

الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

مشروع رسالة ماجستير بعنوان

دراسة التأثيرات المناخية على الخواص الميكانيكية

للمواد المركبة ذات الأساس البوليميري

Study the Environmental Effects on the Mechanical
Properties of Polymer Composites

بإشراف الدكتور

محمد مازن يعقوب

اعداد الطالب : محمد علي

الفهرس

رقم الصفحة

11	المقدمة
12	القسم الأول
12	المواد المركبة - مكوناتها - تصنيعها
13	الفصل الأول
13	مدخل إلى المواد المركبة
13	1-1- بنية المواد المركبة
16	1-2- أهم الألياف المستخدمة في تصنيع المواد المركبة
17	1-2-1- الألياف الزجاجية
17	1-2-2- الألياف الكربونية
18	1-2-3- ألياف الأراميد
18	1-3- المواد الرابطة
19	1-4- طرق تصنيع بعض المواد المركبة
19	1-4-1- القولية باللمس
20	1-4-2- القولية بالبخ
21	1-4-3- القولية بالتفريغ (vacuum)
22	1-4-4- القولية تحت ضغط الهواء
22	1-4-5- حقن الحبيبات المدعمة
23	1-4-6- القولية بلف الخيوط آليا
24	1-4-7- القولية بالضغط
25	الفصل الثاني
25	الخواص الميكانيكية للمواد المركبة
25	2-1- النسب الحجمية
25	2-2- النسب الكتلية
26	2-3- العلاقة بين النسب الكتلية والحجمية
30	الفصل الثالث

30	أنماط الانهيار للمواد المركبة
30	3-1- مقدمة
31	3-2- انتشار الشق في المواد المركبة
31	3-2-1- تأثير المادة الرابطة على انتشار الشق
31	3-2-2- تأثير الليف على انتشار الشق
31	3-2-3- تأثير السطح الفاصل بين الليف والمادة الرابطة على انتشار الشق
32	3-3- اشتقاق المتانة من العمل الحقيقي للمادة المركبة
32	3-3-1- حالة مادة مركبة تحتوي على ليف وحيد
34	3-3-2- الانهيار في طبقة احادية الاتجاه
36	الفصل الرابع
36	بنية المادة المركبة المستخدمة (ألياف الزجاج - ايبوكسي)
36	4-1- ألياف الزجاج
36	4-1-1- مقدمة
36	4-1-2- انتاج ألياف الزجاج
38	4-1-3- بنية الزجاج
38	4-1-4- خواص ألياف الزجاج
40	4-2- المادة الرابطة الايبوكسي
40	4-2-1- التركيب الكيميائي لزيينات الايبوكسي
41	4-2-2- كيمياء مركبات التقسية للايبوكسيات
42	الفصل الخامس
42	تأثير العوامل الجوية على خواص المواد المركبة والأبحاث السابقة في هذا المجال
42	5-1- مقدمة
43	5-2- تأثير الأشعة فوق البنفسجية على المواد المركبة
43	5-2-1- اكتشاف الأشعة فوق البنفسجية
43	5-2-2- تأثير الأشعة فوق البنفسجية على المواد المركبة البوليميرية
44	5-2-3- ميكانيكية التكسير

48	5-3- تأثير الرطوبة على المواد المركبة
48	5-3-1- امتصاص الرطوبة في المواد المركبة البوليميرية
48	5-3-2- انتشار Fickian الكلاسيكي
49	5-3-3- انتشار Non- Fickian
51	5-3-4- العوامل المؤثرة على عامل الانتشار
51	5-3-5- العوامل المؤثرة على محتوى رطوبة التوازن
51	5-3-6- التعتيق (Hygrothermal) للمواد المركبة
52	5-3-6-1- تأثير Hygrothermal ageing على المادة الرابطة البوليميرية
52	5-3-6-2- تأثير Hygrothermal ageing على الألياف
53	5-3-6-3- تأثير Hygrothermal ageing على المنطقة البينية
53	5-3-7- تأثير الرطوبة على المواد المركبة
55	5-4- تأثير الحرارة على المواد المركبة
55	5-4-1- التمدد الحراري والاجهادات الحرارية
55	5-4-1-1- الاجهادات والانفعالات الحرارية
58	5-4-1-2- عوامل التمدد الحراري
63	5-5- الأبحاث السابقة
65	القسم الثاني
65	الاختبارات العملية
66	الفصل السادس
66	تحضير العينات واختبارها
66	6-1- تحضير العينات
66	6-1-1- تحضير الصفائح
67	6-1-2- مراحل تحضير الصفائح
68	6-1-3- قص الصفائح
68	6-2- اختبارات المواد المركبة
68	6-2-1- اختبار الشد

68	6-2-1-1- الغاية من التجربة
69	6-2-1-2- وصف الاختبار
69	6-2-1-3- التجهيزات
69	6-2-1-4- عينة الاختبار
70	6-2-1-5- تحديد الشروط البدائية
70	6-2-1-6- تطبيق شروط الاختبار
70	6-2-1-7- القياس وتدوين النتائج
72	6-2-2- اختبار الصدم الديناميكي
72	6-2-2-1- الغاية من التجربة
72	6-2-2-2- أنواع اختبارات الصدم
72	6-2-2-3- العوامل المؤثرة على عامل الصدم
72	6-2-2-4- عينة الاختبار
73	6-2-2-5- اختبار تشاربي
73	6-2-2-6- آلة تشاربي
74	6-2-2-7- مواصفات آلة الاختبار
74	6-2-2-8- طريقة الاختبار
76	6-3- اختبار التعرض لأشعة UV
76	6-3-1- الأجهزة المستخدمة
77	6-3-2- عينات الاختبار
77	6-3-3- شروط الاختبار
78	6-3-4- نتائج اختبار الشد نتيجة التعرض لأشعة UVC
79	6-3-5- نتائج اختبار الصدم نتيجة التعرض لأشعة UVC
80	6-4- اختبار تأثير الرطوبة
80	6-4-1- الغاية من الاختبار
80	6-4-2- الأجهزة المستخدمة
81	6-4-3- وصف الاختبار وشرح طريقة العمل
82	6-4-4- الاجراء A
82	6-4-5- الاجراء B

82	6-4-6-الاجراء C
82	6-4-7-الاجراء D
82	6-4-8- منهجية الاجراء B
83	6-4-9- منهجية امتصاص الرطوبة
84	6-4-10- وزن عينات الاختبار
85	6-4-11- النسبة المئوية لزيادة وزن العينات نتيجة امتصاص الرطوبة
89	6-4-12- نتائج اختبار الشد نتيجة التعرض للرطوبة
90	6-4-13- نتائج اختبار الصدم نتيجة التعرض للرطوبة
91	6-5- اختبار الحرارة
91	6-5-1- الغاية من التجربة
91	6-5-2- التجهيزات
91	6-5-3- عينات الاختبار
91	6-5-4- وصف الاختبار وشرح طريقة العمل
92	6-5-5- نتائج اختبار الشد
93	6-5-6- نتائج اختبار الصدم
95	مناقشة النتائج
97	التوصيات للأعمال المستقبلية
98	المراجع المستخدمة
98	المراجع العربية
99	المراجع الأجنبية

فهرس الأشكال

- 13 1-1- صورة توضيحية لبنية المادة المركبة
- 15 2-1- مخطط اجهاد - انفعال للمادة المركبة و لكل من الليف و المادة الرابطة
- 16 3-1- أشكال لتوضع الألياف يتم اختيارها بناء على الخصائص المراد الحصول عليها
- 18 4-1- مخطط اجهاد - انفعال لأكثر الألياف شيوعاً
- 19 5-1- طريقة القولية باللمس
- 20 6-1- طريقة القولية بالبخ
- 21 7-1- طريقة القولية بالتفريغ
- 22 8-1- طريقة القولية تحت ضغط الهواء
- 22 9-1- طريقة حقن الحبيبات المدعمة
- 23 10-1- طريقة القولية بلف الخيوط آليا
- 24 11-1- طريقة القولية بالضغط
- 26 1-2- توزع الحمل الموازي لاتجاه الألياف بين الليف والمادة الرابطة
- 27 2-2- توزع الاجهاد بين الليف والمادة الرابطة
- 28 3-2- توزع الحمل العمودي على اتجاه الألياف بين الليف والمادة الرابطة
- 29 4-2- توزع الانفعال بين الليف والمادة الرابطة
- 32 1-3- نموذج اصطناعي مؤلف من مادة رابطة مدعمة بليف وحيد
- 35 2-3- أنماط الانكسار الممكنة الحدوث في مادة مركبة المتمثلة بطبقة أحادية الاتجاه تحت حمولة الشد
- 37 1-4- مراحل انتاج ألياف الزجاج
- 46 1-5- صورة تخطيطية توضح انشطار السلسلة لجزيئة البوليمر خلال تكون مجموعة الهيدروبيروكسيد عند ذرة الكربون الثالثة.
- 46 2-5- صورة تخطيطية توضح بعض التفاعلات التي من الممكن إن تحدث بعد تعرض البوليمر للإشعاع .
- 47 3-5- العمليات الأولية التي تحدث بعد التفاعل ما بين الإشعاع وجزيئة البوليمر
- 49 4-5- منحنى الانتشار النموذجي لـ Fickian

- 50 5-5- الانحرافات عن انتشار Fickian كما يفترض من قبل weitsman
- 56 5-6- بيانات تجريبية من أجل معاملات التمدد الحراري للمواد الرابطة ومواد تقوية مختلفة
- 57 5-7- حقل الإجهاد المرن في مادة حاضنة لانهائية من التيتانيوم
- 58-5- استخدام نموذج اللوح من أجل استنتاج علاقة رياضية تعبر عن التمدد المحوري لمادة مركبة
- 60 مقواة بألياف طويلة
- 61 5-9- وثوقية (ثقة) التنبؤ بالتمدد الحراري لمادة الإيبوكسي بطرق متنوعة من التسليح
- 69 6-1- عينة الشد
- 70 6-2- جهاز الشد
- 71 6-3- تغيير مقاومة الشد مع نسب الألياف
- 73 6-4- عينة الصدم
- 75 6-5- جهاز اختبار الصدم
- 76 6-6- حجرة اختبار UV
- 78 6-7- تغيير مقاومة الشد نتيجة التعرض لأشعة UVC مع الجذر التربيعي لزمن التعرض
- 79 6-8- تغيير عامل الصدم نتيجة التعرض لأشعة UVC مع الجذر التربيعي لزمن التعرض
- 80 6-9- فرن التجفيف
- 81 6-10- حجرة اختبار الرطوبة
- 86 6-11- النسبة المئوية لزيادة وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة بأسبوع
- 86 6-12- النسبة المئوية لزيادة وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة بأسبوعين
- 87 6-13- النسبة المئوية لزيادة وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة بثلاثة أسابيع
- 87 6-14- النسبة المئوية لزيادة وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة بأربعة أسابيع
- 88 6-15- النسبة المئوية لزيادة وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة بخمسة أسابيع
- 88 6-16- مقارنة النسبة المئوية لزيادة وزن العينات في أزمنة مختلفة
- 89 6-17- مخطط تغيير متانة الشد مع الجذر التربيعي لزمن التعرض نتيجة التعرض للرطوبة
- 90 6-18- مخطط تغيير عامل الصدم مع الجذر التربيعي لزمن التعرض نتيجة التعرض للرطوبة
- 91 6-19- فرن كهربائي
- 93 6-20- مخطط تغيير مقاومة الشد مع الجذر التربيعي لزمن التعرض نتيجة التعرض للحرارة
- 94 6-21- مخطط تغيير عامل الصدم مع الجذر التربيعي لزمن التعرض نتيجة التعرض للحرارة

فهرس الجداول

14	1-1- الخواص الميكانيكية لبعض المواد التقليدية
15	1-2- الخواص الميكانيكية لبعض أنواع الألياف
17	1-3- الخواص الميكانيكية لأهم أنواع الألياف الزجاجية
66	6-1- خواص ألياف الزجاج E
67	6-2- خواص المادة الرابطة (الايوكسي)
68	6-3- نسب ألياف الزجاج غراماج 200
68	6-4- نسب ألياف الزجاج غراماج 100
71	6-5- زيادة مقاومة الشد بزيادة النسبة الحجمية للألياف
71	6-6- نتائج اختبار الشد للعينات الأساس دون التعرض لأي عامل عند نسبة حجمية للألياف (36.2829205)
75	6-7- نتائج اختبار الصدم للعينات الأساس دون التعرض لأي عامل
78	6-8- نتائج اختبار الشد نتيجة التعرض لأشعة UV C
79	6-9- نتائج اختبار الصدم نتيجة التعرض لأشعة UV C
83	6-10- أرقام العينات ووزنها وفرق الوزن بين كل مرحلتين متتاليتين بعد وضعها في فرن التجفيف
84	6-11- أرقام العينات ووزنها بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة
85	6-12- النسبة المئوية لزيادة وزن العينات نتيجة امتصاص الرطوبة
89	6-13- نتائج اختبار الشد للعينات نتيجة التعرض للرطوبة
90	6-14- نتائج اختبار الصدم نتيجة التعرض للرطوبة
92	6-15- نتائج اختبار الشد نتيجة التعرض للحرارة
93	6-16- نتائج اختبار الصدم نتيجة التعرض للحرارة

Abstract

During exposure of Fiber Reinforced polymer material to different environment, a degradation is expected to occur in these materials.

The degradation rate may be constant or increase or decrease with time and can be gradual and abrupt.

These changes in the degradation rate occur at the long-term exposure to different environment.

All of these issues raise serious at long-term exposure of composite to different environment and it must be estimate and find solutions if it is possible before use these materials.

The objective of this research is to study the effect of environment on the performance of composite material (fiber glass- epoxy) where specimens are subjected to :

- 1- temperature and study the effect of temperature on mechanical properties (tensile strength and impact).
- 2- Moisture and study the effect of Moisture on mechanical properties (tensile strength and impact).
- 3- UV Radiation and study the effect of UV Radiation on mechanical properties (tensile strength and impact).

And find the relation between the time of exposure and the mechanical properties (tensile strength and impact).

ملخص البحث

خلال تعرض المواد البوليميرية المقواة بالألياف للعوامل الجوية المختلفة يتوقع حدوث تآكل في هذه المواد. قد يكون معدل التآكل ثابت أو متزايد أو متناقص مع الزمن وقد يكون تدريجي أو مفاجئ.

تحدث هذه التغيرات في معدل الانحلال (التآكل) عند التعرض لمدة طويلة للظروف البيئية المختلفة.

تظهر كل هذه القضايا والمشاكل بجدية عند تعرض المواد المركبة للظروف الجوية لفترات زمنية طويلة وهي بحاجة إلى تقييمها وإيجاد حلول لها إذا كان بالامكان وذلك قبل استثمار هذه المواد.

الهدف من هذا البحث دراسة تأثير العوامل الجوية على أداء المواد المركبة (الايوكسي - ألياف الزجاج) حيث تم تعريض العينات :

أولا : للحرارة ودراسة تأثير الحرارة على الخواص الميكانيكية (متانة الشد والصدم).

ثانيا: للرطوبة ودراسة تأثير الرطوبة على الخواص الميكانيكية (متانة الشد والصدم).

ثالثا : لاشعة UV ودراسة تأثير أشعة UV على الخواص الميكانيكية (متانة الشد والصدم).

وايجاد العلاقة بين زمن التعرض والخواص الميكانيكية (متانة الشد والصدم).

مقدمة :

في الوقت الحاضر التطور المستمر في تصميم المواد الهندسية وتركيبها - من أجل الأداء الممتاز - ومتطلبات توفير الوزن دفعت علماء المواد والمهندسين والمصممين إلى استمرار البحث عن مواد جديدة. منذ عام 1960، عندما تم انتاج أول عينة من مواد بلاستيكية مدعمة بالألياف، ازداد بشكل مستمر مدى ومجال تطبيق هذه المواد.

بفضل هذا التطور الذي أحدثته المواد المركبة خلال العقود الماضية أصبحت هذه المواد رائدة في مضمار المواد الهندسية المتقدمة، مما حث معظم الدول على التهاافت لإمتلاك التقانات المنبثقة عن هذه المواد، وتبع ذلك صراع ضخم من أجل التفوق في هذا المجال وخاصة في الدول المتقدمة. لذلك رافقت بحوث المواد المركبة كثير من السرية والكتمان.

القسم الأول

المواد المركبة - مكوناتها - تصنيعها

الفصل الأول

مدخل إلى المواد المركبة

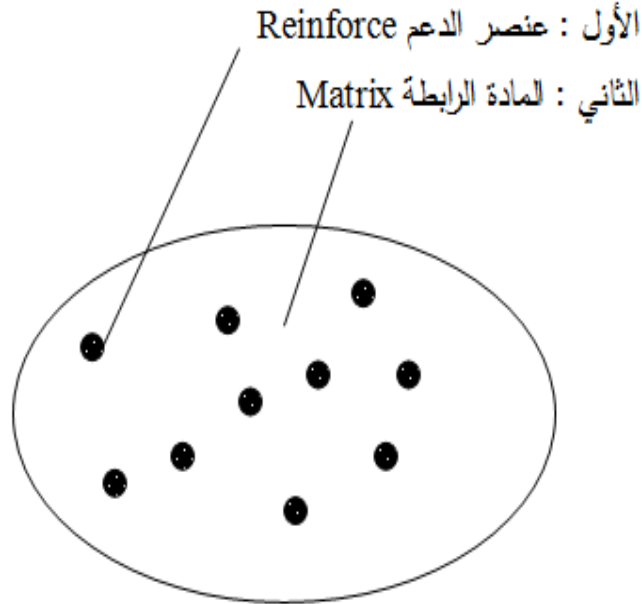
المواد المركبة : هي مواد غير متجانسة تتكون من مادتين مختلفتين أو ربما أكثر .
تم استخدام المواد المركبة منذ العصور القديمة حيث كان الفراعنة يمزجون القش مع الطين في ابنيتهم
كما تم استخدام شعر الحيوانات وبعض الألياف النباتية في التدعيم.
أما المواد المركبة الحالية : **الغاية منها** الحصول على خصائص عالية لا يمكن الحصول عليها
باستخدام المواد التقليدية.

1-1- بنية المواد المركبة

تتكون المادة المركبة على الأغلب من عنصرين :

1- عنصر الدعم.

2- المادة الرابطة.



الشكل (1-1) صورة توضيحية لبنية المادة المركبة

غالباً يكون عنصر الدعم عبارة عن ألياف Fibers تأخذ أشكالاً متنوعة وأنواعاً مختلفة. أما المادة الرابطة فهي إما من مواد بلاستيكية أو معدنية أو سيراميكية وذلك حسب مجال الاستخدام.

من أين جاءت فكرة المواد المركبة ؟

يتطلب التطور التكنولوجي البحث الدائم عن مواد ذات :

أ- مقاومة ميكانيكية عالية :

1- حد انكسار عالي σ_R

2- عامل يونغ مرتفع E

ب- خفة الوزن مع المحافظة على الخصائص العالية :

- وزن نوعي منخفض ρ

• بناء على ذلك يجب البحث عن مواد تتمتع بقيم مرتفعة لكل من :

E/ρ & σ_R/ρ

لننظر أولاً إلى المواد التقليدية المبينة في الجدول التالي :

σ_R/ρ [KN.m/Kg]	E/ρ [MN.m/Kg]	ρ [Kg/m ³]	σ_R [Mpa]	E [Gpa]	
43-270	26.6	7800	340-2100	210	الفولاذ
52-230	25.9	2700	140-620	70	خلائط الألمنيوم
-	33.3	390	-	30	الخشب
280-840	28	2500	700-1200	70	الزجاج
57-210	18.1	19300	1100-4100	350	التتغستين
380	164	1830	700	300	البيريليوم

الجدول (1-1) الخواص الميكانيكية لبعض المواد التقليدية

نلاحظ أن الزجاج يملك القيم الأعلى لكل من :

E/ρ & σ_R/ρ

لكن : للزجاج خاصية الهشاشة التي تمنع من استخدامه في تصنيع القطع الميكانيكية.

هذه الهشاشة أو القصفة ناتجة عن الحساسية المفرطة للزجاج تجاه العيوب والتشققات التي تنشأ أثناء التصنيع.

لوحظ بالتجربة والبرهان:

أنه عند اختبار القطع ذات الأبعاد الصغيرة نجد :

ارتفاع قيم الخواص الميكانيكية

الحد من خاصية الهشاشة

لقد تم تفسير هذه الظاهرة بأنه في القطع الصغيرة يقل فيها احتمال تشكل العيوب والتشققات.

من هنا جاءت فكرة تصنيع الألياف

عملياً تم الوصول إلى قيم مشابهة لتلك المحسوبة على أساس نظري وذلك من أجل ألياف زجاجية ذات قطر مساوي إلى 6 ميكرون.
يبين الجدول التالي بعض خصائص الألياف المستخدمة:

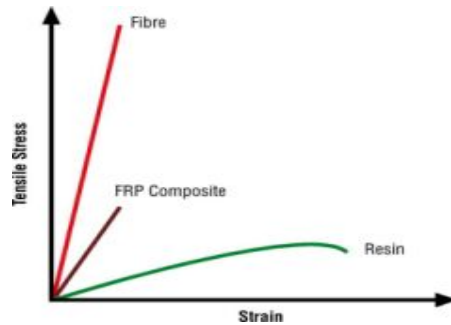
الألياف وخواصها	E [Gpa]	σ_R [Mpa]	ρ [Kg/m ³]	E/ ρ [MN.m/Kg]	σ_R/ρ [KN.m/Kg]
زجاج (E)	72.4	3500	2540	28.5	1380
زجاج (S)	85.5	4600	2480	34.5	1850
كربون عالي E كربون عالي σ_R	390	2100	1900	205	1100
	240	3500	1850	130	1890
اراميد	130	2800	1500	87	1870
البور	385	2800	2630	146	1100

الجدول (2-1) الخواص الميكانيكية لبعض أنواع الألياف

لكن لا يمكن أن نستخدم الألياف فقط لتصنيع القطع الميكانيكية
من هنا جاءت فكرة غرس الألياف ضمن مادة رابطة :

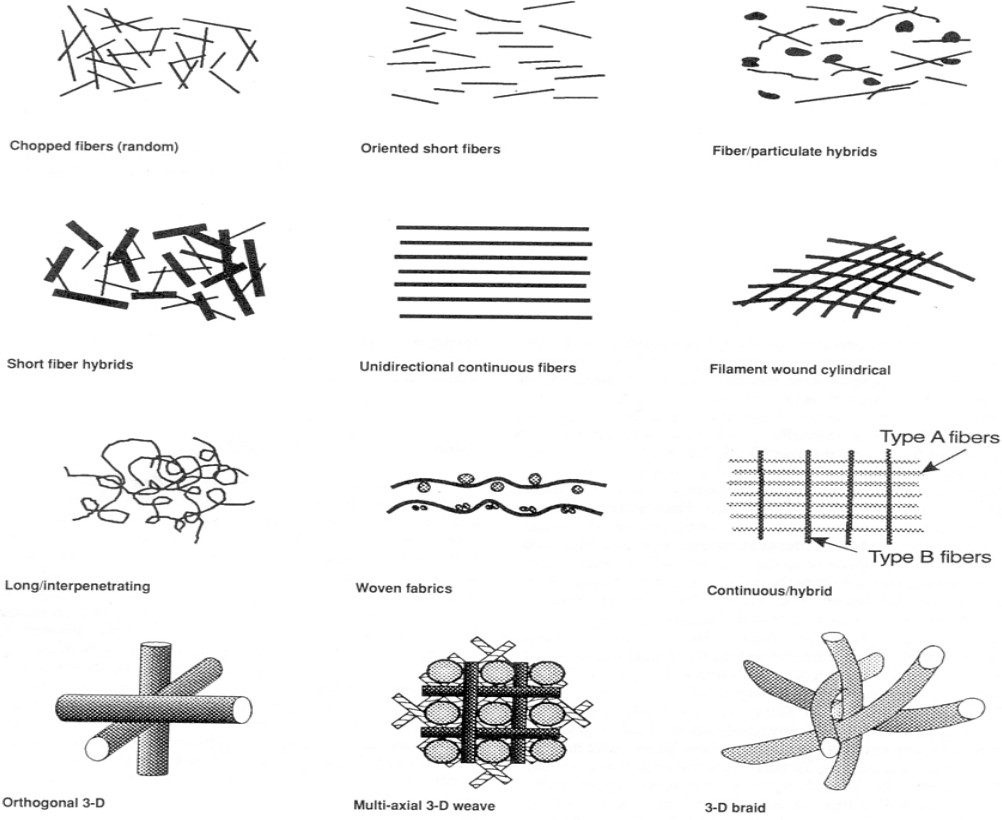
المادة المركبة : ألياف + مادة رابطة

يكون سلوك المادة المركبة متعلقاً بخصائص كل من الألياف والمادة الرابطة كما أن كمية الألياف الموجودة وطريقة توجيهها ضمن المادة المركبة ستلعبان دوراً مهماً في تحديد خصائص المادة المركبة.



الشكل (2-1) مخطط اجهاد - انفعال للمادة المركبة ولكل من الليف والمادة الرابطة

أما بنية المادة الداعمة أو الألياف فلها أيضاً أشكال مختلفة يتم اختيارها بناء على الخصائص المراد الحصول عليها. (إمكانية التحكم بالخصائص عن طريق البنية).



الشكل (3-1) أشكال لتوضع الألياف يتم اختيارها بناء على الخصائص المراد الحصول عليها

يتم غرس الألياف ضمن مادة رابطة وظيفتها :

1- تحوي الألياف.

2- تعطي الشكل المطلوب للقطعة المراد تصنيعها.

3- تحميها من العوامل الخارجية.

4- نقل الحمولة المطبقة إلى الألياف.

1-2- أهم الألياف المستخدمة في تصنيع المواد المركبة

وجدنا أن الألياف تستخدم بطرق متعددة فهي في البداية تلف على بكرات عند إنتاجها ثم يتم إنتاج الأنسجة المختلفة أو قد تقطع إلى ألياف قصيرة.

الأنواع الأساسية للألياف :

1- الألياف السيراميكية : ألياف الزجاج، الكربون،...

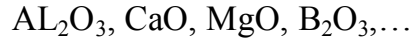
2- الألياف العضوية : ألياف الأراميد (Kevlar)، البولي أميد، ...

3- الألياف المعدنية : ألياف البور، الألمنيوم،...

أما أكثر الألياف شيوعاً :

1-2-1 - الألياف الزجاجية : الأكثر استخداماً عالمياً حيث توجد عدة أنواع منها تحضر

جميعها من خلطة زجاجية قابلة للمط وتختلف فيما بينها بنسب التركيب للإضافات
المخلوطة مع السيليس (SiO_2):



تتراوح أقطار الألياف الزجاجية المستخدمة ما بين 5 - 13 ميكرون.

أما أهم أنواع الألياف الزجاجية فهي :

نوع الألياف	مجال الاستخدام	السعر النسبي
E	استخدام عام وخاصة مع المواد الرابطة البلاستيكية : TS, TP	1
R, S	خصائص ميكانيكية وحرارية عالية حتى 250°C	5
C	خصائص كيميائية كبيرة خاصة للحموض والقلويات	2
D	كثافة منخفضة وخصائص ميكانيكية عادية لكن عازلية ثابتة للكهرباء	15

الجدول (1-3) الخواص الميكانيكية لأهم أنواع الألياف الزجاجية

1-2-2 الألياف الكربونية : تتمتع هذه الألياف بخصائص قيمها عالية جداً ودُ حُضر بدءاً من مواد

عضوية (PAN) وبطرق خاصة حيث نحصل على عدة أنواع أهمها:

1- الألياف الكربونية ذات المقاومة الميكانيكية العالية (C(HR)

2- الألياف الكربونية ذات عامل المرونة العالي (C(HM)

بشكل عام الألياف الكربونية ذات سعر مرتفع لكن تتميز بما يلي :

1- خواص ميكانيكية عالية.

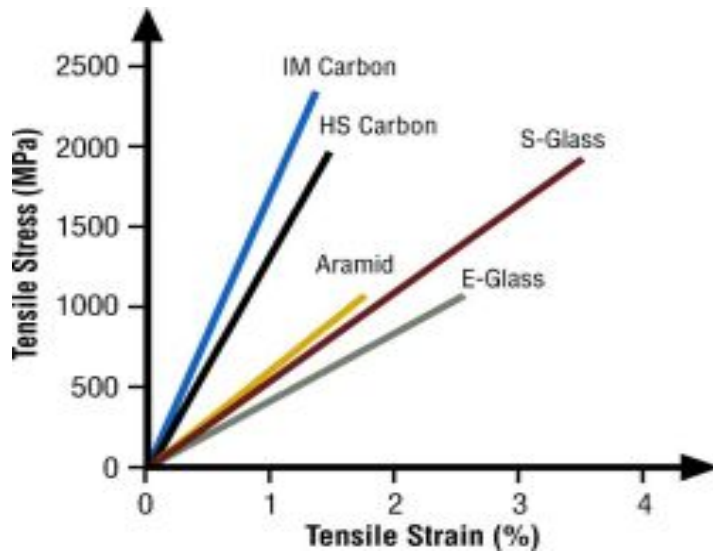
2- كثافة منخفضة.

3- مقاومة حرارية عالية (ضمن محيط غير مؤكسد).

4- إمكانية الاحتفاظ بالخصائص حتى 1500 درجة مئوية.

1-2-3 ألياف الأراميد :تحضر بدءاً من مركب عضوي عطري ينتج عن تمديد سلسلة طويلة من البولي اراميد (Polyaramide)

- أهم ما يميز هذه الألياف:
- المقاومة العالية جداً في الشد.
- مقاومة جيدة للصدم والتعب.
- وزن نوعي منخفض.
- تخميد وامتصاص ممتاز للاهتزازات.
- كلفة منخفضة مقارنة مع ألياف الكربون.



الشكل (4-1) مخطط اجهاد - انفعال لأكثر الألياف شيوعاً

1-3- المواد الرابطة :

يتم تصنيف المواد المركبة حسب المادة الرابطة المستخدمة في تحضيرها حيث تنقسم المواد الرابطة إلى ثلاثة أقسام :

1- المواد الرابطة العضوية أو البلاستيكية : المواد البلاستيكية بنوعها فبالنسبة

للمواد TP (Thermoplastic) نستخدم : PC, PP, PA, ... ,

أما المواد TS (Thermosetting) فنستخدم : PE, EP, Phenolic, ...

2- المواد الرابطة المعدنية : خلاط الألمنيوم الخفيفة، المغنيزيوم، التيتانيوم، ...

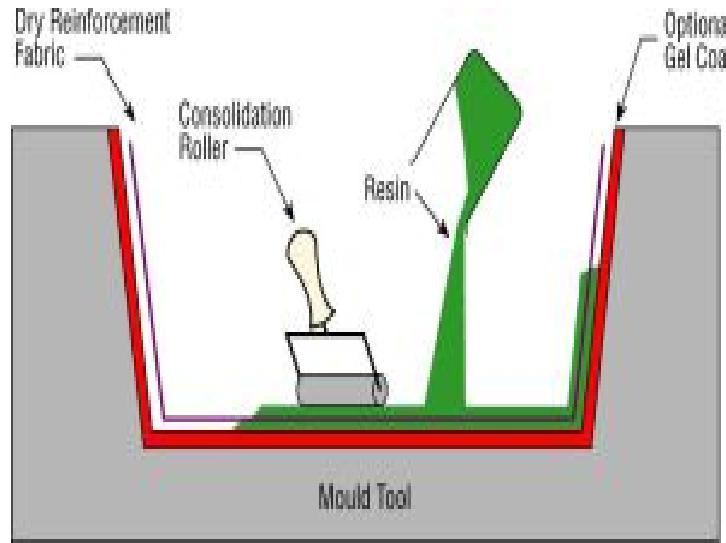
3- المواد الرابطة السيراميكية : الكربون، كربيد السيليسيوم SiC، الألومينا Al_2O_3 ،

بعض أنواع الزجاج...

1-4- طرق تصنيع بعض المواد المركبة

سوف نستعرض فقط بعض الطرق الخاصة بالمواد المركبة ذات المادة الرابطة البلاستيكية:

1-4-1- القوالب باللمس



الشكل (1-5) طريقة القوالب باللمس

المواد المكونة:

مادة الدعم: نسج ألياف زجاجية (عشوائية أو ذات تركيبة معينة) بنسبة $V_f = 30\% - 40\%$
المادة الرابطة : بولي استر بالدرجة الاولى، أو فينيل استر وأيضاً فينوليك.

طريقة التحضير

1- يطلّى القالب (الذي يصنع في أغلب الأحيان من مواد مركبة) بمادة فصل تساعد على النزع والتي تكون غالباً من الشمع.

2- بخ أو دهن طبقة من مادة خاصة تسمى (طبقة هلامية) gel-coat وظيفتها إعطاء نعومة وجمالية لسطح المادة المركبة.

3- توضع طبقة من نسيج الألياف على القالب بعد تحضيرها بما يناسب شكل القالب.

4- (وضع) طلاء طبقة من المادة الرابطة.

5- امرار رولو خاص لإزالة الفقاعات الهوائية.

6- تكرار الخطوات 3-4-5 حتى الحصول على السماكة المطلوبة.

7- الانتظار حتى تصلب المادة الرابطة.

هناك بعض المواد الرابطة التي تتصلب عند درجة حرارة الوسط المحيط وأنواع أخرى بحاجة لتيار من الهواء الساخن.

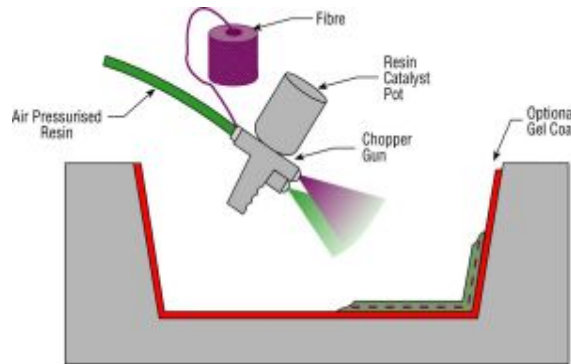
ملاحظات:

من الضروري جداً أن تتغلغل المادة الرابطة بشكل جيد ضمن المادة الداعمة بحيث يتم طرد جميع الفقاعات الهوائية. هذه الفقاعات إذا بقيت ضمن المادة فإنها قد تؤدي إلى انخفاض الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة وربما الخصائص الأخرى كالكيميائية مثلاً .
إذاً يجب أن تكون مهارة العمال في هذه الطريقة عالية لأنها تؤثر بشكل مباشر على جودة المنتج. يكون أحد طرفي المنتج الذي سنحصل عليه خشناً والآخر ناعماً لذلك يجب أخذ هذا الأمر بعين الاعتبار عند اختيار القالب.

أهم التطبيقات

- أحواض للاستخدام في الصناعات الكيميائية والغذائية.
- كبائن وهياكل الشاحنات والباصات.
- أغطية الجرارات والآلات.
- قوارب الصيد والزوارق السريعة.
- المسابح (أحواض وأغطية) زلاجات الأطفال.

1-4-2 - القولبة بالبخ



الشكل (1-6) طريقة القولبة بالبخ

المواد المكونة:

مادة الدعم: ألياف زجاجية مقصوصة بطول حتى 5 سم، بنسبة حجمية تتراوح من 25 - 30 %.

المادة الرابطة : البولي استر (PS) بشكل أساسي.

يمكن أن نعتبر هذه التقنية عبارة عن تطوير للطريقة السابقة (القولبة باللمس)

طريقة التحضير: يتم استخدام فرد خاص يقوم بقذف الألياف المقصوصة والمادة الرابطة نحو القالب

حيث يتم امراره ليمسح جميع نقاط القالب.

- يحوي هذا الفرد في داخله مقطّعا للألياف حيث أن الألياف تدخل إليه مستمرة من بكرة وتتقطع داخله وتوجه إلى فتحة الفرد.

- بنفس الوقت تضخ المادة الرابطة من خزان خاص وتوجه أيضاً للفتحة حيث يخرج كلاً من الألياف المقطعة والمادة الرابطة معاً نحو القالب.

في هذه الطريقة تلعب مهارة العامل دوراً مهماً في جودة القطعة وقد نحتاج أحياناً إلى إزالة بعض الفقاعات الهوائية.

التطبيقات:

نفس تطبيقات طريقة القولبة باللمس لكن في هذه الطريقة يمكن إنتاج القطع المعقدة وذات السطوح الكبيرة.

- في مجال صنع هياكل القوارب بالمشاركة مع القولبة باللمس.

- أحواض السباحة.

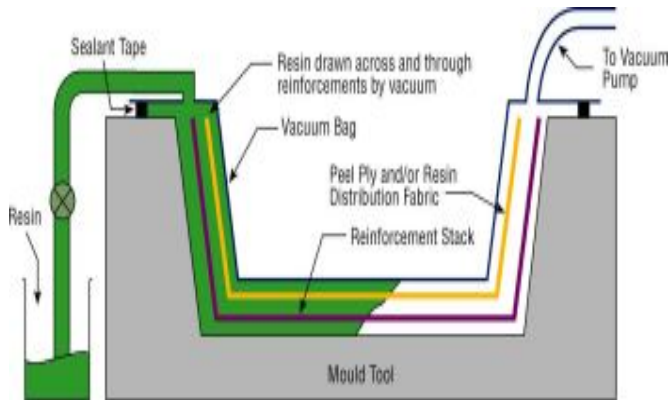
- أغطية المحركات وبعض الآلات.

1-4-3- القولبة بالتفريغ (vacuum)

في هذه الطريقة تسحب المادة الرابطة عبر الألياف وذلك بخلق ضغط منخفض (ضغط تخلخلي) بين

القالب المتماسك وغطاء القالب الخفيف والذي هو عبارة عن غشاء مرن (انظر الشكل). نحصل بهذه

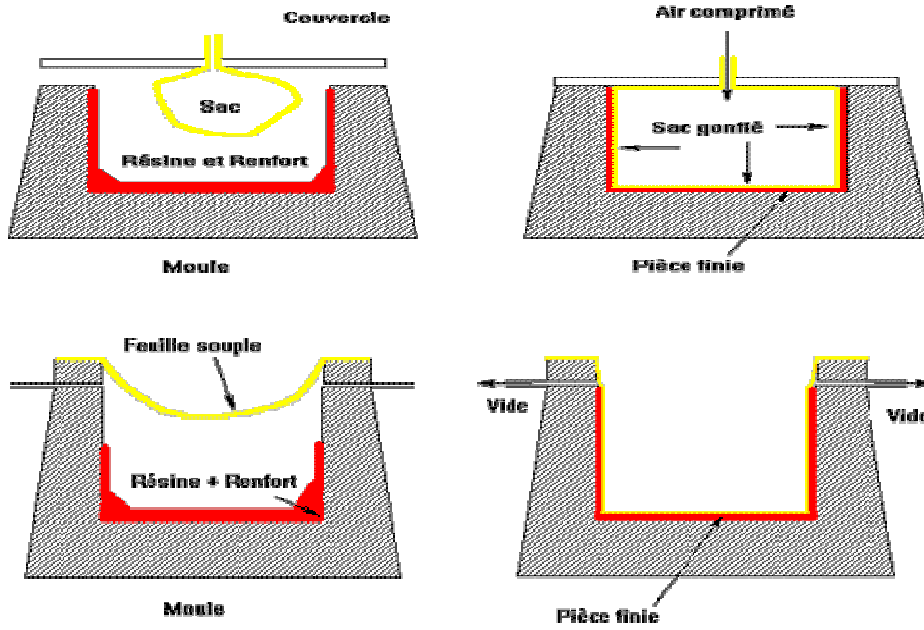
الطريقة على إزالة جيدة للفقاعات لكن يبقى الضغط منخفضاً حيث لا يتجاوز 1 / بار.



الشكل (1-7) طريقة القولبة بالتفريغ

4-4-1- القولية تحت ضغط الهواء

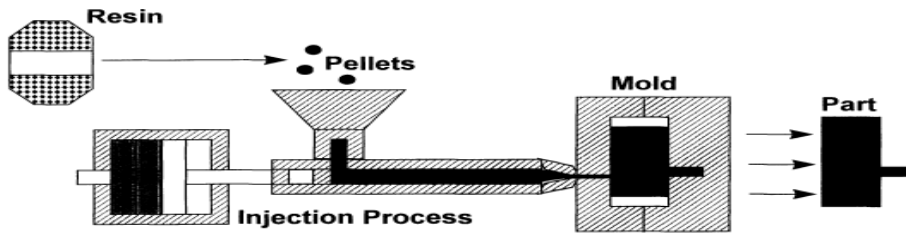
هذه الطريقة عكس الطريقة السابقة حيث يكون تغلغل المادة الرابطة ضمن الألياف إجبارياً وذلك عن طريق الضغط من الطرف الآخر للقالب الذي يكون مطاوعاً كمثال على ذلك نستخدم بالون ننفخ فيه الهواء حيث يضغط على القطعة ويتشكل شكلها مع تطبيق الضغط عليها مما يؤدي المطلوب. في هذا النوع يمكن أن يصل الضغط المطبق من /1-15 بار وبهذه الطريقة تكون عملية إزالة الفقاعات ذات فائدة أكثر من الطريقة السابقة.



الشكل (8-1) طريقة القولية تحت ضغط الهواء

5-4-1- حقن الحبيبات المدعمة:

TED PROCESS - INJECTION MOLDING



الشكل (9-1) طريقة حقن الحبيبات المدعمة

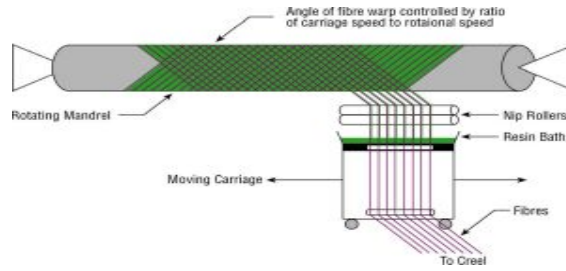
المواد المكونة:

- حبيبات مدعومة بألياف قصيرة (من 0,1-0,2 مم)
- حبيبات مدعومة بألياف طويلة (10مم)

طريقة التحضير:

يتم وضع الحبيبات المدعومة ضمن آلة الحقن حيث يتم تسخينها إلى درجة حرارة التلدين وتحقن تحت ضغط عالي ضمن قالب معدني مؤلف من جزئين يتم تبريد القالب بعد حقن المادة حتى تتصلب المادة ومن ثم يتم فتح القالب ونزع القطعة المطلوبة.

1-4-6- القولبة بلف الخيوط آلياً :



الشكل (10-1) طريقة القولبة بلف الخيوط آلياً

المواد المكونة:

- ألياف طويلة : زجاج _ كربون _ أراميد
- مادة رابطة : بولي استر - ايبوكسي

المبدأ وطريقة التحضير:

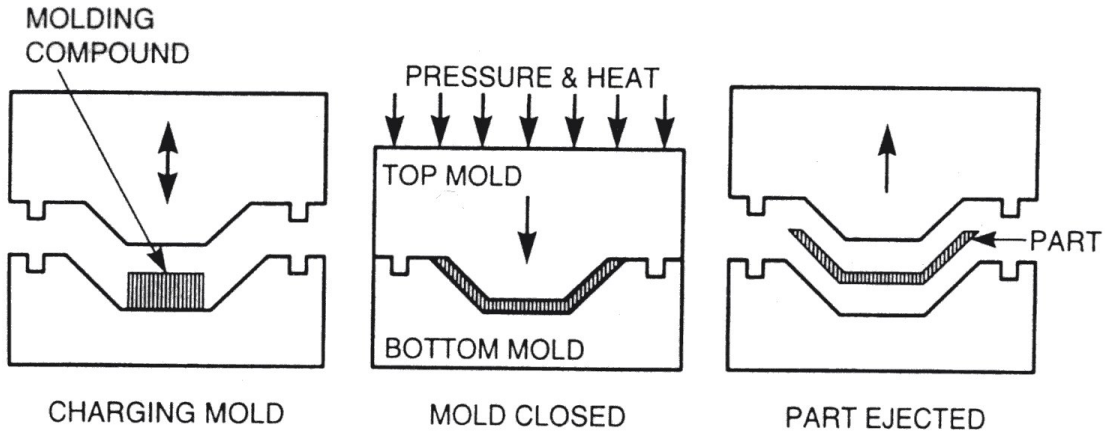
تلف الألياف على شاقة ذات شكل مطابق لشكل القطعة المطلوبة وذلك بعد تشبييع الألياف (مرورها) بالمادة الرابطة. يتم اللف وفق اتجاهات محددة مسبقاً وبعد الانتهاء من اللف توضع الشاقة مع القطعة الملفوفة للتقسية داخل الفرن مع المحافظة على دوران بطيء بنفس اتجاه لف الألياف تجنباً لعدم فك الألياف للمجموعة و لمنع سيلان المواد الرابطة. كما يمكن أن تكون التقسية في الجو المحيط.

- عملية الحصول على المنتج وإخراج الشاقة:
- الشاقة مؤلفة من عدة قطع يتم تفكيكها.
- الشاقة مصنوعة من مواد يمكن حلها في الماء (polyvinyle + رمل)
- أكياس مطاطية (نفخ).

التطبيقات:

- أنابيب مختلفة الأقطار.
- صناعات مختلفة كيميائية وبترولية.
- خزانات.
- شفرات الهيلوكبتر والمحركات الهوائية.
- اسطوانات الغاز.

1-4-7- القوالب بالضغط



الشكل (11-1) طريقة القوالب بالضغط

الفصل الثاني

الخواص الميكانيكية للمواد المركبة

تلعب نسب توزع كل من الألياف والمادة الرابطة (نسب حجمية أو كتلية) دوراً أساسياً في تحديد خصائص ومواصفات المواد المركبة.

تستخدم النسب الكتلية عند التصنيع والتحضير للمواد المركبة بينما تستخدم النسب الحجمية في الحسابات والمعادلات الرياضية المستخدمة لمعرفة سلوك المواد المركبة.

2-1- النسب الحجمية

بفرض ان V_c حجم مادة مركبة ما يتضمن هذا الحجم كلاً من

حجم الألياف V_f + حجم المادة الرابطة V_m

سنرمز إلى كل مايتعلق بالمادة المركبة بالدالة C

سنرمز إلى كل مايتعلق بالمادة الرابطة بالدالة m

سنرمز إلى كل مايتعلق بالألياف بالدالة f

بذلك تكون النسبة الحجمية للألياف V_f

$$V_f = v_f / v_c$$

وتكون النسبة الحجمية للمادة الرابطة V_m

$$V_m = v_m / v_c$$

لكن :

$$V_c = V_f + V_m$$

بتعويض ما سبق نجد:

$$V_f + V_m = 1$$

2-2- النسب الكتلية

يمكن بنفس الطريقة استنتاج

$$M_f + M_m = 1$$

$$m_f + m_m = m_c$$

حيث

$$M_f = m_f / m_c \text{ \& } M_m = m_m / m_c$$

3-2- العلاقات بين النسب الكتلية والحجمية

يمكن الربط بين النسب الكتلية والحجمية بواسطة الكتلة الحجمية ρ (الوزن النوعي) حسب العلاقات:

$$m_c = \rho_c \cdot V_c$$

$$m_f = \rho_f \cdot V_f$$

$$m_m = \rho_m \cdot V_m$$

حسب هذه العلاقات والعلاقات السابقة يمكن استنتاج

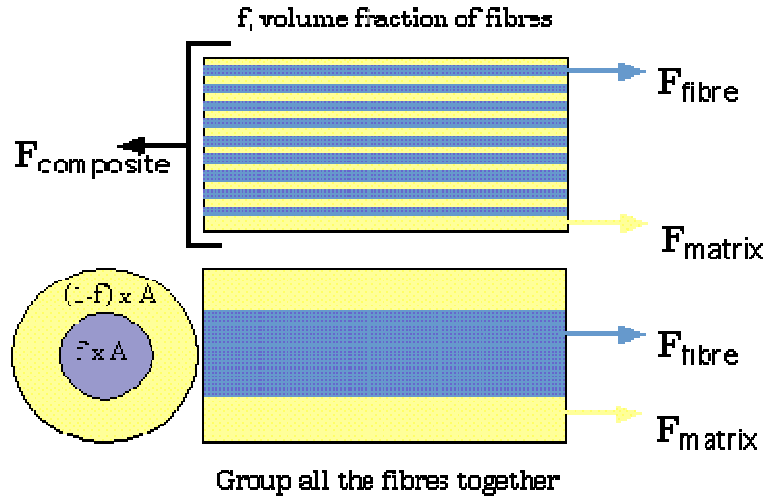
$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m (1 - V_f)$$

إذا كانت المادة المركبة مؤلفة من عدة مواد يمكن ان نكتب:

$$\rho_c = \sum \rho_i V_i$$

$$i = 1 - n \text{ حيث}$$



الشكل (1-2) توزيع الحمل الموازي لاتجاه الألياف بين الليف والمادة الرابطة

لنوجد العلاقات ما بين القيم

$$E_c, E_t, E_f, E_m, V_m, V_f.$$

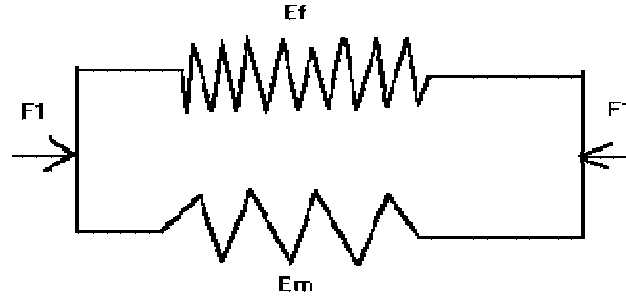
- بفرض ان :

- الاجهادات المطبقة تبقى ضمن المجال المرن الخطي.

- بفرض ان الألياف والمادة الرابطة جسماً واحداً .

نتحقق لدينا محلياً

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c$$



الشكل (2-2) توزيع الاجهاد بين الليف والمادة الرابطة

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

$$\sigma_c = F_c / A_c = E_c \varepsilon_c = E_c \varepsilon_f = E_c \varepsilon_m$$

$$\Leftrightarrow \sigma_c = E_c \sigma_f / E_f = E_c \sigma_m / E_m$$

$$F_c = F_f + F_m$$

$$F_f = E_f \varepsilon_f A_f = E_f \varepsilon_c A_f$$

$$F_m = E_m \varepsilon_m A_m = E_m \varepsilon_c A_m$$

$$F_f + F_m = \varepsilon_c (E_f A_f + E_m A_m) = F_c \quad *$$

لكن

$$\sigma_c = F_c / (A_f + A_m) = E_c \varepsilon_c$$

$$\Rightarrow F_c = E_c \varepsilon_c * (A_f + A_m) \quad **$$

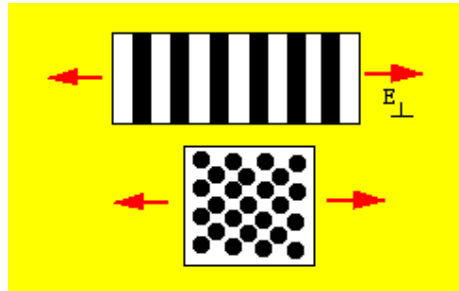
بمساواة * و ** نجد

$$E_c = E_f A_f / (A_f + A_m) + E_m A_m / (A_f + A_m)$$



$$\boxed{E_c = E_f V_f + E_m V_m}$$

- لنوجد الآن عامل الصلابة في الاتجاه العمودي على الألياف



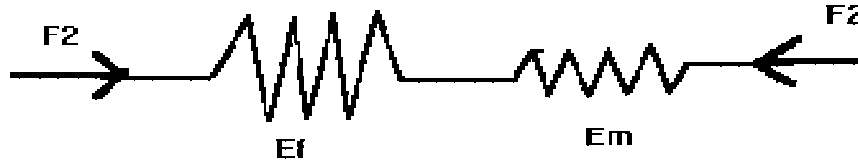
الشكل (2-3) توزع الحمل العمودي على اتجاه الألياف بين الليف والمادة الرابطة

E_t عامل يونغ للمادة المركبة في الاتجاه العمودي على محور الألياف

يمكن أن نكتب

$$\sigma_{ct} = E_{ct} \varepsilon_{ct}$$

نمثل هذه الحالة على الشكل التالي



الشكل (2-4) توزيع الانفعال بين الليف والمادة الرابطة

نفرض ان الاجهاد ثابت في المقطع العمودي للمادة أي ان

$$\sigma_{ct} = \sigma_f = \sigma_m$$

في هذه الحالة تكون الاستطالة الكلية عبارة عن مجموع الاستطالة لكل من الألياف والمادة الرابطة

$$\Delta_{ct} = \Delta_f + \Delta_m \quad \text{ومنه نكتب}$$

$$\varepsilon_{ct} = V_f \varepsilon_f + V_m \varepsilon_m$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\sigma_{ct} / E_t = (V_f \sigma_f / E_f) + (V_m \sigma_m / E_m)$$

ومنه

$$\boxed{1/E_t = (V_f / E_f) + (V_m / E_m)}$$

الفصل الثالث

أنماط الانهيار للمواد المركبة

3-1- مقدمة

تعتبر المواد المركبة مواد غير متجانسة (Heterogeneous)، تتميز بوجود أنواع متعددة من العيوب المتأصلة فيها والمسببة لنمو الشقوق وانتشارها حتى الانهيار، هذه العيوب إما ألياف مكسورة وفراغات في المادة الرابطة أو سوء توجيه الألياف أو سطوح تماس مفصولة بين المادة الرابطة والألياف الخ... إن نسبة وجود كل نوع من هذه العيوب يعتمد على عملية التصنيع المستخدمة، لذلك تبدي المواد المركبة عادة أنماط انهيار مختلفة تتضمن تشققات مجهرية في المادة الرابطة، أو انهيارات في الألياف، أو انفصالات بين الألياف والمادة الرابطة، أو انفصال الطبقات في الصفيحة متعددة الطبقات. بالإضافة إلى ذلك فإن العديد من هذه الأنماط يمكن أن تحدث في أي وقت دون سابق إنذار.

إحدى المزايا المهمة للمواد المركبة هي متانتها العالية الاستثنائية على الرغم من أنها مؤلفة من ألياف هشة ومواد رابطة ضعيفة. ويعود سبب ذلك إلى طبيعتها غير القجانسة وأسلوب تصنيعها.

بشكل عام لا يوجد تعريف واضح للمتانة ولكن يمكن اعتبارها بارامتر تصميمي يعكس استجابة المادة (الحاوية على عيوب داخلية) للجهدات المطبقة والانفعالات الناتجة عنها.

لتعيين متانة مادة والتي تعتبر مقياس لمقاومة المادة لانتشار الشق. يتم تجريباً تحديد القيمة الدنيا لمقدار الطاقة اللازمة لحدوث واحدة المساحة من سطح الانكسار. يؤدي ازدياد الطاقة السطحية لانكسار مادة إلى زيادة مقاومتها للانكسار تحت الحملات الستاتيكية أو الديناميكية وتتم هذه الزيادة في الطاقة عن طريق إعاقة انتشار الشق.

يمكن ملاحظة ظاهرة نمو الشقوق في المواد المركبة على مستويين فعلى صعيد البنية المجهرية تكون هذه الإعاقة بسبب وجود السطوح الفاصلة بين الألياف والمادة الرابطة أما على صعيد البنية المجردة فتكون بسبب وجود السطوح الفاصلة الضعيفة بين الطبقات في صفيحة متعددة الطبقات. وعليه فإن عملية الانكسار لمادة مركبة لا تضم فقط انكسار الألياف المحملة والمادة الرابطة الضعيفة، بل أيضاً مجموعة معقدة من حوادث الانهيار المجهرية والمتشعبة التي يمكن أن تحدث على طول هذه السطوح الضعيفة.

3-2-2- انتشار الشق في المواد المركبة

3-2-1- تأثير المادة الرابطة على انتشار الشق

تترواح النسبة الحجمية للألياف في المواد المركبة بين 10% وحتى 70% من أجل المواد المركبة ذات الأداء العالي، لأن تأثير مقاومة الشق التي يمكن نسبها مباشرة للمادة الرابطة قد لا تكون هامة إلا في المواد المركبة ذات النسبة الحجمية المنخفضة للألياف.

على كل حال هناك ثلاثة تأثيرات فعالة يمكن ذكرها:

1- تناقص المتانة الفعالة للمواد الرابطة المطيلية كالمعادن أو المواد اللدنة حرارياً مع وجود نسبة

حجمية مرتفعة للألياف الهشة.

2- من الممكن أن تزداد المتانة الفعالة للمواد الرابطة المرنة، ذات المتانة المنخفضة مع وجود نسبة

حجمية منخفضة للألياف لأنه في هذه الحالة نحتاج إلى تطبيق إجهادات عالية على المادة

المركبة لتوليد انتشار حدي لفتح الشق في المادة الرابطة المدعمة بالألياف.

3- من الممكن أن تزداد المتانة الفعالة للمواد الرابطة ذات المتانة المنخفضة بوجود الألياف كنتيجة

لتباطؤ سرعة الشقوق المنتشرة في جوار الألياف الداعمة.

3-2-2- تأثير الليف على انتشار الشق

يمكن لبعض أنواع الألياف كألياف الأراميد أن تصنف كألياف متينة (أي ذات متانة عالية) لأنها قادرة

على تحمل تشوهات كبيرة غير مرنة بعد حدوث الخضوع. حيث تبدي مثل هذه الألياف عادة درجة

عالية من تسامح العيوب (damage tolerance) وبالتالي يمكن القول بأنه تمتلك حزمة من هذه

الألياف طاقة انكسار عالية وجزء كبير من هذه الطاقة يمكن أن تنتقل إلى المادة المركبة الحاوية على

تلك الحزمة.

من ناحية ثانية فإن الألياف الزجاجية والكربونية وحتى ألياف البور تمتلك طاقات منخفضة من مرتبة

($10 - 100 \text{ j/m}^2$) على الرغم من مقاومة الشد والانحناء العاليتين، وأن هذه الطاقات المنخفضة لا

تؤدي إلى أية مساهمة مفيدة لطاقة انكسار المادة المركبة حتى لو انكسر الليف عدة مرات. ولكن نتيجة

لهذا التكسر المتعدد للألياف يصبح الضرر واسع الانتشار وتصبح مسارات الشق في المادة المركبة

معقدة، هذه المسارات هي التي تؤدي إلى أعمال انكسار عالية جداً وبالتالي متانة عالية للمواد المركبة.

3-2-3- تأثير السطح الفاصل بين الألياف والمادة الرابطة على انتشار الشق

تؤثر الألياف على نمو الشق في المواد المركبة ويعتمد تأثيرها على جودة اللصق مع المادة الرابطة، فإذا

كان اللصق بين الألياف والمادة الرابطة لصقاً كاملاً وقوياً فإنه يمكن للشق أن يمر من خلال الألياف

والمادة الرابطة دون أن ينتج عن انكسار الليف انكسار في المادة الرابطة وفي هذه الحالة تكون متانة

الانكسار للمادة المركبة منخفضة ويمكن تقريبها على أنها مجموع متانات المكونات المستقلة التي تحسب من قانون المزج التالي:

$$G = 2 [\gamma_f \cdot V_f + \gamma_m (1 - V_f)]$$

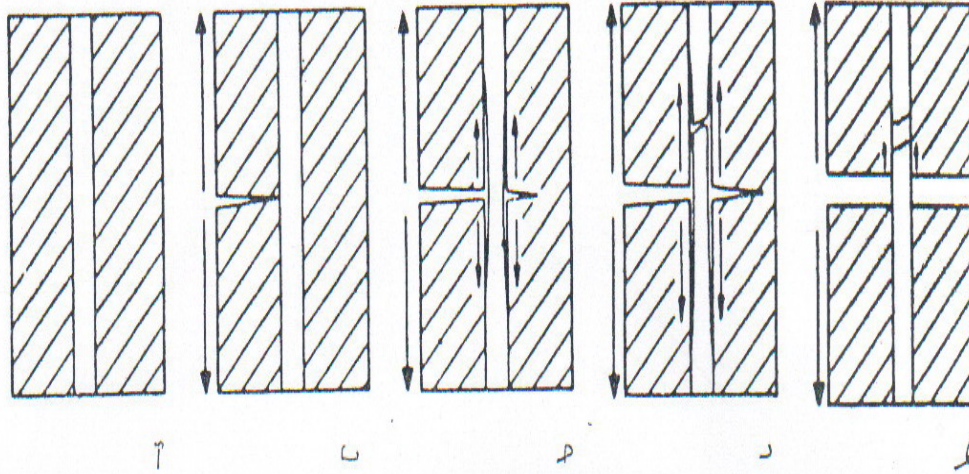
γ_f, γ_m عوامل الانكسار لكل من الليف والمادة الرابطة على التوالي.
من ناحية ثانية إذا كان اللصق ضعيفاً يصبح مسار الشق معقداً وعندها تساهم جميع آليات الانهيار المنفصلة في عمل انكسار إجمالي وفي هذه الحالة تصبح العلاقة السابقة غير قابلة للتطبيق.

3-3- اشتقاق المتانة من العمل الحقيقي للمادة المركبة

3-3-1- حالة مادة مركبة تحتوي على ليف وحيد

في التطبيقات العملية لانشاءات المواد المركبة قلما يتم الحصول على جودة لصق عالية للمنطقة الفاصلة بين الألياف والمادة الرابطة وبالتالي نادراً ما يتم حدوث انهيار هش للألياف والمادة الرابطة وبالتالي الانهيار بمتانة منخفضة للمادة المركبة. وتكون عملية انتشار الشق معقدة بسبب حدوث عدد كبير من الآليات المجهرية المختلفة.

لكي نميز بين الآليات المجهرية المنفصلة للمتانة والنتيجة عن العمل الحقيقي للمادة المركبة فإنه من المناسب فرض نموذج صناعي مؤلف من مادة رابطة مدعمة بليف وحيد ويحوي على شق ينتشر في المادة الرابطة ويقترب من الليف المعزول كما في الشكل.



الشكل (3-1) نموذج اصطناعي مؤلف من مادة رابطة مدعمة بليف وحيد

يبدأ الشق بالانتشار أولاً في المادة الرابطة ويتوقف انتشاره عند وصله إلى الليف وذلك :

1- لأن الصلابة العالية لليف تمنع انفتاح الشق في المادة الرابطة.

2- لأن مقاومة الليف العالية جداً تمنع انكسار الليف تحت تأثير الاجهاد المركز عند رأس الشق في المادة الرابطة.

فيمايلي عرض لمختلف الآليات المجهريّة التي تحدث في المواد المركبة وتساهم في زيادة المتانة:

- انفصال الليف عن المادة الرابطة

تميل كل من الألياف والمادة الرابطة عند رأس الشق إلى التشوه وبشكل مختلف كلما ازدادت الحمولة على المادة المركبة، ويبدأ ذلك بنشوء اجهاد محلي كبير نسبياً في الليف، هذا الاجهاد يؤدي إلى انفصال الليف عن المادة الرابطة.

إن اجهاد القص في المنطقة الفاصلة الناتج عن تباين عامل يونغ لكل من الألياف والمادة الرابطة يسبب امتداد في طول الانفصال على طول الليف في الاتجاهين الطولي والعرضي وبعيداً عن مستوي الشق. وهذا الانفصال يسمح بانفتاح أكبر لطول الشق في المادة الرابطة وراء الليف وتكرر العملية عند الليف التالي وهكذا.

في بعض الحالات يمكن أن يقود الانفصال إلى انحراف كبير لرأس الشق وذلك في الاتجاه الموازي للألياف مؤدياً إلى فقدان حدة الشق عندها من الممكن أن يتقدم الشق في مستويات أخرى بعيداً عن مستوي الشق الأصلي مما يؤدي إلى زيادة في تعقيد مسار الانكسار وبالتالي زيادة في متانة المادة المركبة.

- العمل الاحتكاكي بعد الانفصال

بعد حدوث الانفصال تنشأ حركة نسبية بين الليف والمادة الرابطة مع استمرار انفتاح الشق ،ويجب انجاز عمل ما يقابل المقاومة الاحتكاكية أثناء تلك الحركة ولكن من الصعب تقدير هذا العمل لعدم معرفة مقدار القوة الاحتكاكية العاملة بدقة. أحد التقديرات تفترض بأن قوة الاحتكاك في المنطقة الفاصلة تعمل على مسافة تساوي إلى امتداد طول الليف المنهار هذا العمل يساهم بشكل كبير في زيادة متانة المركبات المدعمة بالألياف الزجاجية.

- انسحاب الليف

بعد الانفصال يبقى الليف محملاً حتى انكساره على طول فعال يساوي إلى الطول المفصول ومن المحتمل أن ينكسر الليف عند أي نقطة داخل هذه المنطقة.

تتمدد النهايات المكسورة لليف وتستعيد قطرها الأصلي وتلتصق بالمادة الرابطة من جديد ولكي يسمح للشق بالانفتاح بشكل أكبر وذلك عندما يستمر التحميل فلا بد لهذه النهايات المكسورة أن تتسحب خارج المادة الرابطة ولذلك تكون سطوح الانكسار الناتجة لها مظهر فرشاة وهذا ما نميز به سطوح انهيار معظم المواد البوليمرية المدعمة بالألياف.

من المفيد هنا توضيح تأثير كل من طول الليف واتجاهه على متانة المادة المركبة. إن المواد المركبة الحاوية على ألياف قصيرة يكون عمل الانسحاب اعظماً عندما تكون ألياف التدعيم بطولها الحرج. أما إذا كانت الألياف متوضعة بزاوية بالنسبة لمستوي الشق عندها تنهار الألياف بشكل مسبق قبل انسحابها.

من الجدير بالملاحظة أن متانة المواد المركبة يجب أن تزداد دائماً بزيادة النسبة الحجمية للألياف أو بزيادة قطر الليف أو باستخدام ألياف أقوى. من ناحية أخرى وخلافاً للتوقعات فإن تحسين جودة اللصق بين الألياف والمادة الرابطة يخفض عادة من المتانة وذلك لأن اللصق الجيد يمنع حدوث انفصال الليف عن المادة الرابطة. في الخلاصة تشير معظم الدراسات إلى أن عملية الانسحاب تساهم بشكل رئيسي في خفض المتانة لأنها تمتص طاقة أكبر من تلك الممتصة في عملية الانفصال على الرغم من حدوث عملية الانفصال قبل عملية الانسحاب.

3-3-2- الانهيار في طبقة أحادية الاتجاه

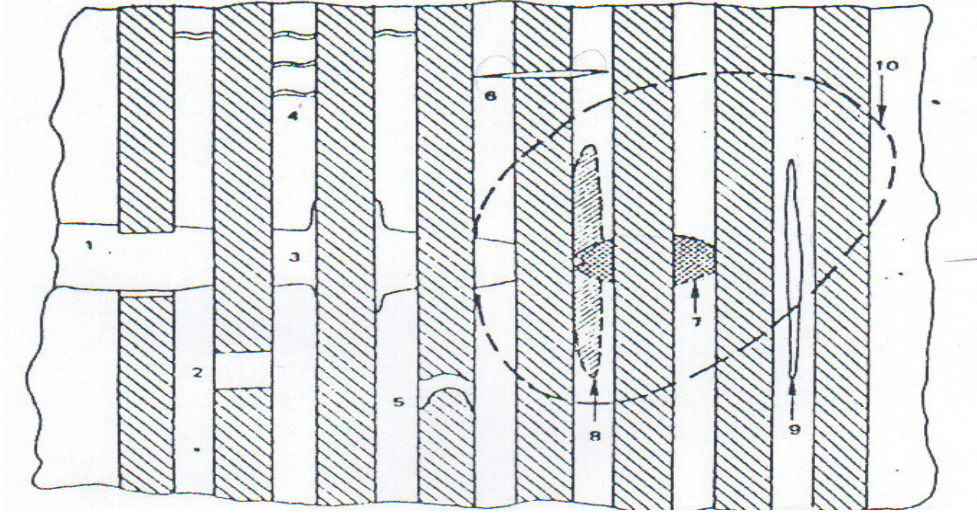
كما في المعادن يمكن افتراض أن الانهيار في المواد المركبة ينبثق من عيوب صغيرة متأصلة في المادة. هذه العيوب قد تكون ألياف مكسورة أو عيوب في المادة الرابطة أو عبارة عن انفصال عند السطح الفاصل. إن الإستخدامات الانشائية الرئيسية للمواد المركبة تكون في الغالب على شكل صفائح طبقية وانهيار مثل هذه الطبقات سيكون معقداً ويعتمد على تسلسل تكديس الطبقات، ويحدث الانهيار بشكل عام نتيجة لانتشار الشقوق في الاتجاهات الموازية والمتعامدة مع الألياف. ولسهولة توضيح المبادئ الرئيسية للانهيار سوف تقتصر الدراسة على مركبة مؤلفة من طبقة أحادية الاتجاه والانكسار على نمط الانفتاح تحت حمولة الشد الستاتيكي. في مثل هذه المواد يكون الانتشار في الاتجاه الموازي للألياف أسهل منه في الاتجاه المتعامد عليه.

يبين الشكل (3-2) أنماط الانكسار المختلفة الممكنة الحدوث في مادة مركبة نموذجية والمتمثلة بطبقة أحادية الاتجاه، وذلك تحت حمولات الشد حيث الانهيارات التي تحدث هي :

- 1- انكسار هش للألياف يليه انكسار المادة الرابطة الهشة.
- 2- انسحاب الليف عن المادة الرابطة نتيجة ضعف المنطقة الفاصلة.
- 3- تجسير الشق حيث يجتاز الشق الرئيسي الليف دون كسره.
- 4- تشققات مجهرية في الماد الرابطة من أجل المواد الرابطة الهشة.
- 5- الانهيار المطيلي لليف من أجل الألياف المطيلية.
- 6- انكسار الليف في منطقة العيب وتوزع الانفعال اللدن المترافق في المادة الرابطة.
- 7- توزع الانفعال اللدن الناتج عن مركبة الاجهاد σ_y عند رأس الشق الرئيسي.

8- توزيع انفعال القص اللدن الناتج عن مركبة الاجهاد T_{xy} .

9- ظهور شق طولي في المادة الرابطة أو في المنطقة الفاصلة الناتج عن توزيع مركبة الاجهاد σ_x .



الشكل (2-3) أنماط الانكسار الممكنة الحدوث في مادة مركبة المتمثلة بطبقة أحادية الاتجاه تحت حمولة الشد.

الفصل الرابع

بنية المادة المركبة المستخدمة (ألياف الزجاج - ايبوكسي)

تتكون المادة المركبة المستخدمة من عنصر الدعم هو ألياف الزجاج والمادة الرابطة وهي الايبوكسي لذلك سنتحدث عنهما بشئ من التفصيل.

4-1- ألياف الزجاج

4-1-1- مقدمة

قصة الزجاج قديمة، لكن تطورها العلمي الهندسي موضوع حديث. من المحتمل أن أول إنتاج للزجاج كان منذ حوالي 4000 سنة في مصر وذلك في الأفران المستخدمة لإنتاج الخزف. و أول تطبيق له كان على شكل ترصيع للمجوهرات أو كزينة مضافة للمزهريات وأوعية الشرب.

يعود استخدام الزجاج كألياف إلى القرن السابع عشر عندما استخدمها venetians لاختراع ألبسة لأغراض خاصة. على أية حال استخدام ألياف الزجاج كمادة تجارية لم تصبح حقيقة حتى عام 1939 حيث أدت جهود البحث إلى تأسيس شركة owens - coming الأمريكية لصناعة ألياف الزجاج.

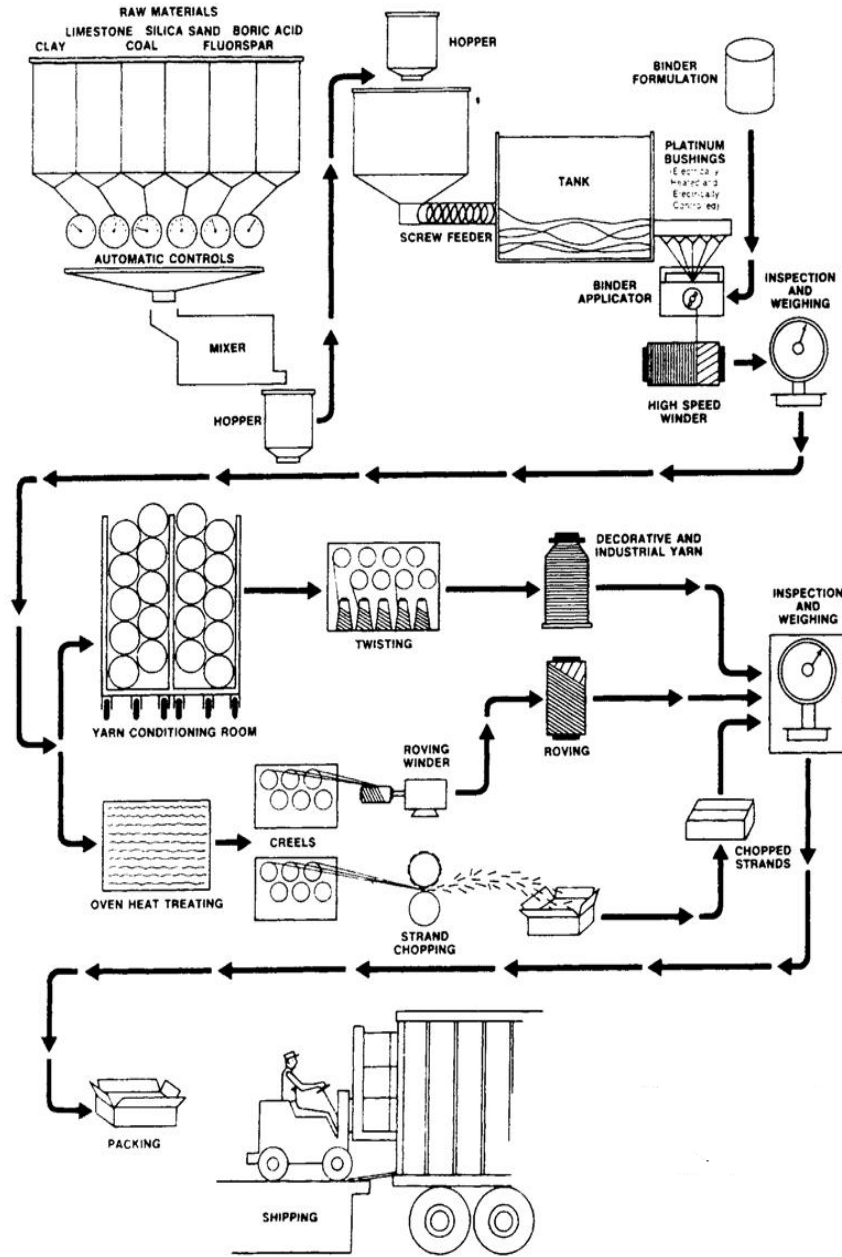
4-1-2- إنتاج ألياف الزجاج

يبدأ إنتاج ألياف الزجاج من مزج جاف للمواد التالية رمل السليكا , حجر الكلس , حمض البوريك , وعدد من منتجات أخرى مثل الطين والفحم الحجري. تذاب هذه المواد في فرن ذو مردود عالي، تعتمد درجة حرارة الذوبان على بنية الزجاج ولكنها عموماً حوالي 1260°C ومن ثم يتدفق الزجاج المصهور بشكل مباشر إلى فرن سحب الألياف في عملية تدفق مباشر للمصهور أو يتدفق إلى آلة لصنع كرات من الزجاج. هذه الكرات يمكن أن تخزن وفيما بعد يمكن إعادة صهرها وسحبها إلى ألياف.

يتم إنتاج ألياف الزجاج المستمرة عندما يتم تمرير مصهور الزجاج بتأثير الجاذبية من فتحات صغيرة كثيرة في حوض من خلاط البلاتينيوم هذه الفتحات تدعى bushing. وقطرات الزجاج المصهور التي تبتق من كل فتحة من فتحات bushin تجمع مع بعضها البعض وتمرر من خلال رذاذ ماء على سير دائري والتي تعطي طبقة حماية وتزليق تعرف باسم blinder (مادة تظلي بها السطوح غير المستقرة) أو size (مادة تسوية النفاذية). تجمع الألياف عندئذ معا في شكل ملائم لتشكل حزمة تدعى الجدلة (strand) التي تلف على قالب بمعدل تقريبا 190 km/h. هذه الحزمة من الألياف عندئذ تجفف أو تبرد فيما بعد من أجل عملية لاحقة و أخيرا تباع كخيوط مصنوعة من ألياف مستمرة.

تنتج الألياف بامرار الهواء عبر فتحات موجودة على قاعدة الـ bushing التي تسحب ألياف بطول تقريبا 20 – 40 cm من الزجاج المصهور الذي يتدفق من كل فتحة. هذه الشعيرات تجمع على اسطوانة تفريغ دوارة وترش بوساطة مادة تسوية النفاذية وتجمع على شكل أسلاك مجدولة. تبرد هذه الحزم من الشعيرات مرة أخرى أو تجفف فيما بعد لتصنيع منتج معين للاستخدام المستقبلي.

يجب أن يتم التحكم في كل ليف يسحب من فتحات الـ bushing وهكذا يتم الحصول على أبعاد وخواص الجذلات. تتجز عملية التحكم هذه عن طريق تنظيم اللزوجة، درجة الحرارة وسرعة السحب. يمكن الحصول على ألياف بأقطار مختلفة وذلك بوساطة تغيير عدد الفتحات وظروف السحب.



الشكل (1-4) مراحل إنتاج ألياف الزجاج

4-1-3- بنية الزجاج

يعرف الزجاج عادة كمادة أمورفية كونها ليست مادة صلبة ولا سائلة. يتكون الزجاج كيميائياً من عناصر مثل السليكون، البورون والفسفور والتي تحول إلى زجاج عندما يتفاعلوا مع الأوكسجين و الكبريت... الخ.

تساعد البنية الجزيئية للأوكسجين على تشكيل شبكة ثلاثية معقدة من الأوكسجين مع ذرة سيليكون متوضعة في الوسط ومرتبطة مع كل ذرة أوكسجين. يتطلب السليكون بحد ذاته درجات حرارة عالية من أجل الصهر. لذلك تضاف عناصر أخرى للمزيج من أجل تخفيض درجة الحرارة الصهر ولإنتاج لزوجة في مصهور الزجاج هذه اللزوجة تسمح بسهولة السحب.

يتم توفير عدد من مكونات الزجاج بالاعتماد على الخواص المطلوبة من الألياف الناتجة.
الزجاج A : زجاج عالي القلوية يتم تحويله إلى ألياف للاستخدام في التطبيقات التي تتطلب مقاومة كيميائية جيدة.

الزجاج E : زجاج منخفض القلوية مكون من الألومنيوم وسليكات البور. يمتلك هذا الزجاج خواص عزل كهربائية ممتازة وهي من أكثر الألياف المستخدمة في إنتاج ألياف الزجاج المنسوجة.

الزجاج C : مادة مكونة من الصوديوم والسليكات حيث تنتج ألياف تبدي مقاومة كيميائية ممتازة.

الزجاج 2-S : يتألف هذا الزجاج من المغنيزيوم وسليكات الألومنيوم وتبدي ثبات فيزيائي عالي، الألياف المنتجة من هذا الزجاج لها متانة شد محسنة 40% عن متانة الشد للزجاج E.

الزجاج D: تتألف هذه الألياف من تركيبة ذات عازلية منخفضة (ثابت العازلية 3.8 mc s^{-1}) أفضل من الزجاج E ذو العازلية (6 mc s^{-1}).

الزجاج R : له تركيبة زجاجية خاصة حيث تنتج ألياف ذات مقاومة قلوية وتستخدم في دعم الاسمنت.
4-1-4- خواص ألياف الزجاج :

تلعب بنية الزجاج الأولية الدور الأساسي في تحديد خواص ألياف الزجاج. إن استمرار الاستخدام الواسع الانتشار لألياف الزجاج في التطبيقات العديدة والمتنوعة يمكن أن يكون مرتبطاً بشكل مباشر مع خواصها الطبيعية الفريدة ومن هذه الخواص :

1- مقاومة الشد العالية : تمتلك ألياف الزجاج مقاومة شد عالية بشكل استثنائي مقارنة مع الألياف

الأخرى. مقاومتها النسبية (بالنسبة للوزن) تفوق مقاومة سلك فولاذي في بعض التطبيقات.

2- مقاومة الحرارة واللهب : باعتبار ألياف الزجاج مواد غير عضوية فإنها لا تحترق وتقاوم اللهب.

3- المقاومة الكيميائية : تمتلك ألياف الزجاج مقاومة كيميائية ممتازة لمعظم المواد الكيميائية ولا

تتأثر بالأضرار الفطرية والحشرية والبكتريا.

4- مقاومة الرطوبة : باعتبار أن ألياف الزجاج لا تمتص الماء فإنها لا تنتفخ، لا تمتد

ولا تتحل بالماء. ولهذا فإن ألياف الزجاج لا تتلف بسهولة وتستمر بالمحافظة على مقاومتها الميكانيكية في الظروف الجوية الرطبة.

5- الخواص الحرارية : بسبب القيمة المنخفضة لعامل التمدد الحراري الخطي والقيمة العالية لعامل الإصالية الحرارية تبدي ألياف الزجاج اداء ممتازاً في الظروف الحرارية.

6- الخواص الكهربائية : باعتبار أن ألياف الزجاج غير ناقلة كهربائياً فإنه الاختيار الأنسب للعزل الكهربائي.

يمكن أن يستفيد المستخدم من واحدة أو أكثر من خواص الزجاج الآتفة الذكر في تصنيع المواد المركبة المدعمة بالألياف والاستفادة من كلاً من المقاومة العالية والخواص الكهربائية الممتازة لألياف الزجاج فقد وجدت شركات صناعة هيكل الطائرة من ألياف الزجاج عنصر الدعم الممتاز.

استفادت صناعة بوردات الدارات من الخواص الحرارية وخاصة الاستقرار في الأبعاد لألياف الزجاج في تصنيع بوردات الدارات التي يمكن أن تستخدم في الظروف الجوية المتقلبة. يتم اختيار ألياف الزجاج في العديد من التطبيقات كعنصر دعم باعتباره يسمح للمادة المركبة بالمحافظة على خواصها في ظروف الرطوبة الجوية العالية. يتم اختيار ألياف الزجاج E كعنصر دعم بسبب مقاومتها الممتازة للماء. (ألياف الزجاج E تبدي فقط فقدان في الوزن 1-7% عندما تعرض للماء المغلي لمدة 60 دقيقة) مقاومة الماء هذه تساعد في المحافظة على الخصائص الفيزيائية والكهربائية للمادة المركبة عند التعرض لفترات طويلة للظروف الجوية المائية.

4-2- المادّة الرابطة (الايبوكسي) :

يعتبر الايبوكسي من أفضل المواد الرابطة للعديد من المواد المركبة، حيث تتميز ريزينات الايبوكسي

باحتوائها على زمرة الايبوكسي الفعالة  . ويعتبر الايبوكسي من المواد الرابطة الصناعية

المهمة بسبب مقاومتها الكيميائية واللصق الممتاز والخواص الفيزيائية والميكانيكية الجيدة. ويتميز

التفاعل بين الايبوكسي و مركبات تقسيته بعدم نشره لأي مواد متطايرة أو ماء.

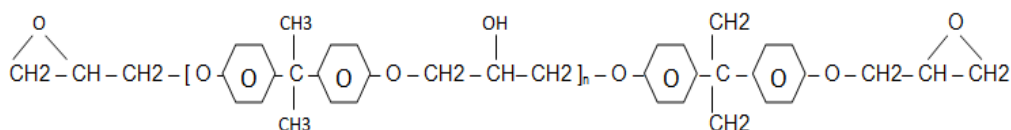
يستخدم الايبوكسي في العديد من التطبيقات منها الطلاءات السطحية، المواد اللاصقة، المواد البلاستيكية المدعمة والدارات الكهربائية المطبوعة. وتعتبر ريزينات الايبوكسي من أفضل الريزينات أداءً من بين الريزينات الموجودة في الوقت الحالي. بالإضافة إلى خواصها الميكانيكية ومقاومتها العالية تجاه العوامل الجوية.

4-2-1- التركيب الكيميائي لريزينات الايبوكسي

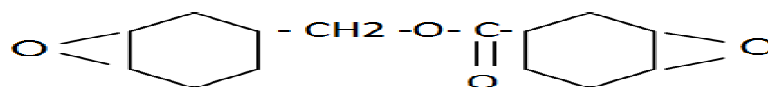
يوجد الكثير من ريزينات الايبوكسي المستعملة والمطروحة في مجال الصناعة لأمجال لحصرها نذكر

منها على سبيل المثال :

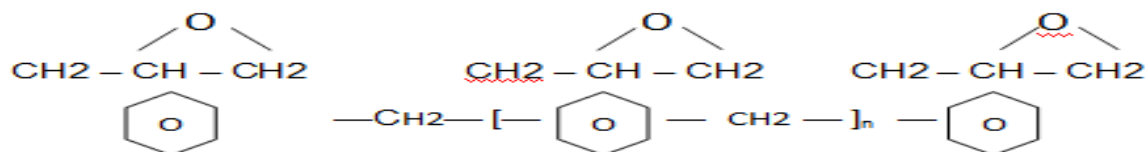
1- دي فينول A ايبوكسي كلوروهيدرين :



2- ريزينات الايبوكسي السكلوأليفاتية :



3- ريزينات الايبوكسي نوفولاك :

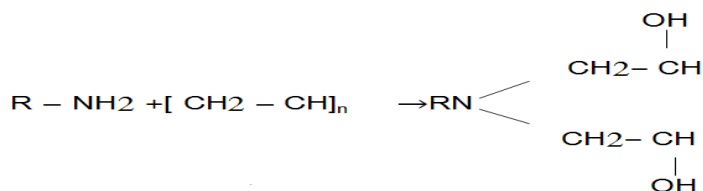


إن أهم مركبات الايبوكسي في مختلف مجالات التطبيق والأوسع انتشاراً هي تلك التي تصنع على أساس الذي فينول A وإيبى كلوروهيدرين أي النموذج (1) أعلاه. إن هذا النوع من ريزينات الايبوكسي يتواجد بحالات مختلفة تتدرج من الحالة السائلة المنخفضة اللزوجة نسبياً إلى سائل لزج ثم إلى الشكل الصلب الذي يمكن أن ينصهر برفع درجة الحرارة وذلك حسب درجة الكثافة التي تحددها نسب المواد المتفاعلة من الايبىكلوروهيدرين والبيسفينول أسيتون حسب نسب هذه المواد فإما أن ينتج جزيئات ذات أوزان جزيئية صغيرة فتكون عندها بالحالة السائلة أو ذات أوزان جزيئية كبيرة فتكون عندها بالحالة الصلبة.

4-2-2-2- كيمياء مركبات التقسية للايبوكسيدات

هناك أنواع كثيرة لمركبات التقسية نذكر منها على سبيل المثال :

- تفاعل معالجة ريزين الايبوكسي بواسطة المركبات الأمينية حيث يتم التفاعل بين زمرة الايبوكسي وزمرة الأمين وفق المعادلة التالية :



الفصل الخامس

تأثير العوامل الجوية على خواص المواد المركبة والأبحاث السابقة في هذا المجال

5-1- مقدمة :

ينبغي أن نأخذ بعين الاعتبار تأثير العوامل الجوية على المواد المركبة في المراحل الأولى من التصميم وإلا فإن تكرار التصميم والانهيار سيسبب مضيعة للوقت والمال. تختلف عادة درجة تأثير المواد المركبة لكل عامل من العوامل الجوية. فمثلا من أجل تصميم ريشة عنفة من مواد مركبة فإن درجة الحرارة والرطوبة هما من أكثر العوامل الجوية التي يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار.

تأثير هذين العاملين الجويين ستحدد بشكل منفصل. على كل حال فإن دمج تأثير هذين العاملين الجويين سيكون له تأثيرات سلبية أكثر على الخواص الميكانيكية من تأثير كل عامل على حدة. ويتغير نمط الانهيار عند درجات حرارة أعلى من أجل نفس مستوى الرطوبة. التأثيرات الأساسية للعوامل الجوية تكون على المادة الرابطة ومن المحتمل على السطح البيني في حين يكون تأثير الألياف أقل عند نفس الشروط من درجة الحرارة والرطوبة.

في الحقيقة الدور الأساسي للمادة الرابطة هو حماية الألياف من التأثيرات الجوية.

5-2- تأثير الأشعة فوق بنفسجية على المواد المركبة

الأشعة فوق البنفسجية هي أمواج كهرومغناطيسية ذات طول موجي أقصر من الضوء المرئي لكنها أطول من الأشعة السينية سميت بفوق البنفسجية لأن طول موجة اللون البنفسجي هو الأقصر بين ألوان الطيف. ومداها الموجي يبدأ من 400 نانومتر إلى 10 نانومتر، وطاقتها تبدأ من 3 eV إلى 124 eV.

وتوجد أشعة فوق البنفسجية في أشعة الشمس، وتتبعث بواسطة القوس الكهربائي أو الضوء الأسود. وبما أنها أشعة مؤينة فقد تسبب تفاعل كيميائي، وتجعل العديد من المواد متوهجة. وقد أدرك الكثير من الناس تأثير الأشعة فوق البنفسجية على الجسم مسببة حالات من ضربة شمس، ولكن طيف تلك الأشعة لها تأثيرات أخرى قد تكون مفيدة أو مضرّة لصحة البشر.

5-2-1- اكتشاف الأشعة فوق البنفسجية

تم اكتشاف الأشعة فوق البنفسجية بمشاهدة علمية بأن أملاح الفضة تصبح داكنة أكثر بعد توضعها لضوء الشمس. ففي عام 1801 لاحظ الفيزيائي الألماني يوهان ويلهلم ريتير أن أشعة غير مرئية، طول موجتها أقصر من اللون البنفسجي - التي هي نهاية الطيف المرئي -، ناجعة بشكل خاص في زيادة دكانة لون ورق الفضة المشبع بالكلوريد فقام بتسميتها "الأشعة المؤكسدة" ليشدد على تفاعلها الكيميائي ولتمييزها عن "الأشعة الحارة" التي هي بالطرف الآخر من الطيف. تم اعتماد الاسم "الأشعة الكيميائية" بعد ذلك بفترة وجيزة وبقي هذا الاسم قيد الاستعمال خلال القرن التاسع عشر. في نهاية الأمر سقط من الاستعمال التعبيران أشعة كيميائية وأشعة حارة واستعمل التعبيران الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء على التوالي. الأشعة فوق البنفسجية التي هي تحت 200 نانومتر تم اكتشافها عام 1893 بواسطة الفيزيائي الألماني فيكتور شومان.

تعود الترجمة الحرفية للكلمة إلى الأصل اللاتيني (Ultra Violet). بما أن الأشعة فوق بنفسجية هي أقصر من البنفسجية إلا أنها غير مرئية.

5-2-2- تأثير الأشعة فوق البنفسجية على المواد المركبة البوليميرية :

عند تعرض البوليمرات للعوامل الجوية مثل الحرارة والإشعاع فوق البنفسجي (UV) فإن بعض خواصها سوف يتدهور مثل حدوث تغير في اللون الذي يصبح داكناً أو حدوث تقشر وتحولها إلى حالة قصفة (brittle). ويمكن تحسين مقاومة البوليمرات لظروف الجوية وذلك بإضافة مواد ملء مختلفة مثل بعض الحشوات السيراميكية أو مواد لتعظيمها أو مواد لإمتصاص الأشعة فوق البنفسجية.

إن البوليمرات والمواد المركبة البوليميرية بصورة عامة تكون عرضة للظروف الجوية المختلفة نظراً لإستخدامها وبشكل واسع في التطبيقات الخارجية. أحد أهم هذه الظروف التي لها تأثير ضار جداً على البوليمرات والمواد المركبة البوليميرية هي الأشعة فوق البنفسجية فالبرغم من أن نسبة قليلة منها تصل إلى

سطح الكرة الأرضية والتي هي بمقدار (3 %) من الطيف الشمسي الكلي إلا إنها تمتلك طاقة كافية لتسبب كسر الروابط الموجودة في السلاسل البوليمرية وبذلك فإن هذا التأثير ينتج عنه تشقق السطح وتلاشي اللون. ولهذا السبب تستخدم مع البوليمرات مواد مثبطة لتأثير الأشعة فوق البنفسجية حيث إنها تخلق مع البوليمر عند قولبة المادة المصنوعة من البوليمر . فالطول الموجي للأشعة فوق البنفسجية الذي يتراوح ما بين 280-400 والذي هو جزء من الطيف الشمسي هو الذي يؤثر وبشكل كبير على خواص البوليمر لأن الروابط التي تربط الذرات في السلسلة البوليمرية التي لها طاقة محددة فإن الطاقة اللازمة لفك الارتباط فيما بين الذرات تقع ضمن هذا المدى من الطيف .

على الرغم من أن الأطوال الموجية المؤثرة للأشعة فوق البنفسجية تقع ما بين nm (200-400) إلا أن الجزء الأكثر فاعلية والمؤثرة على البوليمرات بصورة خاصة يقع ضمن المدى nm (290-315). حيث أن هذه الأشعة ممكن أن تقسم إلى ثلاثة أنواع :

- 1-أشعة فوق البنفسجية من نوع (UV- C) وتتراوح أطوال موجاتها ما بين (200 – 290) .
 - 2 -أشعة فوق البنفسجية من نوع (UV – B) وتتراوح أطوال موجاتها ما بين (290 – 315) .
 - 3 -أشعة فوق البنفسجية من نوع (UV – A) وتتراوح أطوال موجاتها ما بين (315 – 400) .
- الأطوال الموجية ضمن مدى (UV – A) مسؤولة عن إسمرار وتصبغ جلد الإنسان . الأطوال الموجية ضمن مدى (UV – B) تسبب معظم التحلل الضوئي الكيميائي الذي يحدث في اللدائن .بينما الأطوال الموجية ضمن مدى (UV- C) فهي تمتص من قبل طبقة الأوزون ولذلك فهي لا تصل أبداً إلى سطح الكرة الأرضية .

تتأثر البوليمرات الطبيعية منها والصناعية بالأشعة فوق البنفسجية من نوع (UV – B) حيث إن تحلل هذه المواد ومنها اللدائن المتصلدة بالحرارة واللدائن المطاوعة للحرارة والمطاطيات وكذلك مواد البناء مثل الخشب هو نتيجة لإتحاد مجموعة عوامل أدت إلى هذه النتيجة من أهم العوامل هي :أشعة (uv) ، الحرارة والرطوبة والملوثات الموجودة في الهواء .

5-2-3- ميكانيكية التكسير (Damage Mechanism)

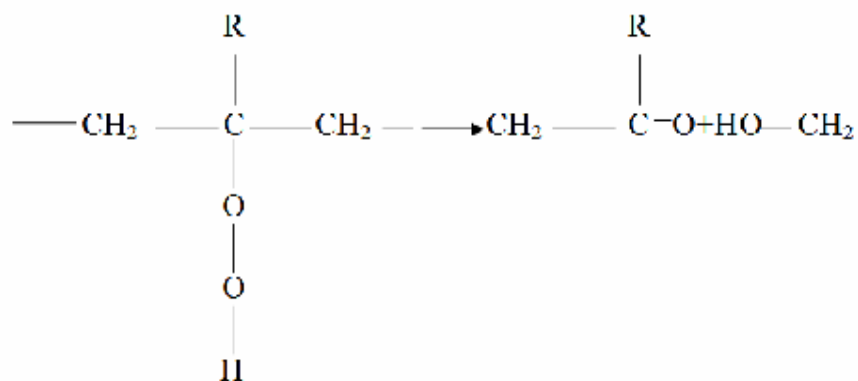
إن البوليمرات اللدنة حرارياً أكثر تأثراً بالإشعاع من البوليمرات المقساة حرارياً حيث إن أحد الأسباب التي توضح لماذا البوليمرات سريعة التأثير بالإشعاع هو بسبب بنية السلسلة الطويلة للبوليمرات . حيث إنه بسبب الوزن الجزيئي العالي للبوليمرات والذي يتضمن آلاف الوحدات من ذرات الكربون ، فإن نسبة قليلة من الإشعاع يمكن أن تحدث تأثيرات على نسبة كبيرة من الجزيئات وهكذا فإن مقداراً قليلاً من الإشعاع يمكن أن يحدث تغييراً كبيراً في معدل الوزن الجزيئي .عندما تتعرض المادة البوليمرية للإشعاع فإن تأثيره يمر بعدة مراحل لحين الوصول إلى مرحلة تدهوروا انحلال المادة . حيث يتضمن التأثير الأولي للإشعاع تهيج الإلكترونات المكونة للروابط الكيميائية، ونتيجة لذلك فإن كسراً في السلسلة الرئيسية أو السلسلة الجانبية ممكن أن يحدث .

في حالة إعادة إتحاد الروابط المكسورة فإن المادة يمكن ألا تتأثر ولكن إعادة إتحاد هذه الروابط المكسورة فيما بينها لن تدوم طويلاً حيث إنها تتحد مع روابط أخرى وبالنتيجة تؤدي إلى تكوين بنية متغيرة. الروابط المكسورة والتي إما أن تكون جذراً حراً أو أيوناً تكون جداً فعالة. بعد عملية تكوين الجذور الحرة، فإن هنالك تفاعلات مختلفة يمكن أن تحدث.

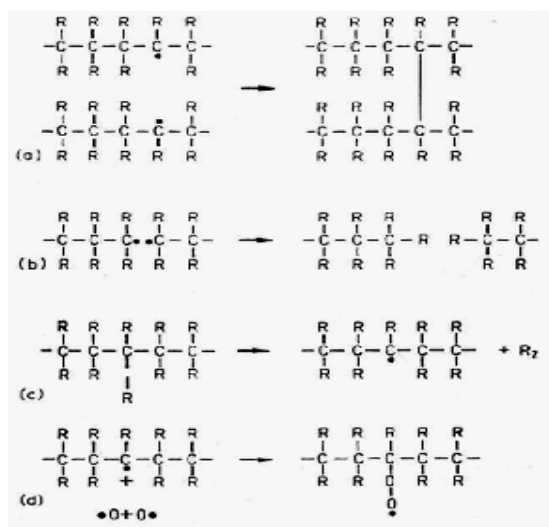
ترابط التشابك (Cross linking) والذي هو عبارة عن ارتباط جزيئتين معاً، سوف يحول المادة الصلبة من مادة مرنة (Flexible) قابلة للسحب إلى مادة أكثر هشاشة (Brittleness). من ناحية أخرى فإن انشطار السلسلة (Chain Scission) ممكن أن يحول المادة من مادة صلبة قوية إلى الحالة الشمعية (Waxy State) وأخيراً تحولها إلى سائل لزج. في أغلب البوليمرات وخصوصاً البوليمرات التي تبلرم بطريقة الجذور الحرة فإن كلا العمليتين (الترابط التشابكي وانشطار السلسلة) ممكن حدوثهما ولكن مع تغلب إحدى العمليتين على الأخرى. هنالك عملية أخرى يمكن أن تحدث عندما يتعرض البوليمر إلى الإشعاع وهي عملية تحرير الغازات (Gases Evolution). الجزيئات الجانبية (R) والموضحة في الشكل (3) تعتمد على نوع البوليمر مثال على ذلك في حالة البولي إيثيلين (PE) فإن جزيئات الجانبية هي الهيدروجين،

وفي البولي فينيل كلوريد (PVC) فإن الجزيئات الجانبية هي الكلور وهكذا. تأثير آخر لعملية وميكانيكية التحلل هو التفاعل مع أي غاز محيطي والذي بإمكانه أن ينتشر خلال البوليمر. يمثل الأوكسجين أهم العوامل الفعالة من الظروف الجوية التي يتعرض لها البوليمر. يبين الشكل (3) واحدة من سلاسل الأحداث الممكنة والتي بواسطتها يتفاعل الأوكسجين مع البوليمر المعرض للإشعاع ليكون في البداية جزيئات البيروكسيد (Peroxide) وبعد ذلك جزيئات الهيدروبيروكسيد (Hydroperoxide). في حالة وجود جزيئات الهيدروبيروكسيد عند ذرة الكربون الثالثة، فإن انشطاراً للسلسلة يمكن أن يبدأ.

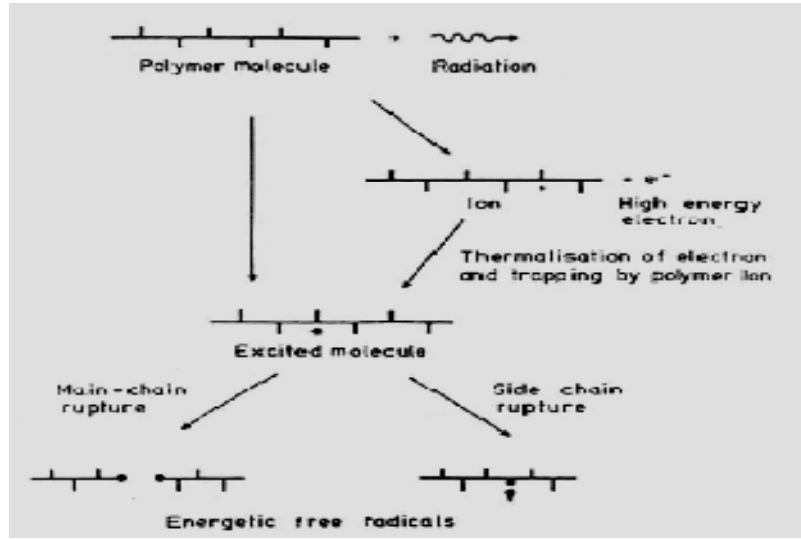
النقطة المهمة التي يجب توضيحها هو أن وجود الأوكسجين هو شرط مهم في حدوث ميكانيكية التحلل والتي لا تحدث بغياب الأوكسجين.



الشكل (5-1) صورة تخطيطية توضح انشطار السلسلة لجزيئة البوليمر خلال تكون مجموعة الهيدروبيروكسيد عند ذرة الكربون الثالثة.



الشكل (5-2) صورة تخطيطية توضح بعض التفاعلات التي من الممكن أن تحدث بعد تعرض البوليمر للإشعاع



الشكل (3-5) العمليات الأولية التي تحدث بعد التفاعل ما بين الإشعاع وجزئية البوليمر.

5-3- تأثير الرطوبة على المواد المركبة

5-3-1- امتصاص الرطوبة في المواد المركبة البوليميرية

تخضع المواد المركبة البوليميرية المعرضة للرطوبة للعديد من التغيرات الفيزيائية. أظهرت التجارب أن الحلمة والتلدن هما السببان الرئيسيان لانحيار المواد الرابطة البوليميرية وبالتالي لانحيار المواد المركبة ذات الأساس البوليميري.

قبل التعمق في دراسة عمليات الانحيار (degradation)، من المهم جداً فهم آليات الانتقال وعمليات الإنتشار في المواد المركبة البوليميرية.

تتفكك جزيئات الماء على سطح المادة البوليميرية وتنتشر خلال المادة المركبة بواسطة سلسلة من الخطوات تحت تأثير القوة الناتجة عن فرق التركيز. كلاً من قابلية الذوبان والإنتشار متضمنتان في هذه العملية.

الانتشار عملية يتم خلالها انتقال جزيئات الماء من مكان إلى آخر كنتيجة للحركة العشوائية للجزيء. تصنف سلوك الانتشار الكلاسيكي في المواد الرابطة البوليميرية كمايلي :

1- الحالة الأولى أو انتشار Fickian : معدل الانتشار أقل بكثير من معدل حركة الجزيء.

2- الحالة الثانية : معدل الانتشار أكبر بكثير من معدل حركة الجزيء، ويعتمد الانتشار بشكل

كبير على آليات الانتفاخ (swelling).

3- الانتشار non - Fickian : في هذا النوع من الانتشار يتم المقارنة بين معدل الانتشار ومعدل حركة الجزيء. يمكن أن يعتبر هذا السلوك كحالة وسطية بين نوعي الانتشار السابقين (الحالة الأولى والثانية).

في هذه الدراسة تم اعتماد سلوك امتصاص الرطوبة باستخدام نمطي الانتشار Fickian و non - Fickian.

5-3-2- انتشار Fickian الكلاسيكي :

يتصف انتشار Fickian بالسمات التالية :

1- كلا من منحنيات امتصاص ومج الرطوبة هي توابع للجذر التربيعي للزمن وخطية في المرحلة

الأولى والمنطقة الخطية تمتد على الأقل حتى $Mt / Mm = 0.6$.

حيث Mt : الرطوبة الممتصة من قبل المادة المركبة في الزمن t .

Mm : محتوى الرطوبة الأعظمي الممتصة من قبل العينة.

2- التناظر المتعاكس بين كسب الوزن للعينة الجافة في البداية وفقد الوزن للعينة المشبعة عندما

يكون معامل الانتشار ثابت.

3- ينخفض معدل الانتشار بعد الجزء الخطي حتى الوصول إلى محتوى رطوبة التوازن.

4- يطبق سلوك الامتصاص على طبقة صغيرة جداً . يتم الحصول على منحنيات الامتصاص برسم

الخط البياني لـ Mt / M_m مع $\sqrt{t/h}$ بغض النظر عن سماكة العينة.

حيث t : الزمن و h : سماكة العينة.

5- معامل الانتشار D تابع لدرجة الحرارة (كلفن) ويمكن أن يعبر عنه بالعلاقة :

$$D = D_o \exp \left(\frac{-Ea}{RT} \right)$$

Ea : طاقة التنشيط

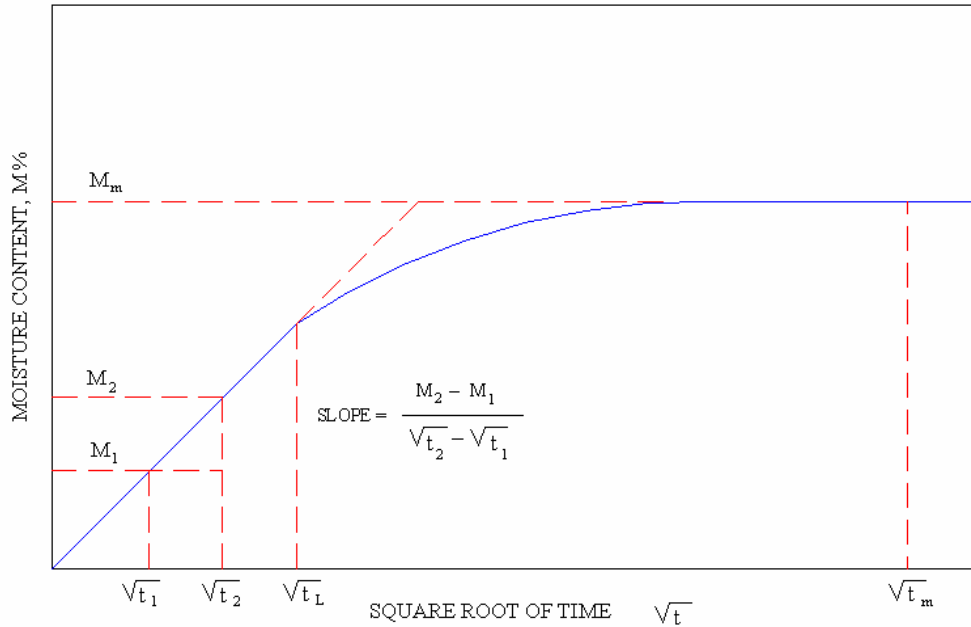
حيث D_o ثابت

K : درجة الحرارة بالكلفن

R : ثابت الغازات العام

يجب على أية حال ملاحظة أنه لا يتوافق نمط الانتشار Fickian مع جميع درجات الحرارة ومحتوى الرطوبة.

تفترض نظرية انتشار Fickian أنه يحدث خلال عملية امتصاص الرطوبة فقط التفاعلات الفيزيائية العكوسة في المادة الرابطة البوليميرية.



الشكل (4-5) منحنى الانتشار النموذجي لـ Fickian

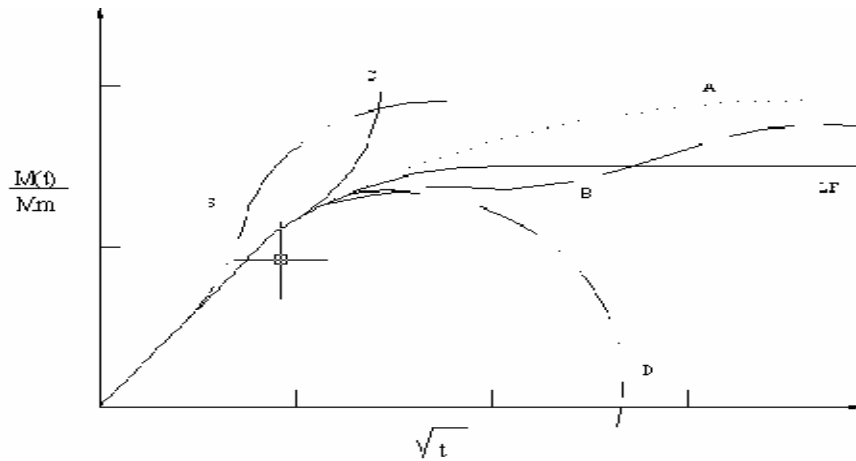
3-3-5 - انتشار Non-Fickian :

لوحظ في العديد من الحالات أن سلوك الانتشار لا يتوافق مع انتشار Fickian.

يظهر المنحنى (A) في الشكل (5-5) زيادة تدريجية في محتوى رطوبة مع محتوى رطوبة توازن لن تحقق أبداً .

يمثل المنحني (B) في الشكل (5-5) سلوك امتصاص ذو مرحلتين حيث الامتصاص الأولي سريع وتابع خطي للجذر التربيعي للزمن. بعدئذ يقترب منحنى الامتصاص من شبه التوازن ثم يقترب من التوازن الحقيقي.

يمثل المنحني (C) زيادة سريعة في محتوى الرطوبة، وتكون مصحوبة عادة بتشوهات كبيرة وانهايار ميكانيكي. وأخيراً يمثل المنحني D في الشكل (5-5) فقد الوزن الذي ينسب للانحلال الكيميائي غير القابل للعكس والفيزيائي للمادة.



- LF - Linear Fickian Diffusion
- A - Pseudo - Fickian
- B - Two-Stage Sorption
- C - Rapid Increase in Moisture Content
- D - Weight Loss attributed to Irreversible Degradation
- E - Sigmoid Behavior with Single Inflection Point

الشكل (5-5) الانحرافات عن انتشار Fickian كما يفترض من قبل weitsman

اقترحت عدد من الأساليب لوصف الانتشار non - Fickian في المواد المركبة ذات الأساس البوليميري لكن لايزال يقتصر على النظرية العامة الوحيدة للانتشار non - Fickian في المواد المركبة البوليميرية.

استخدم Roy [7] بيانات كسب الرطوبة لعينات من الايبوكسي مغمورة في محلول ملحي وذلك عند درجات حرارة مختلفة ليقدم منهجية تمكن من توصيف معاملات الانتشار Non - Fickian. معاملات الانتشار هذه يمكن أن تستخدم بعد ذلك لتوقع منحنيات تركيز الرطوبة خلال السماكة للبوليمير.

5-3-4- العوامل المؤثرة على عامل الانتشار

يمكن أن يعرف الانتشار بأنه عملية تنتقل فيها المادة من مكان إلى آخر كنتيجة للحركة العشوائية لجزيئات المادة [6]. بينما يعرف معامل الانتشار بأنه معدل انتشار الجزيئات، إعتقاداً على حجم الجزيئة، للزوجة، درجة الحرارة. إن معامل الإنتشار تابع لدرجة الحرارة ولقد تبين أنه يزداد عامل الانتشار مع زيادة درجة الحرارة ويرتبط معامل الانتشار مع درجة الحرارة وفق العلاقة التالية:

$$D = D_o \exp \left(\frac{-Ea}{RT} \right)$$

Ea : طاقة التنشيط

حيث D_o ثابت

K : درجة الحرارة بالكلفن

R : ثابت الغازات العام

هذه المعادلة عرفت من قبل Arrhenius في 1988. وبسبب كون هذه العلاقة علاقة أسية فإن أي تغير بسيط في درجة الحرارة أو طاقة التنشيط تسبب تغير كبير في معدل الانتشار.

طاقة التنشيط لعملية الانتشار تحسب بإيجاد D عند درجات حرارة مختلفة T . ويرسم المنحني اللوغاريتمي لـ D ومقلوب درجة الحرارة T وتحديد ميل الخط المستقيم الذي يمر من أغلب النقاط، هذا الميل يمثل طاقة التنشيط.

يعتمد معامل الانتشار أيضاً على تركيز الرطوبة في الجو، التركيب الكيميائي وعيوب المادة الرابطة مثل الشقوق الميكروية في المادة الرابطة، درجة التصالب (الروابط العرضية) للبوليمير. لقد برهن أنه يتعلق معدل انهيار المادة البوليميرية المعرضة للرطوبة مباشرة بمعدل امتصاص المادة البوليميرية للرطوبة. تتأثر عملية امتصاص الرطوبة بالعوامل الداخلية مثل النسبة الحجمية للألياف وتوجيه الألياف ، وبالعوامل الخارجية مثل تركيز الرطوبة ودرجة الحرارة.

لوحظ أيضاً أنه تنقص معاملات الانتشار مع زيادة النسبة الحجمية للألياف.

5-3-5- العوامل المؤثرة على محتوى رطوبة التوازن

تشير الأدلة التجريبية بأن محتوى الرطوبة الأعظمي غير حساس لدرجة الحرارة لكن يعتمد على تركيز رطوبة الجو. من أجل مادة معينة مغمورة في سائل فإن محتوى الرطوبة الأعظمي Mm ثابت [2]. يتأثر محتوى الرطوبة الأعظمي بالأضرار الموجودة في المادة المركبة وبلاستقرار الكيميائي للريزين.

5-3-6- التعتيق (Hygrothermal) للمواد المركبة :

تدهور الخواص الميكانيكية للمواد المركبة بعد التعرض لكل من الحرارة والرطوبة تسمى بـ

Hygrothermal ageing.

Hygrothermal ageing : هو مجموع التغيرات الفيزيائية والكيميائية في المواد المركبة. يمكن

أن تكون التغيرات في الخواص الميكانيكية للمواد المركبة بسبب Hygrothermal ageing عكوسة أو غير عكوسة أو كلاهما وذلك اعتماداً على زمن التعرض ودرجة الحرارة.

التأثيرات الكيميائية للرطوبة على المواد المركبة ناتجة من تفاعل جزيئات الماء مع واحدة أو أكثر من مكونات المادة الرابطة أو مع الألياف.

جزيئات الماء تحلل روابط المادة البوليميرية مؤدية إلى ذوبان جزيئات البوليمير القابل للذوبان في الماء. بالإضافة إلى أن منتجات الذوبان تتفاعل مع جزيئات البوليمير مؤدية إلى انهيار إضافي للبوليمير. بما أنه تصنع المواد المركبة من مجموعة مختلفة من الألياف مع مادة رابطة بوليميرية. فإنه يعتمد معدل التفاعلات الكيميائية مع الرطوبة على التركيب الكيميائي والفيزيائي للمواد المركبة. تتغير الخواص الميكانيكية للمادة المركبة. نتيجة. الهشّار المسببة للألياف تصدع المادة الرابطة وفصل السطح البيني بسبب التغيرات الكيميائية الناتجة عن امتصاص الرطوبة

5-3-6-1- تأثير Hygrothermal ageing على المادة الرابطة البوليميرية

تؤثر الرطوبة على المواد المركبة ذات الأساس البوليميري فيزيائياً بتلدين المادة الرابطة وبذلك تنخفض درجة حرارة تحولها الزجاجي. التغيرات المسببة نتيجة التلدين والانتفاخ عموماً تغيرات عكوسة تزال بإزالة الرطوبة الممتصة من المادة.

تتعلق ظاهرة التلدين بالزيادة في الحجم الحر للبوليمير وانهيار الروابط الهيدروجينية داخل الجزيء. درجة حرارة التحول الزجاجي T_g هو خاصية فيزيائية مهمة في البوليميرات المقساء حرارياً مثل الفينيل استر، الأيبوكسي.

تعرف درجة حرارة التحول الزجاجي بأنها درجة حرارة حرجية يتغير عندها حالة البوليمير من حالة زجاجية مرنة إلى حالة مطاطية لزجة. يكون البوليمير عند درجات الحرارة المنخفضة في حالة شبه زجاجية وتتميز بالقيم العالية لعوامل المرونة وبالسلوك المرن والحركة الوحيدة المحتملة للجزيء هي الاهتزاز حول موقع ثابت لأنه لا توجد طاقة كافية لتسهيل الدوران والانتقال ولكن عندما تزداد درجة الحرارة فإن زيادة الطاقة الحرارية تجعل الاهتزاز والانتقال والدوران ممكناً ويصبح البوليمير عندها مثل الجلد المرن ويتميز بالانخفاض الحاد في عوامل المرونة. هذه المنطقة تدعى بمنطقة التحول. بعد التحول الزجاجي تنخفض خواص المتانة والصلابة للبوليمير مقارنة مع خواص البوليمير عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة التحول الزجاجي.

يوجد تأثير فيزيائي آخر للرطوبة على المواد البوليميرية وهو توليد اجهادات داخلية بسبب تراكم جزيئات الماء في الققوق الميكروية والفراغات في المادة الرابطة البوليميرية. تسبب هذه الاجهادات الداخلية انهيارات موضعية (محلية) في المادة.

5-3-6-2- تأثير Hygrothermal ageing على الألياف

إن الألياف الزجاجية وخلافا لألياف الكربون الخاملة، عرضة للتأثر بالرطوبة والانحلال بالماء. لوحظ انخفاض المتانة في المواد المركبة ذات الأساس البوليميري والمدعمة بألياف الزجاج بسبب تطبيق الحمل لفترة زمنية طويلة وهذا الانخفاض يكون أكبر في حال الظروف الجوية الرطبة منها في حال الظروف

الجوية الجافة. التأثير الكيميائي على ألياف الزجاج يمكن أن توضح بالمعادلة التالية والتي تظهر سلسلة من التفاعلات مؤدية إلى انقسام روابط الأوكسجين - سيليكون وتحويلهم إلى Hydroxysilane.



إن التفاعل الإجمالي، الذي يحفز ذاتياً بسبب الزيادة التدريجية في مستوى الـ PH ، يسبب الانهيار وتشكيل عيوب في سطح الليف الزجاجي وتؤدي أيضاً إلى انخفاض كبير في متانة المواد المركبة المدعمة بألياف الزجاج.

تتخفض متانة الشد، الضغط والقص البيني في المواد المركبة (بوليستر - ألياف الزجاج) المعرضة لـ Hygrothermal ageing .

5-3-6-3- تأثير Hygrothermal ageing على المنطقة البينية

يعرف السطح البيني بأنها منطقة غير متجانسة تقع بين الليف والمادة الرابطة. الالتصاق بين الليف والمادة الرابطة يجب أن يكون جيداً للحصول على خواص مفيدة. لكي تحافظ المادة المركبة على خواصها لدى التعرض للرطوبة فإن السطح البيني يجب أن يقاوم الانحلال الناتج عن امتصاص الرطوبة.

5-3-7- تأثير الرطوبة على المواد المركبة :

يصل محتوى رطوبة التوازن إلى قيمة ثابتة عندما تغمر المادة بالكامل في الماء ولكن تتغير قيمتها مع الرطوبة النسبية عندما تعرض المادة لرطوبة الهواء. يمكن أن يعبر عن محتوى رطوبة التوازن لمادة معرضة للهواء الرطب بالعلاقة التالية [2]:

$$M_m = a \phi^b$$

حيث a و b ثابت و ϕ الرطوبة النسبية.

قدم Carol Williams [2] وجهة نظر شاملة عن استجابة المواد المركبة CFRP و GFRP لامتصاص الرطوبة.

قدم Wyatt و ashbee مقارنة سلوك CFRP و GFRP لدى تعرضهما للماء. يعزى الاختلاف في سلوك CFRP و GFRP إلى جاذبيتها المختلفة للماء (سطح ألياف الكربون تكره الماء (hydrophobic) بينما سطح ألياف الزجاج تحب الماء (hydrophilic)). والسطح البيني الذي يشكلانه مع المادة الرابطة [2].

ألياف الكربون غالبا ما تكون محصنة من هجوم الرطوبة عند درجات الحرارة المنخفضة وأي انهيار بالتالي يكون بسبب انهيار المادة الرابطة البوليميرية وهذا ما تم اثباته من قبل Wyatt و Ashbee. عموما تعاني المواد المركبة البوليميرية والمدعمة بألياف الكربون من فصل عند السطح البيني وذلك عند درجات حرارة أعلى من 100°C

عرض Ehrenstein و Spaude الأنواع المختلفة لألياف الزجاج لوحدها بدون مادة رابطة إلى الرطوبة وإلى العديد من الأوساط الأكالة و لاحظ وجود شقوق محورية أو حلزونية في ألياف الزجاج. لقد تبين إن الماء يسرع معدل نمو الشقوق في ألياف الزجاج ويرجع ذلك لعاملين أساسيين :

1- يخفض الماء الطاقة السطحية للألياف الزجاج مسببا انخفاض الطاقة المطلوبة لتشكيل الشق.

2- يخفض الماء الطاقة المطلوبة لكسر الرابطة Si-O بمقدار كبير وهذا يساعد في توليد الشقوق.

درس Bonniau و Bunsell سلوك الامتصاص للمواد المركبة (أيبوكسي - ألياف الزجاج) المعرضة للهواء الرطب تتراوح رطوبتها من 0-100% ودرجة حرارة من تتراوح من 23°C - 40 - 60 - 80 (90 -). ظهرت أضرار في المادة المركبة المعرضة لمستوى رطوبة نسبية 90-100% لمدة أسبوعين. شقوق ميكروية على سطح الريزين ينسب لهذا الضرر.

5-4- تأثير الحرارة على المواد المركبة

مقدمة

سلوك المواد المركبة حساس لتغير درجات الحرارة. تظهر حساسية المواد المركبة للحرارة من سببين رئيسيين.

أولاً: تتعلق استجابة المادة الرابطة للحمل المطبق عليها بدرجة الحرارة.

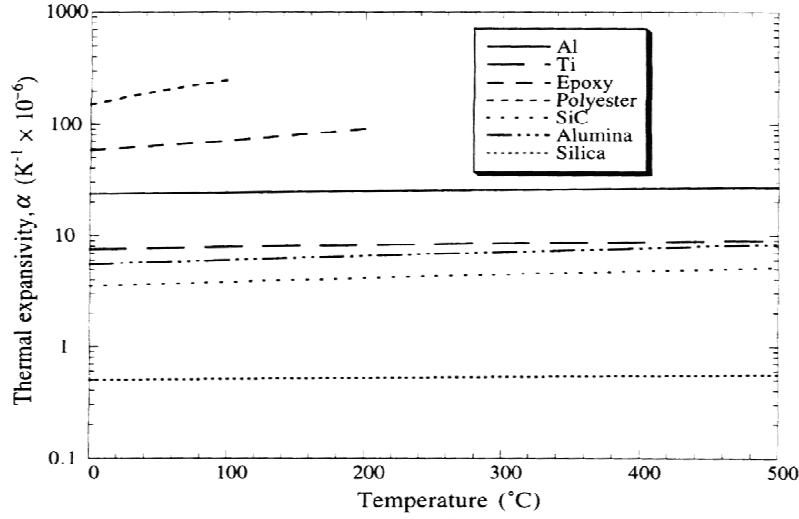
ثانياً: قد يسبب تغير درجة الحرارة إجهادات داخلية نتيجة تفاوت التمدد والتقلص بالحرارة لمكوني المادة المركبة، تؤثر هذه الإجهادات على معامل التمدد الحراري للمادة المركبة. إضافة لذلك فتوجد عادةً إجهادات عالية في المادة (في درجة حرارة المحيط) حيث تتعرض المواد للتبريد بعد عملية التصنيع، يمكن أن تؤثر حالة الإجهادات الداخلية بتغير الحرارة بشكل كبير على استجابة المادة للحمل المطبق. يتأثر سلوك الزحف (زحف المعدن) بهذه التغيرات أيضاً وبشكل خاص تحت ظروف التغير الدوري لدرجة الحرارة. أخيراً إن الناقلية الحرارية للمواد المركبة ذات أهمية كبيرة حيث تتضمن تطبيقات كثيرة بعض أنواع التدفق الحراري. يمكننا التكهن بهذه الخاصية من معرفة الناقلية الحرارية لمكونات المادة المركبة رغم أنه قد يتعقد هذا التكهن نتيجة التماس الحراري السيئ عبر سطوح تلامس مكونات المادة المركبة.

5-4-1- التمدد الحراري والإجهادات الحرارية

5-4-1-1- الإجهادات والانفعالات الحرارية

معامل التمدد الحراري (α) للمواد الحاضنة ومواد التقوية بدلالة درجة الحرارة موضحة في الشكل (5-6)، بشكل عام تتمدد البوليميرات والمعادن أكثر من السيراميك. إن الاختلاف في معامل التمدد بين المواد الحاضنة ومواد التقوية يصل لعدة مرات.

بما أنه يتضمن تصنيع المادة المركبة عملية اندماج بدرجة حرارة عالية نسبياً فإن المواد المركبة تحوي عادةً في درجات الحرارة العادية إجهادات ضغط كبيرة ناتجة عن فروقات إجهادات التقلص الحرارية.



الشكل (5-6) بيانات تجريبية من أجل معاملات التمدد الحراري للمواد الرابطة ومواد تقوية مختلفة.

إضافة لذلك إن المادة الحاضنة في المواد المركبة ذات الأساس من الريزين (الراتنج) ستتعرض للتقلص خلال المعالجة (عملية التصلب) مما يضيف المزيد إلى تفاوت التقلص.

بفرض أن المادة غير مجهددة (في درجة حرارة مرتفعة T_{esf})، يمكن اعتبار الحالة الإجهادية في درجة الحرارة الأقل ناشئة عن وضع شائبة كبيرة في داخل ثقب صغير في المادة الحاضنة.

ويكون انفعال عدم التلائم (شائبة كبيرة في ثقب صغير) الناتج عن التفاوت في الأحجام مساوياً إلى $\Delta\alpha \Delta T$ ، حيث:

$$\Delta\alpha = \alpha_m - \alpha_f \quad \text{و} \quad \Delta T = T_{esf} - T_o$$

T_o = درجة حرارة المحيط.

نستطيع في بعض الحالات حساب الحالة الإجهادية الناشئة عن عدم التلائم (التفاوت في الأحجام) بشكل تحليلي، أبسط حالة هي عندما تكون مادة التقوية عبارة عن كرة معزولة في مادة حاضنة لانهائية. إن الإجهادات في المادة الحاضنة هي نفس الإجهادات التي تسببها فقاعة كروية نصف قطرها a تحت تأثير ضغط p ،

(hydrostatic stress, σ_H of $-P$).

حل العالم Lamé (1852) مسألة الإجهادات القطرية والمماسية في المادة الحاضنة:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -Pa^3 / r^3 \\ \sigma_\theta &= Pa^3 / 2r^3 \end{aligned} \quad (5-1)$$

يمكن حساب الضغط في حبيبة كروية بسبب الإنفعالات الناتجة عن التفاوت الحجمي وعدم التلائم $\Delta\alpha$

ΔT تحليلياً (Lee 1980):

$$P = \frac{4G_m \frac{(1+\nu_m)}{3(1-\nu_m)} \frac{K_P}{K_m} \Delta\alpha\Delta T}{\frac{(1+\nu_m)}{3(1-\nu_m)} \left(\frac{K_P}{K_m} - 1 \right) + 1} \quad \dots (5-2)$$

حيث :

G: معامل القص، ν : عامل بواسون، K : معامل تغير الحجم، m, P : للحبيبية والمادة الحاضنة.

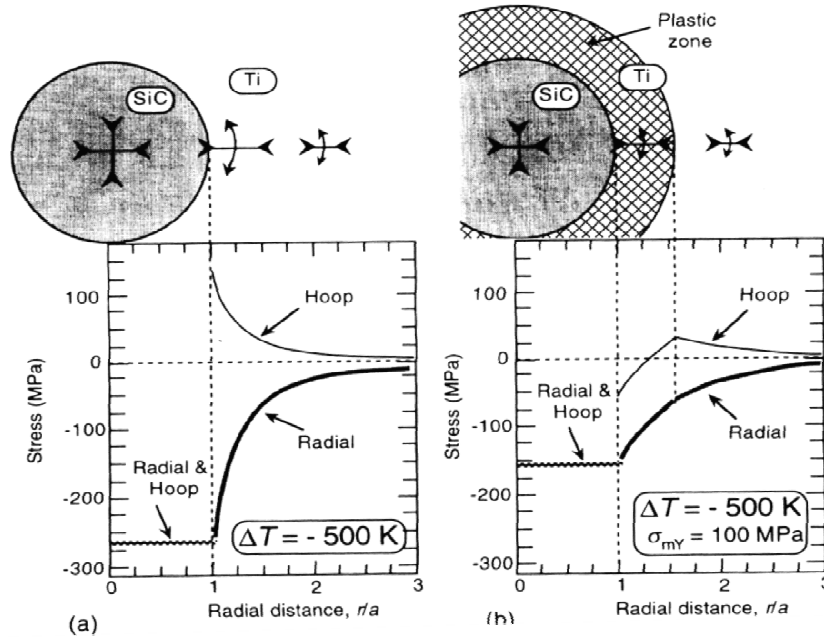
يظهر الشكل (7-5) نتيجة تطبيق هذه المعادلات على حالة كرة من SiC في مادة حاضنة من

التيتانيوم Ti بعد التبريد خلال درجة حرارة (500 k)

يبين الشكل نشوء إجهاد ضغط كبير في الاتجاه القطري، لكن الإجهاد الحلقي (المماسي) في المادة

الحاضنة هو إجهاد شد. لذلك يكون هنالك انحراف كبير (تغير شكل) لمكون الحالة الاجهادية في

المادة الحاضنة بجانب كرة SiC وقد تحدث الإجهادات خضوطاً في المادة الحاضنة.



الشكل (7-5) (a) حقل الإجهاد المرن في مادة حاضنة لانهائية من التيتانيوم متضمنة حبيبات

كروية من SiC بعد تبريد خلال 500 k. (b) : حالة إجهادية جديدة بعد انسياب موضعي لدن

بفرض إجهاد خضوع المادة الحاضنة (100 MPa) بدون إجراء تقسية .

هناك معادلات أخرى لـ Lee (1980) تنتبأ بمدى المنطقة اللدنة والتغير المرافق في توزيع الإجهادات، يظهر ذلك في الشكل (5-7) نلاحظ في الشكل أنه قد سبب الانسياب اللدن تغيرات كبيرة في توزيع الإجهادات، ومن بين ذلك انخفاض ضغط السائل الساكن الذي تتعرض له الحبيبة. بينما يؤثر وجود الحبيبات المجاورة على الوضع في مادة مركبة حقيقية، حيث غالباً تغير لدونة المادة الحاضنة حالة الإجهاد المنتبأ بها أما من أجل حالة المرونة فتبقى صحيحة ويجب دوماً أخذها بعين الاعتبار.

يمكن الحصول تحليلياً على حقل الإجهاد المرن لليف وحيد وطويل بشكل لانتهائي محاط بمادة حاضنة أسطوانية نصف قطرها منتهى، رغم أن المعادلات المستخدمة أكثر تعقيداً من الحالة السابقة. تم توضيح نتيجة تلك الدراسة في الشكل (3-7) في الفصل السابع من [3]، وذلك لمادة مركبة من ألياف الزجاج والبوليستر بعد التبريد خلال (100 k). يبرز حقل الإجهاد هذا تشابهاً مع حالة الكرة - كما هو متوقع - رغم أن الإجهادات المحورية تصبح مسيطرة على غلاف الليف. يكون حقل الإجهاد في المادة المركبة المقواة بألياف قصيرة أكثر تعقيداً وخصوصاً عندما نأخذ بعين الاعتبار أثر الألياف المجاورة، في هذه الحالة يجب اتباع طرق عديدة تتطلب جهداً حسابياً كبيراً وذلك من أجل حساب حقل الإجهاد.

نستطيع رغم ذلك أن نستنتج من المثالين السابقين البسيطين أعلاه الطبيعة العامة لتوزيع الإجهادات، كما يمكن أن نأخذ فكرة تقريبية عن كمية الإجهاد، كما يمكن أن نستخدم طريقة (إشيلبي) (الفقرة 2-6) من [3] للتنبؤ بالإجهادات المتوسطة للمادة الحاضنة بالنسبة للحجم والنتيجة عن التفاوت في التقلص الحراري.

قبل فحص كيفية تأثير الإجهادات التي تسببها الحرارة على عمليات التشوه غير المرنة، من المفيد أن نرى كيف أن الاستيعاب المرن للإنفعال الناتج عن عدم التلائم (التفاوت في الحجم) يتحكم بمعامل التمدد الحراري الإجمالي للمادة المركبة.

5-4-1-2 معامل التمدد الحراري

يسمح تحليل الإجهادات الناتجة عن التغير في درجة الحرارة بالتنبؤ بمعامل التمدد الحراري (CTE). تترافق هذه الإجهادات بإنفعالات حيث يمكن حساب أو تقدير التأثير النهائي على طول المادة المركبة. يضاف بكل بساطة التغير الإجمالي في الطول الناتج عن الإجهادات الداخلية إلى عامل التمدد الإجمالي للمادة الحاضنة ليعطي التغير الكلي في الطول وبالتالي عامل التمدد للمادة المركبة ككل، تسمح هذه النظرة المبسطة للتمدد الحراري بتوضيح بعض النقاط، فمثلاً مادة مسامية (وهي مادة ذات فراغات) لا تولد عند التسخين أية إجهادات داخلية لأن "الشوائب" معدومة الجساءة، لذلك لا يؤثر وجود المسامات (مهما كان شكلها وأبعادها وحجمها ونسبتها الحجمية) في معامل التمدد الحراري، على الرغم من أنها تنقص الجساءة بشكل كبير.

أبسط حالة لمعالجة التمدد المحوري هي المادة المركبة ذات ليف طويل، نلاحظ في الشكل (3-7) في الفصل السابع من [3] أن الإجهادات المحورية منتظمة في كلا المكونين، مما يبسط المسألة. يعطي نموذج متوازي المستطيلات (الثخين و العريض) أساساً جيداً لهذا الحساب، ولحساب معامل يونغ / الفقرة 4-1/ من [3] هناك مرحلتان للحساب يوضحهما الشكل (5-8)، أولاً، يسمح لكلا المكونين بالتمدد بحرية ثم يجبران على الاحتفاظ بالطول نفسه في الاتجاه المحوري وذلك بتطبيق إجهادات مناسبة عليهما.

يمكن اعتبار التمدد النهائي مكوناً من حدين، الأول تمدد طبيعي (عادة يعتبر تمدد المادة الحاضنة) والحد الثاني التمدد أو التقلص الإضافي الناتج عن الإجهاد الداخلي، أي :

$$\alpha_c \Delta T = \alpha_m \Delta T + \varepsilon_m \quad (5-3)$$

حيث α_c : معامل التمدد الحراري للمادة المركبة.

ε_m : الإنفعال المرن للمادة الحاضنة المصاحب للإجهاد الداخلي.

تحسب قيمة ε_m باستخدام علاقتين بسيطتين تعتمدان على (توازن الانفعال) و (توازن القوى).

توازن الانفعال: يعبر عن مجموع الانفعالات المتولدين عن الإجهادين الداخليين:

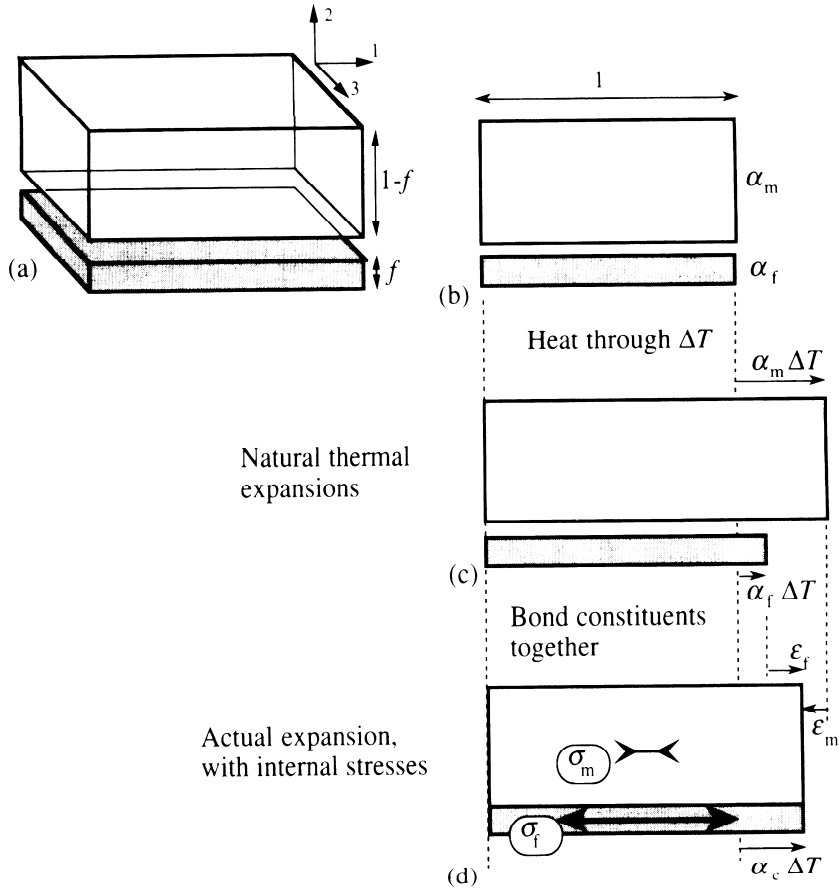
$$(\alpha_m - \alpha_f) \Delta T = \varepsilon_f - \varepsilon_m \quad \dots (5-4)$$

توازن القوى: بما أنه لا يوجد أي إجهاد مطبق لذلك يجب أن يوازن الإجهادين الداخليين بعضهما عندما

جو لان إلى قوى (مضروبة بسطوح المقاطع المناسبة لها) :

$$(1-f) \sigma_m + f \sigma_f = 0 \quad \dots (5-5)$$

$$(1-f) E_m \varepsilon_m + f E_f \varepsilon_f = 0$$



الشكل (5-8) استخدام نموذج اللوح من أجل استنتاج علاقة رياضية تعبر عن التمدد المحوري لمادة مركبة مقواة بألياف طويلة. (a) : أبعاد اللوح ، (b) : الطول البدائي باتجاه الليف ، (c) : التمددات الحرارية الطبيعية (بدون إعاقة) للمكوني المادة المركبة، (d) : الأبعاد النهائية والإجهادات الداخلية عندما يتم المحافظة على السطح البيني (سطح التلامس).

بحل المعادلتين أعلاه نجد :

$$(1-f) E_m \varepsilon_m + f E_f [\varepsilon_m + (\alpha_m - \alpha_f) \Delta T] = 0 \quad (5-6)$$

$$\varepsilon_m = [-f E_f (\alpha_m - \alpha_f) \Delta T] / [(1-f) E_m + f E_f]$$

بالتعويض في المعادلة (5-3) يمكننا الحصول على معامل التمدد الحراري المحوري للمادة المركبة:

$$\alpha_c = \alpha_m - \frac{f E_f (\alpha_m - \alpha_f)}{(1-f) E_m + f E_f} = \frac{\alpha_m (1-f) E_m + \alpha_f f E_f}{(1-f) E_m + f E_f} \dots \quad (5-7)$$

حيث أنه يمكن الوثوق بتوازن القوى المحورية في حالة نموذج متوازي المستطيلات / الفقرة 1-4 / من [3] لذلك يجب أن تكون هذه الحسابات صحيحة (هذه الحسابات غير دقيقة تماماً بسبب إهمال اختلافات تقلص معامل بواسون).

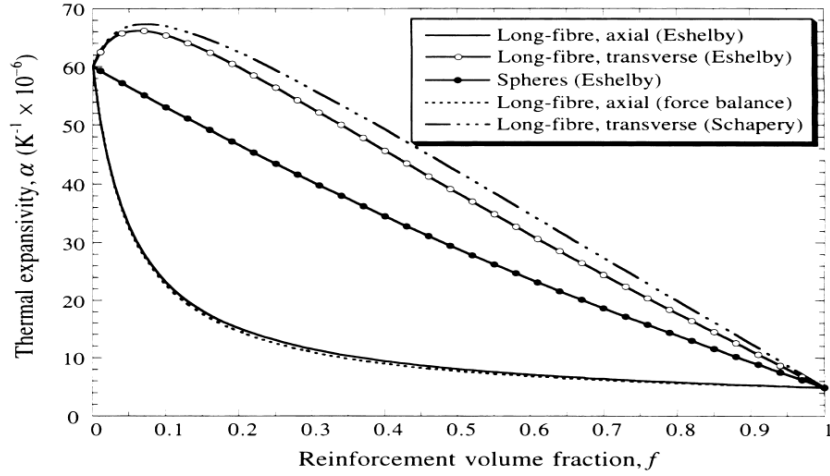
حساب معامل التمدد الحراري في الاتجاه العرضي وحساب القيمة من أجل المواد المركبة المقواة بألياف قصيرة أو بالحبيبات أمر صعب حيث تتغير الإجهادات والانفعالات بحسب الموضع.

واحد من أنجح النماذج لمعامل التمدد الحراري العرضي للليف طويل في المواد المركبة يقدمه Schapery (1968) والذي استخدم أسلوباً يعتمد على الطاقة حيث:

$$\alpha_c^{tr} = \alpha_m (1-f)(1+v_m) + \alpha_f f(1+v_f) - \alpha_c^{ax} v_{12c} \quad \dots(5-8)$$

حيث معامل التمدد الحراري المحوري α_c^{ax} معطى بالعلاقة (5-7) ويحدد معامل بواسون v_{12c} من قانون الخلط البسيط / الفقرة 4-4 / من [3].

يبين الشكل (5-9) تغير معاملي التمدد الحراري المنتبأ بهما مع النسبة الحجمية للألياف المحتواة ضمن المادة المركبة والمعبّر عنه في العلاقتين "5-7"، "5-8" من أجل المادة المركبة ذات الأساس البوليميري، كما يبين الشكل التنبؤات التي تم الحصول عليها باستخدام طريقة إيشيلبي "Eshelby" /فقرة 2-6/ من [3] حيث يكمن جوهر تلك الطريقة في حساب الحجم المتوسط للإجهادات في كلا المكونين نتيجة انفعال عدم التلائم (التفاوت في الحجم) وبذلك يمكن التنبؤ بمعامل التمدد الحراري.



الشكل (5-9) وثوقية (ثقة) التنبؤ بالتمدد الحراري لمادة الإيبوكسي بطرق متنوعة من التسليح -تبعاً لمعادلة توازن القوى حسب المعادلة (5-7) و شابري (5-8) وإيشيلبي (5-9). تم الحصول على المنحنيات باستخدام بيانات الخواص في الجداول (2-2) & (2-5) من المرجع [3]

العلاقة الناتجة هي علاقة Clyne & Withers (1993):

$$\alpha_c = \alpha_m - f \{ (C_m - C_f)[S - f(S-I)] - C_m \}^{-1} C_f (\alpha_f - \alpha_m) \quad \dots (5-9)$$

حيث الجساءة C ، ومعامل التمدد α ، كلاهما كميات، وكذلك كمية إيشيلبي S (والمعلقة بنسبة معامل أبعاد الليف Aspect ratio) وأيضا كمية التماثل I .

تبين المنحنيات في الشكل (5-9) عدة جوانب تستحق الملاحظة،

أولاً: تتوافق معادلة توازن القوى /5-7/ ومعادلة شابري / 5-8 / مع نموذج إيشيلبي مما يؤكد وثوقيتهما

ثانياً: يمكن تمثيل حالة الحبيبات الكروية بشكل جيد بواسطة قاعدة المزج -قانون الخلط- (تغير

خطي بين عوامل التمدد للمكونات).

أخيرا: يزداد عامل التمدد العرضي للمادة المركبة المقواة بليف طويل بزيادة محتوى الألياف، يحدث ذلك لأنه بتسخين المادة المركبة يجمع بشدة التمدد المحوري نتيجة وجود الألياف، ويولد الإنضغاط المحوري الناتج بالمادة الحاضنة تمدد بواسون في الاتجاه العرضي والذي هو أكثر من أن يعوض تأثير التناقص في الطريقة الطبيعية بسبب وجود الألياف (على الأقل من أجل محتوى ضئيل من الألياف).
يهتم المهندسون بمنحنيات مماثلة للشكل (5-9) ، حيث تسمح هذه المنحنيات بتفصيل معامل التمدد الحراري عن طريق انتقاء مكونات المادة المركبة ومحتوى التقوية المستخدمة فيها، لكن من المهم ملاحظة أنه تم حساب هذه القيم بافتراض السلوك المرن، تصبح الإجهادات الداخلية المصاحبة عالية وخصوصا إذا كانت التغيرات الحرارية كبيرة ، قد تتعرض المادة الحاضنة في هذه الظروف لإنسياب لدن (أو زحف)، الذي قد يعدل من تغيرات أبعاد المادة المركبة ويجعل المادة صعبة التنبؤ.

5-5- الأبحاث السابقة :

يستعرض هذا المقطع أبحاثاً أجريت من قبل العديد من باحثين عن انحلال المواد المركبة تحت تأثير العوامل الجوية.

يمكن أن تستمر المواد المركبة في الخدمة عدة سنوات قبل إكتشاف آثار الانحلال والإنهيار. على أية حال يمكن أن تتلف المواد المركبة عندما تتعرض إلى:

1- أشعة الشمس.

2- درجات الحرارة سواء العالية أو المنخفضة.

3- الغمر في ماء المحيطات.

درس عدد كبير من الباحثين تأثير العديد من العوامل الجوية على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للبوليميرات المقساء حرارياً والمدعمة بألياف الزجاج، هذه العوامل هي التعرض للأشعة فوق البنفسجية، درجات الحرارة والرطوبة.

من هذه الخواص الفيزيائية والميكانيكية :

1- مقاومة الشد.

2- التعب.

3- مقاومة الصدم.

4- زيادة الوزن.

5- درجة حرارة التحول الزجاجي.

درس Hammami في [5] الانحلال تحت تأثير العوامل الجوية للمواد المركبة ذات الأساس الفينيل

استر والمدعمة بألياف الزجاج، عندما عرضت لدرجات حرارة عالية، الرطوبة، ماء البحر والسوائل،

الغمر في السوائل الآكلة لفترات طويلة من الزمن يمكن أن يشكل فقاعات التي تكبر تحت تأثير ضغط

الانقفاخ حتى تسبب الانهيار. بدمج تأثير الماء والسوائل الآكلة فإن المادة الرابطة تتمدد ويمكن أن

يحدث النقر (pitting). غمرت عينات غير معالجة كيميائياً في البحر فلو حظ انهيارها بسهولة

مساهمة بالتالي في إضعاف أداء العينات. أيضاً تم تعريض العينات لدرجات حرارة عالية في وسط ذي

رطوبة عالية فلو حظ انحلال المادة بسبب انتشار الرطوبة خلال المادة الرابطة.

وصف Chin et al في [6] التغيرات الفيزيائية والكيميائية في المواد البوليميرية مثل الفينيل استر والمعرضة لـ UV، درجة الحرارة، لم يلاحظ تغيرات كبيرة في مقاومة الشد للفينيل استر المغمورة في الماء ولكن لاحظ أكسدة السطح. لوحظ معظم الانحلال للمادة في الأوساط القلوية. ذكر Liao في [7] أنه كلما ارتفعت درجة الحرارة وزاد زمن التعرض كلما انخفضت مقاومة الشد وعامل المرونة للمواد البلاستيكية المدعمة بألياف الزجاج المعرضة للعديد من السوائل. درس Signor في [8] الخواص الميكانيكية والكيميائية للفينيل استر بسبب التعرض للإشعاع فوق البنفسجي (UV)، في هذه الدراسة نفذ التعرض الاصطناعي لأشعة UV باستخدام حجرة كروية. حيث وجد أن الانهيار (degradation) كان مقصوراً على طبقة سطحية رقيقة، معظم الخواص الميكانيكية مثل متانة الشد والصلابة تأثرت بشكل كبير.

درس Liao في [9] التأثيرات المنفصلة والمشاركة للضوء فوق البنفسجي [UV] والصدمة الحرارية على الخواص الفيزيائية للمواد المركبة ذات الأساس البوليميري في الهواء وفي أنظمة vacuum. حيث لاحظ بأن سطح المادة المركبة المعرضة للإشعاع تأذت بشكل كبير، كذلك لاحظ زيادة انخفاض الوزن مع زيادة زمن الإشعاع، وكذلك الضرر يكون أكبر في الهواء الطلق منه في أنظمة vacuum.

القسم الثاني
الاختبارات العملية

الفصل السادس

تحضير العينات واختبارها

6-1- تحضير العينات :

يتضمن تحضير العينات الخطوات الرئيسية التالية :

1- تحضير صفائح بأبعاد 20x20 cm من المادة المراد اختبارها.

2- قص هذه الصفائح بالشكل المطلوب للحصول على عينات الاختبار.

6-1-1- تحضير الصفائح :

المواد المستخدمة لتحضير الصفائح هي :

أ- عنصر الدعم : ألياف الزجاج من النوع E ذو الخصائص التالية :

نوع الألياف الزجاجية	200 و 100 gr/ m ² ألياف نسيجية gr/m ²
الكتلة الحجمية	$\rho_f = 2.55 \text{ gr/cm}^3$
مقاومة الشد	$\sigma_t = 2400 \text{ Mpa}$
عامل يونغ	$E_f = 71 \text{ Gpa}$

الجدول (6-1) خواص ألياف الزجاج E

ب- المادة الرابطة : OREPOXY – R 8828 ذو الخصائص التالية :

TYPICAL PROPERTIES	
appearance	amber liquid
Specific gravity@ 77 F	0.95
Amine value , mg KOH / g	500
Density @ 77 F (lb/ gal)	7.9 = 0.947 gram/ cm3
flash point (closed cup) (F)	310
TYPICAL HANDLING PROPERTIES	
MIXED VISCOSITY @ 77 F (cp)	2000
gel time (150 g mix @ 77F) (MIN)	70
Thin flim set time @ 77 F (hr)	9
typical performance	
(7 day cure at 77 F)	
heat Deflection Temperature (astm D648 - 264 psi) (F)	119
Tensile Strength (psi)	6,590
Tensile modulus (thousand psi)	313
elongation (%)	2.1
flexural strength(psi)	8.85
flexural modulus(thousand psi)	251

الجدول (2-6) خواص المادة الرابطة (الايوكسي)

2-1-6- مراحل تحضير الصفائح :

تم تحضير العينات بطريقة القوالب باللمس وفق الخطوات التالية :

- 1- تجهيز لوح زجاجي بأبعاد 30x30 cm.
- 2- تجهيز لوح خشبي بأبعاد 20x20 cm.
- 3- وضع اللوح الخشبي على اللوح الزجاجي.
- 4- لصق جوان بلاستيكي على محيط اللوح الخشبي وذلك للحصول على فراغ 20x20 cm.
- 5- دهن سطح الزجاج بمادة عازلة (شحمة سلكونية).
- 6- تحضير 120 gr من المادة الرابطة وذلك من 80 gr من الايوكسي و 40 gr من المقسي (الأمين).
- 7- دهن سطح القالب بكمية من المادة الرابطة بواسطة فرشاة.
- 8- قص شرائح من ألياف الزجاج بأبعاد 20x20 cm.

9-وضع طبقة من ألياف الزجاج فوق المادة الرابطة ومرار رولو خاصة فوق طبقة الألياف حتى يتم إشباعها بالمادة الرابطة.

10- تكرار الخطوتين 7-9 حتى الحصول على لوح من المادة المركبة بأبعاد 20x20 cm بالسماكة المطلوبة وذلك بنسب حجمية مختلفة للألياف وذلك حسب الترتيب التالي :

النسبة الحجمية للألياف	حجم المادة المركبة (cm ³)	حجم الأيوكسي (cm ³)	حجم الألياف (cm ³)	وزن المادة المركبة (gr)	وزن الأيوكسي (gr)	وزن الألياف (gr)	مساحة الطبقة	عدد طبقة الألياف	النسبة الوزنية للألياف
0.039628	158.333	152.059	6.274	160	144	16	0.04	2	10/100
0.084956	147.712	135.163	12.549	160	128	32	0.04	4	20/100
0.137306	137.091	118.268	18.823	160	112	48	0.04	6	30/100
0.198449	126.470	101.372	25.098	160	96	64	0.04	8	40/100

الجدول (3-6) نسب ألياف الزجاج غراماج 200

ألياف التي استخدمت في هذه الصفائح هي ألياف غراماج 200

النسبة الحجمية للألياف	حجم المادة المركبة (cm ³)	حجم الأيوكسي (cm ³)	حجم الألياف (cm ³)	وزن المادة المركبة (gr)	وزن الأيوكسي (gr)	وزن الألياف (gr)	عدد طبقة	النسبة الوزنية للألياف
0.362829205	198.872	126.715	72.156	304	120	184	46	60/100

الجدول (4-6) نسب ألياف الزجاج غراماج 100

ألياف التي استخدمت في هذه الصفائح هي ألياف غراماج 100

3-1-6- قص الصفائح : تم قص الصفائح على فارزة CNC للحصول على شكل المطلوب للعينات.

2-6- اختبارات المواد المركبة

1-2-6 - اختبار الشد

يعتبر هذا الاختبار من أشهر وأعم أنواع الاختبارات الميكانيكية لكون نتائجه تعطي صورة تكاد تكون كافية لتقييم المادة المختبرة.

1-2-6- 1 - الغاية من التجربة

تحديد مقاومة الشد لعينات من المواد المركبة ضمن شروط الاختبار المذكورة.

6-2-1-2- وصف الاختبار

يتم إخضاع العينة في هذا الاختبار إلى حمولة شد ستاتيكية أحادية المحور ثم ملاحظة سلوك العينة حتى الإنهيار.

يتم الحصول على النتائج من مخطط الاجهاد - الانفعال الذي يعطيه جهاز الاختبار حيث نحصل من المخطط على قيمة اجهاد الشد الاعظمي σ_{max} ويتم قياس الانفعال من المسافة التي ينتقلها الفك المتحرك.

6-2-1-3- التجهيزات

1- آلة اختبار الشد :

مزودة بـ أ - لوحة مفاتيح لادخال المعلومات والشروط الابتدائية

ب- شاشة لاطهار المعلومات والنتائج والمخططات

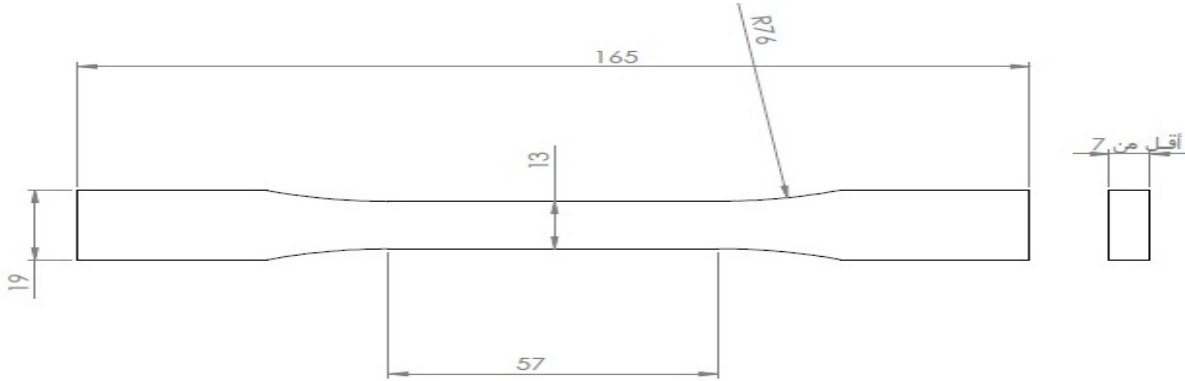
ج - طابعة لطباعة هذه النتائج والمخططات

2- فكوك ذات سطوح احتكاك لمنع الانزلاق بين العينة وسطح الفك

6-2-1-4 - عينة الاختبار :

تحضر عينة اختبار الشد وفق الشكل والابعاد التي تعطيها المواصفة

Designation: D 638 –Standard Test Method forTensile Properties of Plastics1 Type I



الأبعاد بـ mm

الشكل (1-6) عينة الشد

6-2-1-5- تحديد الشروط البدائية

يجب أن يتم تحديد :

1- سماكة العينة الفعلية.

2- عرض العينة الفعلي.

3- الطول الفعال للعينة.

4- سرعة الفك المتحرك.

6-2-1-6- تطبيق شروط الاختبار

بعد التأكد من كل المعطيات يتم تشغيل الجهاز ومراقبة سلوك العينة ومراقبة مخطط الاجهاد -الانفعال على شاشة الاظهار.

6-2-1-7- القياس وتدوين النتائج

في كل طريقة اختبار يتم اختيار عدد من العينات ويتم حساب القيمة الوسطية للخواص المقاسة حسب العلاقة :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

n : عدد العينات المختبرة



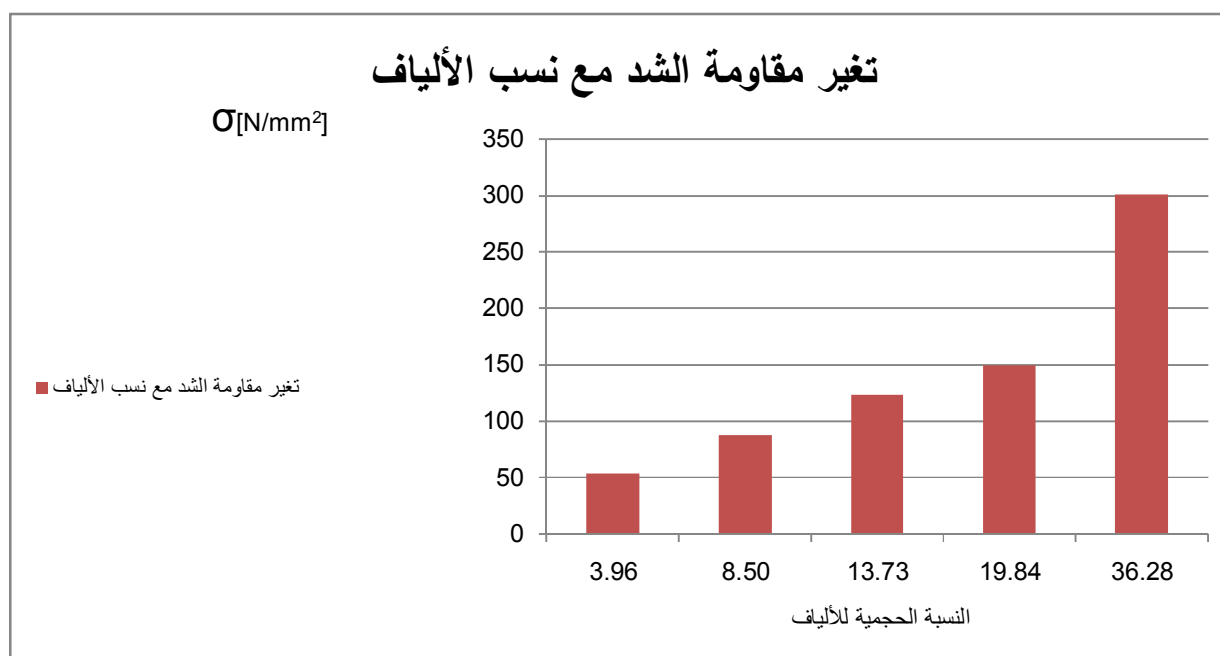
الشكل (2-6) جهاز الشد

رقم العينة	القوة [N]	عرض العينة [mm]	سمانة العينة [mm]	النسبة الحجمية للألياف %	الاجهاد [N/mm ²]	متوسط الاجهاد [N/mm ²]
G2-1	3490	13.04	5.09	3.9628	52.58114672	
G2-2	2871	13.04	5.09	3.9628	43.25514964	53.67094
G2-3	4326	13.04	5.09	3.9628	65.17651596	
G4-1	5638	13.04	5.09	8.4956	84.94341124	
G4-2	5911	13.04	5.02	8.4956	90.29831594	88.06524
G4-3	5823	13.04	5.02	8.4956	88.95399995	
G6-1	7929	13.04	5	13.7306	121.6104294	
G6-2	7916	13.04	5.03	13.7306	120.6869214	123.3274
G6-3	8375	13.04	5.03	13.7306	127.6848114	
G8-1	10315	13.04	5.03	19.8449	157.2619498	
G8-2	8659	13.04	5.03	19.8449	132.0146605	149.9185
G8-3	10526	13.04	5.03	19.8449	160.4788447	

الجدول (5-6) زيادة مقاومة الشد بزيادة النسبة الحجمية للألياف

رقم العينة	عرض العينة [mm]	سمانة العينة [mm]	القوة [N]	الاجهاد [N/mm ²]	متوسط قيمة الاجهاد [N/mm ²]
1	13.04	5	19690.4	302	
2	13.04	5.18	20274.592	300	301
3	13.04	5.03	19742.9512	301	

الجدول (6-6) نتائج اختبار الشد للعينات الأساس دون التعرض لأي عامل عند نسبة حجمية للألياف (36.2829205)



الشكل (3-6) تغير مقاومة الشد مع نسب الألياف

6-2-2 - اختبار الصدم الديناميكي

تختلف الخواص الميكانيكية للمواد المعرضة لتأثير الحمولات المطبقة باختلاف سرعة التحميل. الفارق الاساسي بين الحمولات الستاتيكية والديناميكية هو فترة تطبيق هذه الحمولات (معدلات التحميل) ففي الحمولات الستاتيكية تكون معدلات التحميل منخفضة أي التحميل بطيء جداً ، بينما في الاجهادات الديناميكية فإن معدلات التحميل تكون عالية أي التحميل سريعاً .

نتيجة الفرق في معدلات التحميل بين الحمولات الستاتيكية والحمولات الديناميكية فإن هناك إختلاف واضح في الخواص الميكانيكية التي تبديها المواد لنوعي التحميل. إن معظم حالات التحميل العملية هي ديناميكية وبالتالي الاجهادات التي تتعرض لها الإنشاءات هي اجهادات متغيرة وقد يكون تغير الاجهاد في حدود ضيقة وقد يكون التغير مفاجئاً أيضاً بحيث يصبح هو السبب الرئيسي في الكسر والإنهيار وعليه فإن اختبار الصدم هو أفضل تمثيل لظروف الاستخدام العملية من حالات التحميل الستاتيكية في بعض التطبيقات.

6-2-2-1- الغاية من التجربة

التعرف على أحد اختبارات الصدم القياسية الذي يتم على عينات من مواد بابعاد وأشكال معينة لتعيين متانة أو عامل الصدم.

6-2-2-2- أنواع اختبارات الصدم :

1- اختبار تشاربي.

2- اختبار آيزود

6-2-2-3- العوامل المؤثرة على عامل الصدم

1- سرعة الصدم.

2- نوع المادة المختبرة.

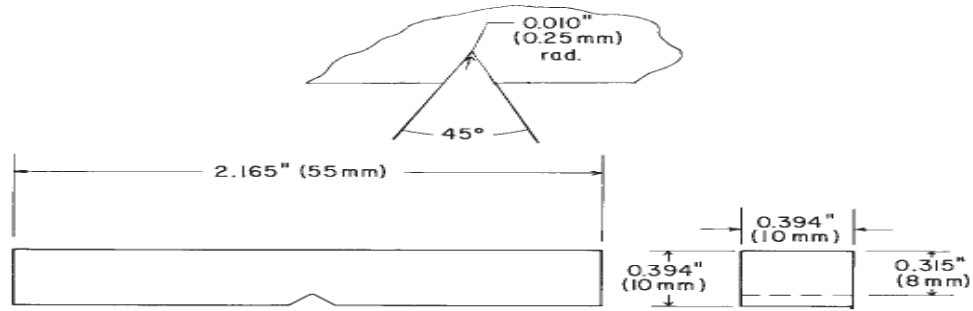
3- حجم وأبعاد العينة.

6-2-2-4 - عينة الاختبار :

تحضر عينة اختبار الصدم وفق الشكل والابعاد التي تعطيها المواصفة

A 327 – 91 (Reapproved 1997)

Standard Test Methods for Impact Testing of Cast Irons



NOTE—Permissible variations shall be as follows:

Adjacent sides shall be at	90° ± 10 min
Cross section dimensions	±0.001 in.
Length of specimen, L	±0, -0.100 in.
Angle of notch	±1°
Radius of notch	±0.001 in.
Dimension to bottom of notch	±0.001 in.
Distance to notch, ½	±0.040 in.

الشكل (4-6) عينة الصدم

تم اختيار اختبار تشاربي وذلك بناءً على جهاز الاختبار المتوفرة في مخبر خواص المواد في جامعة حلب.

2-2-6-5 اختبار تشاربي :

يتم تعيين العمل اللازم لكسر عينة قياسية محزوزة نتيجة الصدم. يهتم اختبار تشاربي بالنقاط التالية :

1- نتائج الكسر : في حال انفصال العينة عن بعضها انفصلاً تاماً وسطح العينة خشن فالعينة

تكون قصفة وفي حال كسر العينة كسر جزئي فإن العينة تكون مطيلية.

2- العمل المبذول لكسر العينة ويظهر مباشرة على العداد أو يمكن حسابه عن طريق الطاقة

الكامنة النهائية ناقص الطاقة الكامنة الابتدائية.

3- عامل الصدم : وهو عبارة عن العمل المبذول لكسر العينة مقسوم على سطح مقطع العينة عند

الصدم

$$\alpha = \frac{A_R}{A}$$

2-2-6-6 آلة تشاربي :

تتألف بنية الآلة من:

- حاملين صلبين وعند أسفل الحاملين يوجد مسند ذو فكيين ثابتين ملحوم مع الحاملين وتوضع

عليهما العينة.

- محوريين متمفصلين مع بعضهما البعض أحدهما ثابت والآخر متحرك.

- حامل المطرقة.
- دولاب لتدوير المطرقة.
- عتلة تستخدم كمحدد لزاوية السقوط.
- ذراع التعشيق.
- جهاز رقمي يعطي الفرق بين الطاقة الكامنة قبل وبعد الصدم.
- كابح يدوي لإيقاف المطرقة.

6-2-2 - 7- مواصفات آلة الاختبار:

- 1- كتلة المطرقة 22 kg
- 2- المسافة بين مركز المطرقة ومحور الدوران $L = 0.8612 \text{ m}$
- 3- زاوية السقوط $\beta = 129.76^\circ$
- 4- ارتفاع السقوط $H = L (1 - \cos \beta) = 1.412 \text{ m}$
- 5- سرعة المطرقة عند الصدم $V = \sqrt{2gh}$
- 6- الطاقة الكامنة الابتدائية [J] $A = 292.1$
- 7- المسافة بين الفكيين $X = 40 \pm 0.5$

6-2-2 - 8- طريقة الاختبار

- 1- الضغط على الزر set في الجهاز الرقمي والمطرقة في وضعية الشاقول.
- 2- تعشيق المحوريين المتمفصلين بوساطة ذراع التعشيق.
- 3- وضع العينة على المسند في وضع يكون فيه حز العينة مقابلة لنقطة الصدم على المطرقة.
- 4- تدوير الدولاب من أجل وضع المطرقة في وضعية زاوية السقوط $\beta = 129.76^\circ$
- 5- فك تعشيق المحوريين المتمفصلين بوساطة ذراع التعشيق.
- 6- تحرير المطرقة بوساطة عتلة تحديد زاوية السقوط.
- 7- محاولة إيقاف المطرقة بوساطة الكابح اليدوي.
- 8- قراءة القيمة على الجهاز الرقمي والتي تمثل العمل اللازم للكسر.

رقم العينة	عرض [mm]	سمائة [mm]	طاقة الصدم (J)	عامل الصدم (KJ/mm^2)	متوسط عامل الصدم (KJ/mm^2)
0-1	10.25	4.55	6	128.6518	
0-2	10.25	4.4	6.1	135.255	129.4058673
0-3	10.5	4.75	6.2	124.3108	

الجدول (7-6) نتائج اختبار الصدم للعينات الأساس دون التعرض لأي عامل



الشكل (5-6) جهاز اختبار الصدم

6-3- اختبار التعرض لأشعة UV

نتيجة استخدام المواد المركبة في التطبيقات الخارجية فإنها تكون معرضة لعوامل جوية مسببة تدهور خواص المادة المركبة، من أحد هذه العوامل الجوية هي أشعة UV. تستخدم المواصفة القياسية ASTM D 5208 -91 لتقييم سلوك هذه المواد المعرضة لأشعة UV المولدة صناعياً. الاجراءات الموصفة في هذه المواصفة تحاكي التعرض لأشعة الشمس. بما أن توزيع طاقة الطيف spectral power distribution لمصابيح UV لا تتطابق تماماً مع تلك لأشعة الشمس، وبما أن البارامترات الأخرى من حرارة و رطوبة لا تمثل حالة جوية معينة فإن النتائج التي يتم الحصول عليها لا تتطابق تماماً مع النتائج التي يتم الحصول عليها نتيجة التعرض للعوامل الجوية الخارجية.

6-3-1- الأجهزة المستخدمة

- 1- لمبة UV هذه اللمبة يجب أن تكون من النوع UV A – 340nm ولكن بسبب عدم توفرها في السوق المحلية تم الاستعاضة عنها بلمبة UV C.
- 2- سخان كهربائي لتوليد الحرارة اللازمة للاختبار وهي $50 \pm 2^\circ$.
- 3- مروحة كهربائية للحصول على تجانس في درجة حرارة حجرة الاختبار.
- 4- حجرة الاختبار وهي عبارة عن صندوق خشبي بأبعاد 50x25cm وارتفاع 20 cm .



الشكل (6-6) حجرة اختبار UV

6-3-2- عينات الاختبار :

عينات الاختبار المستخدمة هي عبارة عن عينات اختبار الشد والصدم الموضحين سابقاً

6-3-3- شروط الاختبار

- يجب تعريض كل أسطح العينة لأشعة UV، حيث يؤدي عدم تعرض أي جزء من العينة لأشعة UV إلى الحصول على نتائج خاطئة باعتبار أن بعض أجزاء العينة تتعرض لأشعة UV بينما أجزاء أخرى تتعرض للحرارة فقط لذلك يجب قلب العينات أثناء الاختبار خلال فترات منتظمة. حيث تم قلب العينة كل 24 ساعة.
- يبرمج الجهاز لإنجاز واحد من إجراءات الاختبار التالية:
 - 1- الإجراء A : 20 ساعة تعرض لأشعة UV عند درجة حرارة 50°C متبوعة بأربع ساعات تكثيف (إبقاء في حجرة الاختبار بدون أشعة) عند درجة حرارة 40°C .
 - 2- الإجراء B : 4 ساعات تعرض لأشعة UV عند درجة حرارة 50°C متبوعة بأربع ساعات تكثيف عند درجة حرارة 40°C .
 - 3- الإجراء C : 24 ساعة تعرض لأشعة UV عند درجة حرارة 50°C .
- تم اتباع الإجراء C في اختبارنا والفترة الزمنية المرجعية إسبوع حيث تم إختبار أربع دفعات من العينات خلال أربعة أسابيع وذلك حسب المواصفة G 53-96.
- تم تشغيل الجهاز بشكل مستمر، لإخراج دفعات من العينات المختبرة خلال فترات زمنية مرجعية (إسبوع) محددة في المواصفة G53-96 .

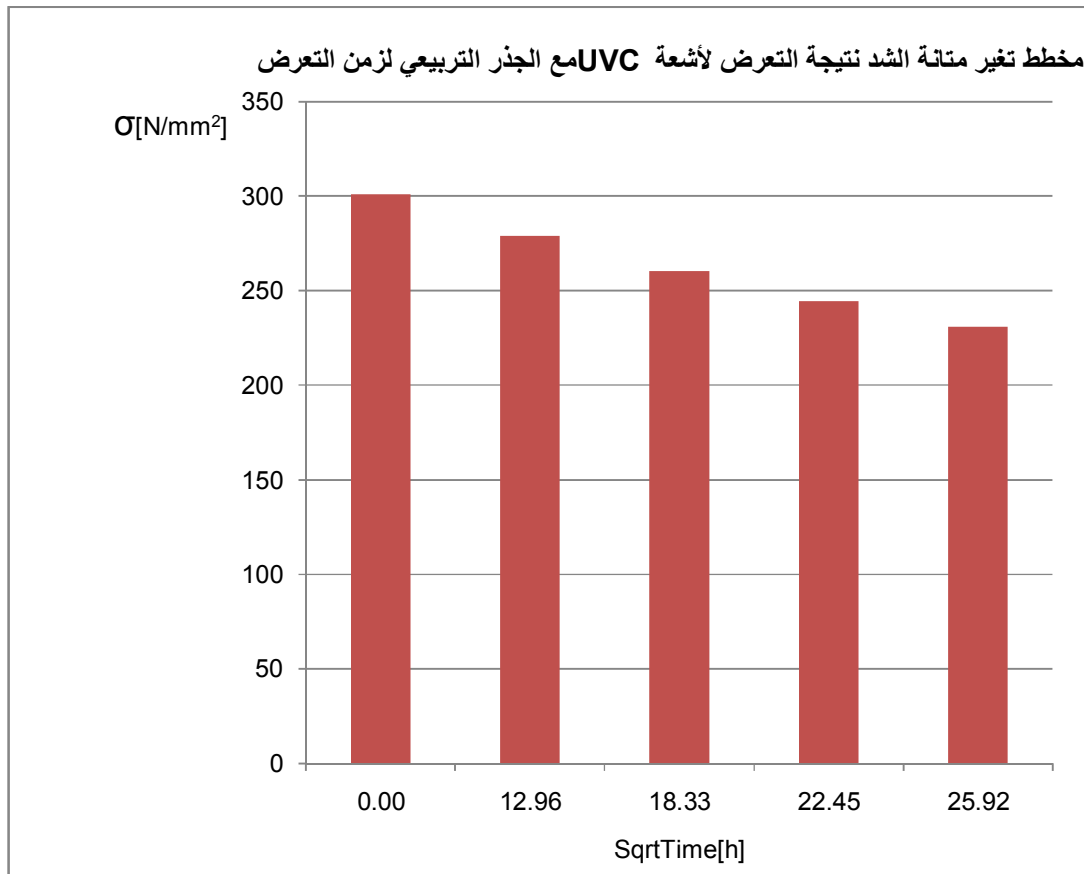
- Standard practice for *

Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) and Condensation Apparatus for
Exposure of Photodegradable plastic

4-3-6- نتائج اختبار الشد نتيجة التعرض لأشعة UV C.

رقم العينة	مدة التعرض [h]	القوة [N]	عرض العينة [mm]	سماعة العينة [mm]	الاجهاد [N/mm ²]	متوسط الاجهاد [N/mm ²]
uv1-1	168	17909	13.04	5	274.6779141	278.9622
uv1-2	168	18390	13.04	5	282.0552147	
uv1-3	168	18266	13.04	5	280.1533742	
uv2-1	336	17169	13.04	5	263.3282209	260.7385
uv2-2	336	16969	13.04	5.03	258.7084853	
uv2-3	336	17269	13.04	5.09	260.1787458	
uv3-1	504	15958	13.04	5	244.7546012	244.8043
uv3-2	504	16047	13.04	5	246.1196319	
uv3-3	504	15974	13.04	5.03	243.5387674	
uv4-1	672	15036	13.04	5	230.6134969	230.9612
uv4-2	672	15089	13.04	5.03	230.0461037	
uv4-3	672	15141	13.04	5	232.2239264	

الجدول (8-6) نتائج اختبار الشد نتيجة التعرض لأشعة UV C

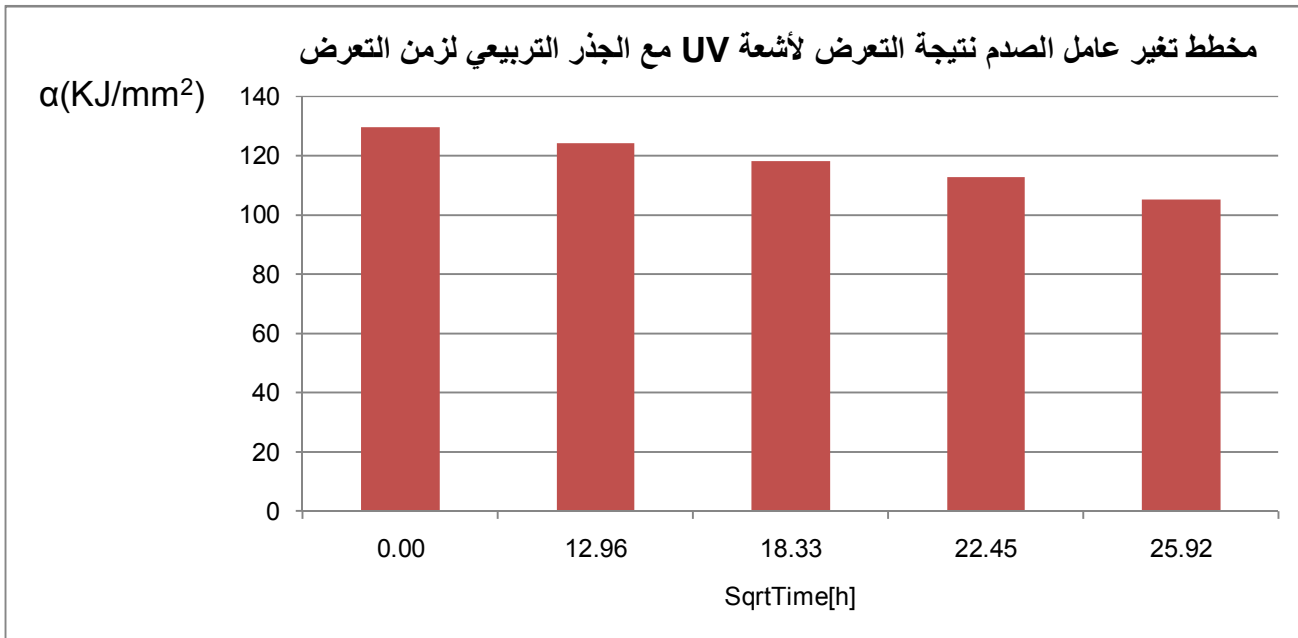


الشكل (7-6) تغير مقاومة الشد نتيجة التعرض لأشعة UV مع الجذر التربيعي لزمان التعرض

5-3-6- نتائج اختبار الصدم نتيجة التعرض لأشعة UV C.

متوسط عامل الصدم (KJ/mm ²)	عامل الصدم [KJ/mm ²]	طاقة الصدم [J]	مدة التعرض (أيام)	سماعة [mm]	عرض [mm]	رقم العينة
124.0875	114.7699	5.8	7	4.59	11.01	UV(1-1)
	114.1355	6.2	7	4.82	11.27	UV(1-2)
	143.3572	7.7	7	4.8	11.19	UV(1-3)
118.0666	112.3806	6	21	4.75	11.24	UV(2-1)
	134.6672	7	14	4.6	11.3	UV(2-2)
	107.1519	5.9	14	4.83	11.4	UV(2-3)
112.5155	112.3806	6	14	4.75	11.24	UV(3-1)
	106.719	5.4	21	4.6	11	UV(3-2)
	118.447	5.4	21	4.7	9.7	UV(3-3)
105.002	108.625	5.4	28	4.85	10.25	UV(4-1)
	100.561	5.6	28	4.95	11.25	UV(4-2)
	105.82	5.5	28	4.95	10.5	UV(4-3)

الجدول (9-6) نتائج اختبار الصدم نتيجة التعرض لأشعة UV C



الشكل (8-6) تغير عامل الصدم نتيجة التعرض لأشعة UVC مع الجذر التربيعي لزمان التعرض

4-6- اختبار تأثير الرطوبة

هناك حاجة متزايدة لإستخدام المواد المركبة بسبب تميز هذه المواد على المعادن من حيث المقاومة النوعية، عامل المرونة النوعي ولكن استثمار هذه المواد يؤدي إلى تعرضها للظروف الجوية حيث تتعرض إلى نسب مختلفة من الرطوبة مما يؤثر على خواص هذه المواد، وعليه فإنه من الضروري تقييم تأثير الرطوبة على خواص هذه المواد وخاصة على خواصها الميكانيكية.

العينات المختبرة لتقييم تأثير الرطوبة على الخواص الميكانيكية هي عينات مواد مركبة مؤلفة من المادة الرابطة الايبوكسي والمدعمة بألياف الزجاج وذلك ضمن حجرة اختبار الرطوبة بالشروط التالية :

1- رطوبة نسبية أكبر من 95%.

2- درجة حرارة 50°.

4-6-1- الغاية من الاختبار

تحديد العلاقة بين تغيرات الوزن والخواص الميكانيكية لهذه العينات.

4-6-2- الأجهزة المستخدمة

1- فرن التجفيف



الشكل (6-9) فرن التجفيف

2- جهاز اختبار الرطوبة



الشكل (10-6) حجرة اختبار الرطوبة

3-4-6- وصف الاختبار وشرح طريقة العمل :

لإجراء الاختبار تم اعتماد المواصفة القياسية

ASTM D 5229/D 5229M – 92 (Reapproved 1998)^١
**Standard Test Method for
Moisture Absorption Properties and Equilibrium
Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials^١**

يتم في هذا الاختبار قياس متوسط محتوى الرطوبة للمادة مع الزمن وذلك بقياس التغير الكلي لكتلة العينة المعرضة للرطوبة من جانبيين، يمكن أن يتم الاختبار بإحدى الطرق الأربعة المعتمدة ضمن المواصفة القياسية وهي:

4-4-6-الاجراء A : يتم في هذا الاختبار تحديد خاصيتين من خواص انتشار Fickian للرطوبة وهما :

1- ثابت انتشار الرطوبة.

2- محتوى رطوبة التوازن.

لم تحدد المواصفة مستوى رطوبة محددة إلا أنه توصي المواصفة بأن يتم الاختبار عند مستويات رطوبة مرتفعة من أجل تسريع عملية الاختبار.

4-4-6-الاجراء B : يتم هذا الاختبار في ظروف الرطوبة العامة.

4-4-6-الاجراء C : يتم هذا الاختبار في حالة الرطوبة النسبية 50 %.

4-4-6-الاجراء D : يتم هذا الاختبار للعينات قبل اتباع أحد الاجراءات السابقة وذلك للتخلص من

الرطوبة الممتصة في العينات المختبرة (تجفيف العينات).

تم اتباع الاجراء B.

4-4-8- منهجية الاجراء B :

1- تنفيذ الاجراء D كخطوة أولى للاجراء B وذلك للتخلص من الرطوبة الموجودة في العينات، حيث

منهجية الاجراء D كمايلي :

1- تم ترقيم عشرين عينة وقياس وزنها قبل وضعها في فرن التجفيف، حيث تم ترميز وزن هذه

العينات بالرمز W0.

2- تم وضع العينات في فرن التجفيف عند درجة حرارة $3^{\circ} \pm 80$ لمدة 7 أيام ومن ثم اطفاء

الفرن حتى ترجع درجة حرارة إلى درجة حرارة الجو المحيط ثم اخراج هذه العينات وقياس

وزنها W1.

3- ارجاع العينات إلى فرن التجفيف عند نفس درجة حرارة السابقة وتكرار الخطوة (2) حتى يتم

الحصول على فرق في محتوى الرطوبة بين الخطوة والخطوة التي تسبقها لا تتجاوز 0.01%.

حيث أرقام العينات ووزنها (بالغرام) وفرق الوزن بين كل خطوة والخطوة التي تسبقها موضحة في الجدول رقم (6-10).

رقم العينة	W0	W1	W0-W1	W2	W1-W2	W3	W2-W3	W4	W3-W4
1	20.656	20.564	0.091	20.524	0.041	20.499	0.024	20.495	0.004
2	21.092	21.003	0.089	20.969	0.035	20.947	0.021	20.944	0.003
3	20.375	20.287	0.088	20.251	0.036	20.237	0.015	20.229	0.008
4	20.199	20.114	0.085	20.069	0.045	20.042	0.027	20.034	0.008
5	20.047	19.962	0.085	19.930	0.032	19.917	0.013	19.912	0.006
6	21.183	21.098	0.084	21.065	0.034	21.051	0.013	21.042	0.009
7	20.948	20.871	0.078	20.839	0.032	20.824	0.014	20.820	0.004
8	21.730	21.646	0.084	21.607	0.039	21.594	0.013	21.585	0.009
9	19.836	19.753	0.083	19.715	0.038	19.701	0.013	19.700	0.001
10	20.337	20.247	0.090	20.208	0.040	20.186	0.021	20.178	0.009
11	20.500	20.412	0.088	20.379	0.034	20.366	0.013	20.364	0.002
12	19.848	19.756	0.092	19.727	0.029	19.712	0.015	19.709	0.004
13	20.244	20.178	0.066	20.144	0.034	20.118	0.026	20.108	0.010
14	19.316	19.224	0.092	19.192	0.032	19.171	0.021	19.165	0.006
15	20.737	20.624	0.114	20.592	0.031	20.566	0.027	20.558	0.007
16	21.229	21.123	0.107	21.091	0.031	21.063	0.029	21.062	0.001
17	20.216	20.122	0.093	20.090	0.032	20.066	0.024	20.063	0.003
18	21.040	20.930	0.110	20.901	0.029	20.885	0.016	20.883	0.002
19	20.548	20.453	0.095	20.422	0.031	20.408	0.014	20.406	0.003
20	19.766	19.622	0.144	19.577	0.045	19.552	0.026	19.547	0.005

الجدول رقم (6-10) أرقام العينات ووزنها وفرق الوزن بين كل مرحلتين متتاليتين بعد وضعها في فرن التجفيف

حيث : W1 : وزن عينات الاختبار بعد وضعها في فرن التجفيف لمدة اسبوع.

W2 : وزن عينات الاختبار بعد وضعها في فرن التجفيف لمدة اسبوعين.

W3 : وزن عينات الاختبار بعد وضعها في فرن التجفيف لمدة ثلاثة اسابيع.

W0= W4 : وزن عينات الاختبار بعد وضعها في فرن التجفيف لمدة أربعة اسابيع وزن العينة.

6-4-9-منهجية امتصاص الرطوبة :

وتتم وفق الخطوات التالية :

1- تسجيل كتلة العينة الخالية من الرطوبة (نهاية المرحلة الرابعة) ثم نضع العينة في حجرة

الاختبار في الشروط التالية:

أ- رطوبة نسبية 95% ب - درجة حرارة 50°C.

يتم دهان السطحين الجانبيين لعينة الاختبار بمادة عازلة (مطاط سليكوني) وذلك حتى

يكون انتشار الرطوبة من جانبيين فقط

2- يتم إخراج العينة من حجرة الاختبار في نهاية كل فترة زمنية مرجعية (اسبوع حسب

المواصفة D 5229) وقياس وزنها.

W0 : وزن العينات الجاف.

W11 : وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة لمدة اسبوع.

W12 : وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة لمدة اسبوعين.

W13 : وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة لمدة ثلاثة اسابيع.

W14 : وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة لمدة أربعة اسابيع.

W15 : وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة لمدة خمسة اسابيع

فرق الوزن = وزن العينة الرطبة في مرحلة ما - وزن العينة في المرحلة التي قبلها

النسبة المئوية لمحتوى الرطوبة = $100 \times \text{فرق الوزن} / \text{وزن العينة الجافة}$.

10-4-6- وزن عينات الاختبار.

رقم العينة	Wo	W11	W12	W13	W14	W15	Time[h]	Sqrt Time[h]
1	20.495	20.622					168	12.96148
7	20.803	20.957					168	12.96148
18	20.872	21.037					168	12.96148
19	20.428	20.554	20.629				336	18.3303
20	19.534	19.649	19.712				336	18.3303
9	19.7	19.795	19.858				336	18.3303
5	19.879	20.015	20.069	20.1088			504	22.44994
16	21.048	21.202	21.261	21.2958			504	22.44994
8	21.577	21.723	21.785	21.8237			504	22.44994
11	20.35	20.477	20.57	20.6049	20.626		672	25.92296
14	19.137	19.251	19.315	19.3647	19.387		672	25.92296
15	20.553	20.689	20.766	20.7997	20.823		672	25.92296
2	20.939	21.066	21.149	21.1863	21.215	21.228	840	28.98275
3	20.219	20.346	20.419	20.4623	20.491	20.504	840	28.98275
4	20.034	20.152	20.22	20.2635	20.291	20.302	840	28.98275
6	21.04	21.171	21.246	21.2943	21.324	21.337	840	28.98275
10	20.155	20.281	20.353	20.3994	20.428	20.441	840	28.98275
12	19.696	19.819	19.89	19.9354	19.964	19.976	840	28.98275
13	20.079	20.205	20.278	20.3247	20.353	20.366	840	28.98275
17	20.046	20.172	20.245	20.2916	20.32	20.333	840	28.98275

الجدول رقم (6-11) أرقام العينات ووزنها بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة.

حيث وزن العينات هنا بالغرام

11-4-6- النسبة المئوية لزيادة وزن العينات نتيجة امتصاص الرطوبة.

M1 : النسبة المئوية لزيادة وزن العينات نتيجة امتصاص الرطوبة بعد اسبوع

$$M1=(W11-Wo)/Wo$$

M2: النسبة المئوية لزيادة وزن العينات نتيجة امتصاص الرطوبة بعد اسبوعين

$$M2=(W12-W11)/Wo$$

M3 : النسبة المئوية لزيادة وزن العينات نتيجة امتصاص الرطوبة بعد ثلاثة اسابيع

$$M3=(W13-W12)/Wo$$

M4 : النسبة المئوية لزيادة وزن العينات نتيجة امتصاص الرطوبة بعد اربعة اسابيع

$$M4=(W14-W13)/Wo$$

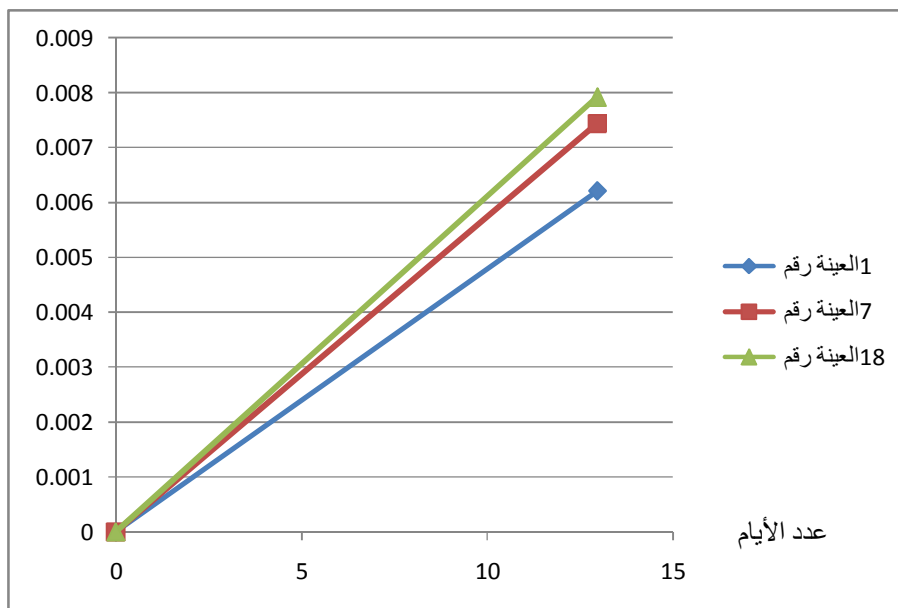
M5: النسبة المئوية لزيادة وزن العينات نتيجة امتصاص الرطوبة بعد خمسة اسابيع

$$M5=(W15-W14)/Wo$$

Sqrt Time[h]	Time[h]	M5	M4	M3	M2	M1	Wo	رقم العينة
12.96148	168					0.006206331	20.495	1
12.96148	168					0.007436606	20.803	7
12.96148	168					0.007919663	20.872	18
18.3303	336				0.003632234	0.006177735	20.428	19
18.3303	336				0.003261014	0.005871873	19.534	20
18.3303	336				0.003187801	0.004837539	19.7	9
22.44994	504			0.001992072	0.002726523	0.00685152	19.879	5
22.44994	504			0.001653395	0.002788917	0.007350007	21.048	16
22.44994	504			0.001779656	0.00291048	0.00673396	21.577	8
25.92296	672		0.0010516	0.001700254	0.004604445	0.006226075	20.35	11
25.92296	672		0.00117054	0.002602357	0.003360071	0.005962428	19.137	14
25.92296	672		0.00113364	0.001625051	0.003785299	0.006582917	20.553	15
28.98275	840	0.000606524	0.00138755	0.001764459	0.004006877	0.006041358	20.939	2
28.98275	840	0.00062617	0.0014325	0.002156439	0.003609104	0.006271558	20.219	3
28.98275	840	0.000588758	0.00134691	0.002176364	0.003393469	0.005896849	20.034	4
28.98275	840	0.000619889	0.00141813	0.002291441	0.003572903	0.006208652	21.04	6
28.98275	840	0.000621825	0.00142256	0.002298598	0.003584062	0.006228042	20.155	10
28.98275	840	0.00062338	0.00142612	0.002304346	0.003593024	0.006243616	19.696	12
28.98275	840	0.000627682	0.00143596	0.002320249	0.003617821	0.006286706	20.079	13
28.98275	840	0.000628938	0.00143883	0.002324891	0.003623795	0.006299282	20.046	17

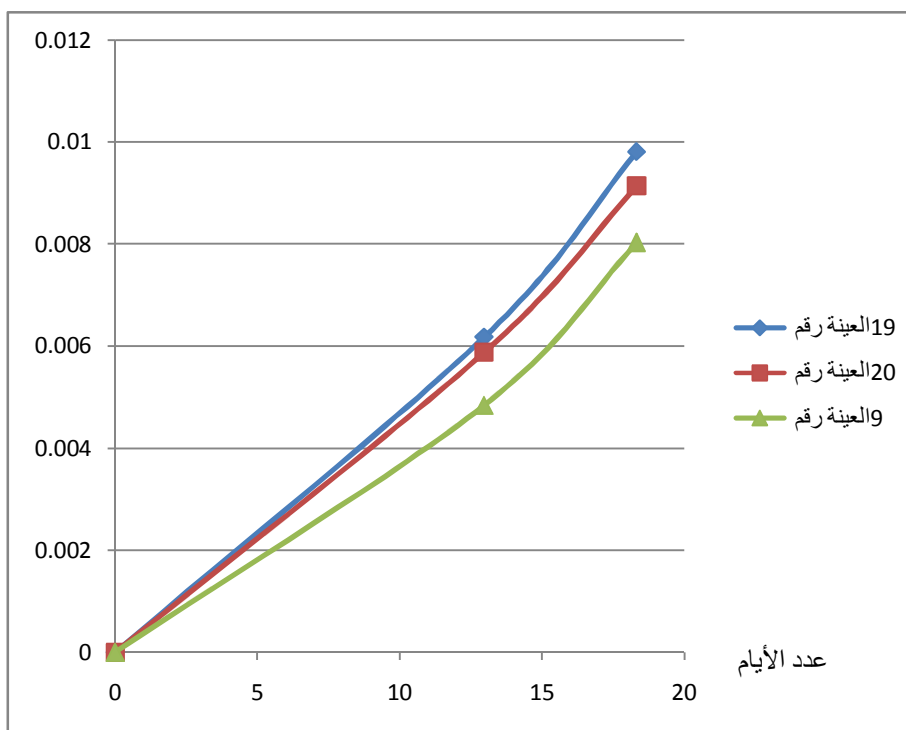
الجدول رقم (6-12) النسبة المئوية لزيادة وزن العينات نتيجة امتصاص الرطوبة

النسبة المئوية
لزيادة الوزن



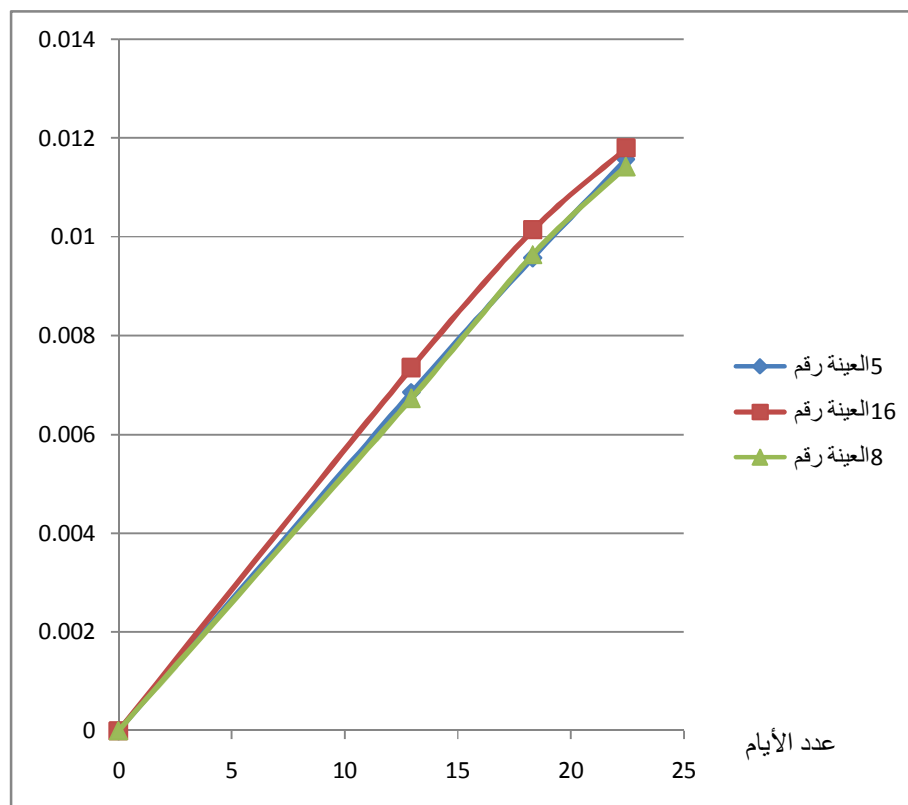
الشكل (11-6) النسبة المئوية لزيادة وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة بأسبوع

النسبة المئوية
لزيادة الوزن



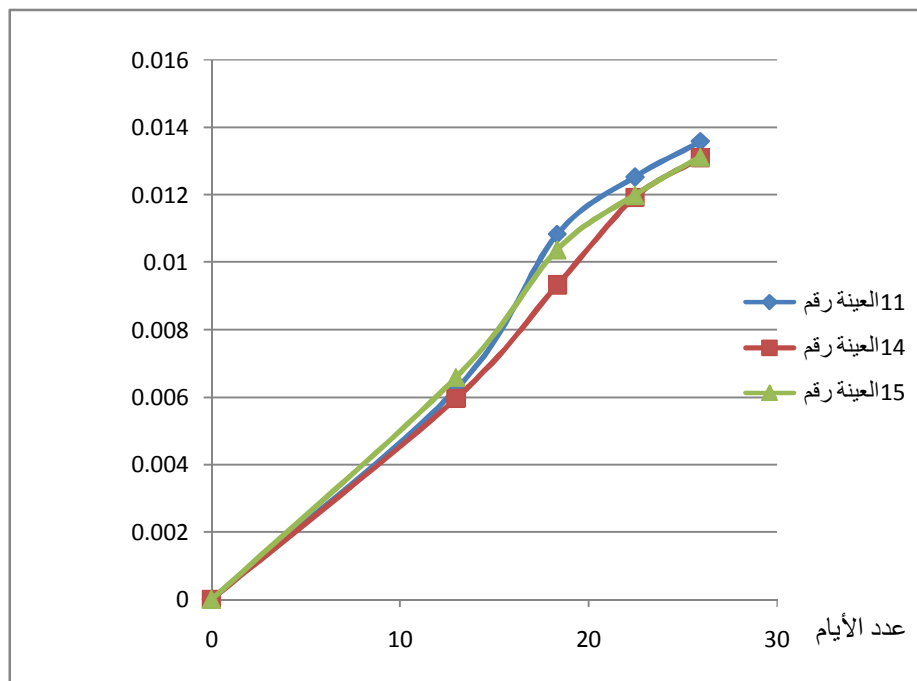
الشكل (12-6) النسبة المئوية لزيادة وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة بأسبوعين

النسبة المئوية
لزيادة الوزن



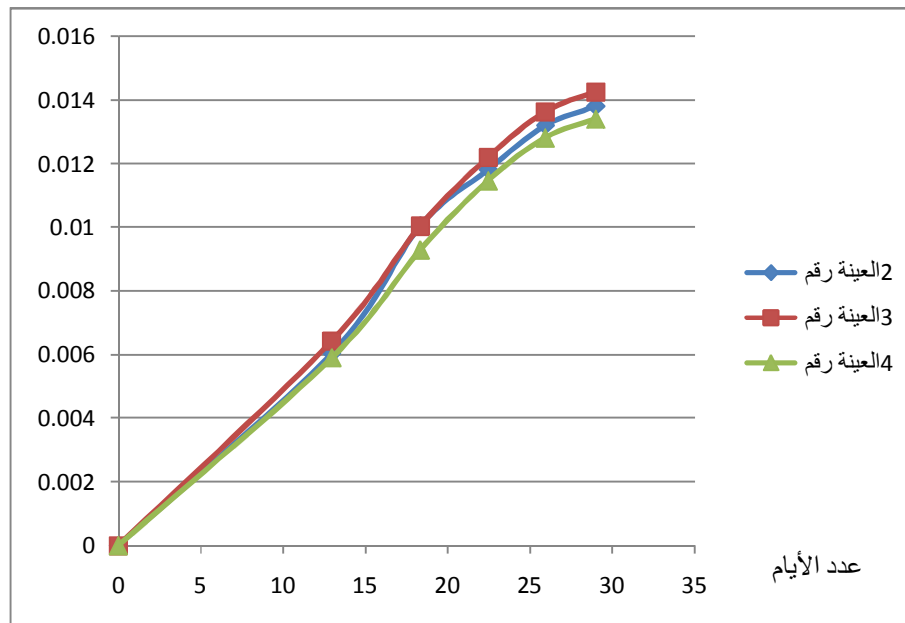
الشكل (6-13) النسبة المئوية لزيادة وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة بثلاثة اسابيع

النسبة المئوية
لزيادة الوزن



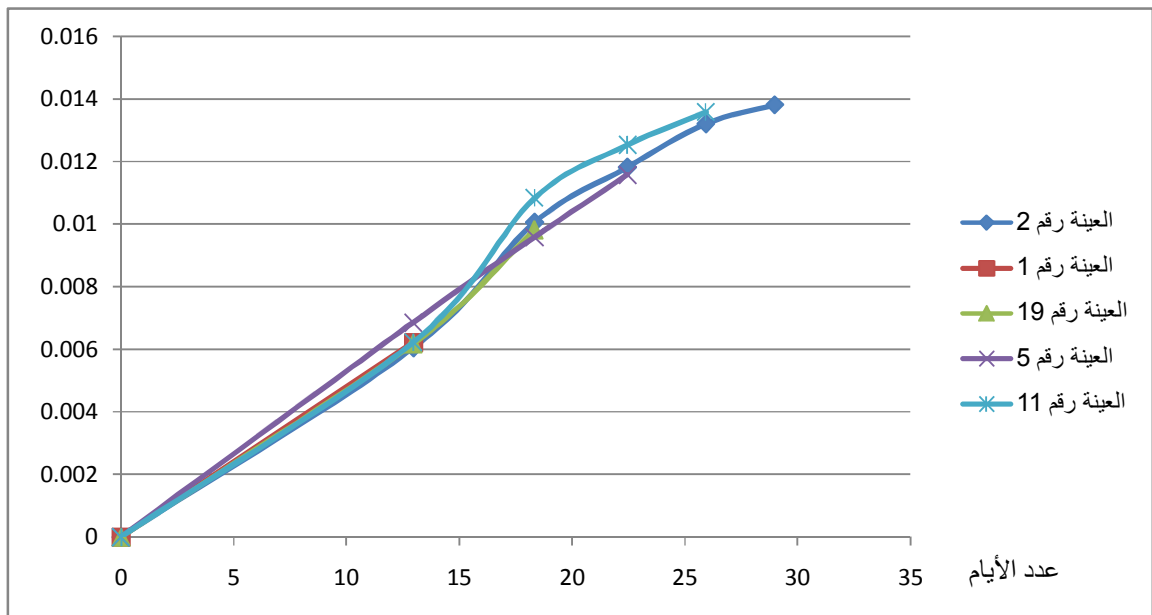
الشكل (6-14) النسبة المئوية لزيادة وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة بأربعة اسابيع

النسبة المئوية
لزيادة الوزن



الشكل (6-15) النسبة المئوية لزيادة وزن العينات بعد وضعها في حجرة اختبار الرطوبة بخمسة اسابيع

النسبة المئوية
لزيادة الوزن



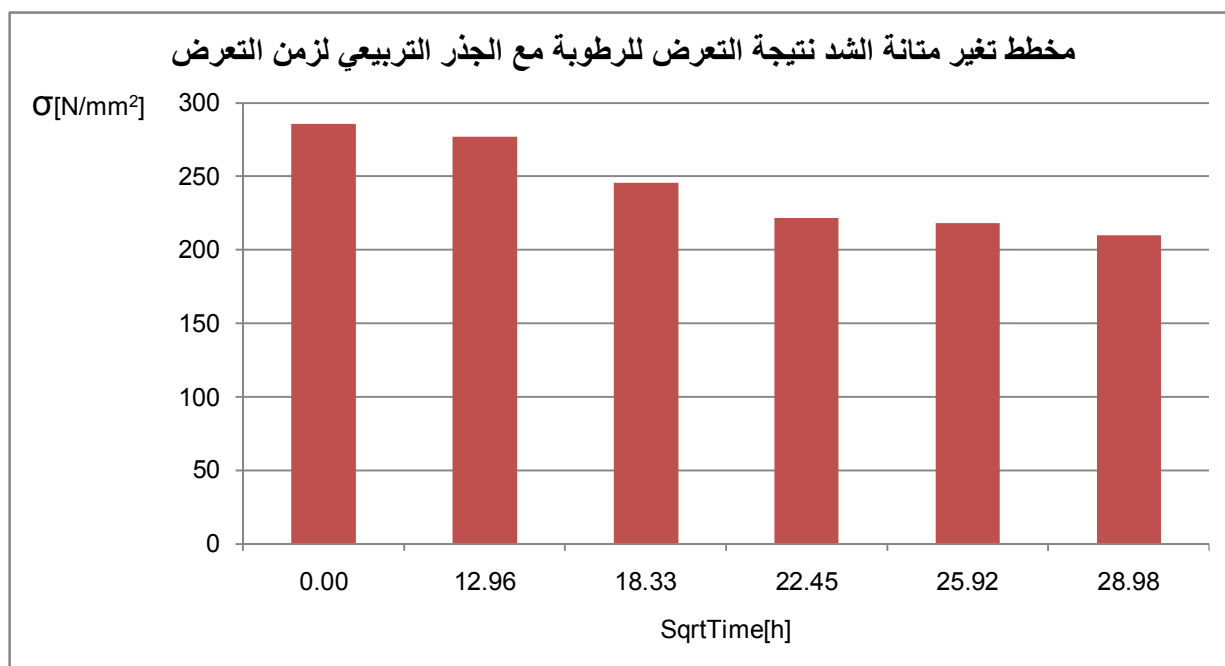
الشكل (6-16) مقارنة النسبة المئوية لزيادة وزن العينات في أزمنة مختلفة

12-4-6 - نتائج اختبار الشد نتيجة التعرض للرطوبة

نتائج تغيرات مقاومة الشد للعينات

رقم العينة	Thickness[mm]	Width[mm]	F _{max} [N]	σ_{max} [Mpa]	AVERAG σ_{max} [Mpa]	Time[h]	Sqrt Time[h]
1	5	13.04	17005	260.8129		168	12.961
7	5.2	13.04	19102	281.7072	276.5439333	168	12.961
18	5.03	13.04	18832	287.1117		168	12.961
9	5.04	13.04	16560	251.972		336	18.330
19	5	13.04	14885	228.2975	245.7237667	336	18.330
20	5	13.04	16750	256.9018		336	18.330
5	5.09	13.04	14707	221.5791		504	22.449
16	5.09	13.04	14584	219.7259	221.2375667	504	22.449
8	5.09	13.04	14762	222.4077		504	22.449
11	5.03	13.04	13950	212.681		672	25.9229
14	5.09	13.04	14865	223.9595	218.0053667	672	25.9229
15	5.09	13.04	14428	217.3756		672	25.9229
2	5.09	13.04	13750	207.1607		840	28.9827
12	5.09	13.04	14115	212.6599	210.0685	840	28.9827
13	5.09	13.04	13964	210.3849		840	28.9827

الجدول رقم (6-13) نتائج اختبار الشد للعينات نتيجة التعرض للرطوبة



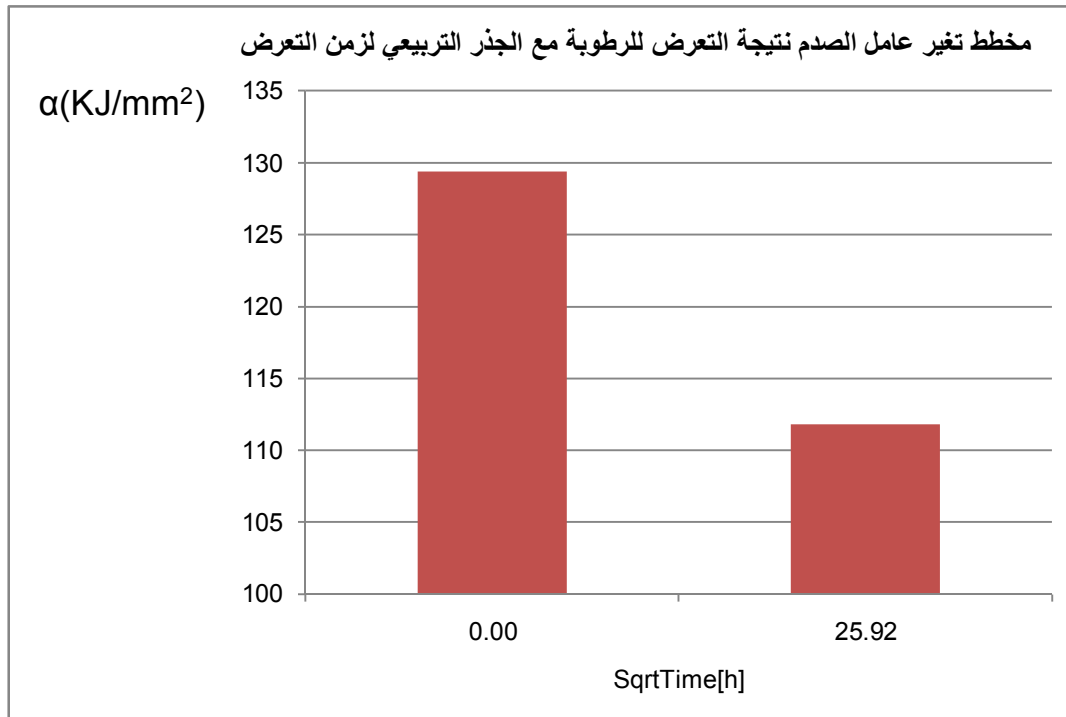
الشكل (6-17) مخطط تغير متانة الشد مع الجذر التربيعي لزمن التعرض نتيجة التعرض للرطوبة

6-4-13- نتائج اختبار الصدم نتيجة التعرض للرطوبة:

تم اجراء الاختبار على العينات المعرضة للرطوبة لمدة خمسة اسابيع و كانت نتائج الصدم على الشكل التالي :

رقم العينة	عرض [mm]	سماكة [mm]	طاقة الصدم (J)	عامل الصدم (KJ/mm ²)	متوسط عامل الصدم (KJ/mm ²)
3	11.45	4.77	6.6	120.8426	
4	11.59	4.77	5.8	104.9122	111.8116
6	11.48	4.97	6.9	120.9347	
10	11.53	4.83	5.6	100.5568	

الجدول رقم (6-14) نتائج اختبار الصدم نتيجة التعرض للرطوبة



الشكل (6-18) مخطط تغير عامل الصدم مع الجذر التربيعي لزمن التعرض نتيجة التعرض للرطوبة

5-6- اختبار الحرارة

نظراً للاستثمار الكبير مؤخراً للمواد المركبة في مختلف التطبيقات الهندسية فإنها تتعرض لدرجات حرارة مختلفة أثناء الاستثمار، ونتيجة لهذا التعرض تتغير بعض خواص هذه المواد.

5-6-1- الغاية من التجربة :

دراسة تغير الخواص الميكانيكية (مقاومة الشد، مقاومة الصدم) نتيجة التعرض للحرارة.

5-6-2- التجهيزات :

- فرن كهربائي : طراز WILD BARFIELD



الشكل (6-19) فرن كهربائي

5-6-3- عينات الاختبار

تم اختبار عينات الشد وعينات الصدم والمذكور شكلهما وأبعادهما مسبقاً .

5-6-4- وصف الاختبار وشرح طريقة العمل :

لإجراء الاختبار تم اعتماد المواصفة القياسية

ASTM D3045 – 92

Standard Practice for

Heat Aging of Plastics Without Load

يتم في هذا الاختبار تعريض العينات لدرجات حرارة تحاكي درجات الحرارة اثناء الاستثمار مع عملية تسريع لعملية التعريض.

تم اختيار درجة حرارة الاستثمار وفق للمواصفة حسب الترتيب التالي :

1- مدة التعرض 24 اسبوع وفق النمط A عند درجة حرارة 40 درجة مئوية تم تسريعها إلى 16 يوم

عند درجة حرارة 105 درجة مئوية وفق للمواصفة المذكورة.

2- مدة التعرض 12 اسبوع وفق النمط B عند درجة حرارة 55 درجة مئوية تم تسريعها إلى 24 يوم

عند درجة حرارة 105 درجة مئوية.

3- مدة التعرض 6 اسابيع وفق النمط B عند درجة حرارة 70 درجة مئوية تم تسريعها إلى 21 يوم

عند درجة حرارة 105 درجة مئوية .

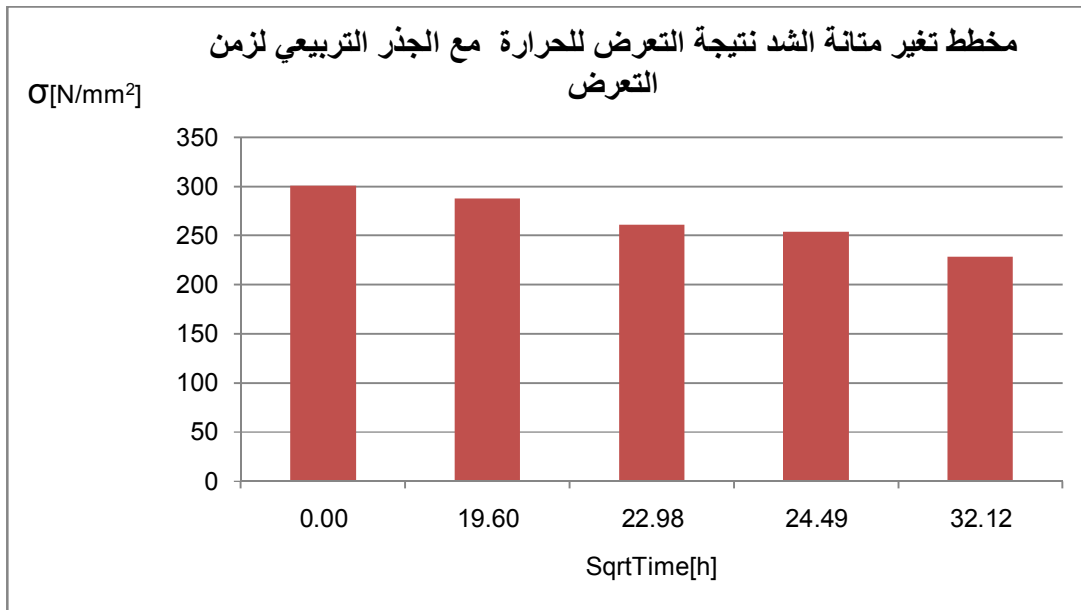
4- مدة التعرض 6 اسابيع عند درجة حرارة 85 درجة مئوية تم تسريعها إلى درجة حرارة 105

درجة مئوية وفقاً للنمط A .

5-5-6- نتائج اختبار الشد:

رقم العينة	مدة التعرض (يوم)	الجذر التربيعي لزمان التعرض (الساعة)	عرض العينة [mm]	سماعة العينة [mm]	القوة [N]	الاجهاد [N/mm ²]	متوسط قيمة الاجهاد [N/mm ²]
16 -1	16	19.5959	13.04	5.09	19810	298.4620391	
16 -2	16	19.5959	13.04	5.09	18571	279.7949787	288.1266046
16 -3	16	19.5959	13.04	5.09	18991	286.1227958	
22 -1	22	22.9783	13.04	5.09	16509	248.7284101	
22 -2	22	22.9783	13.04	5.02	17727	270.8032899	260.8989436
22 -3	22	22.9783	13.04	5.02	17227	263.1651309	
25 -1	25	24.4949	13.04	5	16566	254.0797546	
25 -2	25	24.4949	13.04	5.03	16953	258.4645501	254.4619603
25 -3	25	24.4949	13.04	5.03	16453	250.8415763	
43 -1	43	32.1248	13.04	5.03	14752	224.9082194	
43 -2	43	32.1248	13.04	5.03	15209	231.8756175	228.7451162
43 -3	43	32.1248	13.04	5.03	15050	229.4515118	

الجدول رقم (6-15) نتائج اختبار الشد نتيجة التعرض للحرارة

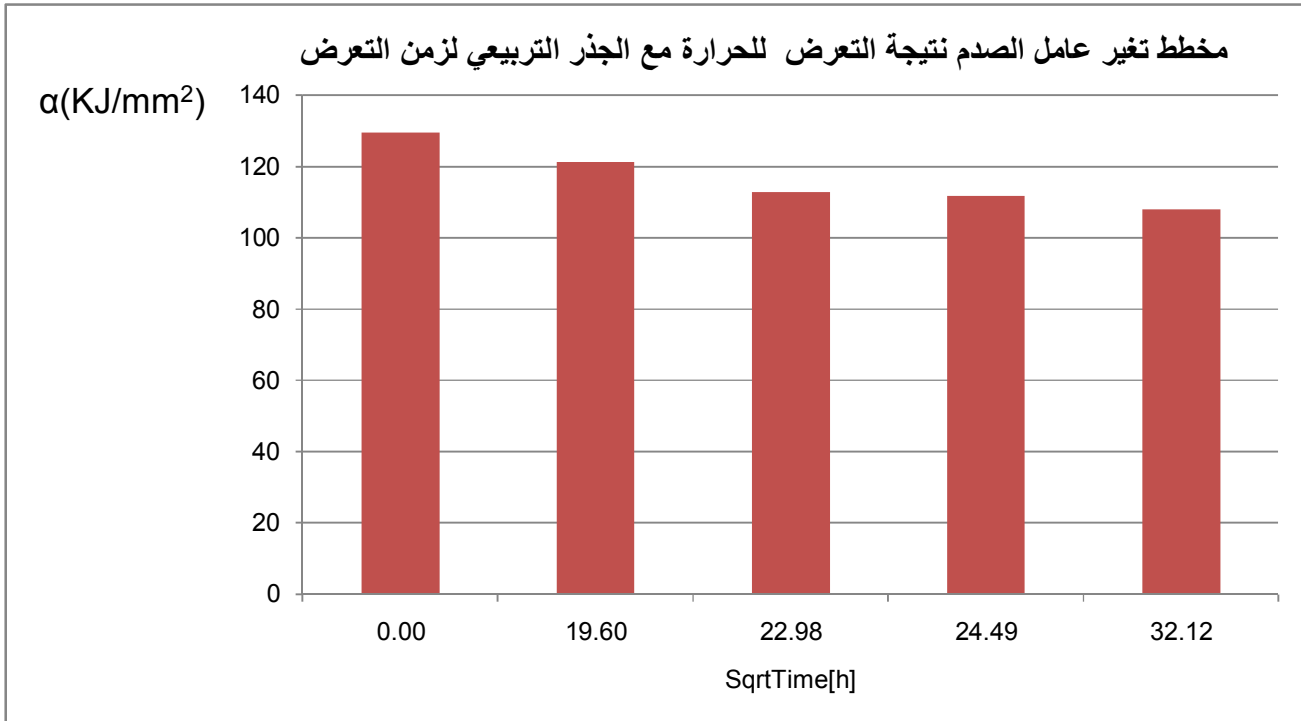


الشكل (6-20) مخطط تغير مقاومة الشد مع الجذر التربيعي لزمان التعرض نتيجة التعرض للحرارة

6-5-6- نتائج اختبار الصدم :

رقم العينة	مدة التعرض (يوم)	الجذر التربيعي لزمان التعرض (الساعة)	عرض [mm]	سماعة [mm]	طاقة الصدم (J)	عامل الصدم (KJ/mm^2)	متوسط عامل الصدم (KJ/mm^2)
1---1	16	19.5959	10.89	4.66	6.6	130.055924	
1--2	16	19.5959	10.26	4.4	5.2	115.1869573	121.1753
1--3	16	19.5959	10.88	4.74	6.1	118.2831	
2--1	22	22.9783	10.35	4.3	4.8	107.8530502	
2--2	22	22.9783	10.38	5.03	5.4	103.4256886	112.7398962
2--3	22	22.9783	10.38	4.25	5.6	126.9409498	
3--1	25	24.4949	10.85	4.41	5.8	121.2159211	
3--2	25	24.4949	10.25	4.4	4.3	95.34368071	111.5876372
3--3	25	24.4949	10.8	4.7	6	118.2033097	
4--1	43	32.1248	10.85	5.02	6	110.1584446	
4--2	43	32.1248	10.9	4.99	5.6	102.95821	107.9306869
4--3	43	32.1248	10.85	4.83	5.8	110.6754062	

الجدول رقم (6-16) نتائج اختبار الصدم نتيجة التعرض للحرارة



الشكل (6-21) مخطط تغير عامل الصدم مع الجذر التربيعي لزمان التعرض نتيجة التعرض للحرارة

اختبار التعرض لأشعة UV :

يكشف تحليل نتائج بأنه :

- 1- عند تعرض المواد المركبة لأشعة UVC لمدة 168 [h] انخفض مقاومة الشد تقريباً 7.3 %
 - 2- عند تعرض المواد المركبة لأشعة UVC لمدة 336 [h] انخفض مقاومة الشد تقريباً 13.4 %
 - 3- عند تعرض المواد المركبة لأشعة UVC لمدة 504 [h] انخفض مقاومة الشد تقريباً 18.7 %
 - 4- عند تعرض المواد المركبة لأشعة UVC لمدة 672[h] انخفض مقاومة الشد تقريباً 23.3 %
 - 5- عند تعرض المواد المركبة لأشعة UVC لمدة 168 [h] انخفض عمل الصدم تقريباً 4 %
 - 6- عند تعرض المواد المركبة لأشعة UVC لمدة 336 [h] انخفض عامل الصدم تقريباً 8.7 %
 - 7- عند تعرض المواد المركبة لأشعة UVC لمدة 504 [h] انخفض عامل الصدم تقريباً 13 %
 - 8- عند تعرض المواد المركبة لأشعة UVC لمدة 672[h] انخفض عامل الصدم تقريباً 18.8 %
- قد يعزى هذا الانخفاض في مقاومة الشد وعامل الصدم نتيجة التعرض لأشعة الـ UVC إلى أن جزيئات المادة الرابطة تكتسب نتيجة التعرض لأشعة UVC طاقة أكبر من طاقة الارتباط بين جزيئاتها مسببة تغير في بنية المادة الرابطة هذا التغير أدى إلى انخفاض مقاومة الشد وعامل الصدم.

اختبار التعرض للرطوبة :

يكشف تحليل نتائج بأنه :

- 1- عند تعرض المواد المركبة للرطوبة لمدة 168 [h] انخفض مقاومة الشد تقريباً 8 %
 - 2- عند تعرض المواد المركبة للرطوبة لمدة 336 [h] انخفض مقاومة الشد تقريباً 18 %
 - 3- عند تعرض المواد المركبة للرطوبة لمدة 504 [h] انخفض مقاومة الشد تقريباً 26 %
 - 4- عند تعرض المواد المركبة للرطوبة لمدة 672[h] انخفض مقاومة الشد تقريباً 27.5 %
 - 5- عند تعرض المواد المركبة للرطوبة لمدة 840 [h] انخفض مقاومة الشد تقريباً 30 %
 - 6- عند تعرض المواد المركبة للرطوبة لمدة 840 [h] انخفض عامل الصدم تقريباً 14 %
- قد يعزى هذا الانخفاض في الخواص إلى أن انتشار الرطوبة في المادة الرابطة يؤدي إلى انهيار السطح البيني بين الليف والمادة الرابطة وبالتالي إلى انخفاض امكانية نقل الحمل بين الليف والمادة الرابطة وبالتالي انخفاض مقاومة الشد وعامل الصدم.

اختبار التعرض للحرارة :

يكشف تحليل نتائج بأنه :

- 1- عند تعرض المواد المركبة للحرارة لمدة [h] 384 انخفض مقاومة الشد تقريباً % 4.27
 - 2- عند تعرض المواد المركبة للحرارة لمدة [h] 528 انخفض مقاومة الشد تقريباً % 13.3
 - 3- عند تعرض المواد المركبة للحرارة لمدة [h] 600 انخفض مقاومة الشد تقريباً % 15.4
 - 4- عند تعرض المواد المركبة للحرارة لمدة [h] 1032 انخفض مقاومة الشد تقريباً % 24
 - 5- عند تعرض المواد المركبة للحرارة لمدة [h] 384 انخفض عامل الصدم تقريباً % 6.3
 - 6- عند تعرض المواد المركبة للحرارة لمدة [h] 528 انخفض عامل الصدم تقريباً % 12.9
 - 7- عند تعرض المواد المركبة للحرارة لمدة [h] 600 انخفض عامل الصدم تقريباً % 13.7
 - 8- عند تعرض المواد المركبة للحرارة لمدة [h] 1032 انخفض عامل الصدم تقريباً % 16.6
- قد يعزى هذا الانخفاض في مقاومة الشد وعامل الصدم نتيجة التعرض للحرارة إلى أن الروابط العرضية بين جزيئات المادة الرابطة تتحطم نتيجة التعرض للحرارة بدلا من زيادة الروابط العرضية حيث عملية تصلب المادة الرابطة تمت كيميائياً وليس بالحرارة وبالتالي فإن عدد الروابط العرضية تكون قد وصلت إلى ذروتها وعند التعرض للحرارة بدأت عملية تحطيم هذه الروابط وبالتالي انخفاض مقاومة الشد وعامل الصدم.

التوصيات للأعمال المستقبلية

- إن العمل في مجال المواد المركبة وتحديد خواصها الميكانيكية واسع الأفاق والنتائج التي حصلنا عليها غير كاملة فمثلا في اختبار الرطوبة تم الاختبار لمدة خمسة اسابيع ولم يسمح باستمرار الاختبار أكثر من ذلك. لذلك يوصى بمتابعة العمل في هذا المجال.
- استخدام تقنيات متطورة في تحضير العينات.
- امتداد الاختبارات لتشمل أيضاً التعب والزحف وعدم اقتصرها على الشد والصدم.
- توسيع مجال الاختبارات المحيطية لتشمل الأوساط الكيميائية.
- امتلاك تجهيزات تمكننا من قياس بعض الخواص الفيزيائية الأخرى كعامل التوصيل الحراري والحرارة النوعية.
- تحديد الخواص الميكانيكية والفيزيائية لمواد مركبة هجينة تحوي نوعي تسليح (ألياف زجاج و ألياف أراميد).

المراجع المستخدمة

المراجع العربية:

1- محاضرات للدكتور محمد هيثم ابراهيم محاضر في جامعة حلب

2- سلوك الانكسار للمواد المركبة تحت نمط الانفتاح

المراجع الأجنبية

1-TEMPERATURE AND MOISTURE EFFECTS ON COMPOSITE MATERIALS FOR WIND TURBINE BLADES

A thesis submitted for the degree of Master of Science in Chemical Engineering
MONTANA STATE UNIVERSITY-BOZEMAN

Bozeman, Montana March 2000

Chapter 2, Page 14

2- HYGROTHERMAL EFFECTS ON DURABILITY AND MOISTURE KINETICS OF FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITES

by

PADMAVATHI SURATHI

VISTASP M. KARBHARI

Interim Report Submitted to the California Department of
Transportation Under Contract No. 59A0309

Chapter 2, Page 35

3- AN INTRODUCTION TO COMPOSITE MATERIALS

Second Edition 1996

Chapter 10 , Page 237

4-HANDBOOK OF COMPOSITES SECOND EDITION

Edited by

S. T. Peters

Chapter 7 :FIBERGLASS REINFORCEMENT

Dennis J. Vaughan

5-Al-Ghuilani N Hammami, A. Durability and environmental degradation of glass vinyl ester composites. *Polymer Composites*, 25(6):609–616, December 2004

6- Aouadi-K. Nguyen T Chin, J.W. Effects of environmental exposure on fiber-reinforced plastic (frp) materials used in construction. *Journal of Composites Technology and Research*, 19(4):205–213, February 1995.

7- Schultheisz C.R. Hunston D.L. Brinson L.C Liao, K. Long-term durability of fiber reinforced polymer matrix composite materials for infrastructure applications: A review. *Journal of Advanced Materials*, 30(4):3–40, 1998.

8- Chin J. W Signor, A. W. Effects of ultraviolet radiation exposure on vinyl ester matrix resins: chemical and mechanical characterization. In *American Society for Composites, 16th Technical Conference, VA*, pages

1–12, SEPTEMBER 2001.

9- Tseng F. P Liao, W. B. The effect of long-term ultraviolet light irradiation on polymer matrix composites. *Polymer composites*, 19(4):440–445, AUGUST 1998.

النسبة المئوية لزيادة الوزن

النسبة المئوية لزيادة الوزن

النسبة الحجمية للألياف

28.98

النسبة المئوية لزيادة الوزن

النسبة المئوية لزيادة الوزن

Filename: يعد تعديل لجنة الحكم.docx
Directory: D:\المناقشة النهائية\نهائي
Template: C:\Users\ASUS\AppData\Roaming\Microsoft\Templat
s\Normal.dotm
Title: النسب الوزنية والحجمية للالياف
Subject:
Author: Haisam
Keywords:
Comments:
Creation Date: 03:59:00 2013/01/20 ص
Change Number: 11
Last Saved On: 08:57:00 2013/01/20 ص
Last Saved By: ASUS
Total Editing Time: 58 Minutes
Last Printed On: 08:58:00 2013/01/20 ص
As of Last Complete Printing
Number of Pages: 101
Number of Words: 17,395 (approx.)
Number of Characters: 99,152 (approx.)