

الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

تحضير مواد مركبة بوليمير - ألياف زجاج ودراسة خصائصها الميكانيكية

رسالة أعدت لنيل درجة الماجستير في علوم وهندسة المواد - اختصاص بوليميرات

إعداد

م. محمد اديب بدر

إشراف

د. باسم شعبان

د. رفيع جبره

العام الدراسي ٢٠٢٢

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

Higher Institute for Applied Sciences & Technology

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا مؤسسة حكومية للتعليم العالي أحدثت بموجب المرسوم التشريعي رقم /٢٤/ لعام ١٩٨٣، وذلك بهدف إعداد كوادر علمية متميزة من مهندسين وباحثين للإسهام الفاعل في عملية التطوير العلمي والتنمية في الجمهورية العربية السورية.

يمنح المعهد العالي درجة الإجازة في الهندسة في الاتصالات والمعلوماتية والنظم الإلكترونية والميكاترونيكس وعلوم وهندسة المواد وهندسة الطيران. يقبل المعهد العالي لدراسة هذه الاختصاصات شريحة منتقاة من المتفوقين في الشهادة الثانوية من الفرع العلمي. يتيح المعهد العالي أيضاً برامج ماجستير أكاديمي في نظم الاتصالات وفي التحكم والروبوتيك وفي نظم المعطيات الكبيرة ونظم المعلومات ودعم القرار وفي علوم وهندسة المواد وعلوم وهندسة البصريات. وأخيراً، يمنح المعهد العالي درجة الدكتوراه في الاتصالات والمعلوماتية ونظم التحكم والفيزياء التطبيقية. تُحدث في المعهد العالي اختصاصات جديدة بحسب متطلبات سوق العمل وتوجهات البحث والتطوير المحلية والعالمية.

يمتاز المعهد بأطره الكفوءة ذات التأهيل العالي وبمختبراته والمجهزة تجهيزاً عالياً وبنيتها التحتية الفريدة في القطر. إلى جانب النشاط التعليمي، يمارس المعهد العالي عبر جهود أطره وفعالياته العلمية المختلفة نشاطاً حثيثاً في البحث والتطوير، إذ ينفذ مشاريع ودراسات واستشارات متنوعة لصالح الجهات العامة والخاصة في القطر، كما يتعاون مع جهات خارج القطر في بعض المشاريع البحثية والتطويرية. يسعى المعهد أيضاً، عبر دورات تدريبية نظرية وعملية متاحة للقطاعين العام والخاص وللأفراد، إلى إفادة أوسع فئة من المهتمين من إكبات أطره العلمية ومختبراته. واستكمالاً لدوره الرائد في مجال التعليم ونشر العلم، ينشر المعهد العالي كتباً علمية عالية المستوى من نتاج أطره، منها ما هو تدريسي يوافق المناهج في المعهد العالي ويفيد شريحة واسعة من الطلاب الجامعيين عموماً، ومنها ما هو علمي ثقافي. يتيح المعهد العالي بعضاً من منشوراته على موقعه على الشبكة، كما يتيح إمكانية الاطلاع على رسائل الماجستير والدكتوراه المنفذة في المعهد العالي وعلى بعض منشورات طلابه وأطره من المقالات العلمية.

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، الجمهورية العربية السورية، دمشق، ص.ب ٣١٩٨٣

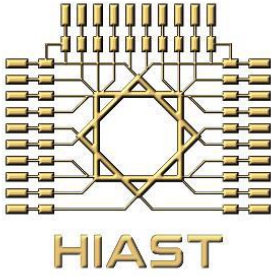
Higher Institute for Applied Sciences & Technology – HIAST

P. O. Box 31983, Damascus, Syrian Arab Republic

هاتف ٠٠٩٦٣١١٥١٢٣٨١٩ - فاكس ٠٠٩٦٣١١٥١٤٠٧٦١

بريد إلكتروني contact@hiast.edu.sy

موقع إلكتروني www.hiast.edu.sy



الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

تصريح

أنا الموقع أدناه محمد أديب بدر معدّ أطروحة الماجستير التي تحمل العنوان:

تحضير مواد مركبة بوليمير - ألياف زجاج

ودراسة خصائصها الميكانيكية

أصرح بأن:

- الأعمال والنتائج المعروضة في هذه الأطروحة هي نتيجة جهودي الشخصية وبتوجيه من المشرف، وأن ما عدا ذلك من معلومات ونتائج قد نُسبت إلى مصادر لها ومؤلفيها، وأشير إلى ذلك في متن النص وفي قائمة المراجع.
- المعطيات والمعلومات المستخدمة في هذه الأطروحة جرى تحصيلها بطرائق سليمة ومشروعة ونُسبت إلى مصادر لها في المواضيع الملائمة.
- كلّ مكوّن من مكونات هذه الأطروحة (مقطع نصّي، صورة، مخطط، ...) مقتبس من عمل آخر جرى تمييزه بوضوح ونُسب إلى مصدره.
- الأعمال والنتائج المعروضة في هذه الأطروحة لم تُستخدم سابقاً وليست قيد الاستخدام للحصول على أي شهادة أكاديمية أخرى.

التوقيع

دمشق / ٢٠٢٢/

إهداء

إلى تلك الأرواح الطاهرة التي لم تفارقني أبداً... أمي وأبي.

إلى من استلهمت منهم الدعم والمحبة... زوجتي وأطفالي الغاليين.

إلى تلك الأيدي البيضاء التي قدمت لي يد العون... أساتذتي ومعلمي الأفاضل.

شكر وتقدير

كل الشكر والتقدير لإدارة المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا على الدعم الذي قدموه حتى تمكنت من إتمام العمل على هذا البحث، وأخص بالذكر الدكتور المشرف رفيع جبره الذي كان اليد الداعمة ومنهل المعرفة الذي لا ينضب أبداً.

كل الشكر والتقدير لمؤسسة الصناعات التقنية، وعلى رأسها السيد المدير العام الدكتور جمال سعيد، والدكتور المشرف باسم شعبان، التي كان لها الفضل في تأمين المواد اللازمة، وتقديم كل التسهيلات اللازمة، والسماح لي باستخدام معاملها وتجهيزاتها في سبيل إنجاز هذا البحث. شكر خاص للدكتور فيصل محمد لدعمه اللامحدود أكاديمياً ومعنوياً والذي لن أنسى فضله ما حييت.

الملخص.

جرى في هذا البحث تحضير مواد مركبة من بوليمير الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج بطريقة البناء اليدوي. جرى تحضير المواد المركبة ايبوكسي- ألياف زجاج مختلفة الأشكال (مطحونة - نسيجية - نسيج غير منسوج - هجينة - صوفية). وجرى تحضير مادة مركبة من الإيبوكسي مع إضافات من مساحيق كربونات الكالسيوم والسيليكا. دُرس تأثير كل نوع من ألياف الزجاج ونسبتها ونوع المساحيق على خواص الانعطاف الميكانيكية للمواد المركبة المنشودة. بيّنت الدراسة ازدياداً في مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ مع زيادة نسبة ألياف الزجاج حتى بلوغ قيمة دنيا للمادة الرابطة لإشباع هذه الألياف، ثم انخفاض مقاومة الانعطاف بعدها. تبيّن أن مقاومة الانعطاف هي الأعلى عند استخدام ألياف الزجاج النسيجية، كما تبيّن انخفاض مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ عند إضافة كل من مساحيق كربونات الكالسيوم والسيليكا بنسبة ٢٠٪ إلى الإيبوكسي.

جرى توظيف تقنية السكب بالشمع المهدور في تشكيل منتجات نصف مصنعة ومصنعة من المادة المركبة المنشودة في البحث مع إمكانية استعمال هذه الطريقة لتشمل كافة المواد المركبة التي تستخدم بوليميرات التصلب الحراري كمادة رابطة. جرى تطوير تقنية باستخدام القالب الشمعي لتحضير عينات مواد مركبة أولية اسطوانية أو موشورية يمكن تشغيلها للحصول على منتجات نهائية من المادة المركبة المنشودة في البحث. أجريت دراسة لمشروع آلة لتحضير المادة المركبة المنشودة في البحث لغرض أتمتة عملية تشكيل منتجات مواد مركبة بوليميرية مكونة من مادة رابطة من بوليمير تصلب حراري مقوى بالألياف.

Abstract.

In this research, fiber reinforced polymer (FRP) composite materials were prepared using hand-layup technique from epoxy and different shapes of glass fibers (milled – textile – mat – hybrid – woolen). Composite materials were also prepared from epoxy and powder additives of calcium carbonate or silica powders.

The effect of of glass fiber type, percentage and powder type on the flexure mechanical properties of these composite materials were studied.

The study showed an increase in the flexural strength and Young modulus with the increase in the percentage of glass fibers until reaching a minimum value of the matrix required to saturate these fibers, and after that the decline of flexural strength. The flexural resistance was found to be highest when textile fiberglass was used. A decrease in flexural strength and Young modulus was found when both calcium carbonate and silica powders were added at 20%.

Investment casting technique was used to form semi-finished/ finished products from the studied composite material in this research, with the possibility of using this method to include all composite materials that use thermosetting polymers as a matrix.

A technique has been developed using wax mold to prepare composite materials preforms (cylindrical – prismatic) that can be machined to obtain final products from the composite material studied in this research.

A study was conducted for a project of a machine for preparing the desired composite material in order to automate the forming process of (PMC) composite material products consisting of a thermosetting polymer matrix reinforced with fibers.

فهرس المحتويات

٢	الفصل الأول: الدراسة النظرية
٢	١-١ مقدمة عامة.
٢	٢-١ تعريف المواد المركبة.
٢	٣-١ تاريخ المواد المركبة.
٥	٤-١ مكونات المادة المركبة.
٥	١-٤-١ تصنيف المواد المركبة وفقاً للمادة الرابطة (Matrix).
٦	٢-٤-١ تصنيف المواد المركبة وفقاً لمادة التقوية (Reinforcements)
٧	٥-١ المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية وتقانات تشكيلها.
٧	١-٥-١ تعريف المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية (PMC).
٧	٢-٥-١ المادة الرابطة البوليميرية.
٧	١-٢-٥-١ بوليميرات التصلب الحراري.
٨	٢-٢-٥-١ بوليميرات التلدن الحراري.
١١	٣-٥-١ مواد التقوية المستخدمة في المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية
١٢	١-٣-٥-١ الألياف الزجاجية.
١٢	أ - أشكال الألياف الزجاجية.
١٣	ب- خصائص الألياف الزجاجية.
١٣	ج- أصناف الألياف الزجاجية.
١٥	٤-٥-١ تقنيات تصنيع المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية.
١٥	١-٤-٥-١ طريقة القالب المفتوح (Open contact moulding).
١٧	٢-٤-٥-١ طريقة القولية بالانتقال (Resin transfer moulding RTM).
١٨	٣-٤-٥-١ القولية بالتفريغ (Vacuum-assisted resin transfer moulding VARTM).
١٨	٤-٤-٥-١ طريقة القولية بالضغط (Compression moulding).
١٩	٥-٤-٥-١ طريقة القولية بالحقن (Injection moulding).
١٩	٦-٤-٥-١ طريقة اللف الآلي (لف الفتائل Filament winding).
٢٠	٧-٤-٥-١ طريقة القولية بالسحب (Pultrusion method).
٢١	٦-١ راتنجات الإيبوكسي.
٢١	١-٦-١ مقدمة عامة.
٢١	٢-٦-١ راتنجات الإيبوكسي القائمة على ثنائي الفينول.
٢٤	٣-٦-١ تفاعلات راتنجات الإيبوكسي.
٢٤	٤-٦-١ أنواع راتنجات الإيبوكسي.

٢٤	١-٤-٦-١ راتنجات الإيبوكسي - نوفولاك.
٢٥	٢-٤-٦-١ راتنجات الإيبوكسي الأليفاتية.
٢٥	١-٢-٤-٦-١ الإيبوكسيدات الحلقية الأليفاتية.
٢٦	١-١-٢-٤-٦-١ مزايا الإيبوكسيدات الحلقية الأليفاتية.
٢٦	٢-٢-٤-٦-١ الزيوت النباتية الإيبوكسيدية.
٢٧	٣-٢-٤-٦-١ راتنجات الإيبوكسي الجليسيديل الأليفاتية.
٢٧	٣-٤-٦-١ راتنجات الإيبوكسي الهالوجينية.
٢٨	٤-٤-٦-١ ممددات الإيبوكسي.
٢٩	١-٤-٤-٦-١ مزايا ممددات الإيبوكسي.
٢٩	٥-٤-٦-١ راتنجات الجليسيديل أمين.
٣٠	١-٥-٤-٦-١ مزايا راتنجات الجليسيديل أمين.
٣٠	٦-٤-٦-١ مواد التلدين (الملدنات).
٣٠	١-٦-٤-٦-١ الاستخدامات الرئيسية لمواد التلدين.
٣٠	٢-٦-٤-٦-١ آثار مواد التلدين.
٣٠	٣-٦-٤-٦-١ أنواع مواد التلدين.
٣١	٧-٤-٦-١ المواد المائلة (المثخنات).
٣١	١-٧-٤-٦-١ الاستخدامات الرئيسية للمواد المائلة.
٣١	٢-٧-٤-٦-١ أنواع المواد المائلة.
٣١	أ- مواد مائلة تساهم كمواقد تقوية.
٣١	ب- مواد مائلة لا تساهم كمواقد تقوية.
٣٢	٨-٤-٦-١ الملونات والأصبغة.
٣٢	١-٨-٤-٦-١ أنواع الملونات.
٣٢	٩-٤-٦-١ مانعات الالتصاق في القالب.
٣٢	٥-٦-١ الخصائص البارزة لراتنجات الإيبوكسي.
٣٣	٦-٦-١ تطبيقات راتنجات الإيبوكسي.
٣٣	١-٦-٦-١ الطلاءات.
٣٤	٢-٦-٦-١ العزل الإلكتروني والكهربائي.
٣٤	٣-٦-٦-١ الأعمال الإنشائية.
٣٥	٤-٦-٦-١ اللواصق.
٣٥	٥-٦-٦-١ المواد المركبة.
٣٦	٧-١ الدراسات السابقة على المواد المركبة البوليميرية (إيبوكسي / ألياف زجاج).

٤٠	الفصل الثاني: المواد والتجهيزات والطرائق
٤٠	١-٢ المواد.
٤٠	١-١-٢ نظام الإيبوكسي/ المقسي.
٤٠	١-١-١-٢ خصائص نظام الإيبوكسي/ المقسي.
٤٥	٢-١-٢ الألياف الزجاجية المستخدمة في البحث كمادة تقوية
٤٥	٣-١-٢ المساحيق.
٤٦	٣-١-٢ الشمع.
٤٦	٢-٢ التجهيزات.
٤٦	١-٢-٢ قالب تحضير عينات المواد المركبة.
٤٦	٢-٢-٢ مكبس هيدروليكي.
٤٧	٣-٢-٢ خلاط كهربائي.
٤٧	٤-٢-٢ ميزان الكتروني.
٤٧	٥-٢-٢ جهاز اختبار الانعطاف.
٤٨	٦-٢-٢ قوالب تحضير النماذج الشمعية.
٤٨	٧-٢-٢ جهاز الصاد والموصد (الأوتوكلاف).
٤٩	٨-٢-٢ فرن الغاز.
٤٩	٩-٢-٢ فرن التلييد.
٥٠	٣-٢ طرائق تحضير العينات.
٥٠	١-٣-٢ تحضير عينات المواد المركبة.
٥٠	١-١-٣-٢ تحضير العينات الصفحائية باستخدام القالب المعدني.
٥٣	٢-١-٣-٢ تحضير العينات الاسطوانية باستخدام القالب الشمعي.
٥٤	٢-٣-٢ تحضير منتجات مواد مركبة باستعمال تقنية السكب بالشمع المهودور.
٥٥	١-٢-٣-٢ تشكيل منتجات مواد مركبة باستخدام القالب القشري (السيراميكي).
٥٥	١-١-٢-٣-٢ خطوات تشكيل منتجات مواد مركبة باستخدام القالب السيراميكي.
٥٦	١- تشكيل النموذج الشمعي.
٥٦	٢- تشكيل القالب السيراميكي القشري.
٥٧	٣- إزالة الشمع من القالب السيراميكي القشري.
٥٧	٤- حقن المادة المركبة ضمن القالب السيراميكي.
٥٧	٥- تحطيم القالب السيراميكي القشري.
٥٨	٢-٢-٣-٢ تشكيل منتجات مواد مركبة باستخدام القالب الشمعي.
٥٨	١-٢-٢-٣-٢ خطوات تشكيل منتجات مواد مركبة باستخدام القالب الشمعي.

٥٨	أ- تجهيز القالب المعدني الخاص بحقن القالب الشمعي والمادة المركبة الأولية.
٦٠	ب -حقن الشمع المصهور.
٦٠	ت- تشكيل المادة المركبة.
٦٢	٢-٤ طرائق القياس والاختبار.
٦٢	٢-٤-١ اختبار الانعطاف.
٦٤	الفصل الثالث: النتائج والمناقشة.
٦٤	٣-١ نتائج اختبار الانعطاف.
٧٥	٣-٢ نموذج آلة تشكيل منتجات مواد مركبة.
٧٦	٣-٢-١ وظيفة الآلية.
٧٦	٣-٢-٢ الميزات الاستثمارية.
٧٧	٣-٢-٣ الأقسام الرئيسية لآلة تشكيل منتجات مواد مركبة.
٧٧	٣-٢-٤ ملحقات لآلة تشكيل منتجات مواد مركبة.
٧٧	٣-٢-٤ آلية عمل النموذج.
٧٨	٣-٢-٥ الأفق المستقبلية.
٨٠	الفصل الرابع: الاستنتاجات والتوصيات
٨٢	المراجع
٨٥	ملحق: جداول اختبار العينات
٨٩	ملحق: المخططات التشغيلية لآلة حقن وتشكيل منتجات مواد مركبة.

فهرس الأشكال

٢	الشكل (١-١): بنية مادة الخشب.
٣	الشكل (٢-١): إنشاء المباني في الحضارات المصرية القديمة.
٣	الشكل (٣-١): هيكل سيارة وقارب من مادة مركبة مقواة بالألياف الزجاجية.
٤	الشكل (٤-١): أول جسر للمشاة مصنع من المواد المركبة في اسكتلندا.
٥	الشكل (٥-١): مكونات المادة المركبة.
٦	الشكل (٦-١): تصنيف المواد المركبة وفقاً لمادة التقوية.
١١	الشكل (٧-١): حصيرة من ألياف الكيفلار.
١١	الشكل (٨-١): حصيرة من ألياف الكربون.
١٢	الشكل (٩-١): أشكال الألياف الزجاجية.
١٥	الشكل (١٠-١): طريقة القالب المفتوح (يدوية).
١٦	الشكل (١١-١): طريقة القالب المفتوح باستخدام مسدس الرش.
١٦	الشكل (١٢-١): تطبيقات طريقة القالب المفتوح باستخدام مسدس الرش.
١٧	الشكل: (١٣-١) القولية بالانتقال.
١٧	الشكل (١٤-١): منتجات القولية بالانتقال.
١٨	الشكل (١٥-١): القولية بالتفريغ.
١٨	الشكل (١٦-١): القولية بالضغط.
١٩	الشكل (١٧-١): القولية بالحقن.
١٩	الشكل (١٨-١): اللف الآلي.
٢٠	الشكل (١٩-١): القولية بالسحب.
٢٠	الشكل (٢٠-١): تطبيقات القولية بالسحب.
٢١	الشكل (٢١-١) أكسيد الإيثيلين.
٢١	الشكل (٢٢-١): مركب ثنائي الفينول (F)، ورابع بروم البيسفينول (A).
٢٢	الشكل (٢٣-١): راتنجات الإيبوكسي بأساس ثنائي الفينول.
٢٣	الشكل (٢٥-١) راتنجات الإيبوكسي (DGEBA).
٢٥	الشكل (٢٦-١): إيبوكسي فينول نوفولاك (EPN).
٢٦	الشكل (٢٧-١): ٣،٤-إيبوكسي حلقي هيكسيل الميثيل-٣،٤-إيبوكسي حلقي هيكسان الكربوكسيل.
٢٦	الشكل (٢٨-١): زيوت فول الصويا الإيبوكسيدية.
٢٧	الشكل (٢٩-١): تفاعل الكحول مع مركب إبيكلورهيدين.
٢٧	الشكل (٣٠-١): إسترات الجليسيديل.
٢٨	الشكل (٣١-١): رباعي البروم ثنائي الفينول A.

٢٨	الشكل (٣٢-١): مركبات الإيثر ثنائي الجليسيديل البرومية.
٢٨	الشكل (٣٣-١): دوديكانول جليسيديل إيثر.
٢٨	الشكل (٣٤-١): ٤،٤،١ بوتانيدول ثنائي جليسيديل الإيثر.
٢٩	الشكل (٣٥-١): ثلاثي ميثيل البروبان ثلاثي جليسيديل الإيثر.
٢٩	الشكل (٣٦-١): ثلاثي جليسيديل - ٤ - أمين الفينول.
٣٠	الشكل (٣٧-١): رباعي الجليسيديل - ثنائي (٤ - أمين الفينول) - الميثان.
٣٣	الشكل (٣٨-١): تطبيقات راتجات الإيبوكسي.
٤٥	الشكل (١-٢): أشكال ألياف الزجاج المستخدمة.
٤٥	الشكل (٢-٢): كربونات الكالسيوم وهباب السليكا.
٤٦	الشكل (٣-٢): الشمع.
٤٦	الشكل (٤-٢): قالب تحضير عينات المواد المركبة.
٤٧	الشكل (٥-٢): مكبس هيدروليكي.
٤٧	الشكل (٦-٢): خلاط كهربائي.
٤٧	الشكل (٧-٢): ميزان الكتروني.
٤٧	الشكل (٨-٢): جهاز اختبار الانعطاف.
٤٨	الشكل (٩-٢): قوالب النماذج الشمعية.
٤٨	الشكل (١٠-٢): جهاز الصاد والموصد الأوتوكلاف.
٤٩	الشكل (١١-٢): فرن الغاز.
٤٩	الشكل (١٢-٢): فرن التلييد.
٥١	الشكل (١٣-٢): مزج الألياف الصوفية والمساحيق مع الإيبوكسي.
٥١	الشكل (١٤-٢): توزيع الخليط ضمن القالب
٥٢	الشكل (١٥-٢): وضع طبقات الألياف ضمن القالب
٥٣	الشكل (١٦-٢): مراحل تحضير القالب الشمعي للعينات الاسطوانية.
٥٤	الشكل (١٧-٢): المنهجية المتبعة عند اختيار طريقة تشكيل منتج مادة مركبة باستعمال تقنية السكب بالشمع المهدور.
٥٦	الشكل (١٨-٢): تشكيل النموذج الشمعي.
٥٦	الشكل (١٩-٢): تشكيل القالب السيراميكي القشري.
٥٧	الشكل (٢٠-٢): تحطيم القالب السيراميكي القشري
٥٨	الشكل (٢١-٢): مجسم قالب معدني لتحضير مادة مركبة أسطوانية
٥٩	الشكل (٢٢-٢): أجزاء القالب المعدني لتحضير مادة مركبة اسطوانية.
٥٩	الشكل (٢٣-٢): مقطع عرضي للقالب المعدني لتحضير المواد المركبة الأولية.
٦٠	الشكل (٢٤-٢): توزع المادة الشمعية ضمن تجويف القالب المعدني.

٦٠	الشكل (٢٥-٢) القالب الشمعي المتشكل ضمن القالب المعدني
٦١	الشكل (٢٦-٢): وضع الألياف ضمن فراغ القالب الشمعي
٦١	الشكل (٢٧-٢): تشكيل لولب M12 مع صامولة وتشغيله.
٦٢	الشكل (٢٧- ٢) اختبار الانحناء للعينات
٦٥	الشكل (١-٣): تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج الصوفية.
٦٥	الشكل (٢-٣): تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج النسيجية.
٦٦	الشكل (٣-٣): تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج الغير منسوجة.
٦٦	الشكل (٤-٣): تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج الهجينة.
٦٧	الشكل (٥-٣): مقارنة بين تغير مقتومة الانعطاف لعينات المواد المركبة من الإيبوكسي مع نسبة كل شكل من الألياف.
٦٨	الشكل (٦-٣): تغير معامل يونغ مع نسبة ألياف الزجاج الصوفية.
٦٨	الشكل (٧-٣): تغير معامل يونغ مع نسبة ألياف الزجاج النسيجية.
٦٩	الشكل (٨-٣): تغير معامل يونغ مع نسبة ألياف الزجاج غير المنسوجة.
٦٩	الشكل (٩-٣): تغير معامل يونغ مع نسبة ألياف الزجاج الهجينة.
٧٠	الشكل (١٠-٣): مقارنة بين تغير معامل يونغ لعينات موشورية من مواد مركبة من الإيبوكسي مع نسبة كل شكل من الألياف.
٧١	الشكل (١١-٣): مقارنة بين مقاومة الانعطاف لعينات موشورية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.
٧٢	الشكل (١٢-٣): مقارنة بين معامل يونغ لعينات موشورية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.
٧٣	الشكل (١٣-٣): مقارنة بين مقاومة الانعطاف لعينات أسطوانية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.
٧٣	الشكل (١٤-٣) مقارنة بين مقاومة الانعطاف لعينات أسطوانية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.
٧٤	الشكل (١٥-٣): مقارنة بين مقاومة الانعطاف لعينات المواد المركبة الاسطوانية والموشورية عند نسبة ألياف ٢٠ %.
٧٤	الشكل (١٦-٣): مقارنة بين معامل لعينات المواد المركبة الاسطوانية والموشورية عند نسبة ألياف ٢٠ %.
٧٥	الشكل (١٧-٣): نموذج آلة تشكيل منتجات مواد مركبة.
٧٦	الشكل (١٨-٣): الأقسام الرئيسية آلة تشكيل منتجات مواد مركبة.

فهرس الجداول

٩	الجدول (١-١): مقارنة بين بوليميرات التلدن الحراري وبوليميرات التصلب الحراري.
١٠	الجدول (٢-١): الخصائص الفيزيائية لبعض أنواع بوليميرات التلدن الحراري وبوليميرات التصلب الحراري.
١٤	الجدول (٣-١): الخصائص الميكانيكية لأصناف الرئيسية للألياف الزجاجية المستخدمة في المواد المركبة.
٤٠	الجدول (١-٢): مواصفات نظام الإيبوكسي/المقسي.
٤١	الجدول (٢-٢): مواصفات لزوجة نظام الإيبوكسي/المقسي.
٤١	الجدول (٣-٢): نسبة المزج في بنظام الإيبوكسي/المقسي.
٤٢	الجدول (٤-٢): زمن التصلب والتهلّم في نظام الإيبوكسي/المقسي.
٤٢	الجدول (٥-٢): دورة المعالجة النموذجية لنظام الإيبوكسي/المقسي المستخدم
٤٣	الجدول (٦-٢): خصائص نظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة (التصالب).
٤٤	الجدول (٧-٢): خصائص اختبار الشد لنظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة.
٤٤	الجدول (٨-٢): خصائص اختبار الانعطاف لنظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة.
٤٤	الجدول (٩-٢): امتصاصية الماء لنظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة.
٥٠	الجدول (١٠-٢): أوزان الإيبوكسي والمقسي والألياف الزجاجية (المطحونة- الصوفية) والمساحيق في العينات.
٥٢	الجدول (١١-٢): النسب الحجمية والوزنية للألياف والمادة الرابطة.
٥٢	الجدول (١٢-٢): العينات المحضرة وفقاً لنسب الألياف (النسجية - النسيج الغير منسوج - الهجينة)
٦٤	الجدول (١-٣): نتائج اختبارات الانعطاف لعينات مواد مركبة إيبوكسي - ألياف زجاج وفقاً لنسبة الألياف وشكلها.
٧١	الجدول (٢-٣): نتائج اختبارات الانعطاف على عينات موشورية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا.
٧٢	الجدول (٣-٣): نتائج اختبارات الانعطاف لعينات اسطوانية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.

جدول الاختصارات والرموز

MMC	Metal Matrix Composites
CMC	Ceramic Matrix Composites
PMC	Polymer Matrix Composites
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
PE	Polyethylene
HDPE	High-density polyethylene
LDPE	Low-density polyethylene
PA	polycaprolactam
PB	Polybutylene
PC	Polycarbonates
PET	Polyethylene terephthalate
PMMA	Poly (methyl methacrylate)
PP	Polypropylene
PS	Polystyrene
PTFE	Polytetrafluoroethylene
PVC	Polyvinyl chloride
EP	Epoxy
MF	Melamine formaldehyde
PF	Phenol formaldehyde
RPU	Rigid Thermoset Polyurethane
UPE	Unsaturated Polyester
UF	Urea-formaldehyde
VE	Vinyl Ester
RTM	Resin Transfer Moulding
VARTM	Vacuum-assisted Resin Transfer Moulding
EPN	Epoxy Phenol Novolac
ECN	Epoxy Cresol Novolac

الخلاصة.

تُظهر المواد المركبة أهمية كبيرة في التطبيقات الإنشائية، ويعتبر تطوير مواد مركبة جديدة أو إجراء تعديلات على مواد مركبة موجودة في الأصل من أكبر التحديات التي تواجه مهندسي المواد، بالإضافة إلى تطوير تقنيات تساهم في أتمتة تشكيل منتجات من هذه المواد، تتميز المادة المركبة البوليميرية من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج بخصائص جيدة من ناحية خفة الوزن والمتانة والعزل الحراري والصوتي والكهربائي وغيرها من الخصائص التي تلبي حاجات التطبيقات المختلفة.

أهمية البحث.

لا يمكن استخدام المواد المعدنية ضمن بعض أجزاء المنظومات والتجهيزات كونها تعمل ضمن شروط عمل محددة تتطلب خفة في الوزن وعازلية حرارية وكهربائية، وغيرها من العوامل، لذا يتم الاستغناء من منتجات من مواد مركبة بوليميرية تتصف بخصائص يمكنها أن تؤدي الوظيفة المطلوبة منها. لذلك، يُعدّ العمل على تحسين الخواص الميكانيكية للمواد المركبة البوليميرية وتطوير تقنيات تشكيلها ذو أهمية في تحسين شروط عمل المنظومات القائمة عليها.

إشكالية البحث.

جرى تحضير مادة مركبة بوليميرية من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج، ويهدف استقصاء تأثير شكل الألياف، تم استخدام أشكال مختلفة من ألياف زجاج وتغيير نسبتها، ودراسة الخواص الميكانيكية (مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ) والمقارنة بينها، كما جرى توظيف تقنية السكب بالشمع المهدور والقالب الشمعي بغية تشكيل منتجات من مواد مركبة بوليميرية.

أهداف البحث.

- التعرف على المادة المركبة المنشودة في البحث والمواد الداخلة في تركيبها (الإيبوكسي وألياف الزجاج)؛
- دراسة تأثير نسبة ألياف الزجاج وشكلها على الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة من مادة رابطة من الإيبوكسي؛
- تطوير تقنية قولبة وتشكيل منتجات مادة مركبة بوليميرية بالاستفادة من تقنية السكب بالشمع المهدور، والقالب الشمعي؛
- العمل على مشروع تصميم آلة تشكيل مواد مركبة من مادة رابطة بوليميرية مقواة بالألياف.

أقسام البحث:

الفصل الأول: الدراسة النظرية.

تناول المواد المركبة وخصائصها وتطبيقاتها وتصنيفاتها وفقاً للمادة الرابطة ومادة التقوية وجرى التركيز على المادة المركبة المكونة من مادة رابطة بوليميرية والمقواة بالألياف، واختيار أحد أنواع راتنجات الإيبوكسي كمادة رابطة بوليميرية، وهو من عائلة بوليميرات التصلب الحراري، واختيار ألياف الزجاج كمادة تقوية للمادة المركبة موضوع البحث. جرى أيضاً التطرق لبعض الدراسات التي قامت حول مواد مركبة مشابهة للمادة المركبة المنشودة في البحث بغرض الاستفادة من الاختبارات والنتائج المحصلة من هذه الدراسات.

الفصل الثاني: المواد والتجهيزات والطرائق.

تضمن استعراض جميع المواد وتجهيزات العمل وطرائق الاختبار في ها العمل، وتحضير عينات من المادة المركبة المنشودة بنسب وزنية مختلفة من ألياف الزجاج بأنواعها (المطحون - الصوفي - النسيجي)، ودراسة خواصها الميكانيكية (مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ). كما اشتمل هذا الفصل على توظيف تقنية السكب بالشمع المهدور، والاستفادة من القوالب السيراميكية، ومن القوالب الشمعية للحصول على منتجات مصنعة / نصف مصنعة، وعلى مواد مركبة أولية تخضع لعمليات تشغيل لاحقة للحصول على المنتج المطلوب.

الفصل الثالث: النتائج والمناقشة.

تناول عرض نتائج قياس الخواص الميكانيكية لعينات المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج، ومناقشة النتائج، وعرض المنتجات مصنعة / نصف مصنعة أولية لتقنية السكب بالشمع المهدور القوالب السيراميكية والقوالب الشمعية.

- الفصل الرابع: الاستنتاجات والتوصيات.

الفصل الأول الدراسة النظرية

الفصل الأول

الدراسة النظرية

١-١ مقدمة عامة.

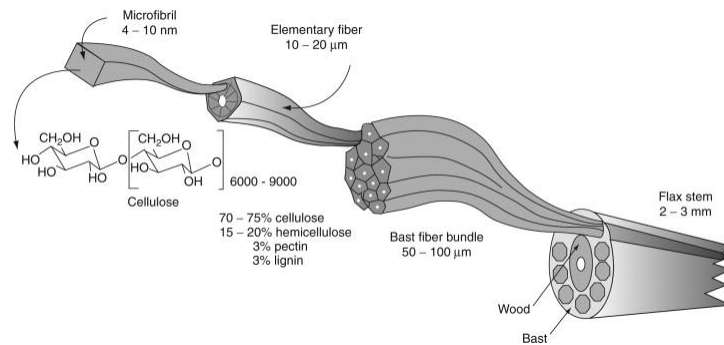
لعبت المواد المركبة دوراً مهماً عبر تاريخ البشرية، بدءاً من الحضارات المبكرة وصولاً للابتكارات المستقبلية، فهي تقدم فوائد عديدة أهمها مقاومة التآكل، ومرونة التصميم، والمتانة، والمقاومة، والوزن الخفيف. ولقد أصبح للمواد المركبة دور في جميع مجالات حياتنا اليومية كالمنتجات المستخدمة في التطبيقات الإنشائية والطبية والنفط والغاز والنقل البري والبحري والرياضة والفضاء وغيرها الكثير، حتى أن بعض التطبيقات، مثل السفن الفضائية، لا يمكنها أن تتحقق بدون المواد المركبة.

٢-١ تعريف المواد المركبة.

المادة المركبة هي عبارة عن اجتماع مادتين هندسيتين أو أكثر عبر سطح بيني على مستوى القياس الماكروي (العياني). تشكل إحداهما مادة رابطة والأخرى مادة تقوية، بالإضافة لمحسنات ومضافات أخرى (مواد مالئة - مخففات - مواد تلدن - ملونات... الخ)، ولا يحدث تفاعل بين المواد الداخلة، وتتشكل بالنتيجة مادة مفيدة لها خواص ومزايا غير متوفرة في كل مادة لوحدها [١].

٣-١ تاريخ المواد المركبة.

إن المواد المركبة موجودة في الطبيعة، فقطعة الخشب، على سبيل المثال، هي عبارة عن مادة مركبة تتألف من مادة حاضنة تسمى اللجنين مع ألياف سليولوز طويلة متماسكة معاً. يُبين الشكل (١-١) بنية مادة الخشب.



الشكل (١-١): بنية مادة الخشب.

يستخدم البشر المواد المركبة منذ آلاف السنين في مناطق وحضارات مختلفة. وتعود الاستخدامات الأولى للمواد المركبة إلى حضارات بلاد ما بين النهرين، حيث قام هؤلاء القدماء بلصق شرائح الخشب بزوايا مختلفة لإنشاء خشب رقائقي في ٣٤٠٠ قبل الميلاد. في عام ١٥٠٠ قبل الميلاد، استخدم المصريون الأوائل وحضارات بلاد ما بين النهرين خليطاً مكوناً من الطين والقش لإنشاء مبانٍ مقاومة ومتينة، حيث يوفر الجمع بين الطين والقش في كتلة من الطوب خصائص مقاومة عالية ضد كل من الضغط والاهتراء والانحناء [١]. يُبين الشكل (٢-١) تشييد المباني في الحضارات المصرية القديمة.

الشكل (٢-١): تشييد المباني في الحضارات المصرية القديمة.



كان العديد من التطورات في المواد المركبة نتيجة لاحتياجات زمن الحرب، فخلال الحرب العالمية الثانية، تم تطوير العديد من المواد المركبة ونقلها من المختبرات إلى الإنتاج الفعلي [١].

أدت هذه الحاجة لتطوير المواد المركبة إلى صناعة المواد المركبة من مادة حاضنة بوليميرية ومقواه بالألياف، ففي عام ١٩٤٥، تم استخدام أكثر من ٧ ملايين رطل من الألياف الزجاجية لمنتجات مختلفة، وكانت التطبيقات العسكرية في المرتبة الأولى. استمرت المواد المركبة في التقدم بعد الحرب ونمت بسرعة خلال فترة الخمسينيات.

عمل المخترعون والمصنعون على إدخال المواد المركبة من مادة حاضنة بوليميرية ضمن مجالات القطاع العام مثل الفضاء والبناء وخاصة النقل، حيث تم تقديم أول هيكل للقارب في عام ١٩٤٦، وتم تصنيع واختبار هيكل السيارة بالكامل من المواد المركبة في عام ١٩٤٧. يُبين الشكل (٣-١) هيكل سيارة وقارب من مادة مركبة مقواه بالألياف الزجاجية [١].



الشكل (٣-١): هيكل سيارة وقارب من مادة مركبة مقواه بالألياف الزجاجية.

خلال أواخر السبعينيات وأوائل الثمانينيات، جرى استخدام المواد المركبة لأول مرة في تطبيقات البنية التحتية في آسيا وأوروبا. وفي التسعينيات جرى وضع أول جسر للمشاة مصنّع بالكامل من المواد المركبة في اسكتلندا [٢] - الشكل (٤-١).



الشكل (٤-١): أول جسر للمشاة مصنّع من المواد المركبة في اسكتلندا.

وحتى يومنا هذا، يستمر تطوير تطبيقات المواد المركبة من خلال دمج المواد النانوية مع الألياف والراتنجات المستخدمة في المواد المركبة الجديدة. ففي أوائل القرن الحادي والعشرين، بدأ استخدام تقنية النانو في المنتجات التجارية، كما تتناول الأبحاث الراهنة استخدام أنابيب الكربون النانوية كمادة تقوية في المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية لتحسين الخصائص الميكانيكية والحرارية والكهربائية للمنتج [٣].

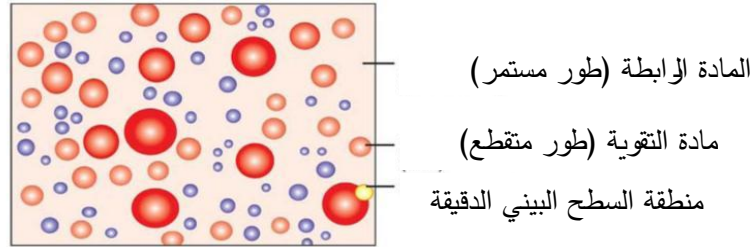
في نطاق تطوير مصادر الطاقة المتجددة، يتطور استعمال المواد المركبة في تصميم وإنتاج شفرات العنفات الريحية بهدف التغلب على القيود المفروضة على الحجم، وهذا يتطلب مواد مركبة متقدمة مقاومة للحرارة والمواد الكيميائية والعوامل الجوية [٤].

وفي السنوات الأخيرة، تزايد الوعي البيئي والحاجة إلى تحقيق التنمية المستدامة، وبدأ الاهتمام باستخدام الألياف الطبيعية كمواد تقوية لتحل محل الألياف الاصطناعية في المواد المركبة لتطبيقات العربات [٥-٧].

١-٤ مكونات المادة المركبة.

تتألف المادة المركبة بشكل عام من ثلاث مكونات:

- المادة الرابطة كطور مستمر؛
 - مادة التقوية كطور متقطع أو مشتت ضمن المادة الرابطة، بما في ذلك الألياف والجسيمات؛
 - منطقة السطح البيني الدقيقة، وعوامل الربط السيلانية بين المادة الرابطة ومادة التقوية.
- من خلال الاختيار الدقيق لكل من المادة الرابطة، ومادة التقوية، وتقنية التصنيع التي تجمعها معاً، يمكن تكييف الخصائص لتلبية متطلبات محددة [٨]. يُبين الشكل (١-٥) مكونات المادة المركبة.



الشكل (١-٥): مكونات المادة المركبة.

١-٤-١ تصنيف المواد المركبة وفقاً للمادة الرابطة (Matrix).

يمكن تصنيف المواد المركبة وفقاً للمادة الرابطة بشكل عام إلى ثلاثة أنواع:

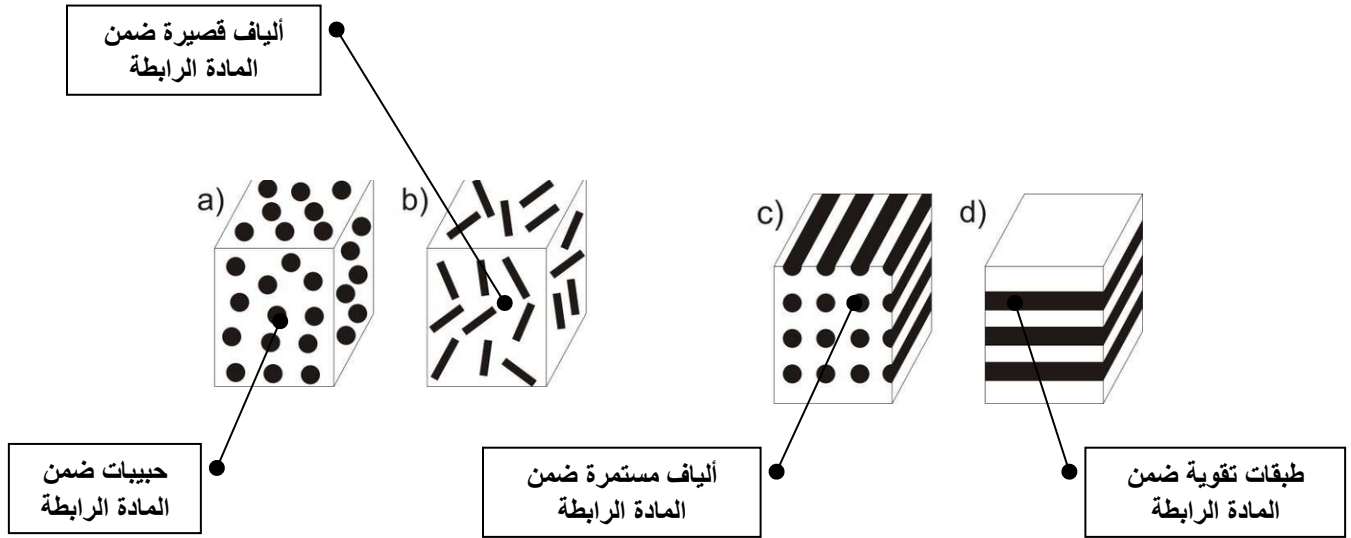
- مواد مركبة ذات مادة رابطة معدنية (Metal Matrix Composites MMC)؛
- مواد مركبة ذات مادة رابطة سيراميكية (Ceramic Matrix Composites CMC)؛
- المواد المركبة ذات مادة رابطة بوليميرية (Polymer Matrix Composites PMC).

١-٤-٢ تصنيف المواد المركبة وفقاً لمادة التقوية. (Reinforcements)

يمكن، بشكل عام، تصنيف المواد المركبة وفقاً لهندسة مادة التقوية إلى أربعة أنواع:

- المواد المركبة الليغية المقواة بألياف (مستمرة أو قصيرة) ضمن مادة رابطة؛
- المواد المركبة الحبيبية المقواة باستعمال حبيبات ضمن مادة رابطة؛
- المواد المركبة الصفائحية المقواة باستعمال طبقات من مواد تقوية مختلفة؛
- مواد مركبة هجينة تتشارك فيها الأنماط الثلاثة السابقة أو بعض منها.

يُبين الشكل (٦-١) تصنيف المواد المركبة وفقاً لمادة التقوية.



الشكل (٦-١): تصنيف المواد المركبة وفقاً لمادة التقوية.

١-٥ المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية وتقانات تشكيلها.

١-٥-١ تعريف المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية (PMC).

هي مادة مركبة مكونة من مجموعة متنوعة من الألياف القصيرة أو المستمرة المدمجة ضمن مادة رابطة بوليميرية تعمل على نقل الأحمال بين المادة الرابطة والألياف، تشمل بعض مزايا هذه المواد خفة الوزن، والجساءة العالية، والمقاومة العالية على طول اتجاه الألياف، بالإضافة للمقاومة الجيدة للتآكل.

١-٥-٢ المادة الرابطة البوليميرية.

هناك العديد من البوليميرات التي يمكن استخدامها كمادة رابطة ضمن المواد المركبة، وهي تندرج تحت صنفين أساسيين وما:

- بوليميرات التصلب الحراري (Thermoset Polymers)؛

- بوليميرات التلدن الحراري (Thermoplastic Polymers).

عادة ما تستخدم بوليميرات التصلب الحراري أكثر من بوليميرات التلدن الحراري، وعلى الرغم من التشابه بين هذين الصنفين من البوليميرات، إلا أن لهما خصائص وتطبيقات مختلفة جداً. يمكن أن يساعد فهم الاختلافات في الأداء في اتخاذ قرارات أفضل بشأن تحديد مصادر المواد الداخلة في تركيب المواد المركبة وتصاميم منتجاتها.

١-٥-٢-١ بوليميرات التصلب الحراري.

هي المواد التي تخضع لتفاعل كيميائي أو عملية معالجة (تقسية)، وتتحول عادة من مادة سائلة إلى مادة صلبة، وتحتوي المادة، في شكلها غير المعالج، على جزيئات صغيرة غير مرتبطة تعرف باسم المونومير. يبدأ التفاعل الكيميائي أو (التقسية) عن طريق إضافة مادة ثانية كعامل تصالب أو تقسية، وبوجود حرارة أو بعض المؤثرات المنشطة الأخرى، سوف يحدث من خلال هذا التفاعل ترابط بين سلاسل البوليمير، وتتشكل شبكة بوليميرية ثلاثية الأبعاد، مما يتسبب في تصلب المادة بشكل دائم غير عكوس. بعد ذلك، سيؤدي التعرض للحرارة العالية بعد التصلب إلى تحلل المادة وتقادها وليس الانصهار.

تتصف بوليميرات التصلب الحراري بتكاليف مواد أولية منخفضة، وغالباً ما توفر إمكانية تبليل ألياف التقوية وإشباعها، وتشكياً سهلاً للأجزاء الهندسية النهائية، كما أن معالجتها أسهل من معالجة بوليميرات التلدن الحراري.

١-٥-٢-٢ بوليمرات التلدن الحراري.

هي مواد متلدنة قابلة للانصهار، وتتم معالجتها بالحرارة، فعند رفع درجة حرارة هذه المواد، تتمتع وتتصهر بما يكفي لمعالجتها، وعند إزالة مصدر الحرارة، وانخفاض درجة حرارتها، تتجمد مرة أخرى إلى مادة صلبة.

يمكن تكرار هذه العملية، ومع ذلك، يمكن أن تتعرض المادة للتقادم والتقهقر في حالتها المنصهرة، لذلك، هناك حد لعدد مرات إعادة المعالجة قبل أن تبدأ خصائصها بالتأثر.

تميل بوليمرات التلدن الحراري إلى أن تكون أكثر متانة أو أقل قساوة من بوليمرات التصلب الحراري، ويمكن أن تتمتع بمقاومة كيميائية أفضل، كما يمكن إعادة تدويرها وإصلاحها بسهولة أكبر.

يقدم الجدول (١-١) مقارنة بين بوليمرات التلدن الحراري وبوليمرات التصلب الحراري، ولا يوفر هذا الجدول جميع المعلومات، بل بعض المعلومات للباحثين والمُصنعين عند التفكير في استخدام هذه المواد [٩].

كما يوضح الجدول (٢-١) الخصائص الفيزيائية لبعض أنواع بوليمرات التلدن الحراري وبوليمرات التصلب الحراري [١٠].

الجدول (١-١): مقارنة بين بوليميرات التلدن الحراري وبوليميرات التصلب الحراري.

بوليميرات التلدن الحراري	بوليميرات التصلب الحراري	
تبدأ الحبيبات هذه البوليميرات بالتلدن عند تسخينها، وتصبح أكثر سيولة مع زيادة الحرارة. تسمح هذه الخاصية بإعادة تشكيل هذه المواد وإعادة تدويرها دون أن يؤثر ذلك سلباً على خصائصها الفيزيائية.	تحتوي على مونوميرات تتشابك معاً أثناء عملية المعالجة لتشكيل رابطة كيميائية لا تتفكك بالحرارة مما يمنع إعادة صهر المنتج عند استخدام الحرارة، وهذا ما يجعلها مثالية للتطبيقات عالية الحرارة مثل الإلكترونيات وتطبيقاتها.	المعالجة
<ul style="list-style-type: none"> • توفر عادة مقاومة عالية ومقاومة للتقلص وقابلية للانحناء بسهولة، • قابلة عالية لإعادة التدوير، • يمكن أن تتصهر إذا تم تسخينها أو إعادة تشكيلها، مما يمنح القدرة على إعادة التشكيل، • صعوبة تبليل ألياف التقوية والمواد المائنة، • مقاومة صدم عالية، • مقاومة كيميائية، • خيارات حصول على سطح بلوري صلب أو غير بلوري، • إنهاء متفوق من الناحية الجمالية، • صديقة للبيئة، • مكلفة بشكل عام أكثر من بوليميرات التصلب الحراري، 	<ul style="list-style-type: none"> • تحسين الخواص الميكانيكية للمادة المركبة بشكل كبير، مما يعزز المقاومة الكيميائية، ومقاومة الحرارة. غالباً ما تستخدم للمنتجات المحكمة الإغلاق (الكثيمة) بسبب مقاومتها للتشوه، • لا يمكن إعادة تدويرها، • لا يمكن إعادة تشكيلها (لا تتصهر بالحرارة)، • سهولة تبليل ألياف التقوية والمواد المائنة، • أكثر مقاومة لدرجات الحرارة المرتفعة من بوليميرات التلدن الحراري، • تصميم مرن للغاية، • مظهر جمالي ممتاز، • ثبات الأبعاد، • أكثر صعوبة في إنهاء السطوح، • تكلفه منخفضة نسبياً، 	الإيجابيات والسلبيات

الجدول (٢-١): الخصائص الفيزيائية لبعض أنواع بوليميرات التلدن الحراري وبوليميرات التصلب الحراري.

بوليميرات التلدن الحراري				
البوليمير	الكثافة (غ/سم ^٣)	الامتطالة النسبية %	مقاومة الشد (ميغا باسكال)	معامل يونغ (غيغا باسكال)
أكريلونيتريل بوتيدين ستيرين (ABS)	١.١-١.٠	٢٧٠.٠	٤٧.٠	٢.١
البولي إيثيلين (PE)	٠.٩	٣٥٠.٠	١٨	٠.٥
بولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE)	١.٠-٠.٩	١٥٠	٣٨.٢-٣٢	١.٣
بولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)	٠.٩	٤٠٠	١١.٦-١٠	٠.٣-٠.٢
النايلون ٦ (PA 6)	١.١	٦٠.٠	٨١.٤	٢.٨
النايلون ٦٦ (PA 66)	١.١	٦٠.٠	٨٢.٧	٢.٨
بولي بيوتيلين (PB)	٠.٩٥	٣٠٠-٢٢٠	٣٥-٢٩	٠.٣٠-٠.٢٩
بولي كربونات (PC)	١.٢	٢٠٠	٦٩	٢.٣
البولي إيثيلين تيريفتالات (PET)	١.٦-١.٥	٣٠٠	١٥٩-٥٥	٩.٠-٢.٣
بولي ميثيل ميتا كريلات (PMMA)	١.٢-١.١	٢.٥	٧٢.٤	٣.٠
بولي بروبيلين (PP)	١.٣-٠.٩	٨٠	٣٥.٨	١.٦
بولي ستايرين (PS)	١.٠٤	١.٦	٣٤.٠	٣.٠
بولي تترافلور الإيثيلين (PTFE)	٢.٢	٦٥٠-٤٠	٤١.٤-٠.٨٦٢	٢.٢٥-٠.٣٩٢
بولي فينيل كلوريد (PVC)	١.٥-١.٣	٨٠-٥٠	٩٠-٥٢	٤.٠-٣.٠
بوليميرات التصلب الحراري				
البوليمير	الكثافة (غ/سم ^٣)	الامتطالة النسبية %	مقاومة الشد (ميغا باسكال)	معامل يونغ (غيغا باسكال)
الإيبوكسي (EP)	١.٣-١.٢	١.٣	١٣٠-٥٥	٤.١-٢.٧
ميلامين فورمالديهايد (MF)	١.٦-١.٥	٠.٦	٦٥.٠	١٢.٠
الفينول فورمالديهايد (PF)	١.٢	١.٢	٦٠-٤٥	٧.٠-٤.٠
البولي يوريثان المتصلب بالحرارة (RPU)	١.٢	٩٠.٠	٦٠	٢.٢
البوليستر غير المشبع (UPE)	١.١	٢.٠	١٠٥-٣٤	٣.٥-٢.١
اليوريا فورمالديهايد (UF)	١.٦-١.٥	٠.٨	٦٥.٠	٩.٠
مطاط البولي يوريثان	١.٣-١.٢	٥٨٠-٣٠٠	٣٩.٠	١٠-٢
إستر الفينيل (VE)	١.٢٣	١٢٠-٢٠	٨١-٧٣	٣.٥-٣.٠

١-٥-٣ مواد التقوية المستخدمة في المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية

يتم استخدام أنواع مختلفة من الألياف في هذا النوع من المواد المركبة، والأكثر شيوعاً هي:

١- ألياف الكربون؛

٢- ألياف الكيفلار؛

٣- الألياف الطبيعية: (القطن - جوز الهند - الخشب - الكتان - القنب - الخ)؛

٤- الألياف الزجاجية.



الشكل (١-٨): حصوة من ألياف الكربون.



الشكل (١-٧): حصوة من ألياف الكيفلار.

١-٣-٥-١ الألياف الزجاجية.

الألياف الزجاجية هي نوع شائع من الألياف يستخدم كمادة تقوية في المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية.

أ - أشكال الألياف الزجاجية.

١- عشوائية على شكل نسيج غير منسوج من الألياف المقطعة؛

٢- على شكل قطعة قماش زجاجية، نسيج من الألياف المستمرة؛

٣- ألياف قصيرة مقطعة؛

٤- ألياف مطحونة [١١].

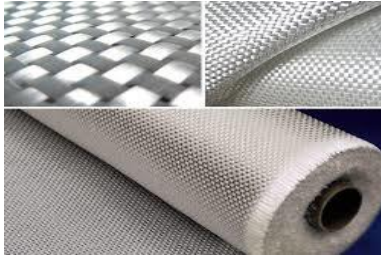
يُبين الشكل (٩-١) أشكال الألياف الزجاجية.



ألياف زجاجية مقطعة.



ألياف زجاجية مطحونة.



نسيج منسوج من الألياف الزجاجية.



نسيج غير منسوج من الألياف الزجاجية المقطعة.

الشكل (٩-١): أشكال الألياف الزجاجية.

ب- خصائص الألياف الزجاجية.

- ١- أرخص وأكثر مرونة من ألياف الكربون؛
- ٢- امتصاصية رطوبة منخفضة؛
- ٣- مقاومة شد عالية؛
- ٢- أعلى مقاومة من العديد من المعادن مقارنة بالوزن؛
- ٣- غير مغناطيسية، وغير موصلة، وشفافة للإشعاع الكهرومغناطيسي؛
- ٤- يمكن تشكيلها في أشكال معقدة؛
- ٥- خاملة كيميائياً في العديد من الشروط [١٢].

ج- أصناف الألياف الزجاجية.

على الرغم من أن السليكا النقية يمكن تشكيلها على شكل ألياف زجاجية قابلة للتطبيق تماماً، إلا أن ذلك يتطلب درجات حرارة عالية جداً، وهذا ما يُعدّ قيداً ما لم تكن هناك حاجة إلى خصائصها المحددة، لذا فمن المعتاد إدخال أكاسيد أخرى مع السليكا في الزجاج لخفض درجة حرارة الصهر والتشكيل، وتضفي هذه الأكاسيد أيضاً العديد من الخصائص الأخرى على الزجاج في تطبيقات مختلفة.

١- الصنف A (زجاج الكالسيوم القلوي).

مع القليل من أكسيد البورون أو بدونه وهو النوع الأول من الزجاج المستخدم في الألياف الزجاجية.

٢- الصنف E (الزجاج الإلكتروني).

وهو زجاج يحتوي على سيليكات الألومنيوم والبور، وعلى أكاسيد قلوية بنسبة أقل من ١٪ (نسبة وزنية)، ويستخدم بشكل أساسي في المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية المقواة بألياف الزجاج، وهو خالٍ من القلويات، وكان أول تركيبة زجاجية تُستخدم لتشكيل الألياف المستمرة، ويشكل الآن معظم إنتاج الألياف الزجاجية في العالم.

٣- الصنف C (الزجاج الكيميائي).

وهو زجاج الكالسيوم القلوي مع نسبة عالية من أكسيد البور، وهو مقاوم للمواد الكيميائية، ومعظمها من الأحماض التي تخرب الزجاج الإلكتروني، لذا، يستخدم هذا الزجاج في البيئات الحمضية أو المعرضة للتآكل.

٤- الصنف D (زجاج ثابت العزل الكهربائي المنخفض).

عبارة عن زجاج منخفض ثابت العزل.

٥- الصنف R (زجاج التقوية).

يستخدم لتوفير خصائص ميكانيكية عالية وهو المعادل الأوروبي للزجاج من الصنف S.

٦- الصنف S (زجاج عالي المقاومة).

يستخدم عندما تكون مقاومة الشد العالية مهمة، هو زجاج عالي المقاومة، والنوع الشائع هو زجاج S. تتمتع أليافه بمعامل يونغ مرتفع ومقاومة درجات الحرارة أعلى من زجاج الصنف E، لكنها أعلى بكثير، وهي مهمة في المواد المركبة لبناء الطائرات.

يُبين الجدول (٣-١) الخصائص الميكانيكية للأصناف الرئيسية للألياف الزجاجية المستخدمة في المواد المركبة [١٠].

الجدول (٣-١): الخصائص الميكانيكية للأصناف الرئيسية للألياف الزجاجية المستخدمة في المواد المركبة.

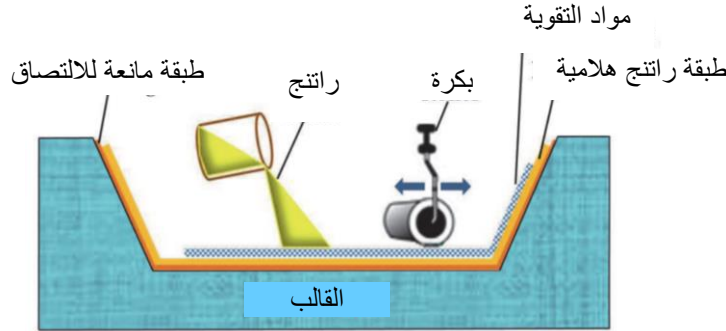
صنف الألياف	الكثافة (غ/سم ^٣)	معامل يونغ (غيغا باسكال)	مقاومة الليف (ميغا باسكال)	التشوه عند الكسر (%)
A	٢.٤٦٠	٧٣	٢٧٦٠	٣.٦
C	٢.٤٦٠	٧٤	٢٣٥٠	-
D	٢.١٤٠	٥٥	-	-
E	٢.٥٥٠	٧١	٢٤٠٠	٣.٣٧
R	٢.٥٥٠	٨٦	٣١٠٠	٥.٢
S	٢.٥٥٠	٨٥	٣٩١٠	٤.٦
S2	٢.٤٦٠	٩٠	-	-

١-٥-٤ تقنيات تصنيع المواد المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية.

هناك عدة طرائق لتصنيع المواد المركبة. ويعتمد اختيار طريقة تصنيع المنتج على المواد والتصميم والأداء والاستخدام النهائي أو التطبيق.

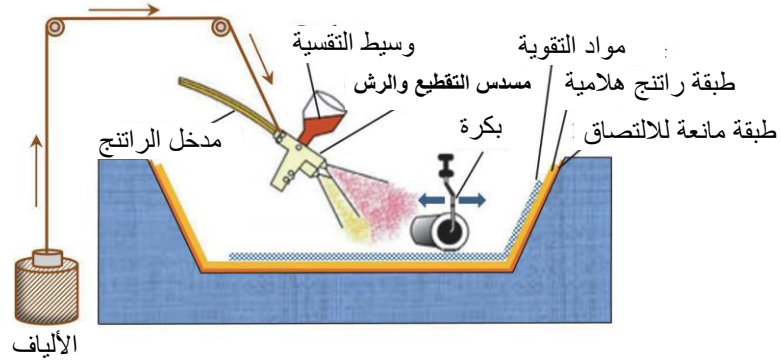
١-٤-٥-١ طريقة القالب المفتوح (Open contact moulding).

يجري إشباع الألياف بالراتنج يدوياً، وتكون على شكل أقمشة منسوجة أو محبوكة أو مخيطة أو مرتبطة، وفي هذه الطريقة، يُعالج القالب أولاً بمواد مانعة للالتصاق، وتوضع الألياف الجافة على القالب، ثم يُسكب الراتنج السائل وينتشر على طبقات الألياف. ويتحقق ذلك عادةً عن طريق، إما البكرات، أو الفرشاة التي تقوم بتبليل الألياف، وإزالة الهواء المحتبس في الطبقات. تُبلل طبقات قليلة من الألياف، وتترك لتتم عملية المعالجة (التقسية) في شروط محيطية نظامية [١٣]. بعد انتهاء معالجة هذه الطبقات، يجري إضافة مزيد منها، كما في الشكل (١-١٠).



الشكل (١-١٠): طريقة القالب المفتوح (يدوية).

يُعدّ الرش طريقة مباشرة لتشكيل المواد المركبة. في هذه الطريقة، يُعالج القالب أولاً بمواد مانعة للالتصاق. إذا استُعملت طبقة هلامية من الراتنج، يجري تطبيقه بالرش في القالب بسماكة معينة بعد وضع المواد المانعة للالتصاق، ويكون القالب جاهزاً للمعالجة. يتم رش الألياف والراتنج مع مواد التقسية عند لزوجة ٥٠٠-١٠٠٠ سنتي بواز في القالب باستخدام مسدس رش يُقَطَّع الألياف المستمرة إلى أطوال حزم قصيرة، ثم ينفخها مباشرة في تيار الراتنج، بحيث يحدث تطبيق كلتا المادتين في وقت واحد على سطح القالب، كما في الشكل (٢-٥). في خطوة أخيرة من عملية الرش، يجري ضغط الصفائح يدوياً باستخدام بكرات. ثم تتم معالجة (تقسية) المادة المركبة وإزالتها من القالب [١٤].



الشكل (١١-١): طريقة القالب المفتوح باستخدام مسدس الرش.

تُعدّ طريقة القالب المفتوح شائعةً لتصنيع منتجات المواد المركبة المقواة بالألياف الزجاجية مثل أحواض الاستحمام، وأجسام القوارب، والمصدات، وكبائن الشاحنات، وغيرها من الأشكال الكبيرة وغير المعقدة نسبياً. يُبين الشكل (١٢-١) تطبيقات طريقة القالب المفتوح باستخدام مسدس الرش.

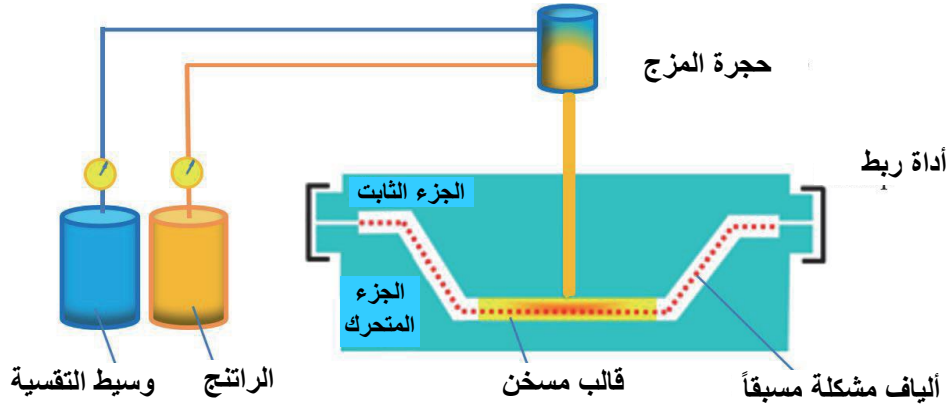


الشكل (١٢-١): تطبيقات طريقة القالب المفتوح باستخدام مسدس الرش.

١-٥-٤-٢ طريقة القولية بالانتقال (Resin transfer moulding RTM).

تعتبر القولية بالانتقال (RTM)، التي تسمى أحياناً بالقولبة السائلة، عملية بسيطة إلى حد ما. في هذه التقنية، يعالج القالب أولاً بالمواد المانعة للالتصاق، ثم توضع مواد التقوية الجافة التي تأخذ شكلاً محدداً في القالب الذي يُغلق بعد ذلك.

يُبين الشكل (١٣-١) طريقة القولية بالانتقال.



الشكل (١٣-١): القولية بالانتقال.

يتم ضبط كمية الراتنج والمحفز منخفض اللزوجة وخطهما، ثم ضخهما في القالب تحت ضغط منخفض إلى متوسط من خلال منافذ الحقن، باتباع مسارات محددة مسبقاً. يستخدم الراتنج منخفض اللزوجة في طريقة القولية بالانتقال لضمان تغلغه بسرعة بين الألياف خلال القولية، وبشكل كامل قبل التصلب، خاصة مع المواد المركبة ذات السماكة العالية [١٥].

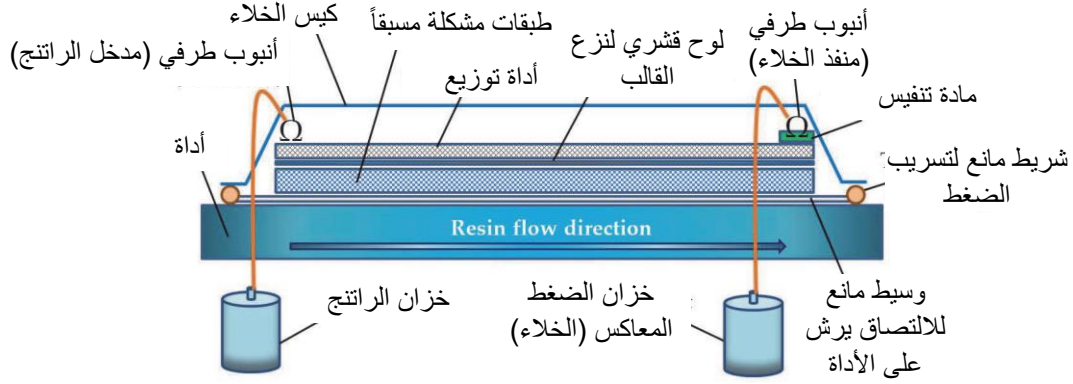
تستخدم هذه الطريقة في الحصول على منتجات ذات أشكال معقدة مثل بعض أجزاء هياكل السيارات. يُبين الشكل (١٤-١): منتجات مشكلة بطريقة القولية بالانتقال.



الشكل (١٤-١): منتجات القولية بالانتقال.

١-٥-٤-٣ القولية بالتفريغ (Vacuum-assisted resin transfer moulding VARTM).

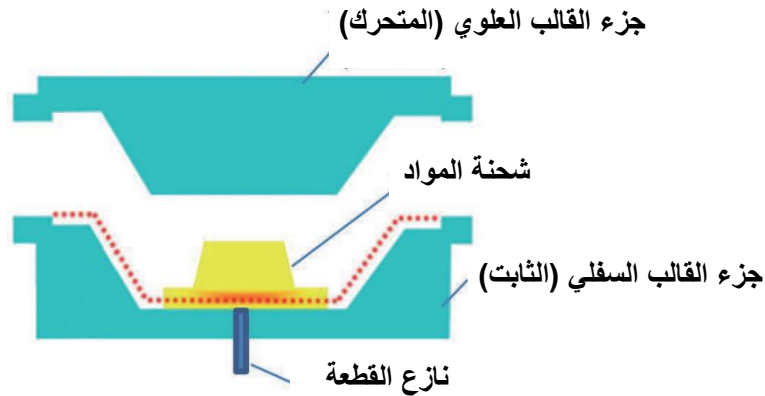
وهي من أكثر طرائق القولية تقدماً، ويكمن الفرق بين هذه الطريقة وطريقة القولية بالانتقال في سحب الراتنج إلى القالب باستخدام الخلاء (التفريغ) فقط، بدلاً من ضخه تحت ضغط. لا تتطلب هذه الطريقة حرارة أو ضغط عاليين، وهي تعمل عادةً باستخدام أدوات منخفضة التكلفة، مما يجعل من الممكن إنتاج أجزاء كبيرة ومعقدة بتكلفة زهيدة وفي مرحلة واحدة [١٦]. يُبين الشكل (١٥-١) القولية بالتفريغ.



الشكل (١٥-١): القولية بالتفريغ.

١-٥-٤-٤ طريقة القولية بالضغط (Compression moulding).

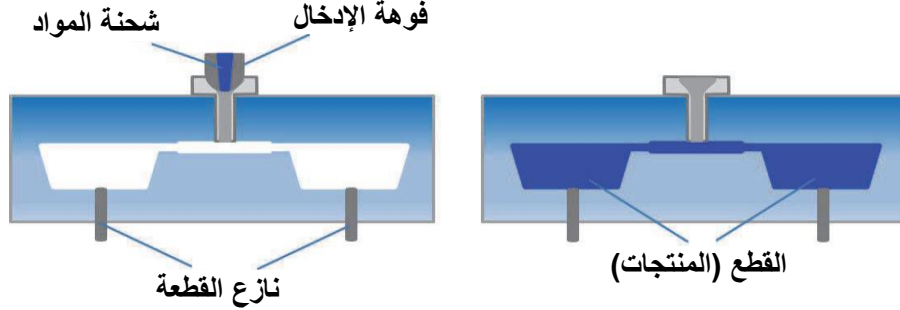
القولبة بالضغط هي عملية دقيقة وسريعة نسبياً لإنتاج أجزاء ذات جودة عالية مصنوعة من مواد مركبة ذات مجال واسع من الأحجام، حيث توضع المواد يدوياً أو آلياً ضمن القالب، ثم يغلق نصفا القالب، ويُطبق الضغط باستخدام مكابس هيدروليكية. يتراوح وقت الدورة حسب أبعاد القطعة وسماكتها. تُنتج هذه العملية أجزاءً معقدة عالية المقاومة وذات أحجام متنوعة. يُبين الشكل (١٦-١) القولية بالضغط.



الشكل (١٦-١): القولية بالضغط.

١-٥-٤-٥ طريقة القولية بالحقن (Injection moulding).

القولبة بالحقن هي عملية قولبة مغلقة سريعة، وذات إنتاجية كبيرة، ولا تتطلب ضغطاً مرتفعاً، وهي الأكثر استخداماً في المواد المركبة ذات المادة الرابطة من بوليميرات التلدن الحراري والمقواة بالألياف، مثل النايلون مع الألياف الزجاجية المقطعة. بدأت طريقة القولية بالحقن منذ ١٥٠ عاماً تقريباً. وطورت آلات القولية بالحقن اللولبية الترددية في الستينيات، ولا تزال تستخدم حتى اليوم، تكون سرعات الحقن عادةً من ثانية إلى بضع ثوان، ويمكن إنتاج العديد من القطع في الساعة في بعض القوالب متعددة الحجرات [١٧]. يُبين الشكل (١٧-١) القولية بالحقن.

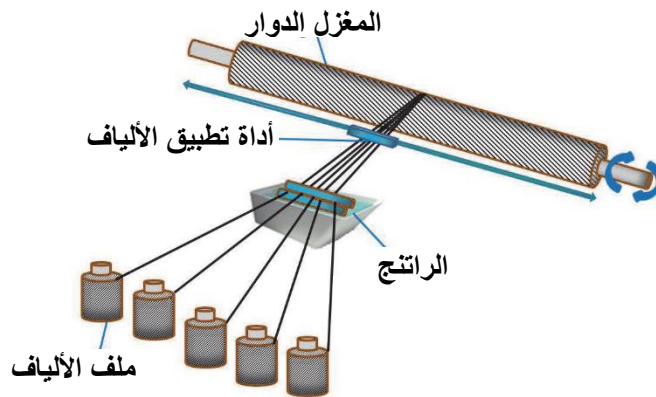


الشكل (١٧-١): القولية بالحقن.

١-٥-٤-٦ طريقة اللف الآلي (لف الألياف Filament winding).

اللف الآلي هو طريقة تصنيع مستمرة يمكن أن تكون مؤتمتة بشكل كامل وقابلة للتكرار، مع تكاليف مواد منخفضة نسبياً، حيث يجري تعليق أداة أسطوانية طويلة تسمى المغزل أفقياً بين دعائم النهاية. تمر الألياف الجافة من خلال حوض من الراتنج ليتم تبليلها، وتتحرك أداة تطبيق الألياف ذهاباً وإياباً على طول المغزل الدوار مع عربة النقل، مما يمكن من توضع الألياف عليه في تنضيدٍ محددٍ مسبقاً [١٨].

تُستخدم آلات لف الخيوط التي يتم التحكم فيها بواسطة الكمبيوتر لترتيب محاور الحركة وتعتبر هذه الطريقة من الطرائق المستخدمة في تحضير المواد المركبة لتطبيقات الفضاء. يُبين الشكل (١٨-١): اللف الآلي.



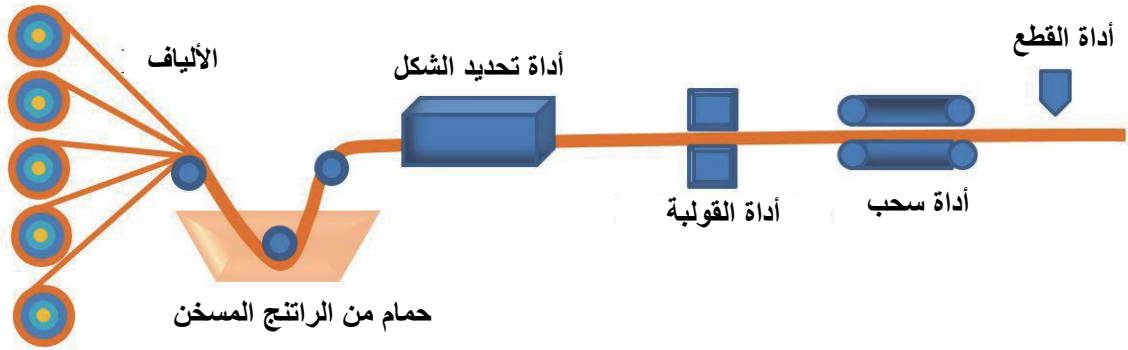
الشكل (١٨-١): اللف الآلي.

١-٥-٤-٧ طريقة القولية بالسحب (Pultrusion method).

هي طريقة تشكيل لإنتاج أطوال مستمرة من هياكل مصنعة من مواد مركبة ذات مادة رابطة بوليميرية مقواة بالألياف وذات مقاطع عرضية ثابتة، وهي طريقة تصنيع مستمرة يمكن تكون مؤتمتة بشكل كامل. في هذه الطريقة، يتم سحب حزمة مستمرة من الألياف الجافة من خلال محطة تبلييل بالراتنج الساخن.

تُسحب حزمة الألياف المشبعة إلى قوالب ساخنة، ويتشكل شكل المقطع العرضي للألياف المسحوبة بواسطة هذه القوالب. ثم يُعالج الراتنج والألياف حرارياً، وتتشكل المادة المركبة. وتُقطع المنتجات المستمرة الطويلة المعالجة وفقاً للأطوال المرغوبة. يُبين الشكل (١-١٩): القولية بالسحب.

تقتصر هذه الطريقة على الأجزاء المستقيمة ذات المقطع العرضي الثابت، مثل الجوائز ذات المقطع I أو ذات المقطع T أو مقاطع الإطارات وقضبان السلاالم [١٩-٢٠].



الشكل (١-١٩): القولية بالسحب.

يُبين الشكل (١-٢٠) بعض منتجات المواد المركبة المشكلة بالسحب.

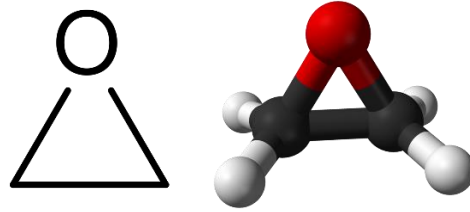


الشكل (١-٢٠): تطبيقات القولية بالسحب.

٦-١ راتنجات الإيبوكسي.

١-٦-١ مقدمة عامة.

يطلق الإيبوكسي على فئة من البوليمرات التصلب الحراري التي تحتوي على مجموعات الإيبوكساييد، وتسمى جماعي بالإيبوكسي. إن الاسم المعتمد من قبل الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية لمجموعة الإيبوكساييد هو الأوكسيرين، وأبسط أشكالها هو أكسيد الإيثيلين C_2H_4O . [٢١]. يُبين الشكل (٢١-١) أكسيد الإيثيلين.

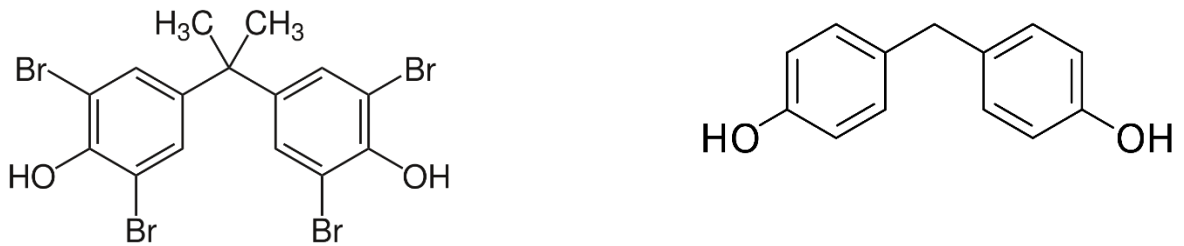


الشكل (٢١-١): أكسيد الإيثيلين.

٢-٦-١ راتنجات الإيبوكسي القائمة على ثنائي الفينول.

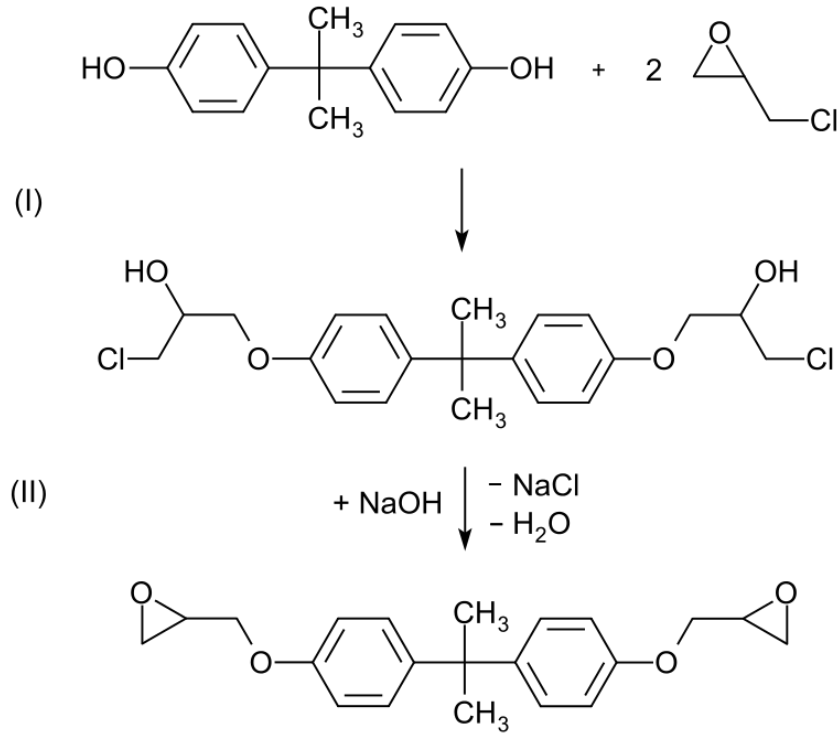
تعتمد راتنجات الإيبوكسي الأكثر شيوعاً على تفاعل الإيبوكلورهيدين (Epichlorohydrin) مع ثنائي الفينول (Bisphenol A)، مما ينتج عنه بوليمير إيبوكسي يعرف باسم ثنائي جليسيد إيثر ثنائي الفينول (DGEBA)، وتعد هذه الراتنجات الأكثر تداولاً على نطاق واسع. ويمكن أيضاً استعمال مركبات ثنائي الفينول الأخرى بشكل مشابه مع إيبوكلورهيدين، على سبيل المثال مركب ثنائي الفينول (F)، ورابع بروم البيسفينول (A).

يبين الشكل (٢٢-١) مركب ثنائي الفينول (F)، ورابع بروم البيسفينول A.



الشكل (٢٢-١): مركب ثنائي الفينول (F)، ورابع بروم البيسفينول (A).

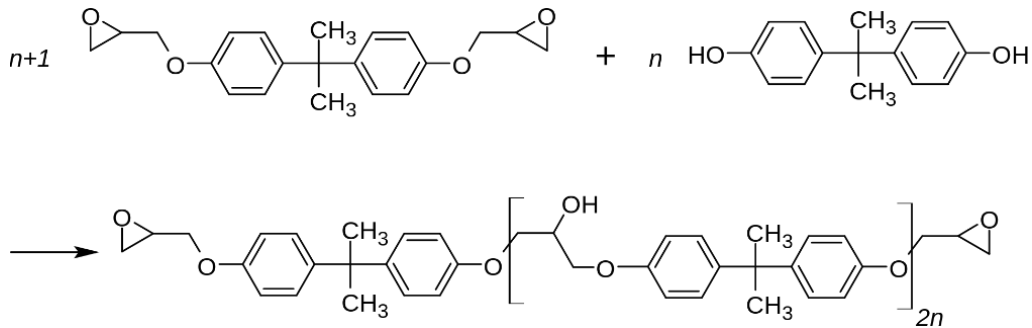
يُبين الشكل (٢٣-١) تفاعل الإبيكلورهيدين مع ثنائي الفينول (A).



الشكل (٢٣-١): راتنجات الإيبوكسي بأساس ثنائي الفينول.

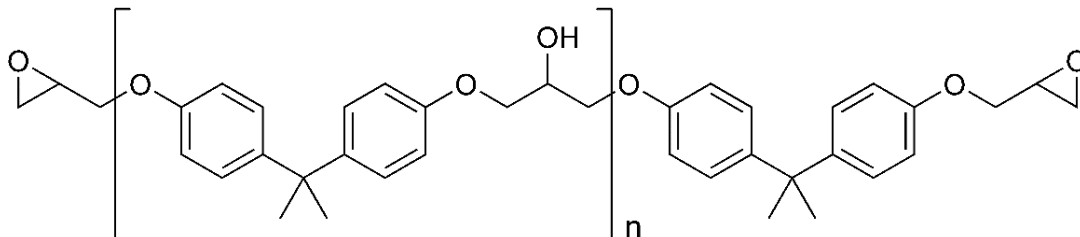
يحدث هذا التفاعل على مرحلتين، حيث يضاف إبيكلورهيدين أولاً إلى ثنائي الفينول A فيتشكل ثنائي الإيبوكسيد في تفاعل تكاتف بوجود كمية مكافئة من هيدروكسيد الصوديوم لتشكل كلوريد الصوديوم NaCl والماء.

تتشكل إيثرات ثنائي الجليسيديل ذات الوزن الجزيئي الأكبر ($n > 1$) عن طريق تفاعل إيثر ثنائي الجليسيديل ثنائي الفينول A المتكون مع المزيد من مركب ثنائي الفينول A كما في الشكل (٢٤-١).



الشكل (٢٤-١): تفاعل تشكيل ثنائي جليسيديل إيثر ثنائي الفينول A (DGEBA).

يكون ثنائي جليسيد إيثر ثنائي الفينول A (DGEBA) مع عدد قليل من الوحدات المتكررة ($n = 1$ إلى 2) عبارة عن سائل لزج وعديم اللون؛ وهذا ما يسمى براتنج الأيبوكسي السائل. أما الذي يشتمل على المزيد من الوحدات المتكررة ($n = 2$ إلى 30)، فهو مادة صلبة عديمة اللون في درجة الحرارة العادية، وتسمى براتنجات الأيبوكسي الصلبة- الشكل (1-20).



الشكل (1-20) راتنجات الأيبوكسي (DGEBA).

يمكن استخدام مركبات أخرى من ثنائي الفينول، خاصة ثنائي الفينول F، أو رابع بروم ثنائي الفينول A لتشكيل راتنجات الأيبوكسي بطريقة مماثلة وعادة ما يكون لهذه الراتنجات لزوجة أقل ومحتوى إيبوكسي أكبر بالمقارنة مع الراتنجات المشكلة باستخدام ثنائي الفينول A، وهذا ما يمنحها مقاومة كيميائية أكبر.

تؤدي زيادة نسبة ثنائي الفينول A إلى إيبكلورهيدين أثناء التصنيع إلى إنتاج بولي إيثر خطي ذي وزن جزيئي أعلى مع مجموعات نهائية من الجليسيد، وهي عبارة عن مواد بلورية شبه صلبة إلى صلبة في درجة حرارة العادية اعتماداً على الوزن الجزيئي الناتج، ويُعرف هذا باسم تشكيل المعجون الراتنجي.

مع زيادة الوزن الجزيئي للراتنج، يقل محتوى الإيبوكسايد، وتسلق المادة أكثر فأكثر مثل سلوك البوليميرات التلدن الحراري. وعند وزن جزيئي مرتفع جداً (حوالي 30000 - 70000 غ / مول)، تظهر فئة تُعرف باسم راتنجات الفينوكسي، وهي لا تحتوي فعلياً على مجموعات إيبوكسايد، نظراً لأن مجموعات الإيبوكسايد الطرفية غير ذات أهمية مقارنة بالوزن الكلي للجزيء. ومع ذلك، تحتوي هذه الراتنجات على مجموعات هيدروكسيل في بنيتها، مما يمكنها أيضاً من إجراء تفاعلات ترابط متبادلة أخرى.

يُعد محتوى مجموعات الإيبوكسايد معياراً مهماً لراتنجات الأيبوكسي. يتم التعبير عن ذلك بدلالة "الوزن المكافئ للإيبوكسايد"، وهو النسبة بين الوزن الجزيئي للبوليمير وعدد مجموعات الإيبوكسايد فيه. يستخدم الوزن المكافئ للإيبوكسايد لحساب كتلة عامل التصالب (عامل التقسية) عند معالجة راتنجات الأيبوكسي. وعادةً ما يتم معالجة راتنجات الأيبوكسي بكميات متكافئة أو شبه متكافئة من عامل التصالب لتحقيق أفضل الخصائص الفيزيائية.

١-٦-٣ تفاعلات راتنجات الإيبوكسي.

تتم تفاعلات راتنجات الإيبوكسي بطريقتين:

- مع نفسها من خلال البلمرة المتجانسة التحفيزية؛
- مع مجموعة من المواد، بما في ذلك:
 - أ- الأمينات ذات الوظائف المتعددة؛
 - ب- الأحماض (وأنهيدرات الحمض)؛
 - ج- المركبات الفينولية، والكحولية، والثيولات [٢٢].

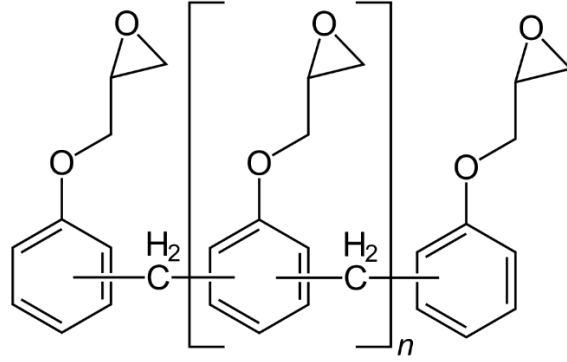
غالباً ما يشار إلى هذه المواد المتفاعلة على أنها مواد التصالب، ويشار عادةً إلى تفاعل التصالب بعملية المعالجة أو التقسية. يؤدي تفاعل راتنجات الإيبوكسي (البولي إيبوكسايد) مع نفسها أو مع مواد المعالجة التقسية متعددة الوظائف إلى تشكيل بوليمر تصلب حراري يتصف بخصائص ميكانيكية جيدة، ومقاومة حرارية وكيميائية عالية.

١-٦-٤ أنواع راتنجات الإيبوكسي.

- راتنجات الإيبوكسي القائمة على ثنائي الفينول؛
- راتنجات الإيبوكسي - نوفولاك؛
- راتنجات الإيبوكسي الأليفاتية؛
- راتنجات الإيبوكسي الهالوجينية؛
- ممددات الإيبوكسي؛
- راتنجات الجلبيسيديل أمين [٢٣].

١-٦-٤-١ راتنجات الإيبوكسي - نوفولاك.

تنتج من تفاعل إيبكلورهيدين ومركبات النوفولاك، مثل إيبوكسي فينول نوفولاك (Epoxy phenol novolac EPN) أو إيبوكسي كريسول نوفولاك (Epoxy cresol novolac ECN). عادةً ما تحمل هذه الراتنجات شديدة اللزوجة إلى الصلابة مجموعتين إلى ست مجموعات إيبوكسي في كل جزيء. من خلال معالجة التصالب، تتشكل بوليمرات عالية الارتباط تتحمل درجات حرارة عالية ومقاومة كيميائية، لكن مرونتها الميكانيكية منخفضة بسبب تعددية وظائف هذه الراتنجات. يُبين الشكل (١-٢٦) إيبوكسي فينول نوفولاك EPN.



الشكل (٢٦-١): إيبوكسي فينول نوفولاك (EPN).

٢-٤-٦-١ راتنجات الإيبوكسي الأليفاتية.

هناك نوعان شائعان من راتنجات الإيبوكسي الأليفاتية:

أ- النوع الأول يتم الحصول عليه عن طريق أكسدة الروابط المزدوجة وتنقسم إلى:

- الإيبوكسيدات الحلقية الأليفاتية؛

- الزيوت النباتية الإيبوكسيدية.

ب- النوع الثاني، هو راتنجات الإيبوكسي جليسيدل الناتجة عن التفاعل مع إيبوكسيدات الكلوروهيدرين وتنقسم إلى:

- راتنجات إيبوكسي مركبات الكحول الأليفاتية أو البولي يول للحصول على إيثرات الجليسيدل؛

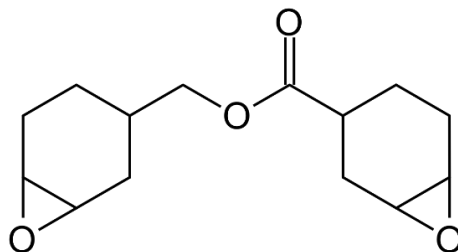
- راتنجات إيبوكسي الأحماض الأليفاتية الكربوكسيلية للحصول على إيثرات الجليسيدل.

١-٢-٤-٦-١ الإيبوكسيدات الحلقية الأليفاتية.

تحتوي على واحدة أو أكثر من الحلقات الأليفاتية في الجزيء الذي توجد عليه حلقة الأوكسيران، مثل ٣،٤-إيبوكسي حلقي

هيكسيل الميثيل-٣، ٤-إيبوكسي حلقي هيكسان الكربوكسيل الناتج عن تفاعل ألكين حلقي مع حمض البيروكسيد- الشكل

(٢٧-١).



الشكل (٢٧-١): ٣،٤-إيبوكسي حلقي هيكسيل الميثيل-٣، ٤، ٤'-إيبوكسي حلقي هيكسان الكربوكسيل.

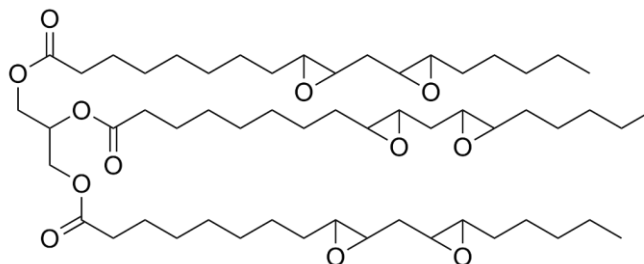
١-٦-٤-٢-١-١ مزايا الإيبوكسيدات الحلقية الأليفاتية.

- ١- تتميز الإيبوكسيدات الحلقية الأليفاتية بتركيبها الأليفاتية، ومحتوى الأوكسجين العالي (مجموعات الإيبوكسايد) وغياب الكلور، مما يؤدي إلى انخفاض اللزوجة.
- ٢- بعد عملية التفسية، تكون مقاومة جيدة لعوامل الطقس، وذات ثابت عازلية منخفض، ودرجة حرارة انتقال زجاجي مرتفعة.
- ٣- تجري بلمرة راتنجات الإيبوكسي الأليفاتية ببطء شديد في درجة حرارة الغرفة، لذلك، عادةً ما تكون هناك حاجة لدرجات حرارة أعلى ومسرعات مناسبة.

٤- نظراً لانخفاض ثابت العازلية الكهربائية وغياب الكلور، غالباً ما تستخدم الإيبوكسيدات الحلقية الأليفاتية لتغليف الأنظمة الإلكترونية، مثل الرقائق الدقيقة أو مصابيح الليد. كما أنها تستخدم في الدهانات والورنيش المعالجة بالإشعاع. ومع ذلك، نظراً لارتفاع سعرها، اقتصر استخدامها حتى الآن على مثل هذه التطبيقات.

١-٦-٤-٢-٢ الزيوت النباتية الإيبوكسيدية.

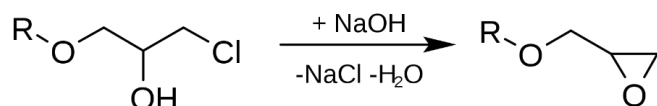
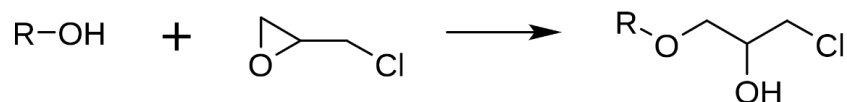
تتشكل عن طريق تفاعل الأحماض الدهنية غير المشبعة مع حمض البيروكسيد. بالمقارنة مع راتنجات الإيبوكسي السائلة، فإن لزوجتها منخفضة للغاية. وإذا تم استخدامها بنسب أكبر كممددات تفاعلية، يؤدي ذلك، غالباً، إلى انخفاض المقاومة الكيميائية والحرارية، وإلى خصائص ميكانيكية أضعف للإيبوكسيدات المعالجة- الشكل (٢٨-١).



الشكل (٢٨-١): زيت فول الصويا الإيبوكسيدية.

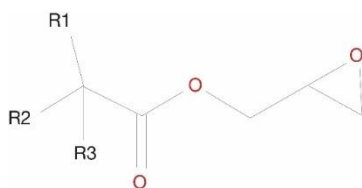
١-٦-٤-٢-٣ راتنجات الايبوكسي الجليسيديل الأليفاتية.

تتشكل راتنجات الايبوكسي الجليسيديل الأليفاتية ذات الكتلة المولية المنخفضة (أحادية أو ثنائية أو متعددة الوظائف) عن طريق تفاعل إبيكلورهيدين مع الكحولات الأليفاتية أو البوليولات وتشكيل إيثرات الجليسيديل، كما في الشكل (٢٩-١).



الشكل (٢٩-١): تفاعل الكحول مع مركب إبيكلورهيدين.

أو مع الأحماض الكربوكسيلية الأليفاتية، وتشكل إسترات الجليسيديل كما في الشكل (٣٠-١).

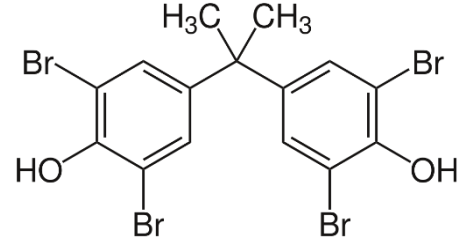
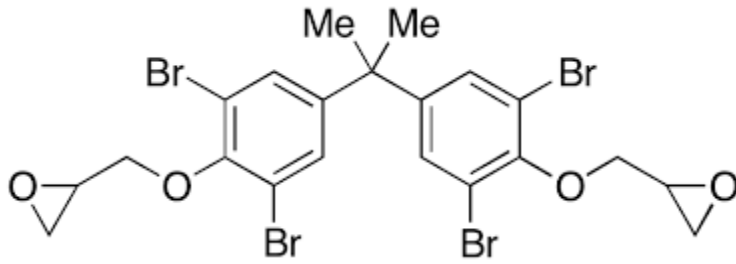


الشكل (٣٠-١): إسترات الجليسيديل.

يجري التفاعل في وجود أساس مثل هيدروكسيد الصوديوم، وهو مماثل لتشكيل ثنائي الفينول A ديجليسيديل إيثر. كما تُظهر راتنجات الايبوكسي الجليسيديل الأليفاتية عادةً لزوجة منخفضة مقارنة براتنجات الايبوكسي العطرية. لذلك، تُضاف إلى راتنجات الايبوكسي الأخرى كممددات تفاعلية أو كمحفزات الالتصاق. تمت إضافة راتنجات الإيبوكسي المصنوعة من البوليولات (طويلة السلسلة) لتحسين مقاومة الشد ومقاومة الصدم.

١-٦-٤-٣ راتنجات الإيبوكسي الهالوجينية.

تُستعمل راتنجات الايبوكسي الهالوجينية، ولا سيما راتنجات الايبوكسي البرومية والفلورية، للحصول على خصائص خاصة. يستخدم رباعي البروم ثنائي الفينول أ عندما تكون خصائص مشطبات اللهب مطلوبة، كما هو الحال في بعض التطبيقات الكهربائية، مثل لوحات الدارات المطبوعة- الشكلان (٣١-١) و (٣٢-٣).



الشكل (٣٢-١): مركبات الإيثر ثنائي الجليسيديل البرومية.

الشكل (٣١-١): رباعي البروم ثنائي الفينول A.

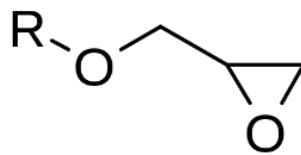
تم فحص راتنجات الايبوكسي الفلورية لبعض التطبيقات عالية الأداء، ونظراً لأنها تُظهر توتراً سطحياً منخفضاً، فإنها تُضاف كعامل تبليل (خافض للتوتر السطحي) لتحسين التماس مع الألياف الزجاجية. ويمكن مقارنة تفاعلها مع مواد التقسية بتفاعل ثنائي الفينول أ. عند المعالجة، تتحول راتنجات الايبوكسي إلى مادة ذات مقاومة كيميائية عالية، وامتصاص منخفض للرطوبة. ومع ذلك، فإن الاستخدام التجاري لراتنجات الايبوكسي الفلورية مقيد بتكلفتها العالية وانخفاض درجة حرارة الانتقال إلى الحالة الزجاجية.

١-٦-٤-٤ ممددات الإيبوكسي.

تتشكل ممددات الإيبوكسي بشكل نموذجي عن طريق ارتباط الكحولات الأليفاتية أو البوليولات بالجليسيديل.

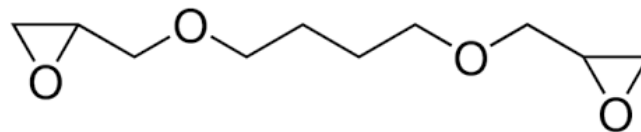
قد تكون المواد الناتجة:

أ- أحادية الوظيفة، مثل دوديكانول جليسيديل إيثر - الشكل (٣٣-١).



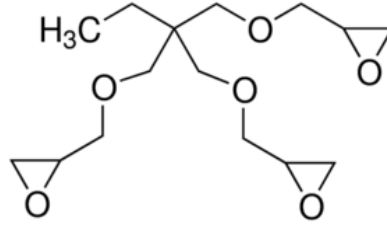
الشكل (٣٣-١): دوديكانول جليسيديل إيثر.

ب- ثنائية الوظيفة مثل ٤،٤،٤-أبوتانديول ثنائي جليسيديل الإيثر - الشكل (٣٤-١).



الشكل (٣٤-١): ٤،٤،٤-أبوتانديول ثنائي جليسيديل الإيثر.

ج- متعددة الوظائف مثل ثلاثي ميثيل البروبان ثلاثي جليسدل الإيثر - الشكل (٣٥-١).



الشكل (٣٥-١): ثلاثي ميثيل البروبان ثلاثي جليسدل الإيثر .

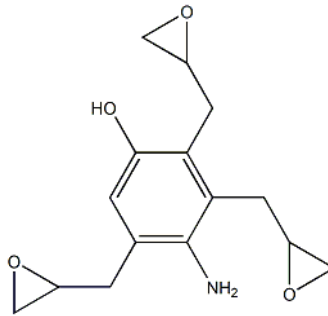
١-٦-٤-٤-١ مزايا ممددات الإيبوكسي.

١. يحصل التفاعل بوجود وسيط قلوي مثل هيدروكسيد الصوديوم؛
 ٢. يمكن أن تكون الراتنجات الناتجة أحادية أو ثنائية أو متعددة الوظائف؛
 ٣. تكون هذه الراتنجات ذات لزوجة منخفضة؛
 ٤. تستخدم عادة كممددات لتعديل (تقليل) لزوجة راتنجات الإيبوكسي الأخرى.
- وقد أدى ذلك إلى مصطلح "راتنجات الإيبوكسي المعدلة" للإشارة إلى تلك التي تحتوي على ممددات تفاعلية منخفضة اللزوجة.

١-٦-٤-٥ راتنجات الجليسدل أمين.

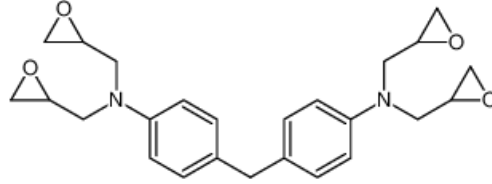
راتنجات الإيبوكسي (الجليسدل أمين) هي إيبوكسيدات ذات وظائف متعددة تتشكل عندما تتفاعل الأمينات العطرية مع إبيكلورهيدين. إن الأنواع الوظيفية المهمة صناعياً هي:

أ- الجليسدل أمين ثلاثي الوظيفة مثل: ثلاثي جليسدل - ٤ - أمين الفينول - الشكل (٣٦-١).



الشكل (٣٦-١): ثلاثي جليسدل - ٤ - أمين الفينول.

ب- الجليسيديل أمين رباعي الوظيفة مثل رباعي الجليسيديل - ثنائي (٤- أمين الفينول) - الميثان- الشكل (٣٧-١).



الشكل (٣٧-١): رباعي الجليسيديل - ثنائي (٤- أمين الفينول) - الميثان.

١-٦-٤-٥-١ مزايا راتنجات الجليسيديل أمين.

- ١- راتنجات ذات لزوجة منخفضة إلى متوسطة في درجة حرارة الغرفة، مما يجعلها أسهل في المعالجة من راتنجات الايبوكسي فينول نوفولاك؛
- ٢- تفاعلية تصالب مرتفعة؛
- ٣- مقاومة درجات الحرارة العالية وذات خصائص ميكانيكية للشبكة المعالجة الناتجة، مما يجعلها مواد مهمة لتطبيقات المركبات الفضائية.

١-٦-٤-٦-١ مواد التلدين (الملدنات).

١-٦-٤-٦-١ الاستخدامات الرئيسية لمواد التلدين.

١. زيادة مرونة راتنج الإيبوكسي،
٢. زيادة مقاومة الصدم،
٣. تساهم في تقليل اللزوجة.

١-٦-٤-٦-١ آثار مواد التلدين.

١. قد تؤثر هذه المواد سلباً على الخصائص الأخرى،
٢. تبقى مواد التلدين على اختلافها أقل تكلفة من الراتنج، لذلك، تستخدم كممددات.

١-٦-٤-٦-١ أنواع مواد التلدين.

لتحسين وتعديل خصائص الصدم عادة ما تستخدم مزائج الإيبوكسي مع البوليميرات مثل:

١. البولي أميدات،
٢. البوليستر،
٣. البولي فينيل كلوريد،
٤. البولي يوريثان،
٥. السيليكونات،

٦. الأكريلات،

٧. راتنجات الأكريليونتريل - بوتادين،

٨. البولي سلفيدات.

١-٦-٤-٧ المواد المائلة (المثخنة).

١-٦-٤-٧-١ الاستخدامات الرئيسية للمواد المائلة.

١. تقليل التكاليف،

٢. تقليل إطلاق الحرارة،

٣. تقليل الانكماش،

٤. تقليل التمدد الحراري.

لا يحصل تفاعل بين المواد المائلة والراتنج غير المعالج.

١-٦-٤-٧-٢ أنواع المواد المائلة.

هناك نوعان رئيسيان من المواد المائلة:

أ- مواد مائلة تساهم كمواد تقوية،

ب- مواد مائلة لا تساهم كمواد تقوية.

أ- مواد مائلة تساهم كمواد تقوية.

تساهم هذه المواد في تحسين الخصائص الميكانيكية (مقاومة الشد - مقاومة الصدم - مقاومة الضغط)، وتتضمن

هذه المواد:

١. الألياف الزجاجية،

٢. الجرافيت،

٣. البولي أراميد،

٤. الميكا،

٥. دقيق الخشب.

ب- مواد مائلة لا تساهم كمواد تقوية.

وتشمل الاستخدامات الرئيسية:

١. تحسين الخصائص الكهربائية والحرارية؛

٢. تقليل التكاليف؛

٣. التحكم بالكثافة؛

٤. التحكم باللزوجة والانزلاقية.

ومن أنواعها:

١. المساحيق المعدنية،

٢. الألومينا،

٣. السيليكا،

٤. التالك،

٥. كربونات الكالسيوم،

٦. سلفيد الباريوم،

٧. مسحوق الجرافيت.

١-٦-٤-٨ الملونات والأصبغة.

١. تكون الملونات غير شفافة على عكس الأصبغة ونادراً ما تستخدم هذه الأخيرة في الإيبوكسي،

٢. يميل الإيبوكسي بشكل طبيعي للون الأصفر عند التعرض للأشعة فوق البنفسجية،

٣. يفضل عادة استخدام الملونات في أنظمة الإيبوكسي.

١-٦-٤-٨-١ أنواع الملونات.

١. سلفيد الباريوم وأكسيد التيتانيوم (اللون الأبيض)،

٢. الكربون الأسود (اللون الأسود)،

٣. أكسيد الحديد (اللون البرتقالي - الأحمر - الأصفر).

١-٦-٤-٩ مانعات الالتصاق في القالب.

تشمل المواد المستخدمة:

١- مواد السيليكون؛

٢- أفلام البولي إيثيلين؛

٣- السلوفان؛

٤- الشمع.

إن مواد السيليكون هي الأكثر استخداماً بسبب استقرارها الحراري.

١-٦-٥ الخصائص البارزة لراتنجات الإيبوكسي.

لراتنجات الإيبوكسي أصناف متعددة ذات طيف واسع من الخصائص. وبشكل عام، هناك سمات بارزة لراتنجات الإيبوكسي:

١. قساوة عالية؛

٢. مقاومة صدم منخفضة للإيبوكسي غير المعدل؛

٣. مقاومة الشد: ٥٠٠ - ٣٠٠٠٠ باوند/ إنش مربع؛

٤. مقاومة الضغط: ١٥٠٠٠ - ٤٨٠٠٠ باوند/ إنش مربع؛

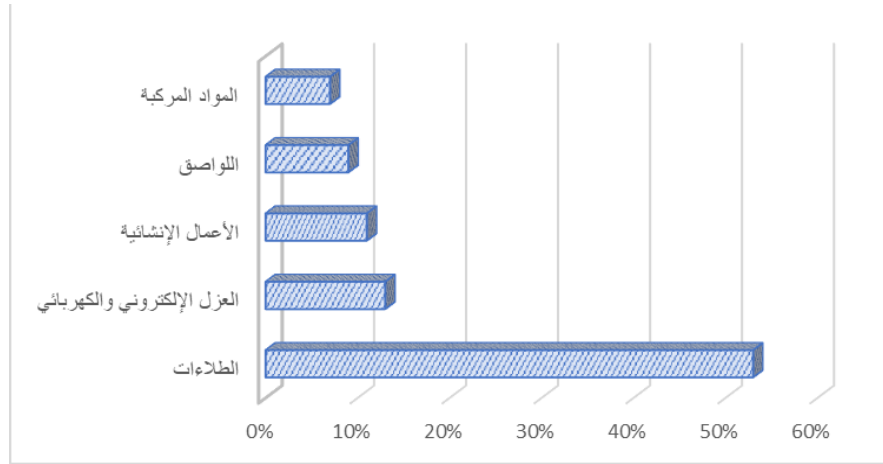
٥. استقرار في الأبعاد بسبب عدم حصول تطاير أثناء المعالجة: معدل الانكماش: ٠.٠٠٠٠٢ - ٠.٠١، والاستطالة: ٢-١٠٪؛

٦. مقاومة حرارية عالية وخصائص عزل حراري ممتاز؛

٧. مقاوم للماء والمذيبات والمواد الكيماوية:
 ✓ يتأثر الإيبوكسي بسهولة بمركبات الهيدروكربون الكلور،
 ✓ معدل امتصاص الرطوبة: ٠.٠٥ - ٤ %،
 ٨. خصائص عزل كهربائي ممتازة؛
 ٩. لواصل ممتازة بسبب طبيعتها القطبية، فحلقات الأوكسجين والجليسدين تفتح لتشكيل مجموعات الهيدروكسيد المستقطبة أثناء المعالجة، لكن الكلفة العالية للإيبوكسي تحد من استخدامه كواصلق.

١-٦-٦ تطبيقات راتنجات الإيبوكسي [٣٣].

يُبين الشكل (١-٣٨) النسب المئوية للتطبيقات الأساسية للإيبوكسي.



الشكل (١-٣٨): تطبيقات راتنجات الإيبوكسي.

١-٦-٦-١ الطلاءات.

يعزى الاستخدام الكبير لراتنجات الإيبوكسي في مجال الطلاءات للأسباب التالية:

١. مقاومتها الكيميائية،
٢. الفسادة،
٣. القدرة على التحمل والاستمرارية،
٤. خاصية الالتصاق للإيبوكسي.

التطبيقات:

١. تستخدم طلاءات الإيبوكسي المعالج بالأشعة فوق البنفسجية في الدارات الإلكترونية المطبوعة،

٢. تستخدم طلاءات الإيبوكسي في مجال صناعة السيارات والآليات سواء كطلاء حماية أو كطلاء أولي (برايمر) أو في الدهانات،
٣. طلاء بطانة الحاويات الكيميائية،
٤. خطوط الأنابيب،

١-٦-٢-٢ العزل الإلكتروني والكهربائي.

الأسباب التي تجعل من الإيبوكسي مواد عزل جيدة للأجزاء الإلكترونية والكهربائية:

١. مقاومته العالية،
٢. معامل تمدد منخفض نسبياً،
٣. خصائص ميكانيكية عالية،
٤. ناقلية حرارية منخفضة،
٥. خصائص نوعية عالية.

التطبيقات:

تغليف وطلاء الترانزستورات، والمفاتيح الكهربائية، والوشائع، والدارات المتكاملة.

١-٦-٣ الأعمال الإنشائية.

تستخدم راتنجات الإيبوكسي في الأعمال الإنشائية بشكل رئيسي للأسباب التالية:

١. قساوتها،
٢. سهولة التطبيق،
٣. التصاق ممتاز على الزجاج، والكوارتز، والرخام وغيرها.

التطبيقات:

١. إصلاح مدرجات المطارات؛
٢. الأنظمة الصناعية التي تتطلب مقاومة كيميائية؛
٣. يتميز الإيبوكسي مع مواد ملئ رملية بمقاومة ممتازة للماء والزيوت والمذيبات والمواد الكاوية ويتصف بالتصاق جيد مع الإسمنت؛
٤. في صناعة القطع بتقنية القولبة بالانتقال مثل شفرات المراوح والجوائز الداعمة.

١-٦-٤-٤ اللواصق.

١. في مجال اللواصق الإنشائية والصناعية:
٢. ملئ التجاويف الميكروسكوبية، حيث تكون على شكل معجون تدخل ضمن مثل هذه التجاويف وتتصلب بداخلها،
٣. يستخدم الإيبوكسي في صناعة الطيران كمادة لاصقة لتجميع أجزاء الطائرات بدلاً من البراشيم،
٤. يستخدم الإيبوكسي في صناعة السيارات كمادة لاصقة بديلاً عن الوصلات المعدنية.

يفيد استخدام الإيبوكسي كبديل عن الوصلات المعدنية والبراشيم في:

١. تقليل الضجيج،
٢. تقليل استخدام المواد السامة مثل الرصاص،
٣. تخفيف الوزن،
٤. زيادة فعالية الوقود.

١-٦-٥ المواد المركبة.

تكون المواد المركبة التي تتألف من مادة رابطة من الإيبوكسي مقواة بشكل أساسي، إما بألياف الزجاج أو مساحيقه، أو بالجرافيت أو البولي أراميد (البولي أميد العطري).
تتصف المواد المركبة ذات المادة الرابطة من الإيبوكسي بمقاومة حرارية وكهربائية وكيميائية جيدة وخصائص ميكانيكية نوعية عالية.

التطبيقات:

١. صناعة الطيران والفضاء،
٢. الدارات المطبوعة (أنصاف النواقل - الدارات المتكاملة)،
٣. الحاويات والأوعية تحت الضغط،
٤. الأنابيب.

٧-١ الدراسات السابقة على المواد المركبة البوليميرية (إيبوكسي / ألياف زجاج).

١-٧-١ في أيلول من عام ٢٠٠٨، نُشرت دراسة بعنوان الخواص الميكانيكية للمواد المركبة المقواة بالألياف الزجاجية مع مواد مألثة من جسيمات سيراميكية من أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 من قبل عثمان عاصي من قسم الهندسة الميكانيكية، كلية الهندسة جامعة أوساك، أوساك، تركيا [٢٥].

تم إجراء دراسة تجريبية لمعرفة الخواص الميكانيكية للمواد المركبة من مادة رابطة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج والمملوءة بنسب مختلفة من جسيمات سيراميكية من أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 . ولغرض المقارنة، تم تقييم الخواص الميكانيكية للمادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بالألياف الزجاجية بدون مواد مألثة في نفس شروط الاختبار. أظهرت النتائج أن مقاومة الشد ومقاومة القص القصى للمواد المركبة انخفضت مع زيادة محتوى جسيمات Al_2O_3 ، وزادت مقاومة الانعطاف مع زيادة محتوى جسيمات Al_2O_3 حتى نسبة ١٠٪ وزناً، حيث انخفضت بعدها. بالمقارنة مع الخواص الميكانيكية للمادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بالألياف الزجاجية بدون مواد مألثة، تبين أن إضافة ١٠٪ وزناً من جسيمات Al_2O_3 في المادة الرابطة، قد زادت مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ بنسبة ٣٣ و ٧٨٪ على الترتيب.

١-٧-٢ في تشرين الأول من عام ٢٠١٦، نُشرت دراسة حول خصائص المواد المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج مع إضافات من أكسيد التيتانيوم TiO_2 [٢٦].

تناولت هذه الدراسة تأثير الجسيمات النانوية من (TiO_2) على المواد المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج، حيث تم تحضير عينات المادة المركبة باستعمال طريقة البناء اليدوي مع نسب متفاوتة قدرها ٠ و ١ و ٢ و ٣٪ وزناً من الجسيمات النانوية. لقد تحسنت الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج بإضافة جسيمات نانوية مألثة من TiO_2 ، فعند نسبة وزنية ٣٪ منه، تم تحقيق مقاومة انعطاف ٢٠٣.٣٦ ميغا باسكال، وكان الارتباط الجيد بين الألياف والإيبوكسي هو السبب الرئيسي لتحقيق خصائص انعطاف أفضل.

١-٧-٣ نشرت في حزيران ٢٠١٤، تناول Ramesh K. Nayak و Alina Dasha و B.C. Ray دراسة تأثير مواد الإضافة $(Al_2O_3 / SiO_2 / TiO_2)$ على الأداء الميكانيكي للمواد المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج [٢٧].

جرى تحضير ثلاث عينات من كل مادة مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج مع نسبة ١٠٪ وزناً من المواد المألثة المختلفة باستخدام طريقة البناء اليدوي.

ومن خلال مقارنة مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ بوجود مواد الإضافة المختلفة، لوحظ أن المادة المركبة من الإيبوكسي/ألياف زجاج مع السيليكا أظهرت مقاومة القص بين الطبقات، ومقاومة انعطاف، ومعامل يونغ أكبر منها في المواد المركبة مع الألومينا وأكسيد التيتانيوم. وقد يرجع ذلك إلى كون أبعاد جسيمات السيليكا الدقيقة (أصغر من ١٠ ميكرون) أصغر مقارنة بجسيمات

الألومينا وجسيمات أكسيد التيتانيوم (٢٠٠-٣٠٠ ميكرون). فمع تقليل أبعاد الجسيمات، تزداد مساحة السطح البيني ويحصل ارتباط أفضل بين المادة الرابطة والمادة المائنة. وبالتالي، تعطي جسيمات SiO_2 مقاومة التصاق أفضل وتحسن الخصائص الميكانيكية.

تبيّن أيضاً أن طاقة الصدم القسوى للمادة المركبة من الإيبوكسي مع الألومينا أكبر بالمقارنة مع مواد الإضافة الأخرى، وقد يكون سبب ذلك زيادة جساءة جسيمات الألومينا مقارنة بجسيمات السيليكا وأكسيد التيتانيوم.

١-٧-٤ في عام ٢٠٠٥، أجريت دراسة بعنوان التأثيرات المركبة للحمل والرطوبة ودرجة الحرارة على خصائص المواد المركبة من الإيبوكسي مع ألياف الزجاج من قبل بكرى عبد المجيد، سعيد ضياء، كاترينا جاس، ماركوس شنايدر من كلية هندسة المواد المركبة جامعة ولاية وينونا، في الولايات المتحدة الأمريكية، حيث جرى فحص خصائص المواد المركبة ألياف زجاج / إيبوكسي قبل وبعد التحميل الميكانيكي وفي شروط الرطوبة [٢٨].

جرى في هذا البحث اختبار خصائص المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج قبل وبعد التحميل الميكانيكي وفي شروط الرطوبة. تشير النتائج الأولية إلى أن مقاومة الشد ومعامل يونغ للمادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج تتأثر بوجود الرطوبة والتحميل الميكانيكي مقارنة مع العينات الشاهدة. في فترات التكييف الأقل في درجة الحرارة العادية، لوحظت زيادة طفيفة في مقاومة الشد وانخفاض طفيف في معامل يونغ؛ وعلى فترات أطول، ٣٠٠٠ ساعة، لوحظ انخفاض ملحوظ في المقاومة والضغط حتى الفشل. أظهرت العينات التي تم وضعها في شروط التحميل، في الماء عند ٦٥ درجة مئوية لمدة ١٠٠٠ ساعة انخفاضاً أكبر في قيمة معامل يونغ. من المتوقع أن يكون للتحميل المستمر تأثير إيجابي على المدى القصير، وأن التعرض الطويل للرطوبة يؤدي إلى انهيار قصف في درجة حرارة العادية، وإلى انهيار لدن في درجات الحرارة العالية.

١-٧-٥ في آذار من عام ٢٠١٥، تم نشر دراسة بعنوان التحقق التجريبي في السلوك الميكانيكي للمواد المركبة من مادة رابطة بوليميرية مقواة بألياف الزجاج، من قبل معهد الهندسة والتكنولوجيا، حيدر أباد وكلية الملا ريدي للهندسة في مدينة إسكندر أباد [٢٩].

جرى في هذا البحث مقارنة في الخصائص الميكانيكية (مقاومة الشد القسوى ومقاومة الصدم ومقاومة الانعطاف) لمجموعة عينات من المادة المركبة تختلف عن بعضها بنسبة ألياف الزجاجي (نسيج غير منسوج) عن طريق إجراء اختبار الشد والانعطاف والصدم. تبيّن أن المادة المركبة تظهر مقاومة شد ومقاومة انعطاف ومقاومة صدم أعلى مع زيادة النسبة المئوية لألياف الزجاج.

١-٧-٦ نشرت من قبل جامعة الشرق الأوسط التقنية، قسم هندسة المعادن والمواد، أنقرة، تركيا دراسة حول تأثير درجة الحرارة والخلاء في قالب (القولبة بالانتقال RTM) على الخواص الميكانيكية لصفائح المواد المركبة من الإيبوكسي / ألياف الزجاج [٣٠].

جرى في هذا البحث دراسة تأثيرات درجة حرارة القالب، والخلاء المطبق في منافذ خروج الراتنج، ودرجة حرارة الراتنج الأولية على الخواص الميكانيكية للعينات من المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج النسيجية، والمنتجة بتقنية القولية بالانتقال RTM. تم استخدام ست درجات حرارة للقالب (٢٥، ٤٠، ٦٠، ٨٠، ١٠٠، ١٢٠ درجة مئوية)، ودرجتي حرارة أولية للراتنج (١٥ و ٢٨ درجة مئوية)، وبوجود خلاء (٠.٠٣ بار)، وبدون وجود خلاء (١ بار). تُبين الاختبارات أن مقاومة الشد ومقاومة الانعطاف ومقاومة الصدم هي الأعلى عند درجة حرارة ٦٠ درجة مئوية في القالب، وأنه يجب وجود درجة حرارة متوسطة للقالب لضمان انخفاض الفراغات ولتحقيق أعلى ابتلال للألياف، وترابط أفضل للألياف مع المادة الرابطة. وتبين أيضاً أنه في حال وجود خلاء في القالب، يحدث تحسن في مقاومة الشد ومقاومة الانعطاف ومقاومة الصدم عند درجة حرارة القالب ٢٥ و ٦٠ درجة مئوية. يمكن مما سبق استنتاج أن تعزيز الخواص الميكانيكية يرجع فقط إلى التخفيض في النسبة المئوية "للعيوب" أو "الفراغات". يؤدي خفض درجة الحرارة الأولية للراتنج من ٢٨ إلى ١٥ درجة مئوية إلى تدهور الخصائص الميكانيكية، كما وجد أن الزيادة في درجة الحرارة الأولية للراتنج لها تأثير مماثل في زيادة درجة حرارة القالب، حيث يقلل كلاهما اللزوجة، ويخفّض تشكّل الفراغات.

١-٧-٧ بتاريخ ٢٨ تشرين الأول عام ٢٠١٣، نُشرت دراسة من قبل T. Rangaswamy, K. Devendra تم في هذه الدراسة إجراء دراسة تجريبية للخصائص الميكانيكية (مقاومة الشد ومقاومة الصدم والقساوة) للمواد المركبة من مادة رابطة من الإيبوكسي والمقوى بألياف الزجاج من الصنف E مع مواد مألوفة مختلفة [٣١]. جرى تقوية هذه المواد المركبة بنسب مختلفة من الرماد، وأكسيد الألومنيوم (Al_2O_3)، وهيدروكسيد المغنيسيوم ($Mg(OH)_2$)، ومسحوق الهيماتيت. أظهرت نتائج الاختبار أن المواد المركبة مع نسبة حجمية ١٠٪ من $Mg(OH)_2$ أظهرت مقاومة شد وجساءة أكبر، بينما أظهرت المواد المركبة المملوءة بالرماد مقاومة صدم أكبر.

الفصل الثاني

المواد والتجهيزات والطرائق

الفصل الثاني

المواد والتجهيزات والطرائق

١-٢ المواد.

١-١-٢ نظام الإيبوكسي/المقسي.

المادة الرابطة المستخدمة هي من أنظمة الإيبوكسي التي تتم عملية معالجتها (عملية التصالب) على البارد (بدرجة الحرارة العادية)، وتشتمل على راتنج الإيبوكسي Araldite® LY 5052 منخفض اللزوجة، والمقسي Aradur® 5052 من مزيج من الأمينات المتعددة. ومصدرها شركة فانتيكو سويسرا. ويستعمل نظام الإيبوكسي هذا هي الفضاء والمركبات الصناعية، والعُدَد، وإصلاح الطائرات.

١-١-٢-٢ خصائص نظام الإيبوكسي/المقسي (وفقاً لبيانات الشركة المصنعة).

١. لزوجة منخفضة، مما يسمح بإشباع سهل لمواد التقوية؛
٢. زمن تصلب طويل (ساعتان لكل ١٠٠ مل في درجة حرارة الجو المحيطة)، وهذا الزمن يسمح بإنتاج منتجات كبيرة؛
٣. مقاومة لدرجات الحرارة العالية، تصل درجة حرارة الانتقال الزجاجي إلى ٦٠ درجة مئوية بعد المعالجة بدرجة حرارة الجو المحيطة، و ١٢٠ درجة مئوية بعد المعالجة عند درجة حرارة ١٠٠ درجة مئوية؛
٤. خصائص ميكانيكية وديناميكية ممتازة بعد المعالجة بدرجة الحرارة المحيطة مع إمكانية الحصول على خصائص أعلى عندما تتم المعالجة في درجات حرارة مرتفعة؛
٥. خصائص ميكانيكية وديناميكية بارزة للصفائح، حيث يُعتمد نظام الإيبوكسي هذا لدى هيئة الطائرات الألمانية لإنتاج الطائرات الشراعية.

يُبين الجدول (١-٢) مواصفات نظام الإيبوكسي / المقسي.

الجدول (١-٢): مواصفات نظام الإيبوكسي/المقسي.

المقسي Aradur® 5052	الراتنج Araldite® LY 5052	المظهر
سائل شفاف	سائل شفاف	
٦٠-٤٠	١٥٠٠-١٠٠٠	اللزوجة عند ٢٥ درجة مئوية (وفقاً للأيزو ١٢٠٥٨-١) [cps]
٠.٩٤	١.١٧	الكثافة عند ٢٥ درجة مئوية (وفقاً للأيزو ١٦٧٥) غ/سم ^٣

يُبين الجدول (٢-٢): مواصفات لزوجة نظام الإيبوكسي/المقسي.

الجدول (٢-٢): مواصفات لزوجة نظام الإيبوكسي/المقسي.

لزوجة المزيج البدائية			
اللزوجة [cps]	درجة الحرارة (درجة مئوية)		
١٣٥٠-١١٥٠	١٨	(وفقاً للأيزو ١-١٢٠٥٨)	
٧٠٠-٥٠٠	٢٥		
٢٥٠-٢٠٠	٤٠		
معدل تزايد لزوجة المزيج			
الزمن (دقيقة)	اللزوجة [cps]	درجة الحرارة (درجة مئوية)	
٦٠-٥٠	حتى ١٥٠٠	٢٥	(وفقاً للأيزو ١-١٢٠٥٨)
١١٠-٩٠	حتى ٣٠٠٠	٢٥	
٤٥-٤٠	حتى ١٥٠٠	٤٠	
٦٠-٥٠	حتى ٣٠٠٠	٤٠	
١٨-١٥	حتى ١٥٠٠	٦٠	
٢٢-١٨	حتى ٣٠٠٠	٦٠	

يُبين الجدول (٣-٢): نسبة المزج في بنظام الإيبوكسي/المقسي.

الجدول (٣-٢): نسبة المزج في بنظام الإيبوكسي/المقسي.

نسبة حجمية	نسبة وزنية	
١٠٠	١٠٠	الراتنج Araldite® LY 5052
٤٧	٣٨	المقسي Aradur ®5052

يجب أن يتم وزن المكونات بدقة وخطها جيداً، وذلك للحصول على الخصائص المثلى. بما أن التفاعل بين الراتنج والمقسي هو تفاعل ناشر للحرارة، فإنه سينتج كمية كبيرة من الحرارة في حال مزج كميات كبيرة منه، مما يؤدي بدوره إلى زمن تصلب قصير. لذا، يفضل خلط كميات صغيرة أو تقسيم الخلطات الكبيرة إلى أجزاء أصغر.

يُبين الجدول (٤-٢) زمن التصلب والتَهلم في نظام الإيبوكسي/المقسي.

الجدول (٤-٢): زمن التصلب والتَهلم في نظام الإيبوكسي/المقسي.

زمن المعالجة	
الزمن (دقيقة)	درجة الحرارة (درجة مئوية)
٣٢٠-٢٨٠	١٨
١٦٠-١١٠	٢٥
٥٥-٤٥	٤٠
زمن التَهلم	
الزمن (دقيقة)	درجة الحرارة (درجة مئوية)
٥٠٠-٤٢٠	٢٥
١٧٠-١٥٠	٤٠
٥٥-٤٠	٦٠
١٧-١٤	٨٠
٦-٤	١٠٠
٣-٢	١٢٠

يُبين الجدول (٥-٢) دورة المعالجة النموذجية في نظام الإيبوكسي/المقسي.

الجدول (٥-٢): دورة المعالجة النموذجية لنظام الإيبوكسي/المقسي المستخدم.

دورة المعالجة (التقسية) النموذجية
يوم كامل بدرجة حرارة ٢٣ درجة مئوية + ١٥ ساعة بدرجة حرارة ٥٠ درجة مئوية
أو يوم كامل بدرجة حرارة ٢٣ درجة مئوية + ٤ ساعة بدرجة حرارة ١٠٠ درجة مئوية
يتم تحديد دورة المعالجة المثلى وفقاً لكل حالة، وهذا يعتمد على المتطلبات الاقتصادية والتشغيلية.

يُبين الجدول (٦-٢) خصائص لنظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة (التصلب).

الجدول (٦-٢): خصائص نظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة (التصلب).

خصائص نظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة (التصلب) بدون وجود مواد تقوية		
T_g (درجة مئوية) بعد فترة من التصلب	T_g (درجة مئوية) مباشرة عند التصلب	دورة المعالجة:
٥٥-٥٢	٥٢-٥٠	٢ يوم بدرجة حرارة ٢٥ درجة مئوية
٦٦-٦٢	٦٤-٦٠	٨ يوم بدرجة حرارة ٢٥ درجة مئوية
٧١-٦٧	٦٨-٦٤	٤ أشهر بدرجة حرارة ٢٥ درجة مئوية
٧٦-٧٠	٧٢-٦٨	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ١٠ ساعة ٤٠ درجة مئوية
٨٠-٧٤	٧٦-٧٢	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ٢٠ ساعة ٤٠ درجة مئوية
٨٥-٨٠	٨٢-٧٨	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ١٠ ساعة ٥٠ درجة مئوية
٨٨-٨٢	٨٥-٨١	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ١٥ ساعة ٥٠ درجة مئوية
١٠٤-٩٤	٩٦-٩٢	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ١٠ ساعة ٦٠ درجة مئوية
١٠٦-٩٦	٩٨-٩٤	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ١٥ ساعة ٦٠ درجة مئوية
١١٤-١٠٨	١١٠-١٠٦	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ٢ ساعة ٨٠ درجة مئوية
١٢٢-١١٤	١١٦-١١٢	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ٨ ساعة ٨٠ درجة مئوية
١١٨-١٠٨	١٠٨-١٠٤	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ١ ساعة ٩٠ درجة مئوية
١٢٦-١١٦	١١٦-١١٢	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ٤ ساعة ٩٠ درجة مئوية
١٣٠-١١٨	١٢٠-١١٦	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ١ ساعة ١٠٠ درجة مئوية
١٣٤-١٢٠	١٢٤-١١٨	١ يوم ٢٣ درجة مئوية + ٤ ساعة ١٠٠ درجة مئوية

درجة حرارة الانتقال الزجاجي

يُبين الجدول (٧-٢) خصائص اختبار الشد لنظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة.

الجدول (٧-٢): خصائص اختبار الشد لنظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة.

خصائص اختبار الشد (وفقاً لمعيار الأيزو ٥٢٧)			
دورة المعالجة:	٧ أيام (بدرجة حرارة الغرفة)	١٥ ساعة (٥٠ درجة مئوية)	٨ ساعة (٨٠ درجة مئوية)
اجهاد الشد (ميغا باسكال)	٧١-٤٩	٨٦-٨٢	٨٦-٨٤
الاستطالة عند الكسر (%)	٢.٥ - ١.٥	٣.٧-٣.١	٥.٩-٥.٧
معامل يونغ (ميغا باسكال)	٣٥٥٠-٣٣٥٠	٣٦٥٠-٣٤٥٠	٣٢٠٠-٣٠٠٠

يُبين الجدول (٨-٢): خصائص اختبار الانعطاف لنظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة.

الجدول (٨-٢): خصائص اختبار الانعطاف لنظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة.

خصائص اختبار الانعطاف لنظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة (وفقاً لمعيار الأيزو ١٧٨)		
دورة المعالجة:	١٥ ساعة (٥٠ درجة مئوية)	٨ ساعة (٨٠ درجة مئوية)
مقاومة الانعطاف (ميغا باسكال)	١٤٠-١٣٠	١٢٢-١١٦
الاستطالة عند الكسر (%)	٦.٣-٥.٨	٧.٢-٦.٥
معامل يونغ (ميغا باسكال)	٣٣٠٠-٣٠٠٠	٣٠٠٠-٢٧٠٠

يُبين الجدول (٩-٢): امتصاصية الماء لنظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة.

الجدول (٩-٢): امتصاصية الماء لنظام الإيبوكسي/المقسي بعد المعالجة.

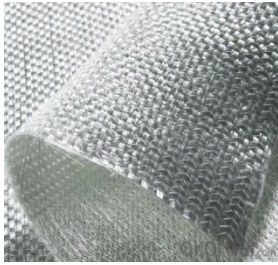
امتصاصية الماء (وفقاً لمعيار الأيزو ٦٢)		
نظام الغمر	الامتصاصية (%)	
	٧ أيام (بدرجة حرارة الغرفة)	٨ ساعة (٨٠ درجة مئوية)
٤ أيام ٢٣ درجة مئوية	٠.٥٠-٠.٤٥	٠.٤٥-٠.٤٠
١٠ أيام ٢٣ درجة مئوية	٠.٨٠-٠.٧٠	٠.٧٠-٠.٦٥
٣٠ دقيقة ١٠٠ درجة مئوية	٠.٦٠-٠.٥٥	٠.٥٠-٠.٤٥
٣٠ دقيقة ١٠٠ درجة مئوية	٠.٨٠-٠.٧٠	٠.٧٠-٠.٦٠

٢-١-٢ الألياف الزجاجية المستخدمة في البحث كمادة تقوية

تم استخدم أنواع ألياف الزجاج التالية من الصنف E وكثافتها ٢.٥٥ غ/سم^٣:

- ١- حصائر غير منسوجة، وزن واحدة المساحة ٣٠٠ غ / م^٢؛
- ٢- حصائر منسوجة، وزن واحدة المساحة ٦٠٠ غ/م^٢؛
- ٣- حصائر هجينية (من حصائر منسوجة وغير منسوجة)، وزن واحدة المساحة ١١٠٠ غ/م^٢؛
- ٤- ألياف زجاج مطحونة؛
- ٥- ألياف زجاج صوفية.

يبين الشكل (١-٢) أشكال ألياف الزجاج المستخدمة.



حصائر هجينة



حصائر منسوجة



حصائر غير منسوجة



ألياف صوفية

الشكل (١-٢): أشكال ألياف الزجاج المستخدمة.

٢-١-٣ المساحيق.

- ١- كربونات الكالسيوم، كثافتها ٢.٧١ غ/سم^٣؛
- ٢- هباب السيليكا، كثافته ٢.٦٥ غ/سم^٣ - الشكل (٢-٢).



هباب السيليكا



كربونات الكالسيوم

الشكل (٢-٢): كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا.

٢-١-٣ الشمع.

وهو عبارة عن ألواح شمعية وزنها نوعي ٠.٩ غ/سم^٣، ودرجة انصهارها ٦٨ درجة مئوية - الشكل (٣-٢).

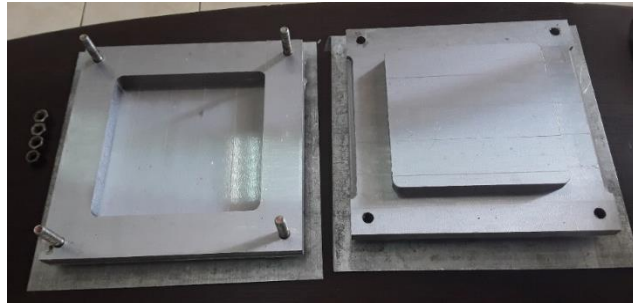
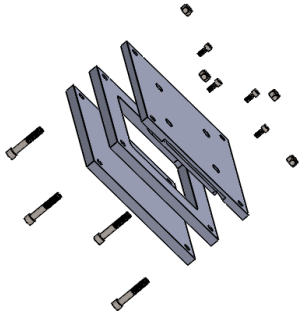


الشكل (٣-٢): الشمع.

٢-٢ التجهيزات.

٢-٢-١ قالب تحضير عينات المواد المركبة.

جرى تصميم وتصنيع قالب عينات معدني لتحضير عينات المواد المركبة، كما هو مبين في الشكل (٤-٢).



الشكل (٤-٢): قالب تحضير عينات المواد المركبة.

٢-٢-٢ مكبس هيدروليكي.

يستخدم لتطبيق ضغط على القالب المعدني بعد وضع خلطة المادة المركبة من أجل ضبط سماكة صفائح عينات المواد المركبة تحت بضغط حتى ٨ بار - الشكل (٥-٢).

٢-٢-٣ خلاط كهربائي.

الغاية منه مزج الإيبوكسي مع الألياف (المطحونة أو الصوفية) أو المساحيق، وتحقيق الابتلال والتجانس - الشكل (٦-٢).

٢-٢-٤ ميزان الكتروني.

يستخدم لوزن الألياف والمساحيق والإيبوكسي ومادة التقسية عند دقة 0.001- الشكل (٢-٧).



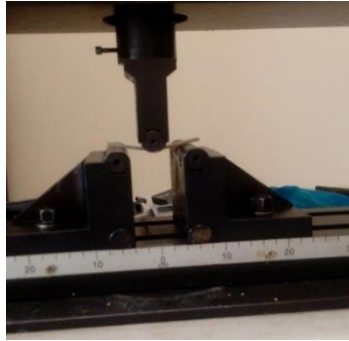
الشكل (٢-٧): ميزان الكتروني.

الشكل (٢-٦): خلاط كهربائي.

الشكل (٢-٥): مكبس هيدروليكي.

٢-٢-٥ جهاز اختبار الانعطاف.

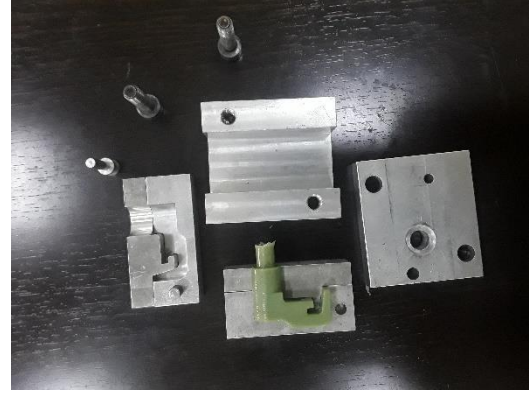
استخدم جهاز الاختبارات الميكانيكية في مختبرات المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، والجهاز طراز WDW-50 من إنتاج شركة JINAN الصينية. استخدم لإجراء اختبارات الانعطاف ، كما يمكن استخدامه من أجل اختبارات الشد والضغط. يجري التحكم فيه عن طريق حاسب بإدخال متغيرات التجربة مثل أبعاد العينات وسرعة التحميل، ويقوم الحاسب برسم منحنى القوة بدلالة التشوه، ويمكن تحصيل النتائج على شكل ملفات الكترونية تحتوي على جميع المعطيات وهي قابلة للمعالجة وحساب مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ. يتألف الجهاز من فك متحرك وفك ثابت، ويتم تطبيق القوة بواسطة الفك المتحرك الموصول مع منصة متحركة تحدد سرعة تحميل ثابتة أثناء الاختبار. تبلغ القوة العظمى للجهاز ١٠ كيلو نيوتن- الشكل (٢-٨).



الشكل (٢-٨): جهاز اختبار الانعطاف.

٦-٢-٢ قوالب تحضير النماذج الشمعية.

تستخدم لتشكيل النماذج الشمعية، حيث يتم حقن الشمع السائل فيها بضغط حتى ٨ بار ودرجة حرارة ٧٠ درجة مئوية، وبعد تصلب الشمع ضمن القالب يتم إخراج النموذج- الشكل (٩-٢).



الشكل (٩-٢): قوالب النماذج الشمعية.

٧-٢-٢ جهاز الصاد والموصد (الأوتوكلاف).

يستعمل جهاز الصاد والموصد (الأوتوكلاف) لإزالة معظم الشمع من القوالب السيراميكية، ويمكن تجديد الشمع وإعادة استخدامه. توضع المصببات القشرية ضمن جهاز الصاد والموصد (الأوتوكلاف) تحت جو من البخار بضغط ٨ بار ودرجة حرارة ١٢٠ درجة مئوية - الشكل (١٠-٢).



الشكل (١٠-٢) جهاز الصاد والموصد الأوتوكلاف.

٢-٢-٨ فرن الغاز.

يستخدم للتخلص من بقايا الشمع في القوالب السيراميكية- الشكل (١١-٢).



الشكل (١١-٢): فرن الغاز.

٢-٢-٩ فرن التلييد.

توضع القوالب فيه في درجة حرارة ١٠٥٠ درجة مئوية ولمدة ساعة، وذلك لتلييد القشرة السيراميكية وللمنع تشققها عند السكب - الشكل (١٢-٢).



الشكل (١٢-٢): فرن التلييد.

٢-٣ طرائق تحضير العينات.

٢-٣-١ تحضير عينات المواد المركبة.

٢-٣-١-١ تحضير العينات الصفحائية باستخدام القالب المعدني.

١- عزل القالب باستخدام لاصق بلاستيكي لمنع حدوث التصاقات بين المعدن وخلطة المادة المركبة كون المادة الرابطة من (الإيبوكسي)؛

٢- إضافة مانع التصاق قبل وضع الخلطة ضمن القالب لضمان عدم الالتصاق ولسهولة إخراج العينة؛

٣- تحضير عينات المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج (الصوفية، المطحونة) والمساحيق:

أ- حساب الأوزان اللازمة من الألياف (الصوفية والمطحونة)، والمساحيق (كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا)، والإيبوكسي والمقسي، كما في الجدول (٢-١٠).

ب- تحضير ثلاث عينات- صفائح من المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج الصوفية بنسب وزنية (٢٠٪، ٤٠٪، ٦٠٪)، وعينة- صفيحة من المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة بنسبة وزنية ٢٠٪، وعينة من المادة المركبة من الإيبوكسي مع كربونات الكالسيوم بنسبة وزنية (٢٠٪)، وعينة- صفيحة من السيليكا بنسبة وزنية (٢٠٪)؛

الجدول (٢-١٠): أوزان الإيبوكسي والمقسي والألياف الزجاجية (المطحونة- الصوفية) والمساحيق في العينات.

رقم العينة	النسب الوزنية للألياف المسحوق	حجم العينة	كثافة الإيبوكسي	كثافة المقسي	كثافة مواد التقوية	نوع الألياف / المساحيق	وزن الإيبوكسي	وزن المقسي	وزن الألياف الزجاجية
	سم ^٣	غ/سم ^٣				غ			
١	٢٠٪	٨٠	١.١٧	٠.٩٤	٢.٥٥	صوفية	٥٧.٣٧	٢١.٨٠	١٩.٧٩
٢	٤٠٪					صوفية	٤٩.٣٩	١٨.٧٦	٤٥.٤٣
٣	٦٠٪					صوفية	٣٨.٦٣	١٤.٦٨	٧٩.٩٧
٤	٢٠٪					مطحونة	٥٧.٣٧	٢١.٨٠	١٩.٧٩
٥	٢٠٪					CaCo3	٥٧.٧٠	٢١.٩٢	١٩.٩١
٦	٢٠٪					SiO2	٥٧.٥٨	٢١.٨٨	١٩.٨٦

ج- تحضير مزيج الإيبوكسي / المقسي وفق الأوزان المحددة ومزجه يدوياً ضمن وعاء حتى التجانس؛
 د- توضع الألياف الصوفية والمساحيق في الخلاط، ويسكب مزيج الإيبوكسي / المقسي مع الاستمرار بالخلط حتى تمام التجانس والابتلال- الشكل (١٣-٢).



الشكل (١٣-٢): مزج الألياف الصوفية والمساحيق مع الإيبوكسي.

د- توزيع مزيج (ألياف صوفية أو مساحيق / الإيبوكسي) ضمن القالب، كما في الشكل (١٤-٢).



الشكل (١٤-٢): توزيع الخليط ضمن القالب

٤- تحضير عينات- صفائح المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج (حصائر منسوجة - حصائر غير منسوجة - حصائر هجينة).

أ- تحضير عينات المادة المركبة بطريقة البناء اليدوي، بعد حساب الحد الأدنى من المادة الرابطة لكل نوع من الألياف وفقاً لسماكتها ولوزن واحدة المساحة كما يلي:

- حجم الزجاج في ١م^٢ من الطبقة (سم^٣) = الوزن واحدة المساحة / الوزن النوعي للألياف؛
- الحجم الهندسي لـ ١م^٢ من الطبقة (سم^٣) = ١٠٠ × ١٠٠ × سماكة الشريحة؛

- الحد الأدنى لحجم المادة الرابطة اللازمة لتبليد الألياف = الحجم الهندسي - حجم الزجاج؛
 - النسبة الحجمية للألياف = حجم الألياف / الحجم الهندسي للطبقة؛
 - النسبة الحجمية للمادة الرابطة = حجم المادة الرابطة / الحجم الهندسي للطبقة.
- ب- تنظيم النتائج ضمن جدول من أجل الأنواع الثلاثة للألياف (حصائر منسوجة - حصائر غير منسوجة - حصائر هجينة) - الجدول (١١-٢).

الجدول (١١-٢): النسب الحجمية والوزنية للألياف والمادة الرابطة.

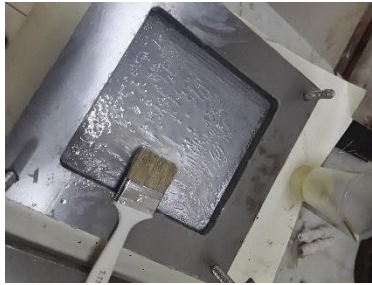
نوع الألياف	وزن واحدة المساحة غ / م ^٢	سماكة الطبقة (مم)	الحجم الهندسي لطبقة (سم ^٣)	النسبة الحجمية للألياف	النسبة الحجمية للمادة الرابطة	النسبة الوزنية للألياف	النسبة الوزنية للمادة الرابطة
غير منسوجة	٣٠٠	٠.٦	٦٠٠	٠.٢٠	٠.٨٠	٠.٣٦	٠.٦٤
نسيجية	٦٠٠	٠.٧	٧٠٠	٠.٣٤	٠.٦٦	٠.٥٤	٠.٤٦
هجينة	١١٠٠	١.٤	١٤٠٠	٠.٣١	٠.٦٩	٠.٥١	٠.٤٩

- ج- تحضير عينات من المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف زجاج (حصائر منسوجة - حصائر غير منسوجة - حصائر هجينة) - وفق النسب المأجول (١١-٢).

الجدول (١٢-٢): العينات المحضرة وفقاً لنسب الألياف (النسيجية - النسيج غير المنسوج - الهجينة)

النسبة الوزنية للألياف						نوع الألياف
%٥٤		%٣٥		%٢٠		غير منسوجة
%٦٢		%٥٤		%٢٠		نسيجية
%٦٣	%٥٢	%٤٥	%٤٠	%٣٤	%٢٠	هجينة

- د- توضع طبقات الألياف ضمن القالب ويتم توزيع المادة الرابطة (نظام الإيبوكسي/المقسي) كما هو مبين في الشكل (١٥-٢).



الشكل (١٥-٢): وضع طبقات الألياف ضمن القالب

٥- إغلاق القالب ووضعة تحت ضغط مكبس هيدروليكي لضمان ضبط السماكة على كامل مساحة العينة، ويحكم شد البراغي للحفاظ على الضغط المطبق بعد زوال تأثير المكبس.

٦- ترك القالب لمدة يوم كامل قبل فتحه وإخراج العينة ووضعها في الفرن مدة ٤ ساعات على درجة ١٠٠ درجة مئوية.

٧- الحصول على صفائح تقص بوساطة قرص قص لعينات على شكل متوازي مستطيلات تمهيداً لاختبار خواصها الميكانيكية.

٢-٣-١-٢ تحضير العينات الاسطوانية باستخدام القالب الشمعي.

١ - تحضير قوالب شمعية وتقبها وفق القطر المحدد ووضع ألياف الزجاج فيها (حصائر منسوجة - حصائر غير منسوجة - حصائر هجينة) عند نسبة وزنية ٢٠٪؛

٢- حقن القوالب الشمعية (حالة الألياف) بالإيبوكسي /المقسي حتى ظهوره من فتحة الخروج، وتركها حتى تمام التصلب؛

٣- في حالة المساحيق (كربونات الكالسيوم- هباب السيليكا)، يوضع المزيج (المسحوق مع المادة الرابطة) داخل القالب الشمعي عند نسبة وزنية ٢٠٪؛

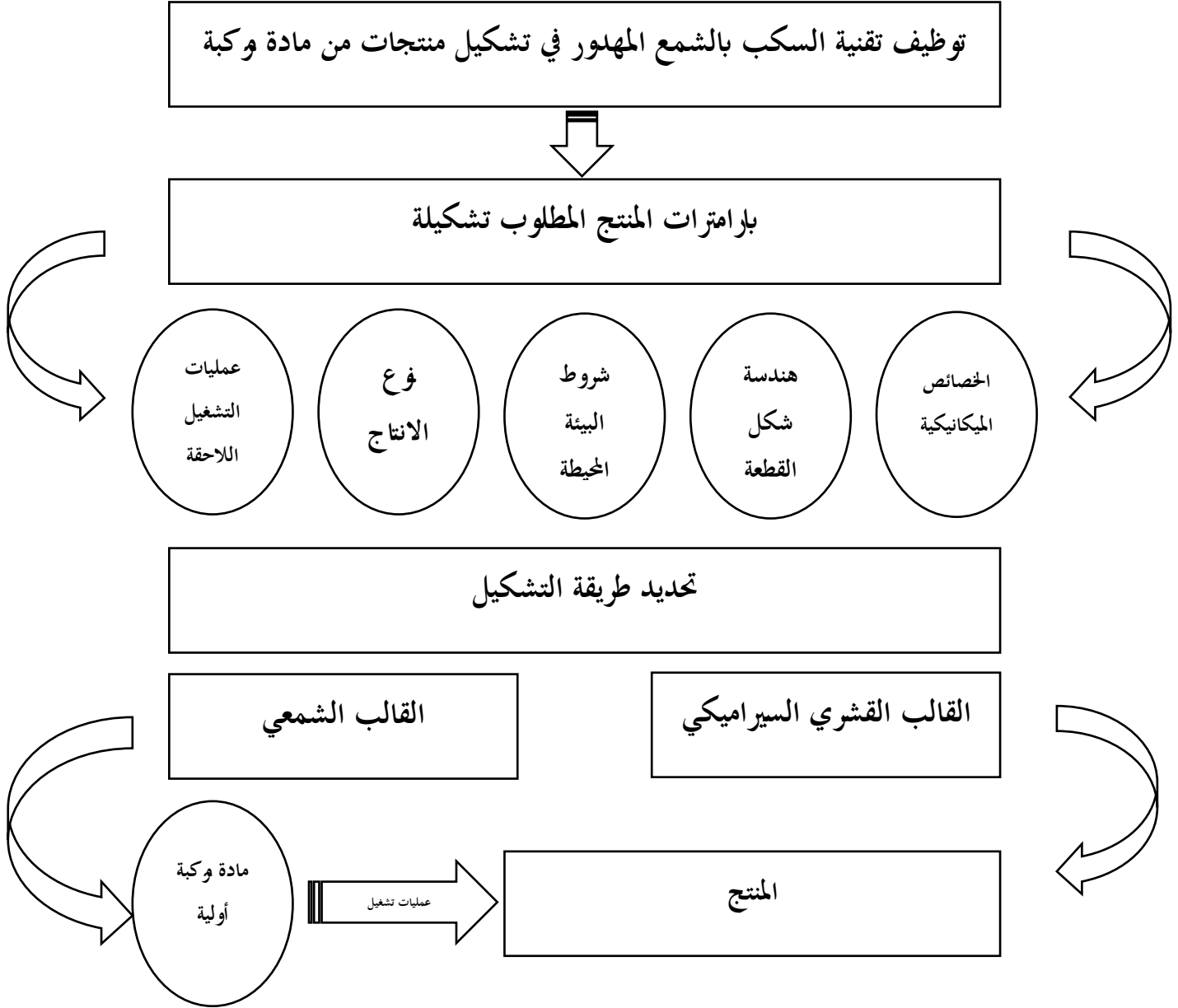
٤- بعد مضي دورة المعالجة في درجة الحرارة العادية، صهر الشمع وإزالة العينات الأسطوانية- يُبين الشكل (٢-١٦): مراحل تحضير القالب الشمعي للعينات الاسطوانية.



الشكل (٢-١٦): مراحل تحضير القالب الشمعي للعينات الاسطوانية.

٢-٣-٢ تحضير منتجات مواد مركبة باستعمال تقنية السكب بالشمع المهودور.

يوضح الشكل (١٧-٢) المنهجية المتبعة عند اختيار طريقة تشكيل منتج مادة مركبة باستعمال تقنية السكب بالشمع المهودور



الشكل (١٧-٢): المنهجية المتبعة عند اختيار طريقة تشكيل منتج مادة مركبة باستعمال تقنية السكب بالشمع المهودور.

٢-٣-١ تشكيل منتجات مواد مركبة باستخدام القالب القشري (السيراميكي).

- المزايا:

- ١- تحضير قوالب معقدة لأشكال؛
- ٢- استخدام المعدن المصهور والاستفادة منها في تحضير منتجات من مواد مركبة معقدة لأشكال؛
- ٣- استخدام الألياف المطحونة والمساحيق ذات اللزوجة المنخفضة في هذه القوالب؛
- ٤- تشكيل عدد كبير من المنتجات (انتاج كمي)؛
- ٤- عدم حاجة المنتجات لعمليات تشغيل لاحقة وإنما لعمليات إنهاء بسيطة؛
- ٤- وجوب عدم تعرض المنتجات لإجهادات وأحمال ديناميكية عالية نسبياً وفائدة هذه التقنية في الحصول على منتجات مثل الأغطية والعلب والصناديق التي لا تتعرض لأحمال ديناميكية، وتحقق العازلية الكهربائية والكهرومغناطيسية، بالإضافة لتحقيق الكتامة المطلوبة، وحماية التجهيزات ضمنها.

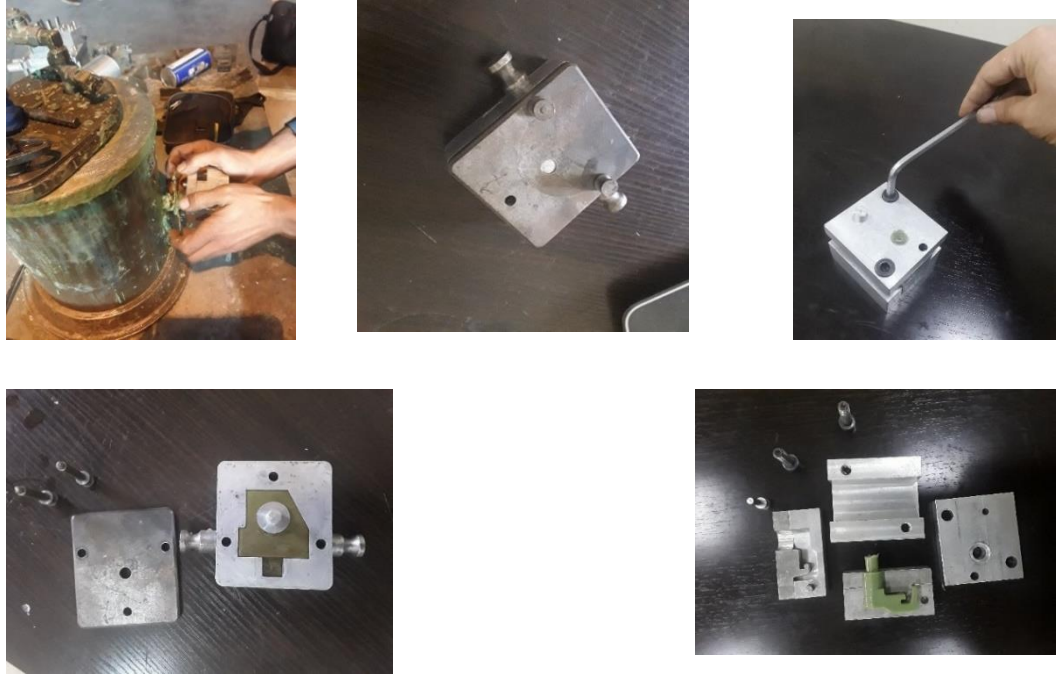
٢-٣-١-١ خطوات تشكيل منتجات مواد مركبة باستخدام القالب السيراميكي.

تشتمل الخطوات الأساسية على:

١. تشكيل النموذج الشمعي؛
٢. تشكيل القالب السيراميكي القشري؛
٣. إزالة الشمع من القالب السيراميكي القشري؛
٤. حقن المادة المركبة ضمن القالب السيراميكي القشري؛
٥. تحطيم القالب السيراميكي القشري وإخراج المنتج؛

١- تشكيل النموذج الشمعي.

يتم تشكيل النموذج الشمعي عن طريق حقن الشمع السائل تحت ضغط حتى ٨ بار ضمن قالب معدني يمكن عن طريقه تحضير عدد لا نهائي من النماذج الشمعية- الشكل (١٨-٢).



الشكل (١٨-٢): تشكيل النموذج الشمعي.

٢- تشكيل القالب السيراميكي القشري.

يتم تشكيل القالب السيراميكي القشري عن طريق طلاء النماذج الشمعية بعدة طبقات من ملاط سيراميكي يفصل بينها فترات زمنية محددة. يُبين الشكل (١٩-٢) عملية تشكيل القالب السيراميكي القشري.



الشكل (١٩-٢): تشكيل القالب السيراميكي القشري.

٣- إزالة الشمع من القالب السيراميكي القشري.

يتم أولاً صهر معظم الشمع باستخدام جهاز الصاد والموصد (الأوتوكلاف)، والتخلص من بقايا الشمع بواسطة فرن الغاز، وبعد ذلك، توضع القوالب في فرن التلييد من أجل زيادة مقاومتها ومنع تشققها تحت تأثير ضغط السكب.

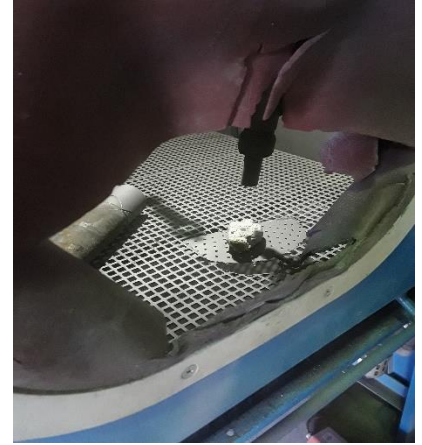
٤- حقن المادة المركبة ضمن القالب السيراميكي.

يتم في البداية تحضير القوالب وحقنها بمادة مانعة للالتصاق، ثم حقن المادة المركبة (إيبوكسي / ألياف زجاجية مطحونة - مساحيق) ضمن القوالب السيراميكية القشرية المحضرة، وتركها حتى تمام التصلب.

٥- تحطيم القالب السيراميكي القشري.

يتم تحطيم القالب السيراميكي القشري باستخدام تيار من الماء مع الرمل أو باستخدام طريقة السفع بالرمل للحصول على المنتج النهائي.

يوضح الشكل (٢-٢٠) طريقة تحطيم القالب السيراميكي القشري والحصول على المنتج النهائي.



الشكل (٢-٢٠): تحطيم القالب السيراميكي القشري

٢-٣-٢-٢ تشكيل منتجات مواد مركبة باستخدام القالب الشمعي.

يستفاد من القالب الشمعي في تحضير مادة مركبة أولية (أسطوانية - متوازي مستطيلات) وفقاً للنسب المحددة لمادة التقوية (الألياف الزجاجية) ضمن المادة الرابطة البوليميرية (الإيبوكسي).

تتصف هذه التقنية بما يلي:

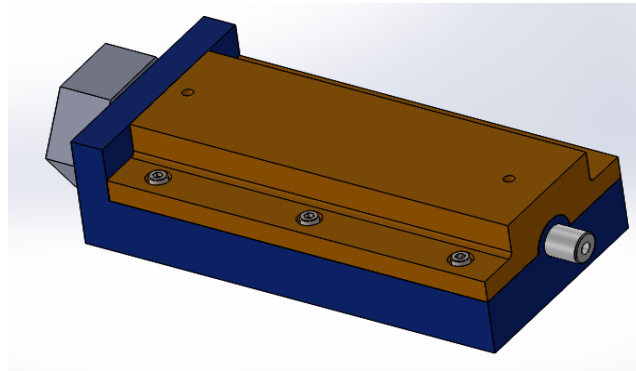
- ١- تصميم القالب المعدني الخاص بحقن القالب الشمعي لمرة واحدة فقط؛
- ٢- إنتاج عدد لا نهائي من القوالب الشمعية عن طريق القالب المعدني؛
- ٣- الحصول على المنتج عن طريق صهر الشمع عن المادة المركبة الأولية بعد تصلبها؛
- ٤- إمكانية إعادة استخدام الشمع في تشكيل قوالب شمعية جديدة؛
- ٥- إخضاع المادة المركبة الأولية لعمليات تشغيل لاحقة (خراطة - تفريز) للحصول على المنتج المطلوب.

٢-٣-٢-١ خطوات تشكيل منتجات مواد مركبة باستخدام القالب الشمعي.

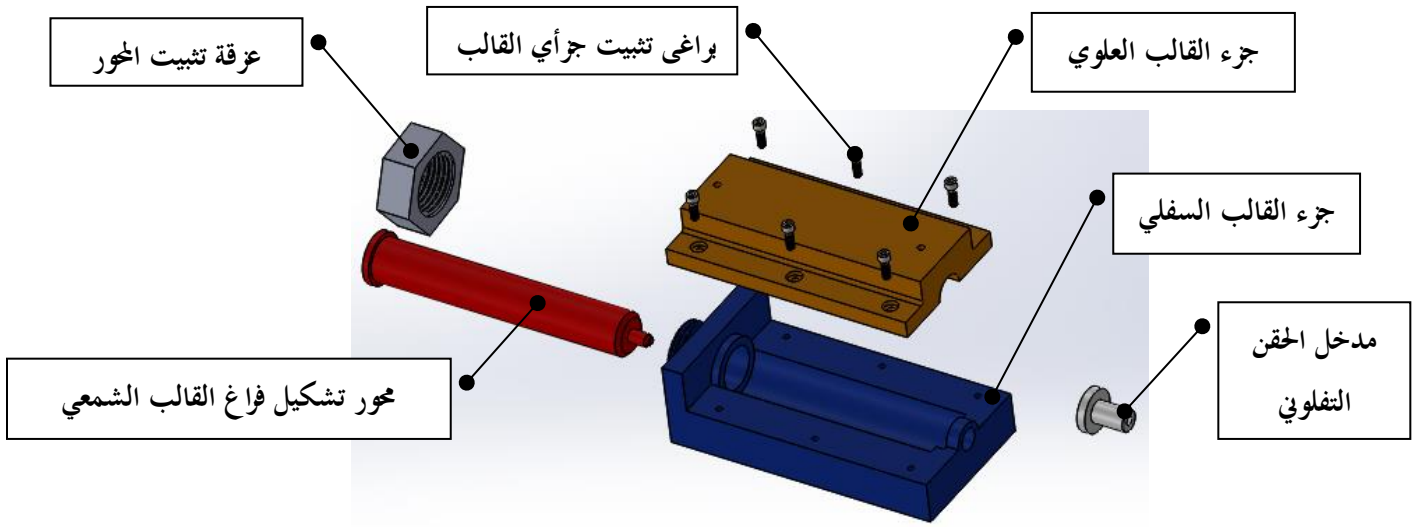
أ- تجهيز القالب المعدني الخاص بحقن القالب الشمعي والمادة المركبة الأولية.

يصمم قالب معدني لحقن القالب الشمعي وفق البارامترات التالية:

- القالب مخصص للحصول على مادة مركبة أولية أسطوانية؛
- اختيار معدن الأجزاء الرئيسية في القالب من الألمنيوم أو أحد سبائكه كون درجة حرارة صهر الشمع ٧٠ درجة مئوية والألمنيوم ٦٦٠ درجة مئوية، وكون زمن تشغيل قطع القالب من الألمنيوم أقل من زمن تشغيل سبائك الفولاذ.
- يتألف القالب من الأجزاء الرئيسية التالية الموضحة في الشكل (٢-٢١) والشكل (٢-٢٢).

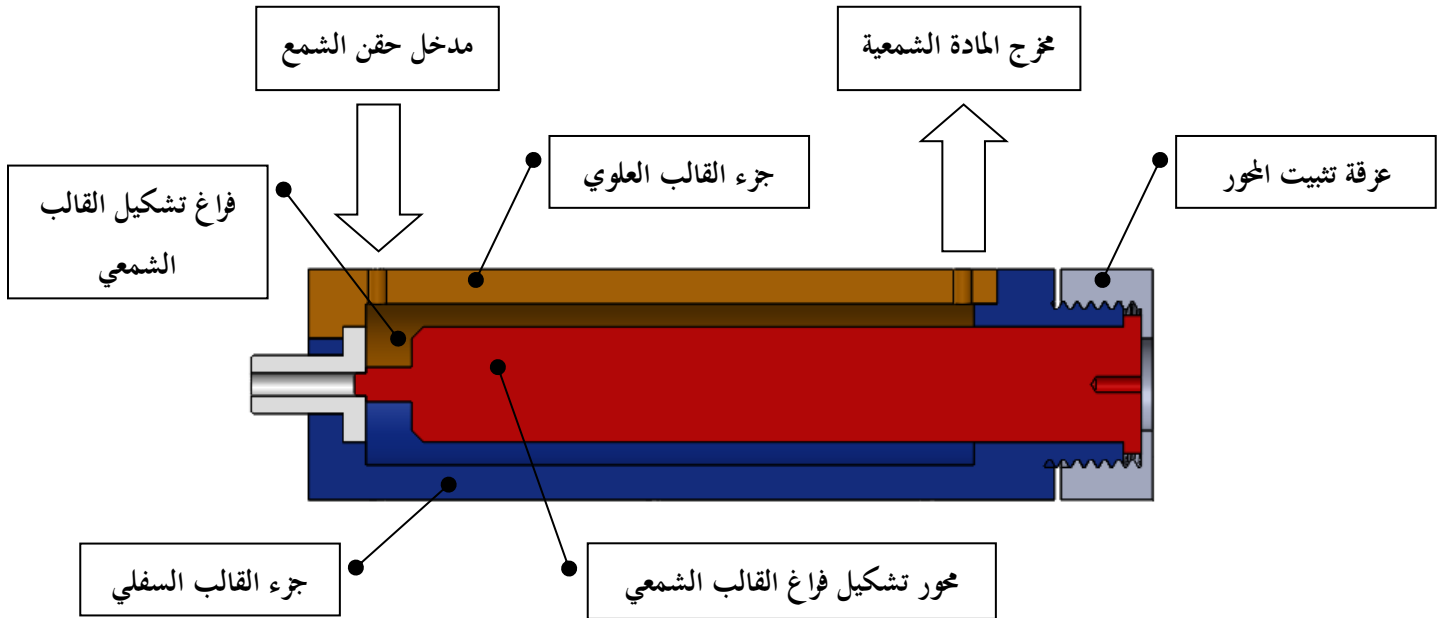


الشكل (٢-٢١): مجسم قالب معدني لتحضير مادة مركبة أسطوانية



الشكل (٢-٢٢): أجزاء القالب المعدني لتحضير مادة مركبة اسطوانية.

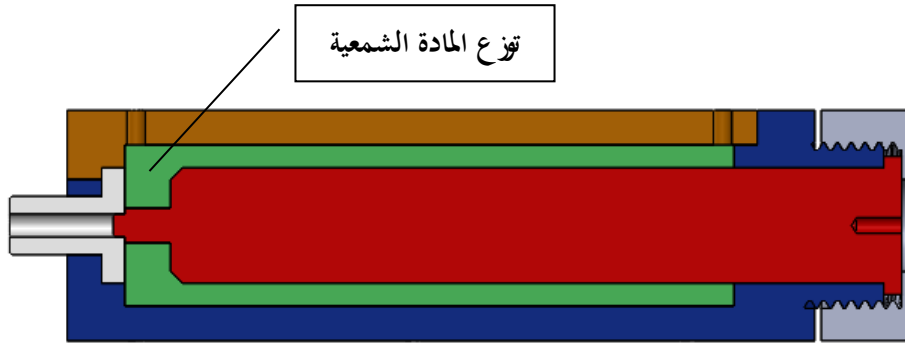
يتم تجميع قالب التشكيل المعدني، ويوضح الشكل (٢-٢٣) مقطع عرضي له.



الشكل (٢-٢٣): مقطع عرضي للقالب المعدني لتحضير المواد المركبة الأولية.

ب - حقن الشمع المصهور.

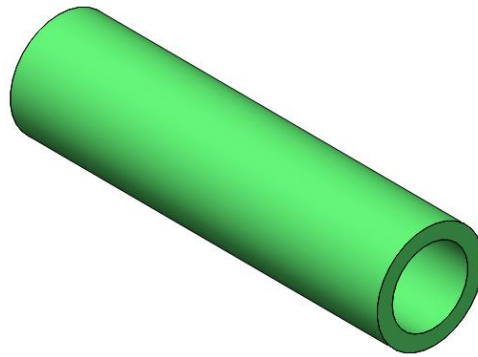
يُحقن الشمع المصهور بواسطة آلة حقن الشمع عبر مدخل الحقن في القالب المعدني تحت ضغط ٤ بار، وعند خروج المادة الشمعية من المخرج، يكون القالب قد امتلأ. يُبين الشكل (٢٤-٢) توزيع المادة الشمعية ضمن تجويف القالب المعدني.



الشكل (٢٤-٢): توزيع المادة الشمعية ضمن تجويف القالب المعدني.

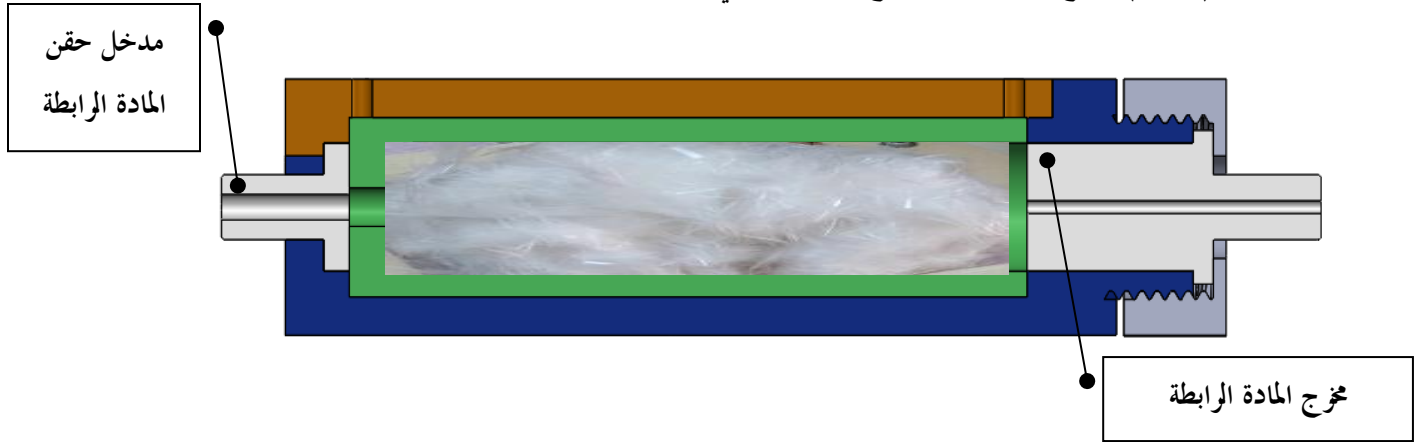
ت - تشكيل المادة المركبة.

بعد تصلب المادة الشمعية، يتم فك عزقة تثبيت المحور وسحب محور تشكيل فراغ القالب الشمعي، يبين الشكل (٢٥-٢) القالب الشمعي المتشكل ضمن القالب. يجري وضع الألياف (الألياف الزجاجية) وفق النسبة المحددة ضمن فراغ القالب الشمعي.



الشكل (٢٥-٢) القالب الشمعي المتشكل ضمن القالب المعدني

يُبيّن الشكل (٢٦-٢) وضع الألياف ضمن فراغ القالب الشمعي



الشكل (٢٦-٢): وضع الألياف ضمن فراغ القالب الشمعي

يجري وصل مدخل حقن المادة الرابطة بآلة الحقن (الإيبوكسي مع المقسي)، ويوصل مخرج المادة الرابطة مع مضخة الخلاء، ويحقن المزيج داخل القالب تحت ضغط ١.٥ بار مع تطبيق خلاء قدره ٠.٠٣ بار على الطرف الآخر. يتوقف الحقن عند خروج المادة الرابطة من المخرج. عندها يجري إخراج القالب الشمعي من القالب المعدني، وإغلاق وطرفية بالشمع وترك المادة المركبة الأولية حتى تصلبها. وللحصول على المادة المركبة، يجري صهر الشمع والتخلص منه عن بوضع القالب الشمعي الحاوي عليها ضمن حوض شمعي ساخن عند درجة حرارة ٧٠ مئوية. بعد ذلك يتم إجراء عمليات تشغيل للمادة المركبة الأولية للحصول على المنتج المطلوب.

يمكن تكرار الخطوات واستساخ المادة المركبة باستعمال العدد المطلوب من القوالب الشمعية واستعمال القالب المعدني نفسه.

يبين الشكل (٢٧-٢) مثال على تشكيل لولب M12 مع صامولة وتشغيله بهذه الطريقة.



الشكل (٢٧-٢): تشكيل لولب M12 مع صامولة وتشغيله.

٢-٤ طرائق القياس والاختبار.

٢-٤-١ اختبار الانعطاف.

جرى اختبار الانعطاف على ٥ عينات تمثل كل نسبة من ألياف الزجاج في المواد المركبة، وتم أخذ القيم الوسطية لكل من مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ. تبلغ أبعاد العينات الموشورية (٣-١.٥) X ١٠ X ٢٠٠ (مم)، وطول العينات الاسطوانية ١٢٠ (مم) وقطرها ١٥ (مم). بلغت المسافة بين المسندين ٦٠ (مم) في جميع اختبارات الانعطاف، وسرعة التحميل ٥ (مم/دقيقة). بناءً على الدراسات السابقة [٢٥، ٢٧، ٢٩]، والمواصفة ASTM D790 [٣٢]، تحسب مقاومة الانعطاف (ميغا باسكال) في حالة العينة الموشورية:

$$FS=3P.L/2b.t^2$$

وفي حالة العينة الاسطوانية:

$$FS= P.L/\pi R^3$$

يحسب معامل يونغ في حالة العينة الموشورية:

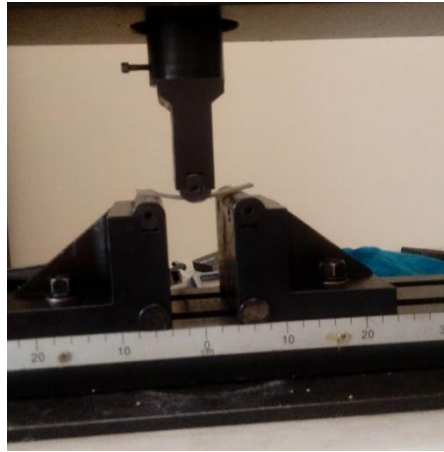
$$E=(F/\delta) * (L^3/4b.t^3)$$

وفي حالة العينة الاسطوانية:

$$E = (F/\delta) * (L^3/12\pi R^4)$$

حيث: P: الحمل الأقصى المطبق (نيوتن)، t: سماكة العينة (مم)، b: عرض العينة (مم)، L: طول العينة (مم).

R: نصف قطر مقطع العينة الاسطوانية



الشكل (٢-٢٧): اختبار الانعطاف لعينات المواد المركبة.

الفصل الثالث

النتائج والمناقشة

الفصل الثالث

النتائج والمناقشة

٣-١ نتائج اختبار الانعطاف لمواد مركبة ايبوكسي- ألياف زجاج.

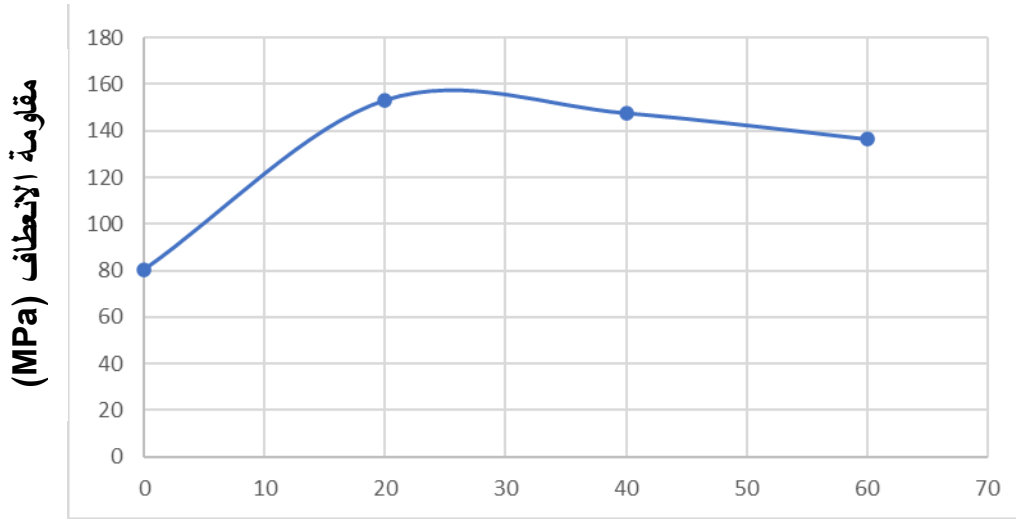
يبين الجدول (٣-١) نتائج اختبارات الانعطاف لعينات مواد المركبة ايبوكسي- ألياف زجاج وفقاً لنسبة الألياف وشكلها.

الجدول (٣-١): نتائج اختبارات الانعطاف لعينات موشورية مواد مركبة ايبوكسي- ألياف زجاج وفقاً لنسبة الألياف وشكلها.

النسبة المئوية للألياف	نوع الألياف	مقاومة الانعطاف (MPa)	الانحراف المعياري	معامل يونغ (GPa)	الانحراف المعياري
%٠	-	٨٠.٥٩	(١٤.٢٩ ±)	٢.٢٧	(٠.٣٧ ±)
%٢٠	صوفية	١٥٣.١٧	(٦.٤٨ ±)	٦.٢٤	(٠.٤٠ ±)
%٤٠		١٤٧.٥٣	(١٧.٤١ ±)	٧.٨٩	(٠.٥٩ ±)
%٦٠		١٣٦.٤	(٥٩.١٧ ±)	١١.٩٥	(٣.٥٠ ±)
%٢٠	نسيج	١١٣.٠٧	(٣٢.٢١ ±)	٣.٦٩	(٠.٩٨ ±)
%٥٤		٣٣٩.٩	(٤١.٦٧ ±)	١٠.٧٩	(١.٨٤ ±)
%٦٢		٣٢٦.٠٤	(٧.٠٦ ±)	١٢.٥٥	(٠.٧٨ ±)
%٢٠	نسيج غير منسوج	١٠٠.٧١	(٢٤.٣٩ ±)	٤.٥٦	(٠.٩٨ ±)
%٣٥		١٥٥.٩٨	(١٣.٥٤ ±)	٥.٩٧	(٠.٧٠ ±)
%٥٤		٨٣.٤٧	(١٣.٨٧ ±)	٤.٥٧	(١.١٤ ±)
%٢٠	هجين	٩٧.٧٣	(٢٧.٠٦ ±)	٢.٣٣	(٠.٧٣ ±)
%٣٤		٢٠٨.٩	(٤١.١٢ ±)	٦.٠٥	(١.٢٢ ±)
%٤٠		٢٢٥.٥	(٢٢.٠٧ ±)	٧.١٥	(١.١٣ ±)
%٤٥		٢٣٣.٤٠	(١٩.٣٦ ±)	٧.٧٦	(٠.٩١ ±)
%٥٢		٣٣٣.٥٥	(١٢.٤٣ ±)	٩.٩٥	(٠.٤٦ ±)
%٦٣		٢٧٤.٤٤	(٣٠.٨٦ ±)	١٠.٨٦	(٠.٤٦ ±)

١-١-٣ مقاومة الانعطاف.

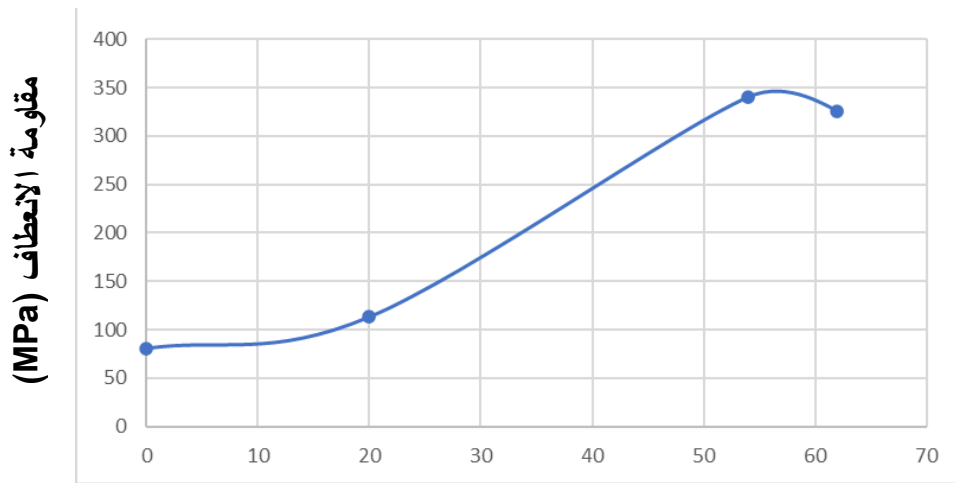
يوضح الشكل (١-٣) تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج الصوفية، حيث يلاحظ زيادة في مقاومة الانعطاف مع زيادة نسبة الألياف حتى النسبة ٢٠٪ لتعود وتخفض بعدها مع زيادة نسبة ألياف الزجاج.



النسبة المئوية للألياف %

الشكل (١-٣): تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج الصوفية.

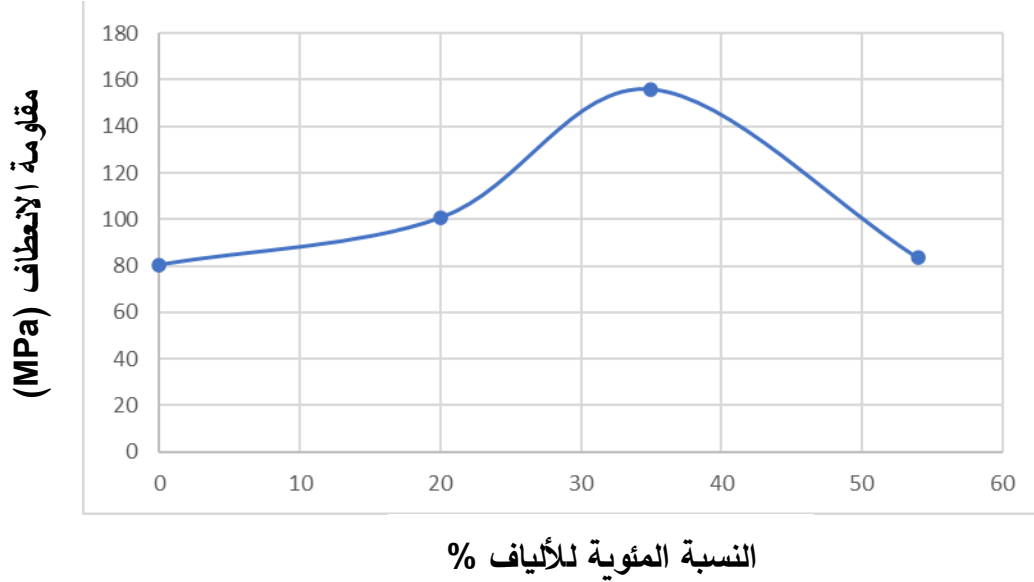
يوضح الشكل (٢-٣) تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج النسيجية، حيث يلاحظ زيادة في مقاومة الانعطاف مع زيادة نسبة الألياف حتى جوار النسبة ٥٤٪ لتعود الانخفاض بعدها مع استمرار زيادة نسبة الألياف.



النسبة المئوية للألياف %

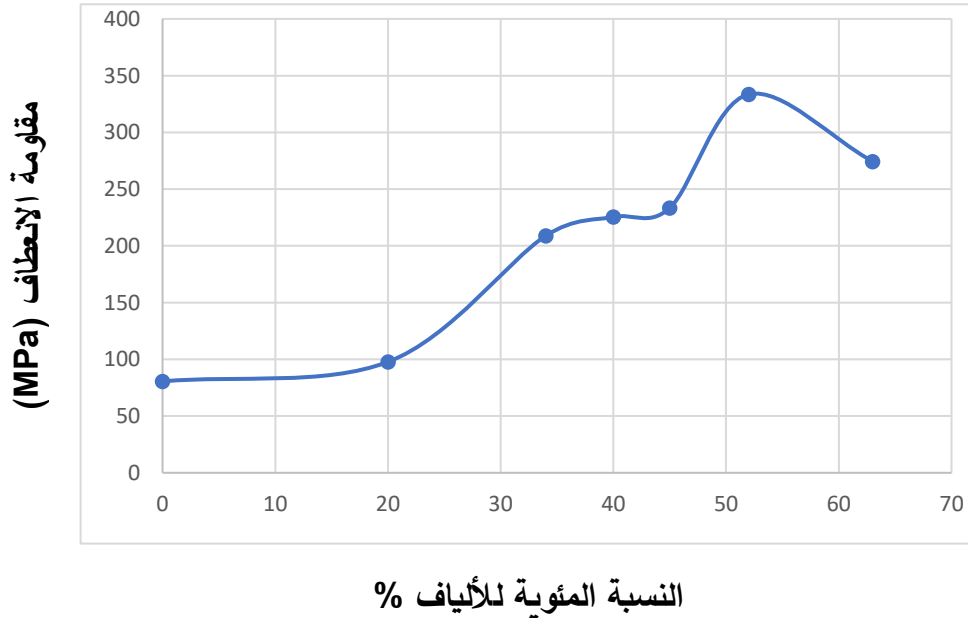
الشكل (٢-٣): تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج النسيجية.

يوضح الشكل (٣-٣) تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج غير المنسوجة ضمن عينات المادة المركبة من الإيبوكسي، حيث يلاحظ ازدياد مقاومة الانعطاف مع زيادة نسبة الألياف حتى جوار النسبة ٣٤٪ لتعاود الانخفاض بعدها مع زيادة نسبة هذه الألياف.



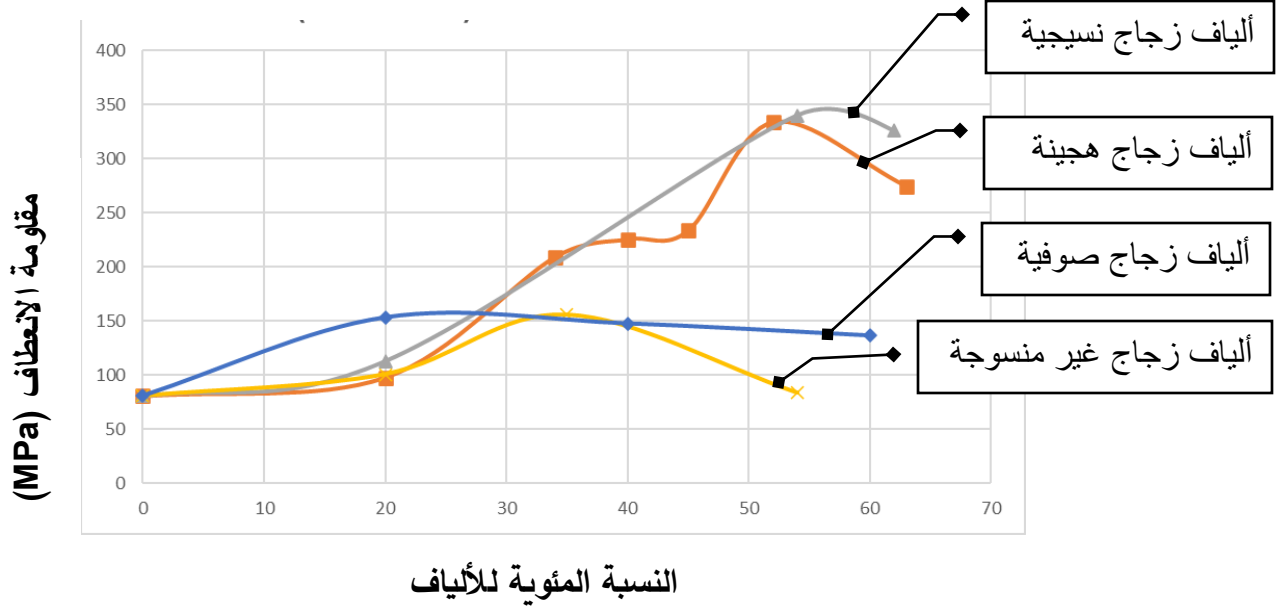
الشكل (٣-٣): تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج غير المنسوجة.

يوضح الشكل (٤-٣) تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج (الهجينة). يتبين زيادة في مقاومة الانعطاف مع زيادة نسبة الألياف الهجينة حتى جوار النسبة ٥٢٪ لتعاود الانخفاض بعدها مع زيادة نسبة الألياف.



الشكل (٤-٣): تغير مقاومة الانعطاف مع نسبة ألياف الزجاج الهجينة.

يُبيّن الشكل (٣-٥) مقارنة بين تغير مقاومة الانعطاف لعينات المواد المركبة من الإيبوكسي مع نسبة كل من أشكال الألياف السابقة.



الشكل (٣-٥): مقارنة بين تغير مقاومة الانعطاف لعينات المواد المركبة من الإيبوكسي مع نسبة كل من أشكال الألياف.

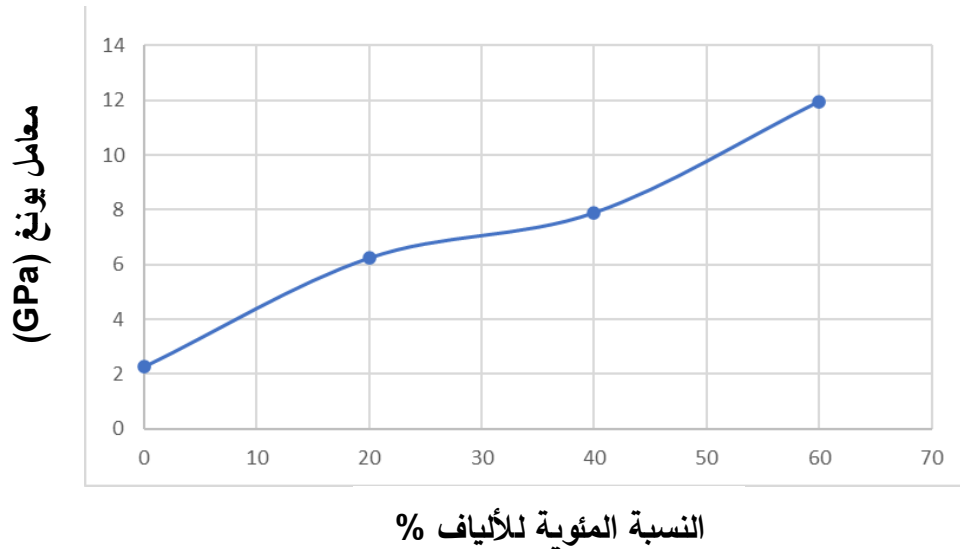
من خلال مقارنة مقاومة الانعطاف لعينات المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج (الصوفية) مع عينات المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج (النسيجية - غير المنسوجة - الهجينة)، يلاحظ ما يلي:

- زيادة مقاومة الانعطاف للمواد المركبة ايبوكسي- ألياف زجاج عموماً مع زيادة نسبة ألياف الزجاج حتى نسبة ألياف معينة، ثم تناقصها بعد هذه النسبة. وتتسجم زيادة مقاومة الانعطاف مع مفعول التقوية لألياف الزجاج نتيجة خصائصها الميكانيكية العالية مقارنة بخصائص الايبوكسي الميكانيكية. أما تناقص مقاومة الانعطاف بعد نسبة ألياف معينة، فهو يرتبط بعدم كفاية الايبوكسي لتحقيق ابتلال الألياف وإشباعها وتغليفها بالاييبوكسي،
- تشابه سلوك ألياف الزجاج (الصوفية) وألياف الزجاج غير المنسوجة في تقوية الايبوكسي من حيث أعلى مقاومة انعطاف ونسبة ألياف الزجاج التي تحققها، ويعود الفرق في نسبة ألياف الزجاج التي تحقق أعلى مقاومة انعطاف في هذين النوعين من الألياف إلى كون ألياف الزجاج غير المنسوجة أكثر ترصاً من ألياف الزجاج الصوفية التي تستهلك نسبة أكبر من الايبوكسي لتعبئة الفراغات بينها، وبالتالي وجود نسبة أقل من ألياف الزجاج التي تقوي،
- تشابه سلوك ألياف الزجاج النسيجية وألياف الزجاج الهجينة في تقوية الايبوكسي من حيث أعلى مقاومة انعطاف ونسبة ألياف الزجاج التي تحققها، هذا يشير إلى أن طبقة ألياف الزجاج غير المنسوجة في ألياف الزجاج الهجينة لم تؤثر سلباً على مفعول تقويتها.
- يمكن عموماً ملاحظة تميز ألياف الزجاج النسيجية في تقوية الايبوكسي وتحقيق مقاومة انعطاف عليا عند حد أدنى من الايبوكسي ونسبة عليا من ألياف الزجاج قدرها ٥٤%.

يؤكد الشكل (٥-٣) الاستنتاجات حول سلوك أشكال ألياف الزجاج المختلفة وفعالية تقويتها لبوليمير الايبوكسي. وتتفق نتائج مقاومة الانعطاف مع عددٍ من الأعمال السابقة [٢٧، ٢٨، ٢٩، ٣٠].

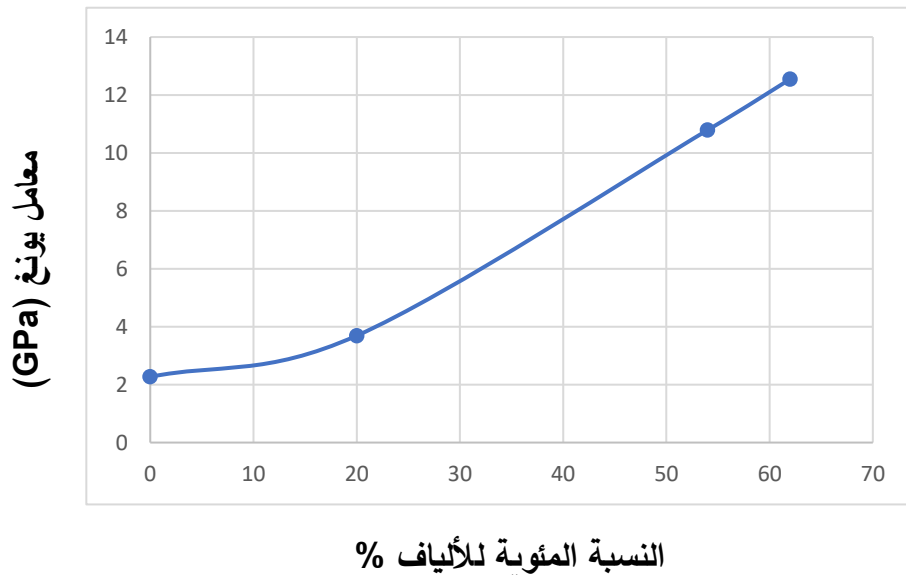
٣-١-٢ معامل يونغ.

يبين الشكل (٦-٣) تغير معامل يونغ مع نسبة ألياف الزجاج الصوفية، يُلاحظ زيادة مطردة في معامل يونغ مع زيادة نسبة ألياف الزجاج (الصوفية).



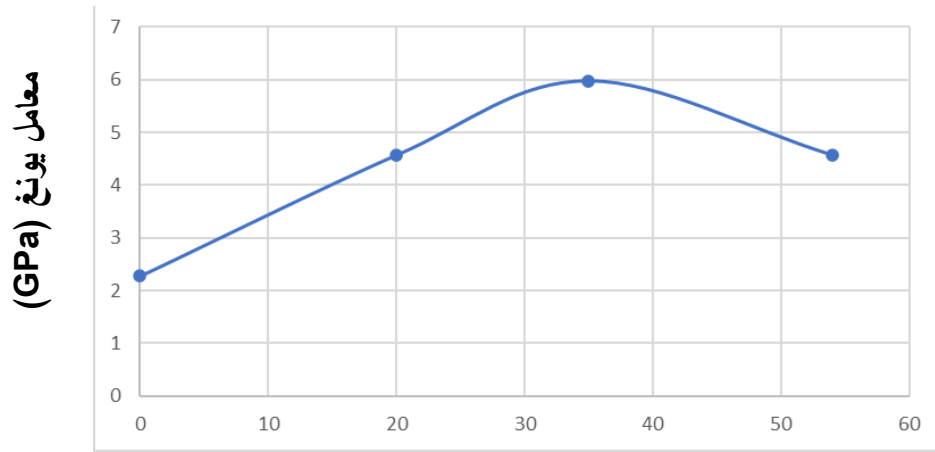
الشكل (٦-٣): تغير معامل يونغ مع نسبة ألياف الزجاج الصوفية.

يوضح الشكل (٧-٣) تغير معامل يونغ مع نسبة ألياف الزجاج النسيجية، حيث يلاحظ زيادة مطردة لمعامل يونغ مع زيادة نسبة ألياف الزجاج النسيجية.



الشكل (٧-٣): تغير معامل يونغ مع نسبة ألياف الزجاج النسيجية.

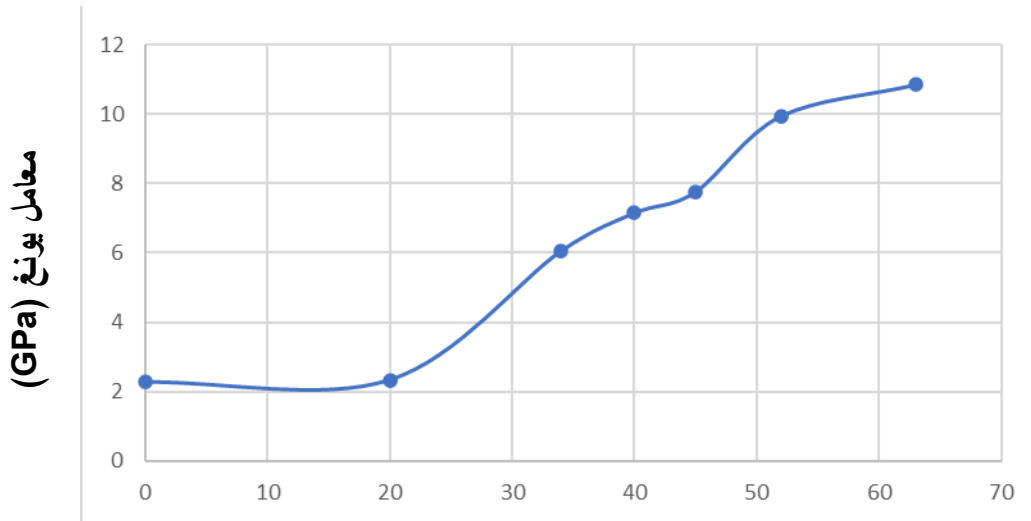
بيّن الشكل (٨-٣) تغير معامل يونغ مع نسبة ألياف الزجاج غير المنسوجة، حيث يلاحظ حدوث زيادة في معامل يونغ مع زيادة نسبة ألياف الزجاج غير المنسوجة.



النسبة المئوية للألياف %

الشكل (٨-٣): تغير معامل يونغ مع نسبة ألياف الزجاج غير المنسوجة.

يُبيّن الشكل (٩٧-٣) تغير معامل يونغ مع نسبة الألياف الهجينة، حيث يلاحظ زيادة مطردة في معامل يونغ مع ازدياد نسبة الألياف.

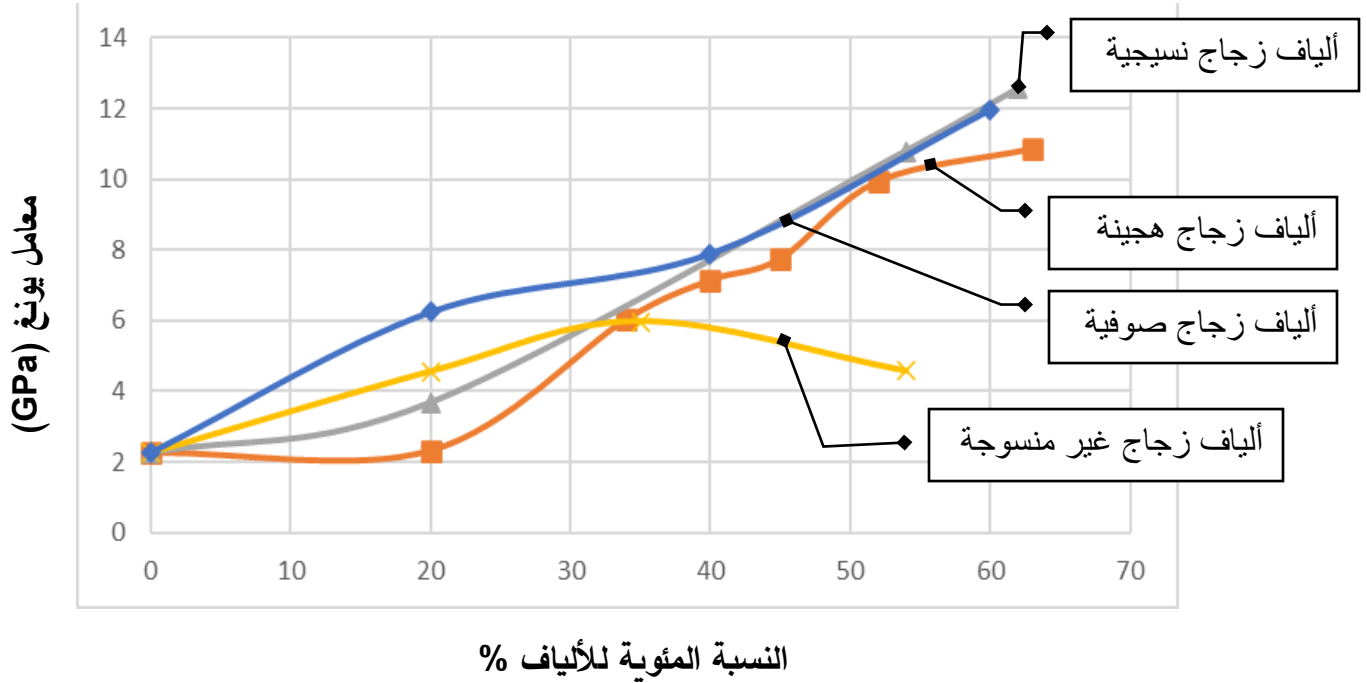


النسبة المئوية للألياف %

الشكل (٩-٣): تغير معامل يونغ مع نسبة الألياف الهجينة.

ترتبط زيادة معامل يونغ مع نسبة ألياف الزجاج مهما كان نوعها مع كون معامل يونغ لألياف الزجاج أكبر منه للإيبوكسي، مما يزيد مقاومة المادة المركبة ايبوكسي- ألياف زجاج للتشوه.

يُبين الشكل (٣-١٠) مقارنة بين تغير معامل يونغ لعينات المواد المركبة من الإيبوكسي مع نسبة كل من أشكال الألياف السابقة.



الشكل (٣-١٠): مقاومة بين تغير معامل يونغ لعينات المواد المركبة من الإيبوكسي مع نسبة كل من أشكال الألياف.

وتتفق نتائج معامل يونغ مع عددٍ من الأعمال السابقة [٢٧، ٢٨، ٢٩، ٣٠].

يُستنتج مما سبق أنه، عند تحضير منتجات مادة مركبة بطريقة البناء اليدوي، يجب بشكل عام الأخذ بعين الاعتبار الحد الأعلى لمادة التقوية ضمن الطبقة، لأنه في حال انخفضت قيمتها عن هذا الحد، يتشكل بين طبقات المادة المركبة طبقة صرفة من المادة الرابطة تُسبب في حصول فصل بين الطبقات المركبة الرئيسية وتضعف الخواص الميكانيكية للمادة المركبة، أما إذا زادت نسبة مادة التقوية عن الحد الأعلى، فلن يحصل تبليل جيد للألياف، وهذا بدوره يؤثر بشكل سلبي أيضاً على الخواص الميكانيكية.

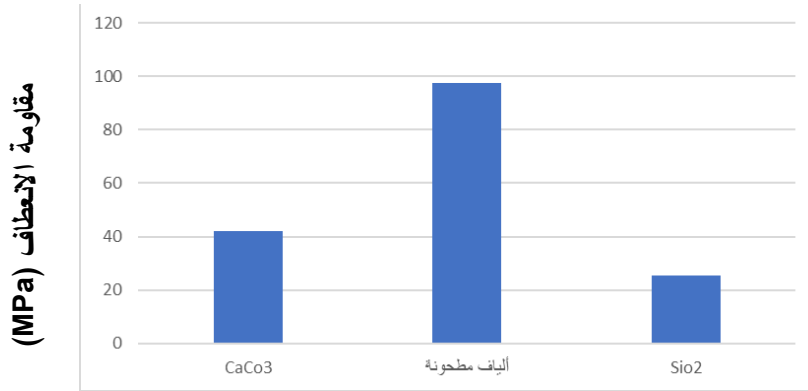
٣-٢ نتائج اختبار الانعطاف لعينات موشورية مواد مركبة ايبوكسي- ألياف زجاج مطحونة أو مساحيق.

يُبين الجدول (٣-٢) نتائج اختبارات الانعطاف على عينات موشورية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا.

الجدول (٣-٢): نتائج اختبارات الانعطاف على عينات موشورية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا.

النسبة المئوية لمادة التقوية	نوع الألياف/ المساحيق	مقاومة الانعطاف (MPa)	الانحراف المعياري	معامل يونغ (GPa)	الانحراف المعياري
٢٠%	كربونات الكالسيوم	٤١.٩٧٠	(٤.٦٩ ±)	٤.٦٤٤	(٠.٥١ ±)
٢٠%	ألياف زجاجية مطحونة	٩٧.٥٢	(١٠.٢٩ ±)	٥.١٦	(٠.٣٨ ±)
٢٠%	سيليكا	٢٥.٣٠٧	(٣.١٤ ±)	٣.٧٨	(٠.١٧ ±)

يوضح الشكل (٣-١١) مقارنة بين مقاومة الانعطاف لعينات موشورية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠%.

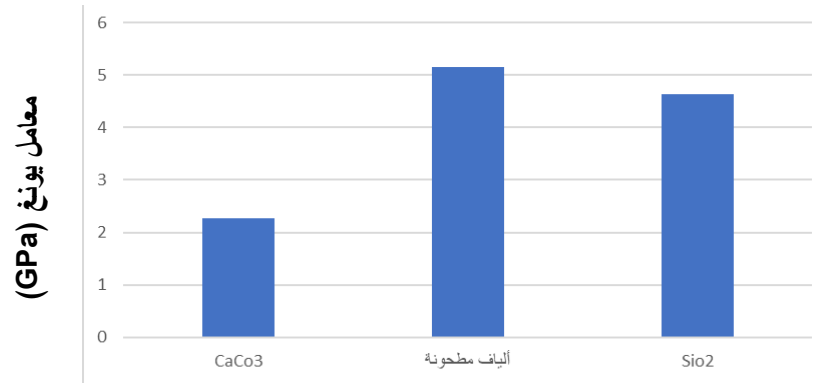


نوع الألياف أو المساحيق

الشكل (٣-١١): مقارنة بين مقاومة الانعطاف لعينات موشورية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠%.

من الشكل (٣-١١)، يلاحظ أن المادة المركبة من الإيبوكسي مع هباب السيليكا تبدي مقاومة انعطاف أقل من ألياف الزجاج المطحونة وكربونات الكالسيوم. يتميز هباب السيليكا النانوي بسطح نوعي وسطح تماس أكبر بكثير من ألياف الزجاج المطحونة وكربونات الكالسيوم، ومع ذلك، يؤدي هباب السيليكا إلى سلوك قصف للمادة المركبة ايبوكسي- هباب سيليكا، مما ينتج عنه انخفاض مقاومتها للانعطاف.

يوضح الشكل (٣-١٢) مقارنة بين معامل يونغ على عينات موشورية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.



فوع الألياف أو المساحيق

الشكل (٣-١٢): مقارنة بين معامل يونغ لعينات موشورية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.

يلاحظ من الشكل (٣-١٢)، أن عينات المادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة تُظهر معامل يونغ أكبر من تلك المضاف إليها كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا، ويرتبط ذلك بطبيعة شكل الليف الذي يقوي أكثر من شكل الحبيبة.

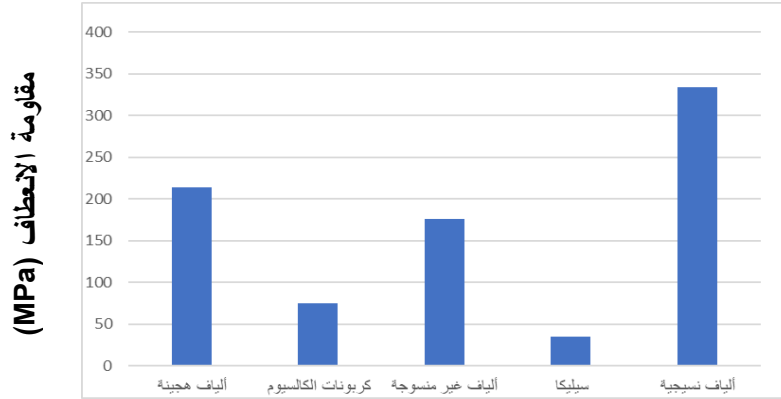
٣-٣ نتائج اختبار الانعطاف على عينات اسطوانية من مواد مركبة ايبوكسي- ألياف زجاج مطحونة أو مساحيق.

يُبين الجدول (٣-٣) نتائج اختبارات الانعطاف على عينات اسطوانية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.

الجدول (٣-٣): نتائج اختبارات الانعطاف لعينات اسطوانية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.

النسبة المئوية لمادة التقوية	نوع الألياف/ المساحيق	مقاومة الانعطاف (MPa)	معامل يونغ (GPa)
٢٠٪	كربونات الكالسيوم	٧٤.٧٨	٢.٥٥
٢٠٪	سيليكا	٣٥.٦٩	٢.٤٦
٢٠٪	ألياف منسوجة	٣٣٤.٠٢	٤.٥٥
٢٠٪	ألياف غير منسوجة	١٧٦.٥٥	٣.٤٢
٢٠٪	ألياف هجينة	٢١٤.٤٦	٣.٥٥

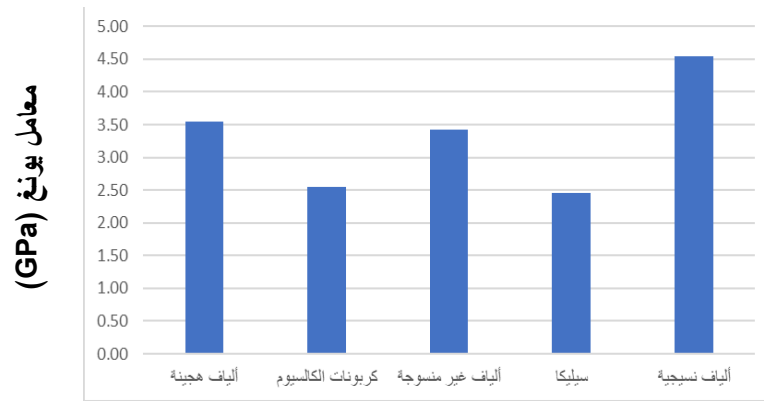
يُبيّن الشكل (٣-١٣) مقارنة بين مقاومة الانعطاف لعينات اسطوانية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.



نوع الألياف أو المساحيق

(٣-١٣): مقارنة بين مقاومة الانعطاف لعينات اسطوانية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.

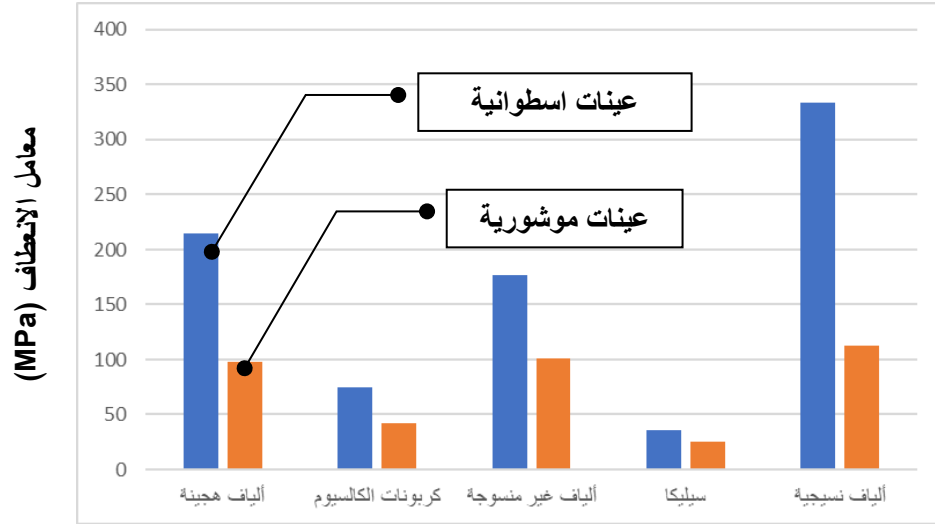
يُبيّن الشكل (٣-١٤) مقارنة بين معامل يونغ لعينات اسطوانية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.



نوع الألياف أو المساحيق

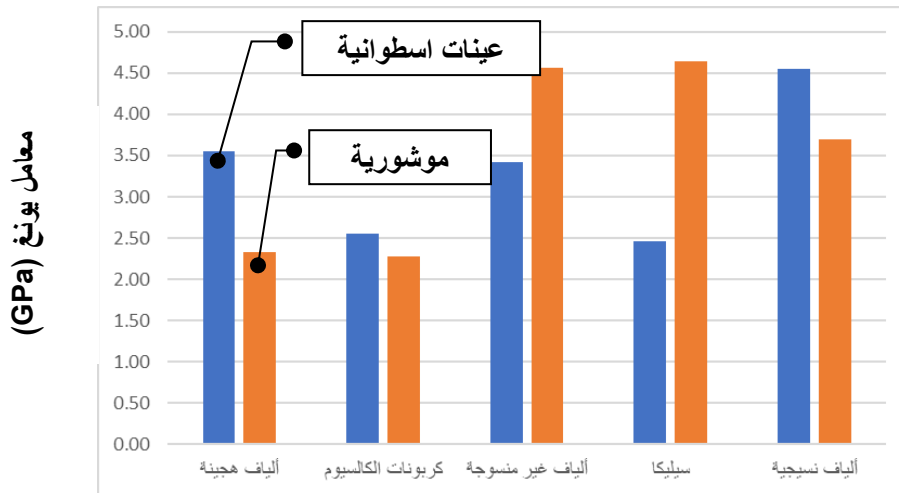
الشكل (٣-١٤): مقارنة بين معامل يونغ لعينات اسطوانية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا عند نسبة ألياف ٢٠٪.

يُستنتج أن مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ هي الأفضل في حالة المواد المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج النسيجية، ويعود ذلك إلى أن مفعول التقوية يحدث في الاتجاه الطولاني للألياف أكبر منه في الاتجاه العرضاني بالنسبة لها. يُبين الشكل (٣-١٥) مقارنة بين مقاومة الانعطاف لعينات المواد المركبة الاسطوانية والموشورية عند نسبة تحميل ٢٠ %، حيث يلاحظ تحسن في مقاومة الانعطاف للعينات الأسطوانية مقارنة بالموشورية، وقد يرتبط ذلك بالعيوب الجانبية نتيجة عملية قص العينات الموشورية.



فوع الألياف أو المساحيق

الشكل (٣-١٥): مقارنة بين مقاومة الانعطاف لعينات المواد المركبة الاسطوانية والموشورية عند نسبة ألياف ٢٠ % . يُبين الشكل (٣-١٦) مقارنة بين معامل يونغ لعينات المواد المركبة الاسطوانية والموشورية عند نسبة ألياف ٢٠ %، حيث يلاحظ تحسن في معامل يونغ للعينات الأسطوانية مقارنة بالموشورية، وقد يرتبط ذلك أيضاً بالعيوب الجانبية نتيجة عملية قص العينات الموشورية.

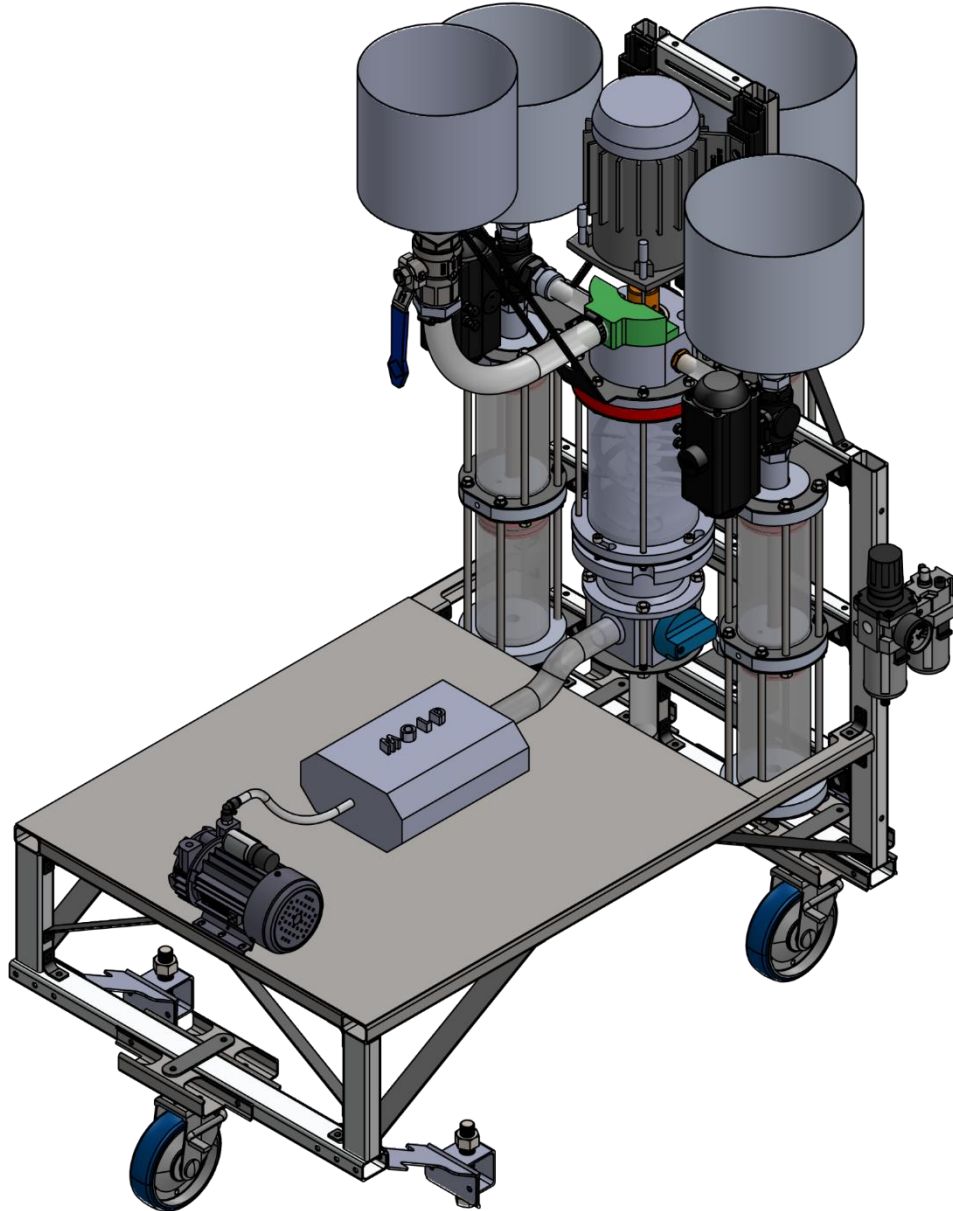


فوع الألياف أو المساحيق

الشكل (٣-١٦): مقارنة بين معامل يونغ لعينات المواد المركبة الاسطوانية والموشورية عند نسبة ألياف ٢٠ % .

٣-٤ نموذج آلة تشكيل منتجات مواد مركبة.

يُبين الشكل (٣-١٧) نموذج آلة تشكيل منتجات مواد مركبة جرى تصميمها في نطاق هذا العمل.



الشكل (٣-١٧): نموذج آلة تشكيل منتجات مواد مركبة.

٣-٤-١ وظيفة الآلة.

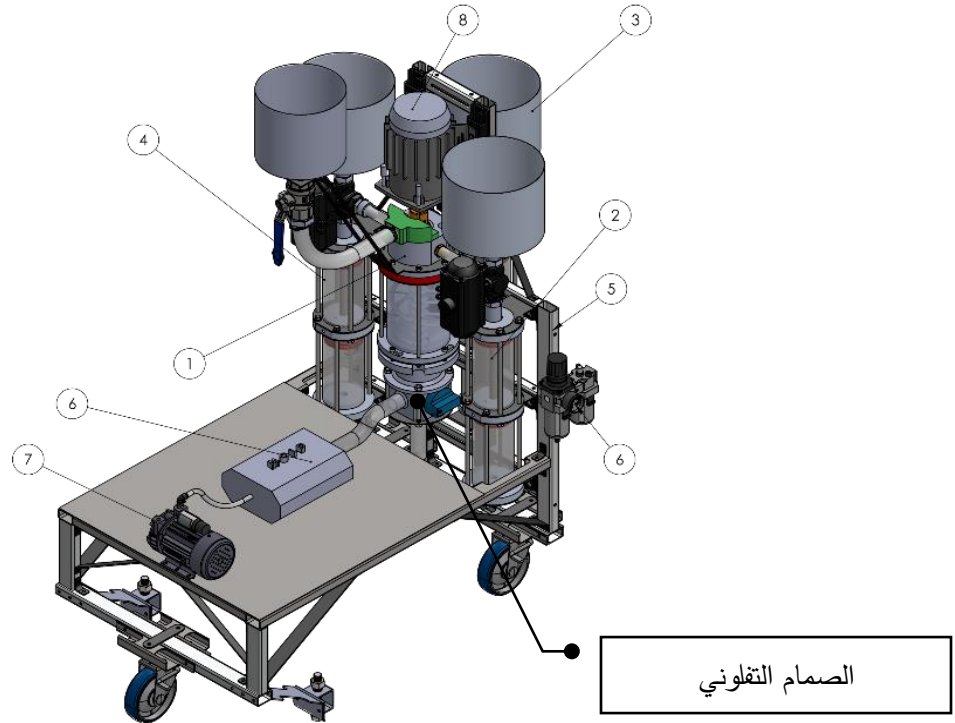
تشكيل منتجات مواد مركبة مكونة من مادة رابطة بوليميرية (الإيبوكسي مثلاً) مع ألياف تقوية (ألياف زجاج مثلاً) مع مواد الإضافة الداعمة (أكاسيد سيراميكية..) والمواد المائلة والملونة... الخ.

تحقن المواد السابقة باستخدام المكابس بالنسبة للمواد السائلة، وباستخدام الخلاء للمواد الصلبة ضمن آلية المزج، حيث يتم مزجها معاً للحصول على التجانس المطلوب، ثم تحقن ضمن قوالب سيراميكية أو سيليكونية أو شمعية.... الخ، باستخدام الهواء المضغوط والخلاء، بالإضافة إلى قوة الدفع من شفرات المزج الحلزونية لضمان امتلاء القالب.

٣-٤-٢ الأقسام الرئيسية لآلة تشكيل منتجات مواد مركبة.

- ١- آلية المزج مع آلية حقن المواد الصلبة؛
- ٢- مكبس حقن المادة البوليميرية (الإيبوكسي مثلاً)؛
- ٣- مكبس حقن مادة التنظيف (الأسيتون مثلاً)؛
- ٤- مكبس حقن مادة التصالب للبوليمير (مادة التقسية)؛
- ٥- الهيكل الحامل للأجزاء مع طاولة العمل.

يُبين الشكل (٣-١٨) الأقسام الرئيسية لآلة تشكيل منتجات مواد مركبة



الشكل (٣-١٨): الأقسام الرئيسية لآلة تشكيل منتجات مواد مركبة.

٣-٤-٣ ملحقات آلة تشكيل منتجات المواد المركبة

- ٦- جهاز تنظيم الضغط والتزييت للمكابس؛
- ٧- مضخة الخلطة؛
- ٨- المحرك الكهربائي الخاص بآلية المزج والخلط؛
- ٩- ضاغط هواء .

٣-٤-٤ الميزات الاستثمارية.

- ١- استخدام طيف واسع من المواد البوليميرية (بوليمرات التصلب الحراري)؛
- ٢- استخدام الألياف بأنواعها المختلفة (ألياف زجاج، ألياف كربون، ألياف كيفلار..). وبكافة أشكالها (نسيجية، غير منسوجة صوفية، مطحونة..).؛
- ٣- استخدام أنواع مختلفة من القوالب (سيراميكية، شمعية، معدنية، تفلونية.....)؛
- ٤- إنتاج منتجات متوسطة وصغيرة الحجم خلال دورة تشغيل واحدة؛
- ٥- إمكانية تشكيل منتجات كبيرة نسبياً بتطبيق أكثر من دورة تشغيل على القالب الواحد ضمن شروط زمنية معينة (مدة تصلب البوليمير)؛
- ٦- سهولة في النقل؛
- ٧- وجود آلية مستقلة للتنظيف تسمح بتنظيف حجرة الخلط من بقايا المواد قبل تصلبها والتصاقها.

٣-٤-٥ آلية عمل النموذج.

- المرحلة الأولى: معايرة وتحضير الآلة.

بناء على بارامترات المنتج المطلوب وهي:

- نوع البوليمير المستخدم؛
- نسبة المقسي بالنسبة بالبوليمير ونوعه؛
- حجم المنتج؛
- النسبة المئوية للألياف في المنتج ونوعها؛
- النسب المئوية للمضافات الأخرى في حال وجودها.

يتم حساب وزن الألياف والمضافات ومعرفة أشواط مكابس مادة البوليمير والمقسي، وتتم معايرة الآلة لتكون جاهز للمرحلة الثانية.

- المرحلة الثانية: تحضير المزيج.

- يكون الصمام التفلوني في وضعية الإغلاق - - الشكل (٣-١٨)؛
- يتم تشغيل المحرك الكهربائي (٨) بجهة دوران عقارب الساعة، ويكون دور الشفرات في هذه المرحلة المزج فقط؛
- توضع الألياف والمضافات في خزان المواد الصلبة مع تطبيق الخلاء في حجرة المزج (١) لسحبها إلى داخل هذه الحجرة؛
- يتم إدخال البوليمير مع المقسي وفق النسب المحددة والكمية المطلوبة عن طريق المكابس (٢،٤)؛
- يستمر المحرك بالدوران بالاتجاه السابق طيلة الفترة السابقة وبسرعة منخفضة نسبياً (حسب لزوجة المزج) حتى حصول الأشباع الكامل للألياف القصيرة أو التجانس التام للألياف المطحونة.

- المرحلة الثالثة: حقن المزيج.

- يفتح الصمام التفلوني باتجاه القالب (٦) - الشكل (٣-١٨)؛
- تُعكس جهة دوران المحرك لتقوم الشفرات بدور الدفع للأسفل؛
- يُفَعَّل الهواء المضغوط في حجرة المزج وتقوم مضخة الخلاء (٧) الموصولة مع الطرف الثاني للقالب بسحب الهواء من جوف القالب لتسهيل دخول الخليط لفرغ القالب؛
- تستمر العملية حتى بدء خروج المادة من الطرف الثاني للقالب، مما يدل على امتلاء القالب، ويتم إيقاف المحرك والهواء المضغوط والخلاء.

- المرحلة الرابعة: تنظيف حجرة الخلط.

- يوضع الصمام التفلوني على وضعية الإغلاق - الشكل (٣-١٨)؛
- يشغل مكبس سائل التنظيف (٣) ليملاً حجرة المزج بالأسيتون؛
- يشغل المحرك من جديد بسرعة عالية بجهة دوران عقارب الساعة؛
- يوضع الصمام على وضعية التفريغ، وتُعكس حركة المحرك ليخرج الأسيتون إلى مستوعب عبر فلتر من أجل إعادة استخدامه. (تكرر هذه المرحلة إذا لزم الأمر).

٣-٤-٦ الآفاق المستقبلية.

يمكن أتمتة عمل الآلة عن طريق التحكم بأجزائها وتسلسل عملها بواسطة وحدة التحكم المنطقية المبرمجة PLC، بالإضافة لتطوير هذا النموذج بتزويده بفرن تسخين ليصبح عبارة عن مشروع خط انتاج متكامل ضمن مصنع وإمكانية إنتاج عدد كبير من المنتجات عن طريق تطوير تقنية تركيب وفك القوالب.

الفصل الرابع

الاستنتاجات والتوصيات

الفصل الرابع

الاستنتاجات والتوصيات

٤-١ الاستنتاجات.

بالاعتماد على ما تقدم في هذه الرسالة وعلى النتائج التجريبية، يمكن صياغة الاستنتاجات التالية:

١- جرى تحضير عينات موشورية واسطوانية من مادة مركبة بوليميرية من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاجية بأشكالها المختلفة، نسيجية - غير منسوجة - هجينة - صوفية - مطحونة، أو بمساحيق من كربونات الكالسيوم أو السيليكا، وجرى دراسة خصائصها الميكانيكية مثل مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ وفقاً للمعاملات التالية:

أ- نسب الألياف / المساحيق ضمن المادة الرابطة؛

ب- أنواع الألياف / المساحيق ضمن المادة الرابطة؛

ج - أشكال العينات موشورية أو اسطوانية.

٢- تبين أن مقاومة انعطاف المواد المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج النسيجية أو غير المنسوجة أو الهجينة تكون في أعلى قيمها عند نسبة الألياف التي تقابل الحد الأعلى من مادة التقوية بحيث يتحقق تبليل الألياف، وأن الألياف النسيجية تحقق أعلى مقاومة انعطاف مقارنة بغيرها من ألياف الزجاج المدروسة؛

٣- تبين أن الخواص الميكانيكية (مقاومة الانعطاف) للمادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج (الصوفية) ذات أعلى قيمة عند نسبة ألياف ٢٠٪ وهي أقل مقارنة مع نسب ألياف الزجاج (النسيجية - غير المنسوجة - الهجينة)

٤- تشير الخواص الميكانيكية (مقاومة الانعطاف) للعينات الأسطوانية إلى أنها أفضل من مثيلاتها للعينات الموشورية، ويرتبط ذلك بطريقة تحضير العينات وأبعادها وشروط سطوحها؛

٥- جرى تشكيل عينات منتجات مادة مركبة أولية باستعمال القالب الشمعي؛

٦- جرى تشكيل عينات منتجات مادة مركبة نصف مصنعة/مصنعة باستعمال القالب السيراميكي؛

٧- جرى تصميم آلة حقن وتشكيل منتجات مواد مركبة بوليميرية (بوليمير تصلب حراري).

٤-٢ التوصيات.

من خلال دراسة الخواص الميكانيكية للمادة المركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج أو المساحيق والمفاضلة بين أنواع ألياف الزجاج المختلفة (نسيجية- غير منسوجة- هجينة -صوفية)، أو بين أنواع المساحيق (كربونات الكالسيوم، هباب السيليكا) أو غيرها من المساحيق التي تم تناولها في دراسات سابقة، وباختيار تقنية التشكيل بالاستفادة من طريقة السكب بالشمع المهدور سواء باستخدام القالب السيراميكي أو بالقالب الشمعي مع إمكانية الاستفادة من تقنيات التشكيل التي تم تناولها في الجزء النظري، يمكن الحصول على منتجات من مادة مركبة بوليميرية من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج/المساحيق تناسب الوظيفة المحددة لها كجزء من منظومة متكاملة، بحيث يمكن الاستفادة من خواصها التي تسمح لها بأن تحل محل الأجزاء المعدنية في بعض الشروط مثل توفير الكتامة ومقاومة ظروف الرطوبة والحاجة للعازلية الكهربائية والحرارية بالإضافة لخفة الوزن.

من خلال تطوير آلة حقن يمكن نوعاً ما أتمتة عملية التصنيع باستخدام القوالب المختلفة المشار إليها، ويمكن الحصول على أفضل النتائج من خلال تطبيق الضغط والخلاء ودرجة حرارة القالب المثالية المشار إليها في دراسات سابقة في هذا الخصوص. يتضمن ملحق منفصل المخططات التشغيلية لأجزاء آلة الحقن المزمع تطويرها، ويوصى باتخاذ الخطوات العملية لتطوير نموذج أولي لهذه الآلة، واختباره تمهيداً لاتخاذ القرار النهائي.

يوصى أيضاً بتنوع أشكال ألياف الزجاج المتوفرة، لا سيما القصيرة منها، لمتابعة دراسة تأثير نسبتها وشكلها على تقوية بوليميرات مختلفة ذات تصلب أو تلدن حراري.

المراجع

[١] Johnson, Todd. "History of Composites." ThoughtCo, Aug. 25, 2020, [thoughtco.com/history-of-composites-820404](https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404).

Available from: <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>

[٢] Y. Kitane, A.J. Aref, 10 – Sustainable replacement of aging bridge superstructures using fiber-reinforced polymer (FRP) composites, Editor(s): Yail J. Kim, *Advanced Composites in Bridge Construction and Repair*, Woodhead Publishing, 2014, Pages 287–322, ISBN 9780857096944,

<https://doi.org/10.1533/9780857097019.2.287>

[٣] Xiaowen Jiang, Yuezhen Bin, Masaru Matsuo, Electrical and mechanical properties of polyimide-carbon nanotubes composites fabricated by in situ polymerization. . *Polymer*, 46 (2005) 7418–7424
Volume 46, Issue 18, 23 August 2005, Pages 7418–7424.

<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.05.127>

[٤] Y. Wang, O.I. Zhupanska, Lightning strike thermal damage model for glass fiber reinforced polymer matrix composites and its application to wind turbine blades, *Composite Structures*, 132, 15 November 2015, Pages 1182–1191

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.027>

[٥] Sanjay MR, Arpitha GR, Naik LL, Gopalakrishna K, Yogesh a B .Applications of natural fibers and its composites: An overview. *Natural Resources*, 2016; 7:108–114.

<http://dx.doi.org/10.4236/nr.2016.73011>

[٦] Ho MP, Wang H, Lee JH, Ho CK, Lau KT, Leng JS, et al. Critical factors on manufacturing processes of natural fiber composites. *Composites Part B Engineering*, 2012; 43:3549–3562.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.001>

[٧] Sathishkumar TP, Navaneeth a Krishnan P, Shankar S. Tensile and flexural properties of snake grass natural fiber reinforced isophthalic polyester composites. *Composites Science and Technology*, 2012; 72:1183–1190.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.04.001>

[٨] Kalpak Jian S, Schmid SR. *Manufacturing Engineering and Technology*. International Edition. 4th ed. Prentice Hall, Inc.; 2001. ISBN 0–13–017440–8

[٩] <http://www.modorplastics.com/thermoset-vs-thermoplastics>

[١٠] Introduction to Composite Materials. WRITTEN BY:Tri-Dung Ngo.Submitted: August 5th, 2019Reviewed: January 21st, 2020 Published: February 25th, 2020

DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.91285>

[١١] Sci-Hub _ Composites_ Overview. Encyclopedia of Condensed Matter Physics, 192–208 _
10.1016/B0-12-369401-9_00545-3.html

<https://doi.org/10.1016/B0-12-369401-9/00545-3>

[١٢] <https://www.tencom.com/blog/fiberglass-properties-and-applications>

[١٣] <https://netcomposites.com/guide/manufacturing/wet-hand-lay-up/>

[١٤] <https://www.eppcomposites.com/spray-layup-process.html>

[١٥] Kendall KN, Rudd CD, Owen MJ, Middleton V. Characterization of the resin transfer moulding process. Composites Manufacturing, 1992;3(4):235–249.

[https://doi.org/10.1016/0956-7143\(92\)90111-7](https://doi.org/10.1016/0956-7143(92)90111-7)

[١٦] Heider D, Graf A, Fink Bruce K, Gillespie JW Jr. Feedback control of the vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) process. Process Control and Sensors for Manufacturing, 1999;II (3589):133–141.

<https://doi.org/10.1117/12.339956>

[١٧] Frizelle WG. Injection molding technology. In: Kutz M, Andrew W, editors. Applied Plastics Engineering Handbook, USA: Elsevier; 2011. p. 2011
eBook ISBN: 9780323390415

[١٨] Minsch N, Herrmann FH, Gereke T, Nocke A, Cherif C. Analysis of filament winding processes and potential equipment technologies. Procedia CIRP, 2017;66:125–130.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.284>

[١٩] Joshi SC. The pultrusion process for polymer matrix composites. In: Advani SG, Hsiao KT, editors, Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs). Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited; 2012. ISBN: 978-0-85709-067-6

[٢٠] Wilson BA. Pultrusion. In: Peters ST, editor. Handbook of Composites. Boston, MA: Springer; 1998. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6389-1-24>

[٢١] <https://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy>

[٢٢] Ha Q. Pham, Maurice J. Marks (2005). "Epoxy Resins". Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. ISBN 3527306730. https://doi.org/10.1002/14356007.a09_547

[٢٣] Ellis, B. (Ed.). (1993). Chemistry and Technology of Epoxy Resins.

https://doi.org/10.1007/978-94-011-2932-9_1

[٢٤] Jin, F.-L., Li, X., & Park, S.-J. (2015). Synthesis and application of epoxy resins: A review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 29, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>

- [٢٥] 1. Asi O. Mechanical Properties of Glass–Fiber Reinforced Epoxy Composites Filled with Al₂O₃ Particles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009;28(23):2861–2867.
<https://doi.org/10.1177%2F0731684408093975>
- [٢٦] Nallusamy, S., 2016. Characterization of Epoxy Composites with TiO₂ Additives and E–Glass Fibers as Reinforcement Agent. *J.Nano R.*, 2016, 40, 99–104.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.40.99>
- [٢٧] Ramesh K. Nayak, Alina Dash, B.C. Ray, Effect of Epoxy Modifiers (Al₂O₃/SiO₂/TiO₂) on Mechanical Performance of epoxy/glass Fiber Hybrid Composites, *Procedia Materials Science*, Volume 6, 2014, Pages 1359–1364, <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.115>
- [٢٨] Beckry Abdel–Magid, Saeed Ziaee, Katrina Gass, Marcus Schneider, The combined effects of load, moisture and temperature on the properties of E–glass/epoxy composites, *Composite Structures*, Volume 71, Issues 3–4, 2005, Pages 320–326, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.09.022>
- [٢٩] Prasad T, Chenna Kesav Reddy A, Madhav Reddy S, and Arjun N, “EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF GLASS–EPOXY COMPOSITES”, *J. Manufg. Engi.*, vol. 10, no. 1, pp. 055–062, Mar. 2015. <http://smenec.org/index.php/1/article/view/256>
- [٣٠]. Cevdet Kaynak, Eralp Akgul, Nihat Ali Isitman. Effects of RTM Mold Temperature and Vacuum on the Mechanical Properties of Epoxy/Glass Fiber Composite Plates. First Published August 1, 2008.
<https://doi.org/10.1177%2F0021998308092204>
- [٣١] K. Devendra, Strength Characterization of E–glass Fibre Reinforced Epoxy Composites with Filler Materials, *J.M. and M. Charact. and Eng.*, 2013, (1), 6, 353–357.
<http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2013.16054>
- [٣٢] ASTM D790, ASTM D7264.

ملحق
جداول اختبار العينات

نتائج اختبارات الانعطاف لعينات موشورية مواد المركبة ايبوكسي- ألياف زجاج وفقاً لنسبة الألياف وشكلها

الانحراف المعياري	معامل يونغ الوسطي (GPa)	معامل يونغ (GPa)	الانحراف المعياري	مقاومة الانعطاف الوسطية (MPa)	مقاومة الانعطاف (MPa)	نوع الألياف	النسبة المئوية للألياف
(± 0.37)	2.27	2,84	(± 14.29)	80.09	101,08	بدون ألياف	%0
		2,23			99,73		
		2,11			59,47		
		2,13			77,29		
		2,23			77,42		
		2,33			90,13		
		2,73			71,13		
		1,50			80,43		
(± 0.40)	6.24	7,20	(± 6.48)	103.17	101,17	صوفية	%20
		7,87			103,31		
		5,79			163,11		
		7,08			145,10		
(± 0.09)	7.89	7,44	(± 17.41)	147.03	118,83	صوفية	%40
		7,87			163,91		
		8,87			149,03		
		7,40			108,38		
(± 3.00)	11.90	7,20	(± 09.17)	136.4	84,07	صوفية	%60
		10,80			201,26		
		10,21			53,71		
		8,00			107,02		
		12,97			187,06		
(± 0.98)	3.79	1,94	(± 32.21)	113.07	78,77	نسجية	%20
		3,78			132,90		
		3,72			130,10		
		4,27			149,04		
		4,88			74,07		
(± 1.84)	10.79	11,087	(± 41.67)	339.9	30,00	نسجية	%54
		11,134			300,90		
		8,445			272,70		
		13,848			398,77		
		9,443			321,70		
(± 0.78)	12.00	11,10	(± 7.06)	326.04	317,09	نسجية	%62
		12,77			334,02		
		12,42			334,01		
		13,22			322,00		
		13,32			322,00		

(٠.٩٨ ±)	٤.٥٦	٥,٠٩	(٢٤.٣٩ ±)	١٠٠.٧١	١٣٣,١٢	نسج غير منسوج	%٢٠
		٦,١٩			٩٠,٠٦		
		٣,٣٨			١٠٢,٥٨		
		٤,١٠			٦١,٢٥		
		٤,٠٤			١١٦,٥٥		
(٠.٧٠ ±)	٥.٩٧	٦,٤٨	(١٣.٥٤ ±)	١٥٥.٩٨	١٥٥,١٦		%٣٥
		٥,٥٩			١٥١,٣٧		
		٥,٧٤			١٤٣,٨٥		
		٧,٠٢			١٨٢,٠٠		
		٥,٠٢			١٤٧,٥٤		
(١.١٤ ±)	٤.٥٧	٤,٧٢٤١	(١٣.٨٧ ±)	٨٣.٤٧	٧٢,٨٢		%٥٤
		٣,٧٠٤٥			٨٧,٧١		
		٣,٠١٠٧			٦٥,٦٧		
		٦,٢٨٠٤			١٠٦,٠٧		
		٥,١٣٥١			٨٥,٠٨		
(٠.٧٣ ±)	٢.٣٣	٣,٥٥	(٢٧.٠٦ ±)	٩٧.٧٣	١٣٥,٥٩		%٢٠
		١,٤٤			٥٣,٩٨		
		٢,٦٣			١١٢,٧٥		
		٢,٢٥			٩٨,٠٣		
		١,٨١			٨٨,٣٠		
(١.٢٢ ±)	٦.٠٥	٧,٢٠	(٤١.١٢ ±)	٢٠٨.٩	٢٥٤,٢٦		%٣٤
		٦,٤٨			١٦٤,٣٥		
		٦,٩٨			٢٥٤,٩١		
		٣,٨٢			١٦١,٠٠		
		٥,٧٧			٢٠٩,٩٩		
(١.١٣ ±)	٧.١٥	٥,٧١	(٢٢.٠٧ ±)	٢٢٥.٥	١٩٦,٧٧		%٤٠
		٨,٨٧			٢٥٨,٤٩		
		٧,١٢			٢٢١,٠٦		
		٦,٩١			٢٣٠,٠١		
		٧,٢٩			٢٠٧,٢٩		
(٠.٩١ ±)	٧.٧٦	٧,٢٦	(١٩.٣٦ ±)	٢٣٣.٤٠	٢٤١,٥٧	هجينه	%٤٥
		٧,١٠			٢٣١,٠٥		
		٧,٦٣			٢٢٢,١٩		
		٩,٥٦			٢٦٤,٩٢		
		٩,٩٨			٣١١,٨٦		
(٠.٤٦ ±)	٩.٩٥	١٠,٧٠	(١٢.٤٣ ±)	٣٣٣.٥٥	٣٤٣,٦٠		%٥٢
		٩,٦٣			٣٣٣,٦١		
		١٠,١٠			٣٤٧,٥٢		
		٩,٣٤			٣٣١,١٦		
		١١,٥٢			٢٨٣,٧١		
(٠.٤٦ ±)	١٠.٨٦	١٠,٧٣	(٣٠.٨٦ ±)	٢٨١,٥٤	٢٨٣,٧١		%٦٣
		١٠,٥٩		٢٨١,٥٤	٢٨١,٥٤		
		١١,٢٢		٢٤٨,٠٣	٢٤٨,٠٣		
		١٠,٢٤		٣٢٣,٤٨	٣٢٣,٤٨		
				٢٣٥,٤٢	٢٣٥,٤٢		

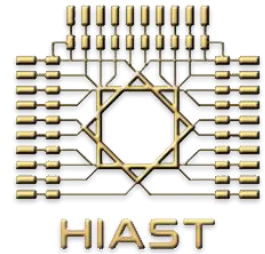
نتائج اختبارات الانعطاف على عينات موشورية من مواد مركبة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج المطحونة أو مساحيق كربونات الكالسيوم وهباب السيليكا.

الانحراف المعياري	معامل يونغ (GPa)	معامل يونغ (GPa)	الانحراف المعياري	مقاومة الانعطاف الوسطية (MPa)	مقاومة الانعطاف (MPa)	نوع الألياف/ المساحيق	النسبة المئوية لمادة التقوية
(± 0.01)	4.644	4.64	(± 4.69)	41.970	40.84	كربونات الكالسيوم	%20
		4.22			39.66		
		4.85			47.20		
		4.97			47.18		
		3.92			34.97		
(± 0.38)	0.16	0.32	(± 10.29)	97.02	103.05	ألياف زجاجية مطحونة	%20
		4.02			79.18		
		0.43			102.47		
		0.41			105.80		
		0.12			95.24		
(± 0.17)	3.78	3.70	(± 3.14)	20.307	23.72	سيليكا	%20
		3.63			29.70		
		4.02			22.50		

ملحق

المخططات التشغيلية لآلة حقن وتشكيل منتجات مواد مركبة

Syrian Arab Republic
Higher Institute for Applied Science & Technology



**Preparation of (FRP) composite materials (polymer– glass fiber)
and Study of their mechanical properties.**

**A Dissertation submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
master degree in Materials Sciences and
Engineering / Polymers & Composites Technology**

By:

Eng. Mohammed Adeeb Badr

Supervised By:

Dr. Rafi Jabra

Dr. Bassem Shaaban