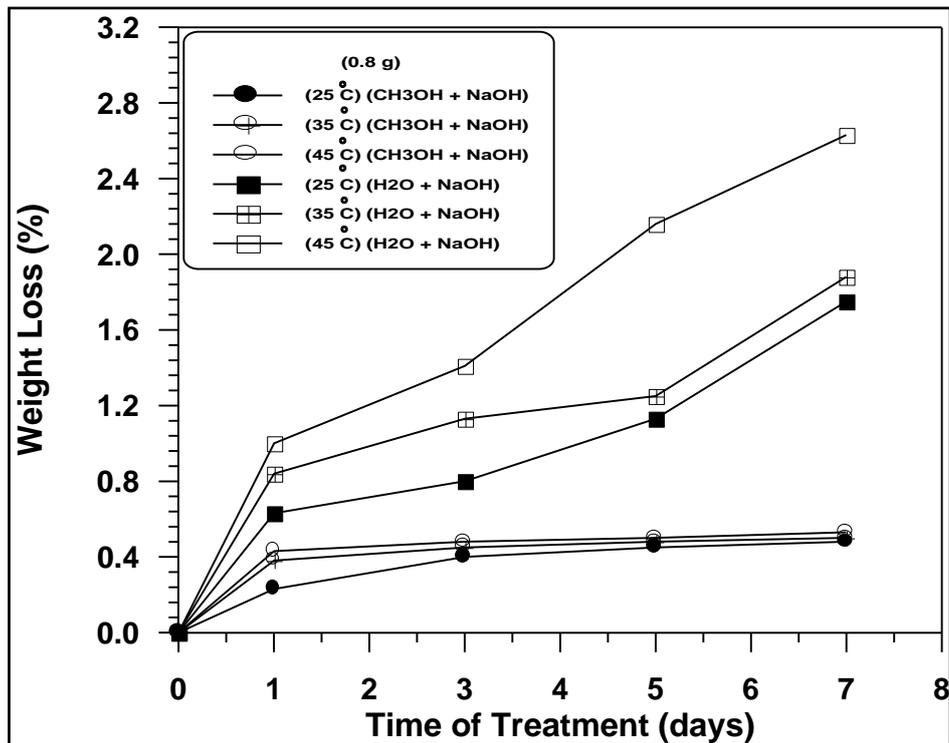
شكل (٤-٣) يوضح العلاقة بين نسبة الفقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بمحلول (CH₃OH + NaOH) ومحلول (+NaOH) و (H₂O + NaOH) في درجة حرارة (٣٥ °C) .



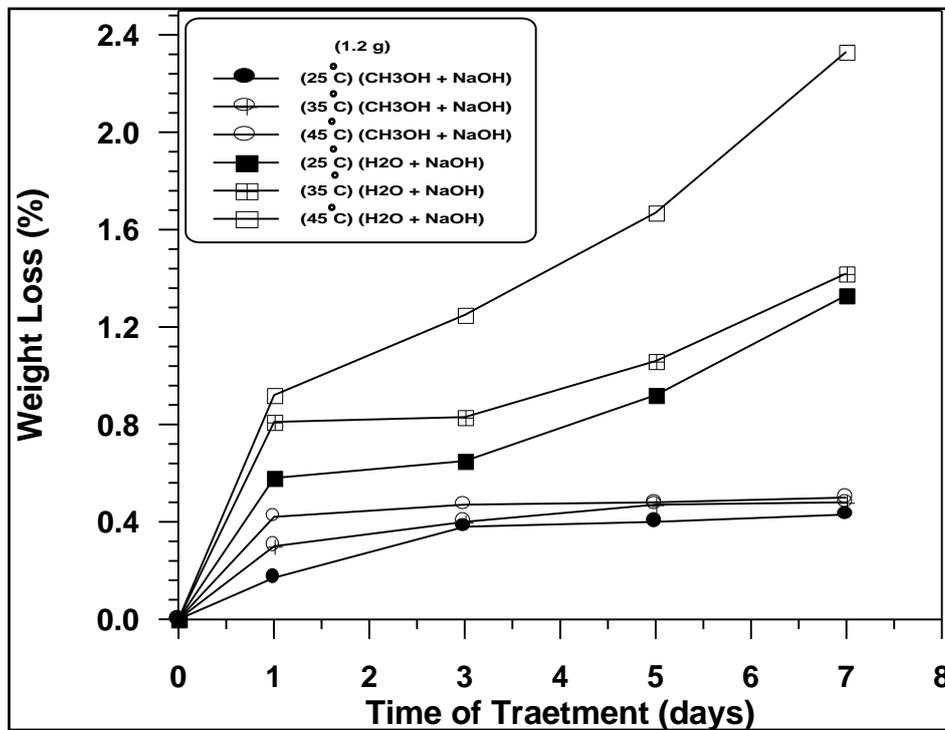
شكل (٤-٤) يوضح العلاقة بين نسبة الفقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بمحلول (CH₃OH + NaOH) ومحللول (H₂O + NaOH) في درجة حرارة (٤٥ °C) .



شكل (٥-٤) يوضح العلاقة بين نسبة الفقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بوزن (g ٠.٤) بمحلول (CH₃OH + NaOH) ومحلول (H₂O + NaOH).



شكل (٤-٦) يوضح العلاقة بين نسبة فقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بوزن (٠.٨ g) بمحلول (CH_٣OH + NaOH) ومحلول (H_٢O + NaOH).



شكل (٤-٧) يوضح العلاقة بين نسبة فقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بوزن (g ١.٢) بمحلول (CH₂OH + NaOH) ومحلول (H₂O + NaOH).

٤-٤ تأثير إضافة هيدروكسيد الصوديوم إلى محلول التحفير

لغرض معرفة تأثير إضافة هيدروكسيد الصوديوم إلى محلول التحفير سواء أكان المذيب كحول أو ماء فضلاً عن معرفة تأثير المذيب وحده على ألياف الزجاج وعامل الربط .

تمت معالجة ألياف زجاج بأوزان (g ١.٢ and ٠.٨ , ٠.٤) بكحول مثيلي في درجة حرارة (٤٥ °C) ولفترة (٧ days) حيث أظهرت النتائج حدوث فقدان بالوزن للألياف المعالجة بالكحول , وتم مقارنة نسبة فقدان بالوزن للألياف المعالجة بالكحول (CH₂OH) فقط مع نسبة فقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول (CH₂OH + NaOH) في نفس درجة حرارة وفترة المعالجة والجدول (٤-١) يوضح هذه المقارنة .

يلاحظ من جدول (٤-١) ارتفاع نسبة فقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول (CH₂OH + NaOH) مقارنة بالألياف المعالجة بالكحول (CH₂OH) فقط , كما يلاحظ من الجدول انه كلما ازدادت النسبة الوزنية للكحول إلى الألياف زادت نسبة فقدان بالوزن سواء أكان الكحول وحده أو مع هيدروكسيد الصوديوم .

إن الكحول وحده يعمل على إذابة عامل الربط وكلما ازدادت نسبته الوزنية زادت إذابة العامل . إن وجود الهيدروكسيد في الكحول يسرع من عملية التحفير لان الكحول يذيب عامل الربط مما يسهل لهيدروكسيد الصوديوم مهاجمة ألياف الزجاج .

تمت معالجة ألياف زجاج بأوزان (g ١.٢ and ٠.٨ , ٠.٤) بالماء المقطر فقط في درجة حرارة (٢٥ °C) ولفترة (٧ days) حيث أظهرت النتائج حدوث فقدان بالوزن للألياف المعالجة بالماء , وتم مقارنة نسبة فقدان بالوزن للألياف المعالجة بالماء فقط مع نسبة فقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول (H₂O + NaOH) في نفس درجة حرارة وفترة المعالجة والجدول (٤-٢) يوضح هذه المقارنة .

يلاحظ من جدول (٢-٤) ارتفاع كبير في نسبة فقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول (H₂O + NaOH) مقارنة بالألياف المعالجة بالماء فقط , كما يلاحظ من الجدول انه كلما ازدادت النسبة الوزنية للماء إلى الألياف زادت نسبة فقدان بالوزن .

إن الماء وحده يعمل على مهاجمة عامل الربط وألياف الزجاج وكلما زادت نسبته الوزنية زادت المهاجمة . إن وجود هيدروكسيد الصوديوم في الماء يسرع من عملية التحفير لأنه يتأين بالماء ويكون أكثر فعالية لمهاجمة ألياف الزجاج من كونه على شكل هيدروكسيد كما في الكحول .

جدول (١-٤) يوضح مقارنة بين نسبة فقدان بالوزن للألياف المعالجة بالكحول (CH₃OH) فقط مع نسبة فقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول (CH₃OH + NaOH) في درجة حرارة (٥٥ °C) ولفترة (٧ days) .

Sample Weight (g)	Weight Loss (%) of Treated samples by (CH ₃ OH+ NaOH)	Weight Loss (%) of Treated samples by (CH ₃ OH)
٠.٤	٠.٨	٠.٥٥
٠.٨	٠.٥٣	٠.٤٣
١.٢	٠.٥	٠.٣٣

جدول (٢-٤) يوضح مقارنة بين نسبة فقدان بالوزن للألياف المعالجة بالماء المقطر فقط مع نسبة فقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول (H₂O + NaOH) في درجة حرارة (٢٥ °C) ولفترة (٧ days) .

Sample Weight (g)	Weight Loss (%) of Treated samples by (H ₂ O+ NaOH)	Weight Loss (%) of Treated samples by (H ₂ O)
٠.٤	١.٨٨	٠.٦٤
٠.٨	١.٧٥	٠.٦٢٥
١.٢	١.٣٣	٠.٦٠

٤-٥ تأثير محلول التحفير على عامل الربط

لمعرفة تأثير محلول التحفير على عامل الربط لذا يجب إزالة عامل الربط من سطح ألياف الزجاج ثم تعالج الألياف المزال عنها العامل بمحلول (CH₃OH + NaOH) .

تم إجراء معاملة حرارية لألياف الزجاج نوع (E-glass) بوزن (٠.٨ g) بدرجات حرارة مختلفة هي (٥٠٠ °C and ٢٠٠ , ١٥٠ , ١١٠) ولمدة (٢ hr) لغرض إزالة عامل الربط (Coupling)

(Agent) من سطح الألياف , حيث أظهرت نتائج المعاملة الحرارية للألياف أن نسبة فقدان بالوزن تزداد مع زيادة درجة حرارة المعاملة حيث تصل إلى أقصى قيمة ثابتة (% ٠.٨) في درجة حرارة (٥٠٠ °C) , كلما زادت درجة حرارة المعاملة زادت نسبة فقدان بالوزن نتيجة إزالة عامل الربط . جدول (٣-٤) يوضح نتائج المعاملة الحرارية للألياف الزجاج .

تمت معالجة ألياف زجاج بوزن (٠.٨ g) مزال عنها عامل الربط بمحلول (CH₂OH + NaOH) في درجة حرارة (٣٥ °C) ولفترة (٧ days) حيث أظهرت النتائج حدوث فقدان بالوزن , حيث تبلغ نسبة فقدان بالوزن (% ٠.٣٨) للألياف المزال عنها عامل الربط والمعالجة بمحلول (CH₂OH + NaOH) وهي أقل من نسبة فقدان بالوزن للألياف المكسية بعامل الربط والمعالجة بمحلول (CH₂OH + NaOH) التي تبلغ (% ٠.٥) ولنفس درجة الحرارة وفترة المعالجة . إن الزيادة الحاصلة في نسبة فقدان بالوزن للألياف المكسية بعامل الربط يعود إلى وجود عامل الربط لأنه يتعرض للتحفير والإزالة أثناء المعالجة فتمثل نسبة فقدان بالوزن (ألياف + عامل ربط) في حين الألياف المزال عنها عامل الربط تكون نسبة فقدان بالوزن أقل لأنها تمثل تحفير الألياف فقط لعدم وجود عامل الربط أو وجوده بنسبة قليلة .

جدول (٣-٤) يوضح نتائج المعاملة الحرارية للألياف الزجاج في درجات حرارية مختلفة ولمدة (٢ hr)

Sample Weight (g)	Temperature of Treatment (°C)	Time of Treatment (hr)	Weight Loss (%)
٠.٨	١١٠	٢	٠.٢٥
٠.٨	١٥٠	٢	٠.٢
٠.٨	٢٠٠	٢	٠.٤
٠.٨	٥٠٠	٢	٠.٨

٤-٦ نتائج التصوير المجهرى

بعد أن تمت معالجة ألياف الزجاج بمحلول (CH₂OH + NaOH) ومحلول (H₂O + NaOH) وبحسب الفترات ودرجات الحرارة المختاره تم التصوير المجهرى لجميع الألياف المعالجة ولألياف أخرى لم تتم معالجتها .

الشكل (٤-٨) يوضح صورة لسطح ليف زجاج غير معالج . شكل (٤-٩) يوضح صوراً لسطح ألياف الزجاج غير المعالجة بمحلول (CH₂OH + NaOH) ومحلول (H₂O + NaOH) تم معاملتها حرارياً (a) بدرجة حرارة (١١٠ °C) ولمدة ساعتين , (b) بدرجة حرارة (٥٠٠ °C) ولمدة ساعتين .

إن المعاملة الحرارية لألياف الزجاج عند (١١٠ °C) و(٥٠٠ °C) تؤثر على سطح الألياف لأنها تسبب إزالة لعامل الربط (Coupling Agent) بزيادة درجة الحرارة [١٠] .

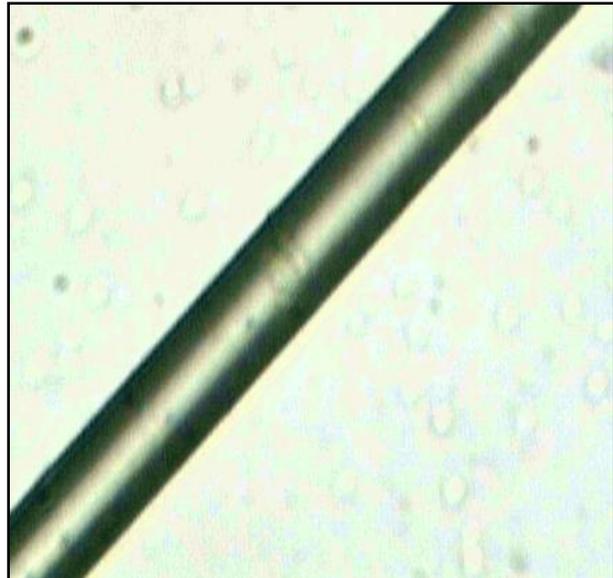
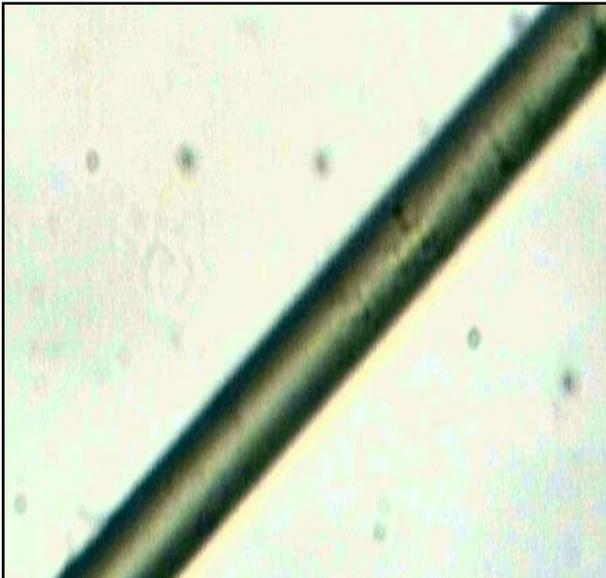
الأشكال : (٤-١٠) , (٤-١١) و(٤-١٢) توضح صوراً لألياف معالجة بمحلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) والإشكال (٤-١٣) , (٤-١٤) و(٤-١٥) توضح صوراً لألياف معالجة بمحلول ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) للفترات المختاره وفي درجة حرارة : (٢٥ °C) , (٣٥ °C) و(٤٥ °C) على التوالي , حيث يلاحظ من الصور تكون حفر على سطح الألياف وهذه الحفر يزداد عددها مع زيادة درجة الحرارة وفترة المعالجة , ويلاحظ أن الألياف المعالجة بمحلول ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) تكون أكثر تضرراً وتحفيراً مقارنة بالألياف المعالجة بمحلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) .

يلاحظ من خلال الصور تضرر وتلف ألياف الزجاج المعالجة بمحلول ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) بالمقارنة مع ألياف الزجاج المعالجة بمحلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) ويلاحظ ايضاً من الفرق الكبير بين نسبة فقدان بالوزن للياف المعالجة بمحلول ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) والذي يكون أعلى بحوالي (٥ - ٤) مرات من نسبة فقدان بالوزن لألياف الزجاج المعالجة بمحلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) , لذا يفضل استخدام المعالجة بمحلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) لمعالجة ألياف الزجاج المستخدمة في الاختبارات الميكانيكية .

شكل (٤-١٦) يوضح صوراً لألياف زجاج معالجة بمحلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) وأخرى غير معالجة قد تم غمرها (ورفعها بسرعة) في سائل البولي استر غير المشبع . يتضح من الصور بان ألياف الزجاج غير المعالجة قد تعلقت بها بعض قطرات متفرقة من البولي استر بحيث لا تبلل سطح الليف بشكل كامل , بينما قطرات البولي استر غير المشبع التي تعلقت بسطح الألياف المعالجة تغطي سطح الليف بالكامل وتكون كبيرة الحجم نسبياً . مما يدل على زيادة الربط بين الألياف المحفرة والبولي استر غير المشبع مقارنة بالربط بين الألياف غير المعالجة والبولي استر غير المشبع . لان الحفر المتكونة على سطح الألياف تسبب زيادة في المساحة السطحية لليف وهذا يؤدي إلى زيادة مساحة الربط بين الليف والأرضية كما يتولد ربط بين الحفر والأرضية يسمى بالربط التشابكي البيئي الميكانيكي ومن ثم يحدث ترابط أفضل ويكون على كامل سطح الليف المحفر في حين يكون الربط محدود بين الليف غير المعالج والأرضية [٥] .



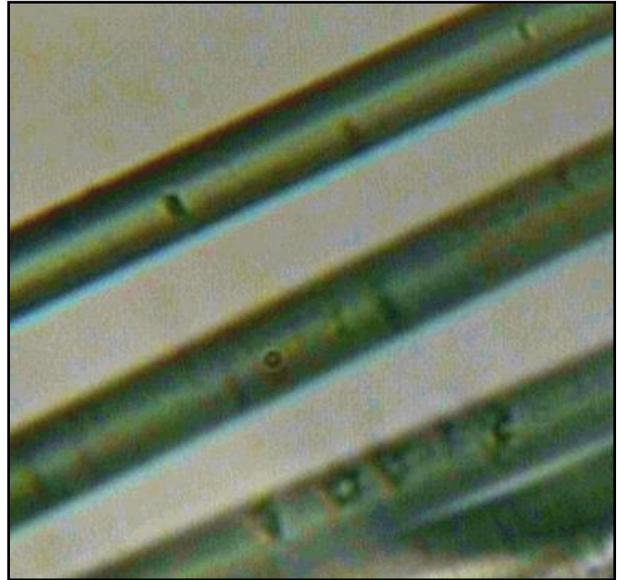
شكل (٤-٨) يوضح صورة بقوة تكبير (٦٠٠ X) لسطح ليف زجاج غير معالج .



(a)

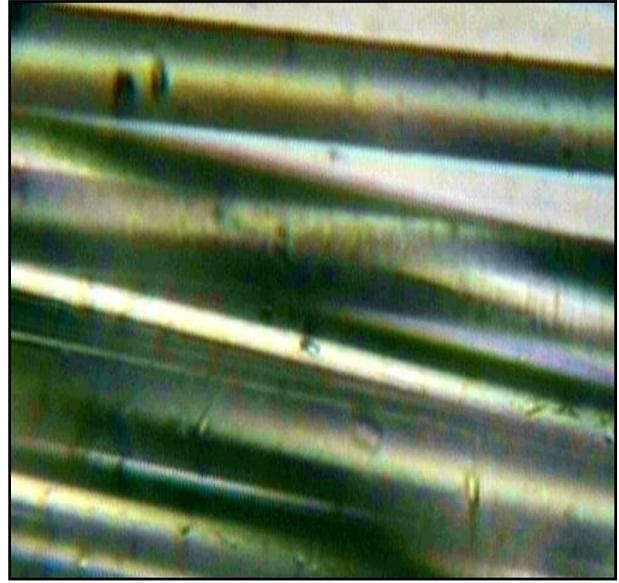
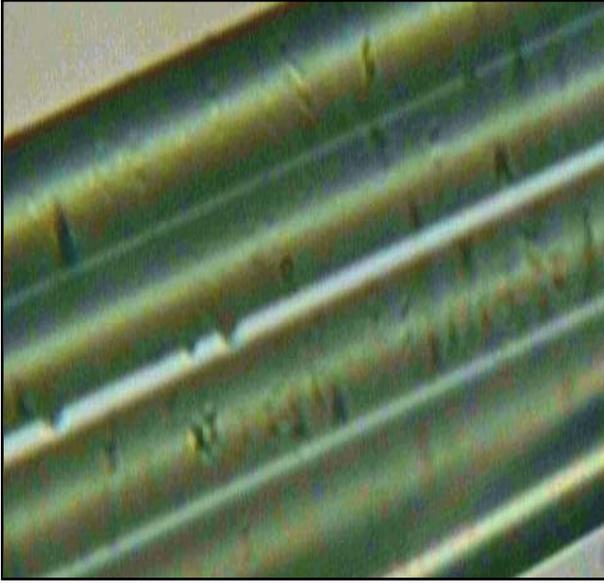
(b)

شكل (٤-٩) يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج معاملة حرارياً (a) بدرجة حرارة (١١٠ °C) (b) بدرجة حرارة (٥٠٠ °C).



(a)

(b)



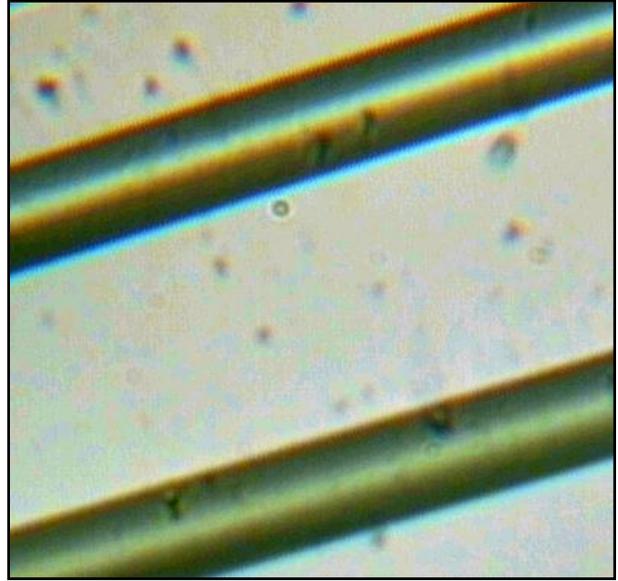
(c)

(d)

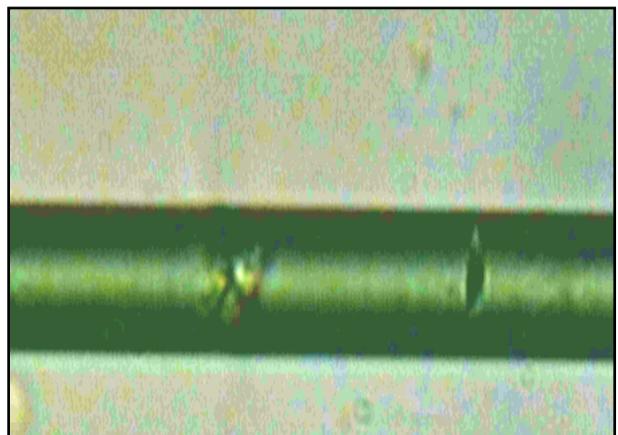
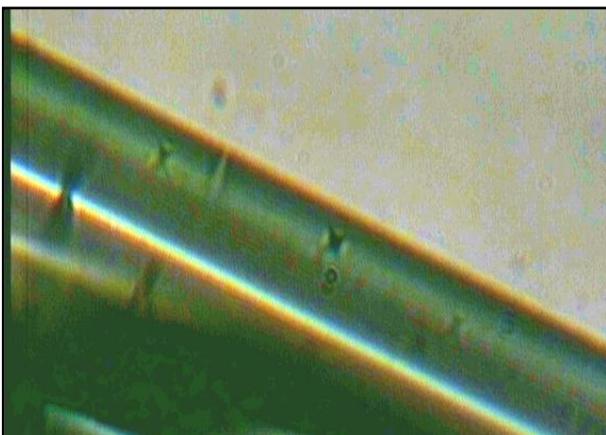
شكل (١٠-٤) يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج محفرة تمت معالجتها باستخدام $(\text{CH}_3\text{OH} + \text{NaOH})$ وبدرجة حرارة (25°C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b) معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .



(a)



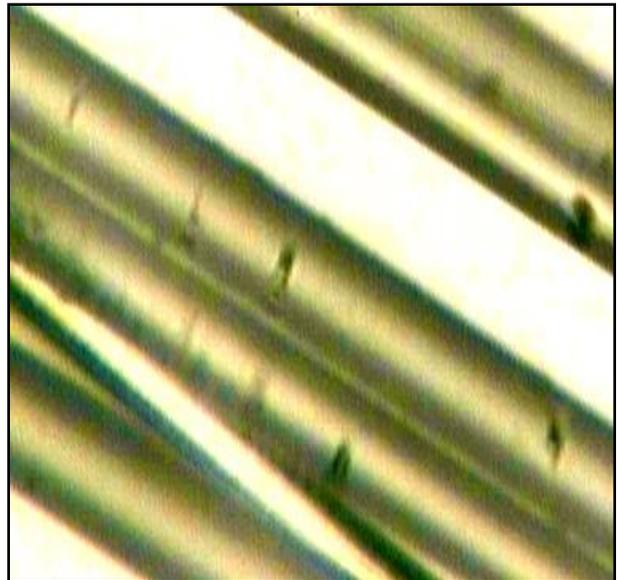
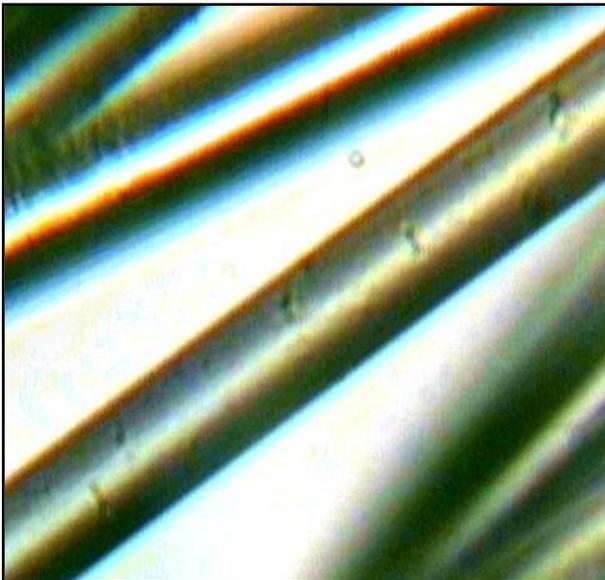
(b)



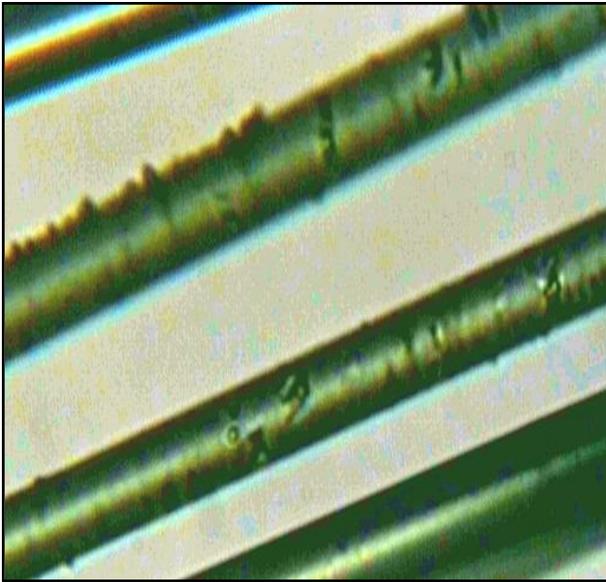
(c)

(d)

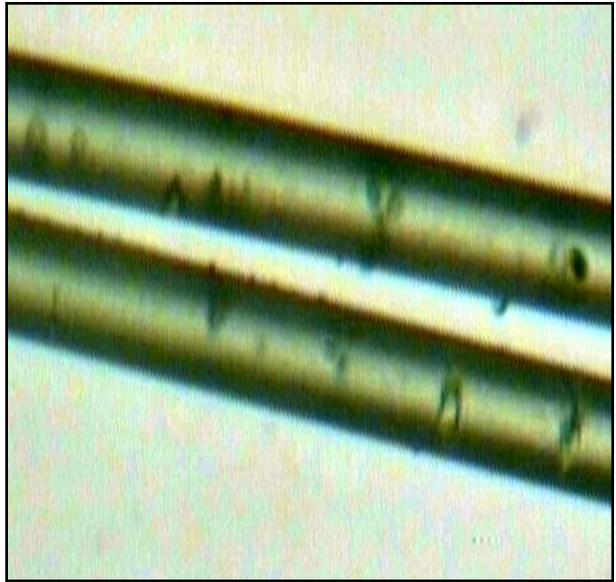
شكل (١١-٤) يوضح صوراً بقوة تكبير (٦٠٠ X) لسطح ألياف الزجاج محفرة تمت معالجتها باستخدام $(\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH})$ وبدرجة حرارة (35°C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b) معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .



(a)



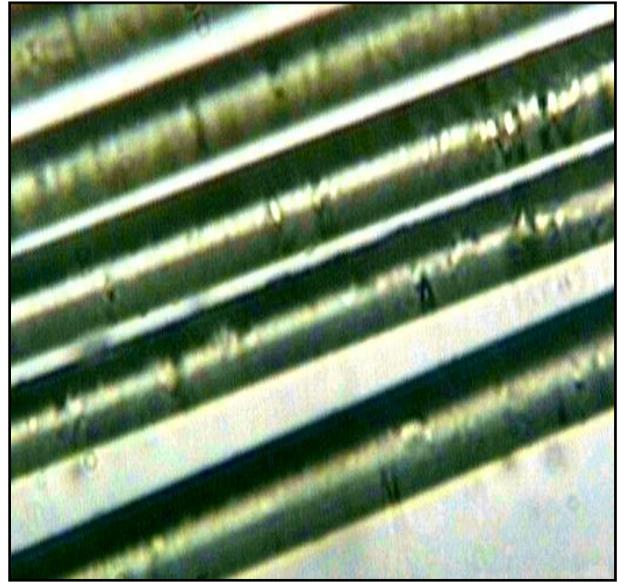
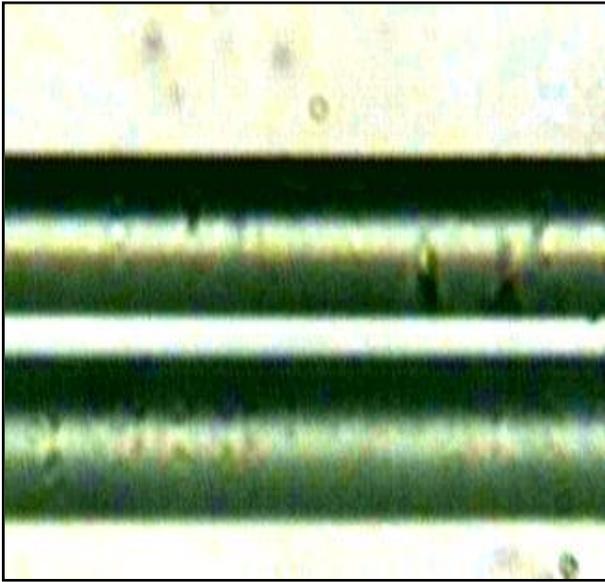
(b)



(c)

(d)

شكل (١٢-٤) يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج محفرة تمت معالجتها باستخدام $(\text{CH}_3\text{OH} + \text{NaOH})$ وبدرجة حرارة (45°C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b) معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .



(a)

(b)

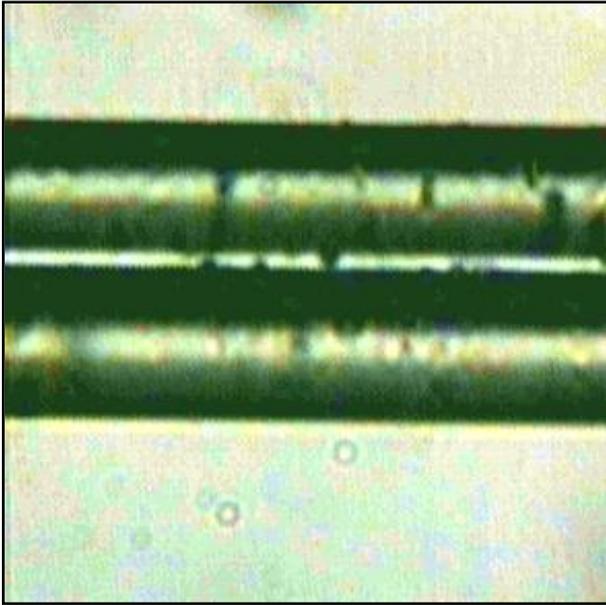


(c)

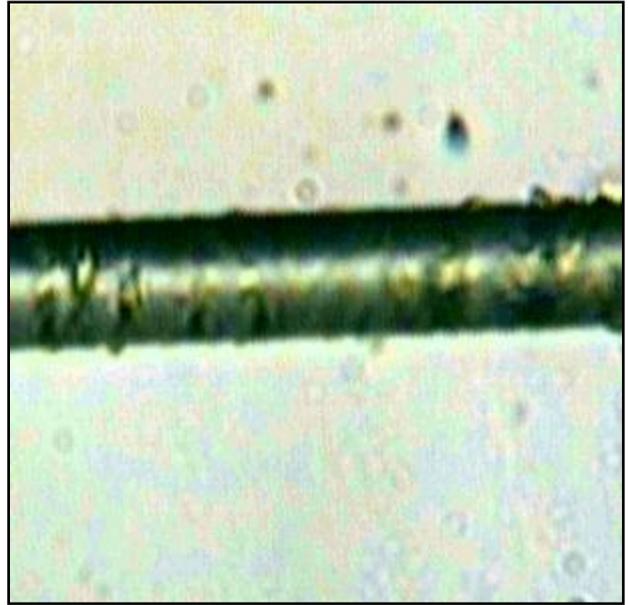


(d)

شكل (٤-١٣) يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج محفرة تمت معالجتها باستخدام (H₂O + NaOH) وبدرجة حرارة (٢٥ °C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b) معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .



(a)



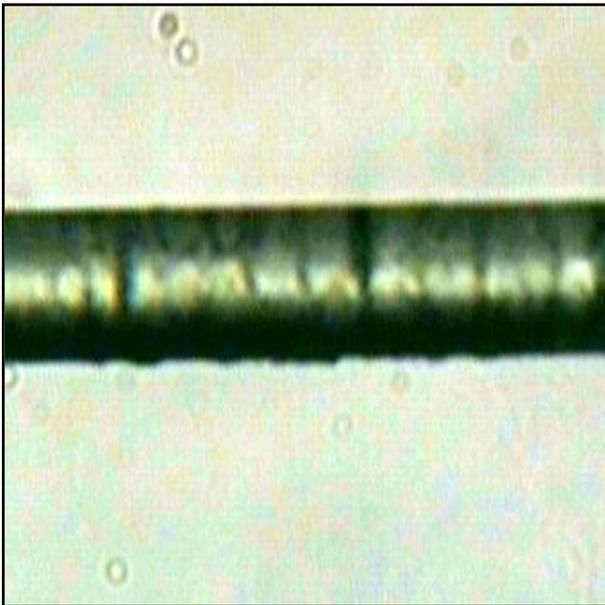
(b)



(c)

(d)

شكل (٤-١٤) يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج محفرة تمت معالجتها باستخدام (H₂O + NaOH) وبدرجة حرارة (٣٥ °C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b) معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .



(a)



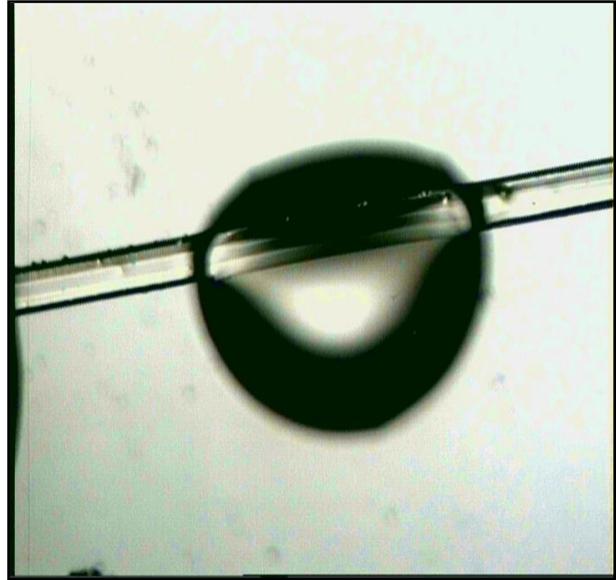
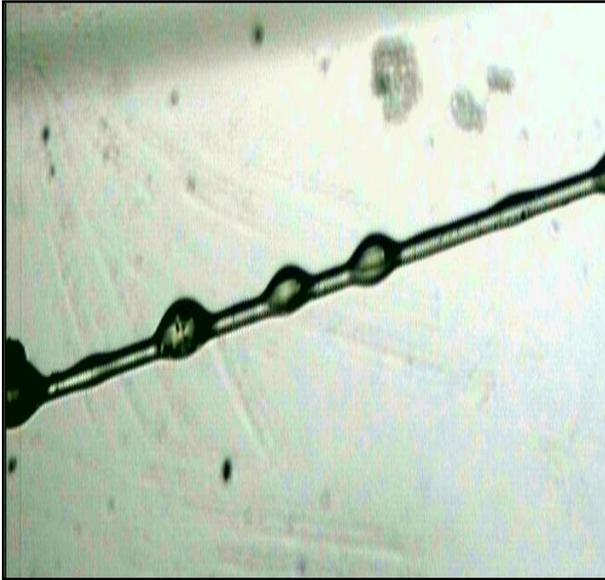
(b)



(c)

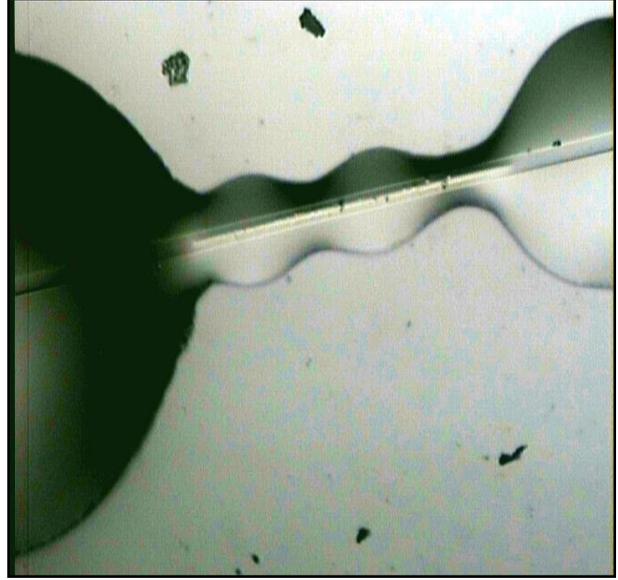
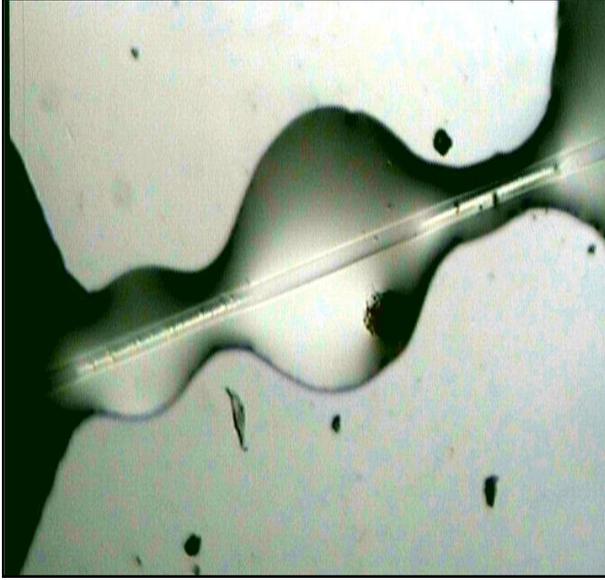
(d)

شكل (٤-١٥) يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج محفرة تمت معالجتها باستخدام (H₂O + NaOH) وبدرجة حرارة (٤٥ °C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b) معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .



(a)

(b)



(c)

(d)

شكل (٤-١٦) يوضح صوراً بقوة تكبير (X ١٥٠) لليف زجاجي غمر مسبقاً في البولي استر غير المشبع : (a , b) غير معالج , (c , d) محفر تم معالجته بمحلول (CH₂OH + NaOH) .

نتائج اختبار الشد للألياف

٤-٧

(Densities of Fibers Tested)

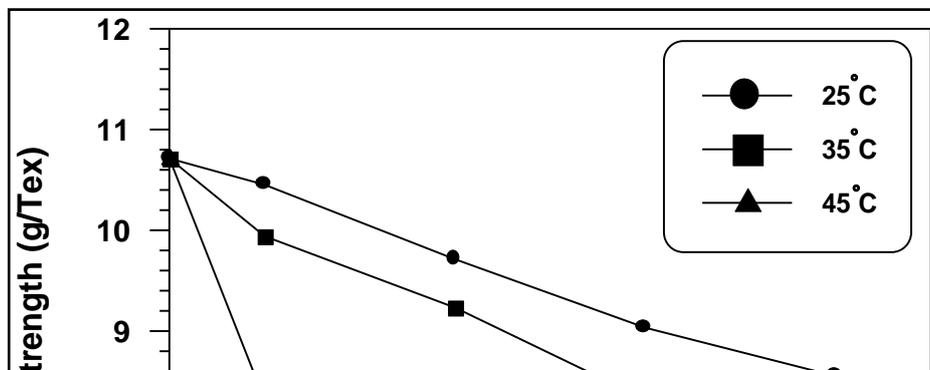
اجري اختبار الشد لحزم من ألياف الزجاج المحفرة نتيجة معاملتها بمحلول ($\text{CH}_3\text{OH} + \text{NaOH}$) وحزم أخرى غير معالجة , وتم اختيار المعالجة للألياف بوزن (0.8 g) أي يعامل كل (1 g) من ألياف الزجاج بـ (9.88 g) من محلول التحفير وان سبب اختيار هذا الوزن لتوسطها بين الأوزان (1.2 , 0.4 , 0.2 g) , والملحق (B) يوضح نتائج هذا الاختبار .

شكل (٤-١٧) يوضح تأثير فترة المعالجة على مقاومة الشد للألياف حيث يلاحظ انخفاض قيم مقاومة الشد للألياف المحفرة بالمقارنة مع قيمتها للألياف غير المعالجة التي تبلغ (10.71 g/Tex) هذا الانخفاض يزداد بزيادة فترة ودرجة حرارة المعالجة حيث تصل مقاومة الشد إلى قيمة (6.76 g/Tex) لعينات الألياف المعالجة في درجة حرارة (45 °C) ولمدة (7 days) وإلى (7.81 g/Tex) لعينات الألياف المعالجة في درجة حرارة (35 °C) ولمدة (7 days) فيما تصل إلى (8.55 g/Tex) لعينات الألياف المعالجة في درجة حرارة (25 °C) ولمدة (7 days) . يلاحظ أيضاً بان أقصى انخفاض في مقاومة الشد كان للألياف المعالجة بدرجة حرارة (45 °C) كما أن مقاومة الشد لهذه العينات تنخفض بشكل كبير في الفترة الأولى للمعالجة حيث يكون الفقدان بالوزن عالياً . الشكل (٤-١٨) يمثل عينة شد لألياف الزجاج بعد الاختبار .

إن سبب الانخفاض في مقاومة الشد للألياف المعالجة يعود إلى أن المعالجة بمحلول ($\text{CH}_3\text{OH} + \text{NaOH}$) أنشأت حفراً على سطح الألياف حيث يزداد عدد الحفر وعمقها بزيادة فترة ودرجة حرارة المعالجة . الحفر المتكونة هذه تعتبر مناطق تركيز إجهاد وكلما ازداد عمقها ازدادت احتمالية فشل الألياف وانخفضت مقاومة شدها وهذا مطابق لما جاء في كثير من البحوث [41, 17] .

شكل (٤-١٩) يوضح تأثير فترة المعالجة على النسبة بين معامل المرونة للألياف المعالجة بمحلول ($\text{CH}_3\text{OH} + \text{NaOH}$) إلى معامل المرونة للألياف غير المعالجة ($E_{\text{treated}} / E_{\text{untreated}}$) حيث يلاحظ انخفاض هذه النسبة مع زيادة فترة المعالجة وكذلك درجة حرارة المعالجة . حيث تصل ($E_{\text{treated}} / E_{\text{untreated}}$) إلى قيمة (0.65) لعينات الألياف المعالجة في درجة حرارة (45 °C) ولمدة (7 days) وإلى (0.785) لعينات الألياف المعالجة في درجة حرارة (35 °C) ولمدة (7 days) فيما تصل إلى (0.867) لعينات الألياف المعالجة في درجة حرارة (25 °C) ولمدة (7 days) . يلاحظ أن أقصى انخفاض في هذه النسبة يحدث لعينات الألياف المعالجة في درجة حرارة (45 °C) ولمدة (7 days) .

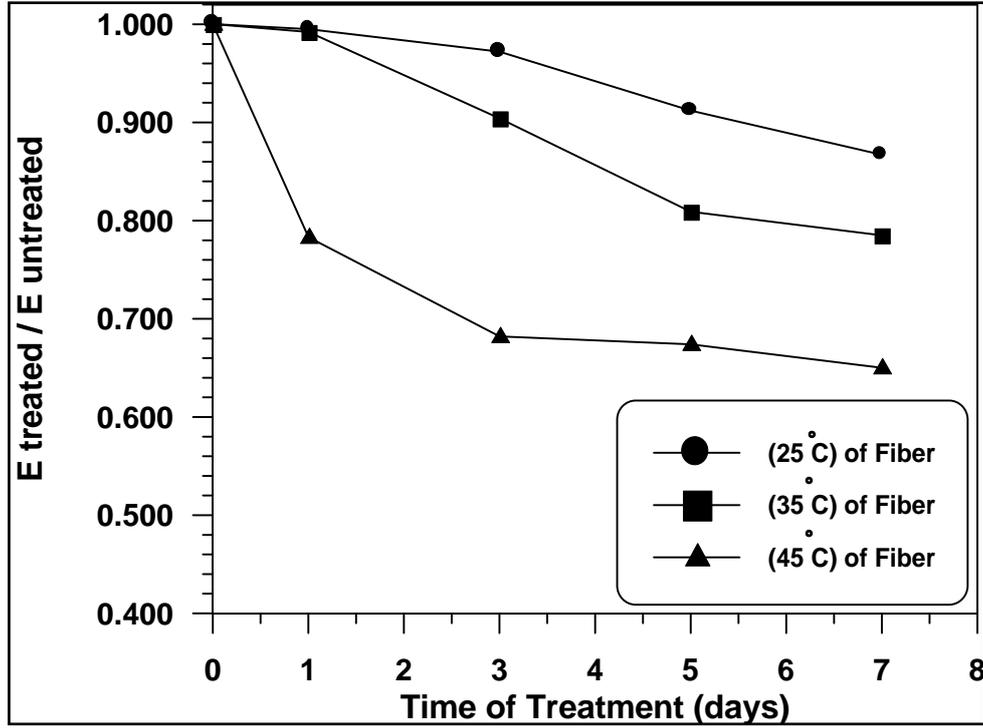
إن سبب الانخفاض في هذه النسبة يعود إلى أن المعالجة بمحلول ($\text{CH}_3\text{OH} + \text{NaOH}$) سبب تحفيراً لألياف الزجاج وهذا التحفير يسبب انخفاض في مقاومة الشد للألياف المحفرة ويزداد الانخفاض مع زيادة درجة حرارة وفترة المعالجة وهذا الانخفاض يسبب انخفاضاً في معامل المرونة للألياف المعالجة بالمقارنة مع قيمته للألياف غير المعالجة .



شكل (٤-١٧) يوضح تأثير فترة المعالجة على مقاومة الشد لألياف الزجاج نوع (E-glass) المعالجة باستخدام محلول (CH₃OH + NaOH) في درجات حرارية مختلفة .



شكل (٤-١٨) عينة شد لألياف الزجاج بعد الاختبار .



شكل (٤-١٩) يوضح تأثير فترة المعالجة على النسبة بين معامل المرونة لألياف الزجاج نوع (E- glass) المعالجة بمحلول (CH₃OH + NaOH) في درجات حرارية مختلفة إلى معامل المرونة للألياف الغير معالجة .

نتائج اختبار القص البيني

٤-٨

اجري اختبار القص البيني (فك الربط) بين حزمة من ألياف الزجاج المعالجة بمحلول (CH₃OH + NaOH) وقطرة من البولي استر الغير مشبع وقورنت النتائج باستخدام حزم من ألياف الزجاج لم يتم معالجتها , والملحق (B) يوضح نتائج هذا الاختبار .

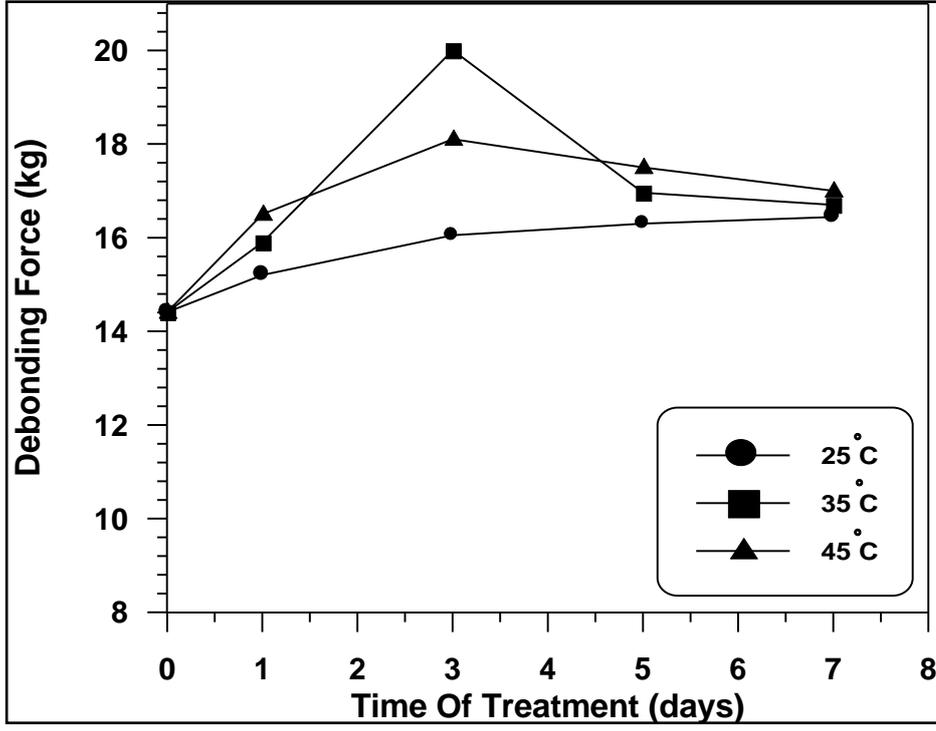
الشكل (٤-٢٠) يوضح نتائج الاختبار حيث يلاحظ ارتفاع مقدار قوة فك الربط بين حزمة الألياف المحفرة وقطرة البولي استر غير المشبع بالمقارنة مع مقدارها اللازم لفك الربط بين حزمة الألياف الغير

معالجة وقطرة البولي استر غير المشبع والبالغ (14.41 kg) , يلاحظ أيضا ارتفاع مقدار قوة فك الربط بالنسبة للعينات المحفرة في درجة حرارة (25 °C) وهذا الارتفاع يزداد مع زيادة فترة المعالجة إلى ان يصل أقصى قيمة له عند (7 days) حيث يبلغ (16.44 kg) في حين ان العينات المعالجة في درجة حرارة (35 °C) يرتفع مقدار قوة فك ربطها إلى أقصى قيمة (20 kg) عند فترة (3 days) بعدها يبدأ مقدار القوة بالانخفاض إلى أن يصل إلى اقل قيمة (16.7 kg) عند (7 days) أما العينات ذات الألياف المعالجة في درجة (45 °C) فيرتفع مقدار قوة فك الربط إلى أقصى قيمة (18.1 kg) عند (3 days) بعدها يبدأ بالانخفاض إلى أن يصل إلى (17 kg) عند (7 days) .

إن المعالجة باستخدام محلول (CH₂OH + NaOH) يسبب تحفيرا لسطح ألياف الزجاج والحفر المتكونة تزيد من المساحة السطحية لليف كما تزيد من مساحة الربط بين الألياف المحفرة وقطرة البولي استر الغير مشبع ويتولد ربط تشابكي بيني ميكانيكي يزيد من مقدار القوة اللازمة لفك الربط بين الألياف والقطرة كما أن الشد السطحي للبوليمر ينخفض عند سريانه إلى الحفر ومن ثم يسهل عملية التبليل للألياف , وهنالك العديد من البحوث التي تبين بأن تحفير الألياف يرفع من قوة فك الربط [37,44,45,47] .

إن معدل التحفير يزداد بزيادة فترة المعالجة فالحفر المتكونة يزداد عددها بزيادة فترة المعالجة ومن ثم تزداد مساحة الربط ويحصل تغلغل أفضل للبولي استر الغير مشبع داخل الحفر وهذا بدوره يرفع من مقدار قوة فك الربط وهذا مطابق لعينات الألياف المعالجة في درجة حرارة (25 °C) أما العينات المعالجة في درجة حرارة (35 °C) وتلك المعالجة في درجة حرارة (45 °C) فإن زيادة درجة حرارة المعالجة يعجل ويسرع من عملية التحفير مما يظهر القيمة القصوى لقوة فك الربط عند فترة معالجة (3 days) عند درجة حرارة (35 °C) حيث بعدها تبدأ حالة التحفير المفرط (Over Etching) حيث تزداد الخشونة السطحية إلى حد يقلل من تغلغل البولي استر إلى داخل الحفر لان الحفر قد زاد عمقها كما زاد عددها وهذا يقلل من مقدار القوة اللازمة لفك الربط بين الألياف والبولي استر على اعتبار أن التحفير يزداد بزيادة فترة المعالجة [3,5] حتى تصل مرحلة ازالة طبقة من الليف أي (Over Etching) .

تعد المعالجة بدرجة حرارة (35 °C) ولمدة (3 days) هي الموازنة المثلى بين درجة الحرارة وزمن المعالجة وهي الأفضل من بين باقي المعالجات المستخدمة فيما يخص هذا الاختبار لأنها تعطي أعلى مقداراً لقوة فك الربط بين حزمة ألياف الزجاج المحفرة وقطرة البولي استر غير المشبع . الشكل (21-4) يمثل عينة قص بيني بين حزمة من ألياف الزجاج وقطرة بولي استر الغير مشبع بعد الاختبار .



شكل (٢٠-٤) يوضح تأثير فترة المعالجة على القوة اللازمة لإنهاء الربط بين ألياف من الزجاج نوع (E-glass) والبولي استر الغير مشبع معالجة باستخدام محلول (CH₃OH + NaOH) في درجات حرارية مختلفة.



شكل (٤-٢١) عينة قص بيني بعد الاختبار .

٤-٩ نتائج اختبار الانحناء للمواد المركبة (Bending Test Results)

اجري اختبار الانحناء لعينات من مواد مركبة ذات أساس من البولي استر الغير مشبع مقواة بنسبة (٢٠ %wt) (٢٨ Bundles) وبالاتجاه الطولي بألياف زجاج نوع (E-glass) محفرة باستخدام محلول (CH₃OH + NaOH) وأخرى غير معالجة كما اختبرت عينات من البولي استر الغير مشبع والغير مقوى , الملحق (B) يوضح نتائج هذا الاختبار .

يلاحظ من الشكل (٤-٢٢) ارتفاع مقاومة كسر الانحناء للعينات ذات الأساس من البولي استر الغير مشبع والمقواة بألياف زجاج إلى حدود (١٥٩.٣٨ MPa) مقارنة بالعينات من البولي استر غير المقواة حيث تصل المقاومة إلى (١١٢.٥ MPa) , كما أظهرت النتائج ارتفاع مقاومة كسر الانحناء لعينات المواد المركبة ذات مادة أساس من البولي استر والمقواة بألياف زجاج محفرة مقارنة بالعينات المقواة بألياف غير معالجة .

يلاحظ من شكل (٤-٢٢) ارتفاع مقاومة كسر الانحناء لعينات المواد المركبة المقواة بألياف محفرة في درجة حرارة (٣٥ °C) إلى أقصى قيمة (٢٣١.٢٥ MPa) عند (٣ days) بعدها تنخفض المقاومة مع زيادة فترة المعالجة إلى أن تصل إلى اقل قيمة (٢٠٤.٦٩ MPa) عند (٧ days) , وارتفاع مقاومة كسر الانحناء لعينات المواد المركبة المقواة بألياف محفرة في درجة حرارة (٤٥ °C) إلى أقصى قيمة (٢١٠.٩٤ MPa) عند (٣ days) بعدها تنخفض المقاومة مع زيادة فترة المعالجة إلى أن تصل إلى اقل قيمة (١٨٧.٥ MPa) عند (٧ days) , في حين ترتفع مقاومة الانحناء لعينات المواد المركبة المقواة بألياف محفرة في درجة حرارة (٢٥ °C) مع زيادة فترة المعالجة إلى أقصى قيمة (٢٠٠ MPa) عند (٧ days) .

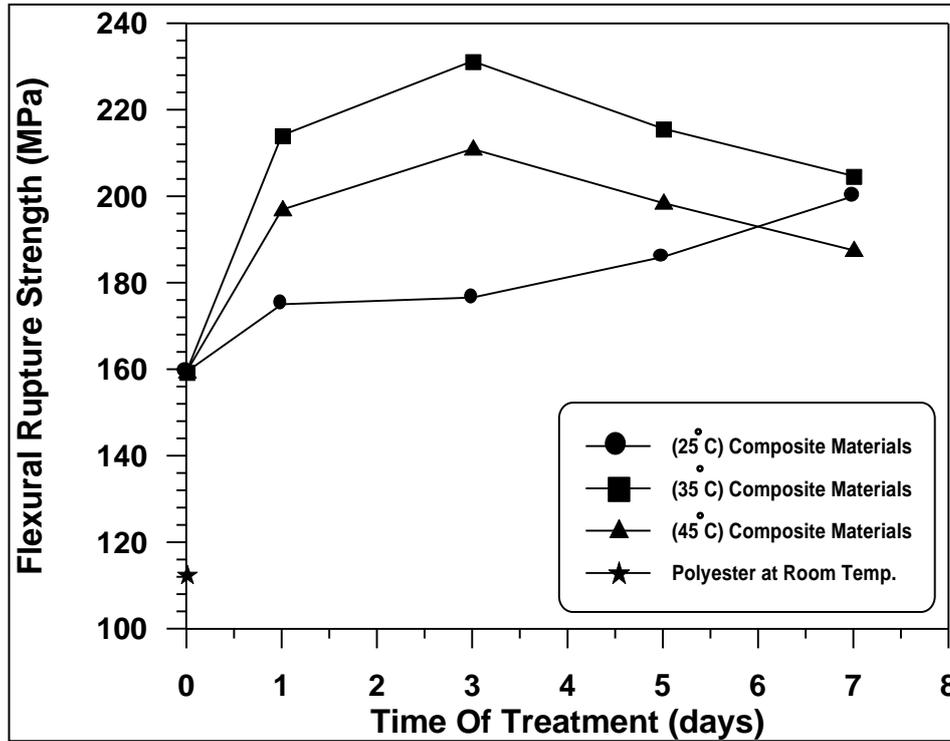
إن سبب ارتفاع مقاومة الانحناء لعينات المواد المركبة المقواة بألياف محفرة يعود إلى أن المعاملة بمحلول (CH₃OH + NaOH) أحدثت حفراً على سطح ألياف الزجاج وزادت من خشونة

السطحية كما زادت من المساحة السطحية للألياف ومساحة الربط كما انشأ ربط تشابكي بيني ميكانيكي بين الحفر والبولي استر وهذا بدوره زاد من انتقال الإجهاد من الأرضية إلى الألياف ومن ثم زاد من مقاومة الانحناء . العديد من البحوث أظهرت أن تحفير الألياف يؤدي إلى زيادة مقاومة الانحناء للمادة المركبة المقواة بها [٢٦, ٤٢, ٤٥] .

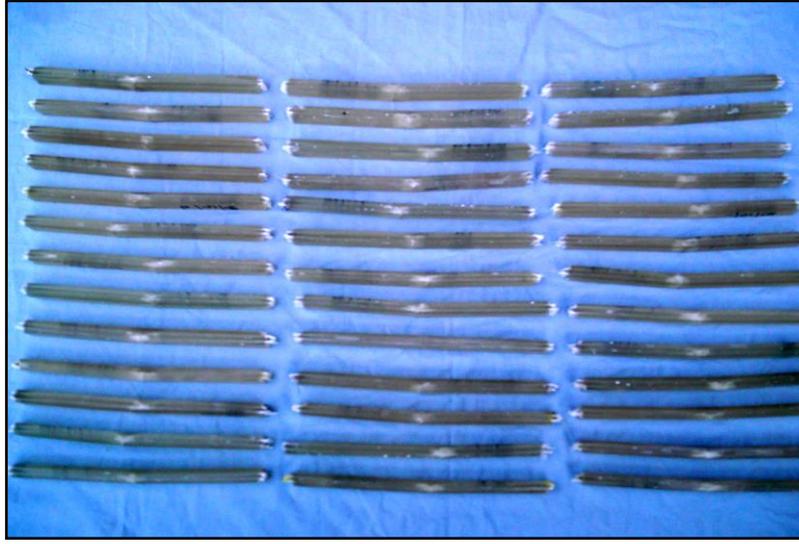
إن معدل التحفير يزداد بزيادة فترة المعالجة لذا يزداد الربط بين الألياف المحفرة والبولي استر للعينات المقواة بألياف محفرة في درجة (٤٥ °C , ٣٥) لحد (٣ days) لحصول تغلغل جيد للبولي استر داخل الحفر لكن بعد هذه الفترة تقل مقاومة الانحناء بسبب حدوث التحفير المفرط (Over Etching) الذي يسبب خشونة سطحية عالية تقلل من تغلغل البولي استر إلى داخل الحفر ومن ثم يقلل من الربط بين الألياف والأرضية وهذا بدوره يقلل من انتقال الإجهاد من الأرضية إلى الألياف .

أما بالنسبة لمقاومة انحناء عينات المواد المركبة المقواة بألياف محفرة في درجة (٢٥ °C) فأنها تزداد مع زيادة فترة المعالجة لان درجة حرارة المعالجة ليست عالية وتأثيرها قليل على معدل التحفير ومن ثم فان التأثير الأكبر على معدل التحفير هو فترة المعالجة بحيث كلما زادت زاد معدل التحفير وزادت معه مقاومة الانحناء .

أظهرت النتائج أن المعالجة بدرجة حرارة (٣٥ °C) ولمدة (٣ days) هي الموازنة المثلى بين درجة الحرارة وزمن المعالجة وهي الأفضل من بين باقي المعالجات المستخدمة فيما يخص هذا الاختبار لأنها تعطي أعلى مقاومة انحناء . الشكل (٢٣-٤) يمثل عينات من المواد المركبة بعد الاختبار .



شكل (٤-٢٢) يوضح تأثير فترة المعالجة على مقاومة كسر الانحناء لعينات من البولي استر غير المشبع مقواة بألياف زجاج نوع (E-glass) معالجة باستخدام محلول (CH₃OH + NaOH) في درجات حرارية مختلفة وأخرى مقواة بألياف غير معالجة وعينات من البولي استر الغير مشبع وغير مقواة .



شكل (٤-٢٣) عينات الانحناء للمواد المركبة بعد الاختبار .

نتائج اختبار الشد للمواد المركبة

٤-

١٠

اجري اختبار الشد لعينات من مواد مركبة ذات أساس من البولي استر الغير مشبع مقواة بنسبة (٢٠ %wt) (١٦ Bundles) وبالاتجاه الطولي بألياف زجاج من نوع (E-glass) محفرة باستخدام

محلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) وأخرى مقواة بألياف غير معالجة كما اختبرت عينات من البولي استر الغير مشبع والغير مقوى . الشكل (٢٤-٤) والشكل (٢٥-٤) يوضحان منحنيات نتائج هذا الاختبار . الملحق (B) يوضح جدول بنتائج هذا الاختبار .

أظهرت نتائج اختبار الشد ارتفاع مقاومة الشد من (31.97 MPa) لعينات البولي استر غير مقواة إلى (224.18 MPa) لعينات المواد المركبة ذات أساس من البولي استر والمقواة بألياف الزجاج .

يلاحظ من شكل (٢٤-٤) ارتفاع مقاومة الشد لعينات المواد المركبة المقواة بألياف محفورة مقارنة بمقاومة الشد لعينات المواد المركبة المقواة بألياف غير معالجة . العينات المعالجة في درجة حرارة (٢٥ °C) ترتفع مقاومة الشد لها مع زيادة فترة المعالجة حيث تصل إلى أقصى قيمة (256.03 MPa) عند فترة معالجة (٧ days) , أما بالنسبة للعينات المعالجة في درجة حرارة (٣٥ °C) فترتفع المقاومة إلى أقصى قيمة (286.04 MPa) عند (٥ days) بعدها تبدأ مقاومة الشد بالانخفاض مع زيادة فترة المعالجة حيث تصل إلى اقل قيمة (262.76 MPa) عند فترة معالجة (٧ days) , في حين تصل أقصى مقاومة شد للمواد المركبة المقواة بألياف معالجة في درجة حرارة (٤٥ °C) إلى (268.89 MPa) عند فترة معالجة (١ day) بعدها تبدأ بالانخفاض مع زيادة فترة المعالجة لتصل إلى اقل قيمة (190.49 MPa) عند فترة معالجة (٧ days) حيث ان هذه القيمة اقل من مقاومة شد المواد المركبة المقواة بألياف زجاج غير معالجة .

إن سبب زيادة مقاومة الشد لعينات المواد المركبة المقواة بألياف محفورة يعود إلى أن عملية التحفير تنشأ حفراً على سطح الألياف تزيد من المساحة السطحية للليف كما تزيد من مساحة الربط وتولد ربط تشابكي بيني ميكانيكي بين الحفر والبولي استر يزيد من قوة الربط بين الألياف والأرضية مما يزيد من مقاومة الشد للمادة المركبة , العديد من البحوث أظهرت ارتفاع مقاومة الشد لعينات مواد مركبة مقواة بألياف محفورة [٢٦,٤٥] .

إن ارتفاع مقاومة الشد لعينات المواد المركبة المقواة بألياف معالجة في درجة حرارة (٢٥ °C) مع زيادة فترة المعالجة يعود سببه إلى أن التحفير يزداد مع زيادة فترة المعالجة مما يؤدي إلى زيادة مقاومة الشد في حين عند المعالجة في درجة حرارة (٤٥ °C , ٣٥) ترتفع مقاومة الشد لفترة معالجة معينة بعدها تنخفض وسبب ذلك يعود إلى أنه كلما ارتفعت درجة حرارة المعالجة زاد معدل التحفير لان الحرارة تسرع من التحفير الى حد التحفير المفرط فيسبب خشونة سطحية تقلل من تغلغل البولي استر إلى داخل الحفر مما يقلل من الربط بين الألياف والأرضية .

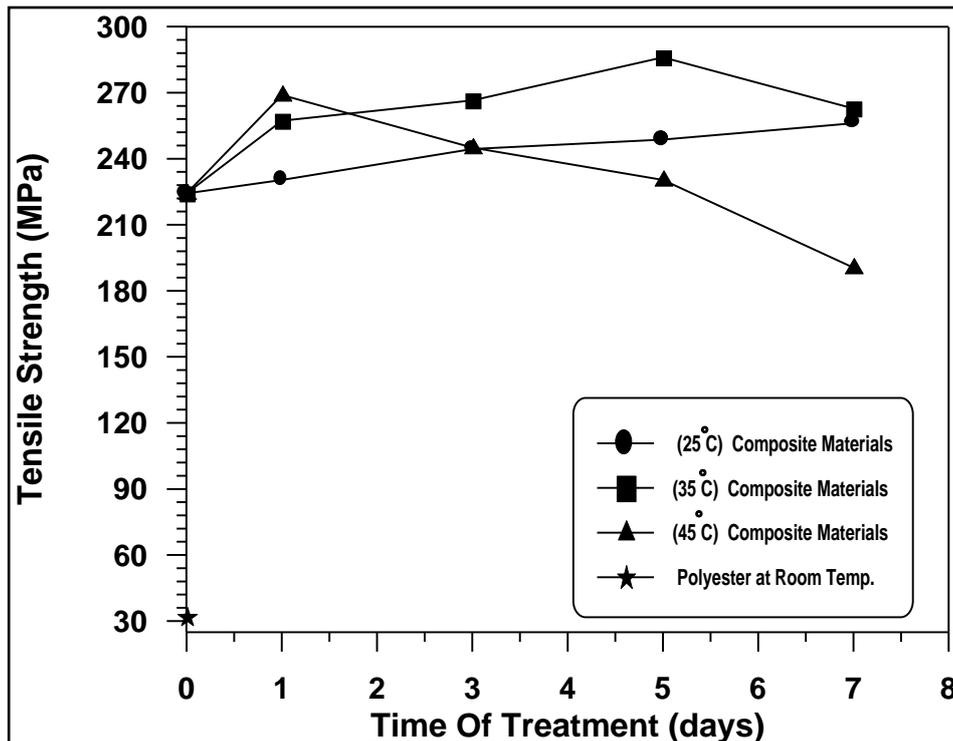
تعد المعالجة بدرجة حرارة (٣٥ °C) ولمدة (٥ days) هي الموازنة المثلى بين درجة الحرارة وفترة المعالجة وهي الأفضل من بين باقي المعالجات المستخدمة فيما يخص هذا الاختبار لأنها تعطي أعلى مقاومة شد .

شكل (٢٥-٤) يوضح تأثير فترة المعالجة على النسبة بين معامل المرونة لعينات المواد المركبة ذات أساس من البولي استر الغير مشبع والمقواة بألياف معالجة بمحلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) إلى معامل المرونة لعينات المواد المركبة المقواة بألياف غير معالجة ($E_{c.t.} / E_{c.un.t.}$) . يلاحظ ارتفاع هذه النسبة لعينات المواد المركبة المقواة بألياف معالجة بالمقارنة مع عينات المواد المركبة المقواة بألياف

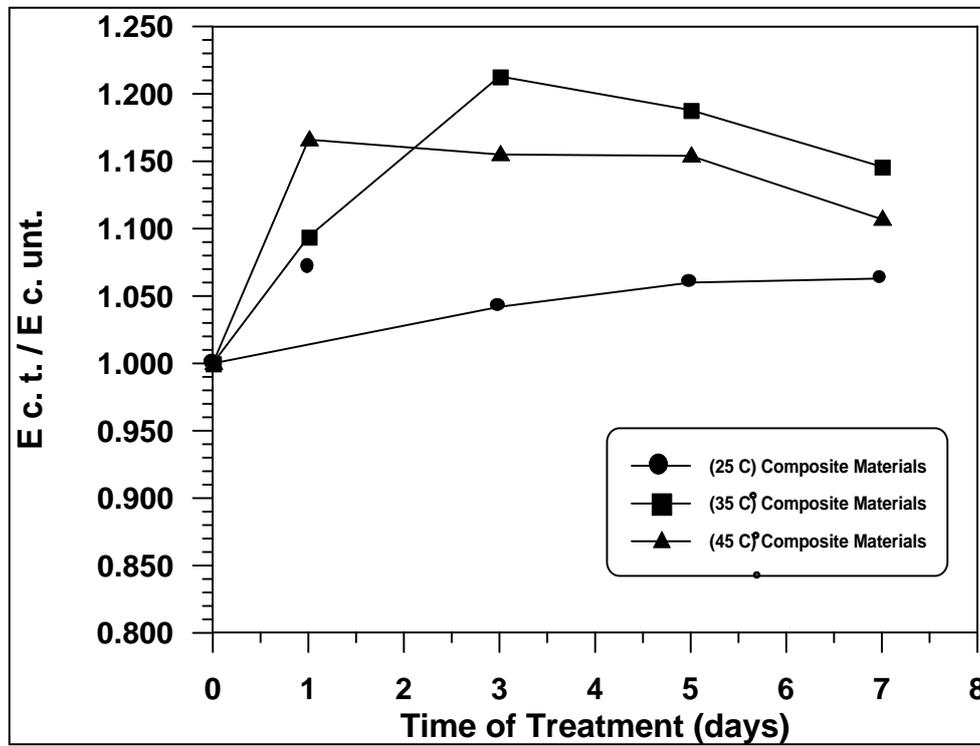
غير معالجة حيث تصل للعينات المعالجة في درجة حرارة (٢٥ °C) إلى (١.٠٦٣) كأقصى قيمة عند فترة معالجة (٧ days) , أما بالنسبة للعينات المعالجة في درجة حرارة (٣٥ °C) فترتفع إلى (١.٢١٣) عند (٣ days) بعدها تبدأ بالانخفاض مع زيادة فترة المعالجة حيث تصل إلى اقل قيمة (١.١٤٦) عند فترة معالجة (٧ days) , في حين للمواد المركبة المقواة بألياف معالجة في درجة حرارة (٤٥ °C) تصل أقصى قيمة لها إلى (١.١٦٧) عند فترة معالجة (١ day) بعدها تبدأ بالانخفاض مع زيادة فترة المعالجة لتصل إلى اقل قيمة (١.١٠٧) عند فترة معالجة (٧ days) .

إن سبب زيادة ($E_{c.t.} / E_{c.un.t.}$) لعينات المواد المركبة المقواة بألياف معالجة يعود إلى أن التحفير يسبب زيادة في مقاومة الربط بين الألياف المحفرة والأرضية مما يؤدي إلى زيادة مقاومة الشد للمواد المركبة المقواة بألياف محفرة مما يزيد من معامل المرونة للمواد المركبة المقواة بألياف معالجة .

إن ارتفاع ($E_{c.t.} / E_{c.un.t.}$) لعينات المواد المركبة المقواة بألياف معالجة في درجة حرارة (٢٥ °C) مع زيادة فترة المعالجة يعود سببه إلى أن التحفير يزداد مع زيادة فترة المعالجة مما يؤدي إلى زيادة مقاومة الشد ومن ثم يؤدي إلى زيادة معامل المرونة للمواد المركبة المقواة بألياف معالجة في حين عند المعالجة في درجة حرارة (٣٥ , ٤٥ °C) ترتفع مقاومة الشد لفترة معالجة معينة بعدها تنخفض وسبب ذلك يعود إلى أنه كلما ارتفعت درجة حرارة المعالجة زاد معدل التحفير لان الحرارة تسرع من التحفير إلى حد التحفير المفرط فيسبب خشونة سطحية تقلل من تغلغل البوليمر إلى داخل الحفر مما يقلل من الربط بين الألياف والأرضية وهذا يؤدي إلى انخفاض مقاومة الشد ومن ثم انخفاض معامل المرونة للمواد المركبة المقواة بألياف معالجة . الشكل (٤-٢٦) يمثل عينات من المواد المركبة بعد الاختبار .



شكل (٤-٢٤) يوضح تأثير فترة المعالجة على مقاومة الشد لعينات من البولي استر غير المشبع مقواة بألياف زجاج نوع (E-glass) معالجة باستخدام محلول (CH₃OH + NaOH) وأخرى مقواة بألياف غير معالجة وعينات من البولي استر غير المشبع غير مقواة .



شكل (٤-٢٥) يوضح تأثير فترة المعالجة على النسبة بين معامل المرونة لعينات المواد المركبة ذات أساس من البولي استر الغير مشبع والمقواة بألياف زجاج نوع (E-glass) معالجة بمحلول (CH₃OH + NaOH) إلى معامل المرونة لعينات المواد المركبة المقواة بألياف غير معالجة .



الشكل (٤-٢٦) عينات من المواد المركبة بعد الاختبار .

٥-١ الاستنتاجات

من خلال ما ورد في الفصول السابقة ومعاينة التجارب المجراة لدراسة تأثير التحفير الرطب لألياف الزجاج ومعاينة الفحوص الفيزيائية والمجهريية والاختبارات الميكانيكية التي تم إجراؤها لنماذج الألياف المحفرة ونماذج المواد المركبة المقواة بألياف محفرة لغرض تحديد ودراسة تأثير التحفير الرطب على الخواص النهائية يمكن استنتاج ما يلي :

١- يزداد عدد الحفر المتكونة على سطح الألياف المعالجة بمحلول التحفير مع زيادة درجة حرارة وفترة المعالجة .

٢- ارتفاع نسبة فقدان الوزن للألياف المعالجة بمحلول (H₂O + NaOH) بالمقارنة مع نسبة فقدان الوزن للألياف المعالجة بمحلول (CH₃OH + NaOH) .

٣- إن نسبة فقدان الوزن للألياف تزداد مع زيادة درجة حرارة وفترة المعالجة وزيادة النسبة الوزنية لمحلول التحفير إلى وزن الألياف .

٤- يزداد الربط بين الألياف والأرضية نتيجة لتحفير الألياف وتعد المعالجة في درجة حرارة (٣٥ °C) ولمدة (٣ days) هي الأفضل من بين باقي المعالجات لأنها تعطي أعلى مقدراً للقوة اللازمة لفك الربط .

٥- انخفاض قيم مقاومة الشد ومعامل المرونة للألياف بعد تحفيرها بالمعالجة بمحلول (CH₃OH + NaOH) وهذا الانخفاض يزداد مع زيادة فترة ودرجة حرارة المعالجة .

٦- ارتفاع مقاومة كسر الانحناء لعينات المواد المركبة ذات أساس من البولي استر غير المشبع والمقواة بألياف زجاج نوع (E-glass) محفرة مقارنة بالعينات المقواة بألياف غير معالجة , وتعد المعالجة في درجة حرارة (٣٥ °C) ولمدة (٣ days) هي الأفضل من بين باقي المعالجات فيما يخص هذا الاختبار لأنها تعطي أعلى مقاومة كسر انحناء .

٧- ارتفاع مقاومة الشد ومعامل المرونة لعينات المواد المركبة ذات أساس من البولي استر غير المشبع والمقواة بألياف زجاج نوع (E-glass) محفرة بشكل اكبر مقارنة بالعينات المقواة بألياف غير معالجة , وتعد المعالجة في درجة حرارة (٣٥ °C) ولمدة (٥ days) الأفضل من بين باقي المعالجات لأنها تعطي أعلى مقاومة شد والمعالجة في درجة حرارة (٣٥ °C) ولمدة (٣ days) فأنها تعطي أعلى نسبة (E_{c. t.} / E_{c. un.t.}) فيما يخص هذا الاختبار .

٨- تعرض عامل الربط الذي يغطي سطح ألياف الزجاج للإزالة عند معالجة الألياف بمحلول (CH₂OH + NaOH) أو بمحلول (H₂O + NaOH) .

٩- إن أفضل موازنة للصفات الميكانيكية هي (٣٥ °C) و(٣ days) ماعدا فحص الشد للمواد المركبة حيث تكون الموازنة عند (٣٥ °C) و (٥ days) لان الوصول إلى أعلى مقاومة شد نحتاج فيه إلى فترة زمنية أطول .

التوصيات

٥-٢

١- استبدال ألياف الزجاج بألياف أخرى كالكاربون أو ألياف البولي ايثيلين ودراسة تأثير ذلك على الخواص النهائية وباستخدام محاليل تحفير مناسبة .

٢- إجراء تحليل نظري لدراسة تأثير التحفير على إجهاد القص بين الليف والمادة الأساس .

٣- استبدال محلول (كحول مثيلي + هيدروكسيد الصوديوم) بمحلول (كحول ايثيلي + هيدروكسيد الصوديوم) ودراسة تأثير عوامل التحفير على خواص الألياف والمواد المركبة المقواة بالألياف .

٤- استخدام درجات حرارة معالجة أعلى وفترات معالجة اقصر ودراسة تأثير ذلك على عملية التحفير .

(References)

المصادر

١- M. M. Schwartz , “ COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK ” , Division of United Technologies , U.S.A. , ١٩٨٤ , pp. (١.٣-٣.١٠) .

٢- “ NEW STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGIES : OPPORTUNITIES FOR THE USE OF ADVANCED CERAMICS AND COMPOSITES ” , Laboratory of Congress Catalog Card Number ٨٦ – ٦٠٠٥٥١ , U.S.A. , September ١٩٨٦ , pp. (٤٣-٥٣) .

٣- Peter A. Thornton and Vito J. Colangelo , “ FUNDAMENTALS OF ENGINEERING MATERIALS ” , Benét Laboratories , U.S. Army Research and Development Center Watervliet , N.Y. , ١٩٨٥ , pp. (٥٨٧-٥٨٩) .

٤- Donghwan Cho , Suk Hyang Yun , etc , “ Effects of Fiber Surface – Treatment and Sizing on the Dynamic Mechanical and Interfacial Properties of Carbon/Nylon ٦ Composites ” , Carbon Science , Vol.٥ , No.١ , March ٢٠٠٤ , pp.(١-٥) .

٥- “ Chapter ١ : Literature Review : Thermoplastic Composite Materials ” , <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-١١-٤٩٩١٣٥-٢٥/unrestricted/Etdbody.pdf#search='Chapter%٢٠١%٢٠%٢C%٢٠Literature%٢٠Review%٢٠%٣A%٢٠Thermoplastic%٢٠Composite%٢٠Materials'> , pp.(٩-١٠) .

٦- Professor Paul K. Chu “ Chapter ٦ : Etching ” , City University of Hong Kong , <http://www.hait.ac.il/staff/reuvend/micro/٦v.pdf> , pp.(١-١٨) .

٧- William D. Callister and Jr. , “ MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING AN INTRODUCTION ” , Department of Metallurgical Engineering , University of Utah , U.S.A. , ٥th edition , ٢٠٠٠ , pp.(٥٢٠-٥٤٧) .

٨- Renée Cusson and Yunping Xi , “ The Behavior of Fiber – Reinforced Polymer Reinforcement In Low Temperature Environmental Climates ” , Department of Civil , Environmental & Architectural Engineering , University of Colorado , December ٢٠٠٢ , pp.(٧) .

9- W. Bolton , “ ENGINEERING MATERIALS TECHNOLOGY ” , 3th edition , 1998 , pp.(304-307) .

10- Nils Berg Madsen , “ Modification and Characterization of The Interface in Polymer / Inorganic Composites ” , Riso National Laboratory , Roskilde , Denmark , March 1999 , pp.(1-8) (101-100) .

11- Gloria Thomas , “ Capillary and Microdevice Electrophoretic Tools for Genetic Analysis : Heteroduplex Analysis for Tuberculosis Drug Susceptibility and Ligase Detection Reaction for Colorectal Cancer Detection ” , Doctor Thesis , Department of Chemistry , Louisiana State University , May 2002 , pp.(34-30) .

12- “ EE 0344-Introduction to MEMS : Chaptet 3 Cont-MEMS Processing ” , <http://www-ee.uta.edu/online/cbutler/MEMSwebpage/pdfs/chapter3contd.pdf> , pp.(1-9) .

13- Joanne Deval , Chris Folk , etc , “ MEMS Preliminary Exam 2000 Study Notes ” , [http://ho.seas.ucla.edu/links/MEMS Prelim 2000 notes.pdf](http://ho.seas.ucla.edu/links/MEMS_Prelim_2000_notes.pdf) pp.(1-12) (09-64) .

14- A.G. Andreou and J. Wang , “ Wet Etching ” , 020/030/080 . 490 , Microfabrication Laboratory , <http://www3.ece.jhu.edu/faculty/andreou/490/2004/LectureNotes/Wet%20Etching.pdf> , 2004 , pp.(1-17) .

15- “ Lecture 9 : Dry Etching ” , 020/030/080 . 490 , Microfabrication Laboratory , <http://www3.ece.jhu.edu/faculty/andreou/490/2003/LectureNotes/DryEtching.pdf> , 2003 , pp.(1-17) .

16- Dr. Marc Madou , “ Lithography and Dry and Wet Etching – 1 ” , Chemistry 694 , <http://mmadou.eng.uci.edu/Classes /Chemistry694/694Class1 .pdf> , 1998 , pp.(1-18) .

17- AGY (World Headquarters / Americas , European Office) , “ High Strength Glass Fibers ” , Technical Paper , March 2004 , pp.(1-12) .

18- “ Abstract ” , http://thesis.lib.cycu.edu.tw/ETD-db/ETD-search/view_etd?URN=etd-0701102-140110 , pp.(0) .

19- Anders Carolin , “ Strengthening of Concrete Structures with CFRP – Shear Strengthening and Full – Scale Applications ” , Licentiate Thesis , Luleå University of Technology , Sweden , 2001 , pp.(29) .

20- K. L. Loewenstein , “ THE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF CONTINUOUS GLASS FIBERS ” , U.S.A. , 1983 , pp.(33) .

21- Navy Environmental Health Center , “ ADVANCED COMPOSITE MATERIALS ” , 2010 Walmer Avenue , Norfolk , Virginia 23013 – 2617 , September 1991 , pp.(18) .

22- Neha Vaidya , “ The Manufacturing of Wet – Laid Hydroentangled Glass Fibers Composites for Industrial Applications ” , Master Thesis , North Carolina State University , July 2002 , pp.(26) .

23- Cihat Tascioglu , “ Impact of Preservative Treatment and Fungal Exposure on Phenolic Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Material Utilized in Wood Reinforcement ” , Doctor Thesis , University of Maine , May 2002 , pp.(23) .

٢٤- N. P. Mellott , S. L. Brantley , etc , “ Evaluation of Surface Preparation Methods for Glass ” , Surface and Interface Analysis ; ٣١:٣٦٢-٣٦٨ , DIO:١٠.١٠٠٢/sia.٩٧١ , ٢٠٠١ .

٢٥- David Fred M^c Bagonluri – Nuuri , “ Simulation of Fatigue Performance & Creep Rupture of Glass – Reinforced Polymeric Composites for Infrastructure Applications ” , Master Thesis , Blacksburg , Virginia , August ١٩٩٨ , pp.(٢٥-٢٦) .

٢٦- Alexander Bismarck , Amar K. Mohanty , etc , “ Surface Characterization of Natural Fibers ; Surface Properties and The Water Up – Take Behavior of Modified Sisal and Coir Fibers ” , Green Chemistry, ٣ , ١٠٠-١٠٧ , DIO: ١٠.١٠٣٩/b١٠٠٣٦٥h , ٢٠٠١ .

٢٧- Alexander Feldman , M. Fernanda Gonzalez and Gad Marom , “ Transcrystallinity in Surface Modified Aramid Fiber Reinforced Nylon ٦٦ Composites ” , Macromolecular Materials and Engineering , ٢٨٨ , No.١١ , DOI:١٠.١٠٠٢/mame.٢٠٠٣٠٠١٥١ , ٢٠٠٣ , pp.(٨٦١-٨٦٦) .

٢٨- د. محمد نزار ابراهيم , د. خالد محمود داود و مروان محمود زكريا , “ الكيمياء العضوية ” , قسم الكيمياء , كلية التربية , جامعة الموصل , (١٩٨٨) .

٢٩- Raymond Chang , “ PHYSICAL CHEMISTRY FOR THE CHEMICAL AND BIOLOGICAL SCIENCES ” , Williams College , University Science Books , California , ٢٠٠٠ , pp.(٦٩٢)(٢٦١) .

٣٠- Gordon M. Barrow , “ PHYSICAL CHEMISTRY ” , International Student Edition , ٤th Edition , ١٩٧٩ , pp.(٥٥٥) .

٣١- د. حسن بن محمد الحازمي و د. محمد بن ابراهيم الحسن , “ الكيمياء العضوية ” , قسم الكيمياء , كلية العلوم , جامعة الملك سعود , الطبعة الاولى , (١٩٨٦) , صفحة (٣٠٠ - ٢٩١) .

٣٢- T. W. Graham Solomons , “ ORGANIC CHEMISTRY ” , John Wily and Sons ,

3rd Edition, 1984.

33- Stuart J. Baum and Charles W. J. Scaife, "CHEMISTRY ALIFE SCIENCE APPROACH", New York, 2nd Edition, 1980, pp.(72).

34- "Chapter 9 : Acids and Bases", http://alpha.chem.umb.edu/chemistry/ch130/documents/Chapter_9_Acids_Bases_Spring2000.pdf, Spring 2000.

35- Jaleel Kareem Ahmad, "CARBON FIBER", AI – Muntasser Institute, Sr. No. 001, 1999.

36- H. Hujo and K. Tsuda, "Effects of Chemical Environments and Stress on Corrosion Behaviors of Glass Fiber – Reinforced Plastics and Vinylester Resin", Gap Analysis for Durability of Fiber Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure, Chapter 3, Effects of Moisture / Aqueous Solutions, <http://www.cerf.org/pdfs/collab/durability/3.pdf>, 1999, pp.(1-14).

37- David A. Biro, Gerald Pleizier, etc, "Application of the Microbond Technique. IV. Improved Fiber – Matrix Adhesion by RF Plasma Treatment of Organic Fibers", Wiley Inter Science : Journal : Abstract, http://www.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/10432270/ABSTRACT?C_RETRY=1&S_RETRY=0, April 1992.

38- J. W. Chin, T. Nguyen, etc, "Effects of Environmental Exposure on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Materials Used in Construction", Gap Analysis for Durability of Fiber Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure, Chapter 4, Effects of Alkaline Environment, <http://www.cerf.org/pdfs/collab/durability/4.pdf>, 1997, pp. (1-16).

੨੯- Rajeev Karnani , Mohan Krishnan , etc , “ Biofiber – Reinforced Polypropylene Composites ” , Polymer Engineering and Science , Vol. ੨੭ , No.੨ , February ੧੯੯੭ , pp.(੧-੮) .

੩੦- kin Liao , Carl R. Schultheisz , etc , “ Long – Term Environmental Fatigue of Pultruded Glass – Fiber – Reinforced Composites Under Flexural Loading ” , International Journal of Fatigue ੨੧ (੧੯੯੯) ੪੮੦ – ੪੯੦ .

੩੧- Dr. Tao C. Chang , “ Plasma Surface Treatment in Composites Manufacturing ” , Journal of Industrial Technology , Volume ੧੦ , Number ੧ – November ੧੯੯੮ to January ੧੯੯੯ , pp.(੧-੭) .

੩੨- R. Park and J. Jang , “ Performance Improvement of Carbon Fiber / Polyethylene Fiber Hybrid Composites ” , Journal Of Materials Science , DOI:10.1023/A:1004647721380 , Volume ੩੪ , Number ੧੨ , <http://www.cheric.org/research/tech/periodicals/view.php?seq=309006&start=0&num=9&jourid=128&key1=Jang%20J&key2=&key3=&syar=&eyar=&link1=&link2=&link3=&item1=authors&item2=&item3=&sortby=pubyear&totalcount=17> , June ੧੯੯੯ .

੩੩- K. Van Den Abeele and K. Van De Velde , “ Correlation Between Dynamic Nonlinearity and Static Mechanical Properties of Corroded E-glass Reinforced Polyester Composites ” , Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation , eds , D. O. Thompson and D. E. Chimenti ,Vol. 19B , 1309 – 1366 , 1999 , pp.(1-8) .

੩੪- Debes Bhattacharyya , “ Natural Fiber Surface Modification Using Plasma Treatment ” , Biographies and Abstracts , 6th International Conference on Wood Fiber – Plastic Composites , U.S.A. , May ੨੦੦੧ , pp.(1-੨੩) .

੩੫- S. Panigrahi , T. Powell , etc , “ The Effect of Chemical Pretreatments on

Flax Fibre Biocomposites ” , The Society for Engineering in Agricultural , Food and Biological Systems , Paper Number : RRVo³ – ٠٠١٨ , Qctober ٢٠٠٣ , pp. (١-١٦).

٤٦- B. Wang , S. Panigrahi , etc , “ Moification of Flax Fibers by Chemical Treatment ” , The Canadian Society for Engineering in Agricultural , Food and Biological Systems , Paper No. ٠٣ – ٣٣٧ , July ٢٠٠٣ , pp.(١-١٥) .

٤٧- Stefanie Feih , Karen Wonsyld , etc , “ Testing Procedure for The Single Fiber Fragmentation Test ” , Risoe National Laboratory , Roskilde , Denmark , December ٢٠٠٤ , pp.(١-٣٠).

٤٨- J. E. Booth , B. Sc. , etc , “ PRINCIPLES OF TEXTILE TESTING ” , Senior Lecturer in Textile Technology Bolton , Institute of Technology , ١٩٧٩ , pp.(٣٥٤-٣٦٦) .

٤٩- ناصر حسين الربيعي ود. مهدي صالح العلوش , “ تكنولوجيا الغزل والنسيج ” , وزارة التعليم العالي والبحث العلمي , هيئة المعاهد الفنية , (١٩٩١) , صفحة (٢٢٣) .

٥٠- “ مسودة الدليل الاسترشادي المرجعي ” , وزارة التخطيط , الجهاز المركزي للتقييس والسيطرة النوعية , جمهورية العراق , (١٩٩٢) .

٥١- Priyv V. Lakshminarayanan , “ Effect of Nitric Acid Oxidation on Vapor Grown Carbon Fibers (VGCFs) Use of These Fibers in Epoxy Composites ” , Master Thesis , Chemical Engineering , Mississippi State , August ٢٠٠٣ , pp.(٣٠) .

قائمة الأشكال

List of Figures

- ١-١ يوضح سلوك (إجهاد شد- انفعال) لألياف تقوية معدنية , سيراميكية وعضوية ... ٦
- ١-٢ بعض أصناف ألياف التقوية الشائعة الاستخدام في المواد المركبة ٨
البوليمرية الأساس .
- ١-٣ طريقة (Microdebond) لقياس مقاومة القص البينية بين الألياف والأرضية.... ١١
- ١-٤ يوضح حالة انتقال الإجهاد من الأرضية إلى الألياف عند تعرض ١٢
مادة مركبة مقواة بالألياف إلى حمل شد وكان السطح البيني بين الليف
والأرضية : (a) لا يحتوي على فجوات , (b) يحتوي على فجوات .
- ١-٥ آلية التحفير الرطب ١٥
- ١-٦ التحفير الرطب موحد الخواص وغير الموحد الخواص ١٦
- ١-٧ مخطط يوضح طريقة التحفير الجاف (RIE) ١٧
- ١-٨ العلاقة بين الاحتفاظ بالوزن وحامضية محلول (Buffer) عند ١٩
معاملة ألياف زجاج نوع (E-glass) و(S-٢ glass) .
- ١-٩ يوضح العلاقة بين معدل التحفير لاوكسيد السليكون (R_{ox}) وتركيز ٢٠
(KOH) ودرجة الحرارة .
- ١-١٠ صورة بالمجهر الالكتروني الماسح لألياف الزجاج (E-glass) بعد ٢٣
تعريضها إلى حامض الكبريتيك بتركيز (٢٥ %) لمدة (٤.٥ days) .
- ١-١١ (a) ليف جوز هند غير معاملة , منظر مستو ومقطع عرضي (X ٢٥٠) ٢٣
ومنظر مستو مكبر (X ٥٠٠) (b) ليف جوز هند معاملة ب(٥ % NaOH) لمدة

(30 min) بدرجة (30 °C) , منظر مستو , مقطع عرضي ومنظر مستو مكبر
(X 1000) .

- ٢٤ ١-١٢ صورة بالمجهر الالكتروني الماسح لسطح ألياف الكفلر (a) غير معاملة
(b) معاملة ب (Br / NH₃) .
- ٢٥ ١-١٣ العلاقة بين مقاومة الشد ورقم (PH) لمحول (Buffer) المستخدم في
معاملة ألياف زجاج نوع (S-2 glass) و (E-glass) .
- ٢٦ ١-١٤ يوضح عزم الاستقطاب للماء
- ٣٨ ٣-١ يوضح (a) جهاز التقطير المستخدم في تنقية الكحول المثيلي (b) حمام مائي
(c) قالب عينة الانحناء للمواد المركبة (d) قالب عينة الشد للمواد المركبة .
- ٣٩ ٣-٢ مخطط تسلسل البرنامج العملي المتبع في البحث
- ٤٢ ٣-٣ صورة لعينات ألياف الزجاج
- ٤٤ ٣-٤ عينات شد لألياف الزجاج قبل الاختبار
- ٤٥ ٣-٥ حصيرة من ألياف الزجاج المحفرة
- ٤٨ ٣-٦ يوضح أبعاد عينة الشد القياسية (ASTM D 638) للمواد المركبة
- ٤٨ ٣-٧ يوضح عينات شد للمواد المركبة قبل الاختبار
- ٥٠ ٣-٨ يوضح عينات الانحناء للمواد المركبة قبل الاختبار
- ٥١ ٣-٩ عينة فك الربط قبل الاختبار
- ٥٤ ٤-١ يوضح صوراً بقوة تكبير (X 100) لسطح ألياف زجاج غير معالجة وأخرى
معالجة باستخدام (CH₃OH + NaOH) وبدرجة حرارة الغرفة (a) غير معالجة
(b) معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة سبعة أيام (d) معالجة لمدة ثمانية أيام
(e) معالجة لمدة احد عشر يوماً .

- ٤-٢ ٥٦ يوضح العلاقة بين نسبة فقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بمحلول....
(CH₂OH + NaOH) ومحلول (H₂O + NaOH) في درجة حرارة (٢٥ °C) .
- ٤-٣ ٥٦ يوضح العلاقة بين نسبة فقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بمحلول....
(CH₂OH + NaOH) ومحلول (H₂O + NaOH) في درجة حرارة (٣٥ °C) .
- ٤-٤ ٥٧ يوضح العلاقة بين نسبة فقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بمحلول....
(CH₂OH + NaOH) ومحلول (H₂O + NaOH) في درجة حرارة (٤٥ °C) .
- ٤-٥ ٥٧ يوضح العلاقة بين نسبة فقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بوزن
(٠.٤ g) بمحلول (CH₂OH + NaOH) ومحلول (H₂O + NaOH) .
- ٤-٦ ٥٨ يوضح العلاقة بين نسبة فقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بوزن
(٠.٨ g) بمحلول (CH₂OH + NaOH) ومحلول (H₂O + NaOH) .
- ٤-٧ ٥٨ يوضح العلاقة بين نسبة فقدان بالوزن وفترة معالجة ألياف الزجاج بوزن
(١.٢ g) بمحلول (CH₂OH + NaOH) ومحلول (H₂O + NaOH) .
- ٤-٨ ٦٣ يوضح صورة بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ليف زجاج غير معالج
- ٤-٩ ٦٣ يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج معاملة حرارياً
(a) بدرجة حرارة (١١٠ °C) (b) بدرجة حرارة (٥٠٠ °C) .
- ٤-١٠ ٦٤ يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج معالجة باستخدام
(CH₂OH + NaOH) وبدرجة حرارة (٢٥ °C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b)
معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .
- ٤-١١ ٦٥ يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج معالجة باستخدام
(CH₂OH + NaOH) وبدرجة حرارة (٣٥ °C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b)
معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .
- ٤-١٢ ٦٦ يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج معالجة باستخدام
(CH₂OH + NaOH) وبدرجة حرارة (٤٥ °C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b)

- ٦٧ ٤-١٣ معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .
يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج معالجة باستخدام
(H₂O + NaOH) وبدرجة حرارة (٢٥ °C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b)
معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .
- ٦٨ ٤-١٤ يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج معالجة باستخدام
(H₂O + NaOH) وبدرجة حرارة (٣٥ °C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b)
معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .
- ٦٩ ٤-١٥ يوضح صوراً بقوة تكبير (X ٦٠٠) لسطح ألياف الزجاج معالجة باستخدام
(H₂O + NaOH) وبدرجة حرارة (٤٥ °C) (a) معالجة لمدة يوم واحد (b)
معالجة لمدة ثلاثة أيام (c) معالجة لمدة خمسة أيام (d) معالجة لمدة سبعة أيام .
- ٧٠ ٤-١٦ يوضح صوراً بقوة تكبير (X ١٥٠) لليف زجاجي غمر مسبقاً في البولي استر ..
(a , b) غير معالج (c , d) معالج بمحلول (CH₂OH + NaOH) .
- ٧٢ ٤-١٧ يوضح تأثير فترة المعالجة على مقاومة الشد لألياف الزجاج نوع (E-glass) ...
المعالجة باستخدام محلول (CH₂OH + NaOH) في درجات حرارية مختلفة .
- ٧٢ ٤-١٨ عينة شد لألياف الزجاج بعد الاختبار
- ٧٣ ٤-١٩ يوضح تأثير فترة المعالجة على النسبة بين معامل المرونة لألياف الزجاج نوع ..
(E-glass) المعالجة بمحلول (CH₂OH + NaOH) في درجات حرارية
مختلفة إلى معامل المرونة للألياف الغير معالجة .
- ٧٥ ٤-٢٠ يوضح تأثير فترة المعالجة على القوة اللازمة لإنهاء الربط بين ألياف
من الزجاج نوع (E-glass) معالجة باستخدام محلول (CH₂OH + NaOH)
في درجات حرارية مختلفة والبولي استر .
- ٧٥ ٤-٢١ عينة قص بيني بعد الاختبار
- ٧٧ ٤-٢٢ يوضح تأثير فترة المعالجة على مقاومة كسر الانحناء لعينات من
البولي استر مقواة بألياف زجاج نوع (E-glass) معالجة باستخدام محلول

- (CH₂OH + NaOH) في درجات حرارية مختلفة واخرى مقواة بألياف غير معالجة وعينات من البولي استر غير مقواة .
- ٢٣-٤ عينات الانحناء للمواد المركبة بعد الاختبار ٧٨
- ٢٤-٤ يوضح تأثير فترة المعالجة على مقاومة الشد لعينات من البولي استر مقواة ٨٠
- بألياف زجاج نوع (E-glass) معالجة باستخدام محلول (CH₂OH + NaOH) وأخرى مقواة بألياف غير معالجة وعينات من البولي استر غير مقواة .
- ٢٥-٤ يوضح تأثير فترة المعالجة على النسبة بين معامل المرونة لعينات ٨١
- المواد المركبة ذات أساس من البولي استر والمقواة بألياف زجاج نوع (E-glass) معالجة بمحلول (CH₂OH + NaOH) إلى معامل المرونة لعينات المواد المركبة المقواة بألياف غير معالجة .
- ٢٦-٤ عينات من المواد المركبة بعد الاختبار ٨١

قائمة الجداول

List of Tables

- ١-١ يوضح بعض المواد المركبة ذات الأساس المعدني المقواة بألياف ٤
- مستمرة ومستقيمة .
- ١-٢ متانة الكسر وحجم العيب الحرج لمواد أساس سيراميكية غير مقواة ٥
- وأخرى مقواة .
- ١-٣ بعض الخواص للدائن المقواة بألياف زجاج غير مستمرة ٥

- ١-٤ ٨ يوضح تأثير توجيه الألياف على صفات المادة المركبة
- ١-٥ ١٨ بعض الغازات المستخدمة في التحفير الجاف لبعض المواد
- ١-٦ ٢١ يوضح التركيب الكيماوي لأنواع مختلفة من ألياف الزجاج
- ١-٧ ٢١ يوضح بعض الخواص لأنواع من ألياف الزجاج
- ١-٨ ٢٢ مجموعة من المحاليل القاعدية والحامضية المستخدمة.....
- في تحفير الزجاج وألياف الزجاج .
- ١-٩ ٢٢ النسبة المئوية للفقدان بالوزن لبعض أنواع ألياف الزجاج
- المعرضة لمحاليل مختلفة .
- ٣-١ ٣٦ يوضح صفات ألياف الزجاج (E-glass) المجهزة من شركة (Binani).....
- ٣-٢ ٤١ يوضح فترات , درجات حرارة , أوزان وعدد العينات المعالجة
- المستخدمة في اختبار الفقدان بالوزن لألياف الزجاج محفرة بمحلول
($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) أو محلول ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) .
- ٣-٣ ٤٤ يوضح أوقات , درجات حرارة وعدد الحزم المعالجة المستخدمة.....
- في اختبار الشد لألياف الزجاج محفرة بمحلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) .
- ٣-٤ ٤٥ يوضح فترات , درجات حرارة وعدد حصائر ألياف الزجاج معالجة
- بمحلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$) والمستخدمة في اختبار الشد واختبار
الانحناء للمواد المركبة .
- ٤-١ ٦٠ يوضح مقارنة بين نسبة الفقدان بالوزن للألياف المعالجة بالكحول المقطر
- فقط مع نسبة الفقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول ($\text{CH}_2\text{OH} + \text{NaOH}$)
في درجة حرارة (٤٥°C) ولفترة (٧ days) .
- ٤-٢ ٦٠ يوضح مقارنة بين نسبة الفقدان بالوزن للألياف المعالجة بالماء المقطر

فقط مع نسبة الفقدان بالوزن للألياف المعالجة بمحلول ($H_2O + NaOH$)
في درجة حرارة ($25^{\circ}C$) ولفترة (7 days) .

٦١ ٤-٣ يوضح نتائج المعاملة الحرارية لألياف الزجاج في درجات حرارية
مختلفة ولمدة (2 hr) .

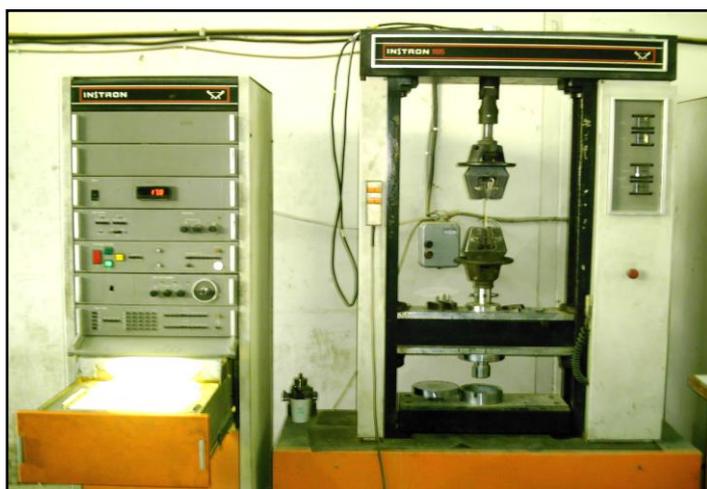
ملحق (A) : صور الأجهزة المستخدمة في الفحوصات الميكانيكية



شكل (١) جهاز الاختبارات العامة .



شكل (٢) جهاز شد الألياف .



شكل (٣) جهاز شد المواد المركبة .

ملحق (B) : جداول نتائج الاختبارات الميكانيكية .

جدول (١) يوضح مقارنة بين نتائج اختبار الفقدان بالوزن لألياف زجاج معالجة بمحلول ($\text{CH}_3\text{OH} + \text{NaOH}$) ومحلول ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) .

Sample Weight (g)	Time of Treatment (day)	Temperature of Treatment (°C)	Weight Loss (%) In (H ₂ O + NaOH)	Weight Loss (%) in (CH ₂ OH + NaOH)
٠.٤	١	٢٥	٠.٧٥	٠.٣
		٣٥	١.٠٨	٠.٤٥
		٤٥	١.٢٥	٠.٥٥
	٣	٢٥	٠.٨٨	٠.٤٥
		٣٥	٢.٠	٠.٥٠
		٤٥	٢.٥	٠.٧٠
	٥	٢٥	١.٢٥	٠.٥٠
		٣٥	٢.٦٣	٠.٦٥
		٤٥	٣.٣٣	٠.٧٥
	٧	٢٥	١.٨٨	٠.٦٥
		٣٥	٢.٧٨	٠.٧٠
		٤٥	٤.٣٣	٠.٨٠
٠.٨	١	٢٥	٠.٦٣	٠.٢٣
		٣٥	٠.٨٤	٠.٣٨
		٤٥	١.٠	٠.٤٣
	٣	٢٥	٠.٨٠	٠.٤٠
		٣٥	١.١٣	٠.٤٥
		٤٥	١.٤١	٠.٤٨
	٥	٢٥	١.١٣	٠.٤٥
		٣٥	١.٢٥	٠.٤٨
		٤٥	٢.١٦	٠.٥٠
	٧	٢٥	١.٧٥	٠.٤٨
		٣٥	١.٨٨	٠.٥٠
		٤٥	٢.٦٣	٠.٥٣
١.٢	١	٢٥	٠.٥٨	٠.١٧
		٣٥	٠.٨١	٠.٣٠
		٤٥	٠.٩٢	٠.٤٢
	٣	٢٥	٠.٦٥	٠.٣٨
		٣٥	٠.٨٣	٠.٤٠
		٤٥	١.٢٥	٠.٤٧
	٥	٢٥	٠.٩٢	٠.٤٠
		٣٥	١.٠٦	٠.٤٧
		٤٥	١.٦٧	٠.٤٨
	٧	٢٥	١.٣٣	٠.٤٣
		٣٥	١.٤٢	٠.٤٨
		٤٥	٢.٣٣	٠.٥٠

جدول (٢) : نتائج اختبار الشد للألياف (مقاومة الشد) .

Temperature of Treatment (°C)	Time of Treatment (day)	Load (kg)	Linear Density (Tex)	Tensile Strength (g/Tex)
-	-	١٢.٨٥	١٢٠٠	١٠.٧١

٢٥	١	١٢.٥٤	١٢٠٠	١٠.٤٥
	٣	١١.٦٥	١٢٠٠	٩.٧١
	٥	١٠.٨٣	١٢٠٠	٩.٠٣
	٧	١٠.٢٦	١٢٠٠	٨.٥٥
٣٥	١	١١.٩٣	١٢٠٠	٩.٩٤
	٣	١١.٠٧	١٢٠٠	٩.٢٣
	٥	٩.٩٨	١٢٠٠	٨.٣٢
	٧	٩.٣٧	١٢٠٠	٧.٨١
٤٥	١	٩.٩٧	١٢٠٠	٨.٣١
	٣	٨.٢١	١٢٠٠	٦.٨٤
	٥	٨.١٥	١٢٠٠	٦.٧٩
	٧	٨.١١	١٢٠٠	٦.٧٦

جدول (٣) : نتائج اختبار الشد للألياف (معامل المرونة) .

Temperature of Treatment (°C)	Time of Treatment (day)	Elongation (%)	Strain	Modulus of Elasticity (g/Text)	$E_{\text{treated}} / E_{\text{untreated}}$
-	-	١٣.٤٦	٠.١٣٤٦	٧٩.٥٧	١
٢٥	١	١٣.٢	٠.١٣٢٠	٧٩.١٧	٠.٩٩٥
	٣	١٢.٥٥	٠.١٢٥٥	٧٧.٣٧	٠.٩٧٢
	٥	١٢.٤٥	٠.١٢٤٥	٧٢.٥٣	٠.٩١٢
	٧	١٢.٤٠	٠.١٢٤٠	٦٨.٩٥	٠.٨٦٧
٣٥	١	١٢.٥٩	٠.١٢٥٩	٧٨.٩٥	٠.٩٩٢
	٣	١٢.٨٣	٠.١٢٨٣	٧١.٩٤	٠.٩٠٤
	٥	١٢.٩٣	٠.١٢٩٣	٦٤.٣٥	٠.٨٠٩
	٧	١٢.٥	٠.١٢٥٠	٦٢.٤٨	٠.٧٨٥
٤٥	١	١٣.٣٣	٠.١٣٣٣	٦٢.٣٤	٠.٧٨٣
	٣	١٢.٦	٠.١٢٦٠	٥٤.٢٩	٠.٦٨٢
	٥	١٢.٦٦	٠.١٢٦٦	٥٣.٦٣	٠.٦٧٤
	٧	١٣.٠٦	٠.١٣٠٦	٥١.٧٦	٠.٦٥٠

جدول (٤) : نتائج اختبار القص البيئي .

Temperature of Treatment (°C)	Time of Treatment (day)	Debonding Force (kg)
-	-	١٤.٤١
٢٥	١	١٥.٢
	٣	١٦.٠٥
	٥	١٦.٣
	٧	١٦.٤٤
٣٥	١	١٥.٩
	٣	٢٠
	٥	١٦.٩٦
	٧	١٦.٧
٤٥	١	١٦.٥
	٣	١٨.١
	٥	١٧.٥
	٧	١٧

جدول (٥) : نتائج اختبار الانحناء للمواد المركبة .

Temperature of Treatment (°C)	Time of Treatment (day)	Load (KN)	Flexural Rupture Strength (MPa)
-	-	١.٠٢	١٥٩.٣٨
٢٥	١	١.١٢	١٧٥
	٣	١.١٣	١٧٦.٥٦
	٥	١.١٩	١٨٥.٩٤
	٧	١.٢٨	٢٠٠
٣٥	١	١.٣٧	٢١٤.٠٦
	٣	١.٤٨	٢٣١.٢٥
	٥	١.٣٨	٢١٥.٦٣
	٧	١.٣١	٢٠٤.٦٩
٤٥	١	١.٢٦	١٩٦.٨٨
	٣	١.٣٥	٢١٠.٩٤
	٥	١.٢٧	١٩٨.٤٤
	٧	١.٢٠	١٨٧.٥

جدول (٦) : نتائج اختبار الشد للمواد المركبة (مقاومة الشد) .

Temperature of Treatment (°C)	Time of Treatment (day)	Load (kg)	Tensile Strength (MPa)
-	-	٩١٥	٢٢٤.١٨
٢٥	١	٩٤٠	٢٣٠.٣
	٣	٩٩٧.٥	٢٤٤.٣٩
	٥	١٠١٥	٢٤٨.٦٨
	٧	١٠٤٥	٢٥٦.٠٣
٣٥	١	١٠٥٠	٢٥٧.٢٥
	٣	١٠٨٧.٥	٢٦٦.٤٤
	٥	١١٦٧.٥	٢٨٦.٠٤
	٧	١٠٧٢.٥	٢٦٢.٧٦
٤٥	١	١٠٩٧.٥	٢٦٨.٨٩
	٣	١٠٠٠	٢٤٥
	٥	٩٤٠	٢٣٠.٣
	٧	٧٧٧.٥	١٩٠.٤٩

جدول (٧) : نتائج اختبار الشد للمواد المركبة (معامل المرونة) .

Temperature of Treatment (°C)	Time of Treatment (day)	Strain	Modulus of Elasticity (MPa)	(E _{c.t.} / E _{c.unt.})
-	-	٠.٠٣٩١	٥٧٣٣.٥٠	١
٢٥	١	٠.٠٣٧٥	٦١٤١.٣٣	١.٠٧١
	٣	٠.٠٤٠٩	٥٩٧٥.٣١	١.٠٤٢
	٥	٠.٠٤٠٩	٦٠٨٠.١٩	١.٠٦٠
	٧	٠.٠٤٢٠	٦٠٩٥.٩٥	١.٠٦٣
٣٥	١	٠.٠٤١٠	٦٢٧٤.٤	١.٠٩٤
	٣	٠.٠٣٨٣	٦٩٥٦.٦٦	١.٢١٣
	٥	٠.٠٤٢٠	٦٨١٠.٤٨	١.١٨٨
	٧	٠.٠٤٠٠	٦٥٦٩	١.١٤٦
٤٥	١	٠.٠٤٠٢	٦٦٨٨.٨١	١.١٦٧
	٣	٠.٠٣٧٠	٦٦٢١.٦٢	١.١٥٥
	٥	٠.٠٣٤٨	٦٦١٧.٨٢	١.١٥٤
	٧	٠.٠٣٠٠	٦٣٤٩.٦٧	١.١٠٧

