

Mechanical Properties For Pipes Made From Composite Materials (Glass/ Epoxy And Carbon/ Epoxy) Subjected To Internal Pressure

Zainab K. Hantoosh

Electromechanical Engineering Department, University of Technology/ Baghdad

Dr.Hatam Kareem Kadhom

Electromechanical Engineering Department, University of Technology/ Baghdad

Dr. Aseel Jasim Mohammed

Electromechanical Engineering Department, University of Technology/ Baghdad

Email: aseel al hassani@yahoo.com

Received on:20/ 3/2011 & Accepted on:2/2/2012

ABSTRACT

Composite Materials have been used extensively in application such as pipes and pressure vessels. Therefore it is important for further studies on the properties of these materials. This paper presents the results from a series of tensile tests on the mechanical properties of composite materials. Specimens cut from pipes made from composite materials were tested under internal pressure loadings have been tested by using a series of ASTM Standards test methods for mechanical properties. Based on the results obtained, the longitudinal E_{11} , transverse E_{22} and shear modulus G_{12} of 101.2 GPa, 5.718 GPa, 4.346 GPa and 36.6, 5.4 GPa, 4.085 GPa for carbon and glass fiber/ epoxy composites, respectively, while the ultimate longitudinal XL, transverse XT and shear tensile τ_0 strengths of 1475.4 MPa, 20 MPa, 36 MPa and 618.9 MPa, 14 MPa, 28 MPa for carbon and glass fiber/epoxy composites, respectively. The results from this series of tests have been presented and compared with results from analytical equations. Good agreement was achieved between the experimental results and analytical results.

Keywords: filament wound pipes, glass, carbon, epoxy, composite, mechanical properties, tensile test

الخواص الميكانيكية لأنابيب مصنوعة من مواد مركبة (ألياف الزجاج/
ايبوكسي+كاربون/ ايبوكسي) معرضة لضغط داخلي

الخلاصة

تم استخدام المواد المركبة على نطاق واسع في التطبيقات العملية، والصناعية مثل الأنابيب و أوعية الضغط لذلك فأنه من الضروري، إجراء المزيد من الدراسات على خواص هذه المواد. هذه الدراسة تقدم صورة واضحة للخواص الميكانيكية لهذه المواد المركبة مستتدة

على اختبارات الشد، حيث ان العينات قطعت من انابيب مصنوعة من مواد مركبة معرضة الى ضغط داخلي وقد انجز العمل وفق اسس ومعايير المواصفة ASTM المتعلقة بالخواص الميكانيكية ،ومن تلك الأختبارات حصلنا على نتائج E_{11} الطولي E_{22} المستعرض و معامل القص G_{12} وكانت للزجاج والكاربون على التوالي 4.058GPa , 5.4GPa , 36.6GPa , وهذه النتائج للمواد المركبة من الكاربون وألياف الزجاج (carbon and glass fiber/ epoxy composites) ، وعلى التوالي بينما الأجهادات الطولية XL ، والمستعرضة Xt واجهاد القص TO هي 28MPa , 14MPa , 18MPa , 36MPa , 20MPa , 1475.4 ألياف الزجاج مع الإيبوكسي على التوالي ، وكانت نتائج الاختبارات العملية عند مقارنتها مع المعادلات التحليلية متطابقة بشكل جيد.

الكلمات المرشدة: المواد المركبة من الكاربون وألياف الزجاج ، الأنابيب بأوعية الضغط، الخواص الميكانيكية ، فحوصات أختبار الشد .

المقدمة

ان المقاومة والجساءة هي الركيزة الاساسية للمواصفات الفنية للمواد ولمعايير التصميم، وعليه يجب تحديد قيمتها للمواد المركبة من خلال تعريض تلك المواد لاختبارات ميكانيكية [1]. في البداية كانت طرق الأختبار تقليدية ، ثم تطورت لتحديد الخصائص (المواصفات) الميكانيكية والفيزيائية للمعادن والمواد المتجانسة او متساوية الخواص الأخرى ، بينما يتطلب للمواد الجديدة التي هي غير متجانسة و غير متساوية الخواص ، أو متعامدة الخواص عناية خاصة عند تحديد الخواص الميكانيكية و الفيزيائية ، وعليه تزايد حديثاً استخدام المواد المركبة في التطبيقات الجديدة .وتعد الان المواد المركبة قادرة على منافسة المواد الأخرى في العديد من التطبيقات ، [2]والحقيقة فأن المواد المركبة تستطيع تكيفها لتلائم الأحتياجات الفردية للمواصفات المرغوب بها في بيئة تآكل حيث تزود بمقاومة عالية، وزن خفيف، وكلفة اقل للعمر الافتراضي للمنتج أقل وتمتاز بجمع جيد بين الخصائص الميكانيكية والحرارية و عزل حراري ، هذه الصفات بالإضافة الى القدرة على رصد الأداء للمواد في الميدان عن طريق جزء لا يتجزأ من أجهزة الاستشعار المركبة قد أعطى التفوق للمواد المركبة على المواد الأخرى ولفهم سلوك المواد المركبة تحت مختلف ظروف التحمل ، و بسبب ان المواد المركبة تنتج بمختلف المصنعين ،يعتبر دراسة الخواص الميكانيكية والفيزيائية أساسية [3].

تم التركيز هنا ، حول توسيع نطاق الفهم العام لهذه المواد وتوضيح أهمية معرفة خواصها الميكانيكية ولتوضيح السهولة التي يمكن ان تكون هذه المعلومات بسيطة الأكتساب من خلال الأختبارات العملية.

المواصفات المعطاة من قبل المصنعين غالباً ما تكون متوسطة القيم و لخط انتاجي كامل وليس لمنتج محدد وهذا هو مصدر الخطأ ،حيث يجب الأخذ بنظر الأعتبار قيم العينة الصغير التي تأخذ من كل العينات المنتجة كذلك الكثير من معلومات حول المواصفات التي لا يتم تثبيتها من قبل المصنعين والتي يحتاجها المستخدم لاجراء تجاربه لتحديد المعلومات الدقيقة. فالمواصفات الميكانيكية الدقيقة للمواد المركبة تعتبر مهمة و اساسية لانها تزودنا بالمتغيرات

المهمة والاساسية في تصميم المواد المركبة تحت مختلف انواع التحميل ،حيث تم في هذا البحث اجراء اختبارات الخصائص الميكانيكية لمواد الياف الزجاج والكاربون المركبة المستخدمة في هذا البحث حيث ان النماذج، (العينات) تم اقتطاعها من صفيحة ذات طبقات مصنوعة من خلال عملية اعداد خيوط الياف الزجاج و الكاربون باستخدام قالب مستطيل. الهدف من هذه الدراسة هو تقديم تقنيات معالجة اعداد العينات وتحليل طرق الاختبار و اجراءات الاختبار لتحديد المواصفات الميكانيكية و تحديد المعلومات عن قيم المقاومة للمواد المركبة و كل طرق الاختبار المقدمة او المستخدمة مستندة على معيار الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد ASTM .

اختيار المواد

المواد المستخدمة في الاختبار ،مواد مركبة ذات اساس ايبوكسي مقواة بألياف الزجاج كمادة رابطة بالاضافة الى الياف الكربون المقواة مع ايبوكسي كمادة رابطة .الياف الزجاج المستخدمة نوع (E-glass)

PPG- Ind,Inc.,USA,PAN-based CARBON FIBER FROM ZOITEK CORPORATION , USA.

جدول (1) يبين الخواص الميكانيكية للالياف. والمواد الرابطة في هذه الدراسة هو اليبوكسي والمصلد نوع MW215 TA , MW 215 TB على التوالي . ومواصفات الالياف هذه ،تم حسابها من قبل المصنّع .

طرق الاختبار

لغرض ايجاد المواصفات الميكانيكية للمادة الرابطة حضرت عينة لاختبار الشد طبقا لمواصفة (ASTM B 97-638) [4] ، شكل (1) يبين الابعاد والشكل الهندسي لعينة اختبار الشد للمادة الرابطة. تم تحضير الخليط من اليبوكسي و المصلد في قالب كما مبين في الشكل (2) وبعدها اجري عليه عملية المعالجة الحرارية (CURING) لأزالة الاجهادات المتبقية، في درجة حرارة الغرفة 24 ساعة.وبعدها يزال القالب من عينة الاختبار واصبحت جاهزة لاختبار الشد عليها باستخدام جهاز الشد نوع (INSTRON 8500). من خلال اختبار الشد لمادة الاساس ثم الحصول على منحنى (الاجهاد - الانفعال) الموضح بالشكل (3) نلاحظ الزيادة الخطية للاجهاد مع الانفعال لحد القيمة العظمى فجأة ينحدر ككسر قصف ، بينما الشكل (4) يبين صورة لعينة الاختبار المادة الرابطة بعد الفشل ومن هذا لوحظ ان فشل العينة يحصل فجائي ويحدث في منطقة التخصر القريبة من المركز .و الجدول (2) يبين الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمادة الرابطة .

خواص المواد المركبة المقواة

اختبار الشد الساكن static tension test

اختبرت الصفيحة ذات الطبقات تحت حمل الشد لتحديد الخواص للمواد المركبة بالاتجاه الطولي والعرضي مثل مواصفات القص للمواد المركبة .حيث ان صفيحة الكاربون والياف الزجاج المركبة صنعت بطريقة القالب المصنوع من الخشب بالابعاد 400مم*200مم*20مم

ومن ثم تعامل العينة حرارياً بدرجة حرارة الغرفة لمدة (14) ساعة . علماً بان العينة قطعت طبقاً للمواصفة (ASTMD 3039) 1995 [6] وتم ترتيب الألياف بزوايا 0، 90، 45، والشكل (5) يوضح الشكل الهندسي لعينة الشد للمواد المركبة المقواة بينما جدول (3) يبين الأبعاد لعينة الشد للألياف الزجاج والكاربون المركبة بالايوكسي كمادة رابطة المستخدمة في الاختبار . ولتحديد ثابت معامل المرونة E والمقاومة يتطلب إيجاد الجهد stress ويلاحظ اختلاف القيم للمواد المتباينة الخواص حسب مبادئ Saint Venaut's وتكون مطابقتها اضعف من المواد المتساوية الخواص (isotropic) وكذلك للحصول على معلومات الجساء للمواد المركبة نلاحظ انه من الضروري زيادة طول العينة وهذا يفسر نوع الفشل الذي يحدث حيث تختلف من نوع الى اخر [7]. معادلة حساب مقاومة الشد كحمل اعظم مقسوم على وحدة المساحة العرضية في منطقة التخصر نفرض ان شكل واحد من الفشل هو كسر العينة بشكل عمودي على المحور الطولي . على اي حال وبالممارسة فان العينة غالباً ماتفشل بالاتجاه الطولي بين الطبقات (وهذا يعتمد على عدد الطبقات) نفس الشيء نلاحظ ان الألياف تسحب او تكسر خارج منطقة التخصر في مسكات جهاز الشد . وهذا الخطأ غالباً ما يحدث في اختبار الشد فيجب معالجته وتعيينه من خلال الاختبار الصحيح لحجم العينة وطريقة المسك الصحيحة .

اختبارات الشد لعينات احادية الاتجاه (0°) اجريت على ثلاث عينات قطعت من صفيحة ذات طبقات مقواة من الياف الكاربون ومرة اخرى لألياف الزجاج وجميع الاختبارات اجريت بالسيطرة على الازاحة بمعدل 1mm/min . باستخدام جهاز الشد العام (INSTRON 8500) والعينات بسمك 2 ملم و 15 ملم وعرض 200 مم وطول . و ثم ترك مسافة 40 مم من كل طرف للعينة مما يعطي طول صافي 120 مم وكذلك تم تثبيت مقياس الاستطالة على العينة .

مقياس الاستطالة ذو 40 مم وضع في مركز العينة لمعرفة الانفعال ، وكما مبين في الشكل (6) بينما في الشكل (7) يوضح العلاقة بين معدل الاجهاد والانفعال لعينة المواد المركبة المقواة بالياف الكاربون والمقواة بالياف الزجاج احادية الاتجاه (0) وبما ان الاجهاد يعرف بانه القوة المسلطة على العينة مقسومة على مساحة المقطع العرضي للاختبار ومعامل يونغ E₁₁ ممكن الحصول عليه باستخدام طريقة المربعات الخطية الصغرى [2] او استخدام الجزء الخطي الاولي لمنحني الاجهاد والانفعال ومعامل يونغ E₁₁ يساوي 101.2MPa للمواد المركبة من الياف الكاربون والايوكسي والمادة المركبة لألياف الزجاج والايوكسي على التوالي ، وحساب الحجم الجزئي ممكن ان يتم للمادة المركبة من الياف الزجاج والايوكسي كما في معظم البحوث يساوي 0.476، 0.545 على التوالي [8].

نلاحظ ان البنية الفشل تكون معقدة ، اي ان سطح الفشل خشن جدا نسبة الى فصل الألياف او في حالة سحب الألياف الى الخارج او في حالة الشقوق من المادة الرابطة وكذلك في حالة الشق القصي .

اختبار الشد لعينات احادية الاتجاه (90) اجريت لإيجاد معامل المرونة المستعرض ومقاومة الشد المعترضة لكلا المادتين المركبة من الياف الكاربون والايوكسي والياف الزجاج والايوكسي . طبقات المادة المركبة من الياف الزجاج والايوكسي استخدمت كتنوية في مناطق مسك العينة بقياس (2مم) سمك .

الشكل (7) يوضح العلاقة بين الاجهاد والانفعال للمادة المركبة احادية الاتجاه (90) في كلا الحالتين ايبوكسي مقوى باللياف الكربون و ايبوكسي مقوى باللياف الزجاج. ويمكن ان نلاحظ بان الحمل يزداد خطيا للقيمة العظمى ومن ثم ينحدر فجأة ككسر قصف ومعامل المرونة المستعرض E22 يساوي 5.718 ، 5.4MPa ، للمادة المركبة كاربون الايبوكسي وزجاج الايبوكسي على التوالي .

عينات الشد للمادة المركبة ذات اليف باتجاه (45)حضرت لغرض تحديد خواص اجهاد القص لتلك المادة المستخدمة في هذا البحث وفق المواصفة (ASTMD3518,1994)[9] وذلك يتضمن معامل القص في المستوي G12 وكذلك اجهاد القص الاعظم. فحص الشد لعينة المادة المركبة ذات الطبقات يمكن من قياس استجابة القص لاجهاد الانفعال في المستوي بصورة غير مباشرة. عينة الشد قيست بواسطة مقياس الانفعال المحوري (0° / 90°) ولوحظ ان اجهاد القص والقص النفعالي ومعامل القص ممكن قياسهم كما موضح في الملحق. ومن ذلك يلاحظ ان استجابة القص في المستوي تكون خطية في بعض النقاط ومن ثم يصبح لخطية حتى الكسر. وهذا السلوك بسبب خضوع المادة الرابطة والتي بدورها تؤدي الى خضوع الاليف وعلى اي حال لايجاد معامل القص في المستوي فان الميل للجزء الاولي في مخطط العلاقة بين الاجهاد - الانفعال للقص ممكن ان يقودنا لذلك ومن ذلك فان معامل القص في المستوي يساوي 4.346MPa, 4.085MPa للمادة المركبة ذات اليف الكاربون الايبوكسي والزجاج الايبوكسي على التوالي .

النتائج العملية وكذلك النتائج النظرية للخواص الميكانيكية للمادة المركبة من اليف الكاربون الايبوكسي واليف الزجاج الايبوكسي لخصت في (جدول4)، يبين نوع الفشل المتوقع الحدوث في حالة حمل الشد نوع التقوية والطبقات لكن الخصائص الميكانيكية للمادة المركبة وعيوب التصنيع لها مثل الفجوات الهوائية وتموج الاليف... الخ[10] وابعاد العينة نتل الحافات وتاثر النهايات (حافة العينة) هذه كلها تعتبر من المؤثرات الاساسية [15] [14]. علما بأن النتائج النظرية استخدمت المعادلات المبينة في الملحق I والملحق II.

الشكل (9) يبين صورة العينات الشد بعد الفشل للمادة المركبة من اليف الزجاج الايبوكسي بينما الشكل (10) يوضح صورة العينات الشد بعد الفشل للمادة المركبة من اليف الكاربون الايبوكسي .

مواصفات (ASTMD 30) ،(995(6)) تتضمن ترميز لنمط فشل ثلاثي الاجزاء كمعيار استخدم في هذا البحث لوصف وتحديد نمط الفشل وموقعه حيث ان الميزة الاولى في هذا الترميز توضح نوع الفشل والميزة الثانية مساحة الفشل اما الثالثة توضح مكان الفشل . نمط الفشل وموقعه ومكانه يتغير من عينة الى اخرى بعض العينات تفشل في مكان المسك عرضيا وافقيا . نوع الفشل العرضي يعني ان الكسر يبدأ من احد الجوانب باتجاه الجانب الاخر عبر عرض العينة وحسب ما ذكر في المواصفة (ASTMD 3039) ،(995[6]) باناه متى ما كان هناك كسر معين لفشل في نموذج ما فانه يحدث داخل عرض العينة من مكان المسك (هي وسيلة تسليط الحمل التي من خلالها يسלט الحمل على المواد) مثل خط المركز للماسكات ، مادة الماسكات ، خاصية التلاصق ، نوع المسك ، ضغط المسك... [10] هذه العوامل يجب ان يتم فحصها والتأكد من مطابقتها للمواصفات القياسية ومن الممكن في حالتها هذه يكون ضغط المسك وخط مركز الماسكات سبب رئيسي في فشل العينات ،كما ان بعض العينات فشلت بسبب العلاقة بين الزاوية والقياس وخط الوسط (المركز) ويسمى (AGM)

(Angled- GAGE- MIDDLE) نوع الفشل هنا يسمى زاوي ومساحة الفشل هنا تعني ان الفشل في منطقة القياس .

والتي هي قريبة من مركز العينة والجزء الخاص بمكان الفشل يعني بان الفشل في وسط العينة وبعض العينات كان فشلها LGM (الجانبي - مقياس - وسط) حيث ان الكسر يوصف بالخط العمودي على الاتجاه الطولي مقسم العينة الى جزئين متساويين الفشل في العينات يكون مفاجئ وكارثي ويقتصر على مرحلة نهاية المنحني للشد من خلال فحص سطح العينات الفاشلة نلاحظ ان الكسر يتبع مسار حر من اتجاه الالياف وحسب زواياه وهذا يعني بان المادة الرابطة تفشل قبل ان تفشل الالياف ، [15] بمعنى اخر فان المادة الرابطة هي اضعف من الالياف ماعدا عينات التي تكون الالياف فيها باتجاه زوايا (0) .

الاستنتاجات

- 1- نتائج الفحص بينت بان العلاقة بين الانفعال الاجهاد في اختبار الشد للمادة الاساس والمادة المركبة زجاج ايبوكسي و كاربون ايبوكسي يزداد خطيا للزوايا (90) وغير خطي عند الزوايا (0) ويكون في قيمته العظمى ويهبط بصورة مفاجئة وفي النهاية يصل الى حمل الكسر وحمل الشد الاعظم لكلا المادتين كاربون ايبوكسي ، زجاج ايبوكسي المادة المركبة في حالة الزوايا (0) يكون اعلى منه في حالة الزوايا (90) اختبار الشد للزوايا (45) لكلا الحالتين للمادة المركبة بين السلوك اللاخطي حتى الكسر ومعامل القص المتمثل بالميل للجزء الاولي من مخطط استجابة اجهاد القص مع القص الانفعالي .
- 2- نتائج الفحص بينت مختلف انماط الكسر مثل الكسر القصف للمادة الرابطة والكسر التدريجي للالياف المعتمد على زوايا اتجاه الالياف حيث ان عند الزوايا (90) الكسر يحدث من خلال كسر في المادة الرابطة وشق ينتشر في الاتجاه العمودي على خط اتجاه الحمل بينما عند زوايا (0) الفشل يكون غير منتظم والشق ينتشر في مختلف الاتجاهات بسبب المقاومة العالية للالياف باتجاه الطولي بينما نلاحظ عند الزوايا (45) الفشل يبدأ من خلال القص الذي يفصل المادة الرابطة بشكل موازي باتجاه التقوية .
- 3- عند مقارنة نتائج الفحص العملية مع النتائج النظرية وجد توافقا جيدا بينهما .

المصادر

- [1] George Lubin. 1985. Static Test Methods for Composites. Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York, USA.
- [2] Donald F. Adams, Leif A. Carlsson and R. Byron Pipes. 2003. Experimental characterization of advanced composite materials. 3rd Ed., CRC Press LLC.
- [3] Jha, A.K. S. Mantry, A. Satapathy , A. Patnaik, "Erosive Wear Performance Analysis of Jute-Epoxy-SiC Hybrid Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 44 (13) pp.1623-1641, 2010.
- [4] ASTM D638. 1997. Standard Test Method for Tensile Properties. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, hiladelphia. pp. 46-54.
- [5] Abdalla, F.H. S.A. Mutasher, Y.A. Khalid, S.M. Sapuan, A.M.S. Hamouda, B.B. Sahari, M.M. Hamdan. 2005. Design and Fabrication of Low Cost

- Filament Winding Machine. Materials and Design. Elsevier Ltd.
- [6] ASTM D3039. 1995. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia. 14(2): 99-109.
- [7] Gul Apalak, Z. "Elastic Flexural Stresses in an Adhesively Bonded Functionally Graded Double Containment Cantilever Joint", Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 23, No. 1, 35-56 (2010).
- [8] زينب كاظم حنتوش ، حاتم كريم ، أسيل جاسم "دراسة أهمية حساب الحجم الجزئي (Volume Fraction) للمواد المركبة المقواة بألياف الزجاج والكربون. مجلة الهندسة و التكنولوجيا/الجامعة التكنولوجية، المجلد 29، العدد 4، 205-195، 2011.
- [9] ASTM D3518. 1994. In-plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test at $\pm 45^\circ$ Laminate. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 14.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia. pp. 139-145.
- [10] Tarnopol'skii, Yu. M. and Kincis, T. 1985. Static Test Methods for Composites. Van Nostrand Reinhold Publishing Company Inc, New York.
- [11] Jones, R. M. 1998. Mechanics of Composite Materials. 2nd Ed. Edwards Brothers, Ann Arbor.
- [12] Jen, M. H. R. and Lee, C. H. 1998. "Strength and Life in Thermoplastic Composite Laminates under Static and Fatigue Loads". Part-1: Experimental International Journal of Fatigue. 20(9): 605-615.
- [13] Barbero, E. J. 1998. Introduction to Composite Materials Design. Taylor & Francis, Philadelphia.
- [14] Barbero, E. J. 1998. Introduction to Composite Materials Design. Taylor & Francis, Philadelphia.
- [15] Hoo Tien Kuan, Wesley Cantwell and Hazizan Md Akil, "The Mechanical Properties of Hybrid Composites Based on Self-Reinforced Polypropylene", Malaysian Polymer Journal, Vol. 4, No.2, p 71-80, 2009, Available online at www.fkksa.utm.my/mpj

جدول رقم (1) الخواص الميكانيكية للألياف المركبة

Types of fiber	E_f (GPa)	U_f	G_f (GPa)	ρ (g/cc)
Carbon fiber	228.0	0.31	41.16	1.81
Glass fiber	72.53	0.33	29.721	2.0

حيث ان :
 E_f : معامل المرونة
 U_f : حجم الفايبر (سم³)
 G_f : الجساءة

جدول (2) يبين الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمادة الرابطة.

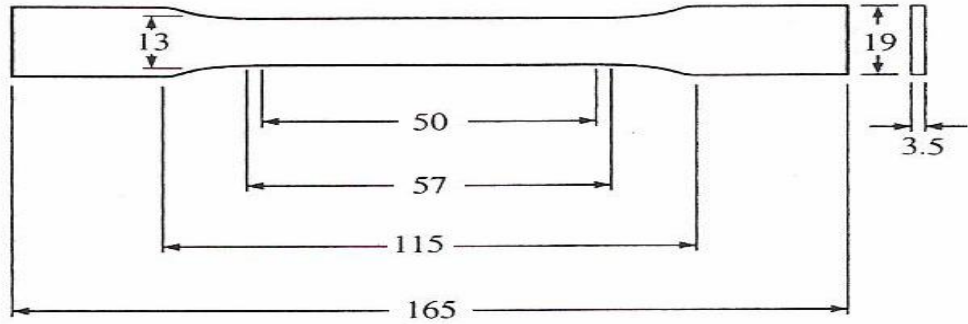
Item	Unit	WM-215 TA	WM-215 TB	Mechanical Properties of Matrix	
				E_m (GPa)	3.2
Appearance	-	White viscous liquid	Colorless liquid	U_m	0.28
Viscosity	CPs@30 °C	5500+1000	30+20	G_m (GPa)	1.25
				ρ_m (g/cc)	1.1
Mixing ratio by volume	-	100	25	Ultimate tensile stress (MPa)	51

جدول (3) ابعاد عينة الشد والياف الزجاج والكاربون المركبة .

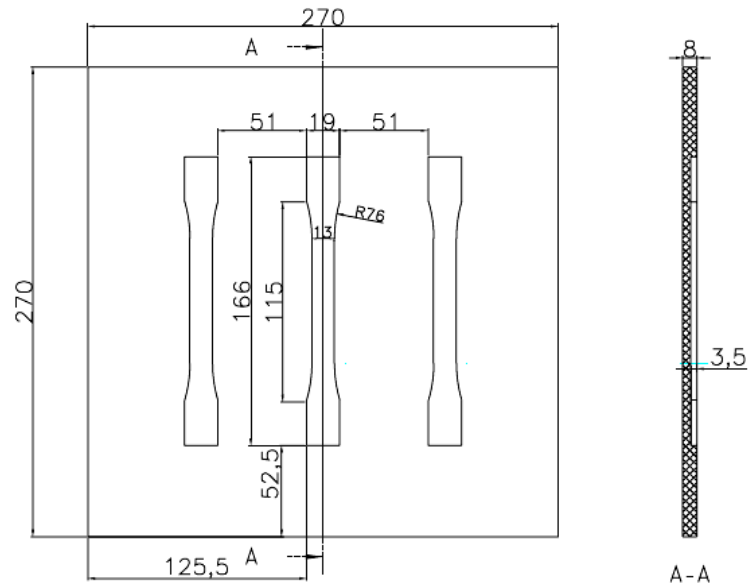
Depth A(mm)	Overall length L(mm)	Thickness T_2 (mm)	Thickness T_1 (mm)	Width B(mm)	Angle (degree)
40	200	5.0	2.0	15	[0]°
30	175	5.0	2.0	25	[90]°
30	175	5.0	2.0	25	[45]°

جدول (4) الخصائص الميكانيكية للمواد المركبة

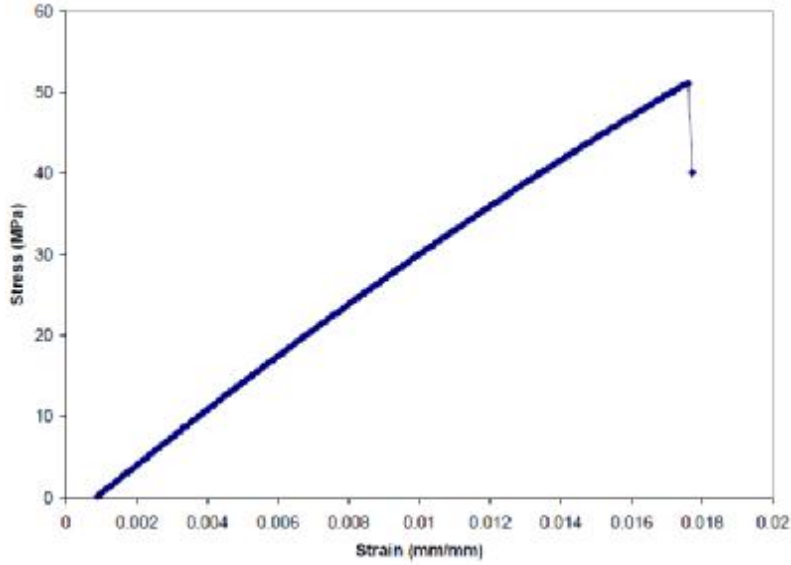
Properties	Carbon/Epoxy composite ($V_f = 54.5\%$)			Glass/Epoxy composite ($V_f = 47.6\%$)		
	% Diff.	Theoretical	Experimental	% Diff.	Theoretical	Experimental
Longitudinal modulus E_{11} (GPa)	19.50	125.716	101.2	1.10	36.196	36.60
Transverse modulus E_{22} (GPa)	17.33	6.917	5.718	8.04	5.872	5.40
Shear modulus G_{12} (GPa)	2.32	4.245	4.346	13.81	3.521	4.085
Poisson's ratio ν_{12}	4.52	0.296	0.31	1.32	0.304	0.30
Volume fraction V_f		-	0.545		-	0.476
Longitudinal strength X^L (MPa)		-	1475.40		-	618.90
Transverse strength X^T (MPa)		-	20.00		-	14.00
Shear strength τ_o (MPa)		-	36.00		-	28.00



شكل رقم (1) عينة اختبار الشد للايبوكسي الابعاد (mm)



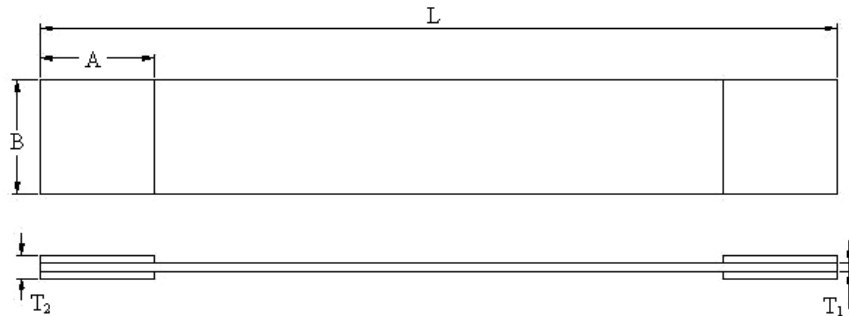
شكل رقم (2) شكل وابعاد القالب لصنع عينات الايبوكسي الابعاد (mm)



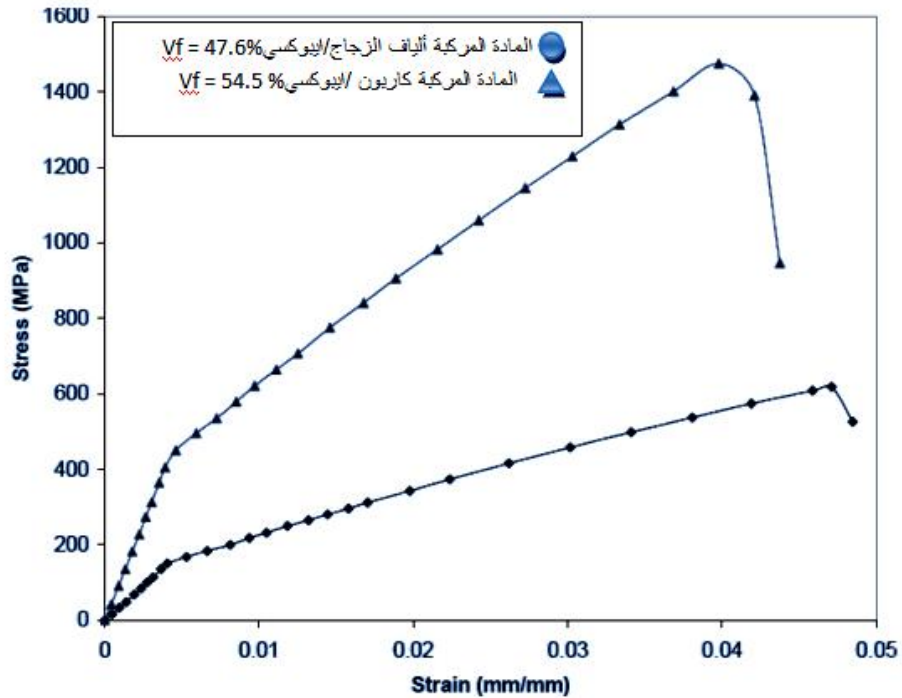
شكل (3) علاقة الاجهاد بالانفعال للمادة الرابطة



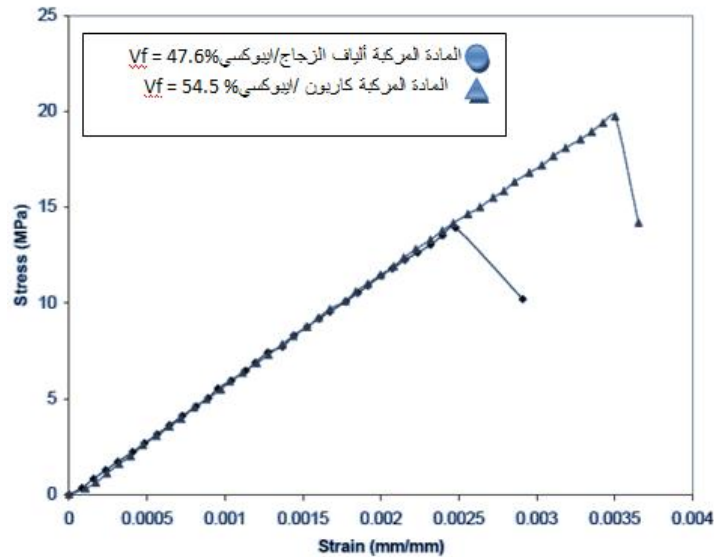
شكل (4) صورة لفشل عينة اختبار الشد للمادة الاساس (Matrix).



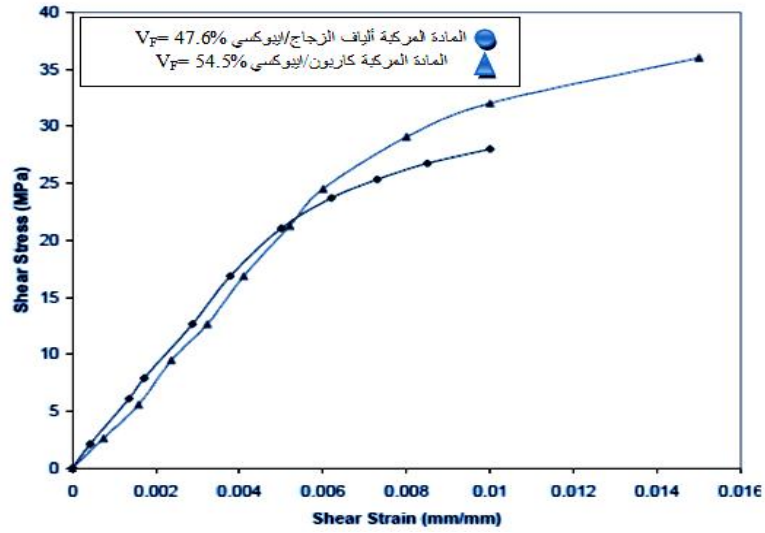
شكل (5) عينة الشد للمواد المركبة المقواة.



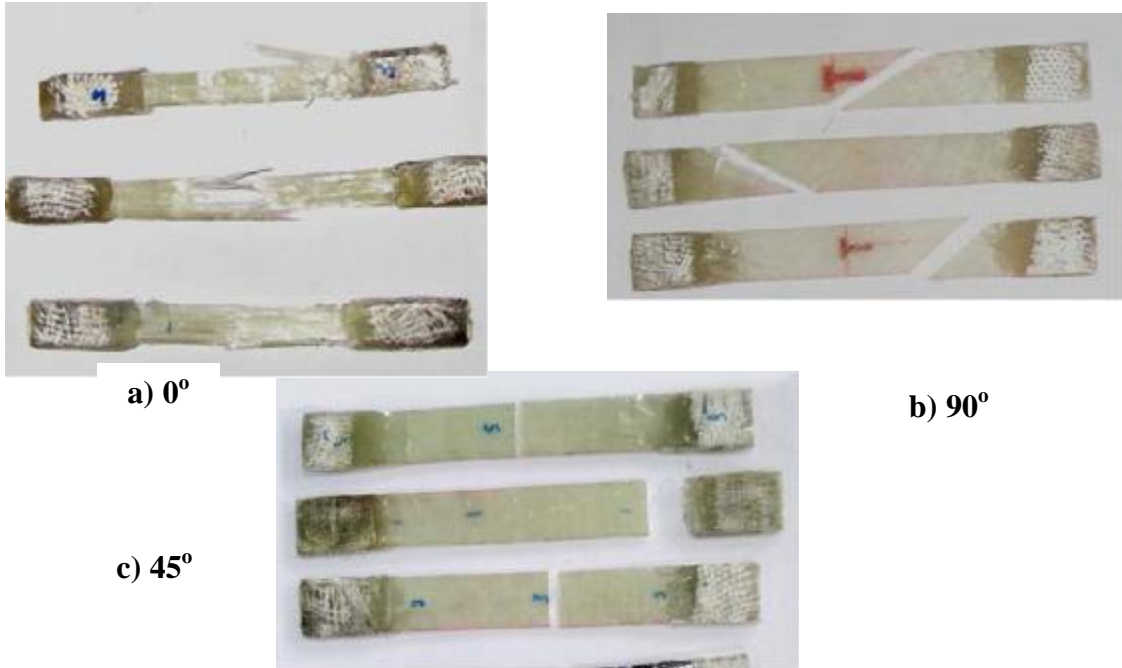
شكل (6) استجابة الشد اجهاد - انفعال لمادة مركبة من كاربون الايبوكسي احادية الاتجاه (0) الايبوكسي احادية الاتجاه $V_F = 54.5\%$ وللمادة المركبة من الياف الزجاج $V_F = 47.6\%$



شكل (7) استجابة الشد اجهاد - انفعال لمادة مركبة كاربون ايوكسي احادية الاتجاه (90°) $V_f = 54.5\%$ ولمادة مركبة زجاج ايوكسي احادية الاتجاه (90°) $V_f = 47.6\%$



الشكل (8) يوضح العلاقة بين اجهد القص والقص والانفعالي لمادة مركبة احادية الاتجاه (45) في حالة كاربون الايبوكسي وحالة زجاج الايبوكسي ..



الشكل (9) صور لفشل عينات اختيار الشد للمادة المركبة اليف الزجاج الايبوكسي بزوايا اتجاه (0) وزوايا الاليف.



a) 0°



b) 90°



c) 45°

شكل (10) صور لفشل عينات اختبار الشد للمادة المركبة كاربون ايوكسي وبزاوية اتجاه (0) وزوايا الالياف.

الملحق (1) التحليل الرياضي لاختبار الشد

معادلة التشكيل الخاصة بالمواد المركبة و كما تم وصفها من قبل [11] (Jones, 1998) هي:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{16} \\ c_{22} & c_{22} & c_{26} \\ c_{16} & c_{26} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{xx}} & \frac{-\nu_{yx}}{E_{yy}} & \frac{\eta_{x,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{-\nu_{yx}}{E_{xx}} & \frac{1}{E_{yy}} & \frac{\eta_{x,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{\eta_{xy,x}}{E_{xx}} & \frac{\eta_{xy,y}}{E_{yy}} & \frac{1}{G_{xx}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ان الاستخدام الهندسي لأختبار الشد الستاتيكي يتم باستخدام المعادلة:

$$\sigma_x = F/A, \sigma_y = \sigma_{xy} = 0$$

عندما =F الحمل المؤثر =A مساحة المقطع الأصلي
من المعادلة رقم (1) يتم احتساب

$$\varepsilon_x = c_{11} \frac{F}{A}; \varepsilon_y = c_{12} \frac{F}{A}; \varepsilon_{xy} = c_{16} \frac{F}{A} \dots \dots \dots (2)$$

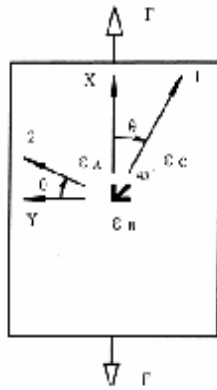
ان الانفعال العمودي للتوجيه الاعتباطي ، θ ، في الاحداثيات x-y هو:

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + \varepsilon_{xy} \sin \theta \cos \theta \dots \dots \dots (3)$$

عندما قيمة $\theta = 45^\circ$ الأنفعال ε_c يساوي $(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_{xy})/2$

عندما $\varepsilon_A = \varepsilon_x, \varepsilon_B = \varepsilon_y$ كما في الشكل التالي فإن

$$2\varepsilon_c - \varepsilon_A - \varepsilon_B = \varepsilon_{xy}$$



المعادلة (2) يمكن صياغتها كالآتي:

$$c_{11} = \frac{A}{F} \varepsilon_A; c_{12} = \frac{A}{F} \varepsilon_B; c_{16} = \frac{A}{F} (2\varepsilon_c - \varepsilon_A - \varepsilon_B) \dots \dots \dots (4)$$

بعد تعويض معادلة رقم (4) في معادلة رقم (1)، نحصل على الآتي:

$$E_{xx} = \frac{F}{A \varepsilon_A}; \nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_A}; \eta_{xy,x} = \frac{(2\varepsilon_c - \varepsilon_A - \varepsilon_B)}{\varepsilon_A} \dots \dots \dots (5)$$

هكذا، فإن الثوابت المادية الثلاثة يتم احتسابها مباشرة من المعادلة رقم (5) بقياس تجمعات الانفعال

(rosettes) في المواقع A,B,C. ان قيمة $\eta_{xy,x}$ تساوي صفر نتيجة للتكديس المنتظم ل [0]_k

، [90]_k

وفقا لأختبارات الشد ل [0]_k ينتج ν_{12} ، كما ان مقدار الشد الأعظم ل [90]_k ، X^L ، ينتج E_{22} ، ν_{21} ، وكذلك قيمة القوة العكسية X^T . كما يمكن حساب قيمة معامل القص G_{12} من خلال بيانات ل [45]_k او [±45]_{ks} كالآتي:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= m^2 \sigma_x + n^2 \sigma_y + 2mn \sigma_{xy} \\ \sigma_{22} &= n^2 \sigma_x + m^2 \sigma_y - 2mn \sigma_{xy} \\ \sigma_{12} &= -mn \sigma_x + mn \sigma_y + (m^2 - n^2) \sigma_{xy} \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

عندما $m = \cos \theta$, $n = \sin \theta$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{11} &= m^2 \varepsilon_x + n^2 \varepsilon_y + 2mn \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{22} &= n^2 \varepsilon_x + m^2 \varepsilon_y - 2mn \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{12} &= -mn \varepsilon_x + mn \varepsilon_y + (m^2 - n^2) \varepsilon_{xy} \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

، نفرض $\theta = 45^\circ$ فتصبح المعادلات (6) و (7) كالآتي: [45]_k في حالة كون

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} = \sigma_{22} = -\sigma_{12} &= \frac{1F}{2A} \dots\dots\dots (8) \\ \varepsilon_{11} &= \frac{1}{2} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_{xy}) \\ \varepsilon_{22} &= \frac{1}{2} (\varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_{xy}) \\ \varepsilon_{12} &= (\varepsilon_x - \varepsilon_y) \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

بربط معادلة رقم (3) مع معادلة (9) نحصل على:

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_C; \varepsilon_{22} = \varepsilon_A + \varepsilon_B - \varepsilon_C; \varepsilon_{12} = \varepsilon_A - \varepsilon_B \dots\dots (10)$$

باستخدام تعريف معامل القص

، مع تعويض معادلة (11) في معادلة (10) نحصل على: G_{12}

$$G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\varepsilon_{12}} = \frac{E_{xx}}{2(1 + \nu_{xy})} \dots\dots\dots (11)$$

حيث تم حساب قيمة E_{xx} , ν_{xy} من خلال اختبار الشد للعيونة [45]_k وبطريقة أخرى يمكن إيجاد قيمة G_{12} باستخدام العيونة [45]_{ks} حسب المواصفة القياسية [8] (1994), ASTM D3518, ، وباستخدام المواصفات المستعملة من قبل CLT and [12] (Jen and Lee 1998) ، وبتطبيق معادلات الاجهاد و الضغط تكون العلاقة كالآتي:

$$\sigma_{12} = -\frac{1F}{2A}; \epsilon_{12} = \epsilon_B - \epsilon_A \dots \dots (12)$$

، نحصل على: $[\pm 45]_{ks}$ وبإستخدام قيمة

$$G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\epsilon_{12}} = \frac{E_{xx}}{2(1 + \nu_{xy})} \dots \dots \dots (13)$$

نظرا لصعوبة حساب قيمة اجهاد القص τ_0 للعينات مختبريا، نستخدم علاقة Jen and Lee [12](1998) والمستعملة بطريقة غير مباشرة في اختبارات Hill-Tsai- لحساب قوى الشد و الضغط للعينة $[45]_k$ لحساب قيمة τ_0 وكما يعبر عنها في العلاقات الآتية:

$$\frac{\sigma_{11}^2}{(X^L)^2} - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{(X^L)^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{(X^T)^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{\tau_0^2} = 1 \quad (\sigma_{11} > 0, \sigma_{22} > 0) \dots \dots \dots (14)$$

$$\frac{\sigma_{11}^2}{(X_C^L)^2} - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{(X_C^L)^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{(X_C^T)^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{\tau_0^2} = 1 \quad (\sigma_{11} < 0, \sigma_{22} < 0) \dots \dots \dots (15)$$

حيث ان X^L , X^T هي قوى الشد العرضية و الطولية بالتتابع، بينما X_C^L , X_C^T هي قوى الضغط. بعد حساب قيم اجهاد الشد والضغط للعينة $[45]_k$ تنتج المعادلات الآتية:

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = -\sigma_{12} = \frac{1}{2}X^L \dots \dots \dots (16)$$

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = -\sigma_{12} = \frac{1}{2}X_C^L \dots \dots \dots (17)$$

وبتعويض معادلة (16) في معادلة (14) او بتعويض معادلة (17) في معادلة (15) يمكن حساب قيمة τ_0 بدون اجراء اختبارات القص.

الملحق (2) المعادلات النظرية

معامل المرونة بالنسبة للنظام الاحداثي [11] (Jones,1998)

$$E_{11} = E_f \nu_f + E_m \nu_m$$

$$E_{11} = 72.52 \times 0.476 + 3.2 \times 0.524 = 36.196 \text{ GPa}$$

$$E_{22} = \frac{E_f \nu_m}{\nu_f \nu_m + (1 - \nu_f) \nu_m}$$

$$E_{22} = \frac{72.52 \times 3.2}{0.476 \times 3.2 + (1 - 0.476) \times 72.52} = 5.872 \text{ GPa}$$

$$\nu_{12} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \nu_f \nu_f + (1 - \nu_f) \nu_m$$

$$\nu_{12} = 0.476 \times 0.33 + (1 - 0.476) \times 0.28 = 0.304$$

معامل القص [13] (Barbero,1998)

لان $G_m \ll G_r$
اذن

$$G_{12} = G_m \times \left[\frac{1 + \nu_f}{1 - \nu_f} \right]$$

$$G_{12} = 1.25 \times \left[\frac{1 + 0.476}{1 - 0.476} \right] = 3.521 \text{ GPa}$$