# دراسة تأثير إجهاد القص البيني على الخواص الميكانيكية لمادة متراكبة ذات أساس من الايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية ( SRP )

**الدكتور علي حسين عتيوي ، الدكتور باسم محمد القريشي ، المهندسة أسيل محمود عبد الله**
الجامعة التكنولوجية

**ملخص البحث :**
السطح البيني ( Interface ) هو من أهم العوامل المسيطرة على خواص المواد المتراكبة لأن الحمل ينتقل من المادة الأساس إلى الألياف عبر هذا السطح. في هذا البحث تم دراسة السطح البيني لمادة متراكبة ذات أساس بوليمري ( الايبوكسي ) مقواة بأسلاك فولاذية من النوع عالي الكربون ( Steel Reinforced Plastic, SRP ) ، إذ تمتاز هذه المادة بالمتانة والجساءة العاليتين وكلفة منخفضة. وتم تخشين الأسلاك الفولاذية ودراسة تأثير هذا التخشين على قوة الربط للسطح البيني وعلى الخواص الميكانيكية لتلك المادة المتراكبة.
وقد لوحظ أن قوة الربط للسطح البيني للمادة المتراكبة المقواة بأسلاك فولاذية مخشنة تزداد بمقدار ( 73.3 % ) ( مقارنة بالمادة المتراكبة المقواة بأسلاك فولاذية ملساء. وكذلك حصول تحسين لسلوك الانحناء وكذلك مقاومة الثني بمقدار ( 11.77 % ) للمادة المتراكبة المقواة بأسلاك فولاذية مخشنة مقارنة بالمادة المتراكبة المقواة بأسلاك فولاذية ملساء ، وحدوث زيادة للطاقة الممتصة اللازمة لكسر المادة بمقدار ( 60 % ) مقارنة بالمادة المتراكبة المقواة بأسلاك فولاذية منتظمة ملساء عند استخدام اختبار الصدمة بطريقة شاربي ( Charpy ).

# EFFECT OF INTERFACIAL SHEAR STRESS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ( srp ) COMPOSITE MATERIAL

**ABSTRACT**
The interface is crucial in controlling composite properties because load is transferred from the matrix to the fiber through this interface. In this paper a study of interface of a composite material which consists of polymer matrix ( Epoxy ) reinforced with high carbon steel wires, ( SRP ). This reinforcement offers high strength and stiffness characteristic at a reasonable cost. Also, the effect of roughness of steel wire on interface and mechanical properties are studied. The bonding force of ( SRP ) composite material with roughened surface increased by about (% 73.3) an increment of flexural capacity by (11.77 %) and the impact energy is increased (60 %) as compared with SRP with polished steel reinforcement wire.

**مقدمة البحث :**
السطح البيني عبارة عن حد ثلاثي الأبعاد بين الليف والمادة الأساس. والترابط للسطح البيني يكون حرجة لتطبيقات المواد المتراكبة ذات الأساس البوليمري المقواة بألياف مستمرة [1]. في هذا البحث سيتم التركيز على السطح البيني لمادة متراكبة ذات أساس بوليمري مقواة بأسلاك فولاذية ( Steel Reinforced Plastic, SRP ) ( والتي هي عبارة عن مادة متراكبة حديثة تتألف من مادة اساس بوليمرية ( الايبوكسي ) مقواة بأسلاك فولاذية.
إن بنية السطح البيني عادةً ما تكون معقدة والعلاقة بين البنية والخواص يجب أن تؤخذ بنظر الاعتبار ، حيث من الواضح جداً أن للبنية تأثير كبير على الخواص الميكانيكية للمواد المتراكبة. فعندما تكون طبقة السطح البيني رقيقة فإنها تؤدي إلى مقاومة كسر منخفضة ، بينما السميكة تعطي مقاومة أفضل للكسر.
عند إضافة مادة مساعدة للترطيب ( Coupling agent ) تتولد منطقة سطح بيني تمتلك تركيب وخواص تختلف عن المادة الأساس والألياف تدعى بالطور البيني ( Interphase ). وبصورة عامة يجب أن يكون السطح البيني للمادة المتراكبة ذات الأساس البوليمري المقواة بألياف مستمرة قوي ليشجع على انتقال الحمل بشكل جيد من مادة الأساس إلى الألياف ، وبالتالي يؤدي إلى خواص ملائمة للمادة المتراكبة. لكن الارتباط الضعيف يجعل من السطح البيني منطقة تركيز للاجهادات مما يؤدي إلى انسحاب الليف أثناء التحميل خلال التطبيق. ونلاحظ أن الترابط القوي للسطح البيني يؤدي إلى منع الألياف من الانسحاب خلال التحميل. وهناك نوع من التعقيد لمتطلبات السطح البيني للمواد المتراكبة ذات الأساس البوليمري أثناء عملية التصنيع والتي تتطلب نظام خاص

ومعين كمعاملة سطح الألياف مثل طلاء سطح الألياف التي تلعب دور كبير في تحسين تركيب السطح البيني [2].
ومن أهم العوامل التي تؤثر على متانة المادة المتراكبة ذات الأساس البوليمري هي الاجهادات المتخلفة ( Residual stress ). وسبب هذه الاجهادات هو اختلاف الخواص الحرارية والميكانيكية للمكونات. ونلاحظ ذلك في المواد المتراكبة المشكلة في درجات حرارية أعلى من درجة حرارة الاستخدام. على سبيل المثال ، أن الاجهادات المتخلفة تزداد خلال عملية التصنيع لراتنج الايبوكسي أو أثناء تصلب مادة الأساس عند تقويتها بألياف مستمرة. وهناك سببان أساسيان لوجود الاجهادات المتخلفة الأول الاجهادات الحرارية الناتجة من اختلاف معاملات التمدد الحراري للمكونات والثاني الاجهادات الناتجة من التقلص خلال عملية التصنيع أو تجمد المادة الأساس.

**دراسات سابقة :**

في عام 2005 قام الباحث ( X-Huang ) وزملاءه [3] بدراسة الخواص الميكانيكية لمادة متراكبة ذات أساس ايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية من النوع عالي الكربون ذات شكل هندسي ملتوي ( Cord ) أي ملتفة حول بعضها. وقد توصل الباحثون إلى أن المادة المتراكبة المقواة بأسلاك فولاذية ( SRP ) سهلة التصنيع واقتصادية. كما أوجد الباحثون معادلة رياضية لحساب مقاومة الانحناء عندما تكون نسبة السمك إلى الطول عالية وذلك عند تغير سمك العينات.

أما في عام 2006 فقد قام الباحث ( Yail J. Kim ) واخرون [4] بدراسة مقاومة الثني لمادة متراكبة ذات أساس ايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية من النوع عالي الكربون مطلية بطبقة رقيقة من البراص. وكانت الأسلاك على شكل أسلاك يحيط بها سلكان ملتويان بزاوية كبيرة وبقطر ( 0.89 mm ). وتوصل الباحثان الى أن المادة المتراكبة ( SRP ) تحسن مقاومة الثني بحوالي 53 ( % مقارنة باستخدام الفولاذ على شكل صفائح. كما توصل الباحث أيضاًإلى أن إجهاد القص يتركز عند نهاية الأسلاك.

ومن الجدير الإشارة إليه أن الباحثون بينوا الخصائص التي تتمتع بها المادة المتراكبة المقواة بأسلاك فولاذية ( SRP ) حيث أنها أفضل وأقل كلفة من المواد المتراكبة ذات الأساس البوليمري المقواة بألياف الزجاج ( Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP ) وكذلك أيضاً أفضل في الخواص وأقل كلفة من المواد المتراكبة ذات الأساس البوليمري المقواة بألياف الكربون ( Carbon Fiber Reinforced Plastic, CRP ) [4].

**الجزء العملي :**

تم استخدام أسلاك فولاذية لتقوية مادة الأساس البوليمرية ( الايبوكسي ). والأسلاك المستخدمة هي من نوع الفولاذ العالي الكربون التي تمتاز بمقاومتها ومتانتها العاليتين حيث تم استخدامها بشكل أسلاك مستمرة وبقطر ثابت ( 0.96 mm ). الجدول 1 ( و ( 2 ) يبينان الخواص الميكانيكية والتركيب الكيمياوي للأسلاك الفولاذية المستخدمة على التوالي حسب مواصفات الشركة العامة لصناعة إطارات بابل / النجف. وقد تم تغيير خشونة الأسلاك الفولاذية ذات السطح الأملس بطريقة ميكانيكية وتم فحص الخشونة لها قبل وبعد إجراء عملية التخشين. ووجد أن الخشونة قبل إجراء عملية التخشين ( 0.005 µm ) أما بعد إجراء عملية التخشين أصبحت الخشونة تتراوح ما بين ( 0.03-0.02 µm ) عند إجراء فحص الخشونة في جهاز قياس الخشونة المبين في الشكل ( 1 ).أما الشكل ( 2 ) يبين صورة مجهرية للسلك الفولاذي المستخدم قبل وبعد إجراء عملية التخشين.

كما تم استخدام الايبوكسي ( Epoxy ) كمادة أساس ، وهو مادة بوليمرية من نوع البوليمرات المتصلدة بالحرارة. والراتنج المستخدم نوع ( Nitofill EPLV BN 1245 ) ذو لزوجة ( 1 Poise ) بدرجة حرارة ( 35 ºC ) ووزن نوعي ( 0.4 ) على هيئة سائل لزج شفاف يتحول إلى الحالة الصلبة بعد إضافة المصلد إليه بنسبة ( 3:1 ) أي لكل ( 3 gr. ) من الراتنج يضاف إليه ( 1 gr. ) من المصلد.

إن القوالب المستخدمة كانت على نوعين ، النوع الأول من الفولاذ لغرض تحضير عينات اختبار سحب الليف ( Pull-out Test ). يتكون القالب من قطعتين ، كل قطعة تحتوي على تجويف نصف دائري وعند تثبيت القطعتين مع بعض بواسطة المثبتات من الجوانب

يتكون من الداخل تجويف على شكل اسطوانة بطول ( 150 mm ) وقطر ( 10 mm ). وهذا القالب مخصص لإنتاج عينة واحدة فقط. أما النوع الثاني من القوالب فكانت من الخشب ذي الانهاء السطحي العالي وإن القالب مخصص لإنتاج عينات اختبار الصدمة واختبار مقاومة الثني علماً أن القالب متحرك ويمكن إنتاج العينات كلاً حسب أبعاده القياسية.

إن القوالب الخشبية مختلفة الأبعاد حسب أبعاد العينة المراد تصنيعها. أما الطريقة المستخدمة في تحضير العينات فكانت طريقة الرصف اليدوية ( Hand-lay-out ) وهي طريقة بسيطة الاستخدام ويمكن الحصول من خلالها على عينات كبيرة الحجم ومعقدة الشكل. ويتم الحصول على العينات على شكل ألواح تترك لمدة سبعة أيام لاتمام عملية النضج ، بعدها تتم عملية تقطيع هذه الألواح حسب المواصفة القياسية للاختبارات المستخدمة. علماً أن الكسر الحجمي لجميع العينات ( % 10 ).

**الخواص الميكانيكية :**

لدراسة السطح البيني وتأثيره على الخواص الميكانيكية للمادة المتراكبة المقواة بأسلاك فولاذية ( SRP ) ، تم استخدام اختبار سحب الليف ( Pull-out Test ) وتم إجراء الاختبار باستخدام اختبار الشد القياسي المحوري بمعدل ازاحة ثابت مقداره 1 ( mm/min. ) لعينات الايبوكسي المقواة بأسلاك فولاذية ملساء وأخرى مخشنة.

كما تم إجراء اختبار الانحناء ذي الثلاث نقاط بحيث كانت أبعاد العينات حسب المواصفة القياسية ( ASTM D790-71178 ). كذلك تم إجراء اختبار الصدمة بطريقه شاربي ( Charpy ) علماً أن أبعاد العينة المستخدمة في الاختبار حسب المواصفة (

( ASTM D256-87 واستخدمت المواصفة ( ASTM D790-86 ) لاختبار مقاومة الثني( Flexural Strength ) . ومن الجدير بالإشارة إليه أن مواصفات جهاز فحص الخشونة هي
قوة التكبير الأفقي : ( 100x-4 ) ثابت ، قوة التكبير العمودي : ( 100000x-500 ) متغير.

**المناقشة :**

**اختبار سحب الليف ( Fiber Pull-out Test ) :**

يبين الشكل ( 3 ) منحني الحمل / الانزلاق ( Load / Slip Curve ) لاختبار سحب الليف لمادة متراكبة ذات أساس من الايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية منتظمة وملساء وأخرى مخشنة. حيث نلاحظ أن القوة تزداد خطياً والألياف تجهد حتى يحدث الانفصال ( Debonding ) عندما تتساوى القوة المسلطة مع قوة الانفصال والتي تمثل أعلى قمة في المنحني. وبعدها يحدث انفصال غيرمتصل ويحدث بسرعه وباستمرار. وتزداد المطاوعة للعينة والقوة المسلطة تسقط إلى أقل قيمة والانزلاق يستمر إلى أن يصل ( 8 mm ) وهذا يتفق مع البحاث ( Piggot ) وزميله [5] بشأن سلوك أسلاك الفولاذ المغمورة بمادة الأساس الايبوكسي عند دراسة فشل الترابط للسطح البيني. لقد بين الباحثان أن هذا السلوك يعود إلى حدوث فشل الترابط لسطح مادة الأساس أولاً ومن ثم يتقدم على طول الليف حتى يكون كافي ليجعل السطح سائب.
ويلاحظ من الشكل ( 3 ) إن الاختلاف واضح في مقدار القوة اللازمة لحدوث الانفصال ، فالعينة المقواة بأسلاك فولاذية من النوع الأملس المنتظم تمتلك أقل قوة لازمة لحدوث الانفصال والتي تبلغ ( 150 N ) ، بينما القوة اللازمة لحدوث الانفصال قد ازدادت للعينة المقواة بأسلاك فولاذية من النوع المخشن حيث بلغت ( 260 N ). وبذلك تعطي أعلى قمة مقارنة بمنحنى النوع الأملس أي أن مقاومة الانفصال تزداد مع زيادة التداخل بين السلك ومادة الأساس الايبوكسي مما يؤدي إلى زيادة متانة الربط. ويعود سبب هذا إلى خلق معوقات كبيرة تمنع حدوث الانفصال وتكوين سطح بيني قوي يمنع من انتقال الفشل إلى سطح السلك. وهذا الترابط القوي يحتاج إلى قوة أكبر لفشل السطح البيني لذلك تكون القوة المسلطة غير كافية لحدوث الفشل لذا يحتاج إلى قوة أكبر لفك الترابط.
كما ويلاحظ في منحنى الحمل / الانزلاق للعينة المقواة بأسلاك فولاذية مخشنة أنه عند تساوي الحمل المسلط مع القوة اللازمة لحدوث الانفصال والتي تبلغ قيمتها ( 260 N ). بعدها يبدأ المنحني بالنقصان ويظهر السلوك المتعرج والذي يمثل الانزلاق الالتحامي ( أي يكون الانفصال غير مستمر ) وذلك بسبب التداخل بين مادة الايبوكسي والنتوءات الموجودة على سطح الأسلاك الفولاذية نتيجة إجراء عملية التخشين ، حيث أن وجود النتوءات تمنع السلوك المستقيم للمنحني أي الانفصال المباشر وجعل السلك سائب. ونلاحظ انخفاض الحمل على المادة المتراكبة المقواة بأسلاك مخشنة بعد حدوث الانفصال عن عينة المادة المتراكبة المقواة بأسلاك ملساء وهذا يعود الى ازدياد المقاومة للأسلاك المخشنة نتيجة ازدياد التشابك بيم مادة الأساس والأسلاك المخشنة وهذا مفيد جداً في التطبيقات لنه يحتاج الى قوة أكبر لفك التشابك وجعل السلك سائب بشكل حر.

**اختبار الانحناء ( The Bending Test ) :**

يبين الشكل ( 4 ) مخطط القوة / الانحراف للمادة المتراكبة ذات أساس ايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية ملساء منتظمة ، وأسلاك مخشنة على التوالي. حيث نلاحظ أن المنحنيين يسلكان سلوك متشابه وعلى وتيرة واحدة منذ بدء التحميل ومقدار الانحراف الحاصل إلى حين حدوث الفشل. ويفسر هذا السلوك المتشابه أن جميع العينات تمر بنفس المراحل انحناء ، حدوث شق ، خضوع وحدوث أعلى انفعال للمادة ، وبعد الخضوع تقل التقوية ويحدث انفصال وتهشم للمنطقة المحيطة حول الأسلاك [4].
ونلاحظ ازدياد مقومة الانحناء اللازمة للفشل عند إجراء المقارنة للعينة المستخدمة في الاختبار المقواة بأسلاك فولاذية مخشنة مع العينة المقواة بأسلاك منتظمة وملساء. ويعود سبب ذلك إلى تحسين التقوية نتيجة لزيادة التداخل الميكانيكي عن طريق إجراء التخشين ، وبذلك يتم السيطرة على حدوث الفشل. وهذا يتفق مع رأي الباحث ( Yail J. ) وزملاءه [4] الذين بينوا أن السيطرة على حدوث الفشل للانحناء بعد حصول الخضوع تعود إلى تحسين التقوية حيث تتجنب حدوث الفشل وتمنع حدوث الانفصال المفاجيء [6,4].
الجدول ( 3 ) يبين قيم معامل الانحناء ( معامل يونك ( E ) ) للمادة المتراكبة ذات أساس ايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية منتظمة ملساء ومخشنة على التوالي. حيث نلاحظ أن معامل المرونة للمادة المتراكبة المقواة باسلاك فولاذية أعلى من ذلك الذي لمادة الايبوكسي غير المقواة. فعند تسليط الإجهاد على المادة المتراكبة سوف يتوزع الإجهاد على كل من المادة الأساس والألياف [7].
كما نلاحظ أن معامل المرونة للمادة المتراكبة المقواة بأسلاك مخشنة اقل من المادة المتراكبة المقواة بأسلاك ملساء وهذا يدل على تغيير سلوك المادة المتراكبة وازدياد المطلية للمادة نتيجة ازدياد قوة الترابط.

**اختبار الصدمة ( Impact Test ) :**

من ملاحظة الجدول ( 4 ) كانت الطاقة اللازمة للكسر ( التي تم الحصول عليها من الجهاز مباشرة ) لعينات الايبوكسي المقوى بأسلاك فولاذية منتظمة وملساء قليلة ، ثم يزداد مقدار الطاقة الممتصة عند التقوية بأسلاك فولاذية مخشنة. إن الطاقة الممتصة تزداد عند التقوية بالأسلاك الفولاذية المخشنة ويعود السبب في ذلك للاحتياج إلى طاقة أكبر تنصرف لفك التشابك أو التداخل للسطح البيني بين مادة الأساس الايبوكسي والأسلاك الفولاذية المخشنة لأن التخشين يزيد من مواقع الارتباط وكذلك يزيد من التداخل والتشابك [3]. وقد أوضح الباحثان ( W. A. Demorais ) وزميله ( M. D. Almeida ) [8] أن أضرار داخلية تتولد في المادة المتراكبة ذات الأساس البوليمري المقواة بالألياف المستمرة قبل الفشل. تتلخص الأضرار بتكسر وتهشم للمادة الأساس ، فشل في الألياف ويشمل ذلك اما تمزق الأسلاك أو أنها تعاني انسلاخاً من مادة الأساس ، وتمزق للسطح البيني لليف / المادة الأساس.

إن المادة المتراكبة المستخدمة في البحث المقواة بأسلاك فولاذية منتظمة ملساء وأخرى مخشنة على التوالي قد عانت نفس الأضرار وذلك بحدوث تكسر للمادة الأساس وتمزق للسطح البيني وفشل الألياف ، حيث نلاحظ أن الأسلاك عانت انسلاخاً من مادة الأساس الايبوكسي.

ومن ملاحظة الجدول ( 4) نجد أن قيم متانة المادة ( $G_c$ ) والتي تعرّف على أنها قابلية المادة على مقاومة نمو الشقوق أو قابلية المادة لامتصاص أكبر كمية من الطاقة قبل حدوث الكسر [10] والتي تم حسابها من المعادلة الآتية :

$$G_C = \frac{U_c}{A} \qquad (1)$$

حيث أن : ( $G_c$ ) متانة الصدمة للنموذج ( $J/mm^2$ ) و ( $U_c$ ) مقدار الطاقة الممتصة و ( A ) مساحة التحميل ( $mm^2$ ).

تزداد بالنسبة للمادة المتراكبة المقواة أسلاك فولاذية ذات التواء من النهايات مقارنة بتلك المقواة بأسلاك منتظمة ملساء. أما بالنسبة للمادة المتراكبة المقواة بأسلاك فولاذية متعرجة فإنها تعطي أعلى قيم لمتانة المادة ويعزى ذلك إلى طاقة التماسك لليف / المادة الأساس.

كذلك نلاحظ من الجدول ( 4 ) أن الطاقة المطلوبة للكسر وقيم متانة المادة لعينات المادة المتراكبة ذات الأساس من الايبوكسي المقواة بأسلاك فولاذية على اختلاف أشكالها أعلى من تلك التي لعينات الايبوكسي غير المقواة. إن سبب ازدياد الطاقة اللازمة للكسر يعزى إلى أن التقوية هي التي تتحمل الجزء الأعظم من إجهاد الصدم ، حيث تعمل الأسلاك كمعوقات للكسر وذلك عن طريق تشتيت الإجهاد المسلط على منطقة التأثير. بالإضافة إلى ذلك فإن الأسلاك تعمل على تقليل تركيز الاجهادات عند منطقة معينة وتمنع نمو الشقوق الصغيرة التي تحدث نتيجة الصدمة. ومما تجدر الإشارة إليه إلى أن المواد البوليمرية ومنها الايبوكسي تمتلك سلاسل ذات تشابك عالي مما يجعلها تمتلك هشاشية عالية والذي بدوره يجعلها تمتلك متانة كسر واطئة [11].

**اختبار مقاومة الثني ( Flexural Strength Test ) :**

يوضح الجدول ( 5 ) مقاومة الثني للمادة المتراكبة ذات أساس ايبوكسي المقواة بأسلاك فولاذية وكذلك لمادة الايبوكسي غير المقواة. حيث نلاحظ زيادة مقاومة الانثناء للعينة المقواة بأسلاك فولاذية مخشنة عند مقارنتها بمقاومة الانثناء للعينة المقواة بأسلاك فولاذية ملساء منتظمة. ويرجع سبب ذلك إلى خشونة سطح الأسلاك لأن الخشونة تزيد من الربط عند مواقع الارتباط لنتوءات السطوح المتماسة [3] وبذلك يتحسن الربط الميكانيكي لأن الربط الميكانيكي يعتمد على خشونة السطح [9]. وكذلك نلاحظ أن الاجهادات التي تتحملها عينات المادة المتراكبة ذات الأساس ايبوكسي المقواة بأسلاك فولاذية أعلى من تلك التي تتحملها عينات الايبوكسي غير المقواة ، وذلك لأن مواد التقوية هي التي تتحمل معظم الاجهادات وتعمل على توزيعها في المادة الأساس وبالتالي تحول دون تمركز الاجهادات في منطقة معينة والتي تؤدي إلى حدوث الفشل للنموذج.

**الاستنتاجات :**

**[1]** إن تخشين السلك الفولاذي يزيد من قوة الربط للسلك الفولاذي مع الايبوكسي بمقدار ( 73.3 % ) مقارنة بقوة الربط للسلك الفولاذي الأملس المنتظم الشكل الهندسي مع الايبوكسي.

**[2]** عند تصميم مادة متراكبة ذات أساس ايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية وتوفير كل مواصفات التصميم والتصنيع والظروف المثالية لها ولم تعطي أداء عالي ، نستطيع أن نحسن أداء هذه المادة وذلك بتحسين الربط الميكانيكي عن طريق استخدام الأسلاك الفولاذية المخشنة.

**[3]** إن الطاقة الممتصة للمادة المتراكبة ( SRP ) تزداد عند إجراء التخشين للأسلاك وتعطي أفضل النتائج عند استخدام الأسلاك المخشنة حيث تزداد بمقدار ( 71.43 % ) مقارنة باستخدام الأسلاك المنتظمة والملساء في تقوية هذه المادة.

**[4]** ان مقاومة الثني للمادة المتراكبة ( SRP ) تزداد عند إجراء التخشين للأسلاك وتعطي أفضل النتائج عند استخدام الأسلاك المخشنة حيث تزداد بمقدار ( 11.77 % ) مقارنة باستخدام الأسلاك المنتظمة والملساء في تقوية هذه المادة.

***المصادر :***


**[1]** "*High Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites*", 2005, The National Academy of Science, www.nap.edu/openbook/03090961/html/20.html.

**[2]** T. W. Clyne and F. R. John, "*Composites: Interfaces, Encyclopedia, of Materials Science and Technology*", S 3.7-Composites: MMC, CMC, PMC, Amortensen ( ed ), Elsevier, 2001. The National Academy of Science.

**[3]** X. Huang, V. Birman, A. Nanni and G. Tunis, "*Properties and Potential for Application of Steel Reinforced Grout Composites*", Journal of Composite Materials, Part B 36 (2005) 73-82.

**[4]** Yail J. Kim, Amir Fam, Andrew Kong and Mark F. Green, Hardwire LLC, 2006, "*Flexural Strengthening of RC Beam Using Steel Reinforced Polymer SRP Composites*", www.hardwirellc.com, Pocomoke City, Maryland.

**[5]** M. R. Piggott and S. R. Dai, "*Interfaces in Polymer, Ceramic and Metal Matrix Composites, Brittle Failure at the Fiber-Matrix Interface*", Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1988.

**[6]** Paolo Casadei, Antonio Nanni, Tarek Alkhrdaji and Jay Thomas, "*Performance of Double-T Prestressed Concrete Beams Strengthened With Steel Reinforced Polymer*", Advances in Structural Engineering, Volume 8, No. 4, 2005.

**[7]** ف. بيلي ، "*مبادىء هندسة المعادن والمواد*" ، ترجمة: د. باقر حسين رحمة الله ، الجامعة التكنولوجية ، بغداد ، 1985.

**[8]** W. A. de Morais, J. R. Almeida and L. B. Goldenrod, "*Effect of the Fiber Reinforcement on the Low Energy Impact Behavior of Fabric Reinforced Resin Matrix Composite Materials*", J. of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. and Eng., October-December 2003, Vol. XXV, No. 4/325.

**[9]** G. Piatti, " *Advances in Composite Materials*", Applied Science Publishers Ltd., 1987.

**[10]** M. O. W. Richardson, "*Polymer Engineering Composites*", Applied Science Publishers Ltd., London, 1977.

**[11]** Donald R. Askeland, "The Science and Engineering of Materials", 4th Edition, Thomson learning™, 2003.

الجدول ( 1 ) الخواص الميكانيكية للأسلاك الفولاذية المعتمدة في الدراسة الحالية.

| Breaking force ( N ) | Elongation at breaking ( % ) | Weight per unit length ( gr/m ) |
|---|---|---|
| 1320 | 5 | 5.4 |

الجدول ( 2 ) التركيب الكيمياوي للأسلاك الفولاذية المعتمدة في الدراسة الحالية.

| C% | Mn% | Si% | S% | ( S+P )% | P% | Ni% | Cr% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.72 | 0.6 | 0.2 | 0.05 | 0.08 Combined | 0.05 | 0.1 | 0.05 |

جدول ( 3 ) يبين معامل الانحناء ( المرونة ) ( $E_b$ ) الناتجة من اختبار الانحناء لنماذج من المادة المتراكبة ذات أساس ايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية ملساء ومخشنة.

| *النموذج* | *معامل الانحناء ( $E_b$ ) (GPa )* |
|---|---|
| مادة الايبوكسي غير المقواة. | 0.124 |
| مادة متراكبة ذات أساس من الايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية منتظمة وملساء. | 0.874 |
| مادة متراكبة ذات أساس من الايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية مخشنة. | 0.467 |

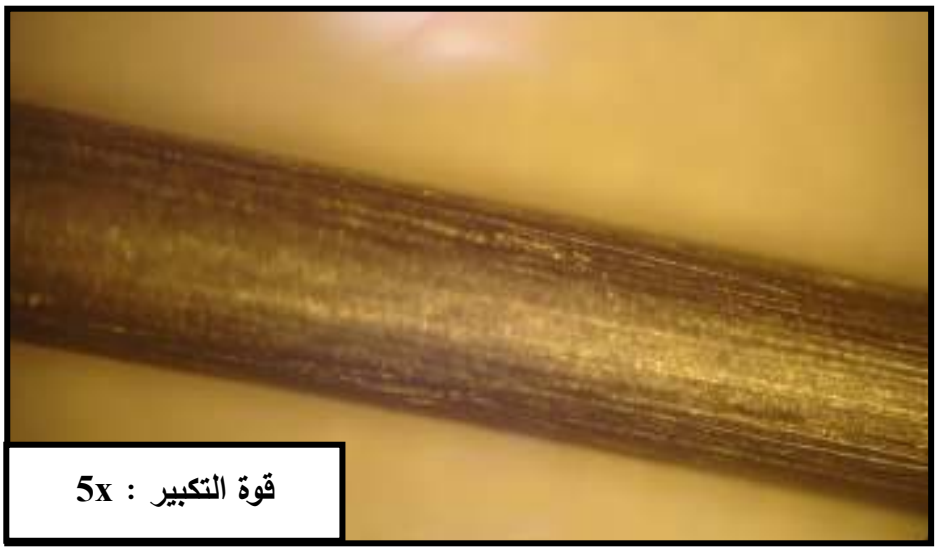
جدول ( 4 ) يبين متانة المادة ( $G_c$ ) الناتجة من اختبار الصدمة لنماذج من المادة المتراكبة ذات أساس ايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية متغيرة الشكل الهندسي.

| *النموذج* | *متانة المادة ( $G_c$ ) ( $KJ/m^2$ )* | *طاقة الكسر ( $U_c$ ) ( $KJ$ )* |
|---|---|---|
| مادة الايبوكسي غير المقواة. | 25 | 2.5 |
| مادة متراكبة ذات أساس من الايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية منتظمة وملساء. | 175 | 17.5 |
| مادة متراكبة ذات أساس من الايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية مخشنة. | 280 | 28 |

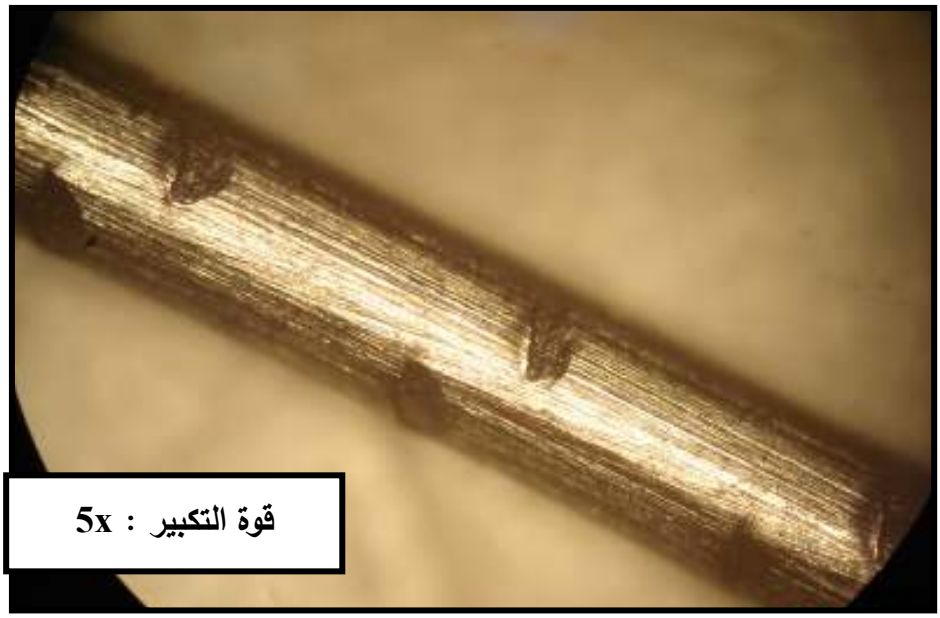
جدول (5) يبين مقاومة الثني الناتجة من اختبار متانة الثني لنماذج من المادة المتراكبة ذات أساس ايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية متغيرة الشكل الهندسي.

| *النموذج* | *مقاومه الثني ( $Pa$ )* | *أقصى اجهاد قص على الدعامة ( $Pa$ )* |
|---|---|---|
| مادة الايبوكسي غير المقواة. | 246.14 | 3.846 |
| مادة متراكبة ذات أساس من الايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية منتظمة وملساء. | 2092.3 | 32.692 |
| مادة متراكبة ذات أساس من الايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية مخشنة. | 2338.46 | 36.538 |

الشكل ( 1 ) يبين جهاز فحص الخشونة
( اسم الجهاز : Taly SURF4 ، الشركة المصنعة : Taylor Hobson ).

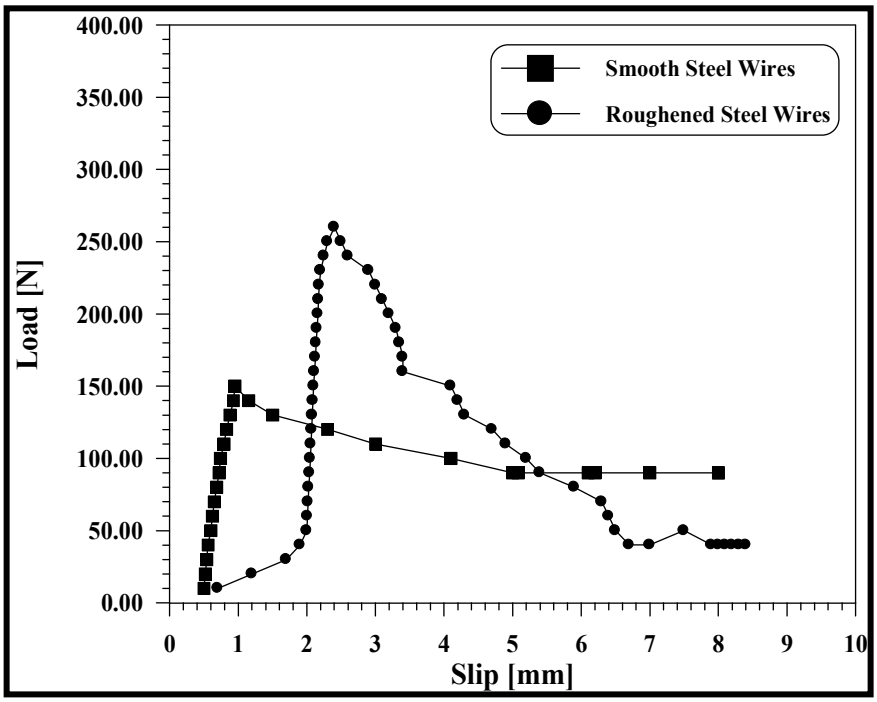



(a)

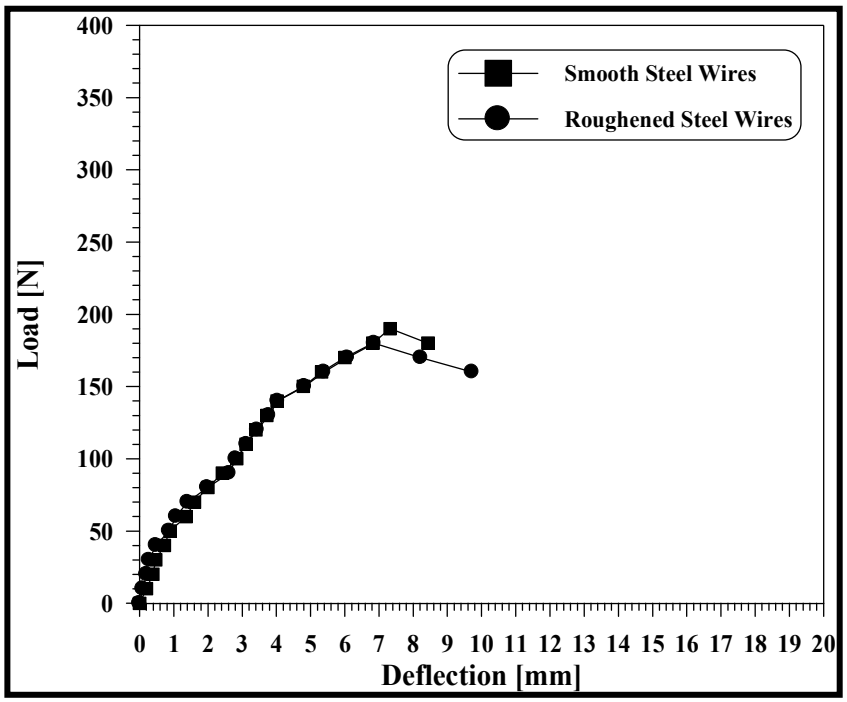



(b)

الشكل ( 2 ) يبين صور مجهرية لمقطع من السلك الفولاذي المستخدم في بحثنا الحالي
a – قبل اجراء عملية التخشين b – بعد اجراء عملية التخشين.




*شكل ( 3 ) يبين منحني ( الحمل / الانزلاق ) لاختبار سحب الليف لمادة متراكبة ذات أساس ايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذية ملساءمنتظمةومخشنه.*




*شكل ( 4 ) يبين منحني ( الحمل / الانحراف ) لاختبار الانحناء ذي الثلاث نقاط لمادة متراكبة ذات أساس ايبوكسي مقواة بأسلاك فولاذيةمنتظمة ملساءومخشنه.*