

# 6

## المواد المتراكبة

### Composite Materials

#### 1.6. مقدمة .

تتكون المادة المتراكبة من جمع مادتين مختلفتي الخواص الميكانيكية والفيزيائية والغرض من هذا الجمع هو إستنباط خواص جديدة لم تكن متوفرة في المواد الأصلية، وقد عُرِفَتْ تقنية تصنيع المواد المتراكبة بأبسط صورها في خلط نشارة الخشب بمادة الطين لتقويته والتي إستخدمها البابليون في بناء بيوتهم. يعتمد الإستخدام العام للمادة المتراكبة بشكل كبير على الخواص الميكانيكية والفيزيائية لهذه المواد لذلك فإن دراسة هذه الخواص تحت تأثير القوى والأحمال في ظروف مختلفة يكتسب أهمية كبيرة لمعرفة مدى ملائمة هذه الخواص لمكان عمل هذه المواد . يوجد في الطبيعة الكثير من الأمثلة على المواد المتراكبة ومنها ألياف السليلوز مع مادة الخشب . أما في الصناعة فإن تقوية الراتنجات بالألياف الصناعية هي الأكثر إنتشاراً. و لتصنيع مادة مركبة يجب توفر مادتين هما المادة الأساس ومادة التقوية.

## 2.6. مادة الأساس (Matrix Material) .

تكون مواد الأساس أما مواد معدنية (Metallic Materials) متكونة من المعادن وسبائكها وتتميز بثقل وزنها ومتانتها العالية، أو قد تكون مواد سيراميكية (Ceramic Materials) والتي تمتاز بخفة وزنها ومقاومتها المرتفعة لدرجات الحرارة العالية ولكنها ضعيفة المقاومة لقوى الصدم. كذلك تكون المادة الأساس مواد بوليميرية (Polymeric Materials) وهي الأكثر إستعمالاً وإنتشاراً لما تتميز به من خواص ميكانيكية وحرارية جيدة. ومن الأمثلة على المواد البوليميرية هو راتنج البولي أستر .

## 3.6. مادة التقوية (Reinforcing Material) .

يجب توفر ميزتين أساسيتين في هكذا مواد وهي المقاومة العالية والمطيلية المنخفضة حتى تستطيع تقوية المواد الأساس . هناك عدة طرق للتقوية منها التقوية بالدقائق (Reinforcing by Particulate) والتي تكون بقطر أكبر من (  $1\ \mu\text{m}$  ) وبأشكال مختلفة منها الإبرية والكروية والقشيرية ، كذلك تتم التقوية بالتشتت (Reinforcing by Dispersed) ويكون قطر الدقائق أقل من (  $0.1\ \mu\text{m}$  ) . أما أكثر أساليب التقوية شيوعاً فهي التقوية بالألياف (Reinforcing by Fibers) نظراً لما تتميز به من قوة كبيرة مقارنة بالمواد الراتنجية ، وتكون الألياف بأنواع وأشكال مختلفة فمنها ما يكون بشكل مستمر أو مقطّع أو بشكل ظفائر محاكة .

#### 4.6. أنواع المواد المتراكبة .

هنالك أربعة أنواع من المواد المتراكبة المتقدمة والمدرجة أدناه:

1. المواد المتراكبة ذات أساس بوليميري (Polymer-Matrix Composites) : تستخدم عادة ألياف ذات مقاومة عالية ومعامل مرونة عالي مثل ألياف الكربون ، كيفلار ، أو البورون ، إضافة إلى إمكانية إستخدامها إلى درجة (315 °C).
2. المواد المتراكبة ذات أساس معدني (Metal-Matrix Composites) : يمكن إستخدامها في درجات حرارة عالية (1250 °C) حيث الظروف المطلوبة هي المقاومة العالية مقرونة مع المطيلية والمتانة .
3. المواد المتراكبة كربون- كربون (Carbon-Carbon Composites) : وهي تتضمن ألياف كاربونية مطمورة في أرضية من الكربون . تتحمل هذه المواد درجات حرارية عالية تصل إلى (3300 °C) مع مقاومة أعلى بعشرين مرة من الكرافيت التقليدي وأقل كثافة بنسبة (30%) .
4. المواد المتراكبة ذات أساس سيراميكي (Ceramic Composites) : تتصف هذه المواد بالوزن الخفيف ومقاومة درجات الحرارة العالية وإستقرارية في الأبعاد وعدم تأثرها بالظروف البيئية .

## 5.6. الكسر الحجمي .

وهو من المواضيع المهمة الواجب دراستها في موضوع المواد المتراكبة، اذ يعرف بأنه الكمية النسبية لمختلف المكونات في المواد المتراكبة، وعادة يعبر عنه كنسبة حجم التدعيم الى الحجم الكلي للمواد المتراكبة. والتعبير عن مكونات المواد المتراكبة حجميا يكون مناسباً بسبب سهولة ربطه بمفهوم مشاركة الحمل ضمن المادة المتراكبة، الا انه يكون من الصعب خلال التصنيع قياس حجم المكونات، بينما قياس وزنها اسهل، لذلك يكون استعمال الكسر الوزني (weight fraction) شائعاً ايضاً.

في ظروف نادرة عندما تكون كثافة المواد متقاربة فان قياس الكسر الحجمي والكسر الوزني سيعطي قيم مختلف، لكن يمكن الربط بينهما بالعلاقات الآتية:

$$W_c = W_f + W_m$$

$$\Psi = \frac{W_f}{W_c}$$

$$V_f = \frac{1}{1 + \frac{1-\Psi}{\Psi} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_m}}$$

حيث ان :-

$\Psi$  = الكسر الوزني للالياف في المادة المتراكبة.

$W_c, W_m$  و  $W_f$  = وزن الالياف والمادة الاساس والمادة المتراكبة على التوالي.

$\rho_m, \rho_f$  = كثافة الالياف والمادة الاساس على التوالي.

$V_f$  = الكسر الحجمي.

يقاس التركيز عادة بالكسر الحجمي او الكسر الوزني وبصورة عامة فهو من اهم المعايير التي تؤثر في خواص المتراكبات ومن السهل السيطرة عليه اثناء التصنيع لتغيير خواص المواد المتراكبة، كما ان توزيع التركيز ضمن النظام هو مقياس لتجانس المواد.

## 6.6. نظرية المرونة .

تُعنى هذه النظرية بتفاصيل استجابة المواد المتراكبة للاجهادات المسلطة عليها، حيث تستعمل معامل القص Shear Modulus ومعامل المرونة الحجمي Bulk Modulus ونسبة بواسون Poisson's Ratio بالاضافة الى معامل المرونة Young Modulus.

أ. المواد المدعمة باليااف طويلة، تطبق المعادلات الآتية :

$$V_c = \frac{V_f}{(V_f + V_m)}$$

$$E_{11} = cE_f + (1 - c)E_m$$

$$E_{22} = \frac{E_f \times E_m}{(1 - c)E_f + cE_m}$$

حيث ان :

$$V_c = \text{الكسر الحجمي للالياف.}$$

$$V_f, V_m = \text{النسبة المئوية لحجم الالياف و لحجم المادة الاساس في المادة المتراكبة.}$$

$$E_f, E_m = \text{معامل المرونة للالياف و المادة الاساس على التوالي.}$$

ب. المواد المدعمة بالياف قصيرة :

$$\frac{B-B_m}{B_f-B_m} = \frac{c}{1 + \frac{(B_f-B_m)}{B + \frac{4}{3}G_f}}$$

$$\frac{G-G_m}{G_f-G_m} = \frac{c}{1 + \frac{(G_f-G_m)}{G_m \left[ \frac{G_f(9B_f+8G_f)}{6(B_f+2G_f)} \right]}}$$

$$K = \frac{1}{9} [E_{11} + 4(1 + v_{12})^2 K_{23}]$$

$$G = \frac{1}{15} [E_{11} + (1 - v_{12})^2 B_{23} + 6(G_{12} + G_{23})]$$

$$E = \frac{[E_{11} + 4(1 + v_{12})^2 B_{23}] [E_{11} + (1 - v_{12})^2 B_{23} + 6(G_{12} + G_{23})]}{3[2E_{11} + (8v_{12}^2 + 12v_{12} + 7)B + 2(G_{12} + G_{23})]}$$

$$v = \frac{E_{11} + 2(2v_{12}^2 + 8v_{12} + 3)B_{23} - 4(G_{12} + G_{23})}{2[2E_{11} + (8v_{12}^2 + 12v_{12} + 7)B_{23} + 2(G_{12} + G_{23})]}$$

حيث ان :

$$B = \text{المعامل الحجمي المؤثر}$$

$$B_m = \text{المعامل الحجمي المؤثر للمادة الاساس}$$

$$B_f = \text{المعامل الحجمي المؤثر للالياف}$$

$$G = \text{معامل القص المؤثر}$$

$$G_m = \text{معامل القص المؤثر للمادة الاساس}$$

$$G_f = \text{معامل القص المؤثر للالياف}$$

$$v = \text{نسبة بوازون}$$

## 7.6. العوامل المؤثرة في المواد المتراكبة المقواة بالألياف .

### 1. الكسر الحجمي Volume Fraction

في عدة حالات ميكانيكية، ترتبط خواص معينة من المواد المتراكبة بوساطة قانون الخلط Rule Of Mixture، وهذه العلاقة تعتمد على جمع خواص المكونات المفردة والكسور الحجمية المتوقعة لها، كما في المعادلات الآتية :

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

حيث ان :

$$E_c = \text{معامل المرونة للمادة المتراكبة.}$$

$$E_f, E_m = \text{معامل المرونة لمادة الليف ومادة الأساس على التوالي.}$$

$$V_f, V_m = \text{الكسر الحجمي لليف والمادة الأساس على التوالي.}$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

حيث ان :-

$$\sigma_c = \text{اجهاد المادة المتراكبة.}$$

$$\sigma_f, \sigma_m = \text{اجهاد المادة الأساس والليف على التوالي.}$$

وبما ان انتقال الحمل وتوزيعه يعتمد على مرونة ومقاومة الألياف المدعمة، فإن الكسر الحجمي الكبير يعني كفاءة اعلى للمادة المتراكبة في مقاومتها وبالتالي فعلى هذا الأساس فلأن المادة المتراكبة تسلك سلوكاً شبيهاً بالمادة الأساس عند كسر حجمي قليل، لكن عند الكسر الحجمي العالي فالمادة المتراكبة تسلك سلوكاً مشابهاً لسلوك الألياف.

## 2. طول الليف الفعال Effective Fiber Length

ان توجيه الألياف في المادة الأساس من الممكن ان يكون مع إما الياف طويلة أو الياف مقطعة. على الرغم من ان الألياف الطويلة تكون موجهة اكثر من الألياف المقطعة، لكن ليس بالضرورة ان تكون افضل، حيث ان المتراكبات التي تصنع من الألياف المقطعة (إن امكن



توجيهها) من الممكن ان تمتلك مقاومة اعلى من المتراكبات المصنوعة من الألياف الطويلة، و هذا واضح في استعمال الشعيرات اذ تمتلك مقاومة شد عالية.

### 3. اتجاه الالياف Fibers Orientation

ان توجيه الألياف يحدد المتانة الميكانيكية للمادة المتراكبة وبالاتجاه الذي يكون فيه الليف الذي يعطي اكبر متانة. هناك ثلاثة انواع تحدد توجيه الليف، التدعيم ببعد واحد، والتدعيم ببعدين والتدعيم بثلاث ابعاد. كلما كان توجيه الليف اكثر عشوائية كلما اصبحت الخصائص الميكانيكية في اي اتجاه اقل.

### 4. ترابط السطح البيني Interfacial Bonding

ان عامل متانة الربط بين الليف والمادة الأساس يعد عاملاً أساس في تحديد ميكانيكية المادة المتراكبة اذ ان الربط القوي للألياف يكون ضروريا لكي تعمل هذه المكونات مع بعضها في تحمل الأجهادات.

ان خشونة سطح الليف تعد عاملاً مهماً يساعد على زيادة الترابط بين المكونات ولكن عندما تكون سطوح الألياف خشنة بدرجة كبيرة فان الترابط سوف يضعف ما بين الليف والمادة الأساس ويمكن ان يكون السبب هو صعوبة تغلغل المادة الأساس داخل الليف.

## 8.6. اللدائن المقواة بالألياف الطبيعية .

المعروف أن اللدائن (plastics) أو البوليمرات (polymers) تنقسم إلى نوعين: لدائن التصلد الحراري (thermosets) وهذه تتصلد وتأخذ شكلها النهائي عند تشكيلها لأول مرة ولا يمكن إعادة تشكيلها بالتسخين، ولدائن حرارية (thermoplastics) وهذه يمكن إعادة تشكيلها بإعادة التسخين. وحيث أن الكلام هنا عن إعادة التصنيع فإن لدائن التصلد الحراري لا تصلح في هذا المجال. وبالفعل كانت نقطة البداية لإنتاج مواد مركبة هي استخدام اللدائن الحرارية مثل البولي بروبيلين (polypropylene, PP)، والبولي أولوفين (polyolefin)، والبولي إيثيلين (polyethylene)، والبولي يوريثين (polyurethane)، والبولي أميد (polyamide) والبولي فينيل كلورايد (polyvinylchloride, PVC) مع ألياف من أصل نباتي وقابلة للتحلل حيوياً.

في بداية التطور في مجال اللدائن المقواة بالألياف الطبيعية استخدمت نشارة الخشب أو الألياف الخشبية الناتجة من المنتجات الخشبية المستعملة مثل الأثاث القديم أو صناديق التعبئة الخشبية أو بقايا الأخشاب المستخدم في الإنشاءات، وذلك كحشوة لمادة PP أو PVC [1]. وهذه المواد المركبة تسمى الخشب البلاستيكي، وتكون نسبة الخشب فيها بين ثلاثين وسبعين في المائة. ويمكن أن تستخدم في إطارات الأبواب والنوافذ وهياكل السيارات، وقطع الأثاث، حيث لا تتعرض كل هذه المنتجات إلى إجهادات عالية أثناء الاستخدام، مما يسهل استخدام مواد لدنة معاد تصنيعها، وهذا يعطي حلاً جزئياً لمشكلة النفايات للمواد اللدنة ذات الأصل البترولي. وبسبب وجود التقنية والآلات لمزج وتشكيل وتصنيع هذه المواد فإن المواد المركبة ذات اللدائن الحرارية، كالخشب البلاستيكي، هي مواد سهلة التصنيع. وقد نما سوق هذه المواد المركبة بشدة في

السنوات القليلة الماضية. وكذلك استخدمت ألياف الخشب ونشارة الخشب مع راتنجات من عدة أنواع لإنتاج ألواح من الألياف متوسطة الكثافة (Medium Density Fibres, MDF) كبديل عن الخشب، وهذه يدخل في تركيبها نفايات الخشب بشكل أساسي. وفي الهند يُستخدم ثقل قصب السكر لإنتاج ألواح مماثلة من الألياف.

والألياف الطبيعية من أصل نباتي معروفة من قديم في صناعة الحبال والخيوط وأشعة السفن. ويُحصل عليها من ساق النباتات أو من أوراقها، وهي بالتالي متجددة سنوياً، بل إن الخيزران مثلاً متجدد كل بضعة أشهر، في حين أن خشب الأشجار لا يتجدد إلا كل حوالي عشرين سنة حتى يمكن قطعه والاستفادة منه. وهذا يعني أن الألياف الطبيعية متوفرة باستمرار على مدار العام، وهي بالإضافة لذلك رخيصة الثمن. ويبين الجدول رقم (1) بعض الألياف النباتية مع خواصها مقارنة بالألياف المستخدمة في المواد المركبة المتقدمة (وهي المصنوعة من الألياف عالية الأداء كألياف الكربون والكفلار والبورون .. الخ).

وواضح من الجدول أن الألياف الطبيعية ليست لها مقاومة كمقاومة ألياف الكربون أو ألياف الكفلار لكن بعضها لها جسوة أكبر من جسوة ألياف الزجاج، وبعضها لها مقاومة نوعية (مقاومة مقسومة على الكثافة) أكبر من المقاومة النوعية لألياف الزجاج. أما عند الكلام عن الكلفة فإن كلفة إنتاج ألياف الزجاج تصل إلى ثلاثة أضعاف كلفة إنتاج الألياف الطبيعية، وكلفة إنتاج ألياف الكربون تصل إلى ثلاثين ضعفاً.

وبالمقارنة مع ألياف الزجاج فإن الألياف الطبيعية المجوفة وذات المسامات لها خواص عزل أفضل ضد الصوت والحرارة. وهذا مهم في تطبيقات بعينها كما في السيارات (الصفائح الداخلية للأبواب، والصفائح الداخلية

الجدول رقم (1): متوسط خواص الألياف الطبيعية مقارنة بألياف المواد المركبة المتقدمة

الألياف	الوزن النوعي w kN/m <sup>3</sup>	الانفعال عند الانكسار %	مقاومة الانكسار $\sigma_u$ MPa	المقاومة النوعية $\sigma_u/w$ km	معامل المرونة E GPa	الجسوة النوعية E/w Mm
Cotton القطن	14.7	7.5	442	30.1	8	0.54
Jute الجوت	12.7	1.6	583	45.7	26	2.04
Flax الكتان	14.7	2.9	690	46.9	40	2.72
Hemp القنب		1.6	690			
Sisal السيزال	14.7	2.2	573	38.9	15	1.02
Coir ليف جوز الهند	11.8	30	175	14.9	5	0.42
Bamboo الخيزران	7.8		695	88.6	68	8.66
الخشب المرن Soft wood	14.7		1000	67.9	40	2.72
Pineapple الأناناس		1.6	1020		58	
Ramie قنب سيام	14.7	3.7	669	45.5	95	6.46
لب شجر الصنوبر Spruce pulp	5.9		1350	229.4	45	7.65
ألياف الزجاج E-glass	25.5		3000	117.6	72	2.82
ألياف الكفلار Kevlar 49	14.1		3900	276.1	131	9.27
ألياف الكربون Carbon	17.2		3000	174.8	235	13.69
ألياف بولي بروبيلين Polypropylene, PP	9		650	72.2	18	2

للسقف، والصفائح الفاصلة بين المحرك ومقصورة الركاب، ولوحة أجهزة القياس). علماً بأن صفائح مصنوعة من الألياف الطبيعية ومادة PP أو غيرها من اللدائن الحرارية دخلت الاستخدام في كثير من السيارات. وما زالت الأبحاث جارية لاستخدامها في تطبيقات داخلية أخرى. ومن المنافع البيئية للألياف

الطبيعية أنها ينبعث منها كمية من ثاني أكسيد الكربون عندما تتحلل أقل من تلك الكمية التي يمتصها النبات خلال مرحلة الزراعة، في حين أن إنتاج ألياف الزجاج والكربون والأراميد يؤدي إلى توليد غاز ثاني أكسيد الكربون الذي ينفلت في الجو مع أكاسيد النتروجين والكبريت والغبار، وكلها مضرّة بالصحة. والألياف الطبيعية لا تسبب الحكة ولا تخدش أدوات الإنتاج ولا آلات التصنيع، وزراعة محاصيلها سهلة ولا تستهلك مساحة كبيرة من الأرض.

إن منافع الألياف الطبيعية ليست بيئية فقط وإنما لها خواص فيزيائية وميكانيكية جيدة . ففي البحث الموضح في تم استخدام ألياف القنب في تقوية راتنج الفينوليك phenolic، علماً بأن هذا الراتنج يُستخدم في وسائل المواصلات التي تتطلب مقاومة للحريق، وقد وجد أنه باستخدام طبقتين من ألياف القنب في إنتاج صفائح مركبة ضاعف من مقاومة الانحناء للصفائح (من 11 ميغا باسكال إلى 25 ميغا باسكال)، وزاد معامل المرونة بمقدار 23%، وحسّن من خواص الصدم بشكل ملحوظ، إذ من المعروف أن صفائح الفينوليك هشة (brittle)، فقللت الألياف من هشاشتها وحولتها إلى مادة مطيلية (ductile) إلى حد ما. كذلك فإن الألياف قللت من عدد ومقاس الفراغات (voids) التي تنتج في الفينوليك عند صبه، حيث امتصت الألياف الطبيعية الرطوبة الناتجة أثناء تفاعلات التحول إلى مادة صلبة.

وتُستخدم اللدائن المقواة بالألياف الطبيعية في صناعة الأجزاء غير الإنشائية في السيارات منذ فترة. فالسيارة الموضحة في الشكل (1) استخدمت فيها لدائن مقواة بألياف الجوت وذلك في الصفائح الداخلية للأبواب. والجوت له مواصفات جيدة لأن اللحاء فيه ذو ألياف مماثلة لألياف لحاء الأشجار. واستخدمت فيها أيضاً ألياف الكتان مع PP في بعض القطع السفلية في السيارة، كما في الشكل (1) .



الشكل (1): سيارة تُستخدم فيها لدائن مقواة بألياف طبيعية

والمادة المركبة من ألياف الكتان مع PP مادة قابلة للتدوير وإعادة التصنيع وإعادة الاستخدام. ويمكن استخدام المادة المعاد تدويرها في تصنيع الأجزاء بواسطة القولبة بالحقن (injection molding). أما الكلفة فهي منخفضة. وهذه المادة تحقق متطلبات السلامة. هذا إضافة إلى أن شكلها الجمالي يعطي منظراً يروق للركاب. وهي مادة مقاومة للخدش ولا تتطلب عمليات تشطيب نهائي لأن منظرها جميل وتتوفر بألوان مختلفة، ويتوقع لها أن تنتشر انتشاراً واسعاً في كل القطع الداخلية في السيارات التي تتطلب منظراً أنيقاً.

غير أن الألياف الطبيعية لا يمكن استخدامها بشكلها الطبيعي. فالألياف السيلولوزية يجب فصلها عن الراتنج البكتيني (pectin resin) الذي يربطها بقلب الساق الخشبي للنبات، وكذلك لابد من فصل الألياف عن بعضها لزيادة مساحة السطح من أجل عملية الالتصاق بالمادة الرابطة في المادة المركبة. وهناك عدة طرق لعملية الفصل. وقد يتم إخضاع الألياف لعمليات معالجة لتعزيز عملية الالتصاق باللدائن في المادة المركبة. وهناك عدة طرق للمعالجة. والألياف الطبيعية يمكن تصنيعها بشكل نسيج أو غير ذلك مما هو معروف في ألياف الزجاج بحيث تكون جاهزة للتصنيع.



ويتوقع كثيرون بأن اللدائن المقواة بالألياف الطبيعية لن يقتصر استخدامها على الأجزاء غير الإنشائية في السيارات، بل سوف تصبح مادة إنشائية لأن مقاومتها النوعية المرتفعة تؤهلها لخفض وزن الأجزاء المصنوعة من المواد المركبة بحوالي 40%. وإذا كانت هذه المواد مازالت في بدايتها من حيث الانتشار فإن أمامها مجال كبير للتطور والتحسين والاستخدام في تطبيقات إنشائية مختلفة كثيرة.

وإذ تم ذكر مزايا اللدائن المقواة بالألياف الطبيعية فلا بد من ذكر المساوئ. فمازالت مقاومة الصدم فيها منخفضة، وكذلك مقاومة الحريق. والألياف غير المعالجة يمكن أن يحصل فيها أعطاب بسهولة، ويمكن أن تضعف خلال عمليات المناولة والتصنيع. والمواد المركبة المصنوعة منها يمكن أن تكون خواصها منخفضة إذا لم تلتصق الألياف بالراتنجات بشكل جيد. هذا إضافة إلى أن الألياف لا تتحمل درجات الحرارة المرتفعة مما يعني أن بعض طرق تصنيع المواد المركبة التقليدية لا يمكن استخدامها. والألياف أيضاً يمكن أن تتحلل خلال عمليات التصنيع أو في فترة الاستخدام. وإذا انكسرت الألياف فقد تصدر رائحة غير محببة، لاسيما مع امتصاص الرطوبة حيث قد تنتفخ. كذلك فإن أسعار الألياف وخواصها وجودتها يمكن أن تتغير بشكل كبير حسب ظروف الزراعة وطرقها. لكن كل هذه المشكلات يمكن معالجتها كما يتوقع أهل الاختصاص. وهناك أبحاث كثيرة تدعمها الحكومات الأوروبية ومراكز البحث العلمي في هذا المجال. ويبقى التحدي الأكبر للمواد المركبة الطبيعية هو التغلب على نقطة الضعف الرئيسية ألا وهي تدني القدرة على تحمل الصدم، فهذه المعضلة لم تزل تواجه مثيلاتها من المواد المركبة الصناعية، لاسيما وأن الخواص الميكانيكية للمادة الحاضنة ضعيفة جداً.

ومن الأبحاث المهمة في الموضوع اختيار طرق التصنيع اللطيفة لعملية دمج الألياف مع الراتنجات دون حصول أعطاب في الألياف. إضافة إلى ذلك هناك أبحاث لتحسين جودة الألياف بدءاً من مرحلة الزراعة إلى مرحلة الحصول على الألياف ومعالجتها. والهدف من ذلك هو الوصول إلى خواص ميكانيكية مرتفعة في المواد المركبة المقواة بالألياف الطبيعية، إضافة إلى معرفة خواصها الأخرى كمقاومة الحريق ومتانتها ومقدار امتصاصها للماء، وذلك كي يثق المستخدم النهائي بخواص وسلوك هذه المواد. وهناك أبحاث لتصنيع أجزاء إنشائية يتم تجريبيها على سيارات كالتى في الشكل (2).



الشكل (2): سيارة تستخدم NFRP في إنشائها

وهناك أبحاث عديدة لمحاولة استخدام طرق تصنيع اللدائن المقواة بألياف الزجاج (GFRP) في تصنيع NFRP. وبسبب الاختلافات بين الألياف الطبيعية وألياف الزجاج فإن الباحثين يدرسون أيضاً كيفية تعديل طرق تصنيع المواد المركبة التقليدية لتناسب المواد المركبة ذات الألياف الطبيعية. وفي الجدول (2) مقارنة بين خواص ألياف الزجاج وألياف الكتان بشكل مركب القولية (sheet molding compound, SMC). والنتائج مشجعة لاسيما عند استخدام الألياف الطبيعية الطويلة، لكن مقاومة الصدم مازالت نقطة حساسة في المواد المركبة ذات الألياف الطبيعية. كما تركز الأبحاث على خواص الترابط بين



الألياف الطبيعية الطويلة، لكن مقاومة الصدم مازالت نقطة حساسة في المواد المركبة ذات الألياف الطبيعية. كما تركز الأبحاث على خواص الترابط بين الألياف والمادة الراتنجية أو الرابطة. وقد أدت معالجة الألياف ببعض المواد إلى تحسين الالتصاق بين الألياف والراتنج وتضاعفت مقاومة القص بين الطبقات (interlaminar shear strength) وهذا أدى إلى زيادة في مقاومة المادة المركبة بمقدار 250% وزيادة في معامل المرونة بمقدار 500% في الاتجاه العرضي للألياف (transverse direction)، أما في الاتجاه الطولي (longitudinal) فالزيادة 40% و 60% على التوالي. وهذه النتائج تبين أن لهذه المواد مستقبلاً ممتازاً.

الجدول رقم (2): مقارنة بين خواص ألياف الزجاج وألياف الكتان بشكل مركب القولبة (SMC)

الخواص	ألياف زجاج بنسبة 20% وزناً (15% حجماً)	ألياف كتان بطول 25 مم ونسبة 21% وزناً (22% حجماً)
جسوء الشد (GPa)	8.5	11
مقاومة الشد (MPa)	95	80
جسوء الانحناء (GPa)	10	13
مقاومة الانحناء (MPa)	125	144
مقاومة الصدم ( $\text{kJ/m}^2$ )	50	22

ويثق كثير من الباحثين أن اللدائن المقواة بالألياف الطبيعية ستستخدم في الأجزاء الإنشائية، لاسيما تلك المقواة بالألياف الطويلة، وذلك بسبب انخفاض وزنها وارتفاع مقاومتها وجسوءتها النوعيتين. وفي الوقت الحاضر فإن خواصها الحالية مناسبة للأجزاء شبه الإنشائية حيث لا تكون مقاومة الصدم مهمة. لكن متانة الانكسار (fracture toughness) مازالت نقطة ضعف في هذه المواد، ولهذا تنصب بعض الأبحاث على معالجة الألياف بحيث يتم تحسين خواصها وخواص التصاقها مع المادة الرابطة .

## 9.6. المواد المتراكبة الحيوية (Biocomposites) .

برزت المواد المتراكبة الحيوية من الحاجة لمواد قابلة للتحويل بعد انتهاء عمرها الافتراضي لتكون صديقة للبيئة. وتتألف هذه المواد من ألياف طبيعية (natural fibres) مغمورة في مواد مبلّمة حيوية (biopolymers). وكان طبيعياً أن يتم اختيار ألياف التقوية من مواد ذات أصل نباتي، أي متجدد (renewable). وهذه الألياف السيلولوزية تتوفر في معظم بلدان العالم وهي رخيصة الكلفة نسبياً، إضافة إلى خواص أخرى مهمة تمت الإشارة إليها آنفاً، مثل كونها لا تخدش أدوات الإنتاج، وكونها قابلة للاحتراق بعد انتهاء عمرها المصممة له، وخفيفة الوزن وعازلة للحرارة والصوت. وتأتي خفة الوزن وخاصة العزل من كونها ألياف مسامية أسطوانية مجوفة أو مفرغة. صحيح أن هذه المواد ليست ذات خواص عالية كالمواد المتراكبة المتقدمة، لكن كثيراً من التطبيقات التي تستخدم فيها المواد المركبة لا تتطلب خواصاً ميكانيكية عالية. واختيار الألياف المناسبة يعتمد على قيم المقاومة والجسوء المطلوبة من المادة المتراكبة. وهناك طبعاً معايير أخرى تلعب دوراً في اختيار نوع الألياف مثل مقدار الانفعال (strain) عند الانكسار، والتوازن الحراري، وشدة التصاق الألياف بالمادة الرابطة، وسلوك المادة المتراكبة على المدى الطويل، وطرق التصنيع المناسبة وكلفة الإنتاج. لكن تجدر الإشارة إلى أن الألياف الطبيعية يمكن أن تكون حيوانية المصدر، كالشعر والحريير والصوف والريش، وهذه كلها تتألف من بروتينات.

وفي المواد المتراكبة الحيوية يجب أن تكون المادة الرابطة حيوية أيضاً لتحقيق متطلبات البيئة بشكل كامل. وكما هو الحال في تصنيف البوليمرات ذات الأصل البتروكيميائي فإن البوليمرات الحيوية يمكن تقسيمها إلى لدائن حرارية،

ولدائن تصلد حراري. الأولى يمكن إعادة تشكيلها بإعادة التسخين، والثانية تتصلد ولا يمكن إعادة تشكيلها بإعادة التسخين. واللدائن الحرارية الحيوية تم تطويرها أساساً لصناعة التغليف، وهي لا تملك المواصفات المناسبة لاستعمالها كمادة رابطة في المواد المركبة الحيوية. أما لدائن التصلد الحراري فهي المناسبة، لكن لا يتم تصنيعها كاملاً وإنما تكون مبلّرة جزئياً، وذلك لتصلد بعد وضعها في المادة المركبة حيث يتم التصليد بالطرق المعروفة في صناعة المواد المركبة.

تُصنع لدائن التصلد الحراري الحيوية من الزيوت النباتية والدهون الحيوانية، وتتم معالجتها بطرق مختلفة وإضافة مواد بتروكيميائية لتحسين خواصها. والهدف في هذا كله هو الحصول على خواص معقولة مع المحافظة على أن يكون المحتوى الحيوي أكبر ما يمكن. لكن الأبحاث تسعى إلى الوصول إلى مركبات حيوية مائة بالمائة. ويتم دراسة مزج أنواع مختلفة من المواد

للوصول إلى الهدف المنشود. وهناك مواد عضوية ومواد غير عضوية تتم دراستها كمواد إضافية لتحسين مختلف الخواص. ونتائج الأبحاث مشجعة في الوصول إلى المطلوب . وإضافة إلى ذلك يتم أيضاً تجريب مختلف الطرق المعروفة في إنتاج المواد المتراكبة التقليدية وتعديلها حسب الحاجة لتناسب المواد المركبة الحيوية .

لقد تم إجراء تعديل كيميائي لبعض أنواع من الزيوت للحصول على مواد راتنجية من أجل الوصول إلى مواد متراكبة خضراء. من ذلك مثلاً راتنجات أساسها زيت فول الصويا، أو زيت العصفور أو زيت الزيتون وغيرها من الزيوت التي يتم هندستها جينياً. ورغم أن معظم هذه الراتنجات ليست قابلة للتحلل إلا أنها يمكن تعديلها كيميائياً لجعلها قابلة للتحلل. وقد تم بالفعل إنتاج سلسلة من الـ maleinized hydroxylated triglycerides من الزيوت المذكورة .

ويتم حالياً بذل جهود كبيرة لتطوير مواد مركبة قابلة للتحلل حيويًا وبشكل كامل وذلك باستخدام ألياف طبيعية مع راتنجات قابلة للتحلل حيويًا. وهذه الجهود مازالت في بداياتها ولذا فإن تقنياتها مازالت في مرحلة البحث والتطوير. لكن بعض المنتجات بدأت بالفعل تظهر على مستوى تجاري. والمواد المركبة هذه صديقة للبيئة وقابلة للتحلل كلياً، أي إنها خضراء بكل ما في الكلمة من معنى. وفي نهاية حياتها يمكن التخلص منها بسهولة أو تحويلها لسماد دون الإضرار بالبيئة. والمواد المركبة الخضراء هذه يمكن استخدامها بفعالية في كثير من التطبيقات ذات العمر القصير (حتى سنتين)، أو للاستخدام لمرة واحدة أو فترة قصيرة ثم يتم التخلص منها. غير أن معظمها يمكن استخدامها في تطبيقات بعيداً عن التعرض لظروف طقس خارجية لعدة سنوات، أي تماماً كالخشب. وهناك عدد من الراتنجات الطبيعية أو الاصطناعية القابلة للتحلل حيويًا والتي يمكن استخدامها في المواد المركبة الخضراء. ومعظمها تتحلل بواسطة التفاعلات الإنزيمية عندما تتعرض لظروف مواتية. وبعضها يتحلل أيضاً في الهواء الطلق بوجود الرطوبة. وقد تم استخدام أنواع مختلفة من الراتنجات مع ألياف من الأناس لإنتاج مادة مركبة خضراء، ووجد أن مقاومة الشد ومقاومة الانحناء

في اتجاه الألياف أكبر بمقدار لا بأس به من خواص الخشب حتى عند نسب الألياف المنخفضة بحدود 30%. ومع ازدياد نسبة الألياف فإن الخواص تتحسن، ويمكن استخدام مثل هذه المواد المركبة في إنشاءات ثانوية في السيارات وغيرها. كما تم إنتاج مواد مركبة خضراء من البوليستر كمادة رابطة مع ألياف الجوت بعد معالجتها لزيادة التصاقها بالمادة الرابطة وتحسين خواصها.

وقد وجد أن هذه المواد تتحلل بسرعة. وهناك أبحاث عديدة حول تحلل اللدائن والمواد المركبة حيويًا. كما تمت دراسة المواد المركبة من ألياف القنب والكتان مع راتنج مصنوع من النشاء المعدل. وبعض هذه المواد المركبة لها خواص مقاربة لخواص اللدائن المقواة بألياف الزجاج. كذلك هناك أبحاث حول

بوليمرات بروتين الصويا التي تتوفر بأشكال مختلفة ويمكن أن تقوّل بالضغط للحصول على مواد مركبة مع ألياف الخشب أو ألياف القنب، ويمكن أن تستخدم في قطع الأثاث والأشكال الجمالية المعمارية غير المعرضة لأحمال أو في التغليف أو في القطع المعدة للاستهلاك السريع. وهي مواد قابلة للتحلل كلياً. ومن المتوقع أن يتم تحسين خواصها بعد تحسين طرق إنتاجها.

وهناك أبحاث حول تعديل النشاء لإنتاج راتنج يستخدم في تصنيع المواد المركبة الخضراء مع ألياف القنب والخيزران ذات الجودة المرتفعة، والمواد المركبة منها لها خواص انحناء ممتازة. فمثلاً وصلت مقاومة ألياف القنب مع راتنج أساسه النشاء إلى 250 ميجا باسكال ويمكن أن تستخدم في أجزاء إنشائية. وهناك أبحاث لإنتاج راتنجات من الزيوت ستكون أرخص من الراتنجات الحالية. وكذلك أبحاث لإنتاج راتنجات صناعية رخيصة قابلة للتحلل حيويًا بخواص أفضل وذلك باستخدام تقنية النانو (nanotechnology).

لكن مازال هناك عقبات في طريق الاستخدام التجاري للمواد المركبة الخضراء. ومن أهمها الكلفة المرتفعة للراتنجات، حيث أنه في الوقت الحاضر، تكلف الراتنجات القابلة للتحلل حيويًا أكثر بكثير (3-5 مرات) من الراتنجات المصنوعة من المواد اللدنة. لكن مع حصول المواد الخضراء على القبول وازدياد إنتاجها فمن المتوقع أن تنخفض كلفة الإنتاج. هذا إضافة إلى أنه من المتوقع أيضاً الوصول إلى طرق أخرى في الإنتاج تكون أقل كلفة. ومن العوائق أيضاً تغيير مقاومة الألياف الطبيعية، فهي تتغير حسب قطر الألياف وعوامل أخرى مثل العوامل الزراعية. هذا إضافة إلى أن الألياف تكون في العادة ملتصقة وتحتاج لفصل قبل استخدامها. ومعظم الألياف الطبيعية تتشرب الرطوبة وبالتالي تنخفض مقاومتها وخواصها الأخرى، ثم تتكسح عندما تجف. واستمرار تشرب الرطوبة ثم الجفاف يخفض المقاومة ويؤثر على الالتصاق بالراتنج، وهذا بدوره يؤثر على المقاومة أيضاً. وهناك أبحاث حول معالجة

الألياف لتقليل حساسيتها للرطوبة. وهناك عوائق تتعلق بدرجات الحرارة في أثناء التصنيع حيث لا تتحمل معظم الألياف الطبيعية درجات حرارة أكثر من 175 درجة مئوية لفترة طويلة، وهذا يحد من إمكانية استخدامها مع اللدائن الحرارية. وما زال هناك الكثير مما يمكن عمله لتحسين خواص المواد المركبة المقواة بالألياف الطبيعية ولتصنيع منتجات تجارية.

## 10.6. تكنولوجيا النانو والمواد المتراكبة .

أضافت تكنولوجيا النانو بُعدًا مهمًا جديدًا في إنتاج فئة حديثة من المتراكبات تعرف باسم المتراكبات النانوية، وذلك من خلال تخليق حبيبات متناهية في الصغر تقل مقاييس أبعاد أقطارها عن 100 نانومتر، بحيث يتم توظيفها كماد نانوية داعمة ومقوية تعرف باسم الدعامات النانوية Nano-Reinforcements لمادة الأساس. وقد أثبتت تلك الجسيمات النانوية قدرة فائقة تعمل على تحسين خواص مادة الأساس، ورفع مقاومتها وصلادتها. ومع بداية العقد الثاني من الألفية الثالثة تجد فئة المواد المتراكبة النانوية مجالًا فسيحًا ورحبا من التطبيقات المهمة التكنولوجية المتقدمة في جميع المجالات والقطاعات. فعلى سبيل المثال، فقد تمكن الباحثون حديثًا من إنتاج أقطاب مؤلفة من حبيبات نانوية الأبعاد لعنصري السيليكون والكربون تسمح عند توظيفها كأقطاب ببطاريات الليثيوم الأيوني Batteries Ion Lithium برفع كفاءة ذلك النوع من البطاريات في إنتاج الطاقة بشكل أكبر مع السماح بشحن وتفريغ البطارية بسرعة عالية وفي زمن قصير.

هذا وتستخدم المواد المتراكبة النانوية كدعامات تعمل على تسريع عملية التئام العظام Healing Process المكسورة، حيث أظهرت نتائج الأبحاث أن عملية نمو العظام البديلة تتسارع عندما تُستخدم متراكبات أنابيب البوليمرات النانوية التي تقوم بعمل «السقالات»



Scaffold التي تقوم بتوجيه وتقويم اتجاهات نمو العظام البديلة. أيضاً تستخدم المواد المتراكبة مثل متراكبات البلمرات النانوية في صنع الخلايا اللينة Soft-tissue لتحل محل الجلد، الأعصاب، وكذلك في ترقيع وترميم الأوعية الدموية.

كذلك يتم إنتاج مواد المكونات الهيكلية التي تتمتع بارتفاع في نسبة قوتها مقارنة بالوزن مثل إنتاج قوالب مادة الإيبوكسي Epoxy (أحد أنواع البلمرات) المدعمة بأنابيب الكربون النانوية المستخدمة في تصنيع ريش طواحين الهواء Windmill Blades وذلك في مجال الطاقة الجديدة والمتجددة. وقد دلت النتائج البحثية على تمتع تلك الريش بمقاومة عالية مع خفة الوزن مما يعني زيادة كمية الكهرباء المتولدة عن تلك الطواحين الهوائية وزيادة العمر التشغيلي لها.

وتُعد تطبيقات المواد المتراكبة النانوية المستخدمة في حماية الأسطح الخارجية لمعدات الحفر المُستخدمة في حفر آبار البترول والمياه الجوفية، أحد أبرز التطبيقات المُستخدمة لوقاية تلك المعدات وحمايتها من التآكل والصدأ. وتتلخص تلك الطريقة في تغطية وطلاء سطح مادة الأساس المراد حمايته بطبقة طلاء رقيقة السمك شديدة الصلادة تتمتع بمقاومة لعوامل البري والتآكل عن طريق الاحتكاك والصدأ. وتُعد طرق الترسيب الكيميائي Chemical Vapor Deposition، الترسيب الفيزيائي للأبخرة Physical Vapor Deposition، طريقة التذرية Sputtering وكذلك تقنية الطلاء الحراري Thermal Spray Coating أبرز التقنيات والأساليب التكنولوجية الحديثة المُستخدمة في مجال طلاء وحماية الأسطح.

## 11.6. التدريع الطبقي المتراكب (Composite Armour).

لعل أحد أبرز الانجازات في ميدان حماية الدروع هو تطوير الدروع المتراكبة (Composite armor) ، المعروفة ابتداءً بإسم "شوبهام" Chobham . تم تطوير هذا التركيب في مؤسسة التطوير وبحث العربات القتالية البريطانية ، وأطلق عليه هذا الإسم نسبة إلى المكان الذي أنتج فيه ، وهو قرية صغيرة قرب لندن يوجد فيها المركز المذكور . لقد أشتمل التدريع المذكور على تشكيلة من المواد المختلفة تتراوح بين السبائك المعدنية إلى المواد الخزفية ، رُتبت على هيئة مصفوفة قرص العسل وغلُفت في صندوق الدرع الفولاذي . أصبح إسم شوبهام منذ ذلك الحين التعبير العام المشترك لدرع الدبابة الطبقي/الخزفي ، الذي يقدم حماية قصوى ضد أسلحة الشحنة المشكلة ، بالمقارنة مع صفائح التدريع الفولاذي التقليدي .

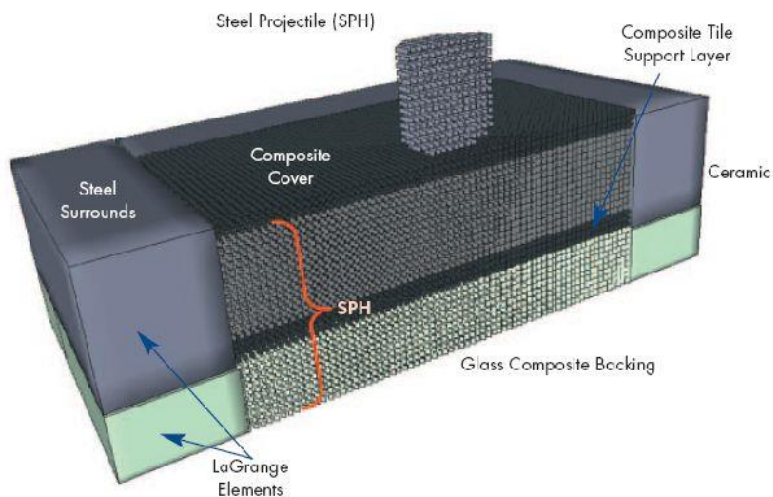
وعلى الرغم من أن التفاصيل الدقيقة لبناء الدروع شوبهام تبقى من الأسرار العسكرية ، إلا أن بناء التدريع المركب يشتمل بشكله العام على ثلاثة طبقات دفاعية ، تختلف في تفاصيلها (انظر الشكل (3)) :

1. الغرض من طبقة الدفاع والحماية الأولى ، إبطاء وتشويه وتخشين وحرف/تغيير اتجاه مقذوف الطاقة الحركية القادم ، أو امتصاص جزء من طاقة نفاث الشحنة الجوفاء . هذه الطبقة المقساة تتكون عادة من صفيحة سميكة نسبياً ، في وضع مائل ، بحيث تزيد هذه من المسافة العرضية الواجب على الرأس الحربية المعادية قطعها لثقب الصفيحة . تصنع الصفيحة الأولى من مواد عالية الكثافة ، وغالباً من الفولاذ المصلد أو اليورانيوم المستنزف أو من سبائك التنتكستن . لقد وجد أن القضيب الطويل للخارق الذي يمتلك على الأرجح طولاً نموذجياً لنحو 30 مرة أو أكثر من قطره ، سيتمكن من اختراق سطح الصفيحة ، بإيداع مقدار كبير من الطاقة الحركية في منطقة مركزة ، سواء أكانت هذه من الفولاذ أو التنتكستن أو ما عدا ذلك . إلا أن أي انحراف لمحور قضيب الخارق عن



اتجاه طيرانه لأكثر من بضعة درجات ، يمكن أن يؤثر على عملية الاختراق بشكل عكسي ، حيث يمكن للقضيب القادم إذا تحقق الانحراف ، أن ينحني أو ينكسر وبالتالي يفقد معظم تأثيره .

2. هذه الطبقة أكبر سمكاً من سابقتها ، وتعني أكثر بتحطيم الخارق بالإضافة لاستيعاب وامتصاص تأثير طاقة الارتطام عالي السرعة (في الوقت ذاته الذي يكون فيه المقذوف تحت تأثير التباطؤ والتشويه) . إن القصد من وجود هذه المحطة ، هو توفير حماية أكثر من المقذوفات المتغلغلة والنافذة عن صفيحة الحماية الأولى ، حيث تقوم بتحطيم كتلتها ، وتوزيع وتشتيت التأثير على كافة أنحاء الطبقة . ويعتقد أن ترتيب هذه الطبقة يرتكز على بناء قرص العسل (Honey comb) ، وهي عبارة عن صفيحة فولاذية مليئة بالثقوب والفتحات سداسية الأضلاع . هذه الطبقة بكاملها مكسوة بمركب خزفي (كربيد البورون أو كربيد السيلكون أو غيرها) ، حيث تحقن المادة الخزفية في فتحات قرص العسل ، بهدف تحطيم أو على الأقل تخشين مقدمة الخارق . ويعتقد أن مضمون هذه المحطة يشتمل أيضاً من ضمن ترتيباته على طبقة مطاطية ، تعمل عند إصابتها ، على الانتفاخ والتمدد ، في حال كون الهجوم من قبل نفاث شحنة مشكلة ، بحيث تمتص هذه الطبقة جزء مهم من طاقة النفاث .



الشكل (3): طبقات التدريع المتراكب

3. هذه الطبقة رقيقة نسبياً ، وهي عبارة عن لوح شديد الصلابة مصنوع من التيتانيوم أو التنتستن ، بالإضافة إلى مركبات أخرى ، الهدف من هذه الطبقة تزويد حماية بالسنتية ممتازة ومنع اختراق هيكل أو برج المركبة . يلحق هذه الطبقة عادة من الداخل وكتجهيز قياسي ، بطانة مانعة للشظايا (عادة تشتمل على ألياف كيفلار) . فعندما يخفق مقذوف مضاد للدروع في إختراق طبقات الحماية بشكل كامل، فإنه يمكن أن يمزق صفيحة الدرع الداخلية ، نتيجة الضغط الشديد أو الموجات التصادمية . ذلك يمكن أن يؤدي لإنتاج قطع صغيرة أو شظايا ، تندفع بسرعة عالية باتجاه مقصورة الطاقم . البطانة المانعة للشظايا يمكن أن تصنع من ألياف كيفلار أو من ألياف البلاستيك الأخرى لإيقاف تأثير هذه الشظايا ، وحماية الطاقم والتجهيزات الداخلية . لقد أثبتت الاختبارات أن بطانة من هذه التراكيب سماكتها 20 ملم ، تستطيع امتصاص نحو 97% من الشظايا المندفعة للداخل .

ويكمن السر في النتائج المثيرة لهذه الدروع المتقدمة والمتطورة المستخدمة في تصفيح العديد من الدبابة الغربية ، هو في تركيبها الذي لا يقتصر على طبقات من مواد مختلفة ، أو مواد خزفية ، ألياف نسيجية ، معادن خفيفة ممزوجة ، فولاذ أو مركبات ذات كثافة وصلادة عالية يفصل بينها فراغات ، بل إنها أيضاً تشتمل على مقاطع سهلة التكسر والإنسحاق ، وأخرى قابلة للتشوه . هذه العناصر والتي من الصعب رؤيتها ، يمكن تشبيهها بقطعة من الورق المقوى المجددة ، والتي تهدف إلى إمتصاص الصدمات الناتجة عن خوارق قذائف الطاقة الحركية وبالتحديد امتصاص طاقتها عن طريق تشتيتها فوق كامل سطح لوحة الإسناد الخلفية . ومع أن دروع الدبابة تمتص تلقائياً كامل الطاقة الحركية لهذه الصدمة (ما لم يرتد الخارق) ، فإن معظمها يتبدد أثناء تشوه العناصر القابلة للتكسر ، وما تبقى من الطاقة يتحول إلى الجزء الداخلي من العربة لمدة طويلة نسبياً من الزمن ، وفوق مساحة كبيرة من السطح . ولحد ما فإن هذه العملية ليست مختلفة عن السيارات الحديثة والمتطورة ، حيث يدرك القارئ كيف تقوم هذه المواد بامتصاص معظم الطاقة في حالة اصطدام السيارة وهي مسرعة جداً وإنقاذ حياة الركاب .