دراسة مفصلة للتعريف بالمواد المركبة وبعض تطبيقاتها

د. حسن محمد سويسي انوير
جامعة غريان، كلية الهندسة، قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، ليبيا
hassan_nw@yahoo.com, EL3434@wayne.edu

الملخص

المواد المركبة هي مواد هندسية تتكون من أكثر من عنصر واحد من المواد التي تختلف بشكل كبير في خواصها الميكانيكية والكيميائية والفيزيائية. الخصائص المميزة للمواد المركبة هي نتيجة للخصائص الفردية للأجزاء المكونة لها والنسبة الحجمية لكل منها وكذلك طريقة ترتيب كل مكون من مكونات المادة المركبة. يتم تصميم المواد المركبة حسب الوظيفة المطلوبة منها وبحيث يلبي هذا التصميم المتطلبات الميكانيكية و الانشائية و الكيميائية و الهندسية وحتى الجمالية في بعض الاحيان. للمواد المركبة العديد من التطبيقات كصناعة هياكل السيارات و الطائرات و البناء (المباني و الجسور) و الصناعات البحرية كالسفن و القوارب و في المجال الطبي (الاربطة و الغضاريف الصناعية و طب الاسنان). الغرض الرئيسي من هذه الدراسة هو التعريف بالمواد المركبة ومناقشة استخداماتها الحالية والمستقبلية.

الكلمات المفتاحية المواد المركبة، المعادن، الخزفيات، الالياف الكربونية و الزجاجية

Abstract

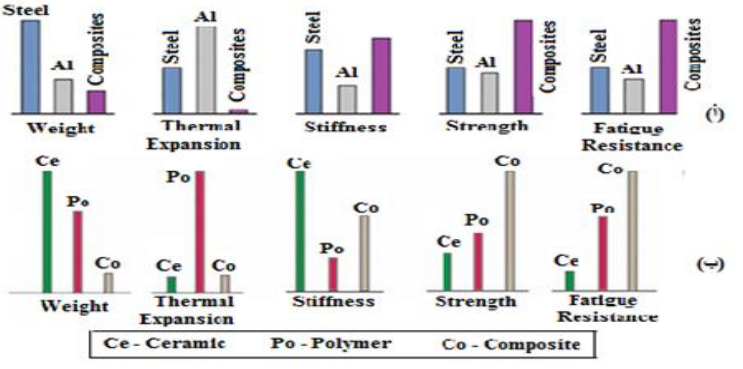
Composite materials are engineering materials consist of two or more separate materials that are highly different in their mechanical, chemical and physical properties. Distinctive properties of composite materials are a consequence of the individual properties of its components, the volume fraction of each of them, as well as the way each component of the composite is arranged. Composite materials are designed according to the function required of them, so that this design meets mechanical, structural, chemical, engineering and even aesthetic requirements in some cases. Composite materials have many applications, such as the manufacture of car bodies, aircraft, construction (buildings and bridges), marine industries such as ships and boats, and in the

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

medical field (ligaments, industrial cartilages and dentistry). The main purpose of this study is to introduce composite materials and discuss their current and future uses
Keywords composites, metals, ceramics, carbon and glass fibers.

المقدمة

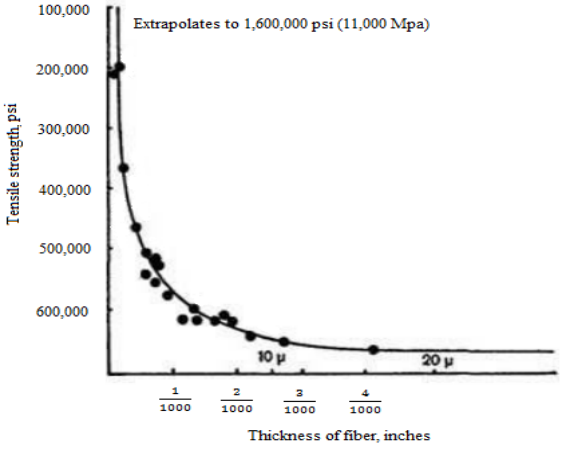
من الصعب معرفة وبشكل مؤكد متى و أين تعرف البشر على المواد المركبة المدعمة بالألياف و التي يوجد منها الكثير من الأمثلة في الطبيعة كالخشب و العظام [1،2] ولكن من المؤكد أن البشر استخدموا الطين المدعم بالقش لغرض البناء و كذلك ألياف النباتات في صناعة الفخار مند اكثر من 6000 سنة [3،4]. هذه الاستخدامات كانت لغرض منع حدوث تشققات في الطين عند تجفيفه و ليس لغرض الحصول على تقوية للهياكل الانشائية. في وقت متأخر تعرف البشر على المواد المركبة لغرض الانشاءات كالخرسانة المدعمة بالحديد، البوليمر المدعم بالألياف (الألياف الزجاجية أو الجرافيت و أنواع أخرى من المواد). المواد المستخدمة في الانشاءات أو ما يعرف بالمواد الهندسية تشمل كل من : المعادن، المواد المتبلرة، السيراميك و المواد المركبة والتي تتكون عادة من تركيبات مختلفة من المواد الثلاث الأولى. شكل (1.أ) يوضح مقارنة للخواص الميكانيكية بين المعادن و المواد المركبة بينما شكل (1.ب) يوضح مقارنة للخواص الميكانيكية بين السيراميك و المواد المركبة و البوليمرات.



الشكل(1): مقارنة الخواص الميكانيكية بين (أ) المعادن و المواد المركبة. (ب) السيراميك، البوليمر و المواد المركبة [5].

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

في بدايات صناعة المواد المركبة كانت المكونات كبيرة الحجم (macroscopic) ومع التقدم في هذا المجال في العقود الزمنية الأخيرة فان مكونات المواد المركبة وبشكل خاص مواد التقوية أصبحت صغيرة في الحجم. في الفترة الأخيرة بدأ اهتمام خاص بما يعرف بالمواد المركبة النانوية (Nano composites)حيث تكون مواد التقوية متناهية الصغر وتقاس ابعادها بالنانومتر. كمثال على ذلك أنابيب النانو الكربونية (carbon nanotubes). قدم Ashby [6] شرح للأهمية النسبية للمواد الهندسية الاربعة عبر مراحل التاريخ أوضح فيه تزايد أهمية كل من المواد المتبلرة، السيراميك و المواد المركبة وكذلك تناقص أهمية المعادن. يتم استخدام المواد المركبة نظرا لخواصها التي لا يمكن الحصول عليها من المواد المكونة لها كل على حده حيث يختار المهندسون بعناية كل من المادة الضامة، مادة التقوية وطريقة الانتاج التي تجمعهما معا لتكوين المادة المركبة. يمكن للمهندسين موائمة خواص المادة المركبة لتلبية الغرض المطلوب منها [7]. أكثر المواد المركبة شيوعا تلك التي تتكون من ألياف تقوية في مادة ضامة أو راتنج (binder or matrix material) كما يتم أيضا استخدام الجسيمات أو الشرائح (particle or flake) للتقوية ولكنها بشكل عام أقل فاعلية من الألياف.



الشكل(2): العلاقة بين مقاومة الشد و سمك الألياف [8،9].

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

التقوية باستخدام الالياف فعالة جدا وذلك بسبب الزيادة الكبيرة في نسبة المساحة الخارجية الى الحجم شكل (2). يعتقد الان أن أنابيب النانو الكربونية (carbon nanotubes) هي الاكثر قوة ومتانة للاستخدام كوسيلة دعم للمواد [10،11]. مما لاشك فيه أن الالياف تعطي أقصى مقاومة و متانة للمواد، و لكن هناك بعض السلبيات في استخدام الالياف نظرا لأنها لوحدها لا يمكنها تحمل اجهادات الضغط الطولية كما أن خواصها الميكانيكية في الاتجاه العرضي (transverse mechanical properties) ضعيفة بشكل عام مقارنة بخواصها في الاتجاه الطولي. لهذا فان الالياف غير ذات فائدة كمادة انشائية الا اذا تم ضمها لبعضها بواسطة مادة ضامة (matrix or binder) والقيام ببعض الدعم في الاتجاه المستعرض. من حسن الحظ أن الشكل الهندسي للألياف يجعلها عالية الكفاءة من ناحية تفاعلها مع المادة الضامة [12] وهذا يرجع الى ارتفاع نسبة المساحة السطحية للألياف، والتي يتم بها نقل الاجهادات، نسبة لوحدة الحجم. اضافة لذلك فان المادة الضامة تقوم بحماية الالياف من العوامل الخارجية. يتم تقوية المواد المركبة بألياف في الاتجاه العرضي بوضع الالياف في اتجاهات تتناسب مع الاجهادات الواقعة عليها وهو ما أدى الى ظهور أنواع مختلفة من المواد المركبة. كثيرا ما يتم اضافة مواد تعبئة (filler particles) للمواد المركبة لغرض الحصول على وزن أقل وخفض التكلفة و زيادة القدرة على مقاومة الحريق و الحماية من الاشعة فوق البنفسجية الناتجة عن التعرض لأشعة الشمس.

تصنيف المواد المركبة

يمكن تصنيف المواد المركبة حسب الشكل الهندسي أو حسب نوع المادة الضامة لعناصر التقوية.

- **حسب الشكل الهندسي لعناصر التقوية**

- **المواد المركبة الجسيمية** (Particulate composites)

وهي المواد المركبة المقواة بجسيمات لها أبعاد متقاربة وعادة ما تكون هذه المواد المركبة متجانسة نظرا لان الجسيمات يتم وضعها بشكل عشوائي في المادة الضامة المكونة من سبائك او سيراميك. الجسيمات يمكن أن تكون معدنية أو غير معدنية. هذا النوع من المواد المركبة يتميز بمقاومة أكبر للإجهادات وزيادة في مدى درجة حرارة التشغيل

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

ومقاومة أكبر للأكسدة وغيرها من الميزات. كمثال على هذا النوع من المواد المركبة استعمال جسيمات الالمنيوم مع المطاط كمادة ضامة وكذلك جسيمات السيلكون كارباید مع الألمنيوم كمادة ضامة وجسيمات الحصى والرمل مع الاسمنت لعمل الخرسانة. يتم استخدام هذا النوع من المواد المركبة بشكل مكثف في الاحجام الكبيرة نظرا لرخص تكلفة انتاجها ومن عيوبها تدني خواصها الميكانيكية.

- **المواد المركبة الرقائقية** (Flake composites)

مواد مركبة مقواة بجسيمات لها بعدين أكبر بكثير من البعد الثالث. كمثال على هذا النوع استخدام صفائح الميكا والالمنيوم والفضة والزجاج. لهذا النوع من المواد المركبة مقاومة عالية للإجهادات وتكلفة منخفضة و لكن يقتصر استخدامها على عدد قليل من المواد بسبب صعوبة وضعها في الاتجاه المطلوب.

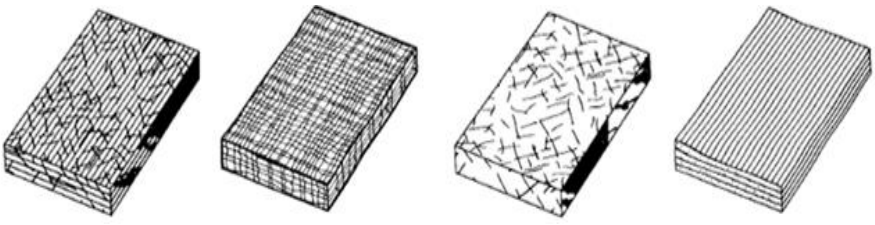
- **المواد المركبة بألياف** (Fiber composites)

وهى من نوعين حيت النوع الاول عبارة عن مادة ضامة مقواة بألياف طويلة متصلة شكل (3.أ) وهى كثيرة الاستخدام نظرا لقدرتها العالية على مقاومة الاجهادات الطولية. عيب هذا النوع ان الاجهادات بين الشرائح (inter-laminar stresses) تقع على عاتق المادة الضامة وهو ما يؤدي احيانا الى حدوث الانفصال بين الشرائح (delamination). أما في النوع الثاني فتكون الالياف قصيرة ومتقطعة شكل (3.ب) و تكون اما منتظمة طوليا أو موزعة عشوائيا في المادة الضامة.

- **المواد المركبة النسيجية** (woven composites) شكل (3.ج) هذا النوع لا يتكون من شرائح ولهذا لا يحدث انفصال (delamination) ولكن ذلك يكون على حساب المثانة (stiffness) و المقاومة (strength) للإجهادات وذلك نظرا لان الالياف لا تكون مستقيمة كما في النوع الاول.

- **المواد المركبة الهجينة** (hybrid composites) شكل (3.د) وهى عبارة عن خليط من الياف طويلة متصلة والياف قصيرة عشوائية الاتجاه في المادة الضامة او خليط من انواع مختلفة من الالياف.

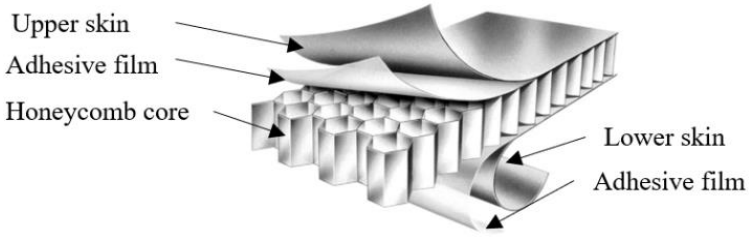
Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية



(أ) المواد المركبة بألياف. (ب) مواد مركبة بألياف قصيرة و متقطعة. (ج) المواد المركبة النسيجية. (د) المواد المركبة الهجينة.

الشكل(3): أنواع المواد المركبة المدعمة بالألياف [13].

- **المواد المركبة على شكل ساندويش** (sandwich structure) هذا النوع تكون الواجهتين من مادة مركبة



الشكل(4): مادة مركبة على شكل ساندويش [14].

هذا النوع من الانشاءات لديها مقاومة عالية جدا لإجهادات الثني مقارنة بوزنها ولهذا يتم استخدامها بشكل واسع في صناعة الطائرات.

- **حسب نوع المادة الضامة**

في المواد المركبة تستعمل كل من المواد المتبلرة والمعادن والسيراميك والكربون كمواد ضامة (matrix) لغرض تثبيت الالياف مع بعضها وحمايتها من العوامل الخارجية ونقل و توزيع الاحمال على الالياف. كما انها تساهم في بعض الحالات في اعطاء بعض الخواص المطلوبة كالمطاوعة (ductility)و القساوة (toughness) و العزل الكهربائي. من المهم جدا ان يكون هناك ترابط قوي بين المادة الضامة و الالياف و ذلك بأن يكون للمادة الضامة القدرة على احداث ترابط ميكانيكي او كيميائي مع الالياف. المادة الضامة والالياف يجب أن يكونا متوافقين من الناحية الكيميائية بحيث لاتحدث تفاعلات غير

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

مرغوبة في منطقة التلامس بينهما. عند اختيار المادة الضامة فان درجة حرارة الخدمة هي العامل الاهم في الاختيار.

- **المواد المركبة بمادة ضامة من البوليمر** (Polymer matrix composites)

البوليمرات هي بدون منازع الاكثر استعمالا في المواد المركبة كمواد ضامة وهي اما تيرموسيت (thermosets) كالابوكسي و البوليستر و الفينوليك أو تيرموبلاستيكس (thermoplastics) كالبوليميد و البوليسلفون و PEEK و PPS. النوع الاول (thermosets) و بعد اتمام عملية معالجتها، تصبح غير قابلة للانصهار عند درجات الحرارة العالية بينما النوع الثاني (thermoplastics) فأنها تلين و تنصهر عند درجات الحرارة العالية و تتصلب من جديد عند تبريدها. البوليسترات وانواع الابوكسيكانت المواد الضامة الرئيسية من البوليمرات لعقود و لكن التيرموبلاستيك المتقدمة (advanced thermoplastics) متل PEEK و PPS اخدت اهتمام اكبر بسبب قساوتها العالية و انخفاض امتصاصها للرطوبة و بساطة عمليات معالجتها و قدرتها العالية على تحمل درجات الحرارة العالية. الابوكسي من النوع المستخدم في الصناعات الجوية يتصلب عند 177 °C و لا يتم استخدامها في درجات حرارة اعلى من 150 °C بينما التيرموبلاستيكس المتقدمة متل PPS و PI و PEEK لديها درجة انصهار في حدود (315–370)°C. في الوقت الحاضر فان المواد الضامة من البوليمر موجودة للاستخدام حتى 425 °C. لدرجات حرارة اعلى يتم استخدام مواد ضامة من المعدن، السيراميك او الكربون.

- **المواد مركبة بمواد ضامة معدنية** (Metal matrix composites)

باستخدام المعادن الخفيفة كالألمنيوم و التيتانيوم و المغنيسيوم و سبائكهم فان درجة حرارة التشغيل يمكن رفعها حتى 1250°C . مزايا اخرى للمادة الضامة المعدنية تتمثل في متانة و مقاومة شد و مطاوعة اعلى من المواد الضامة من البولمرات و لكنها اعلى كثافة. هذا النوع من المواد المركبة تتفوق على المعادن من حيث المتانة و مقاومة الاجهادات.

- **المواد المركبة بمواد ضامة من السيراميك** (Ceramic matrix composites)

المواد الضامة من السيراميك مقواة بالألياف كألياف السيليكون كارباید و السيلكون نيتراید ولها مقاومة و صلادة عالية وخمول كيميائي ويمكن استخدامها حتى درجة حرارة

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

1650°C ولكنها منخفضة مقاومة الشد و هشة و تعمل الالياف على تحسين مقاومة السيراميك للكسر. هذا النوع من المواد المركبة ملائم للاستخدام في درجات الحرارة العالية حيث لا يمكن استخدام المواد الضامة من البوليمر أو المعدن.

- **المواد المركبة من الكربون كمادة ضامة** (Carbon-carbon composites)

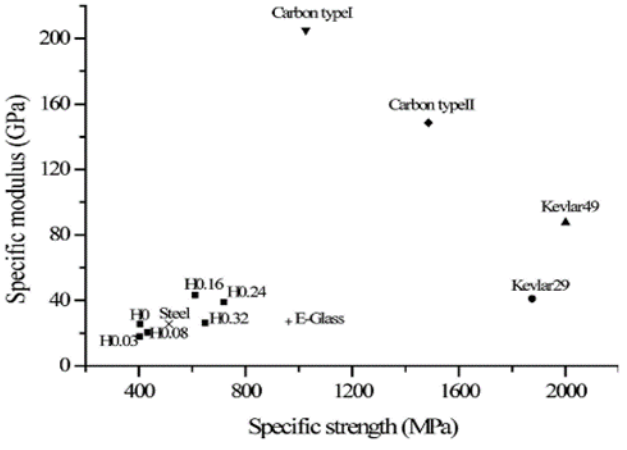
المواد المركبة من الياف الكربون و مادة ضامة من الكربون (carbon fiber/carbon) حيث تعمل ألياف الكربون على تقوية الكربون (المادة الضامة) نظرا لهشاشته و هو ما يمنع حدوث الانهيار المفاجئ. تتميز بانخفاض انفعال الزحف عند درجات الحرارة العالية ومقاومتها العالية لإجهادات الشد و الضغط و اجهاد التعب وكثافتها المنخفضة. يمكن استعمالها حتى درجة حرارة 2760°C و لكن تكلفتها العالية تجعل استخدامها مقتصرا فقط على بعض التطبيقات في الصناعات الجوية و الفضائية.

المواد المكونة للمواد المركبة (Constituent materials for composites)

تعتبر المواد المركبة المدعمة بألياف زجاجية (fiber glass reinforced plastics) هي الاكثر استخداما في الانشاءات الهندسية. هذه الالياف لها درجة منخفضة من المثانة (اقل من 83 Mpa) و تستخدم في التطبيقات التي تتطلب حجوم كبيرة كوسائل النقل و ذلك بسبب تكلفتها المنخفضة. يسمى هذا النوع من المواد المركبة بالمواد المركبة الاساسية (basic composites). اما التطبيقات التي تتطلب درجة عالية من المثانة و المقاومة للإجهادات مع خفة الوزن كعناصر الانشاءات في الصناعات الجوية و الفضائية فيتم استخدام ما يعرف بالمواد المركبة المتقدمة (Advanced composites). يدخل في تركيب هذا النوع من المواد المركبة الالياف من الكربون، أراميد البوليمر، كارباید السيليكون، البورون و أنواع أخرى من الالياف عالية المثانة. هدا النوع من المواد المركبة عالي التكلفة و يستخدم فقط في التطبيقات التي تتطلب مثانة عالية مع خفة الوزن كالصناعات الجوية و الفضائية و بعض وسائط النقل. يتم تصنيف المواد المركبة ايضا حسب متانتها النوعية (نسبة المتانة الى الوزن specific stiffness) و حسب مقاومتها النوعية (نسبة المقاومة الى الوزن specific strength) كما في شكل (5). كثير من الالياف المتقدمة لها سلوك مشابه للمواد الهشة تحت الاجهاد و لكن عند تكوين صفيحة

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

(laminate) من مادة مركبة من عدد من الشرائح (plies) فان تصرف الشريحة تحت تأثير الاجهادات يعتمد على اتجاهات الالياف في هده الشرائح. هذا يعني انه يمكن الحصول على مادة مركبة بسلوك مشابه للمواد المطاوعة بالرغم من وجود الالياف الهشة.



الشكل(5): المثانة النوعية و المقاومة النوعية لأنواع مختلفة من الألياف [15].

1. مواد الالياف (fiber materials)

- **المواد المركبة الاساسية** (basic composites)

الالياف الزجاجية تتكون بشكل اساسي من السيليكا (ثاني اكسيد السيلكون) و مادة اضافية (اكسيد معدني) و يتم انتاجها بسحب الزجا ج المصهور خلال فتحة صغيرة. من اكثر الانواع استعمالا:

(E-glass) و يشكل انتاجه معظم ما يتم انتاجه من الالياف الزجاجية كما انه أكتر انواع الياف التقوية استخداما في المواد المركبة.

- **(** و يأتي في المرتبة الثانية من حيت الاستخدام و مقاومته للشد اكبر 40% كما أنه لديه معامل مرونة أكبر 20% من E-glass و لكن استعماله اقل لأنه أعلى تكلفه. -S) (glass لديه مقاومة للشد أعلى من كثير من الالياف المتقدمة و لكن انخفاض معامل المرونة نسبيا يحد من استخداماته.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

- **(Glass/epoxy)** و **(Glass/polyester)** يتم استخدامها بشكل مكتف في كتير من التطبيقات كأدوات الصيد و الخزانات و بعض قطع الطائرات.

- **المواد المركبة المتقدمة** (advanced composites)

- **الياف الكربون او الجرافيت** هي من اكتر انواع الالياف المتقدمة استعمالا حيت يتم استعمال كل من (graphite/epoxy) أو (carbon/epoxy) بشكل مكثف في هياكل الطائرات و المركبات الفضائية. هذه الالياف يتم انتاجها بتعريض (organic precursor fibers) لسلسلة من المعالجات الحرارية حتى يتحول الى كربون او جرافيت حسب درجة الحرارة. الياف الكربون أقل من 95% كربون بينما الياف الجرافيت يكون فيها نسبة الكربون لا تقل عن 99% [16]. تكلفة الياف الكربون عالية و لكنها في تناقص مستمر بسبب زيادة الطلب و امكانية الانتاج. يتم باستمرار تطوير انواع مختلفة من الياف الكربون و كمثال على دلك (P-120S) و الذي يبلغ معامل المرونة له اربعة اضاف الحديد الصلب و (T-1000G) و الذي لديه مقاومة شد تعادل ستة اضعاف الحديد الصلب. يتم الحصول على درجة عالية من معامل المرونة أو مقاومة الشد عن طريق اجراء المعالجة الحرارية المناسبة.

- **الالياف من البوليمرات** مثل Kevlar aramid fibers، Polyethylene fibers، Technora aramid fibers، PBO fibers لديها مقاومة شد نسبية (specific strength) عالية جدا نظرا لانها تجمع بين المقاومة العالية و الكثافة المنخفضة. هذه الانواع من الالياف لديها مطاوعة اكبر (ductility) من الياف الكربون و الالياف الزجاجية. عيب هذا النوع من الالياف هو عدم ملائمتها لدرجات الحرارة العالية و كذلك قابليتها للتأثر بشكل سلبي بالرطوبة.

- **الياف البورون** و هي عبارة عن مواد مركبة مكونة من طلاء البورون على قاعدة من التنجستن أو الكربون. الياف البورون هي الاكبر قطر من بين الالياف المتقدمة (.05-2 mm). كما أنها لها معامل مرونة أعلى بكثير من معظم ألياف الكربون و لكنها اعلى كثافة. المواد المركبة (Boron/epoxy) و (Boron/aluminum) تستخدم بكثره في الانشاءات للصناعات الجوية و الفضائية حيت الحاجة لمعامل مرونة مرتفع و لكن تكلفتها العالية تحد من مزيد من الاستخدامات لهذا النوع من المواد المركبة.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

- **الياف السيليكون كارباید** (Silicon carbide SiC fibers) تستخدم بشكل اساسي للمواد المركبة بدرجة حرارة عالية للمعادن و السيراميك كمادة ضامة (matrix) وذلك نظرا لمقاومتها العالية للأكسدة و قدرتها على الاحتفاظ بمقاومتها العالية للشد عند درجات الحرارة العالية. عند درجات حرارة الغرفة فان مقاومة الشد و معامل المرونة تكون قريبة من الياف البورون. هناك مزيد من الاهتمام بالمعادن المدعمة بشعيرات السيلكون كارباید (SiC whisker)كبديل للمعادن الغير مدعمة والمعادن المدعمة بالألياف المتصلة الطولية. هذه الشعيرات صغيرة جدا ويبلغ قطرها (20-51 nm) و طولها (0.03 mm) ولهذا يمكن بسهولة تشكيلها بالطرق المعروفة لتشكيل المعادن [12] .
- **الانابيب الكربونية النانوية** (carbon nanotubes) وهى تعطي أقصى دعم للمعادن وهى عبارة عن خلايا على شكل سداسي من ذرات الكربون ثنائية البعد (graphene sheets) و يتم لفها لتكوين انابيب مجوفة قطرها بضعة نانومترات [10،11].
- **الالياف الهجينة** (hybrids) حيت يتم استخدام اكثر من نوع من الالياف و ذلك عندما لا يكون لدى نوع واحد من الالياف كل الخواص المطلوبة.

2. المواد الضامة (Matrix materials)

يتم استخدام البوليمرات، المعادن و الخزفيات كمواد ضامة للألياف في المواد المركبة كما تقوم المادة الضامة بحماية الالياف من العوامل الخارجية، نقل و توزيع الاحمال على الالياف و اضفاء بعض الخواص للمادة المركبة كالمطاوعة و العزل الكهربائي. من المهم أن يكون هناك ترابط قوي بين المادة الضامة و الالياف و أن يكونا متوافقين كيميائيا. العامل الاهم عند اختيار المادة الضامة هو درجة حرارة الخدمة للمادة المركبة.

3. مواد التعبئة (Filler materials)

المادة الثالثة من مكونات المواد المركبة هي مواد التعبئة (filler materials) حيت يتم خلطها مع المادة الضامة لغرض تحسين بعض جوانب سلوك المواد المركبة. كمثال على ذلك استخدام الكريات الزجاجية المجوفة لغرض خفض الوزن و جسيمات الطين و الميكا لغرض خفض التكلفة و جسيمات الكربون السوداء لغرض الحماية من الاشعة فوق

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

البنفسجية و يستخدم ترايهيدريت الالمنيوم لغرض اخماد الحريق [17]. مواد التعبئة ليس لها تأثير يذكر على الخواص الميكانيكية.

استخدامات المواد المركبة (Applications of composite materials)

1. في الصناعات الجوية و الفضائية (Space applications)

هناك توسع مستمر في استعمال المواد المركبة في هذا المجال و كمثال على ذلك كانت نسبة المواد المركبة 12% فقط في الطائرة Boeing 777 بينما وصلت النسبة الى 50% في Boeing 787 (dream linear). شمل هذا التوسع الطائرات العسكرية [18] والطائرات التجارية مع تناقص تكلفة المواد و تطور تكنولوجيا التصميم و الانتاج و تراكم الخبرات في هذا المجال [19] . في البداية كان استعمال المواد المركبة مقتصرا على اجزاء الهيكل الصغيرة الحجم المعرضة لإجهادات خفيفة (secondary structures) و الان المواد المركبة تستخدم في تصنيع الهياكل الكبيرة و المعرضة لأحمال كبيرة (primary structures) كالأجنحة و الجسم الرئيسي للطائرة (fuselage) و مجموعة الذيل حيث يتم استخدام الياف الكربون لوحدها أو مع ألياف أخرى. في العديد من الطائرات العمودية المدنية و العسكرية فان الابوكسي المقوى بالألياف يستخدم في صناعة شفرات الدوار (Rotor blades). استبدال السبائك المعدنية التقليدية بمواد مركبة أدى الى خفض الكتلة بشكل كبير مع المحافظة على المثانة و مقاومة الاجهادات للمكونات المختلفة حيث يعتبر الوزن عامل حاسم لزيادة السرعة و الحمولة و خفض استهلاك الوقود وهو ما يجعل من المواد المركبة الخيار الافضل بالرغم من تكلفتها العالية. في الانشاءات الفضائية الكبيرة كمحطة الفضاء الدولية فان الخواص الاساسية لمواد الانشاءات هي المثانة النسبية العالية (نسبة المثانة الى الوزن) و معامل تمدد حراري منخفض و قدرة عالية على اخماد الاهتزازات. المواد المركبة تتفوق على المعادن التقليدية في جميع هذه الخواص. يتم استخدام انواع خاصة من المواد المركبة، (carbon fiber reinforced isogrids)، في التطبيقات التي تتطلب استقرار كبير في الابعاد على مدى واسع من درجات الحرارة (superior dimensional stability) وهذا يرجع الى ان بعض انواع المواد المركبة المتقدمة لديها معامل تمدد حراري (CTE) منخفض جدا (و يكون سالبا في بعض

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

الاحيان). وزن الهيكل عامل مهم في صناعة وسائل النقل و هو الدافع لتزايد استخدام المواد المركبة في هذا المجال. البوليمرات المدعمة بالألياف الزجاجية هي الاكثر استعمالا مع تزايد استعمال المواد المركبة المدعمة بالكربون بسبب انخفاض التكلفة. تتميز المواد المركبة بقدرة عالية على مقاومة التآكل و العزل الكهربائي و الحراري و هو ما يجعلها الخيار الافضل في كثير من التطبيقات. تعتبر الرياح مصدر مهم للطاقة النظيفة و بسبب مخاطر الاحتباس الحراري و تغير المناخ يتزايد الاقبال على هذا النوع من الطاقة. يتم تصنيع شفرات تربينات الرياح بشكل اساسي من المواد المركبة نظرا لمقاومتها العالية و مثانتها نسبة لوزنها، قدرتها العالية على اخماد الاهتزازات، مقاومتها للإجهادات الدورية (fatigue resistance). في مجال البنى التحتية فان من اكثر المجالات نموا استخدام اجزاء الجسور مسبقة الصنع لغرض بناء جسور جديدة او لغرض اعادة تأهيل جسور قديمة. البوليمرات المدعمة بالألياف FRP المستخدمة لهذا الغرض لها العديد من الميزات مقارنة بالخرسانة و الحديد و يتمثل ذلك في خفة الوزن و مقاومة التآكل و سهولة و سرعة التركيب. كما يتم صيانة و تدعيم الاعمدة الخرسانية القائمة بتغليفها و لفها بأشرطة من مواد مركبة. كما في كثير من الحالات فان التكلفة عامل حاسم في الحد من التوسع في استخدام المواد المركبة و عمليات التصنيع تعتبر الاساس في التحكم في التكلفة.

2. **في وسائل النقل** (Automotive applications)

انتاج و تصميم المواد المركبة المقواة بالألياف للاستخدام في وسائل النقل يختلف عنه في الطائرات و المركبات الفضائية من ناحية حجم الانتاج حيث تكون الحاجة لإعداد أكبر بكثير من مكونات وسائل النقل مقارنة بمكونات الطائرات. المكونات الخارجية في وسائل النقل يجب ان تكون على درجة عالية من المثانة و القدرة على مقاومة الضرر (Damage tolerance) و كذلك فان السطح الخارجي يجب أن يكون على درجة عالية من الجودة (Class A surface finish). القدرة على مقاومة الضرر يمكن الحصول عليها باستخدام مادة ضامة مرنة متل (Polyurethane). ميزة أخرى للمواد المركبة في هذا المجال هي القدرة على امتصاص الاهتزازات و هو ما يؤدي الى خفض الضوضاء و الاهتزاز في الهيكل.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

3. **في المعدات الرياضية** (Sporting goods)

المواد المركبة المكونة من بوليمر مقوى بالألياف تعتبر المواد الاساسية في صناعة المعدات الرياضية. في كتير من المعدات الرياضية يكون استعمال المواد المركبة لغرض خفض الوزن و الاهتزازات و كذلك لإعطاء مرونة أكبر في التصميم. في بعض المعدات الرياضية كالدراجات و سيارات السباق يتم استخدام المواد المركبة بألياف الكربون لغرض خفض الوزن. في بعض التطبيقات كصناعة مضارب التنس و زلاجات الثلج يتم استخدام المواد المركبة من الياف الكربون و الكربون كمادة سطحية و مادة غروية (foam) خفيفة في الداخل و هو ما يؤدي الى خفض الوزن مع المحافظة على المثانة و كذلك سرعة خمود الاهتزازات.

4. **التطبيقات البحرية** (Marine applications)

صفائح البوليستر المقواة بالألياف الزجاجية تستخدم بشكل واسع في الصناعات البحرية. في بعض التطبيقات يستخدم الياف (Kevlar49) كبديل للألياف الزجاجية بسبب مقاومتها العالية للشد و ارتفاع مثانتها نسبة لوزنها. خفض الوزن يؤدي الى زيادة في السرعة و العجلة و القدرة على المناورة و خفض في استهلاك الوقود [20] .

السلوك الميكانيكي للمواد المركبة (Mechanical behavior of composites)

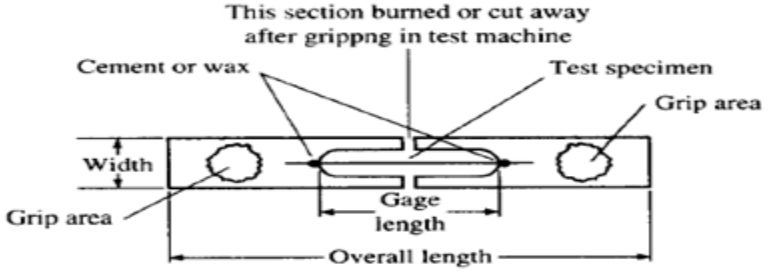
أغلب المواد الانشائية المعدنية خواصها لا تتغير من نقطة لنقطة أخرى في المادة ولا تعتمد على الاتجاه (homogeneous and isotropic) وعلى العكس فان أغلب المواد المركبة تتغير خواصها من نقطة لنقطة أخرى في المادة و حسب الاتجاه (heterogeneous and anisotropic). كمثال على ذلك فان الخواص تختلف كثيرا بين الالياف و المادة الضامة كما أنه في المواد المركبة المدعمة بألياف طولية في اتجاه واحد تكون المثانة و مقاومة الشد اكبر بكثير في اتجاه الالياف عنه في الاتجاه المستعرض. العلاقة بين الاجهادات و الانفعالات في المواد المركبة أكثر تعقيدا بكثير عنها في المواد الاعتيادية و هو ما قد يؤدي الى سلوك غير متوقع للمادة المركبة. كمثال على ذلك فان الاجهاد العمودي في المواد الاعتيادية ينتج عنه انفعال عمودي فقط و كذلك اجهاد القص ينتج عنه انفعال قص فقط. في المواد المركبة فان الاجهاد العمودي

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

يمكن أن ينتج عنه انفعالات عمودية و انفعالات قص و اجهادات القص يمكن ان ينتج عنها انفعالات قص وانفعالات عمودية. كذلك فان التغير في درجة الحرارة في المواد الاعتيادية يؤدي الى تمدد او انكماش منتظم في جميع الاتجاهات بينما في المواد المركبة فان التغير في درجة الحرارة قد يؤدي الى تمدد أو انكماش غير منتظم و تشوه. هذا التأثير الذي يعرف في المواد المركبة بتأثير الاقتران (coupling effect) له تداعيات مهمة على تحليل سلوك المواد المركبة من الناحيتين التحليلية و العملية.

التجارب و القياسات لتحديد خواص المواد المكونة للمواد المركبة

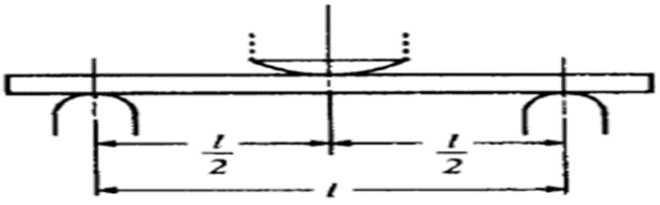
اختبار الالياف مقاومة الشد و معامل المرونة للألياف تحت تأثير حمل استاتيكي طولي يمكن تحديدها بالاختبار المعياري ASTM DC1557.03$^{\varepsilon 1}$ حيث يتم الصاق العينة ، والمكونة من ليفة واحدة، بقطعة رقيقة من الورق يكون بها فتحة دائرية في الوسط أو مجري طولي. بعد تثبيت العينة في الة الشد يتم ازالة قطعة الورق حتي تتلقى الليفة كل حمل الشد شكل 6.



الشكل(6): عينة اختبار شد لليفه [21].

اختبارات المادة الضامة حيث يتم تحديد مقاومة الشد في حالتي الخضوع و الكسر، معامل المرونة و الاستطالة لعينات المادة الضامة وفقا للاختبار المعياري ASTM D638-03 [22]. كذلك يتم تحديد الخواص السابق في حالة الضغط وفقا للاختبار المعياري ASTM D695-02a [23]. أما خواص الانحناء فيتم تحديدها وفقا للاختبار المعياري ASTM D790-03 [24] والذي هو عبارة عن اختبار ثني ثلاثي أو رباعي النقط شكل 7.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

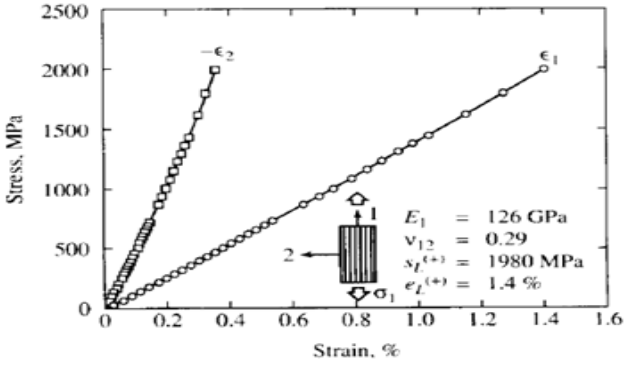


الشكل(7): اختبار تني ثلاثي النقط [24].

التجارب و القياسات لتحديد الخواص الاساسية للمواد المركبة

يجب معرفة خواص المواد المركبة لاستخدامها كمدخلات عند اجراء التحليلات الهندسية و تصميم الانشاءات التي يدخل في تكوينها المواد المركبة. هذه الخواص تتضمن تحديد المقاومة و المثانة في حالة الشد و الضغط، القص، الانحناء و كذلك المقاومة البينية (Interfacial strength) بين الالياف و المادة الضامة و انفعال الزحف (Creep) و الذي هو خاصية مهمه للمواد المركبة بسبب احتوائها على البوليمر.

اختبار الشد حيث يتم تحديد في الاتجاهين الطولي و العرضي كل من: مقاومة الشد $S_L^{(+)}$، $S_T^{(-)}$ ، المثانة E_1، E_2 ، معامل بويسون ν_{12}، ν_{21} وذلك وفقا للاختبار المعياري ASTM D3039/D3039 M-00$^{\varepsilon 2}$ [25]. شكل 8.

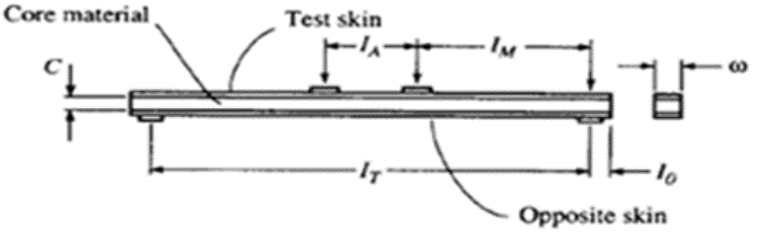


الشكل(8): العلاقة بين (الانفعال الطولي و العرضي) و الاجهاد لعينة شد Graphite/Epoxy $[0]_8$ [25].

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

اختبار الضغط من الصعب الحصول على اجهاد الضغط فقط سواء في التجارب العملية او في الخدمة الفعلية. لهذا يوجد أكثر من طريقة قياسية للاختبار و كل منها تحاول الحصول على اجهاد ضغط بأقل تأثير للأنواع الاخرى من الاجهادات. أكثر اختبارات الضغط المستخدمة:

- **ASTM D3410/D3410M-03** شكل 9.
- **[27] ASTM D5467-97**
- **[28] ASTM D6641/D6641M-01$^{\varepsilon 1}$**
-

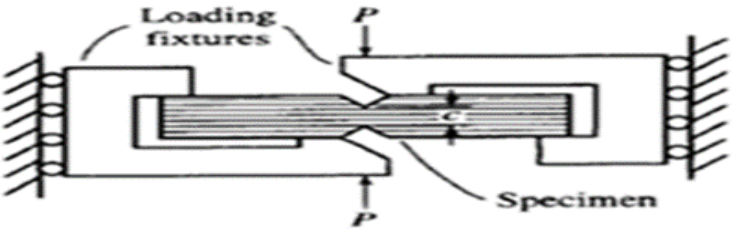


الشكل(9): عارضة ساندويش في اختبار ضغط للسطح العلوي المكون من مادة مركبة [26].

اختبارات القص وهي عملية معقدة نظرا للحاجة لتحديد معامل القص **G** و مقاومة القص في الثلاثة محاور. رغم وجود أكثر من 14 اختبار للقص 8 منها معتمدة من ASTM فان اثنين فقط من هذه الاختبارات تلبي كافة الشروط المطلوبة و المتمثلة في الحصول على اجهاد قص منتظم في المستويات الثلاثة و امكانية تحديد كل من مقاومة القص و معامل القص في هذه المستويات. هذان الاختباران هما:

- Iosipescu Shear test ASTM D5379 شكل 10.
- V-Notched Rail Shear ASTM D7078 [30]

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية



الشكل(10): اختبار القص Iosipescu [29].

اختبارات الانحناء حيث تختلف المواد المركبة عن المواد المتجانسة (Isotropic) في كون خواص الانحناء ليست دائما مطابقة لخواص الشد. الطريقة القياسية للاختبار هي ASTM D790-03 [24]. هذا الاختبار يتطلب اختبار عينات على انحناء ثلاثي النقط (Three point bending) ويتم اعداد العينات وفقا للأبعاد المعيارية.

اختبارات الترابط بين الالياف و المادة الضامة (Film/Matrix interface tests)

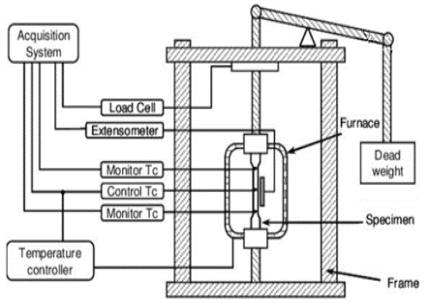
من المهم جدا ان يكون هناك التصاق جيد بين الالياف و المادة الضامة. قام Drzalet [31] بتطوير طريقة للاختبار تعتمد على وضع ليفة وحيدة في عينة اختبار شد من المادة الضامة و تعريض هذه العينة لاختبار شد حتى تنقطع الليفة. بمعلومية مقاومة الشد لليفة $S_{f1}^{(+)}$ نسبة للطول الحرج L_C و قطر الليفة d فانه يمكن حساب اجهاد القص البيني من المعادلة:

$$\tau_y = \frac{d\, s_{f1}^{(+)}}{2\, L_C}$$

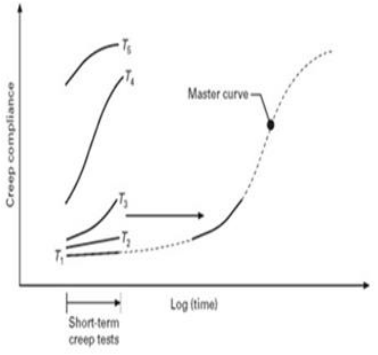
اختبار الزحف (Creep test)

في هذا الاختبار يتم تعريض العينة لحمل ثابت وقياس الانفعال مع الزمن شكل 11. و يتم اجراء الاختبار عند درجة حرارة و نسبة رطوبة ثابتة وفقا للاختبار المعياري ASTM D2990-01 . يتم محاكاة الزحف لفترة طويلة من الزمن بإجراء اختبارات الزحف على العينة لفترات زمنية قصيرة و عند درجات حرارة مختلفة.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية



الشكل(11): اختبار الزحف بتحميل محوري [32].



الشكل(12): طريقة(TTSP) لمحاكاة الزحف لفترة طويلة من الزمن [33–35].

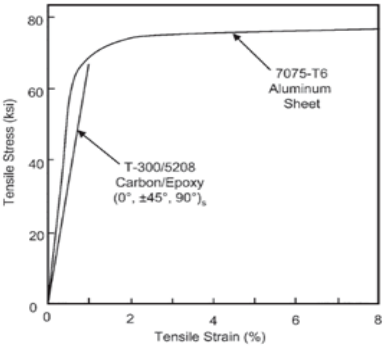
يتم بعد ذلك استخدام طريقة (TTSP- time temperature superposition) لتكوين ما يعرف بالمنحنى المرجعي (Master curve) و هو يمتل انفعال الزحف عند درجة الحرارة المطلوبة و لفترة زمنية طويلة شكل 12.

مقارنة بين المواد المركبة و المعادن Composites versus Metals

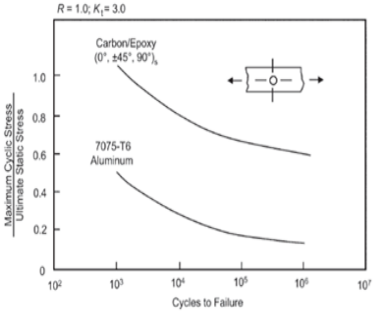
- مقاومة و مثانة المواد المركبة في المستوى الرئيسي (in-plane) تكون عادة كبيرة و تتغير حسب الاتجاه، اعتمادا على اتجاه الالياف. المقاومة و المثانة تكون ضعيفة في الاتجاه العرضي (through thickness) نظرا لان الحمل يقع بشكل رئيسي على المادة الضامة الضعيفة و ليس على الالياف.
- معظم المعادن لديها بعض المطاوعة وهو ما يسمح بتوزيع الحمل الزائد على باقي عناصر الانشاء و التخلص من تركيز الاجهادات. المطاوعة تسمح للمعادن بامتصاص قدر كبير من الطاقة عند التشوه وهو ما يعني القدرة على امتصاص الصدمات بدون حدوث كسر. على النقيض من ذلك فان المواد المركبة هشة نسبيا شكل 13 وهو ما يعني عدم القدرة على التخلص من تركيز الاجهادات وقدرة ضعيفة على مقاومة الصدمات بدون حدوث كسور في المادة الضامة.
- المواد المركبة لديها قدرة كبيرة على مقاومة الاجهادات الدورية مقارنة بالمعادن و على النقيض من ذلك فان المواد المركبة المتضررة

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

- (damaged composites) لديها مقاومة ضعيفة للإجهادات الاستاتيكية شكل14.



الشكل(13): مقارنة منحنى الاجهاد– الانفعال لمادة مركبة و سبيكة المنيوم [36].



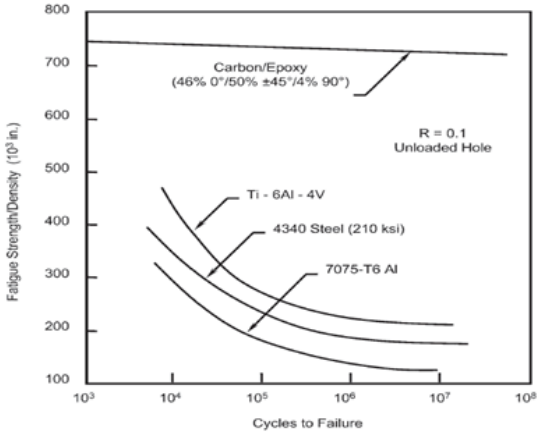
الشكل(14): مقارنة مقاومة اجهاد التعب لمادة مركبة و سبيكة المنيوم [36].

مميزات المواد المركبة

- خفة الوزن، امكانية تصميمها للحصول على أفضل مقاومة و مثانة، قدرة عالية على مقاومة اجهاد التعب (Fatigue resistant)، تكلفة تجميع منخفضة نظرا لوجود أقل عدد من القطع و المثبتات، المقاومة النسبية (strength/density) و المتانة النسبية (stiffness/density) للألياف القوية كألياف الكربون أعلى من السبائك المعدنية المستخدمة في صناعة الطيران شكل 5. وهو ما يعني توفير في الوزن و بالتالي أقل استهلاك للوقود و أداء أفضل و مدى أكبر.
- المواد المركبة لديها قدرة عالية على مقاومة التآكل مقارنة بالسبائك المعدنية وهو ما يؤدي الى خفض كبير في تكلفة الصيانة و اجراءات مكافحة التآكل.
- المواد المركبة لديها مقاومة عالية للإجهادات الدورية مقارنة بالمعادن عالية المقاومة للإجهادات شكل 15.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

- استخدام المواد المركبة أدى الى خفض كبير في تكلفة التجميع لهياكل الطائرات و ذلك بخفض عدد المثبتات و العمالة اللازمة للتجميع. عدد كبير من القطع أمكن دمجها في قطعة تجميعية واحدة.
-



الشكل(15): خواص اجهاد التعب لمواد الصناعات الجوية و الفضائية [36].

عيوب المواد المركبة

- التكلفة العالية للمواد الخام و التصنيع و التجميع.
- التأثير السيئ للحرارة والرطوبة على خواص المواد المركبة.
- ضعف المقاومة في الاتجاه العرضي (out of plane) حيث تتعرض المادة الضامة للإجهادات بشكل رئيسي.
- قابلية المواد المركبة للضرر الناتج عن الصدمة و حدوث انفصال الشرائح عن بعضها (delamination) و صعوبة صيانة المواد المركبة مقارنة بالمعادن.

الخلاصة Conclusion

يوجد هامش كبير للبحث و التطوير في مجال المواد المركبة و ذلك نظرا للتنوع الكبير في أنواع الالياف و انواع المواد الضامة و كذلك امكانية تطوير انواع جديدة منها وهو ما

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

يسمح بإيجاد حلول هندسية لأغلب التطبيقات. تعتبر المواد المركبة تحديا كبيرا من ناحية التصميم نظرا لصعوبة نمذجة سلوكها الميكانيكي و هو ما يعطي شعور بعدم الثقة في أدائها و يتم تعويض ذلك بإضافة هامش كبير للسلامة و يكون ذلك على حساب كفاءة الاستخدام للمواد المركبة. هناك الكثير من جوانب سلوك المواد المركبة، تحت تأثير الانواع المختلفة من الاجهادات، لم يتم دراستها و فهمها بشكل كامل و هذا يرجع الى الحداثة النسبية للتكنولوجيا في هذا المجال. تحسن الثقة في جودة المنتج، تطور تقنيات الكشف الغير هدام، الخبرات المكتسبة من الخدمة الطويلة و مزيد من الفهم لسلوك المواد المركبة كلها عوامل تسمح للمصممين بخفض هامش السلامة و هو ما يؤدي في النهاية الى مزيد من التحسن في كفاءة استخدام المواد المركبة.

أصبح من المؤكد استمرار التوسع المطرد في استخدام المواد المركبة نظرا للأسباب التالية والتي تجعل من المواد المركبة منافس قوي للمواد التقليدية في كتير من التطبيقات الهندسية:

- الانخفاض المستمر للتكلفة المبدئية نظرا لانخفاض تكلفة المادة الخام وتكلفة الانتاج و التجميع كنتيجة للتقدم التكنولوجي في هذا المجال.
- ارتفاع تكلفة الوقود وهو ما يدفع الى التوسع في استخدام المواد المركبة وخاصة في الصناعات الجوية و الفضائية نظرا لكثافتها المنخفضة و مثانتها العالية.
- التطور المستمر في مجال المواد المركبة يؤدي الى خفض في تكلفة الصيانة وزيادة في زمن الخدمة.

References

[1] Shaffer, G.D., 1993. An archaeomagnetic study of a wattle and daub building collapse. J. Field Archaeol. 20, 59–75 .

[2] Wainwright, S.A., Biggs, W.D., Currey, J.D., and Gosline, J.M. 1976. Mechanical Design in Organisms. Princeton University Press, Princeton, NJ.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

[3] Johnson T. History of composites. The evolution of lightweight Composite materials. 2018.

[4] Ngo, Tri-Dung "Introduction to Composite Materials", 2020

[5] Chawla, K.K., 2012. Composite materials: Science and engineering. Springer Science& Business Media.

[6] Ashby, M.F. 1987. Technology of the 1990s: Advanced materials and predictive design. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A322, 393-407.

[7] Williams J. The Science and Technology of Composite Materials. Australian Academy of Science; 2019.

[8] Griffith, A.A. 1920. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of the Royal Society, 221A, 163—198

[9] Gordon, J.E. 1976. The New Science of Strong Materials, 2nd ed. Princeton University Press, Princeton, NJ.

[10] Thostenson, E.R., Ren, Z., and Chou, T.-W. 2001. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: A review. Composites Science and Technology , 61, 1899-1912.

[11] Qian, D., Wagner, J.G., Liu, W.K., Yu, M.F., and Ruoff, R.S. 2002. Mechanics of carbon nanotubes. Applied Mechanics Reviews, 55(6), 495-533.

[12] McCrum, N.G., Buckley, C.P., and Bucknall, C.B. 1988. Principles of Polymer Engineering. Oxford University Press, New York.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

[13] Gibson, R.F. 1993. Principles of Composite Material Mechanics.

[14] B. Castanie, C. Bouvet, M. Ginot, Review of composite sandwich structure in aeronautic applications, Composites Part C: Open Access 1 (2020), 100004, https://doi.org/10.1016/J.JCOMC.2020.100004

[15] Mechanics of Fibrous Composites, CT Herakovich, Wiley 1998

[16] Schwartz, M.M. 1984. Composite Materials Handbook. McGraw-Hill, Inc., New York.

[17] Katz, H.S. and Milewski, J.V. eds. 1978. Handbook of Fillers and Reinforcements for Plastics. Van Nostrand Reinhold Co., New York.

[18] Harris, C.E., Starnes, J.H., Jr., and Shuart, M.J. 2001. An Assessment of the State-of-the-Art in the Design and Manufacturing of Large Composite Structures for Aerospace Vehicles. NASA TM-2001-210844.

[19] Dexter, H.B. and Baker, D.J. 1994. Flight service environmental effects on composite materials and structures. Advanced Performance Materials, 1, 51-

[20] Pemberton R, Summerscales J, Graham-Jones J. Marine Composites: Design and Performance. Cambridge, UK: Woodhead Publishing; 2018

[21] C1557.03$^{\varepsilon 1}$ 2005. Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers, vol. 15.01, Refractories; Activated Carbon; Advanced Ceramics. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[22] D638-03.2005. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, vol. 08.01,Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

[23] D695-02a. 2005. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, vol. 08.01,Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[24] D790-03 2005. Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, vol. 08.01,Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA

[25] D3039/D3039M-00$^{\varepsilon 2}$ 2005. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, vol. 15.03, Space Simulation; Aerospace and Aircraft; Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[26] D3410/D3410M-03, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading, Space Simulation; Aerospace and Aircraft; Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA(2005).

[27] D5467/D5467M-97 Standard Test Method for Compressive Properties of Unidirectional Polymer Matrix Composite Materials using a Sandwich Beam, vol. 15.03, Space Simulation; Aerospace and Aircraft; Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA(2005).

[28] D6641/D6641M-01$^{\varepsilon 1}$, Standard Test Method for Determining Compressive Properties of Laminated Polymer Matrix Composite Materials using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture, vol. 15.03, Space Simulation; Aerospace and Aircraft; Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA(2005).

[29] J D5379/D5379M, 2005 Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-notched Beam Test Method, vol. 15.03, Space Simulation; Aerospace and Aircraft; Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA(2005).

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

[30] D7078/D7078M-05,2005, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-notched Rail Shear Test Method, vol. 15.03, Space Simulation; Aerospace and Aircraft; Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA(2005).

[31] Drzal, L.T., Rich, M.J., and Lloyd, P.F.1982. Adhesion of graphite fibers to epoxy matrices: I. The role of fiber surface treatment. Journal of Adhesion, 16, 1-30.

[32] D2990-01, 2005. Standard Test Method for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep Rupture of Plastics, vol. 08.01, Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA.

[33] Hasan M. Nuwayer and Golam M. Newaz, (2018) Flexural Creep Behavior of Adhesively Bonded Metal and Composite Laminates, International Journal of Adhesion and Adhesives.

[34] Hasan M. Nuwayer, Gurpinder Singh Dhaliwal & Golam M. Newaz (2020) Time-dependent behavior of adhesively bonded composite–composite beams under flexural loading, Journal of Adhesion Science and Technology.

[35] Goertzen, William K, and M. R. Kessler. 'Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites." Materials Science and Engineering (2006).

[36] R .E. Horton and J.E. McCarty, Damage Tolerance of Composites, Engineered Materials Handbook, Vol. 1, Composites, ASM International, 1987

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية