



المواد المركبة

Composite Materials





منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

المواد المركبة

Composite Materials

الدكتور المهندس

محمد مازن يعقوب

استاذ مساعد في قسم هندسة التصميم الميكانيكي

١٤٣٩ - ١٤٤٠ هـ
٢٠١٧ - ٢٠١٨ م

جامعة دمشق



الفهرس

رقم الصفحة	الموضوع		
5		الفهرس	*
19	Introduction	مقدمة	*
25	General introduction	الفصل الأول: مفاهيم أساسية في المواد المركبة	-1
27	Introduction	مقدمة:	1-1
27	Definition Of Composite Materials	تعريف المواد المركبة:	1-2
31	Types of composite material	أنواع المواد المركبة:	1-3
34	Design of composite materials	تصميم المواد المركبة:	1-4
37	The concept of load transfer	مفهوم انتقال الحمل:	1-5
39	Fibers and matrices	الفصل الثاني: المادة الأساس (الحاضنة) ومادة التقوية	2
41	Introduction	مقدمة	2-1
41	Reinforcements	مواد التقوية	2-2
43	Carbon fibers	ألياف الكربون	2-2-1
48	Glass fibers	ألياف الزجاج	2-2-2
52	Organic fibers	الألياف العضوية	2-2-3
55	Silicon carbide	ألياف كربيد السيلكون	2-2-4

58	Alumina and aluminosilicates	ألياف أكسيد الألمنيوم وسيليكات الألمنيوم	2-2-5
60	The strength of reinforcements	متانة مادة التقوية	2-3
60	Thermal stability	الثبات الحراري	2-3-1
62	Compressive strength	المتانة على الضغط	2-3-2
63	Fiber fracture and flexibility	المرونة وتحطم الليف	2-3-3
66	A statistical treatment of fiber strength	معالجة إحصائية لمتانة الليف	2-3-4
69	Matrices	المادة الأساس الحاضنة	2-4
70	Polymer matrices	المادة الحاضنة البوليمرية	2-4-1
74	Metal matrices	المادة الحاضنة المعدنية	2-4-2
74	Ceramic matrices	المادة الحاضنة السيراميكية	2-4-3
77	Fiber architecture	الفصل الثالث: أسلوب بناء الألياف	3
79	Introduction	مقدمة	3-1
79	Volume fraction and weight fraction	النسبة الحجمية و النسبة الوزنية	3-2
79	Fiber packing arrangements	ترتيبات حزم (تجميع) الألياف	3-3
81	Clustering of fibers and particles	تكتل وتجمع الألياف والحبيبات	3-4
83	Long fibers	الألياف الطويلة	3-5
83	Laminates	الصفائح الرقيقة	3-5-1

86	Woven, braided and knitted fiber arrays	ترتيبات الألياف المنسوجة المحاكاة و المضفورة	3-5-2
88	Characterization of fiber orientations in a plane	مميزات اتجاهات الليف في المستوي	3-5-3
89	Short Fibers	الألياف القصيرة	3-6
89	Fiber orientation distributions in three dimensions	توزع اتجاهات الليف في الأبعاد الثلاثة	3-6-1
93	Fiber length distributions	توزع أطوال الألياف	3-6-2
95	Voids	الفجوات	3-5
98	Fiber orientation during processing	توجيه الألياف خلال التصنيع	6-3
101	Elastic deformation of long-fiber composites	الفصل الرابع: التشوه المرن للمواد المركبة المقواة بالألياف الطويلة	4
103	Introduction	مقدمة	4-1
103	Axial stiffness	الجساءة المحورية	4-2
105	Transverse stiffness	الجساءة العرضية	4-3
111	Shear stiffness	جساءة القص	4-4
115	Poisson contraction effects	تأثيرات انكماش بواسون	4-5
119	Elastic Deformation of Laminates	الفصل الخامس: التشوه المرن للصفائح	5
121	Elastic deformation of anisotropic material	التشوه المرن للمواد اللا متناهية (للمواد متباينة الاتجاهات)	5-1

121	Hook's law	قانون هوك	5-1-1
122	Effects of symmetry	تأثيرات التناظر	5-1-2
126	Off- axis elastic constant laminate	ثوابت المرونة اللا محورية للصفحة	5-2
126	calculation procedure	الإجراءات الحسابية	5-2-1
132	Engineering Constants	الثوابت الهندسية	5-2-2
139	Elastic deformation of Laminates	التشوه المرن للصفائح	5-3
139	Loading of a stack of Plies	تحميل أكداش من الرقائق أو الطبقات	5-3-1
141	Predicted Behaviour	السلوك المتوقع	5-3-2
143	Stresses and distortions	الإجهادات والتشوهات	5-4
143	Balanced Laminates	الصفائح المتوازنة	5-4-1
145	Stress in individual Plies of a Laminate	الإجهاد في الطبقات المفردة للصفائح	5-4-2
148	Coupling Stress and symmetric Laminates	الإجهادات المقرونة والصفائح المتناظرة (متناهية الخواص)	5-4-3
153	Stresses and strains in short-fiber composites	الفصل السادس: الإجهادات والانفعالات في المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة	6
155	The shear lag model	نموذج تأخر القص	6-1

156	Stress and strain distributions	توزيع الإجهاد والانفعال	6-1-1
159	The stress transfer length	نقل الإجهاد الطولي	6-1-2
163	Transfer of normal stress across Fiber ends	نقل الإجهاد الناطمي عبر نهاية الليف	6-1-3
165	Prediction of stiffness	تنبؤ الجساءة	6-1-4
168	Onset of inelastic behavior	بداية السلوك غير المرن	6-1-5
170	The Eshelby method	طريقة إيشلبي	6-2
171	A misfitting ellipsoid	الشكل البيضوي غير المتطابق	6-2-1
172	The equivalent homogeneous ellipsoid	مكافئ الجسم البيضوي المتجانس	6-2-2
173	The background stress	الاجهادات المحيطة	6-2-3
174	Composite stiffness	جساءة المادة المركبة	6-2-4

179	The interface region	الفصل السابع: منطقة سطوح الارتباط أو السطوح البينية	7
-----	----------------------	---	---

181	Introduction	مقدمة	7-1
181	Bonding mechanisms	آليات الترابط	7-2
181	Adsorption and wetting	الامتزاز والتبلل	7-2-1
183	Inter-diffusion and chemical reaction	الانتشار الداخلي والتفاعل الكيميائي	7-2-2

185	Electrostatic attraction reaction	التجاذب بشحنة الكهرباء الساكنة	7-2-3
186	Mechanical keying	الترابط الميكانيكي	7-2-4
186	Residual stresses	الاجهادات المتبقية	7-2-5
188	Experimental measurement of bond strength	القياسات التجريبية لمتانة الترابط	7-3
188	Single-Fiber pull-out test	اختبار سحب الليف مفرد	7-3-1
191	Single-fiber push-out and push-down tests	اختبارات الضغط خارجاً والضغط سفليناً لنسيج مفرد	7-3-2
194	Other tests	اختبارات أخرى	7-3-3
195	Control of bond strength	التحكم بمتانة الترابط	7-4
195	Coupling agents and environmental effects	عوامل الربط والتأثيرات البيئية	7-4-1
198	Toughness-reducing coatings	طلاءات تخفيض الجساءة	7-4-2
200	Interfacial chemical reaction and diffusion barrier coatings	التفاعل الكيميائي على سطوح التلامس وطلاءات إعاقة الانتشار	7-4-3
202	The inter-phase region	المنطقة داخل الطور البيني	7-4-4
205	Strength of composites	الفصل الثامن: متانة المواد المركبة	8
207	Introduction	مقدمة	8-1
207	Failure modes of long-fiber composites	أنماط فشل المواد المركبة ذات الألياف الطويلة	8-2

208	Axial tensile failure	الانهيار نتيجة الشد المحوري	8-2-1
219	Transverse tensile failure	الانهيار نتيجة الإجهاد العرضي	8-2-2
223	Shear failure	الانهيار نتيجة القص	8-2-3
225	Failure in comprision	الانهيار نتيجة الضغط	8-2-4
230	Failure of laminate under off-axis loads	انهيار الصفائح نتيجة تأثير الحملات اللامحورية	8-3
231	Maximum stress criterion	معيار الإجهاد الأعظمي	8-3-1
232	Other failure criteria	معايير أخرى للانهيار	8-3-2
234	Experimental data for single laminate	معطيات تجريبية لطبقة صفائحية واحدة	8-3-3
237	Strength of Laminates	متانة الصفائح	8-4
238	Tensile cracking	التصدع الناتج عن الشد	8-4-1
240	Inter-laminar stresses	الإجهادات داخل الصفائح	8-4-2
242	Edge effects	تأثيرات الحافة	8-4-3
243	Failure of tubes under internal pressure	انهيار الأنابيب بتأثير الضغط الداخلي	8-5
244	Pure hoop loading	تحميل الطوق بشكل صافي	8-5-1
246	Combined hoop and axial loading	التحميل المتحد المحوري والطوقي	8-5-2
248	Netting analysis	تحليل الشبكة	8-5-3
251	Toughness of composites	الفصل التاسع: جساءة المواد المركبة	9
253	Introduction	مقدمة	9-1

253	Fracture mechanics	ميكانيك التحطم	9-2
253	Basic concepts	مبادئ أساسية	9-2-1
256	Interfacial fracture and crack deflection	تحطم السطح البيني وانحراف الشق	9-2-2
261	Contributions to work of fracture	الإسهامات في عمل التحطم	9-3
261	Matrix deformation	تشوه المادة الحاضنة	9-3-1
262	Fiber fracture	تحطم الليف	9-3-2
263	Interfacial debonding	فك ارتباط السطح البيني	9-3-3
264	Frictional sliding and fiber pull-out	الانزلاق الاحتكاكي ونزع (سحب) الليف	9-3-4
267	Effects of microstructure	تأثيرات البنية	9-3-5
270	Sub-critical crack growth	نمو الشق الحرج الفرعي	9-4
270	Fatigue	التعب	9-4-1
276	Stress corrosion cracking	تشقق التآكل الاجهادي	9-4-2
279	Thermal behavior of composites	الفصل العاشر: السلوك الحراري للمواد المركبة	10
281	Introduction	مقدمة	10-1
281	Thermal expansion and thermal stresses	التمدد الحراري والإجهادات الحرارية	10-2
281	Thermal stresses and strains	الإجهادات والانفعالات الحرارية	10-2-1
284	Thermal expansivities	عوامل التمدد الحرارية	10-2-2

288	Thermal cycling of unidirectional composites	الدورات الحرارية للمواد المركبة وحيدة الاتجاه	10-2-3
292	Thermal cycling of laminates	الدورات الحرارية للمواد الصفائحية	10-2-4
296	Creep	الزحف	10-3
296	Basics of matrix and fiber behavior	أساسيات سلوك المادة الحاضنة وسلوك الألياف	10-3-1
298	Axial creep of long-fiber composites	الزحف المحوري للمواد المركبة المقواة بألياف طويلة	10-3-2
299	Transverse creep and discontinuously reinforced composites	الزحف العرضي ، والمواد المركبة المقواة (بشكل متقطع)	10-3-3
303	Thermal conduction	الناقلية الحرارية	10-4
304	Heat transfer mechanisms	آليات النقل الحراري	10-4-1
305	Conductivity of composites	الناقلية الحرارية للمواد المركبة	10-4-2
309	Interfacial thermal resistance	المقاومة الحرارية لسطح التلامس (السطح البيني)	10-4-3
313	Fabrication	الفصل الحادي عشر: تصنيع المواد المركبة	11
315	Introduction	مقدمة	11-1
315	Polymer composites	المواد المركبة البوليميرية	11-2

316	Liquid resin impregnation routes	طرائق التشرب بالريزين السائل	11-2-1
323	Pressurized consolidation of resin pre-pregs	الدمج تحت الضغط للريزين المسبق الإقحام	11-2-2
326	Consolidation of resin moulding compounds	دمج مركبات قوالب الريزين	11-2-3
328	Injection moulding of thermoplastic	القوالب بالحقن للبلاستيك الحراري	11-2-4
331	hot press moulding of thermoplastic	القوالب بالضغط على الساخن للبلاستيك الحراري	11-2-5
331	Metal Composites	المواد المركبة المعدنية	11-3
321	Squeeze infiltration	التخلخل بالضغط	11-3-1
332	Stir casting	المصبوبات الممزوجة	11-3-2
334	Spray deposition	الترسيب بالرذاذ	11-3-3
337	Powder blending and consolidation	التصلب و مزج المسحوق	11-3-4
338	Diffusion bonding of foils	الترابط الانتشاري للرقاقات	11-3-5
339	Physical vapor deposition (PVD)	ترسيب البخار فيزيائياً	11-3-6
341	Ceramic composites	المواد المركبة السيراميكية	11-4
341	Powder-based routes	الطرق المعتمدة على المسحوق (البودرة)	11-4-1
343	Reactive processing	الطريقة التفاعلية	11-4-2
344	Layered ceramic composites	المواد مركبة السيراميكية ذات الطبقات	11-4-3

345	Carbon/carbon composites	المواد المركبة كربون / كربون	11-4-4
347	Application	الفصل الثاني عشر : تطبيقات المواد المركبة	12
349	Introduction	مقدمة	12-1
349	Industrial Applications	التطبيقات الصناعية	12-2
349	Sheet processing rolls	درافيل معالجة الصفائح	12-2-1
351	Marine Applications	الاستخدامات البحرية	12-3
352	Minesweeper hull	السفينة كاسحة الألغام	12-3-1
353	Space Applications	الاستخدامات في الفضاء	12-4
359	Airplane Applications	الاستخدامات في الطائرات	12-5
364	Helicopter rotor blade	شفرات مروحة الحوامة	12-5-1
366	Gas turbine combustor can	جسم حجرة احتراق غازي توربيني	12-5-2
367	Aircraft brakes	مكابح الطائرات	12-5-3
369	Transport Applications	الاستخدامات في وسائط النقل	12-6
371	Diesel engine piston	مكبس محرك ديزل	12-6-1
372	Sport Applications	الاستخدامات في الرياضة	12-7
373	Racing bicycle	دراجة السباق	12-7-1
374	Golf driving club	مضرب الغولف	12-7-2
376	Electronic Applications	الاستخدامات في الإلكترونيات	12-8

376	Microelectronics housing	تصنيع مقرات الإلكترونيات الدقيقة	12-8-1
379	Laboratory Section	الفصل الثالث عشر: القسم العملي	13
381		التجارب المخبرية	13-A
395		مراجعة ومسائل	13-B
397		المواد المركبة ذات الأساس البوليميري	13-B
397		المواد المركبة البوليميرية المقواة بالألياف	13-B-1
397		مواد التقوية: الألياف	13-B-1-1
398		شكل وأبعاد وتوضع ألياف التقوية	13-B-1-2
398		الدور الذي تلعبه المادة الحاضنة	13-B-1-3
399		خواص المادة المركبة	13-B-1-4
400		المتانة ومعامل المرونة للبلاستيك المقوى	13-B-2
401		النسب الوزنية والحجمية للألياف	13-B-3
401		النسب الحجمية	13-B-3-1
401		النسب الكتلية	13-B-3-2
401		العلاقة بين النسب الكتلية والحجمية	13-B-3-3
403		معادلات معاملات المرونة للمادة المركبة البوليميرية المقواة بالألياف	13-B-4
403		شروط تساوي الانفعالات	13-B-4-1
407		حالات الإجهاد المتساوي	13-B-4-2
416		بعض طرق تصنيع المواد المركبة البوليميرية	13-B-5
416		طريقة تصنيع البروفيلات من المواد المركبة البوليميرية Pultrusion	13-B-5-1
401		القولبة باستخدام التخلية	13-B-5-2

419	مبادئ القلوبة بنقل الراتنج	13-B-5-3
423	تأثير العوامل الجوية على المواد المركبة ذات الأساس البوليميري	13-B-6
424	درجة الحرارة	13-B-6-1
425	الرطوبة	13-B-6-2
425	امتصاص الرطوبة في المواد المركبة البوليميرية	13-B-6-2-1
427	العوامل المؤثرة على عامل الانتشار	13-B-6-2-2
428	العوامل المؤثرة على محتوى رطوبة التوازن	13-B-6-2-3
431	تأثير الرطوبة على المواد المركبة	13-B-6-3
431	الأشعة فوق البنفسجية	13-B-6-4
432	التأثيرات المتزايدة لأشعة الشمس فوق البنفسجية على المواد	13-B-6-5
434	المادة المركبة ذات المادة الحاضنة- المعدنية (MMCs)	13-C
434	المواد المركبة المقواة بألياف مستمرة MMCs	13-C-1
436	المواد المركبة المقواة بألياف مقطعة و المقواة بالحبيبات	13-C-2
443	المادة المركبة ذات المادة الحاضنة - السيراميكية (CMCs)	13-D
443	المقواة بألياف مستمرة- CMCs	13-D-1
443	المقواة (بشعيرات) منقطعة و المقواة بالحبيبات CMCs	13-D-2
447	أنماط الانهيار للمواد المركبة.	13-E
447	مقدمة	13-E-1
448	انتشار الشق في المواد المركبة	13-E-2
448	تأثيرات المادة الرابطة على انتشار الشق	13-E-2-1

449	تأثيرات الليف على انتشار الشق	13-E-2-2
449	تأثيرات السطح الفاصل بين الألياف والمادة الرابطة	13-E-2-3
449	اشتقاق المتانة من العمل الحقيقي للمادة المركبة	13-E-3
449	حالة مادة مركبة تحتوي على ليف وحيد	13-E-3-1
452	الانهيار في طبقة أحادية الاتجاه	13-E-3-2
455	المراجع العلمية	*

457	المصطلحات العلمية	*
-----	-------------------	---

* - مقدمة :

دفع التطور المستمر في تصميم المواد الهندسية وتركيبها - من أجل الأداء الممتاز - ومتطلبات توفير الوزن، علماء المواد والمهندسين والمصممين إلى استمرار البحث عن مواد جديدة. منذ عام 1960، عندما طور العلماء أول عينة من مواد بلاستيكية مدعمة بالألياف، وقد ازداد بشكل مستمر مدى تطبيق هذه المواد ومجالها.

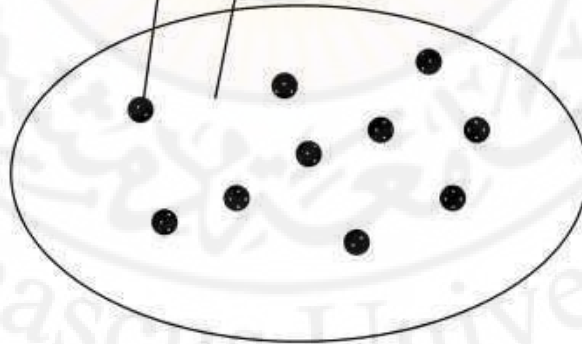
تم استخدام المواد المركبة منذ العصور القديمة، حيث كان الفراعنة يمزجون القش مع الطين في أبنيتهم، كما تم استخدام شعر الحيوانات وبعض الألياف النباتية في التدعيم . يمكن أن نعرف بشكل عام المواد المركبة بأنها المواد غير المتجانسة التي تتكون من مادتين مختلفتين أو ربما أكثر .

فيم يخص المواد المركبة الحالية : الغاية منها الحصول على خصائص عالية لا يمكن الحصول عليها باستخدام المواد التقليدية.

تتكون المادة المركبة على الأغلب من عنصرين :

الأول : عنصر التقوية Reinforce

الثاني : المادة الرابطة Matrix



غالباً يكون عنصر التقوية عبارة عن ألياف Fibers، تأخذ أشكالاً متنوعة وأنواعاً مختلفة. أما المادة الرابطة فهي من المواد البلاستيكية أو المعدنية أو السيراميكية وذلك حسب مجال الاستخدام.

تعتبر المواد المركبة من المواد الهندسية الهامة، حيث تزيد كمية المواد المركبة المنتجة عالمياً سنوياً عن 10 ملايين طن سنوياً، وازداد نمو الكمية المنتجة في السنوات الأخيرة بمعدل يزيد عن 5-10 % سنوياً.

تستخدم المواد المركبة في تطبيقات كثيرة ومتنوعة. بل أكثر من ذلك يتوفر مجال مهم لتحويل بنية المواد المركبة، لكي تلائم ظرف خدمة محددة حسب الطلب. هذا المفهوم موضح بشكل جيد في المواد الحيوية مثل الخشب - العظام - الأسنان و الجلد غير المدبوغ. كل هذه المواد هي عبارة عن مواد ذات بنية معقدة داخلياً، صممت لتعطي صفات ميكانيكية تلائم بشكل جيد تنفيذ متطلبات أداء هذه المواد.

يتطلب تصنيع المواد المركبة، الملائمة في بنيتها لأهداف وغايات هندسية مختلفة، استخدام فروع علمية متعددة، سنعطي في هذا الكتاب فكرة عامة عن أنواع المواد المركبة المتطورة.

نستعرض في الفصل الثاني المادة الحاضنة، وألياف التقوية مع استعراض بعض الأمثلة المحددة من أجل الإيضاح. يتوفر الآن تجارياً مجال واسع من مواد التقوية التي هي غالباً على شكل ألياف. تعتمد خواص مواد التقوية بشكل مباشر على ترتيباتها الذرية، وعلى العيوب المحتواة، لذلك يجب أن تضبط هذه العيوب أثناء عمليات التصنيع.

قد تكون المادة الحاضنة من المواد البوليمرية، المعادن أو من السيراميك، يعتمد اختيار المادة الحاضنة على الخواص المطلوبة، وعلى الاستخدام المطلوب للمادة المركبة وعلى طريقة تصنيع المادة المركبة. تعتمد خواص المادة الحاضنة على بنيتها المجهرية التي تعتمد بدورها على طريقة التصنيع والمعالجات الميكانيكية والحرارية المطبقة عليها.

قد تكون خواص مادة مركبة معينة حساسة لنوعية السطح البيني (سطح التلامس) بين المادة الحاضنة وعنصر التقوية. وهذا سندرسه في الفصل السابع.

يدرس الفصل الثالث ترتيب وتوزيع الألياف والهندسة البنائية للليف، حيث تعتمد خواص المواد المركبة على ترتيب وتوزيع الألياف والهندسة البنائية للليف. يشمل هذا التعبير الصفات والملامح الجوهرية للليف مثل مقدار قطره وطوله وكذلك النسبة الحجمية للألياف المحتواة في المادة المركبة واصطفافها وترتيبها عند تجميعها على شكل حزم. وضعت

في هذا الفصل، السمات الأساسية للهندسة البنائية للليف من أجل كلا المادتين أي المواد ذات الألياف القصيرة والمواد ذات الألياف المستمرة.

نقطة البداية هي وصف لترتيب الليف في الصفائح، (صفائح تحتوي على ألياف طويلة مرتبة ومصطفة)، وللصفائح المبنية منها. يوجد أشكال أخرى لأنظمة الليف المستمر، مثل مواد النسيج المحاك، والمواد المحاكاة والمضفورة. إن الترتيبات في أنظمة الألياف القصيرة أكثر تعقيداً وقد وصفت طرق تمييزها.

ركز الكتاب على مشكلة تتبؤ سلوك المواد المركبة الناتجة، إن الأمر الأساسي هي الخواص الميكانيكية. يهدف عادة تضمين التقوية إلى تحسين الجساءة والمتانة للمادة الأساس. تفاصيل هذا التحسين معقدة وصعبة الوصف بشكل كامل ودقيق .

أسهل نقطة في البدء هي دراسة السلوك المرن للمادة المركبة المقواة بألياف مستمرة مصطفة بنفس الاتجاه، تم وصف السلوك المرن للمواد المركبة ذات الألياف الطويلة والقصيرة في الفصول من 4 وحتى 6. وقد تم تفحص الإجهادات في المواد المركبة الصفائحية، تحت تأثير الحمل الخارجي، وتمت دراسة توزيع الإجهادات على طول الألياف القصيرة. لقد استخدمت هذه المعلومات لاستكشاف الطرق التي يتم فيها تعرض المادة للضرر في البنية المجهرية، التي تؤدي إلى انهيار القطعة كلياً. يمكن تحليل هذا السلوك بأمرين هامين وهما :

أولاً: وجود الانحراف، الذي هو درجة من الضرر والانهيار، للمادة المركبة بتأثير الحمولة المطبقة.

ثانياً : تواجد طرق تسبب امتصاص الطاقة ضمن المادة المركبة عند تعرضها للانفعال، حيث يحدد ذلك جساءة المادة المركبة الذي تمت معالجته في الفصل 9.

على أية حال ، من المهم فهم سلوك المادة عندما تحمّل باتجاهات أخرى. تمت دراسة السلوك المرن للمواد المركبة، وذلك عبر افتراضات بأن الترابط السطحي (على السطوح البينية) كامل ومثالي لا يحوي عيوب. وهذا يعني أنه لا يوجد انفصال أو ارتباط أو

شقوق أو انزلاق ولا عمليات مرنة أو غير مرنة بأي وصف كان. إن طبيعة التفاصيل في منطقة السطح البيني درست في الفصل السابع.

يمكن أن يحدث عملياً العديد من الظواهر الهامة عند السطح البيني. تعتمد هذه الظواهر على بنية السطح البيني والاجهادات المتولدة على هذا السطح. تميل تلك العمليات لتقوية التشوه اللدن للمادة الحاضنة ويمكن أن تؤثر أيضاً على بداية الانهيار وطبيعته. درس في الفصل السابع مميزات السطح البيني وتم فحص كيفية استجابة السطح البيني للعوامل المؤثرة عليه. وصف هذا الفصل معنى وقياس متانة الاتصال "الربط"، كما تمت دراسة تشكل الترابط السطحي لأنظمة متعددة للمواد المركبة، بالإضافة إلى خلاصة عن التقنيات المستخدمة للتأثير على خصائص الترابط .

يتركز الاهتمام في الفصل الثامن على التنبؤ بقيمة الإجهادات الحادثة في المادة المركبة التي يحدث عندها الضرر والانهيار. تركزت الدراسة على المواد طويلة الألياف والمواد المؤلفة من صفائح، وخصوصاً المواد المركبة ذات الأساس البوليميري. تطبق معظم هذه المبادئ بشكل متساوٍ على المواد المركبة ذات مادة التقوية غير المستمرة (منقطعة) وعلى أنواع أخرى من المواد الأساس (الحاضنة).

درس في الفصل التاسع ميكانيك التحطم باختصار، مع دراسة طاقة تحطم السطح البيني مع دراسة مصادر امتصاص الطاقة في المواد المركبة. درست بالنهاية المواد المركبة من حيث النمو البطيء للشق للحالات غير المفضل فيها من حيث طاقة التحطم السريع. درس في الفصل العاشر سلوك المواد المركبة لتغيرات درجات الحرارة الذي هو حساس جداً، وتظهر حساسية المواد المركبة للحرارة من سببين رئيسيين.

أولاً: تتعلق استجابة المادة الحاضنة للحمل المطبق عليها بدرجة الحرارة.

ثانياً: قد يسبب تغير درجة الحرارة إجهادات داخلية نتيجة تفاوت التمدد والتقلص بالحرارة لمكوني المادة المركبة، تؤثر هذه الإجهادات الداخلية على عامل التمدد الحراري للمادة المركبة.

إضافة لذلك، تتواجد إجهادات كبيرة في المادة (في درجة حرارة المحيط) بنتيجة تبريد المواد بعد عملية التصنيع، يمكن أن يؤثر تغير حالة الاجهادات الداخلية الناتجة عن الحرارة على استجابة المادة للحمل المطبق.

يتأثر سلوك الزحف (زحف المعدن) بهذه التغيرات وبشكل خاص تحت ظروف التغير الدوري لدرجة الحرارة. كذلك تشكل الناقلية الحرارية للمواد المركبة أهمية كبيرة حيث تتضمن تطبيقات وعملیات المعالجة لبعض أنواع التدفق الحراري. يمكننا التكهّن بهذه الخاصية من معرفة الناقلية الحرارية لمكونات المادة المركبة رغم أنه قد لا يكون هذا التكهّن صحيحاً نتيجة التماس الحراري السيئ عبر سطوح تلامس مكونات المادة المركبة.

درست تقانة تصنيع المواد المركبة في الفصل الحادي عشر، تعتمد طريقة التصنيع على طبيعة المادة الحاضنة وطبيعة الألياف وأساليب البناء المطلوبة من أجل توزيع الألياف. يتم في معظم الحالات تصنيع المنتج النهائي وإنتاج المادة المركبة في الوقت نفسه ضمن عملية تصنيع واحدة. يؤمن ذلك التوضع الأمثل للألياف، لكن يتطلب ذلك التفهم الجيد للاحتياجات الميكانيكية للجزء المصنوع لتتناسب مع طريقة التصنيع.

أصبحت طرق تصنيع أغلب المواد المركبة البوليميرية ناضجة من الناحية التكنولوجية و التجارية، بينما مازالت أغلب عمليات التصنيع المستخدمة للمواد المركبة السيراميكية والمعدنية في طور التطوير.

سيتم الاعتماد الاستثمار التجاري في الكثير من حالات المواد المركبة السيراميكية والمعدنية على تحسين فعالية الإنتاج .

تستخدم المواد المركبة في مجال واسع من التطبيقات الصناعية لذلك خصص الفصل الثاني عشر للتعريف ببعض تطبيقات المواد المركبة المستعملة في الاستثمار التجاري. تغطي الأمثلة المعطاة جزءاً من المواد المركبة، ذات التعقيد الهندسي، مع طريقة التصنيع، حجم السوق، الوضع التنافسي قياساً إلى المواد المعروفة.

اختص الفصل الثالث عشر بالقسم العملي حيث تضمن تجارب مخبرية على المواد المركبة ذات الأساس البوليميري ومراجعة ومسائل لتصميم المواد المركبة.



الفصل الأول

مفاهيم أساسية في المواد المركبة

General introduction

- 1- تعريف المواد المركبة.
- 2- أنواع المواد المركبة.
- 3- تصميم المواد المركبة.
- 4- مفهوم انتقال الحمل.



1-1- مقدمة: Introduction

تعتبر المواد المركبة من المواد الهندسية الهامة حيث تزيد كمية المواد المركبة المنتجة عالمياً سنوياً عن 10 ملايين طن ويزداد نمو الكمية المنتجة في السنوات الأخيرة بمعدل يزيد عن 5-10 % سنوياً.

تستخدم المواد المركبة في تطبيقات كثيرة متنوعة. بل أكثر من ذلك يتوفر مجال مهم لتطوير بنية المواد المركبة لكي تلبي ظروف خدمة محددة حسب الطلب. هذا المفهوم موضح بشكل جيد في المواد الحيوية مثل الخشب - العظام - الأسنان و الجلد غير المدبوغ. كل هذه المواد هي عبارة عن مواد ذات بنية معقدة داخلياً صممت لتعطي صفات ميكانيكية تلبي بشكل جيد تنفيذ متطلبات أداء هذه المواد.

يتطلب تصنيع المواد المركبة الملائمة في بنيتها لأهداف وغايات هندسية مختلفة استخدام فروع علمية متعددة سنغطي في هذا الفصل التمهيدي فكرة عامة عن أنواع المواد المركبة المتطورة.

2-1- تعريف المواد المركبة: Definition Of Composite Matereals

ما هي المواد المركبة ؟ .

للأسف الشديد فإنه لا يوجد هناك أي تعريف عالمي دقيق لماهية المواد المركبة، وذلك بسبب الارتباك الحاصل حول المواد المركبة. هذا الارتباك موجود لدى عدد من العلماء حتى علماء المواد. فالقاموس يعرف المواد المركبة على أنها مادة مركبة من عدة مركبات مختلفة ويمكن أن نسمي بعض المواد مثل الخلائط المعدنية والمواد البوليميرية بالمواد المركبة على اعتبار أنها تتكون من مجموعات ذرية مختلفة. يصنف هذا التعريف كل المواد غير النقية التي تحتوي على أكثر من عنصر على أنها مواد مركبة إلا أنه بالاعتماد على هذا التعريف تصنف المواد المركبة الحقيقية والمخاليط التي لا تعني شيئاً على أنها مواد مركبة.

وفي مستوى البنية الماكروية (10^{-2} - 10^{-4} cm) فإن خلائط المعادن مثل الفولاذ الكربوني المحتوي على فريت وبرليت يمكن ان يعتبر مواد مركبة على اعتبار أن كلا من الفريت والبرليت مكونان مختلفان ومتقاربان إما في المستويات الماكروية فإنه يمكن

اعتبار البلاستيك المقوى بألياف الزجاج مواد مركبة حيث يمكن أن نميز فيها ألياف الزجاج بالعين المجردة .

وتشير المواد المركبة في الهندسة التصميمية عادةً إلى المواد المحتوية على مكونات تتراوح ضمن المجال الميكروي إلى الماكروي . ويوضح التعريف التالي تعريف المواد المركبة في هذا الكتاب .

يستعرض تعريف المواد المركبة الخدمات المتعددة للمواد المركبة.

المواد المركبة هي أنظمة مواد متعددة الأعمال التي تعطي مميزات لا يمكن الحصول عليها من أي مادة منفصلة. تصنع المواد المركبة بواسطة الجمع الفيزيائي لعنصرين أو أكثر من المواد المتجانسة أو غير المتجانسة وهي مواد متلاصقة البنية والعناصر المشكلة للمواد المركبة تختلف بالتركيب والمميزات وفي بعض الأحيان بالشكل. يركز تعريف المواد المركبة المقواة بالألياف كثيراً على فلسفة التصميم :

المواد المركبة المقواة بالألياف هي تلك المواد غير المتجانسة التي تحضر بالضم والربط في بنية أحادية لمواد مختلفة بصفاتها بشكل كامل وعندما تحضر هذه المواد تعطينا المادة المركبة التي تعطي صفات إضافية متفوقة على كل عنصر من العناصر المكونة لها.

يمثل التعريف السابق حلماً قديماً للمبتالورجيين بأن يتمكنوا من جمع مادتين مختلفتين في مادة مركبة واحدة تعطي صفات أفضل من كل مكون من مكوناتها على حدة .

عند ضم مادتين معاً يعطي كل مكون من مكوناتهما بعض الصفات الجيدة وكذلك بعض العيوب وبذلك يمكن أن تعطي المادة الجديدة (المادة المركبة) إما صفات جيدة أو عيوب فقط. لذلك من الضروري تصميم المواد المركبة من أجل الحصول على الصفات الجيدة المطلوبة.

تكمن الأهمية الهندسية للمواد المركبة في أنه قد نتحد مادتين مختلفتان لتشكيل مادة مركبة تملك خواص مختلفة وأفضل من تلك الخواص المتواجدة في كل مادة على حدة .

من أين جاءت فكرة المواد المركبة ؟

يتطلب التطور التكنولوجي البحث الدائم عن مواد ذات :

أ- مقاومة ميكانيكية عالية :

1- حد انكسار عالي σ_R

2- عامل يونغ مرتفع E

ب- خفة الوزن مع المحافظة على الخصائص العالية : وزن نوعي منخفض ρ

• بناء على ذلك يجب البحث عن مواد تتمتع بقيمة مرتفعة لكل من :

$$E/\rho \text{ و } \sigma_R/\rho$$

لننظر أولاً إلى بعض خواص المواد التقليدية المبينة في الجدول التالي :

جدول (1-1) الخواص الميكانيكية لمواد تقليدية.

المادة	E (GPa)	σ_R (MPa)	ρ (Kg/m ³)	E/ ρ (MN.m/Kg)	σ_R/ρ (KN.m/Kg)
الفولاذ	210	340-2100	7800	26.6	43-270
خلاتنط الألمنيوم	70	140-620	2700	25.9	52-230
الخشب	30	-	390	33.3	-
الزجاج	70	700-1200	2500	28	280-840
التنغستين	350	1100-4100	19300	18.1	57-210
البريليوم	300	700	1830	164	380

نلاحظ أن الزجاج يملك القيم الأعلى لكل من :

$$E/\rho \text{ و } \sigma_R/\rho$$

لكن : للزجاج خاصية الهشاشة التي تمنع من استخدامه في تصنيع القطع الميكانيكية. هذه الهشاشة ناتجة عن الحساسية المفرطة للزجاج تجاه العيوب والتشققات التي تنشأ أثناء التصنيع.

لوحظ بالتجربة والبرهان :

أنه عند اختبار القطع ذات الأبعاد الصغيرة نجد :

ارتفاع الخواص الميكانيكية

الحد من خاصية الهشاشة

لقد تم تفسير هذه الظاهرة بأنه في القطع الصغيرة يقل فيها احتمال تشكل العيوب والتشققات.

من هنا جاءت فكرة تصنيع الألياف

عملياً تم الوصول إلى قيم مشابهة لتلك المحسوبة على أساس نظري وذلك من أجل ألياف زجاجية ذات قطر مساوي إلى 6 ميكرون.

الجدول (1-2) يبين بعض خصائص الألياف المستخدمة:

الجدول (1-2) يبين خواص الألياف.

$\sigma_{u/f}$ (KN.m/Kg)	E/ρ (MN.m/Kg)	f (Kg/m ³)	σ_u (Mpa)	E (Gpa)	الألياف وخواصها
1380	28.5	2540	3500	72.4	زجاج (E)
1850	34.5	2480	4600	85.5	زجاج (S)
1100	205	1900	2100	390	كربون عالي E
1890	130	1850	3500	240	كربون عالي σ_u
1870	87	1500	2800	130	إراميد
1100	146	2630	2800	385	البور

لكن لا يمكن أن نستخدم الألياف فقط لتصنيع القطع الميكانيكية

من هنا جاءت فكرة غرس الألياف ضمن مادة رابطة .

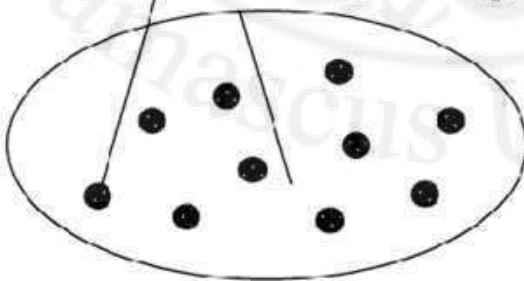
المواد المركبة : هي المواد غير المتجانسة التي تتكون من مادتين مختلفتين أو ربما أكثر . الغاية منها الحصول على خصائص عالية لا يمكن الحصول عليها باستخدام المواد التقليدية.

تتكون المادة المركبة على الأغلب من عنصرين كما بالشكل (1-1).

الأول : عنصر الدعم Reinforce

الثاني : المادة الرابطة Matrix

الشكل (1-1) بنية المادة المركبة.



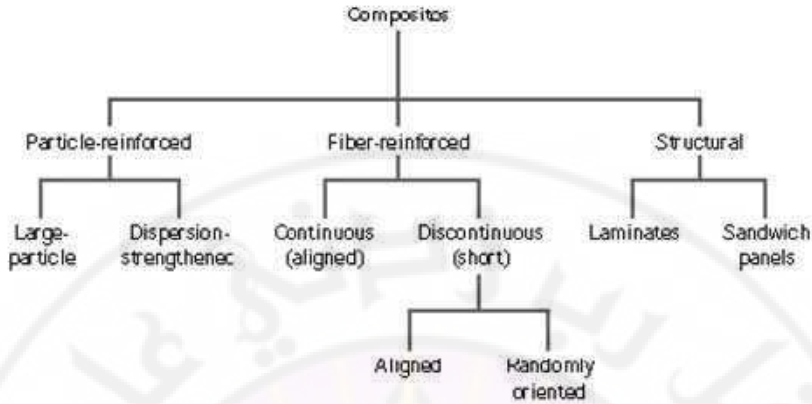
غالباً يكون عنصر الدعم عبارة عن ألياف Fibers تأخذ أشكالاً متنوعة وأنواعاً مختلفة. أما المادة الرابطة فهي من المواد البلاستيكية أو المعدنية أو السيراميكية على حد سواء، وذلك حسب مجال الاستخدام.

1-3 -أنواع المواد المركبة: Types of composite material

1- المواد المركبة الحيوية الطبيعية:

يوجد في الطبيعة مواد مركبة كثيرة. تتألف المواد المركبة الحيوية الطبيعية من مكونين على الأقل. تتألف هذه المواد الحيوية الطبيعية في حالات عديدة من مكونين اثنين وهو بشكل طولي، متوضع في مكون طري (المادة الحاضنة). مثلاً يتألف الخشب من سلاسل ليفية من جزئيات السيللوز في مادة حاضنة من الليجنين (خشب)، بينما تتألف العظام والأسنان بشكل أساسي من بلورات صلبة غير عضوية في مادة رابطة قاسية عضوية تدعى كولاجين. تظهر هذه المواد المركبة تباين في الخواص - أي أن خصائصها مختلفة عندما تقاس في اتجاهات مختلفة- ينتج اختلاف الخواص بسبب أن الجزء المقوي يكون في شكل ألياف متوضعة باتجاه محوري أي أنها متوضعة في اتجاهات معينة مفضلة بحسب خدمة هذه المادة المركبة. بالإضافة إلى أنه قد يظهر جزء أو أكثر من مكونات المادة المركبة تباين في الخواص نتيجة لبنيتها البلورية. يستغل غالباً في المواد الطبيعية التباين في الخواص الميكانيكية في تشكيل بنية المادة المركبة الطبيعية.

مثلاً إن الخشب أقوى في اتجاه الألياف المتوضعة عادة بشكل موازي لمحور الساق أو الغصن، مما هو في الاتجاهات المستعرضة (العرضية) حيث يتطلب انهيار الغصن بالاتجاه المحوري قوة كبيرة. يكون الغصن في الطبيعة محملاً بثقله مثل عتبة كابولية كما يشد الساق بفعل الريح بطريقة مشابهة مثل هذا الانحناء للعتبة يسبب إجهادات كبيرة على طولها لكن ليس عبر السماكة .



الشكل (1-2) أنواع المواد المركبة الصناعية.

1- المواد المركبة الصناعية:

يعطينا التباين في الخواص مجالاً للتداخل بين عمليات تصنيع المواد المركبة الصناعية من حيث خواص المادة وتصميم مكونات المادة المركبة. تعتبر هذه النقطة هامة من أجل استخدام المواد المركبة حيث تمثل انتقال من الهندسة التقليدية في تصميم الجزء. حيث يأخذ المهندسون في الهندسة التقليدية خواص المادة على أنها موحدة الخواص بشكل عام، وهذا غالباً غير دقيق حتى بالنسبة للمواد التقليدية. فمثلاً الصفائح المعدنية المستخدمة في الطائرة لها خواص مختلفة باتجاه الدرفلة عن خواصها في الاتجاه المتعامد معه أي في اتجاه السماكة، رغم أن هذه الاختلافات صغيرة نسبياً في معظم الحالات.

يوجد في المادة المركبة فرق كبير في خواص الصلادة والمتانة، وذلك بحسب اتجاه تعرض المادة المركبة للحمل المطبق، ويجب أن يؤخذ بالحسبان خلال تصميم المادة المركبة، ليس فقط الاختلاف في المتانة، بل يجب أن يؤخذ أيضاً في الحسبان أثر أي اختلاف في خواص الصلادة على متانة المادة المركبة، وذلك تحت تأثير الحمل الخارجي، يجب أن تنتج المادة المركبة، أخذين بعين الاعتبار الطريقة التي ستحمل بها هذه المادة المركبة أثناء الاستخدام.

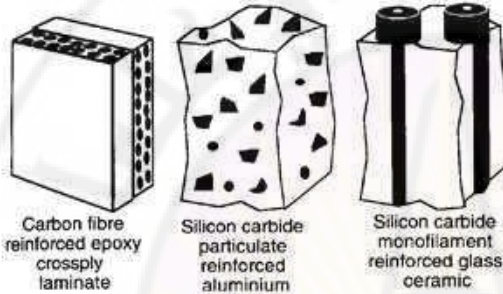
لذلك يجب أن يتم في عملية واحدة تصنيع الجزء المطلوب من المادة المركبة وهذا بالطبع ما يحدث تماماً عندما تنتج المواد الحيوية .

يوجد أنواع متعددة مختلفة للمواد المركبة الشكل (1-2).

يبين الشكل (1-3) أمثلة عن البنية النموذجية للأنواع الثلاثة الرئيسة. تصنف المواد

المركبة المستخدمة في الصناعة بحسب المادة الحاضنة إلى الأنواع التالية:

1-المواد المركبة ذات الأساس البوليميري (PMC): إن المادة الحاضنة البوليميرية هي من أنواع اللدائن المتصلبة بنتيجة التفاعل أو اللدائن المتصلبة بالتسخين.



الشكل (1-3) يبين تخطيطياً بعض المواد المركبة ذات المادة الأساس: البوليميرية المعدنية، والسيراميكية.

تتم عادة تقوية المواد البوليميرية بتضمين هذه المادة البوليميرية بألياف سيراميكية مثل ألياف الزجاج أو الكربون تعطي بشكل عام المادة المركبة الناتجة تباين في الخواص لأن مادة الحاضنة أضعف وأقل صلادة من الألياف .

2- المادة المركبة ذات الأساس المعدني (MMC): ظهر حديثاً اهتمام بالمواد المركبة ذات المادة الحاضنة المعدنية، مثل تقوية الألمنيوم بحبيبات سيراميكية أو ألياف قصيرة سيراميكية و التيتانيوم المحتوي على ألياف طويلة ذات قطر كبير .

التحسن في الخواص (المتانة) للمواد المركبة ذات الأساس المعدني غالباً أقل مقارنة مع المواد المركبة ذات الأساس البوليميري إلا أنه يتحسن أداء المادة المركبة ذات الأساس المعدني في درجات الحرارة العالية. استخدمت المواد المركبة ذات الأساس المعدني في تطبيقات صناعية متعددة كما يتم البحث لتصنيع وتطوير مواد مركبة جديدة ذات أساس معدني من أجل استخدامات محددة، إلا أنه ما يزال الاستخدام التجاري لهذه المواد محدوداً وذلك عندما يقارن بالمواد المركبة ذات الأساس البوليميري (PMC).

3- المواد المركبة ذات الأساس السيراميكي (CMS): تمت دراسة المواد المركبة ذات المادة الأساس (الحاضنة) السيراميكية بحيث الهدف من تصنيع هذه المواد

المركبة هو إضعاف (التقليل) صلابة المادة الحاضنة وذلك بإدخال مكونات أخرى .لا تزال هذه المواد المركبة في المراحل الأولى من التطوير وذلك بسبب الصعوبة في عملية تصنيعهم.

من المهم جداً عند تشكيل مادة مركبة من أجل استخدام معين أن نأخذ بعين الاعتبار خواص المكونات الداخلة في تركيب المادة المركبة. من الخواص التي لها أهمية معينة هي الجساءة (معامل يونغ Young modulus)، الصلادة والمتانة، كما أن كثافة العناصر الداخلة في تركيب المادة المركبة لها أهمية كبيرة في حالات عديدة طالما أن كتلة الجزء من المواد المركبة ذات أهمية استثنائية.

يجب أن يؤخذ بالاعتبار أيضاً الخواص الحرارية مثل قابلية التمدد و الناقلية الحرارية حيث تتعرض المواد المركبة بشكل خاص لتغيرات حرارية (خلال التصنيع أو في الاستخدام). يؤدي عدم التجانس بين معاملات التمدد لمكونات المادة المركبة إلى اجهادات داخلية حرارية متبقية. تؤثر هذه الاجهادات الداخلية الحرارية المتبقية بشكل كبير على الخواص الميكانيكية للمادة المركبة. يبين الجدول (3-1) خواص أنواع متعددة من المواد الحاضنة ومن مواد التقوية وبعض المواد الهندسية والمواد المركبة، يتبين لدى دراسة الخواص المبينة بالجدول أنه يمكن أن نحصل على خواص جيدة في المواد المركبة وذلك عند جمع بعض الخواص الجيدة (مثلاً الصلادة والمتانة الكبيرتان والكثافة المنخفضة). إن الهدف من دراسة مقرر المواد المركبة هو التوصل إلى التنبؤ ومعرفة كيفية الحصول على الخواص الجيدة للمادة المركبة عند دمج المكونات الفردية للمادة المركبة.

4-1 تصميم المواد المركبة: Design of composite materials

إن اختيار تركيب المادة المركبة وينيتها من أجل استخدام معين ليس بالأمر البسيط . يغير إدخال عنصر التقوية إلى المادة الأساس (الحاضنة) من كل الخواص، من الضروري أيضاً أن نأخذ بعين الاعتبار التغيرات الممكن حدوثها في بنية المادة الحاضنة وذلك بسبب وجود عنصر التقوية ضمن المادة الحاضنة، كما أنه قد يؤدي نشوء اجهادات متبقية ضمن المادة المركبة إلى حدوث تأثير كبير على خواص المادة

المركبة- تحدث الاجهادات المتبقية بسبب اختلافات التقلص الحراري لمكونات المادة المركبة وذلك خلال عملية تصنيع المادة المركبة.

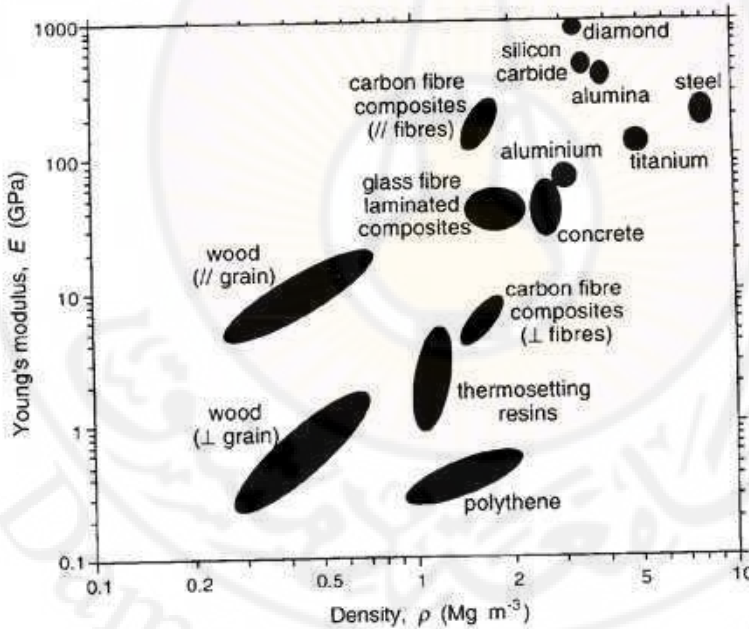
الجدول (1-3) خواص أنواع مختلفة من المواد.

Type of material (example)	Density ρ (Mg m^{-3})	Young's modulus E (GPa)	Tensile strength σ (MPa)	Fracture toughness K_{IC} ($\text{MPa } \sqrt{\text{m}}$)	Thermal conductivity K ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Thermal expansivity α (10^{-6}K^{-1})
Thermosetting resin (epoxy)	1.25	3.5	50	0.5	0.3	60
Engineering thermoplastic (nylon)	1.1	2.5	80	4	0.2	80
Rubber (polyurethane)	1.2	0.01	20	0.1	0.2	200
Metal (mild steel)	7.8	208	400	140	60	17
Construction ceramic (concrete)	2.4	40	20	0.2	2	12
Engineering ceramic (alumina)	3.9	380	500	4	25	8
Wood (load // grain)	0.6	16	80	6	0.5	3
(spruce) (load $\perp$ grain)	0.6	1	2	0.5	0.3	10
General PMC (in-plane) (chopped strand mat)	1.8	20	300	40	8	20
Adv. PMC (load // fibres)	1.6	200	1500	40	200	0
(APC-2) (load $\perp$ fibres)	1.6	3	50	5	40	30
MMC (Al-20%SiC _p)	2.8	90	500	15	140	18

يبين الشكل (1-4) مخطط الخواص التي رسمت بين معامل يونغ E والكثافة ρ تظهر هذه الخواص لمادة معينة بنقطة أو منطقة محددة (مجال)، ثلاث طرق مخطط الخواص من أجل مقارنة الخواص الناتجة عن دمج المادة الحاضنة والعنصر المقوي بمادة مركبة مع تلك المواد التقليدية البديلة .

يمكن أن يحدد بشكل جيد اندماج عنصر التقوية مع المادة الحاضنة وذلك باستخدام " مخطط الخواص من أجل الأداء المطلوب للمادة المركبة الناتجة عن عملية دمج الخواص. عندها يمكن استخدام نموذج مناسب من أجل وضع قيمة أعظمية وقيمة

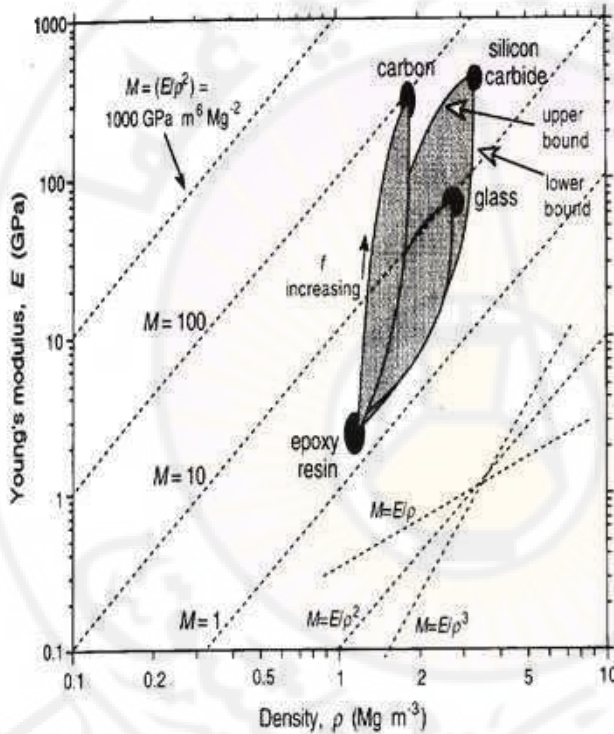
أصغرية للترابط بين مكونات المادة المركبة وبالتالي قيم خواص المواد المركبة الناتجة وذلك من أجل نسبة حجمية محددة لعنصر التقوية. يبين الشكل (1-5) ثلاثة أنواع مختلفة من الألياف والمواد الحاضنة البوليميرية، تصل المنطقة المظلمة بين النقاط التي تمثل الألياف والنقاط التي تمثل المادة الحاضنة. تعطينا المنطقة المظلمة قيم E و ρ الممكن الحصول عليها للمادة المركبة الناتجة من دمج المكونين المبينين في مخطط الخواص (تعطى كثافة المادة المركبة الناتجة ببساطة باعتبار وزن المكونات الداخلة في هذه المادة المركبة)، يمكن أن تحدد الجساءة فقط بأنها متوضعة بين القيمة الأعظمية والقيمة الأصغرية، وذلك إذا لم تعط معلومات أكثر عن توضع الألياف ضمن المادة المركبة.



الشكل (1-4)
المخطط البياني
لقيم معامل يونغ
 E بالنسبة
للكثافة ρ لبعض
المواد الهندسية.

يبين كذلك الشكل (1-5) خطوط تمثل قيم المعاملات E/ρ^3 ، E/ρ^2 ، E/ρ تمثل هذه المعاملات قيم الخواص يجب أخذ القيم الأعظمية لهذه المعاملات من أجل الحصول على الوزن الأصغري للمادة المركبة المصنعة مع الانحراف الأعظمي المسموح فيه ، وذلك من أجل مصنوعات ذات أشكال مختلفة وتحميل محدد. كمثال الجائز نو المقطع العرضي المربع الأخف الذي يقاوم حمل محدد دون تجاوز انحراف معين هو

ذلك الجائز المصنع من مواد ذات القيمة الأعلى للنسبة E / ρ^2 وبحسب الشكل فإنه عند إدخال ألياف الكربون أو ألياف كريد السيلكون ستتحسن النسبة E / ρ وذلك لكلا نوعي المادة المركبة بشكل مشابه. إن المواد المركبة المصنعة بإدخال ألياف الكربون ستكون أكثر فعالية وذلك إذا كانت النسبة E / ρ^3 هي القيمة المناسبة في مخطط الخواص.



الشكل (1-5) مخطط التنبؤ لمعامل يونغ E مع الكثافة ρ للمادة المركبة من ألياف الزجاج أو ألياف كريد السيلكون مع مادة أساس من ريزينات الإيبوكسي. المنطقة المهيمنة تربط قيم E المحورية والعرضية المتنبأ بها للمادة المركبة. تمثل الخطوط القطرية المنقطة القيم الثابتة لثلاثة مزايا (E / ρ) ، (E / ρ^2) و (E / ρ^3) . تم رسم خطوط متعددة من أجل E / ρ^2 وذلك لقيم مختلفة لهذه النسبة.

5-1 مفهوم انتقال الحمل: The concept of load transfer

من الضروري استيعاب مفهوم تشارك الحمل بين المادة الحاضنة والعنصر المقوي وذلك من أجل فهم السلوك الميكانيكي للمادة المركبة. يمكن أن تتغير الإجهادات من نقطة إلى أخرى ضمن المادة المركبة بشكل حاد جداً (بشكل خاص بالمادة المركبة المستخدم فيها للتقوية الألياف القصيرة أو الحبيبات)، لكن يمكن تحديد إجهاد المادة المركبة من تناسب الحمل الخارجي الذي تتحمله النسبة الحجمية لكل مكون بمفرده ضمن المادة

المركبة. يجب أن يساوي الحمل الخارجي إلى مجموع الأحمال التي يتحملها كل مكون من مكونات* المادة المركبة (المادة الأساس الحاضنة- والألياف) بحسب نسبته الحجمية ضمن المادة المركبة وذلك عند الوصول إلى حالة التوازن. وبالتالي تطبق المعادلة التالية:

$$f \cdot \sigma_m + (1 - f) \sigma_f = \sigma_A \quad (1)$$

حيث يمثل كل من (σ_m) اجهاد المادة الأساس الحاضنة و (σ_f) اجهاد الألياف في المادة المركبة المحتوية على نسبة حجمية من عنصر التقوية مساوية إلى f وتتأثر هذه المادة المركبة بإجهاد خارجي قيمته σ_A ، لذلك ستتحمل الألياف نسبة محددة من الحمل والباقي من الحمل الخارجي ستتحملة المادة الأساس الحاضنة وذلك تحت تأثير الحمل الخارجي المطبق على المادة المركبة البسيطة المكونة من عنصرين. سيكون نسب تحمل الحمل غير متعلقة بالحمل المطبق وذلك إذا بقي تجاوب المادة المركبة مرناً. تعتمد نسب تحمل الحمل الخارجي على النسبة الحجمية للعنصر المقوي وعلى شكله وتوضعه وعلى خواص المرونة لكلا مكوني المادة المركبة.

يقوم عنصر التقوية بعمله بشكل فعال إذا أسهم بتحمل نسبة كبيرة من الحمل الخارجي المطبق، مما يؤدي إلى المتانة العالية والجساءة الأكبر للمادة المركبة، وذلك لأنه عادة يكون عنصر التقوية أكثر متانة وجساءة من المادة الأساس الحاضنة. إن تحليل تشارك الحمل ضمن المادة المركبة هو الأساس لفهم السلوك الميكانيكي للمواد المركبة.

*يمكن أن يبقى كل مكون من مكونات المادة المركبة مجهداً وذلك عند عدم تواجد حمل خارجي (هذا بسبب وجود الاجهادات المتبقية). إلا أن هذه الاجهادات يجب أن تكون متعادلة فيما بينها وذلك حسب المعادلة (1) .

الفصل الثاني

المادة الأساس (الحاضنة) ومادة التقوية

Fibers and matrices

- 1- مواد التقوية.
- 2- متانة مواد التقوية.
- 3- المادة الأساس الحاضنة.



2-1- مقدمة: Introduction

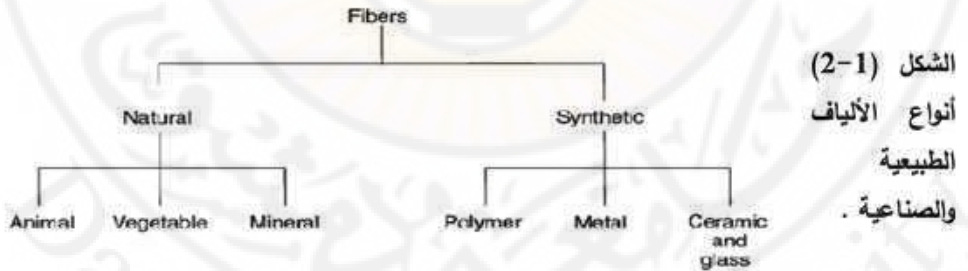
نستعرض في هذا الفصل المادة الحاضنة وألياف التقوية مع استعراض بعض الأمثلة المحددة من أجل الإيضاح. يتوفر الآن تجارياً مجال واسع من مواد التقوية التي هي غالباً على شكل ألياف. تعتمد خواص مواد التقوية بشكل مباشر على ترتيباتها الذرية وعلى العيوب المحتواة، لذلك يجب أن تضبط هذه العيوب أثناء عمليات التصنيع .

قد تكون المادة الحاضنة من المواد البوليمرية، المعادن أو من السيراميك، يعتمد اختيار المادة الحاضنة على الخواص المطلوبة، وعلى الاستخدام المطلوب للمادة المركبة وعلى طريقة تصنيع المادة المركبة. تعتمد خواص المادة الحاضنة على بنيتها المجهرية التي تعتمد بدورها على طريقة التصنيع والمعالجات الميكانيكية والحرارية المطبقة عليها.

قد تكون خواص مادة مركبة معينة حساسة لنوعية السطح البيني (سطح التلامس) بين المادة الحاضنة وعنصر التقوية. وهذا سندرسه في فصل لاحق.

2-2- مواد التقوية: Reinforcements

يتوفر أنواع متعددة من مواد التقوية، حيث إن بعضها مصمم لمادة حاضنة محددة، ويبين المخطط التالي الشكل (2-1) أنواع الألياف الطبيعية والصناعية .

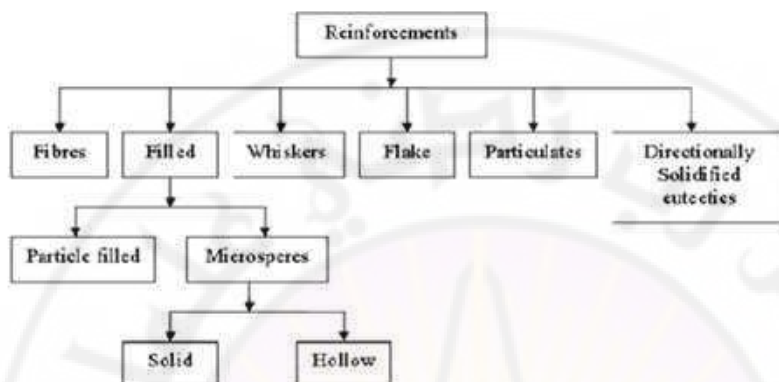


يبين الجدول (2-1) مجموعة من مواد التقوية.

الخصائص النموذجية للألياف مبينة في الجدول (2-2). تتمتع كل أنواع هذه الألياف بجساءة عالية وكثافة منخفضة نسبياً، تستخدم في المواد المركبة ذات الأساس البوليميري

ألياف الكربون بشكل كبير، والألياف الزجاجية والألياف الأراميد العضوية aramid fibres. إن ألياف الكربون مهمة للاستخدام من أجل تصنيع المواد المركبة ذات الأساس

الكربوني (مواد مركبة كربون/كربون). يبين المخطط (2-2) انواع التقوية المستخدمة في المواد المركبة.



الشكل (2-2)
أنواع التقوية
المستخدمة في
المواد المركبة.

يمكن أن تستخدم الألياف السيراميكية والألياف الصغيرة جداً-الشعيرات (whiskers) و الحبيبات لتقوية المواد الحاضنة المعدنية والمواد الحاضنة السيراميكية. الجدول (1-2) بعض الأنواع الشائعة لمواد التقوية.

Form	Size (μm)		Fabrication route	Examples
	<i>d</i>	<i>L</i>		
<i>Monofilaments</i> (large-diameter single fibres)	100–150	∞	CVD onto core fibres (e.g. of C or W)	SiC (SCS-6™) Boron
<i>Multifilaments</i> (tows or woven rovings with up to 14 000 fibres per strand)	7–30	∞	Precursor stretching; pyrolysing; melt spinning	Carbon (HS & HM) Glass Nicalon™ Kevlar™ 49 FP™ alumina
<i>Short fibres</i> (staple fibres aggregated into blankets, tapes, wool, etc.)	1–10	50–5000	Spinning of slurries or solutions, heat treatment	Saffil™ Kaowool Fiberfrax™
<i>Whiskers</i> (fine single crystals in loose aggregates)	0.1–1	5–100	Vapour phase growth/reaction	SiC Al ₂ O ₃
<i>Particulate</i> (loose powder)	5–20	5–20	Steelmaking byproduct; refined ore; sol-gel processing, etc.	SiC Al ₂ O ₃ B ₄ C TiB ₂

الجدول (2-2) خواص الألياف.

Fibre	Density ρ (Mg m^{-3})	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Tensile strength σ_t (GPa)	Failure strain ϵ_f (%)	Thermal expansivity α (10^{-6} K^{-1})	Thermal conductivity k ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
SiC monofilament	3.0	400	0.20	2.4	0.6	4.0	10
Boron monofilament	2.6	400	0.20	4.0	1.0	5.0	38
HM ^a carbon	1.95	axial 380 radial 12	0.20	2.4	0.6	axial -0.7 radial 10	axial 105
HS ^b carbon	1.75	axial 730 radial 20	0.20	3.4	1.1	axial -0.4 radial 10	axial 24
E-glass	2.56	76	0.22	2.0	2.6	4.9	13
Nicalon TM	2.6	190	0.20	2.0	1.0	6.5	10
Kevlar TM 49	1.45	axial 130 radial 10	0.35	3.0	2.3	axial -6 radial 54	axial 0.04
FP TM fibre	3.9	380	0.26	2.0	0.5	8.5	8
Saffil TM	3.4	300	0.26	2.0	0.7	7.0	5
SiC whisker	3.2	450	0.17	5.5	1.2	4.0	100
Cellulose (flax)	1.0	80	0.3	2.0	3.0	—	—

^a High modulus

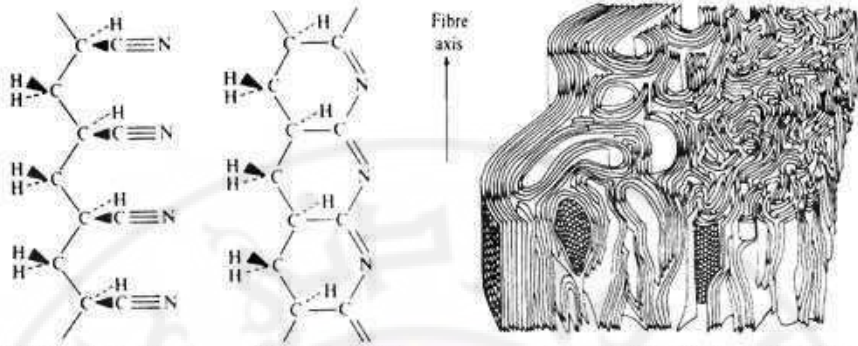
^b High strength

2-2-1- ألياف الكربون : Carbon fibers

تترتب ذرات الكربون في بلورة الغرافيت المفردة في السطوح الأساسية في مجموعات سداسية الذرات وتتماسك معاً بروابط مشتركة قوية، مع قوى ضعيفة فيما بينهم قوى (Van der walls).

الوحدات البلورية الأساسية متباينة الخواص كثيراً، معامل يونغ في المستوى الأساسي) ناظماً على المحور C-) مساوٍ إلى حوالي 1000 GPa ، بينما عامودياً على المستوى الأساسي (موازيًا للمحور C-) مساوٍ فقط إلى 35 GPa .

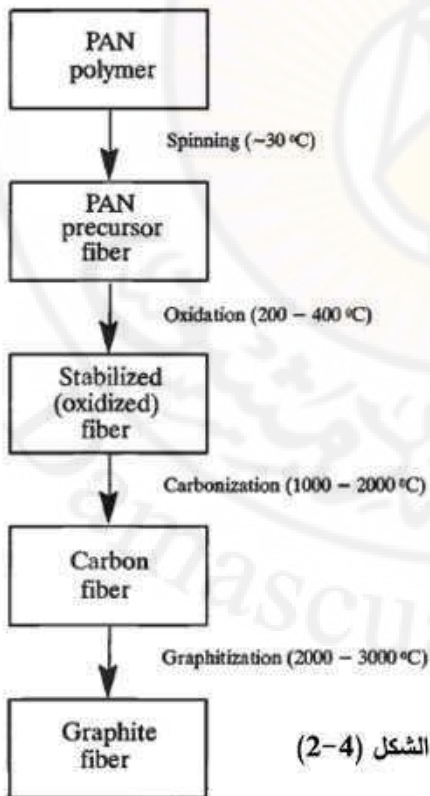
قطر ألياف الكربون يساوي حوالي $8 \mu\text{m}$ ، تتألف ألياف الكربون من بلورات صغيرة من مكونات الغرافيت " التربينية "، الذي هو أحد الأشكال المختلفة للكربون. تشابه ذرات الغرافيت التربينية كثيراً بلورة الغرافيت المفردة. الشكل (2-3) يبين بنية الألياف.



الشكل (2-3) بنية ألياف الكربون. الشكل (2-5) يبين تحول جزيئات PAN إلى بوليمر سلمي صلد.

يتم إنتاج ألياف الكربون باستخدام إحدى الطرق الثلاث الرئيسة للإنتاج وهذه الطرق هي:

(a) من الياف بولي أكريلونيتريل (مادة أساسية في تصنيف ألياف الكربون).



الشكل (2-4)

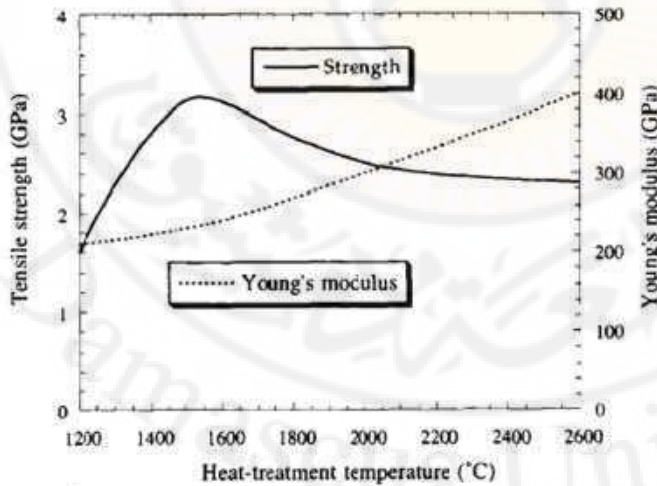
طورت هذه العملية في شركة رولز رويس في مؤسسة الطيران الملكية، المملكة المتحدة من قبل واط وزملاء العمل (1966، 1967).

تعتبر هذه الطريقة من الطرق المفضلة لإنتاج معظم ألياف الكربون جيدة المواصفات. إن مادة البدء هي البوليمر بولي أكريلونيتريل (PAN) يبين الشكل (2-4) مخطط طريقة التصنيع.

تسحب كتلة البوليمر PAN إلى ليف و تمط للحصول على ترتيب سلاسل الجزيئات عندما يسخن الليف الممطوط تتفاعل مجموعات الأزوت الفعال من أجل إنتاج بوليمر سلمي، محتو على صف مؤلف من 6 حلقات أنظر الشكل (2-5).

يسخن الليف الممطوط (مؤثرة عليه قوى الشد) في جو محتو على الأكسجين. يسبب هذا التسخين في جو الأكسجين تفاعلاً كيميائياً أكثر وتشكيل الروابط المشتركة بين الجزئيات السلمية. تختزل بعد ذلك ألياف البوليمر بولي نتريل PAN المؤكسدة لتعطي بنية حلقة الكربون، التي تتحول بالتسخين إلى درجات حرارة مرتفعة إلى جزئي تربيني من الغرافيت. تتألف عادة الألياف من قشرة رقيقة محيطية من المستويات الأساسية ومن نواة ذات بلورات موجهة عشوائياً.

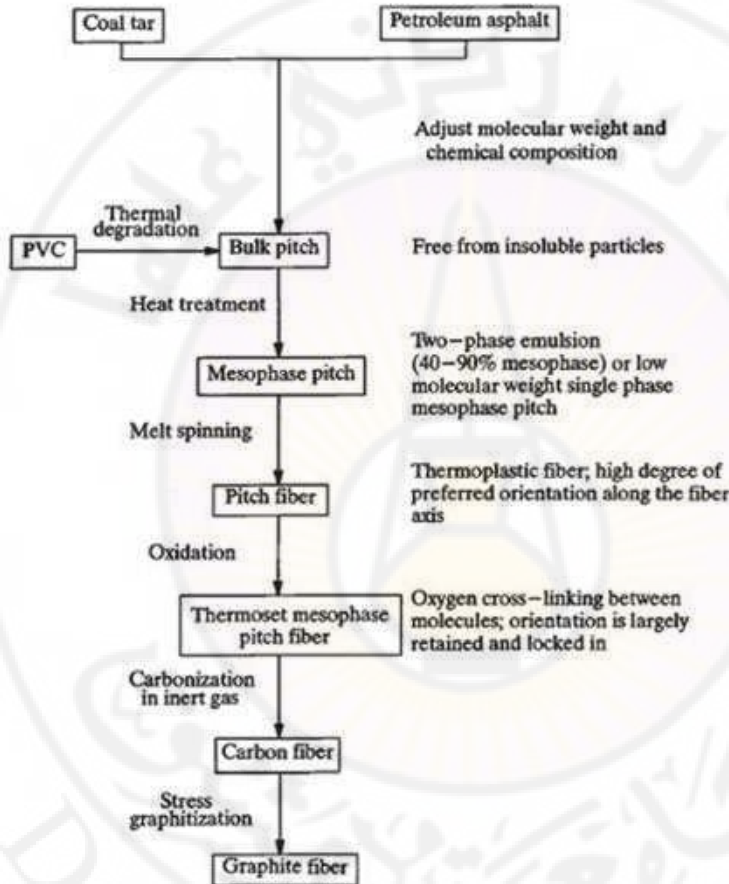
يبين الشكل (2-6) أثر درجة حرارة المعالجة النهائية على خواص ألياف الكربون المعتمدة على البوليمير بولي أكريلونيتريل. يمكن الاختيار المناسب لدرجة الحرارة النهائية من ضبط معامل يونغ ومتانة الشد لألياف الكربون المنتجة. تم إنتاج ألياف كربون قياسية ذات قيم معامل يونغ مساوية إلى ($230 - 240 \text{ GPa}$) وألياف متوسطة ذات قيم معامل يونغ مساوية إلى ($250 - 300 \text{ GPa}$) وألياف مرتفعة المتانة ذات قيم معامل يونغ مساوية إلى ($350 - 500 \text{ GPa}$). إن انفعال الألياف المتمتعة بمعامل يونغ مرتفع حتى تتحطم أقل من الألياف المتمتعة بمعامل يونغ منخفض.



الشكل (2-6) أثر درجة حرارة المعالجة الحرارية على المتانة ومعامل يونغ لألياف الكربون المنتجة من البوليميرات.

انظر جدول (2-2) معامل يونغ بالاتجاه المتعامد مع محور الألياف هو تقريباً مساوٍ إلى 3 - 10 % من قيمة معامل يونغ بالاتجاه المحوري. تميل الخواص الأخرى مثل معامل التمدد الحراري والناقلية الحرارية إلى أن تكون متباينة كثيراً.

(b) من القطران الأوسط الطور: تم وضع طريقة التصنيع هذه من قبل أوتاني (1965)، وتم تطويرها منذ ذلك الحين من قبل عدد من العلماء. وفيما يلي طريقة التصنيع الشكل (2-7):



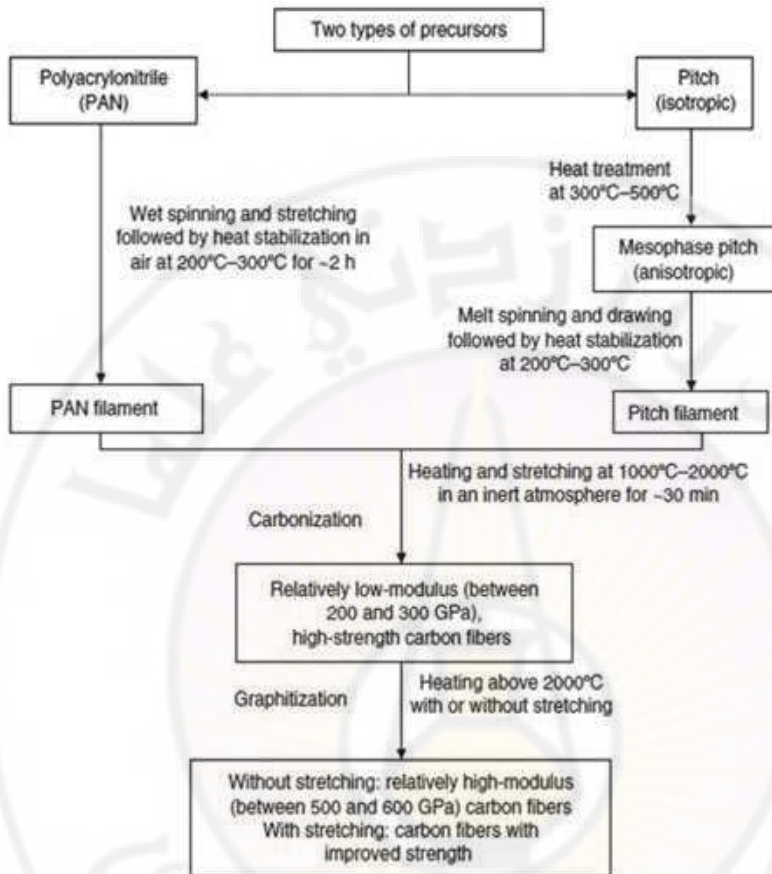
الشكل (2-7)
مخطط طريقة
تصنيع ألياف
الكربون من
القطران.

يتألف القطران من مزيج معقد مؤلف من آلاف الأصناف المختلفة من جزيئات الهيدروكربون والهيتروسيليك، حيث تحدث فيها تفاعلات تكاثف إذا سخنت إلى درجة حرارة أعلى من 350 درجة مئوية التي تؤدي إلى جزيئات ضخمة مسطحة تصطف بشكل متوازٍ بعضها إلى جانب بعض. يسمى هذا غالباً القطران الأوسط الطور وهو عبارة عن سائل لزج فيه الجزيئات مصطفة موضعياً (المقصود سائل بلوري). يثبت بعد ذلك هذا السائل بسرعة من خلال مغزال ذي فتحات عديدة لينتج ما يسمى بالخيط

الأخضر الرطب. يتولد خلال هذه العملية اصطفاك كلي للجزيئات بسبب التأثيرات الهيدرونياميكية في الفتحة. يحول بعد ذلك الخيط إلى الحالة غير القابلة للانصهار وذلك بأكسده بدرجات حرارة أقل من درجة حرارة تليينه. يمكن أن تحول هذه الألياف إلى ليف غرافيت ذي درجة عالية من التوجه المحوري المرغوب وذلك بمعالجته حرارياً دون تطبيق أي إجهاد شد عليه.

تتوجه غدة السطوح الأساسية إشعاعياً كما تصطف هذه السطوح الأساسية على طول محور الليف. تتم عملية التحويل إلى ألياف الغرافيت بدرجات حرارة مساوية تقريباً إلى حوالي 2000°C . البنية الناتجة عن عملية التحويل غرافيتية بشكل كبير، وغرافيتية بشكل أكثر من الألياف المنتجة من الألياف البوليميرية وهذا له دلالات معينة على الخواص الحرارية الفيزيائية، مثلاً تتمتع الألياف المعتمدة بالتصنيع على القطران بناقلية حرارية كبيرة مقارنة بالناقلية الحرارية للألياف الناتجة من البوليمر حتى أن هذه الناقلية هي أكبر من ناقلية معدن النحاس، هذه ميزة هامة لتطبيقات معينة مثل المادة المركبة المكونة من الكربون / كربون المستخدمة لمكابح الطائرات.

(c) بواسطة ترسيب بيروليتك : يمكن إنتاج ألياف الكربون بترسيب البيروليتك للهيدروكربونات من الطور الغازي. استخدم كلاً من الميتان، البنزين، النفثلين، وذلك بالترسيب بدرجات حرارة مساوية إلى حوالي 1100°C . تم وصف العملية من قبل أوبرلاين (1976). بشكل أولاً أنبوب رقيق من الكربون على مادة مناسبة ومن ثم يتم نمو هذا الأنبوب بواسطة آلية الانتشار السطحية. تشكل جزيئات الكربون التريينية في مجموعات حزم مركزة موازية لمحور الليف. أعطى تبيت (1987) التفاصيل التقنية لهذه العملية. يصل طول الليف إلى 50 mm . إن الاستخدام التجاري لهذه الألياف قليل وذلك بسبب طولها القصير والتحكم الضعيف بقطر الألياف إلا أنه نستطيع جعل هذه الألياف غرافيتية بشكل كبير ولها خواص قد تكون جذابة من أجل بعض التطبيقات. يبين الشكل (8-2) مخطط تصنيع ألياف الكربون من القطران ومن بوليمر الـ PAN.



المشكل (2-8)
مخطط تصنيع
ألياف الكربون
من القطران
ومن بوليمر الـ
PAN.

مواصفات ألياف الكربون المصنعة من الـ (PAN) مبينة بالجدول (2-3)، بينما مواصفات ألياف الكربون المصنعة من الـ (القطران) مبينة بالجدول (2-4).

2-2-2 - ألياف الزجاج : Glass fibers

تعتمد معظم ألياف الزجاج على السيلكا (SiO_2 - ثاني أكسيد السليكون) مع إضافات من أكاسيد الكالسيوم، البورون، الصوديوم، الحديد، والألمنيوم. هذه المواد الزجاجية غير متبلورة عادةً، على الرغم من أنه قد يحدث بعض التبلور بعد التسخين المطول لدرجات حرارة مرتفعة، مما يؤدي إلى انخفاض المتانة. يبين الجدول (5 - 2) التركيب النموذجي للأنواع الثلاثة من الألياف الزجاجية الشائعة الاستخدام في المواد المركبة.

الجدول (2-3) مواصفات ألياف الكربون المصنعة من الـ (PAN).

Characteristic	High Strength ^a	Super High Strength ^b	High Modulus ^c
Filament diameter, μm	5.5–8.0	5.4–7.0	8.4
Density, g/cm^3	1.75–1.80	1.78–1.81	1.96
Carbon content, wt%	92–95	99–99 ⁺	99 ⁺
Tensile strength, MPa	3100–4500	2400–2550	1865
Tensile modulus, GPa	25–260	360–395	520
Strain at fracture, %	1.3–1.8	0.6–0.7	0.38
Electrical resistivity, $\mu\Omega\text{m}$	15–18	9–10	6.5
Thermal conductivity, W(mK)^{-1}	8.1–9.3	64–70	120

^a Thornel T-300, T-500, T-600, T-700; Celion 3000, 6000, 1200; AS2, AS4, AS6, IM6; ^b Thornel T-50, Celion G-50, HMS; ^c Celion GY-70

الجدول (2-4) مواصفات ألياف الكربون المصنعة من الـ (القطران).

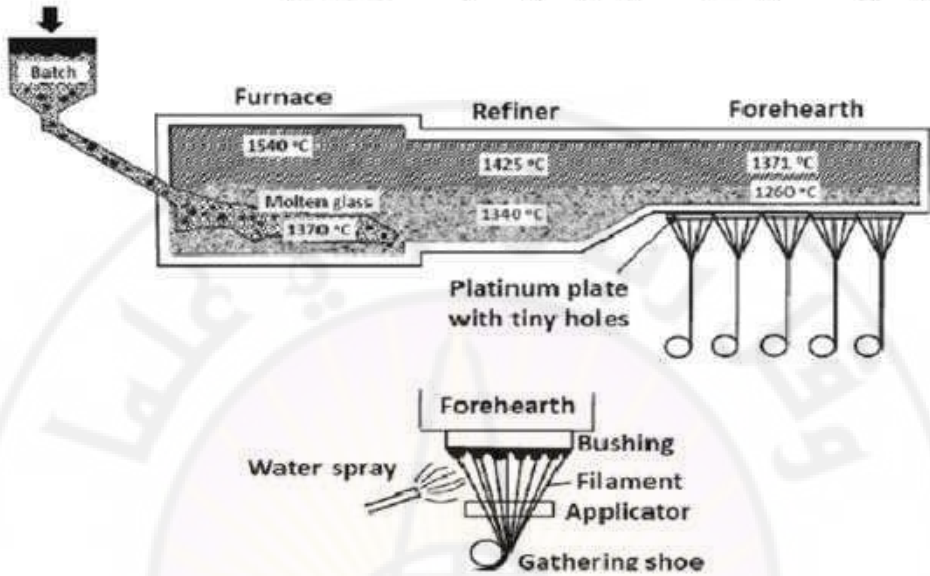
Property	Thornel P555	Thornel P755	Thornel P200
Filament diameter, μm	10	10	10
Density, g/cm^3	2.02	2.06	2.15
Carbon content, wt. %	99	99	99 ⁺
Tensile strength, MPa	1895	2070	2240
Tensile modulus, GPa	380	517	690
Strain at fracture, %	0.5	0.4	0.3
Electrical resistivity, $\mu\Omega\text{m}$	7.5	4.6	2.5
Thermal conductivity, W/mK	110	185	515

إن النوع الأكثر استخداماً هو E – GLASS (E – كهربائي)، يمكن سحب هذا النوع بشكل جيد وله خواص جيدة من حيث المتانة، الصلابة وخواص كهربائية وخواص مقاومة العوامل الجوية.

النوع الثاني هو C-GLASS (C – للتآكل الكيميائي) يفضل هذا النوع من أجل مقاومة للتآكل الكيميائي مقارنةً مع النوع E ولكنه أقل متانةً.

النوع الثالث هو النوع S-GLASS (S – للمتانة) وهو أغلى ثمناً من E-GLASS ولكن متانته أكبر، ويتميز بمقاومة حرارية ومعامل يونغ بشكل أكبر.

إن طريقة تصنيع الألياف الزجاجية هي التالية الشكل (2-9) :



الشكل (2-9) طريقة تصنيع الألياف

تنتج الألياف الزجاجية بصهر المواد الخام في خزان وتغذى إلى سلسلة مواسير من معدن البلاتينيوم، تحتوي كل ماسورة في قاعدتها على منات الثقوب. يتدفق الزجاج المنبثق من خلال هذه الثقوب بتأثير الجاذبية وتسحب ميكانيكياً الألياف الرفيعة للأسفل. تلف الألياف على اسطوانة بسرعة تعادل آلاف الأمتار في الدقيقة. يتم التحكم بقطر الألياف بواسطة ضبط الضغوط للزجاج في الخزان. تعتمد لزوجة الزجاج على تركيب الزجاج وعلى درجة الحرارة، ويعتمد كذلك قطر الألياف الناتجة على قطر الفتحات وعلى سرعة لف الألياف على الأسطوانة. إن قطر الألياف من النوع E-GLASS هو عادة بين $15 - 8 \mu m$.

تحدد المتانة ومعامل يونغ بشكل أولي بواسطة البنية الذرية. يتألف الزجاج الناتج من السيليكا من روابط مشتركة رباعية، يتواجد السيلكون في الوسط والأكسجين على الزوايا تتشارك ذرات الأكسجين بين الروابط الرباعية مؤدية إلى شبكة صلبة ثلاثية الأبعاد. يؤدي وجود عناصر ذات تكافؤ منخفض مثل الكالسيوم، الصوديوم والبوتاسيوم إلى كسر شبكة الترابط وذلك بتشكيل روابط أيونية مع ذرات الأكسجين و بذلك لا تبقى مرتبطة

رابعاً فيما بينها. مما سبق يؤدي إضافة هذه العناصر إلى تقليل المتانة والجساءة إلا أنه يحسن من القدرة على التشكيل. إن ألياف الزجاج متجانسة الخواص وذلك مقارنةً بألياف الكربون حيث يتساوى معامل يونغ العرضي والمحوري. تعتمد المتانة (انظر جدول 2 - 2) على شروط عملية التصنيع وعلى جو الاختبار. إن متانة ألياف الزجاج من النوع E مباشرةً بعد عملية السحب مساوية إلى 3.5 GPa بشرط أن يتم تناولها بشكل حذر لتجنب ضرر السطح كما إن التغيرات في متانتها قليلة. تنخفض المتانة في الجو الرطب وذلك بسبب امتصاص سطحه للماء، ويحدث انخفاض حاد في متانتها إذا تعرض السطح إلى حمض غير عضوي .

يحدد المتانة عامل رئيسي وهو الضرر الذي تتعرض له الألياف عند احتكاك بعضها ببعض خلال عمليات التصنيع. تعالج عادة ألياف الزجاج خلال المرحلة الأولى للتصنيع وذلك من أجل تقليل الضرر المذكور سابقاً. تتم معالجة الألياف بتغليف هذه الألياف بطبقة طلاء رقيقة، ويتم الطلاء برش الألياف بماء يحتوي على بوليمر مستحلب.

يؤمن الطلاء عدداً من الميزات وهي:

- 1- يحمي الطلاء سطح الألياف من الضرر .
 - 2- يمكن الطلاء من حزم الألياف بعضها مع بعض من أجل سهولة التعامل معها وتصنيعها.
 - 3- يؤمن الطلاء تزييت الألياف وبذلك يمكن أن تقاوم الاهتراء الاحتكاكي خلال عمليات التصنيع .
 - 4- يؤمن الطلاء مقاومة الألياف من تأثيرات الكهرباء الساكنة حيث يضيف خواص عدم الشحن بالكهرباء الساكنة .
 - 5- يؤمن الطلاء رابطة كيميائية بين سطح الألياف الزجاجية والمادة الحاضنة مما يؤدي إلى تقوية متانة الارتباط بين الطورين في المادة المركبة (الألياف/المادة الحاضنة).
- يتم تأمين الميزات السابقة بمكونات مادة الطلاء حيث تحتوي مادة الطلاء على المكونات التالية :

- 1- مادة بوليميرية تشكل غشاء رقيق من البوليمير مثل البولي فينيل أسيتات توفر هذه المادة الحماية أثناء تناول الألياف.
- 2- مواد من نوع محدد للترتيب.
- 3- عامل ترابط لتأمين الترابط بين الألياف والمادة الحاضنة وغالباً عامل الترابط هذا هو أورغانواوسلين.

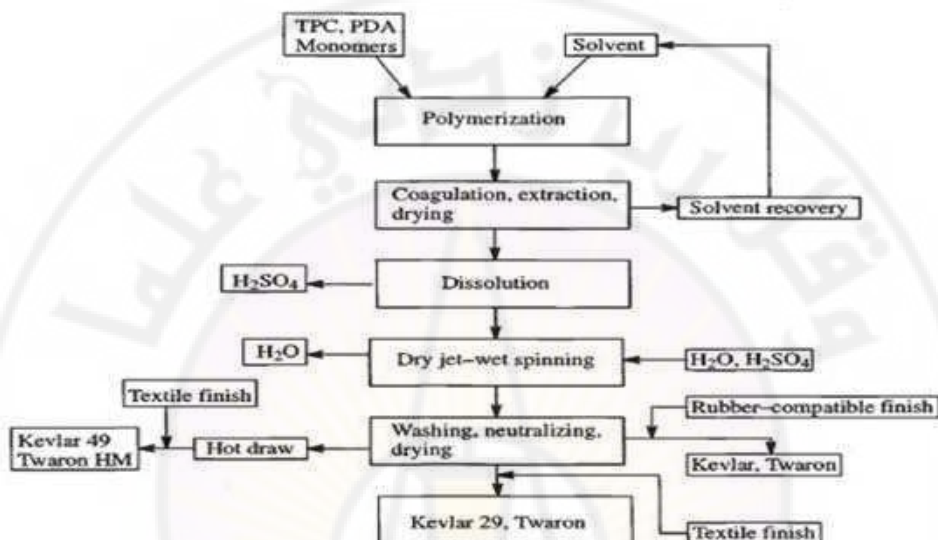
جدول (2-5) تركيب وخواص آلاف الزجاج.

	E-glass	C-glass	S-glass
<i>Composition (%)</i>			
SiO ₂	52.4	64.4	64.4
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	14.4	4.1	25.0
CaO	17.2	13.4	
MgO	4.6	3.3	10.3
Na ₂ O + K ₂ O	0.8	9.6	0.3
B ₂ O ₃	10.6	4.7	—
BaO	—	0.9	—
<i>Properties</i>			
ρ (Mg m ⁻³)	2.60	2.49	2.48
K (W m ⁻¹ K ⁻¹)	13	13	13
α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	4.9	7.2	5.6
σ_a (GPa)	3.45	3.30	4.60
E (GPa)	76.0	69.0	85.5
T_{max} (°C)	550	600	650

3 - 2 - 2 - الألياف العضوية : Organic fibers

طورت معظم ألياف البوليمر الهامة ذات معاملات المرونة E المرتفعة من البولي أميدات العطرية (بوليمر ذو بنية مترابطة بواسطة الأميد أو اليتوميد) وسميت ألياف الأراميد aramid fibres. طورت البولي أميدات العطرية أول مرة من قبل دويونت تحت اسم تجاري KEVLAR كيفلار. يستخدم البوليمر البسيط -بوليثين- كمادة أساسية من أجل تصنيع هذه الألياف. تتألف البلورات المفردة لسلاسل البولي ثين الممتدة من سلاسل كربون بشكل متعرج zig-zag مصطفة بشكل متراص. يساوي معامل يونغ لهذه البلورات حوالي 220 GPa وذلك بالإتجاه الموازي لمحور السلسلة. يمكن تحقيق الترتيب الجيد للسلاسل في الليف وذلك بالسحب والشد (المط) لليف وعندها يمكن الحصول على معامل يونغ مساوي إلى 70 GPa.

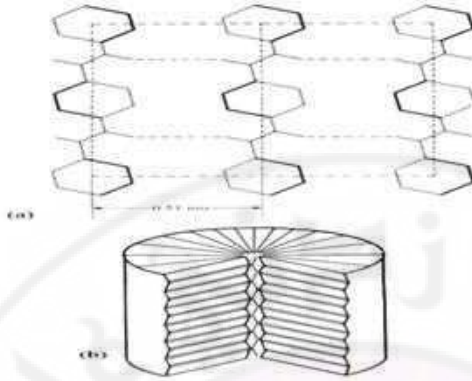
معامل يونغ بالنسبة لألياف الكيفلار KEVLAR بالاتجاه المتعامد على محور الليف أقل بكثير من معامل يونغ باتجاه محور الليف وذلك بشكل مشابه لألياف الكربون. إن طريقة تصنيع ألياف الأراميد هي التالية والمبينة تخطيطياً بالشكل (10-2).



الشكل (10-2) يبين تخطيطياً طريقة تصنيع ألياف الأراميد.

تنتج ألياف الأراميد بعمليات البثق والدوران السريع بالمغزال (النبذ عن المركز بالقوة الطاردة المركزية). يمرر محلول البوليمر في مادة مذيبة مناسبة (مثال حامض الكبريت) من خلال مغزال يدور بسرعة كبيرة وذلك من أجل توليد درجة عالية من التوجيه. يتم ترتيب وتنظيم الجزيئات بعد إزالة المادة المذابة وذلك بواسطة المعالجة الحرارية التلدين annealing. تشكل جزيئات البوليمر صفائح متينة. تصطف سلسلة الجزيئات الممتدة بشكل موازي إلى محور الليف و يوجد ترابط ضعيف للهيدروجين بين الجزيئات داخل السلسلة الشكل (11-2).

ألياف الأراميد مقبنة الخواص كثيراً (انظر جدول 2-2) تنقسم الألياف إلى ليفات أنعم بسبب رابطة سلسلة الهيدروجين الضعيفة، يشاهد ذلك كثيراً خلال عملية تحطم المواد المركبة المحتوية على ألياف كيفلار أثناء تحميلها للتحطم.



الشكل (2-11) (a)

يظهر ترابط الهيدروجين

داخل السلسلة لجزيئات

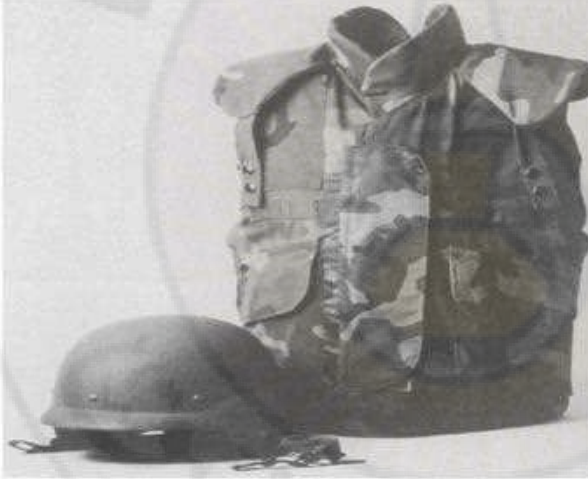
poly-p-phenylene

(b) terephthalamide

بنية الكيفلار مظهراً نظام

التوضع القطري.

استخدمت المواد المركبة البوليميرية مع نسيج الكيفلر وكذلك نسيج ألياف الكيفلر من أجل الستر المقاومة للرصاص ومن أجل خوذة الجنود الشكل (2-12).



الشكل (2-12) خوذة مقواة

بألياف الأراميد (الكيفلر) وسترة

مضادة للرصاص مصنعة من

ألياف الأراميد (الكيفلر).

يوجد عدد من الألياف العضوية الطبيعية المفيدة الاستخدام كمواد تقوية. أكثر الألياف لطبيعية شيوعاً هو السيللوز الذي يشكل بواسطة بلمرة جزيئات الغلوكوز. إن الخشب من أكثر المواد المركبة الطبيعية شيوعاً وهو يتألف بشكل أساسي من ألياف بلورية للسيللوز في مادة أساس حاضنة مكونة من نصف سيللوز غير متبلور أو متبلور جزئياً من الليجين. تصطف هذه الألياف السيللوزية الطبيعية في تشكيلات معقدة متعددة على جدران الخلية في نباتات مختلفة .

يمكن أن تستخلص ألياف السيللوز (أو الليفيات) من عدد من النباتات مثل القطن، كتان والقنب والخشب. إن قيم مواصفات ألياف الكتان المبينة في الجدول (2-2)

تقارن بشكل جيد جداً مع الكثير من الألياف الاصطناعية، خصوصاً إذا كانت الكثافة مهمة. على الرغم من أن إنتاج المواد المركبة التي تعتمد على هذه الألياف الطبيعية محدود جداً إلا أنه قد يزداد استخدامها في المستقبل .

4 - 2 - 2 : ألياف كربيد السيلكون : Silicon carbide

تشابه بنية مادة كربيد السيلكون بنية الألماس. هذه المادة جذابة للاستخدام كمادة تقوية نظراً لكثافتها المنخفضة ولصلادتها ومتانتها المرتفعتان بالإضافة لثباتها الحراري الجيد ولناقليتها الحرارية الجيدة. إن كربيد السيلكون أسهل صنعاً من الألماس ويمكن أن ينتج بكميات كبيرة بشكل بوفرة. إلا أن إنتاج الألياف من كربيد السيلكون بكميات كبيرة أكثر إشكالاً، وقد تم تطوير طرق مختلفة لإنتاج ألياف كربيد السيلكون وهذه الطرق هي التالية:

1- CVD الشعيرات الأحادية : تسمى الألياف بالشعيرات الأحادية عندما تكون الألياف كبيرة القطر الذي يساوي تقريباً ($100-150 \mu m$). تصنع هذه الألياف بطريقة CVD طريقة ترسيب البخار الكيميائي على نواة صغيرة من مادة الليف، تكون هذه النواة عادة من مادة الكربون (قطرها مساوٍ تقريباً إلى $30 \mu m$) أو من مادة التتغستين (قطرها مساوٍ تقريباً $10 \mu m$). تغذى نواة الألياف باستمرار من خلال حجرة تفاعلات، ويمرر من خلال الحجرة مادة سيلكونية محتوية على كربون غازي مثل ميثيل السيلكون ثلاثي الكلور (CH_3SiCl_3). تسخن نواة الألياف عادة بتمرير تيار كهربائي من خلالها، ويتفكك الغاز حرارياً على سطح الليف ليرسب SiC. يتم ترسيب مادة معينة على الطبقات السطحية وذلك من أجل تحسين مقاومة العطب بنتيجة تناول الألياف، وكذلك من أجل التجانس والترابط مع المادة الأساس الحاضنة (عادة معدنية، شبه معدنية أو سيراميكية)، يتم ترسيب المادة السطحية غالباً في حجرة تفاعل ثنائية. مثلاً تطبق بشكل عام طبقات الغرافيت. يوجد دراسات متعمقة حول طبيعة وآثار التفاعلات على سطح التلامس بين الألياف والمادة الحاضنة المعدنية وخصوصاً من خلائط التيتانيوم المعدنية .

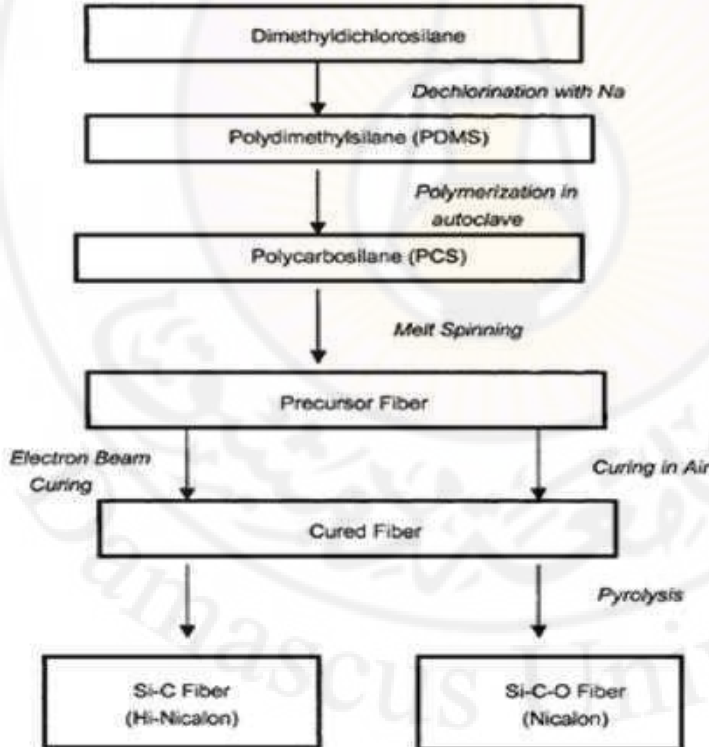
تستخدم عملية الإنتاج هذه تجارياً لإنتاج ألياف البورن وألياف كربيد السيلكون SiC.

2- PCS متعدد الشعيرات : تصنع الألياف التي هي من كربيد السيلكون SiC

بواسطة محاكاة طريقة تصنيع ألياف الكربون من البوليمر .

تنتج ألياف قطرها مساوٍ إلى حوالي $15\ \mu\text{m}$ وذلك بطريقة مشابهة باستخدام السيلكون متعدد الكربون (PCS) تسمى أفضل الألياف المنتجة بواسطة هذه الطريقة تجارياً نيكالون "Nicalon" الذي تم تطويرها بالبدء من قبل Yojima في اليابان (78 - 1976).

إن طريقة تصنيع ألياف كربيد السيلكون هي التالية المبينة في الشكل (2-13) :
ينتج السيلكون متعدد الكربون عبر سلسلة من الخطوات الكيميائية تتضمن تفاعلات متعددة ومن ثم التسخين في أوتوكلاف للحصول على السيلكون متعدد الكربون .



الشكل (2-13) طريقة
تصنيع ألياف كربيد
السيلكون .

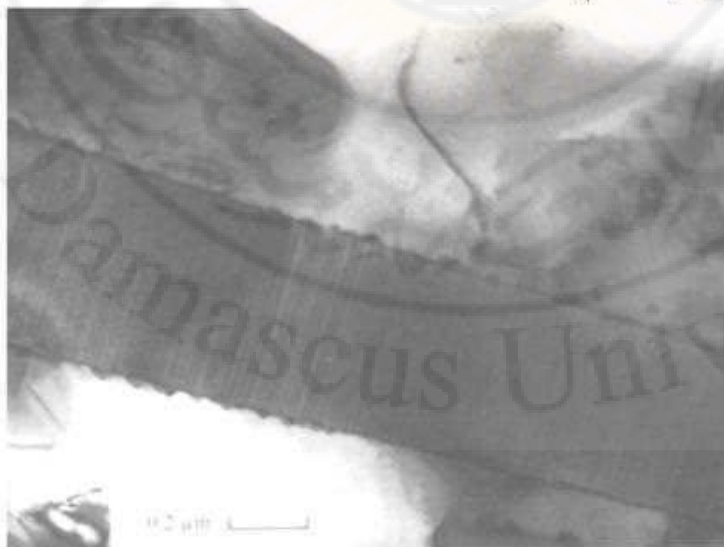
يتم بعد ذلك غزل السيلكون متعدد الكربون إلى ألياف تعامل بعد ذلك بواسطة الحرارة العالية بدرجة حرارة حتى $1300\ ^\circ\text{C}$. تحتوي الألياف المنتجة على نسبة من SiO_2

وكربون حر بالإضافة إلى SiC. تستخدم طرق مشابهة لإنتاج ألياف نترائيدات السيلكون (Si_3N_4).

3- الألياف الصغيرة جداً، الشعيرات -Whiskers:

تكون أفضل الخواص الميكانيكية المتوقعة لعنصر تقوية مكون من بلورة مفردة على شكل ألياف صغيرة جداً (شعيرات) -Whiskers. الجدول (2-2) يبين الخواص الميكانيكية لهذه الشعيرات. إن الشعيرات عبارة عن قضبان أحادية البلورة خالية من العيوب وهي صغيرة الأبعاد (قطرها مساوٍ إلى $0.1-1 \mu\text{m}$)، أنتجت الشعيرات من تشكيلة واسعة من المواد وذلك بكميات صغيرة لأهداف الأبحاث. يتم الإنتاج التجاري لكميات كبيرة في اليابان ومحدود فقط بشعيرات SiC.

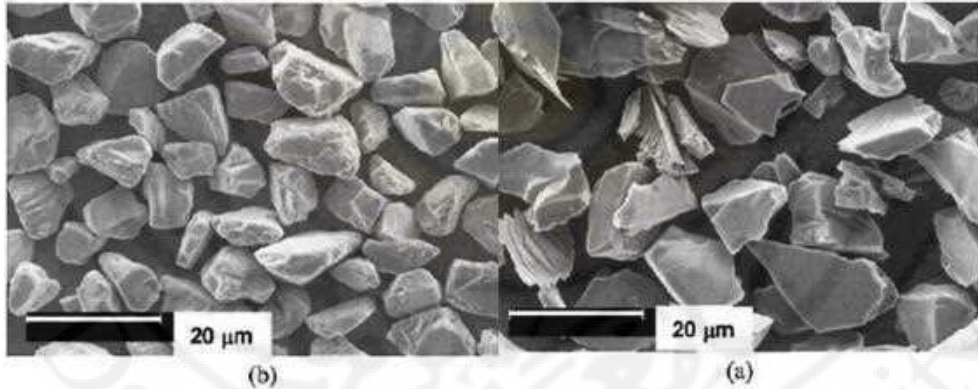
يتم نمو شعيرات $\alpha\text{-SiC}$ من SiC المبخر باستخدام محفز و ترسيب شعيرات $\beta\text{-SiC}$ بواسطة الإرجاع بالهيدروجين للمركب CH_3SiCl_3 . تتمتع الشعيرات المبلورة بالمتانة العالية جداً كنتيجة مباشرة لعدم وجود الإنخلاعات. يبين الشكل (2-14) صورة بالمجهر الإلكتروني للشعيرة. تراجع استخدام الشعيرات (تقوية المواد السيراميكية والمعادن) وذلك بسبب مخاطر التعامل مع هذه الشعيرات وتوليدها مرض السرطان (بشكل مشابه لألياف الأسبستوس نظراً لتماثل أبعادهما).



الشكل (2-14)
يبين صورة شعيرة
SiC مأخوذة
بالمجهر الإلكتروني
وتظهر البنية
الداخلية المزبوجة.

4- الحبيبات - Particulate:

تعطي الحبيبات والبودرة مميزات من حيث التكلفة و سهولة التناول والتصنيع. تستخدم هذه الحبيبات في تشكيلة واسعة من المواد المركبة، وغالباً كمادة حشو رخيصة الثمن. تحتوي المواد الهندسية المطاطية والبوليميرية على إضافات كمادة حشو مثل التالك، الغضار، الميكا، السيلكا، والسيلكات. إن الخواص الميكانيكية للحبيبات والبودرة ذات أهمية قليلة في معظم الحالات وتستخدم كمواد رخيصة الثمن، وتقليل الكثافة في حالات أخرى هو الهدف الأساسي. إلا أنه يوجد حالات مثل MMC حيث نحتاج إلى حبيبات عالية الصلادة والمتانة متلائمة كيميائياً مع المادة الحاضنة. المثال الأكثر شيوعاً حبيبات SiC ، المنتشرة حالياً للاستخدام التجاري كمادة حاككة وكذلك لتقوية خلائط الألمنيوم يبين الشكل (15-2) الحبيبات الزاوية والحبيبات المدورة. يكمن الاهتمام الرئيسي هنا بالتكلفة، طالما يتركز الاهتمام الأكثر على العامل الاقتصادي لإنتاج كمية كبيرة من القطع.



الشكل (15-2) يبين صورة بالمجهر الإلكتروني لحبيبات التقوية من كريد السيلكون (a) الحبيبات الزاوية. (b) الحبيبات المدورة.

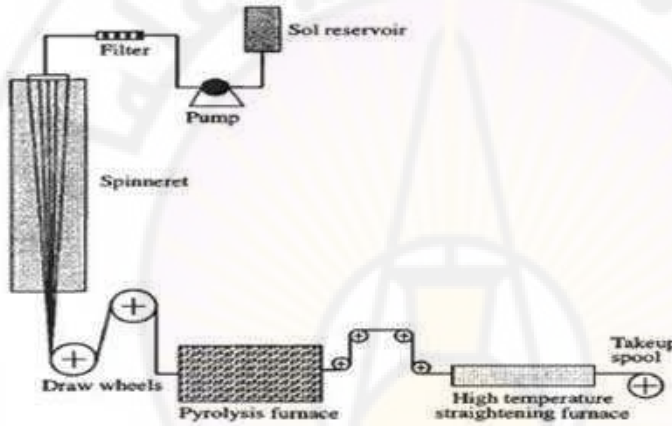
5-2-2: ألياف أكسيد الألمنيوم وسيليكات الألمنيوم :

Alumina and aluminosilicates

تصنع ألياف الأكاسيد غير العضوية من اندماج أكسيد الألمنيوم (الألومينا) مع السيلكا. تشكل الألياف المحتوية على نسبة تقريبية مساوية إلى 50% WT وزناً من كل من السيلكا والألومينا الكمية الأضخم من الألياف الحرارية (الألياف المقاومة لدرجات الحرارة

المرتفعة)، التي تستخدم لأهداف العزل لدرجات الحرارة المرتفعة. مثال ذلك الألياف الزجاجية للعزل الحراري. إن الألياف الألومينا ذات محتوى السيلكا القليل جداً أكثر كلفة للتصنيع إلا أنها تتمتع بمقاومة أكبر لدرجات الحرارة المرتفعة وهي أكثر متانة وجساءة.

1-الشعيرات المتعددة : تصنع ألياف أكسيد الألمنيوم المستمرة بطريقة السائل الرقيق القوام. ينبثق مزيج المعلق المائي لأكسيد الألمنيوم الحبيبي على شكل ليف ثم يحرق. يبين الشكل (2-16) مخطط تصنيع ألياف الألومينا.



الشكل (2-16)

مخطط تصنيع ألياف

الألومينا.

يصنع هذا الليف من حبيبات ناعمة ($0.5 \mu m$) من أكسيد الألمنيوم α ولها قطر ($20 \mu m$)، تم تصنيع هذه الألياف من قبل شركة دو بونت تحت اسم تجاري - FP Fibre -.

تستخدم هذه الألياف بكثرة في المواد المركبة ذات الأساس المعدني. إن الاستخدام التجاري لهذه الألياف محدود نظراً للعوامل الاقتصادية، ولمحدودية التصنيع، ومشاكل التفاعل على سطح التلامس بين الألياف والمادة الحاضنة (السطح البيني)، بشكل خاص في المواد المركبة ذات المادة الأساس من خلاط التيتانيوم.

2-الألياف القصيرة: تصنع عادة ألياف سيليكات الألومين من الكاولين أو مادة غضارية شبيهة. تصهر المادة الغضارية وتسكب إلى داخل نفثة غازية أو تسكب على قرص دوار بشكل سريع. تُنتج كلا العمليتين مواد ليفية، مع بعض الحبيبات، يعطي الدوران السريع ألياف أطول.

يتم إنتاج ألياف الألومينا ببثق المحاليل المركزة لمركبات الألمنيوم التي تحول إلى أكسيد. صنعت هذه الألياف تحت أسم تجاري (Saffil) - شعيرات آمنة safe filament - تم تسويق هذه الألياف بشكل أساسي ليستعاض بها عن الأسبستوس. يدخل في تركيب هذه الألياف حوالي 5% سيلكا وذلك من أجل المحافظة على ثبات البنية البلورية لأكسيد الألمنيوم δ . تتركز هذه السيليكا على حدود البلورات وعلى السطح الحر للليف. يستخدم هذا النوع من الألياف بشكل كبير لتقوية الألمنيوم في المواد المركبة ذات المادة الأساس من خلاط الألمنيوم.

2-3 متانة مادة التقوية: The strength of reinforcements

يبين الجدول (2-2) متانة الألياف على الشد. يجب أن نأخذ بعين الاعتبار عدداً من العوامل عند تقدير متانة الألياف على الشد. تمت الإشارة لاحقاً باختصار لبعض هذه العوامل.

2-3-1 Thermal stability : الثبات الحراري

A-الألياف الكربونية:

تتميز ألياف الكربون بخواص استثنائية بدرجات الحرارة المرتفعة وذلك حال عدم وجود الهواء أو أي بيئة مؤكسدة، يبين الشكل (2-3) أن ألياف الكربون تسخن إلى درجة حرارة مساوية إلى 2600°C . تحتفظ ألياف الكربون بخواصها المتفوقة بشكل جيد فوق درجة حرارة مساوية إلى 2000°C . إن ميزة مقاومة درجات الحرارة المرتفعة غير مفيدة في تطبيقات المواد المركبة ذات الأساس البوليميري وذلك لأنه لا يمكن استخدام معظم المواد الحاضنة البوليميرية فوق أو حوالي 200°C ، كما أنه لم تستخدم ألياف الكربون في المواد المركبة ذات الأساس المعدني، وذلك لأنها تتفاعل كيميائياً خلال عملية تصنيع المادة المركبة. تتمتع المواد المركبة كربون / كربون بمقاومة جيدة لدرجات الحرارة المرتفعة وذلك بشرط أن تكون معزولة عن البيئة المؤكسدة. حيث تتحل بسرعة ألياف الكربون في درجات الحرارة المرتفعة عند وجود الأكسجين.

B-الألياف الزجاجية:

تتلين ألياف الزجاج المعتمدة على السيلكا بدرجة حرارة 850°C ، إلا أنه تتناقص بشدة المتانة ومعامل يونغ فوق درجة الحرارة 250°C لألياف الزجاج النوع E. إن انخفاض خواص ألياف الزجاج لا يعتبر مشكلة للمواد المركبة ذات الأساس البوليمري، لأن درجة حرارة استخدامها أقل من درجة حرارة تلين الألياف، إلا أنه تحد درجة حرارة تليها من استخدامها في العديد من المواد المركبة غير العضوية.

C-ألياف الأراميد:

على الرغم من أن الثبات الحراري لألياف الأراميد أقل من الثبات الحراري لكلا ألياف (الزجاج والكربون) إلا أن هذا الثبات الحراري كافٍ من أجل معظم المواد الحاضنة البوليمرية. بالإضافة إلى الاحتفاظ بالخواص خلال الخدمة في درجات حرارة المرتفعة، من الضروري أن لا يحدث تدهور في خواص الألياف خلال عملية تصنيع المادة المركبة. إن خواص الألياف الزجاجية عكوسة مع درجات الحرارة، إلا أن تدني خواص ألياف الأراميد غير عكوسة وذلك بسبب التغيرات في بنيته الداخلية. يجب أن يؤخذ الحذر من أن لا تتناقص خواص الألياف مثل ألياف كيفلار (kevlar) خلال المعالجة بالتسخين للمادة الحاضنة (الريزونات - الراتنجات المتصلبة حرارياً) من أجل تصلبها وفي عمليات صهر البلاستيك الحراري.

بالإضافة إلى تأثير ألياف الأراميد بالأكسدة بدرجات الحرارة فإن هذه الألياف تتحلل (تتفكك) عندما تتعرض لضوء الشمس. يؤثر كلا الضوء المرئي والأشعة فوق البنفسجية على هذه الألياف ويؤديان إلى إزالة لون الألياف وإلى خفض خواصها الميكانيكية. يمكن تجنب تحلل (تفكك) الألياف بطلاء سطح المادة المركبة المستخدمة ضمنها الألياف بطبقة ضعيفة الامتصاص للضوء.

D-الألياف السيراميكية:

تتمتع الألياف السيراميكية من الأكاسيد، النتريدات والكربيدات بدرجات انصهار عالية جداً. مثلاً ينصهر Al_2O_3 في درجة حرارة مساوية إلى 2050°C ، و SiC ينصهر في درجة حرارة مساوية إلى 2700°C . تحتفظ هذه الألياف بخواصها بدرجات الحرارة المرتفعة طالما أنه لا يوجد تفاعلات ضارة مع المادة الحاضنة، وذلك خلال

عملية تصنيع المادة المركبة وأثناء استثمار المادة المركبة. تركزت حالياً أبحاث كثيرة حول الحاجة إلى حماية الألياف من التفاعلات الضارة، وطوريت تشكيلة من المعالجات بتغطية (طلاء) الألياف.

2-3-2 المتانة على الضغط: Compressive strength

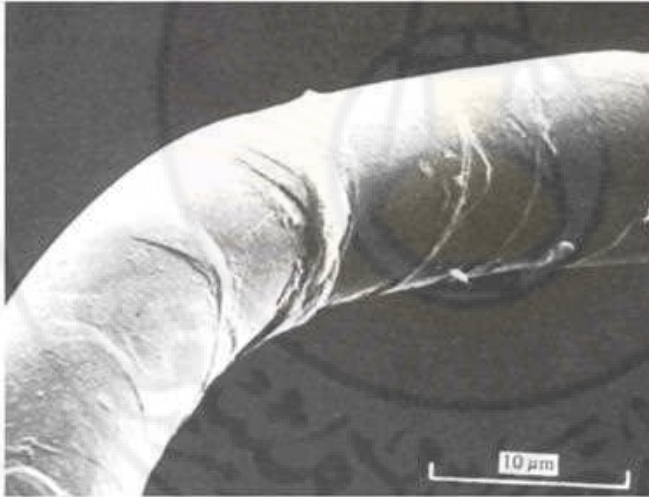
تتم معرفة متانة الألياف على الضغط باستنتاج متانة الانضغاط من سلوك المواد المركبة المصنعة باستخدام هذه الألياف، حيث إن قياس القوة الضاغطة المحورية للألياف صعب جداً، لذلك لم ترد بيانات متانة الانضغاط للألياف في الجدول (2-2). تحدد القوة الضاغطة المحورية للمادة المركبة ذات الألياف أحادية الاتجاه بواسطة أسلوب تحدد الألياف. هذا بالمقارنة إلى قوة الشد التي تعتمد بشكل رئيسي على قوة شد الألياف. قد يحدث الفشل تحت تأثير الأحمال الضاغطة بأشكال مختلفة متضمنة الهصر أو القص، إلا أن من أهم أشكال الفشل في المادة المركبة هو تحدد أولر Euler buckling للألياف المفردة. يحدث مثل هذا التحدد عندما يصبح الليف المعرض للضغط غير مستقر من حيث الحركة الجانبية للمنطقة الوسطى لليف. يعطى الإجهاد المطبق على القضيب الأسطواني في بداية التحدد بالمعادلة التالية:

$$\sigma = \frac{\pi^2 E}{16} \left(\frac{d}{\ell} \right)^2 \quad (2-1)$$

حيث E معامل يونغ، d = القطر، ℓ = طول الليف. سيكون التحدد راجحاً للحدوث عندما يكون لليف معامل أبعاد مرتفع aspect ratio $(\frac{\ell}{d})$. من الصعب التنبؤ بتحدد الألياف في المواد المركبة حيث يتم تأمين الثبات الجانبي بواسطة المادة الحاضنة حتى عندما تكون المادة الحاضنة ذات صلادة منخفضة نسبياً (عند عدم وجود مادة حاضنة، مثلاً حالة الحبال، المشكلة من مجموعة ألياف تكون مقاومتها للتحدد ضعيفة جداً). من الجدير بالملاحظة أن المواد المركبة المحتوية على ألياف ذات قطر

كبير تكون أكبر مقاومة للتحدب الموضعي بتأثير الحمل الضاغط وهذا سيزيد مقاومة الفشل الماكروي.

إن قطر الليف ليس العامل المعتبر الوحيد فمثلاً " متانة الضغط المحورية لصفحة أحادية الاتجاه مصنعة من ألياف Kevlar تشكل فقط 20 % من متانة الشد، بينما تتساوى تقريباً متانة الشد ومتانة الضغط لكلا ألياف الكربون والألياف الزجاجية (ذات الأقطار المماثلة لألياف Kevlar). يعود سبب ذلك إلى أن بنية ألياف الأراميد (شكل 11-2 وشكل 17-2). يحدث فيها عند الانضغاط التشوه المرن لدرجة محدودة (الروابط المشتركة القوية) قبل أن يتم التغلب على قوى " فان در فالز " الضعيفة بين الجزيئات المترابطة ويحدث التحطم. يؤدي ذلك إلى التحدب وتشكيل عقدة عند تطبيق أحمال خفيفة، كما هو مبين في الشكل (17-2).

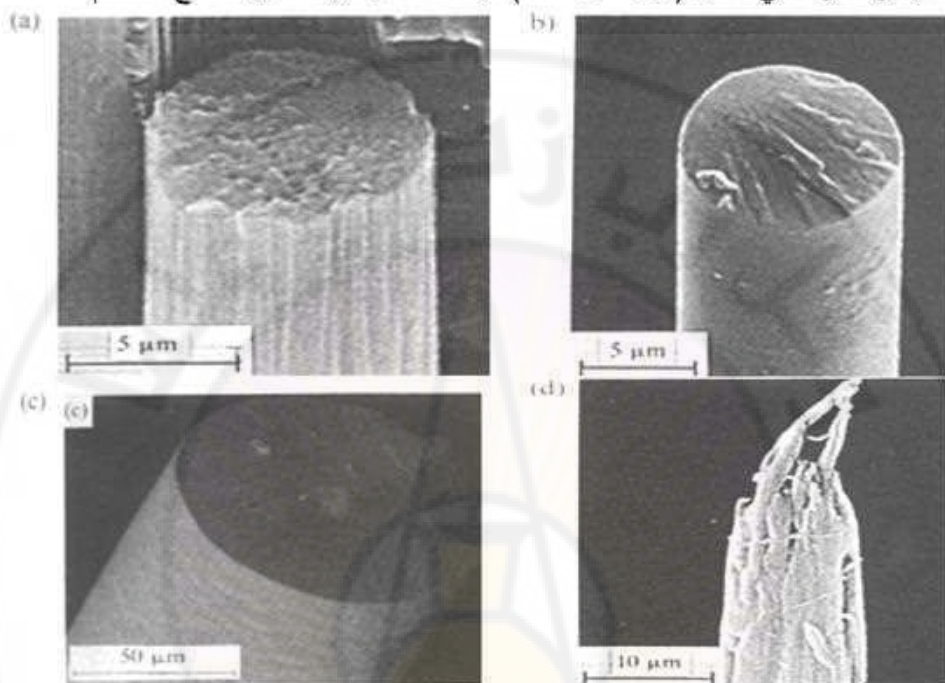


الشكل (17-2) صورة
بمجهز المسح الإلكتروني
(SEM) لألياف الكيفلار
49 (أراميد) تظهر حزم
التشوه لجانب الانضغاط
للالحناء الحاد.

2-3-3 المرونة وتحطم الليف: Fiber fracture and flexibility

تتحطم معظم الألياف على الشد بشكل قصف (هش)، دون أي خضوع أو انسياب. إن الألياف السيراميكية، والألياف الزجاجية وألياف الكربون هشة بشكل كامل وتتحطم دون أي تناقص في مساحة المقطع العرضي. انظر الأشكال (a -، c 18-2). بينما تتحطم ألياف الأراميد بشكل مطيلي، على الرغم من أن انفعالها الكلي صغير. يسبق

الكسر التخصر الواضح ويحدث الانفصال النهائي للليف بعد حدوث كميات كبيرة من السيلان الموضعي شكل (2-18 ، d). يحدث غالبا تليف الألياف مع التحطم.



الشكل (2-18) صور بمجهر المسح الالكتروني للألياف المتحطمة على الشد (a) اليف كربون (b) شعيرات أحادية من كربيد السيلكون (c) ألياف كربيد السيلكون (d) ألياف الأراميد .
الجدول (2-6) قيم مرونة الألياف .

Fibre	Diameter d (μm)	Young's modulus E (GPa)	Flexibility κ/M ($\text{GPa}^{-1} \text{mm}^{-4}$)	Fracture strength σ_c (GPa)	Maximum curvature κ_{max} (mm^{-1})
SiC monofilament	150	400	1×10^2	2.4	0.08
Nicalon TM	15	190	2.1×10^6	2.0	1.4
Kevlar TM 49	12	130	7.6×10^6	3.0	3.8^1
E-glass	11	76	1.8×10^7	2.0	4.8
HM carbon	8	390	1.3×10^7	2.2	1.4
HS carbon	8	250	2.0×10^7	2.7	2.7
Saffil TM	3	300	8.4×10^8	2.5	5.5
SiC whisker	1	450	4.5×10^{10}	5.0	22.2

بؤثر قطر الليف بشكل كبير على السهولة التي يمكن أن تشوه وتحنى بها الألياف. ذلك مهم في العمليات التي تمرر فيها الألياف من خلال ثقب وفوق بكرات مثلما يحدث في الحياكة، وغزل الألياف. وكما يحدث في عمليات القولبة (التشكيل) والمزج حيث تمزج الألياف بشدة وتبقى أو تحقن بالقوالب باستخدام آلات التغذية اللولبية. يمكن أن نعبر عن مرونة الليف بمصطلح العزم M وهو العزم المحتاج له من أجل حني ليف ذي مقطع عرضي دائري إلى قوس معطى κ .

$$M = \frac{\pi E \kappa d^4}{64} \quad (2-2)$$

حيث E = معامل يونغ و d = قطر الليف، تعرف المرونة بالنسبة κ / M ، تتأثر المرونة بقيمة d وتعتمد أيضاً على قيمة E . يبين الجدول (2-6) مقارنة بين قيم مرونة ألياف الكربون، ألياف الزجاج، ألياف الأراميد والألياف السيراميكية. ينتج انحناء الألياف اجهادات شاده سطحية كبيرة التي قد تؤدي إلى تحطم الليف. يعطى اجهاد الشد السطحي بفرض حدوث تشوه مرن بالمعادلة :

$$\sigma = \frac{E \kappa d}{2} \quad (2-3)$$

يستطيع الليف أن يتحمل مقدار انحناء أعظمي قبل أن يحدث فيه التحطم وذلك عندما يكون لليف متانة تحطم مساوية إلى σ . يعطى مقدار الانحناء الأعظمي بالعلاقة:

$$\kappa_{\max} = \frac{2\sigma_*}{Ed} \quad (2-4)$$

قيم $\kappa_{\max}$ معطاة في الجدول (2-6) وذلك بإهمال الاختلافات الإحصائية في متانة التحطم على طول الليف. تتحمل ألياف الزجاج أكثر بكثير من الألياف السيراميكية وألياف الكربون. الشعيرات الأحادية الكبيرة القطر صعبة الحياكة أو التشكيل، لأنها تتحطم عندما تحنى إلى نصف قطر انحناء مساوٍ إلى حوالي 10 mm. من غير المحتمل أن تكسر الألياف والشعيرات Whiskers المنتجة خلال العمليات الاعتيادية لتناولها. يجب أن تلاحظ نقطة أخرى في ألياف الأراميد وهي أن متانتها على الضغط منخفضة. ينتج الانحناء اجهادات ضاغطة كبيرة على السطح وكذلك اجهادات شد. تبدأ

منطقة الانضغاط بالخضوع والتشوه، قبل أن يصبح قوس الانحناء كافياً ليسبب الفشل على الشد، ينتج ذلك تشوهاً دائماً كما هو موضح بالشكل (17 - 2).

4 - 3 - 2 معالجة إحصائية لمئات الليف:

A statistical treatment of fiber strength

إن معظم الألياف قصفة، هذا يعني أنه لا يحدث بالألياف تشوه لدن أو تبدي تشوه لدن قليل قبل حدوث الانهيار والفشل. لا تملك هذه المواد القصفة متانة محددة للشد. يعتمد الإجهاد الذي يحدث عنده فشل هذه المواد القصفة على وجود الانسياب للمادة، الذي يمكن أن يحدث عشوائياً على طول الليف. تنسب في الحقيقة المتانة الكبيرة للألياف مقارنة بالمواد الأخرى إلى عدم وجود الانسيابات الكبيرة. إلا أنه يتوقع عدد من الانسيابات على طول الألياف، لذلك يتوقع تغيرات في المتانة أيضاً.

يمكن أن تعالج هذه الحالة على أسس إحصائية. يتم تقسيم طول الليف L إلى عدد من الأطوال، $\Delta L_1, \Delta L_2, \dots$. عندما يطبق الإجهاد σ يحدد البارامتر n_σ عدد الانسيابات الكافية في وحدة الطول من أجل حدوث الانهيار بتأثير هذا الإجهاد. يتحطم الليف عندما يكون فيه على الأقل عنصر طولي واحد ذو انسياب لذلك يعرف غالباً هذا التحليل بـ "نظرية الرابطة الأضعف" (Weakest Link Theory - WLT). يعتمد فشل أي عنصر طولي جزئي على n_σ وعلى طول هذا العنصر الجزئي. بالنسبة للعنصر الجزئي الأول:

$$p_{f1} = n_\sigma \Delta L_1 \quad (2-5)$$

الاحتمالية p_s من أجل عدم تحطم كامل الليف تحت تأثير هذا الإجهاد وهو احتمال بقاء وعدم تحطم كل من العناصر الجزئية (N) التي تشكل الليف لذلك:

$$p_s = (1 - p_{f1})(1 - p_{f2}) \dots (1 - p_{fN}) \quad (2-6)$$

طالما تؤخذ أطوال العناصر الجزئية متناهية في الصغر فإن قيم p_f يجب أن تكون صغيرة، وباستخدام عملية التقريب فإن $\exp(-x) \approx (1 - x)$ ويمكن تطبيق هذا التقريب عندما تكون x أصغر بكثير من 1 وبالتالي يكون:

$$p_s = \exp[-(p_{f1} + p_{f2} + \dots + p_{fN})] \quad (2-7)$$

بالتعويض من العلاقة (5 - 2) يصبح لدينا:

$$p_s = \exp[-Ln_\sigma] \quad (2-8)$$

افترض العالم Weibull أنه تخضع معظم بيانات تجارب تحطم المواد القصفة للعلاقة التالية:

$$n_\sigma L_o = \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^m \quad (2-9)$$

حيث m معامل Weibull و σ_o هو الإجهاد الناظمي والذي يمكن أن يؤخذ بأنه الإجهاد المتوقع الأكثر احتمالاً لليف بطول L_o . باستخدام هذه الفرضية يكون احتمال انهيار (تحطم) ليف ذي الطول L بتأثير إجهاد مطبق σ هو:

$$p_f = 1 - \exp\left[-\left(\frac{L}{L_o}\right)\left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right)^m\right] \quad (2-10)$$

معامل Weibull هو باراميتير هام من أجل تمييز توزع القوى في الليف (أو أي مادة قصفة أخرى). إذا كانت قيمة m كبيرة ($m > 20$). ستؤدي عند ذلك الإجهادات - حتى الأقل بقليل من قيمة الإجهاد الناظمي σ_o - إلى احتمالية قليلة للفشل. حسب العلاقة (2-9)، بينما إذا كانت الإجهادات أكبر بقليل من قيمة الإجهاد الناظمي سيتم عندئذ التنبؤ باحتمالية كبيرة للفشل.

بينما هنالك عدم التأكيد حول مئاة الليف عندما يكون معامل weibull منخفض القيمة ($m < 10$). تعطي عملياً مواد سيراميكية عديدة معامل weibull في المجال (2 - 15) ممثلة عدم تأكيد قيمة الإجهاد الذي قد تفشل عنده العينة المختبرة.

يفضل إصلاح العلاقة بحيث يكون التنبؤ علاقة خطية وذلك من أجل معاينة ما إذا كان مجموعة قيم قوى تحقق العلاقة (2-10). يتم إصلاح العلاقة بأخذ لوغاريتم احتمال عدم الإنهيار (الفشل). ($p_s = 1 - p_f$)

$$Ln(p_s) = -\left(\frac{L}{L_o}\right)\left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right)^m \quad (2-11)$$

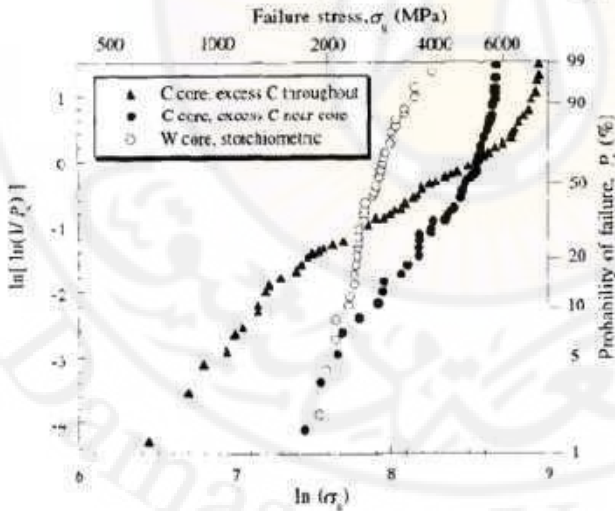
وبذلك:

$$\ln\left(\frac{1}{p_s}\right) = \left(\frac{L}{L_o}\right)\left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right)^m \quad (2-12)$$

بأخذ لوغاريتم الطرفين يكون لدينا:

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{p_s}\right)\right] = \ln(L) - \ln(L_o) + m\ln(\sigma) - m\ln(\sigma_o) \quad (2-13)$$

يجب أن يعطي المخطط البياني بين قيم p_s وقيم σ خطاً مستقيماً ميله القيمة m كما هو مبين في الشكل (2-19). يعطي المخطط المبين بالشكل بيانات توزع المتانة لثلاثة أنواع من الشعيرات الأحادية لكربيد السيلكون SiC. نلاحظ أن البيانات متطابقة تقريباً مع العلاقة (2-13) والمخطط قريب من الخطي. إن لنوعي ألياف الكربون تقريباً نفس المتانة، لكن بقابلية تغيير مختلفة (قيم m مساوية إلى 2 و 4). من ناحية أخرى فإن ألياف التتجستين ذات متانة منخفضة لكن قابلية التغيير أخفض بكثير ($m = 8$). يمكن أن تعزى هذه الاختلافات إلى طبيعة الألياف و توزع الانسياب الحادث.



الشكل (2-19) مخطط Weibull لقيم متانة الإتهيار لثلاثة أنواع من الشعيرات الأحادية لكربيد السيلكون صنع كل منها بظروف مختلفة. تم الحصول على هذه القيم باختبار عدد كبير من الألياف المفردة لكل نوع. التدرج من أجل الخطوط البيانية الثلاثة (معامل Weibull - m) - بحدود 2 - 4 و 8.

إن لتغيرات المتانة لمعظم الألياف السيراميكية نتائج هامة على السلوك الميكانيكي للمواد المركبة. يعني ذلك أنه تتوزع غالباً نقاط تحطم الليف بشكل عشوائي و ليس من الضروري أن تتركز نقطة التحطم في مستوي شق وحيد و ينتشر منها التحطم عبر المادة. يقود ذلك إلى توزع واسع للضرر وحدوث سحب الليف، وتحسن من الجساءة.

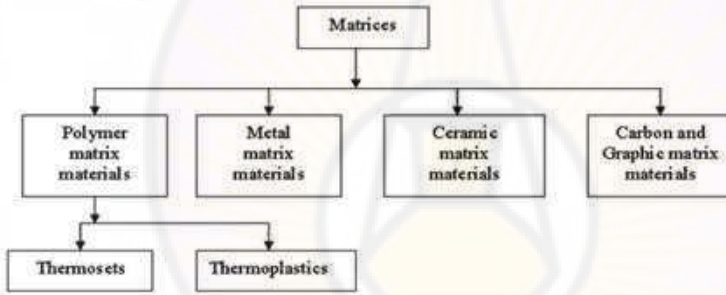
2-4- المادة الأساس (الحاضنة) : Matrices

يبين الجدول (2-7) خواص أنواع متعددة من المواد الأساس (الحاضنة).

الجدول (2-7) خواص أنواع مختلفة من المادة الأساس (الحاضنة).

Matrix	Density (Mg m^{-3})	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Tensile strength σ_t (GPa)	Failure strain ϵ_f (%)	Thermal expansivity α (10^{-6} K^{-1})	Thermal conductivity K ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
Thermosets							
epoxy resins	1.1-1.4	3-6	0.38-0.43	0.035-0.1	1-6	50	0.1
polyesters	1.2-1.5	2.0-4.5	0.37-0.39	0.04-0.09	2	100-200	0.2
Thermoplastics							
Nylon 6,6	1.14	1.4-2.8	0.2	0.06-0.07	40-80	90	0.2
polypropylene	0.96	1.0-1.4	0.2	0.02-0.04	300	110	0.2
PEEK	1.26-1.32	3.6	0.2	0.17	50	47	0.2
Metals							
Al	2.70	70	0.33	0.2-0.6	5-20	24	130-230
Mg	1.80	45	0.35	0.1-0.3	3-10	27	100
Ti	4.5	110	0.35	0.3-1.0	4-2	9	6-22
Ceramics							
borosilicate glass	2.3	64	0.21	0.10	0.2	3	12
SiC	3.4	400	0.20	0.4	0.1	4	50
Al_2O_3	3.8	380	0.25	0.5	0.1	8	30

يمكن اعتماد قيم الخواص المبينة وقيم خواص مادة التقوية من أجل المعلومات عن نظام المادة المركبة الناتجة عن عملية جمع مكوني هذه المادة المركبة. تسمح هذه المعلومات بتقييم إمكانات أنظمة المواد المركبة المشكلة. لا تستخدم مثلاً ألياف الزجاج من أجل تقوية المعادن. يوجد كذلك نقاط هامة دقيقة يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار ومنها الاختلافات الكبيرة في معاملات التمدد الحراري بين الليف والمادة الحاضنة. سهولة التصنيع كذلك مهمة جداً. وفيما يلي أنواع المواد الحاضنة المستخدمة في المواد المركبة مع دراسة بعض النقاط المتعلقة بالعوامل التي تؤثر على اختيار المادة الحاضنة. يتم تسمية المادة المركبة بحسب المادة الحاضنة والمخطط المبين بالشكل (2-20) يبين أنواع المواد المركبة.



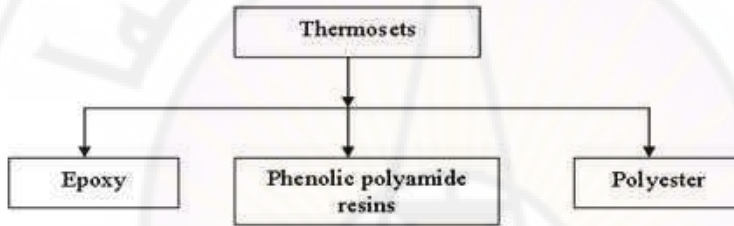
الشكل (2-20)
أنواع المواد
المركبة.

2-4-1 : المادة الحاضنة البوليمرية: Polymer matrices

تتضمن المواد الحاضنة البوليمرية نوعين من المواد وهما الراتينجات المتصلدة حرارياً و البلاستيك الحراري (اللدائن الحرارية).

1-راتينجات تتصلد حرارياً: تغطي هذه المادة حاضنة الشكل (2-20) مجال واسع من المواد الكيميائية التي تعطي مجالاً واسعاً من الخواص الميكانيكية والفيزيائية. تتحول المادة الحاضنة السائلة من البوليمرات التي تتصلد حرارياً إلى مادة صلبة و جامدة بواسطة الترابط المستعرض الكيميائي الذي يؤدي إلى تشكيل شبكة ثلاثية الأبعاد مترابطة بشدة. يتم هذا التفاعل عادة أثناء تشكيل المادة المركبة. تعتمد الخواص الميكانيكية على الوحدات الجزيئية المشكلة للشبكة وعلى طول و كثافة الروابط العرضية. إذاً تعتمد على نوعية المادة الكيميائية المستخدمة وعلى التحكم بعملية الترابط العرضي الناتج عن عملية

معالجة التصلب. يمكن أن تتم معالجة التصلب في درجة حرارة الغرفة لكن من المعتاد استخدام خطة معالجة تصلب تتضمن التسخين لدرجة حرارة واحدة أو أكثر لمدة محددة مسبقاً من أجل الحصول على ترابط عرضي أمثل وبالتالي أفضل الخواص. تتم عادةً معالجة تصلب لاحقة وذلك بدرجة حرارة مرتفعة من أجل التقليل من حدوث أي تصلب لاحق ولتقليل تغير الخواص خلال الخدمة. يمكن أن يؤدي التقلص والتقلص الحراري الحادث بالتبريد بعد معالجة التصلب إلى إجهادات في المادة المركبة. من الراتنجات المصلدة حرارياً الإيبوكسي و البوليستر غير المشبع و استرات الفينيل.



الشكل (2-20)
الراتنجات
المتصلدة
حرارياً

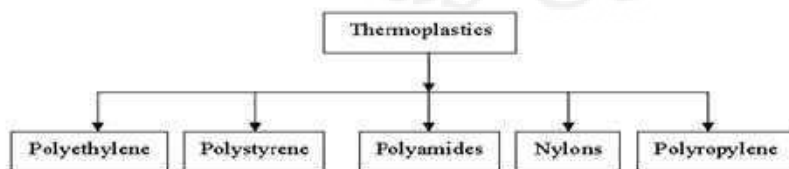
يبين الجدول (2-7) تمتع الراتنجات المصلدة حرارياً بخواص مختلفة قليلاً عن البلاستيك الحراري. و الملاحظ من بين هذه الخواص الانفعال القليل. الراتنجات المصلدة حرارياً مواد قصفة، بينما البلاستيك الحراري يمكن أن يخضع لتشوهات لدنة معتبرة. هنالك أيضاً اختلافات هامة بين الأنواع المختلفة للصلاند الحرارية. مثلاً : الإيبوكسي أقسى من البوليستر غير المشبع أو من استرات الفينيل، خصوصاً مواد إيبوكسي المطورة حديثاً. يبين الجدول (2-8) مقارنة بين خواص الراتنجات المتصلدة حرارياً والبلاستيك الحراري وذلك فيما يتعلق بثبات الأبعاد وشروط البيئة. تبين القيم في الجدول أنه تتمتع أنواع الإيبوكسي بمقاومة جيدة للتشوه بالحرارة كما أن تقلصها عند التصلد أقل من البوليستر. الإيبوكسي في الواقع هي المادة الأفضل من معظم الأنظمة المتصلدة بالتسخين، و التي تفضل أحياناً بسبب تكلفتها الأقل.

2-البلاستيك الحراري (اللدائن الحرارية): اللدائن الحرارية ليست مترابطة عرضياً بعكس راتنجات التصلد الحرارية، تستمد اللدائن الحرارية متانتها و صلابتها من خواص وحدات المركب الكيميائي (غير متبلر) المكون لها ومن الوزن الجزيئي المرتفع جداً.

جدول (8-2) مقارنة بين خواص البلاستيك الحراري والصلاند الحرارية من حيث ثبات الأبعاد والثبات في الظروف البيئية .

Property	Thermosets		Thermoplastics		
	epoxy resins	polyester resins	Nylon 6.6	polypropylene	PEEK
Melting temperature (C)	—	—	265	164	334
Distortion temperature (C)	50-200	50-110	120-150	80-120	150-200
Shrinkage on curing (%)	1-2	4-8	—	—	—
Water absorption (24h @ 20 C) (%)	0.1-0.4	0.1-0.3	1.3	0.03	0.1
Chemical resistance	Good, attacked by strong acids	Attacked by strong acids and alkalis	Good, attacked by strong acids	Excellent	Excellent

مما يؤكد تواجد تركيز عالٍ في اللدائن الحرارية غير المتبلورة على تشابكات الجزيئات التي تعمل مثل الروابط العرضية وأنه يوجد في المواد الشبه بلورية درجة عالية من ترتيب واصطفاف الجزيئات. يؤدي تسخين المواد غير المتبلورة إلى فك الارتباط بين الجزيئات وإلى التغير من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة اللزجة، بينما يؤدي تسخين المواد البلورية إلى صهر الطور البلوري ليعطي سائلاً لزجاً غير متبلور. إن خواص كلا البوليمرات غير المتبلورة و الشبه بلورية متباينة بحسب الشروط خلال عملية التصلب. يحدث تباين الخواص في البوليمرات غير المتبلورة بسبب ترتيب الجزيء الذي يحدث خلال سيلان المادة المنصهرة في عملية القولية أو خلال التشوه اللدن. و تستطيع بشكل مشابه الصفائح البلورية أن تتوجه بشكل مفضل في البوليمرات البلورية، وذلك بسبب التبلور غير المنتظم على سطوح الألياف أو التبلور في المادة المنصهرة المناسبة والنمو المفضل في بعض الاتجاهات بسبب التدرج الحراري في المادة المنصهرة. والشكل (21-2) يبين أنواع اللدائن الحرارية.



الشكل (21-2)
يبين أنواع
اللدائن
الحرارية.

تتميز اللدائن الحرارية بانفعال كبير حتى تتحطم بالإضافة إلى المقاومة الجيدة للمواد الكيميائية و الثبات الحراري الجيد، خصوصاً اللدائن الحرارية الكثيرة المطورة حديثاً للاستخدام في المواد المركبة. كمثال مادة بوليثيرايثر كيتون (PEEK) بوليمر شبه بلوري. تتأثر قليلاً متانة و صلابة هذا البوليمر عند التسخين إلى درجة حرارة مساوية إلى $^{\circ}\text{C}$ 150، حيث عند درجة الحرارة هذه تنخفض بشكل كبير خواص معظم المواد البوليميرية الأخرى. استخدمت المادة المركبة المحتوية على % 60 من ألياف الكربون في مادة حاضنة نوع (PEEK) وسميت APC-2 من قبل مصنعي هذه المادة المركبة في شركة ICI واستخدمت بشكل واسع في التطبيقات الفضائية. مواد أخرى من اللدائن الحرارية عالية الأداء مثل بولي سولفونات و البوليميدات و البولي سلفونات. معظم هذه اللدائن الحرارية هي بوليمرات غير متبلورة. تبدي معظم اللدائن الحرارية مقاومة جيدة لامتصاص الماء رغم أن هذا غير صحيح من أجل مادة النايلون التي تتميز عادة بدرجة عالية من التبلور. انظر جدول (8- 2)

تبدي كل اللدائن الحرارية خضوعاً ويحدث فيها تشوهات كبيرة قبل تحطمها، وتعتمد خواصها الميكانيكية بشكل كبير على درجة الحرارة ومعدل الانفعال المطبق. ميزة هامة أخرى لكل اللدائن الحرارية هي ازدياد الانفعال مع الزمن تحت ظروف تحميل ثابتة مما يعني حدوث الزحف. يعني ذلك أنه قد يوجد أثناء خدمة المادة إعادة توزيع للحمل بين المادة الحاضنة و الألياف خلال تشوه المادة تحت ظروف التحميل.

إن عملية تصنيع المواد المركبة من اللدائن الحرارية أصعب من تصنيع المواد المركبة من لدائن التصلد الحراري. لأن اللدائن الحرارية بوليمرات لزجة جداً في الحالة المنصهرة وذلك قبل تصنيع المادة المركبة. على الرغم من أن درجة حرارة التحول الزجاجي و درجة حرارة الانصهار، T_g و T_m منخفضتان جداً. لا تنتشر الألياف بسهولة بهذه المواد المنصهرة ذات اللزوجة الكبيرة. من الضروري تأمين مسافة انسياب قصيرة للمادة المنصهرة، كمثال يتم تصنيع صفائح من المادة المركبة بضغط صفائح رقيقة من المادة البوليميرية مع ألياف مشكلة مسبقاً وذلك لمدة محددة، يمكن إجراء

عمليات تشكيل متعددة مثل الصب بالحقن بعد أن يتم تجميع الألياف والمادة الحاضنة معاً. الجدول (2-9) يبين مواصفات اللدائن الحرارية.

جدول (2-9) مواصفات اللدائن الحرارية.

Thermoplastic	T _g ° C	T _m ° C	Processing Temperature (° C)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Fracture Toughness (kJ/m ²)
Polypropylene	-10	165	200 - 240	1.1 - 1.6	30 - 40	-
Polyamide	55	265	270 - 320	2.5 - 3.8	50 - 80	-
PEEK	143	343	380 - 400	3.1 - 3.8	90 - 100	4.0
PES	220	None	300 - 320	2.6	80	1.9
PEI	217	None	335 - 420	3.0	105	3.3

2-4-2 المادة الحاضنة المعدنية: Metal matrices

رُكز تطور المواد المركبة ذات الأساس (المادة حاضنة) المعدني على ثلاثة معادن وهي الألمنيوم، المغنيزيوم والتيتانيوم. تخلق عادة المعادن مع عناصر أخرى من أجل تحسين خواصها الفيزيائية و الميكانيكية ويتوفر مجال واسع من تركيبات الخلائط المعدنية. تتأثر الخواص النهائية لهذه الخلائط بالمعالجات الحرارية و الميكانيكية التي تحدد البنية المجهرية للخليطة.

يعطي الجدول (2-7) قيم بعض الخواص النموذجية للمواد المعدنية الحاضنة المستخدمة في المواد المركبة. يجب أن تكون المعادن المستخدمة في المواد المركبة مطيلية وبشكل أساسي متجانسة الخواص. يكون غالباً تزايد الصلادة من تضمين مادة التقوية في المعدن صغير نسبياً وذلك على عكس البوليمرات. لقد حققت المواد المركبة ذات الأساس المعدني تحسناً في الخواص مثل خواص الإهتراء، أداء الزحف ومقاومة التشوه الحراري. إن المعادن الثلاثة المستخدمة كمادة حاضنة هي من المعادن الفعالة وتتفاعل بشدة مع الأكسجين. يؤثر هذا التفاعل على إنتاج المواد المركبة وبشكل خاص فيما يتعلق بالتفاعل على سطح التلامس بين مادة التقوية والمادة الأساس المعدنية (السطح البيني). أثبتت المشاكل بشكل خاص مع معدن التيتانيوم وخليطه.

2-4-3 المادة الحاضنة السيراميكية: Ceramic matrices

استخدمت أربع أصناف رئيسية من المواد السيراميكية للمواد المركبة ذات الأساس (حاضنة) السيراميكية. السيراميك الزجاجي هو أكاسيد تشكيل الزجاج مثل

البوروسيليكات وسيليكات الألومين التي تعالج حرارياً حيث يترسب طور بلوري ليشكل انتشار دقائق ناعمة في الطور الزجاجي. إن درجات حرارة تلين السيراميك الزجاجي منخفضة أكثر من السيراميك البلوري وهو أسهل للتصنيع، هذه ميزة هامة في المواد المركبة السيراميكية. السيراميك التقليدي: مثل SiC، Al_2O_3 و ZrO_2 متبلورة بشكل كامل وينتجها مكونة من الحبيبات البلورية المتوضعة عشوائياً بعضها مع بعض. السيراميك ذو البنية المتوضعة على طبقات ذو أهمية، يتم إنتاج الصفائح بواسطة طريقة البودرة. يفصل بعضها عن بعض بواسطة طبقات رقيقة ضعيفة متداخلة مثل الغرافيت. لا تستخدم في هذه الحالة الألياف والتصنيف كمادة مركبة تصنيف هامشي. تكمن أهمية هذه المواد بالسهولة النسبية للتصنيع. يوجد اهتمام حول تقوية الإسمنت والخرسانة. تضاف عادة ألياف قصيرة بطريقة ما بحيث لا تتأثر قدرة الصب والقولبة. أخيراً تشكل المواد المركبة كربون / كربون المنتجة بواسطة تخلخل البخار لصفوف من ألياف الكربون وهذه المواد مهمة تجارياً.

الميزات الرئيسية لإضافة ألياف السيراميك إلى السيراميك (أو تشكيل سطوح تلامس - سطوح بينية - ببعض الطرق الأخرى) هو تحسين جساأتهم. السيراميك مادة قصفة جداً حتى زيادة صغيرة في الجساءة قد تكون مفيدة. نحصل على زيادة الجساءة من الانعكاس المتكرر للشق على السطوح البينية بالإضافة إلى طبيعة السطح البيني المهمة جداً.



الفصل الثالث

أسلوب بناء الألياف

Fiber architecture

- 1- النسبة الحجمية والنسبة الوزنية.
- 2- ترتيبات حزم (تجميع) الألياف.
- 3- تكتل وتجميع الألياف.
- 4- الألياف الطويلة-الصفائح الرقيقة.
- 5- الألياف القصيرة.
- 6- الفجوات.
- 7- توجيه الألياف خلال التصنيع.



1-3- مقدمة: Introduction

تعتمد خواص المواد المركبة على ترتيب وتوزيع الألياف والهندسة البنائية لليف. يشمل هذا التعبير الصفات والملامح الجوهرية لليف مثل مقدار قطره وطوله وكذلك النسبة الحجمية للألياف المحتواة في المادة المركبة واصطفافها وترتيبها عند تجميعها على شكل حزم. وضعت في هذا الفصل ، السمات الأساسية للهندسة البنائية لليف من أجل:

المواد ذات الألياف القصيرة والمواد ذات الألياف المستمرة.

نقطة البداية هي وصف لترتيب الليف في الصفائح (صفائح تحتوي على ألياف طويلة مرتبة ومصطفة)، وللصفائح المبنية منها. كما أنه يوجد أشكال أخرى لأنظمة الليف المستمر، مثل مواد النسيج المحاك، والمواد المحاكاة والمضفرة.

إن الترتيبات في أنظمة الألياف القصيرة أكثر تعقيداً وقد وصفت طرق تمييزها.

2-3- النسبة الحجمية و النسبة الوزنية:

Volume fraction and weight fraction

على الرغم من أن معظم حسابات المواد المركبة تستند إلى النسبة الحجمية للأجزاء المكونة للمادة المركبة، إلا أنه من المهم أحياناً وخصوصاً عند حساب كثافة المادة المركبة استخدام النسبة الوزنية. المعادلات المستخدمة هي :

$$f = \frac{w\rho_f}{w\rho_f + w_m\rho_m} \quad (3-1)$$

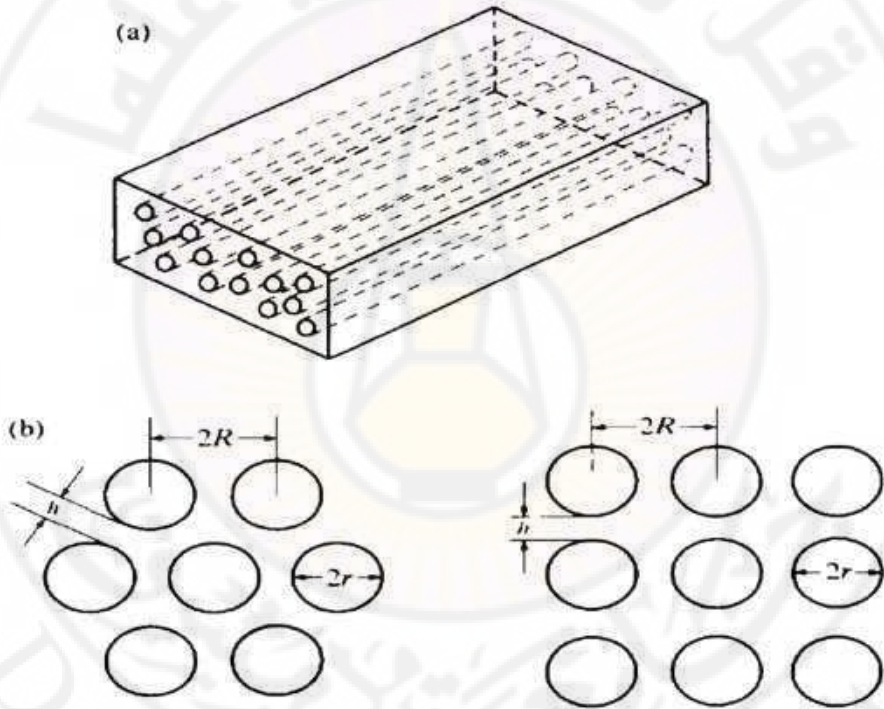
$$w = \frac{f\rho_f}{f\rho_f + f_m\rho_m} \quad (3-2)$$

حيث f و f_m النسب الحجمية و w ، w_m هي النسب الوزنية و ρ_f ، ρ_m هي كثافات المادة الحاضنة والليف على التوالي.

3-3- ترتيبات حزم (تجميع) الألياف: Fiber packing arrangements

تترتب جميع الألياف بشكل مواز في الصفائح وحيدة الاتجاه الشكل (a-3-1)

إن الألياف مرتبة ومنظمة على شكل شبك سداسي أو رباعي، كما هو موضح في الشكل (1-3-b). بشكل مثالي إن للألياف مقطعاً عرضياً دائرياً ولها نفس القطر. في الحقيقة إن للألياف الزجاجية، ولألياف الأراميد والعديد من الألياف السيراميكية مقاطع عرضية دائرية مع إنهاء سطحي ناعم. ولكن العديد من الألياف الكربونية ولو أنها تقريباً دائرية إلا أن أسطح هذه الألياف غير منتظم. يوجد غالباً اختلاف كبير في أقطار الليف وذلك في كل أنواع الألياف.



الشكل (1-3) - a: الصفائح وحيدة الاتجاه. b: التحزيم السداسي والرباعي للألياف الموجهة.
تعطى علاقة النسبة الحجمية للألياف f بنصف قطر الليف r للترتيبات المثالية الموضحة في الشكل (1-3-b) بالمعادلات التالية:

$$f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (3-3) \quad \text{للترتيب السداسي}$$

$$f = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (3-4) \quad \text{للترتيب المربع}$$

حيث $2R$ أقرب مسافة فاصلة بين مركزي ليفين متجاورين إن القيمة العظمى للنسبة الحجمية للألياف المحتواة f عندما تتلامس الألياف $r = R$ لذلك من أجل الترتيب السداسي $f_{\max} = 0.907$ ومن أجل الترتيب الرباعي $f_{\max} = 0.785$. يتغير التباعد بين الألياف h بحسب قيمة f وحسب المعادلات التالية:

$$h = 2 \left[\left(\frac{\pi}{2f\sqrt{3}} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] r \quad \text{السداسي} \quad 3-5$$

$$h = 2 \left[\left(\frac{\pi}{4f} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] r \quad \text{الرباعي} \quad 3-6$$

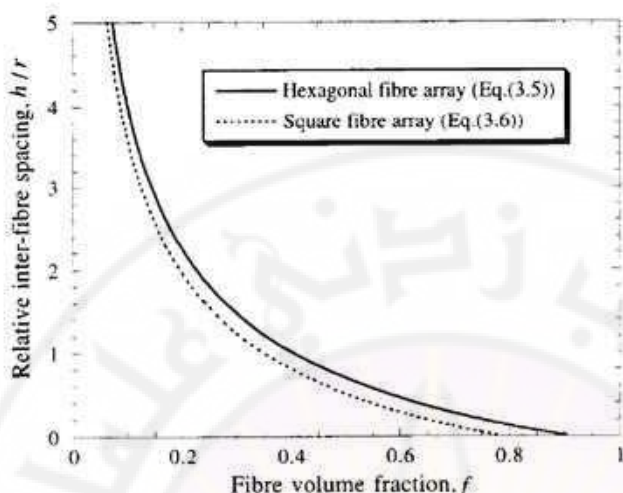
يبين الشكل (2-3) المنحنيات البيانية الممثلة لهذه المعادلات. إن المسافة الأقرب بين الألياف أقل من قطر أحد الألياف حتى عندما تكون النسبة الحجمية للألياف المحتواة قليلة (≈ 0.3) f عند القيم الأكبر للنسبة الحجمية (≈ 0.7) f تصبح المسافة صغيرة جداً.

إن المسافة بين الألياف مهمة عندما يعدل وجود الألياف من المادة الحاضنة المحيطة بهذه الألياف، وهذا يعني أنه يتم تعديل نسبة كبيرة من المادة الحاضنة، وبذلك يكون لها خواص مختلفة عن باقي المادة الحاضنة. ومما يستحق الملاحظة بأنه تحجز المادة الحاضنة بين الألياف القريبة من بعضها، لذلك يتطلب التوزيع المنتظم للألياف إذا أردنا تجنب الاتصال الفيزيائي بين هذه الألياف.

4-3- تكتل وتجمع الألياف والحبيبات:

Clustering of fibers and particles:

تظهر الدراسات التجريبية لتوزيع الألياف في الصفائح وحيدة الاتجاه أنه لا تحدث عملياً التوزيعات المثالية ما عدا في مناطق موضعية صغيرة. يبين المثال في الشكل (3-3) مقطع عامودي على اتجاه الألياف في صفيحة المادة المركبة المرتفعة محتوى الألياف، يقترب الترتيب من الترتيب السداسي في بعض المناطق ولكن هنالك مناطق غنية بالمادة الحاضنة مع تكديس غير منتظم للألياف.



الشكل (3-2) تأثير الحجم النوعي للليف f على المسافة بين الألياف

وتظهر بعض النقاط التي تتصل فيها الألياف بعضها عن بعض. يكون ترتيب وتكدس الألياف في الصفيحة ذات المحتوى الأقل للألياف غالباً غير منتظم بشكل كبير. مع تجمع (تكتل) الألياف ومناطق ضخمة غنية بالمادة الحاضنة، والأكثر احتمالاً حالة عدم الترتيب للألياف.



الشكل (3-3) صورة مجهرية لمقطع عامودي على الألياف في صفيحة مقواة بألياف موجهة باتجاه واحد الصفيحة مادة مركبة من الألياف الزجاجية وريزين البوليستر.

إحدى النتائج الرئيسية للترتيب غير المنتظم للألياف هي صعوبة تحقيق نسبة حجمية للألياف المحتواة أكبر من 0.7، ويجب أن تؤخذ هذه القيمة كقيمة حدية عملية من أجل المواد التجارية. وبالتالي لا يمكن أن تعتبر الصفائح متجانسة من وجهة نظر البنية

الميكروية. على الرغم أنه قد فرض من أجل التنبؤ بخواص الصفائح أن كل صفيحة لها مجموعة من الصفات المميزة .

نقطة أخرى مهمة حول المسافات بين الألياف وهي تهتم من أجل سهولة تصنيع المادة المركبة. تتضمن أغلب عمليات تصنيع المواد المركبة اختراق المادة الحاضنة السائلة إلى داخل مصفوفة الألياف (انظر الفصل الحادي عشر). يتضمن الاختراق الأولي للسائل توليد سطوح محدبة مقوسة عندما تكون الألياف متقاربة بشكل كبير، وبالتالي يتطلب اختراق السائل إلى داخل مصفوفة الألياف تطبيق ضغط مرتفع، وعلاوة على ذلك يحتاج الجريان اللاحق بمعدل مقبول خلال مصفوفة الألياف إلى ضغط مرتفع. وبشكل خاص إذا كانت لزوجة المصهور مرتفعة (كما مع البوليمرات المتصلبة حرارياً)، يمكن أن يصبح الضغط المطلوب خلال عملية التصنيع مرتفع جداً عندما تكون الألياف قريبة من بعضها بشكل كبير وخصوصاً إذا كانت الألياف ناعمة.

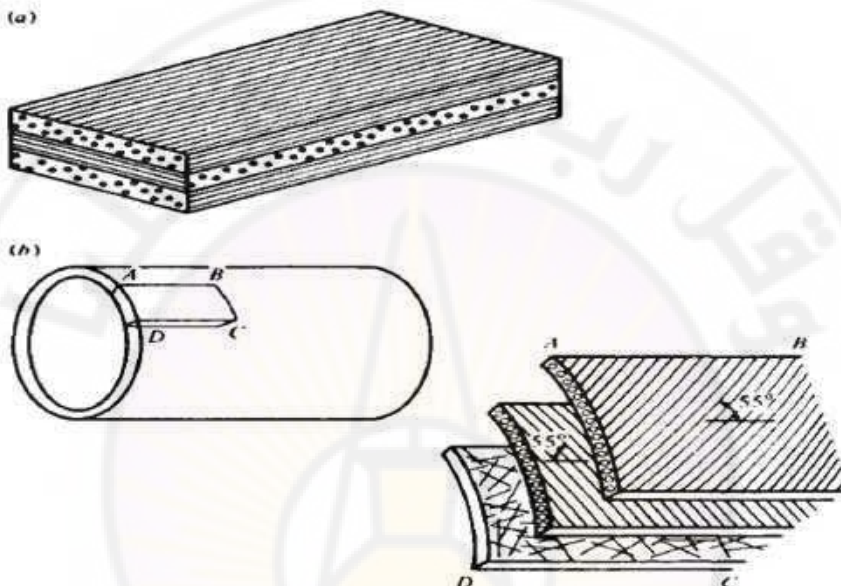
5-3- الألياف الطويلة: Long fibers

1-5-3-الصفائح الرقيقة: Laminates

تألف عادةً أجزاء البوليمرات ذات الأداء العالي من طبقات من الصفائح المكسدة على بعضها في ترتيب محدد مسبقاً. حتى نتمكن من التنبؤ بخواص المرونة لهذا الجزء تعتبر كل صفيحة متجانسة من حيث ترتيب الألياف والنسبة الحجمية للألياف المحتواة ضمنها. يمكن أن تكون الألياف في الصفيحة مستمرة أو قصيرة الطول ويمكن أن تكون مرتبة أو مصطفة باتجاه واحد أو باتجاهات متعددة أو موزعة بشكل عشوائي ثنائية أو ثلاثية البعد. يبين الشكل (4-3) ترتيبين بسيطين للصفائح.

تسمى الصفيحة ذات الاتجاه الواحد بالرقاقة. تحتوي الصفيحة المستوية وحيدة الاتجاه في الشكل (4-3-a) على رقايات متماثلة وحيدة الاتجاه بحيث كدست متجاورة بزاوية 90° بين بعضهم البعض. يستخدم هذا الإنشاء النموذجي البسيط للألواح العالية الجساءة في الطائرة. تمثل الصفيحة المقوسة المبينة في الشكل (4-3-b) جزءاً من جدار وعاء أسطواني. يستخدم هذا الترتيب للصفائح في تطبيقات مثل أنابيب الضغط. تكون في هذا المثال الرقايات الداخلية مقواة بألياف مقطعة متشابكة متقاطعة والرقاقة

الخارجية وحيدة الاتجاه حيث الألياف فيها مرتبة وموجهة $\pm 55^\circ$ بالنسبة لاتجاه محور الاسطوانة، وصفت بعض العوامل المؤثرة على اختيار تسلسل تكديس الرقائق في الفصل الخامس.



الشكل (3-4) (a) صفائح مسطحة مع رقائق وحيدة الاتجاه بزاوية 90° .

(b) صفائح اسطوانية مع طبقة واحدة من الألياف المقطعة المتشابكة و رقاقتين وحيدتي الاتجاه.

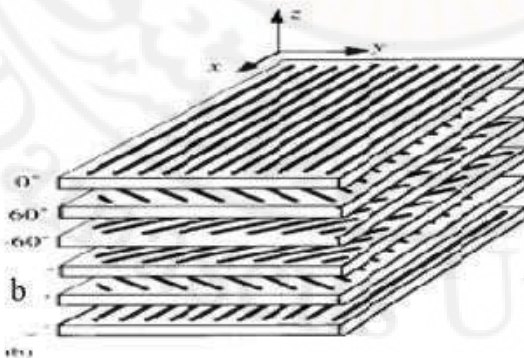
يستخدم توصيف بسيط لوصف تسلسل تكديس الرقائق إن هذا التوصيف موضح بالشكل (a-3-5) لصفحة بسيطة متعددة الطبقات المتصالبة إن تسلسل التكديس بالنسبة للاتجاه X حسب ما يلي: $0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ الذي يمكن تبسيطه إلى الشكل $[0^\circ/90^\circ/0_2^\circ/90^\circ/0^\circ]$ حيث يبين الترقيم السفلي 2 وجود رقاقتين في الاتجاه 0° . وحيث أن التكديس متماثل حول المستوي في المنتصف يمكن استخدام التوصيف المبسط التالي $[0/90/0]_s$. يبين الرمز s أن تسلسل التكديس متكرر و متماثل. يستخدم توصيف مشابه من أجل الصفائح ذات الطبقات المتوضعة فيها الألياف زوايا والمبينة بالشكل (b-3-5) يستخدم التوصيف التالي $[0/+60/-60_2/+60/0]$ الذي يختصر حسب ما يلي $[0/\pm 60]_s$ أو $[0/+60/-60]_s$.

من الضروري أن نضيف كل من المادة و السماكة لكل طبقة عندما تكون الرقائق مختلفة السماكة أو مصنوعة من مواد مختلفة وبطبيعة الحال نضيف توجه الألياف. وهكذا يكون الترميز $[90/0/2R_C)/(2R_C/0/90)/R_{C0.75}]_S$ مبيناً أن الصفائح مع ألياف في الاتجاهين 0 و 90 ، متحدة مع طبقات تسليح مقطع متشابك عشوائياً R_C الذي له سماكتين مختلفتين $0.75R_C - R_C$ وبشكل مشابه الترميز

$KEVLAR^{TM} 49 / T300CARBON / KEVLAR^{TM} 49, [0_3 / \pm 45 / 90]_S$ يدل على أن الصفائح مكونة من ثلاث طبقات من ألياف $KEVLAR^{TM} 49$ ، إحدى الطبقات بزاوية 45° + وواحدة $45^\circ - T300$ ألياف كربونية وواحدة بزاوية 90° بالألياف $KEVLAR^{TM} 49$.



الشكل (3-5) ترتيب
الطبقات
(a) صفائح برقاقات
متصالبة .



(b) صفائح ذات
رقاقات
محصورة بين رقاقات
 0° .

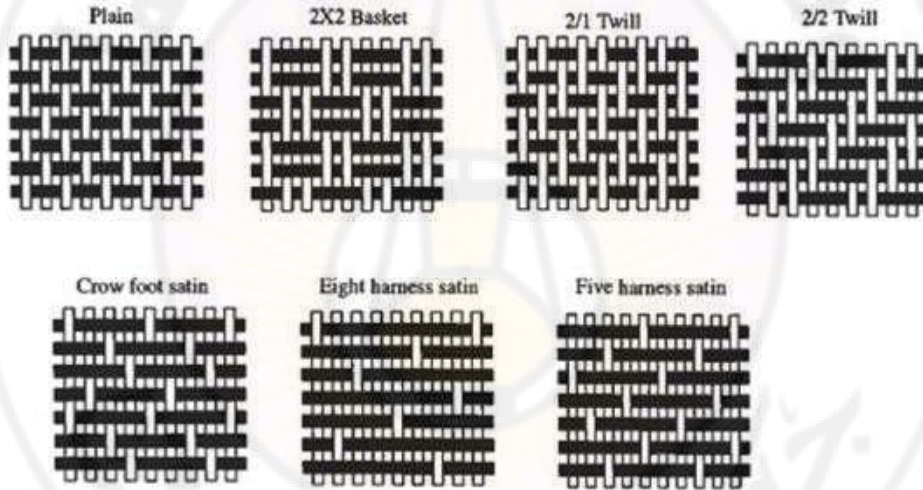
بالإضافة إلى ترميز توجه الطبقات بالنسبة للاتجاه الأساسي المرجعي (الاتجاه X في الشكل 3-5) من الضروري أن يشمل ترميز الصفائح غير المتجانسة شكل التقوية

المستخدمة. وهكذا للمثال البسيط في الشكل (4-3) الألياف العشوائية موجودة داخل الأنبوب لذا تسلسل التكديس كالتالي: $_{inside} [+55/-55/R_C]_{outside}$.

2-5-3- ترتيبات الألياف المنسوجة المحاكاة و المضفرة:

Woven, braided and knitted fiber arrays

يمكن أن تنتج الألياف المستمرة بتشكيلات هندسية مختلفة بالإضافة إلى استخدامها بترتيبات موحدة الاتجاه بالرقاقات وحيدة الاتجاه. استخدمت التقنيات المستخدمة أساساً من أجل عمليات النسيج: النسيج، الحياكة أو الضفر. يبين الشكل (6-3) الأنواع المتنوعة للنسيج.



الشكل (6-3) الأنواع المتنوعة للنسيج.

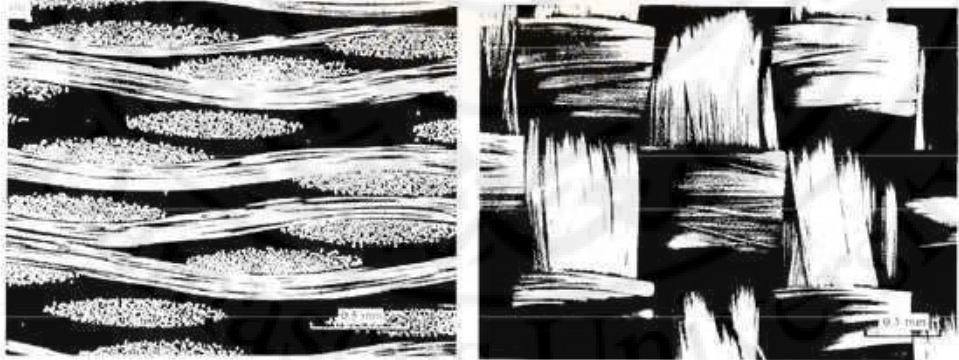
حسب الشكل (7-3). يشكل ترتيب الألياف في القماش المنسوج زاوية بين الإعوجاجات الطولية والعرضية مقدارها 90° ، وتسمح مرونة القماش بأن يحدث الانحناء والتشكيل. مما يساعد على الاستخدام في البنيات غير المستوية. تعتمد الزاوية بين الإعوجاجات الطولية والعرضية على مدى الثني أو التجعد. تتطلب الميزات الكاملة للمواد المركبة ذات الألياف المنسوجة معلومات عن مسافات النسيج و عدد الألياف في كل طرف و الزاوية بين الإعوجاجات الطولية والعرضية ونسبة عدد الألياف في هذه الاتجاهات. تقود بنية النسيج إلى وضع المادة الحاضنة في بؤر على نقاط العبور للألياف. انظر الشكل (7-3 (b)) إن الكمية الأعظمية للألياف في المواد المركبة المحتوية على نسيج أقل من

كمية الألياف في المواد المركبة المرتبة فيها الألياف. تنتج ترتيبات الليف بواسطة الضفر ثنائي الاتجاه المعروف بالنسبة للأنسجة المحاكاة.

يستخدم عادةً الضفر للأنايبب المرنة. يؤدي امتطاط الأنبوب عن طريق زيادة الطول أو القطر إلى دوران الألياف المجدولة. ويمكن أن تنشأ أشكال أكثر تعقيداً مع النقاء الألياف المجدولة بزوايا مختلفة. يستخدم حالياً الضفر لإنتاج الهندسة البنائية للألياف ثلاثية البعد، ولا يمكن تجنب مناطق غنية بالمادة الحاضنة في حالة تسليح النسيج المحاك. لذلك المحتوى الأعظمي للألياف أقل من محتوى الألياف في الصفائح المصنوعة بواسطة تكديس الرقائق وحيدة الاتجاه.

تستخدم كذلك الحياكة لإنتاج نسيج مسبق التشكيل، تكون عادة الألياف على شكل خامة غزل لتسهيل الحياكة. يمكن الحياكة على عدة هيئات، يرتب الغزل على شكل مجموعات مكررة من حلقات متشابكة داخلياً لذلك يتغير باستمرار توجيه الألياف في الأبعاد الثلاثة.

النسبة الحجمية للألياف المحتواة قليلة نسبياً ولا يمكن تجنب بؤر للمادة الحاضنة. طورت طرق مبتكرة لتحسين الخواص باتجاهات محددة تتضمن هذه الطرق وضع الألياف المستقيمة الإضافية باتجاهات محددة في البنيات المحاكاة.



الشكل (7-3) (a) SEM بنية مجهرية للنسيج قبل التخلخل بالريزين.

(b) صورة مجهرية لمقطع مصقول لصفحة مقواة بنسيج من الألياف .

شكل توزيع الألياف الشائع الاستخدام لتطبيقات المواد المركبة القليلة التكلفة هو استخدام الألياف المقطعة المتشابكة بنسيج. حزم من الألياف الطويلة نسبياً مجمعين مع بعضهم

باتجاهات عشوائية في المستوي، كما هو مبين في الشكل (8-3). يمكن التعامل بسهولة مع هذه المادة كمادة مسيكة التشكيل وخواص المادة المركبة الناتجة واحدة في جميع الاتجاهات في المستوي. ولكن النسبة الحجمية للألياف المحتواة محدودة بالقيم الصغيرة نسبياً.



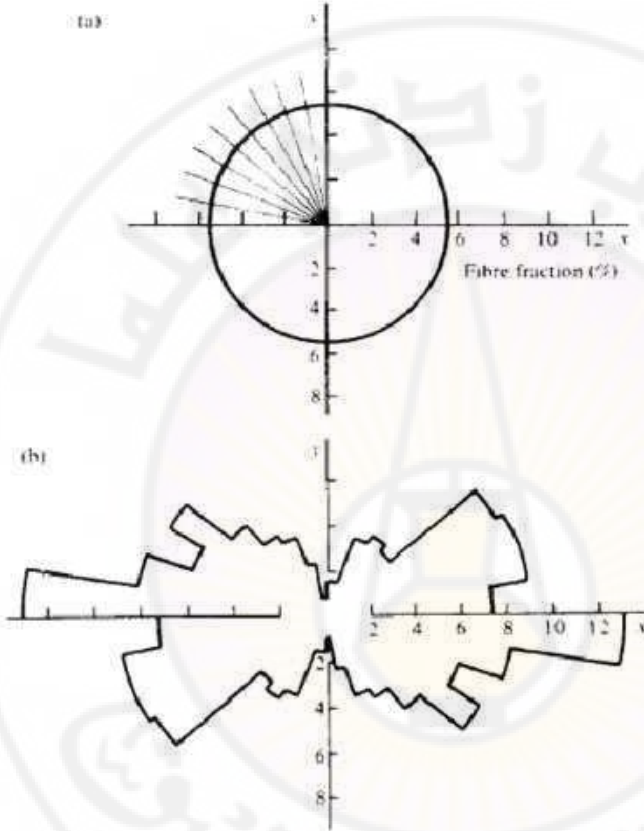
الشكل (8-3) صورة بمجهر المسح الإلكتروني لنسيج متشابك قبل التخلخل بالريزين.

3-5-3- مميزات اتجاهات الليف في المستوي:

Characterization of fiber orientations in a plane

من السهل وصف توزيع اتجاهات الألياف المبينة في الأشكال (6-3 و 7-3). على أية حال هناك حالات يكون فيها التوزيع أكثر تعقيداً. يمكن أن يمثل هذا التوزيع المعقد باستخدام مخطط يوضح تكرار النمط حسب ما هو موضح في الشكل (9-3). نحصل على المخططات بواسطة تسجيل اتجاهات الألياف الفردية بالنسبة للاتجاه المرجعي. يمكن تحقيق ذلك بواسطة تحليل الصور الفوتوغرافية. يمكن أن تؤخذ الصور بالمجهر المينالورجي البسيط أو بالمجهر الإلكتروني أو صور بواسطة أشعة X . تقسم بعد ذلك الاتجاهات إلى عدد مناسب من الصناديق "bins"، يوجد 18 من هذه الصناديق للمخططات المبينة وهي على فترات من 10° . الامتداد المحتاج له 180° من دون إجراء تمييز بين الاتجاهين على طول محور الليف، يتناسب نصف قطر كل صندوق "bin" مع نسبة الألياف بالاتجاه في المنطقة المعتبرة. إن مجموع أنصاف الأقطار يساوي 100%. نصف قطر الدائرة يساوي تقريباً $100/18 \sim$ أي يساوي 5.5%， وذلك للتوزيع

البسيط الموحد الخواص في جميع الاتجاهات الشكل (9-3 (a)). يبين الشكل (9-3 (b)) التوزيع الذي تصطف فيه الألياف بشكل مفضل قرب المحور في المستوي.



الشكل (9-3) مخطط

يوضح التكرار في

توزيع اتجاه الألياف

في ترتيبتين

للألياف. توزيع

عشوائي كامل موحد

الخواص

(b) توزيع تجريبي

من مادة مركبة

مصنعة بالقولبة

بالحقن من البولي

بروبلين المقوى

بالألياف الزجاجية.

3-6-3 الألياف القصيرة : Short Fibers

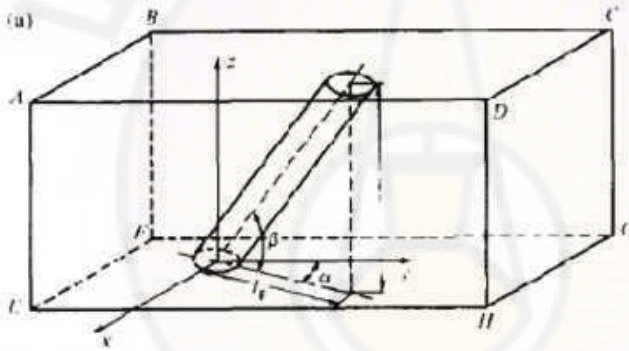
3-6-3-1 توزيع اتجاهات الليف في الأبعاد الثلاثة:

Fiber orientation distributions in three dimensions

قياس وتمييز توزيع اتجاه الألياف المتوضعة بشكل غير مواز لمستوي مفرد أكثر صعوبة، وهذه هي الحالة للألياف القصيرة نسبياً. تعتمد الطريقة البسيطة على افتراض أن الألياف اسطوانية مستقيمة ذات مقطع اسطواني. يفحص مستوي المقطع غير المشوه للمادة المركبة الذي يكون فيه كل ليف مرئي بشكل قطع ناقص. كما هو مبين في الشكل (10-3). يمثل متوازي المستطيلات $ABCDEFGH$ شريحة رقيقة من المادة متوازية

الجوانب. التي قطعت من موضع محدد مسبقاً وبزاوية بالنسبة للمحاور المرجعية للجزء. يحدد توجيه الألياف عن طريق الزاويتين α و β . يمكن أن تحدد الزاوية α في المقطع $(ABCD)$ بين الاتجاه المرجعي (المحدد بالمحور Y في هذه الحالة) واتجاه المحور الأساسي للمقطع الناقص الشكل (3-10 (b)). يمكن أن تقاس الزاوية β بإحدى طريقتين، تتضمن الطريقة البسيطة قياس معدل الأبعاد الممثلة بنسبة محور المقطع الكبير إلى نسبة محور المقطع الصغير.

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3-7) \quad \text{ومنه } \beta \text{ تساوي:}$$



الشكل (3-10)

تحديد توجيه الليف

في مقطع رقيق.

يحدد التوجيه:

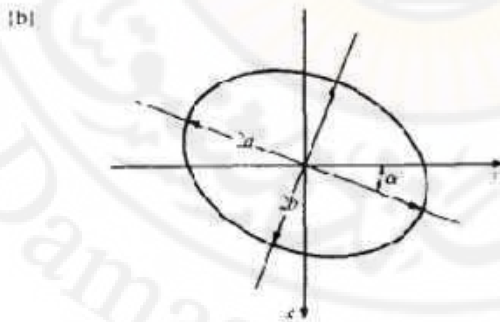
(a) بالزوايا

$\alpha - \beta$

(b) بواسطة شكل

وتوجيه المقطع

العرضي للليف.



من الصعب أن تقاس هذه النسبة بدقة، وبشكل خاص إذا كان قطر الليف صغيراً. من الممكن أن يقاس الطول المسقط للليف L_p إذا كان المقطع بصرياً شفافاً بواسطة التصوير بأشعة X .

تُعطي عندها الزاوية β بالعلاقة:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{t}{L_p}\right) \quad (3-8)$$

حيث t سماكة المقطع .

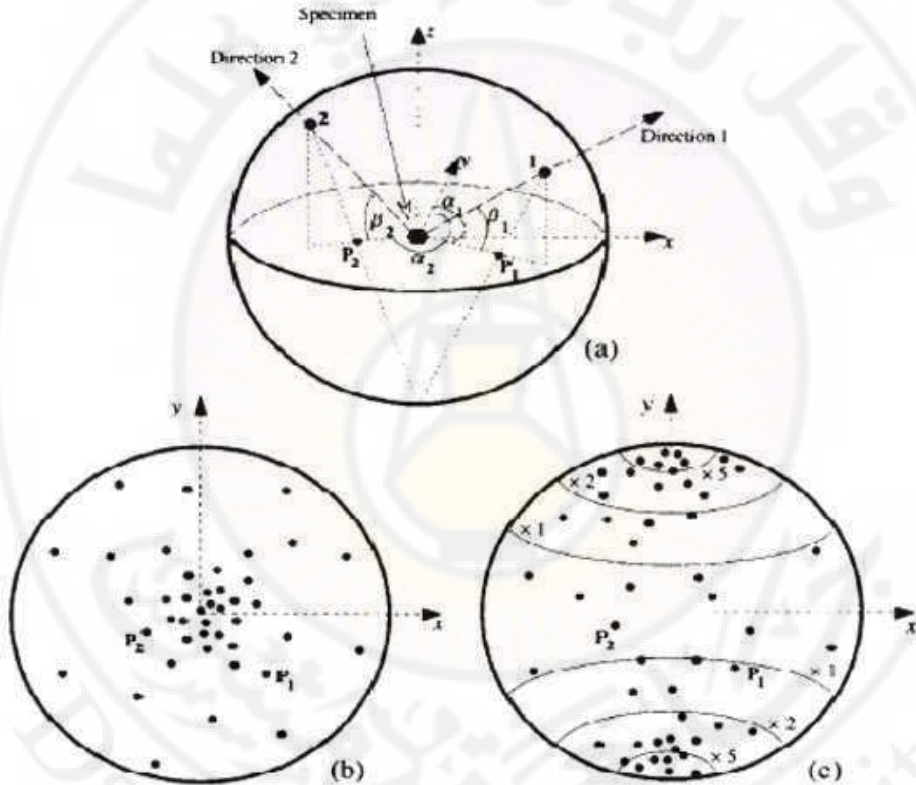
لا يمكن تمييز توجيه الألياف في هذه الطرق. بسبب وجود موضعين محتملين من أجل الزوايا التي يأخذها الليف $\alpha - \beta$. يمكن أن يحصل على نفس نسبة الأبعاد وعلى نفس الطول المسقط لليف الموجود على زاوية مقدارها $(\pi - \beta)$. من الممكن عند فحص المقاطع الشفافة أن نحدد نهاية الليف التي تبرز على السطح العلوي، وذلك بمقارنة الصور البصرية والتصوير بواسطة الأشعة X .

توجد طرق أخرى لتمييز توزيع توجيه الليف، رغم أنها محدودة الفائدة. على سبيل المثال، إذا كانت الألياف غير شفافة في الصورة المأخوذة بالمجهر والمادة الحاضنة شفافة. يمكن أن نحصل عندها على تحويلات فورييه عن طريق انحراف (تشتت) الضوء المار من خلال الصورة. إذا أعيدت هذه العملية على سلسلة من المقاطع، يمكن أن نحصل على تمييز كامل للتوزيع. تقنية أخرى قابلة للتطبيق فقط للألياف وحيدة البلورات (مثل الشعيرات SiC Whiskers). تتضمن هذه الطريقة دراسة نماذج انحراف الأشعة من الجزء. إن أشعة X غير مناسبة، نظراً لمحدودية عمق الاختراق ويفضل انحراف النيوترون.

تمثل توزيعات التوجيه في الأبعاد الثلاثة في مخططات الإسقاط المجسم، وهكذا تمثل معلومات البنية متعددة البلورات بالمخططات القطبية. التي ترسم التردد النسبي للتوجه وفق اتجاه محدد، بالنسبة للإطار الخارجي المرجعي. إن إعادة تمثيل توزيعات الألياف أبسط من تلك للبنية متعددة البلورات حيث نحتاج فقط لتوجيه محور الألياف.

يمثل توجيه محور كل ليف كنقطة على المخطط المجسم. لا يرسم التوزيع ثلاثي البعد العشوائي التوجيه كنقاط منتظمة الكثافة في مسقط المخطط المجسم. تتجمع النقاط قرب المركز وتتناثر باتجاه الحواف الشكل (3-11). يبين هذا الشكل (a) كيف أن الاتجاهين 1 و 2 يرسمان P_1 و P_2 على المسقط. (b) كيف يرسم اتجاهات التوزيع المتماثل الخواص في جميع الاتجاهات كمجموعة من النقاط غير منتظمة الكثافة. الطريقة الأكثر

فعالية لتمثيل معلومات توزع الألياف تتم على شكل سلسلة من المحيط الخارجي، ممثلة نسبة كثافة النقاط الموضعية إلى تلك للتوزع المثلث الخواص في جميع الاتجاهات. يتم بسهولة بناء مثل هذا المحيط الخارجي بواسطة برنامج الحاسوب. الشكل (3-11c). كذلك يسمح هذا بتمييز قوة أي اتجاه مفضل برقم، حيث تم إثبات قيمة أكبر محيط شكل خارجي.



الشكل (3-11) تمثيل توزع الاتجاهات في الأبعاد الثلاثة باستخدام الإسقاط المجسم. (a) إنشاء مخطط التكرار والذي يعرض كيفية رسم الاتجاهين 1 و 2 كنقاط P_1 و P_2 حيث تتقاطع الخطوط من 1 و 2 حتى القطب الجنوبي مع مستوى الاستواء. (b) مخطط إسقاط مجموعة موجهة باتجاهات عشوائية. (c) مخطط إسقاط لمجموعة اتجاهات مع منظومة انحياز باتجاه المرجعي y ، مع مناطق الفصل المفروضة بمحيط شكلها التي تختلف فيها كثافات أجزاء الحالة المتعددة العشوائية.

2-6-3- توزيع أطوال الألياف: Fiber length distributions

إن توزيع أطوال الألياف مهم جداً في المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة. يمكن أن تحدث عمليات التصنيع مثل البثق المستخدمة عادة للمواد المركبة ذات الأساس البوليميري المملدن حرارياً والمواد المركبة ذات الأساس المعدني تكسر زائد على الألياف مع تأثيرات كبيرة على الخواص الميكانيكية. تصنف التقنيات المستخدمة لتحديد توزيع أطوال الألياف إلى طرق مباشرة وأخرى غير مباشرة.

تتضمن الطرق غير المباشرة قياس بعض الخواص الفيزيائية للمادة المركبة مثل المتانة تعتمد هذه الخواص المقاسة على طول الألياف. إن هذه الطريقة غير دقيقة إلا أن لها قيمة من حيث التحكم بجودة المادة المركبة.

في الطرق المباشرة تفصل الألياف عن المادة الحاضنة. حيث من المستحيل عملياً إجراء أي قياسات مفيدة والألياف موجودة ضمن المادة المركبة. يتم الحصول على الألياف من المادة المركبة بحل المادة الحاضنة ونحصل على مادة معلق ضمنها الألياف التي ترسب بعد ذلك إلى داخل مادة بديلة مناسبة للفحص بالطرق البصرية أو بمجهر المسح الإلكتروني. تتضمن طريقة بديلة نخل الألياف عبر سلسلة من المناخل لفصل نسب الأطوال المختلفة، إلا أن هذه الطريقة عرضة للخطأ بسبب انزلاق الألياف الطويلة من المناخل بحسب زوايا تقابلها مع مستوي النخل أو يمكن أن تحصر الألياف القصيرة بسبب وجود ألياف أخرى.

إن القياسات المباشرة لا لبس فيها ولكن تستغرق وقتاً. تفحص الصور البصرية كتلك المبينة بالشكل (a-3-12) ما يدويّاً أو بواسطة أنظمة تحليل الصور لتعطي سلسلة من أطوال الألياف. ترسم البيانات بيانياً بالمستطيلات التي تبين الأطوال المقاسة مع عدد الألياف لهذا الطول كما هو مبين في الشكل (b-3-12). إن انحراف التوزيع واضح في هذا المثال. كان طول الليف قبل التصنيع 6 mm ويبين المخطط أنه لم يسلم أي من الألياف من الكسر.

من الصعب تحديد المعدل الوسطي لأطوال الألياف ولكن من الشائع استخدام متوسطان بسيطان. يحدد رقم المعدل الوسطي لأطوال الألياف بالعلاقة التالية:

$$L_N = \frac{\sum N_i L_i}{\sum N_i} \quad (3-9)$$

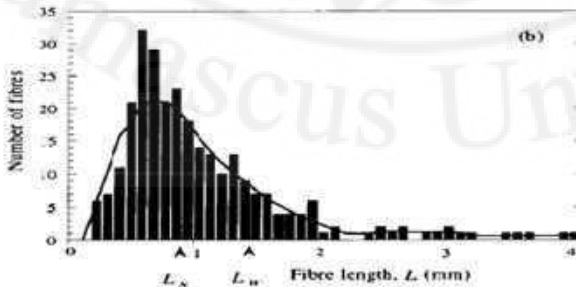
حيث N_i عدد الألياف ذات الطول L_i (مع بعض المجال المحدد قرب الطول L_i).
يحدد معدل وزن (أو حجم) أطوال الألياف بالعلاقة التالية:

$$L_W = \frac{\sum W_i L_i}{\sum W_i} \quad (3-10)$$

حيث W_i وزن الألياف ذات الطول L_i . تصبح المعادلة للألياف ذات القطر الثابت كما يلي:

$$L_W = \frac{\sum \alpha N_i L_i^2}{\sum \alpha N_i L_i} = \frac{\sum N_i L_i^2}{\sum N_i L_i} \quad (3-11)$$

حيث $\alpha = \pi r^2 \rho$ ($2r$ قطر الألياف، ρ الكثافة). يبين الشكل (b-3-12) الفرق بين هذين المعدلين. رقم المعدل L_N أخفض من معدل الوزن L_W . توزع الطول المعتمد على الوزن أكثر معنى حيث يعكس النسبة الكلية للألياف المحتواة من أي طول.



الشكل (3-12)
(a) صورة للألياف
القصيرة المفصولة
عن المادة الحاضنة
الملدنة حرارياً بعد
عملية الحقن.

(b) مخطط
المستطيلات لطول
الألياف المنتزعة
من المادة المركبة
المحقونة من مادة
ملدنة حرارياً.

7-3-الفجوات: Voids

يمكن أن توجد أنماط عديدة من الفجوات في المواد المركبة. يمكن أن تحدث هذه الفجوات في كل أنواع المواد المركبة، على الرغم من الاختلافات في كيفية حدوثها التي تعتمد على طريقة التصنيع ونوع المادة الحاضنة. يمكن أن تتشكل تجاويف كبيرة خلال مرحلة تصنيع الجزء من المواد المركبة كنتيجة عن مجموع العيوب. تتشكل الفجوات الصغيرة بشكل مجاور للألياف، إما بسبب التخلخل غير الكامل أثناء عملية التصنيع أو بسبب التكهف أثناء التشوه. تتشكل أيضاً الفجوات في الجيوب الغنية بالمادة الحاضنة أو في المناطق الخالية من الألياف بين الرقائق في الصفائح.

توجد طريقتين أساسيتين لتقييم محتوى الفجوات في المواد.

الطريقة الأولى: تتم هذه الطريقة بفحص المقطع المصقول وتحديد الفجوات، إما يدوياً أو آلياً وتحديد النسبة السطحية، التي تساوي النسبة الحجمية. تتميز طريقة فحص المقطع بإمكانية تحديد مواضع وأشكال الفجوات. يبين الشكل (13-3) أمثلة لأنواع متعددة من الفجوات. إن هذه الطريقة غير دقيقة، حيث من الصعب اكتشاف الفجوات الصغيرة وحتى الكبيرة منها التي تغطي بسهولة بواسطة انسياب المادة الحاضنة أو فقدان كسرات التقوية أثناء صقل العينة. من الصعب أيضاً تحديد المعدل الوسطي للفجوات المحتواة في العينة دون فحص عدد كبير من المقاطع.

الطريقة الثانية: إن هذه الطريقة خالية من أية مشاكل وتتم بإجراء قياسات دقيقة لكثافة العينة. يتم تحديد الكثافة بوزن العينة في الجو وبعد ذلك توزن العينة في سائل معلوم الكثافة. يطبق مبدأ أرخميدس لتحديد الكثافة (ρ) حسب العلاقة التالية:

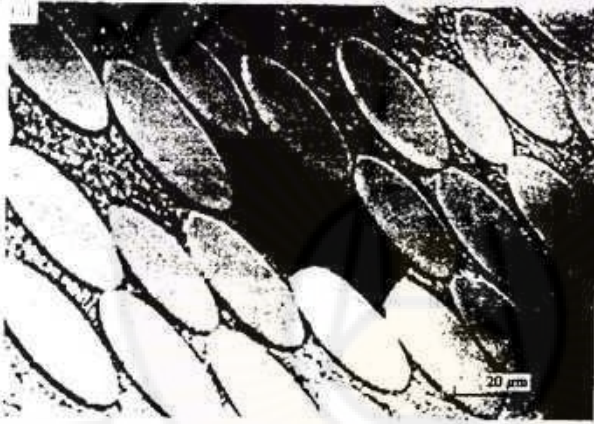
$$\rho = \left(\frac{W_a \rho_L - W_L \rho_a}{W_a - W_L} \right)$$

حيث ترمز الدالة a و L إلى الهواء والسائل على التوالي. يجب أن يكون السائل المستخدم عالي الكثافة ثابت كيميائياً ومنخفض ضغط البخار ومنخفض التوتر السطحي. السائل الشائع الاستخدام هو perfluoro-1-methyl decalin.

يمكن أن تظهر المشاكل إذا كانت أي من المسامات متصلة سطحياً ، حيث يمكن عندئذ أن يدخل السائل شبكة المسامية خلال عملية الوزن معطياً قراءات غير صحيحة. إن أحد الحلول هو طلاء العينة بطبقة من اللكر غير النفوذ للسائل.

يتم تحديد الكثافة كما يلي:

(a) المعايرة دون عينة، (b) تحديد وزن العينة غير المطلية على كفة الميزان العلوية، (c) الوزن للعينة المطلية على كفة الميزان العلوية، (d) وزن العينة المطلية المغمورة بالسائل على كفة الميزان السفلية.



الشكل (13-3)

(a) صورة توضح فجوات كبيرة بين الألياف وذلك في رقائق ريزين البوليستر مع الألياف الزجاجية.



(b) صورة بمجهر المسح الإلكتروني تبين تجاويف صغيرة مجاورة لحبيبة الألومينا في المادة المركبة ذات الأساس من الألمنيوم بعد السحب على البارد.

يتم إيجاد كثافة العينة ρ بتطبيق العلاقة التالية:

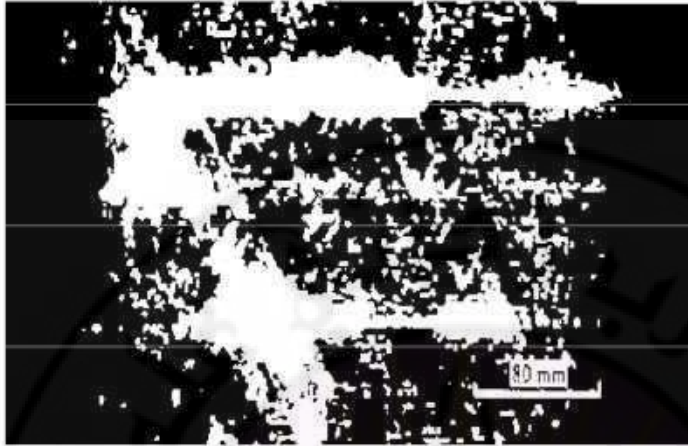
$$\rho = W_{ua} \left[\left(\frac{W_{ca} - W_{cl}}{\rho_L - \rho_a} \right) - \left(\frac{W_{ca} - W_{na}}{\rho_c - \rho_a} \right) \right]^{-1} + \rho_a \quad (3-13)$$

حيث ترمز الدالة c-u-L-a إلى الهواء -السائل -غير المطلية-المطلية على التوالي. يجب أن تكون كثافة الطلاء ρ_c معلومة، وبما أن الطلاء رقيق السماكة نسبياً فمن غير الضروري الدقة العالية في قيمة هذه الكثافة.

تسمح طريقة الوزن بتحديد الفجوات المحتواة فقط إذا عرفت كثافة المادة المركبة المصممة بشكل تام. يتم معرفة كثافة المادة المركبة المصممة عندما يكون محدداً بدقة كثافة مكونات المادة المركبة والنسبة الحجمية لمادة التقوية المحتواة. إذا كان للألياف والمادة الحاضنة كثافات مختلفة كثيراً سيؤثر عند ذلك الخطأ في محتوى الألياف على محتوى الفجوات المحدد حسابياً. إلا أنه يمكن عملياً تحديد النسبة الحجمية للألياف المحتواة بشكل دقيق بطرق الفحص المجهرية بمخبر المعادن.

طريقة أخرى تتم بمقارنة قيم الكثافة المقاسة قبل وبعد عملية تكثيف المادة بالضغط المرتفع على الساخن HIP.

يمكن أن تستخدم طريقة المسح بالأمواج فوق الصوتية من أجل الفحص غير التخطيمي الكمي لتوزع الفجوات وتحديد عيوب المواد المركبة. يتم مسح العينة بالنبضات فوق صوتية ويقاس وهن هذه النبضات في المادة. يتم استمرار الفحص حتى يتم إنتاج صورة ثنائية الأبعاد. الطريقة مفيدة بشكل خاص للتحكم بجودة المواد الصفائحية. يبين الشكل (3-14) مثلاً للمسح بالأمواج فوق الصوتية لمادة مركبة صفائحية من راتنج الإيبوكسي وألياف الكربون.



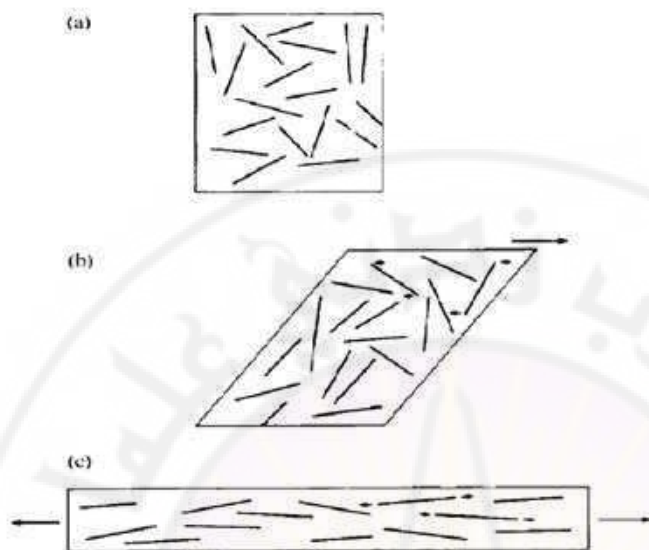
الشكل (14-3) صورة
بالمسح بالأمواج فوق
الصوتية لمادة مركبة
صفائح متعددة
الطبقات من راتنج
الإيبوكسي وألياف
الكربون. المناطق
المضاعة بسبب
الفجوات ووهن
النبضات في المادة.

8-3- توجيه الألياف خلال التصنيع:

Fiber orientation during processing

غالباً ما تحدث التغييرات في توجيه الألياف خلال تصنيع المواد المركبة المحتوية على ألياف قصيرة. يخضع المصهور في هذه العملية لجريان طولي ولجريان قص. يوضح الشكل (15-3) تأثير عمليات الجريان هذه على توجيه الألياف من أجل تشويه بسيط ثنائي البعد . تدور الألياف باتجاه الجريان خلال الجريان الطولي. يمكن أن ينتج عن الجريان الطولي الكبير درجة كبيرة من الاصطفاف و الترتيب. أما في جريان القص تدور بعض الألياف باتجاه القص وتدور الألياف الأخرى بالاتجاه المعاكس ولا يوجد لهذا السبب تغير في إجمالي التوجيه. وهكذا تعتمد درجة توجيه الألياف السائدة على حقل الجريان. تؤثر لزوجة المادة الحاضنة بشكل أساسي على توزيع التوجيه النهائي من خلال تأثيرات هذه اللزوجة على طريقة إملاء القالب. كذلك تحدد هذه اللزوجة توزيع حقول الجريان الطولي و جريان القص.

مثال على تأثيرات حقول الجريان في توجيه الألياف معطى في الفقرة 4-1-11 من أجل طريقة القولبة بالحقن.



الشكل (3-15) التمثيل
التخطيطي للتغيرات
الحادثة في توجيه
الألياف خلال الجريان
(a) توزيع أولي
عشوائي (b) دوران
خلال جريان القص (c)
اصطفاف خلال الجريان
الطولي.



الفصل الرابع

التشوه المرن للمواد المركبة المقواة بالألياف
الطويلة

**Elastic deformation of long-fiber
composites**

- 1- الجساءة المحورية.
- 2- الجساءة العرضية.
- 3- جساءة القص.
- 4- تأثيرات انكماش بواسون.



1-4- مقدمة: Introduction

أعطى في الفصلين السابقين، معلومات بسيطة حول الأنماط المختلفة للتقوية والطرق المتنوعة لتوزيع هذه التقوية في المواد الحاضنة المتنوعة. سنركز الانتباه في هذا الفصل على مشكلة تنبؤ سلوك المواد المركبة الناتجة، إن الأمر الأساسي هو الخواص الميكانيكية. يهدف عادة تضمين التقوية إلى تحسين الجساءة والمتانة للمادة الأساس. تفاصيل هذا التحسين معقدة وصعبة الوصف بشكل كامل ودقيق.

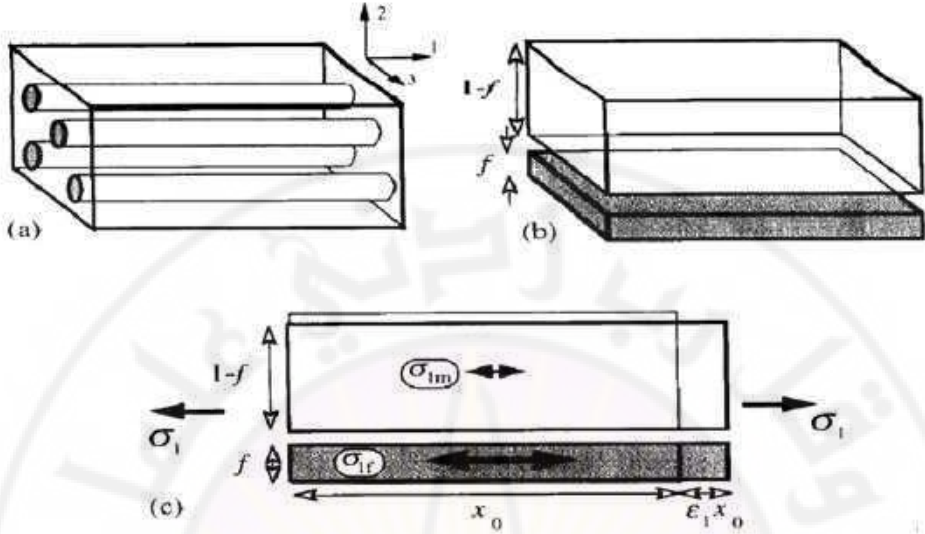
أسهل نقطة في البدء هي دراسة السلوك المرن للمادة المركبة المقواة بالألياف مستمرة مصطفة بنفس الاتجاه. يكون ترتيب اصطفاف التقوية المستخدمة من أجل موازنة الجساءة (ليس المتانة) بالاتجاه الموازي للألياف.

إن فهم سلوك المادة عندما تحمّل باتجاهات أخرى مهم جداً. تم الافتراض في هذا الفصل والفصل الذي يليه، على وجود ترابط كامل بين الألياف والمادة الحاضنة عبر السطح البيني. سوف ندرس بالتفصيل طبيعة منطقة السطح البيني في الفصل السابع.

2-4 الجساءة المحورية: Axial stiffness

تستند المعالجة البسيطة للسلوك المرن للمادة المركبة المقواة بألياف طويلة على فرضية أنه يمكن أن تعالج المادة وكأنها لو كانت مؤلفة من كتل متوازية من اثنين من المركبات المترابطة بعضها مع بعض مع سماكة نسبية متناسبة مع النسبة الحجمية للمادة الحاضنة والألياف. يوضح الشكل (1-4) ذلك حيث الكتلتين مقيدتان ليكون لهما نفس الأطوال الموازية إلى ترابط السطح البيني. وهكذا إذا طبق الإجهاد في اتجاه اصطفاف الألياف (الاتجاه 1).

يحدث نفس الانفعال في كلا مكوني المادة المركبة في هذا الاتجاه ϵ_1 ، حيث حالة الانفعال المتساوي مقبولة للتطبيق عند التحميل على طول الألياف عند عدم وجود انزلاق على السطح البيني.



الشكل (4-1) الرسم التخطيطي حيث يبين:

(a) المادة المركبة المتضمنة النسبة الحجمية f للألياف المستمرة المصطفة.

(b) تمثيل ذلك وكأنه كتلتان مترابطتان من المادة الحاضنة والألياف.

(c) تطبيق الإجهاد σ_1 الموازي لمحور الألياف وبذلك تتعرض كلا الكتلتين إلى نفس الانفعال المحوري ϵ_1

يمكن إيجاد عامل يونغ للمادة المركبة E_1 ، حيث إن الانفعال المحوري في الألياف والمادة الحاضنة يساوي النسبة بين الإجهاد وعامل يونغ من أجل كلا المكونين لذا :

$$\epsilon_1 = \epsilon_{1f} = \frac{\sigma_{1f}}{E_f} = \epsilon_{1m} = \frac{\sigma_{1m}}{E_m} \quad (4-1)$$

وللمادة المركبة ذات الألياف الأكثر جساءة من المادة الحاضنة أي ($E_f \gg E_m$) فإنه تتعرض مادة التقوية لإجهاد أكبر ($\sigma_{1f} \gg \sigma_{1m}$) من المادة الحاضنة ويكون هناك إعادة لتوزيع الحمل.

يكون إجمالي الإجهاد σ_1 بحسب نسبة مشاركة كل مكون في المادة المركبة:

$$\sigma_1 = (1 - f)\sigma_{1m} + f\sigma_{1f} \quad (4-2)$$

يحسب معامل يونغ للمادة المركبة حسب العلاقة التالية:

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{[(1-f)\sigma_{1m} + f\sigma_{1f}]}{(\sigma_{1f}/E_f)} = E_f \left[\frac{(1-f)\sigma_{1m}}{\sigma_{1f}} + f \right] \quad (4-2)$$

بتعويض المعادلة (4-1) ينتج لدينا :

$$E_1 = (1-f)E_m + fE_f \quad (4-3)$$

تعرف هذه بقاعدة المزج التي تبين أن جساءة المادة المركبة (معامل يونغ) يتعلق بشكل رئيسي بمعاملات كلا مكوني المزيج وتعتمد فقط على النسبة الحجمية للألياف.

إن هذه المعادلة متوقعة ومقبولة ولدرجة كبيرة من الدقة، شريطة أن تكون الألياف طويلة بشكل كافٍ من أجل تطبيق فرضية الانفعال المتساوي. من المتوقع الانحرافات الطفيفة عن المعادلة كنتيجة للإجهاد الذي يظهر عندما تكون نسبة بواسون غير متساوية لمكوني المادة المركبة. إن صحة قاعدة المزج مثبتة تجريبياً لعدد من المواد المركبة المقواة بالألياف مستمرة. تدعى هذه الطريقة لمعالجة الانفعال المتساوي بنموذج فويغت " Viogt model"

4-3- الجساءة العرضية: Transverse stiffness

النتنبؤ بالجساءة العرضية للمادة المركبة من خواص المرونة للمكونات أكثر صعوبة من القيمة المحورية، بالإضافة إلى أن القياس التجريبي للجساءة العرضية أكثر عرضة للخطأ كنتيجة للاجهادات العالية في المادة الحاضنة التي يمكن أن تسبب زحف المواد الحاضنة البوليميرية تحت تأثير أحمال معتدلة. إن المنهج التقليدي هو التمثيل بواسطة نموذج الكتل المصير الشكل (4-1). في المادة المركبة المقواة بالألياف الشكل (4-1) (a) كلا الاتجاهين 2 و 3 العرضيان على الألياف. المشكلة الواضحة في نموذج الكتل هي أن الاتجاهين العرضيين غير متماثلين.

سوف ندرس حالة الاجهاد المتساوي (المستخدمة لوصف الخواص العرضية). يبين الشكل (4-2) تطبيق الإجهاد في الاتجاه 2.

$$\sigma_2 = \sigma_{2f} = \varepsilon_{2f} E_f = \sigma_{2m} = \varepsilon_{2m} E_m \quad (4-4)$$

إن الإنفعال الكلي مساوٍ لـ:

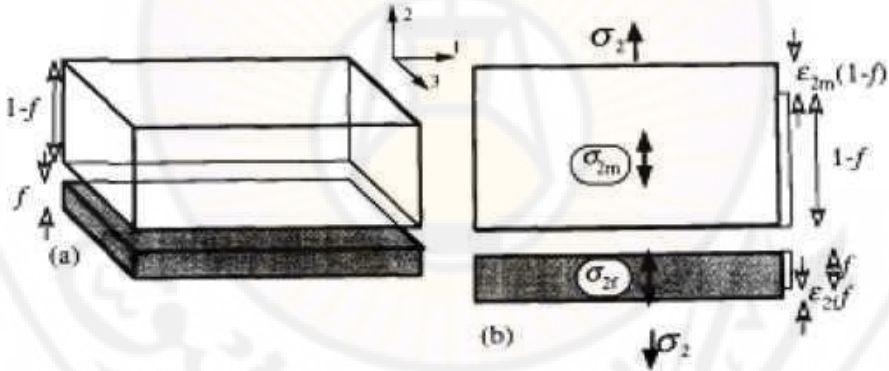
$$\varepsilon_2 = f \varepsilon_{2f} + (1-f) \varepsilon_{2m} \quad (4-5)$$

يعطى معامل مرونة المادة المركبة بالعلاقة:

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = \frac{\sigma_{2f}}{[f \varepsilon_{2f} + (1-f) \varepsilon_{2m}]}$$

بالتعويض بقيمة $\varepsilon_{2f} - \varepsilon_{2m}$ من العلاقة (4-4) ينتج لدينا :

$$E_2 = \left[\frac{f}{E_f} + \frac{(1-f)}{E_m} \right]^{-1} \quad (4-6)$$



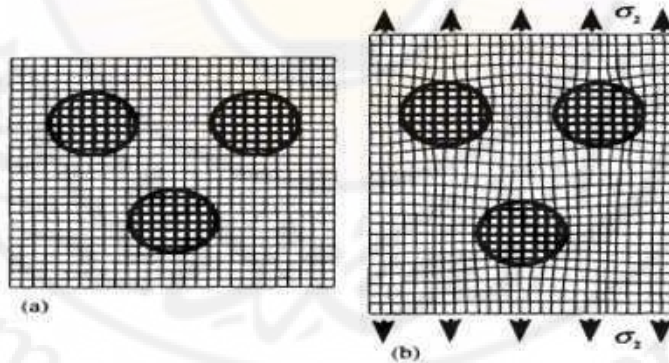
الشكل (4-2) يبين تخطيطياً (a) نموذج الكتل (b) افتراض الإجهاد المتساوي خلال حالة الإجهاد العرضي.

تدعى معالجة الإجهاد المتساوي بنموذج ريوس "Reuss model".

على الرغم من أن هذه المعالجة بسيطة ومناسبة ولكنها تعطي تقريباً ضعيفاً من أجل E_2 . ومن المفيد علمياً أن نعتبر الطبيعة الحقيقية لتوزيع الإجهاد والانفعال خلال هذا النوع من التحميل عندما يستعاض عن كتل التقوية بالألياف. تتعرض مناطق من المادة الحاضنة مع الألياف وقريبة من الألياف وعلى خط باتجاه الحمل لاجهادات مرتفعة

مشابهة لتلك المعرضة له مادة التقوية كما هي موصوفة في الشكل (4-2 (b)). إن مناطق المادة الحاضنة المتلاصقة مع الألياف لها نفس الانفعال المنخفض كما لمادة التقوية وتحمل إجهاد منخفض كما موضح في الشكل (4-1 (c)).

يمكن تصور حقل الانفعال الكلي (الإجمالي) بواسطة عمليات إزالة الألياف مما يؤدي للانفعال بانتظام للمادة الحاضنة المتبقية. إعادة إدخال الألياف (التي سوف تتشوه قليلاً بسبب الاجهادات حيث لها جساءة مرتفعة) يؤدي إلى تشوه المادة الحاضنة بحيث يتوحد كلا المكونين ثانيةً حول السطح البيني. نتيجة هذه العملية موضحة في الشكل (4-3). خطوط الشبكة التي تشكل شبكة مربعة تمثل مواد غير مقيدة. لتصبح مشوهة عند تحميل المادة المركبة بطريقة توزيع الانفعال الموضعي. يوزع هذا الانفعال وبالتالي الإجهاد ضمن المادة الحاضنة بشكل غير منتظم بالمقارنة مع انتظام انفعال المادة الحاضنة عندما يكون اتجاه التحميل على طول الألياف. إن عدم التجانس مع التركيز الحاد للإجهاد في أماكن محددة مهمة للسلوك غير المرن. التي تظهر كنتيجة فك ارتباط السطح البيني وبالتالي التشوه اللدن للمادة الحاضنة والتشقق الميكروي.



الشكل (4-3) يبين تخطيطياً حقل الانفعال في مادة مركبة عرضية بشكل مجموعات سداسية من الألياف الموازية التي هي أكثر جساءة من المادة الحاضنة. (a) غير منفصلة (b) عند تطبيق إجهاد عرضي بالاتجاه العمودي.

يمكن أن تثبت الطبيعة العامة لحقل الانفعال العرضي بالتجربة. على سبيل المثال تؤمن تقنية التصوير المرن الطريقة المناسبة لتصوير حقول الانفعال المرن في المواد الشفافة.

يبين الشكل (4-4) الصورة المأخوذة عن طريق التصوير المرن لشريحة عرضية من خلال نموذج ماكروبي لمادة مركبة محملة بشكل عامودي على اتجاه الألياف (عمودي في الصورة). الرؤيا البصرية للمادة بالمكان المحدد متناسبة مع الاختلاف بالانفعال الرئيسي في هذه النقطة.



الشكل 4-4 صورة للمرونة بشكل تخطيطي لمادة مركبة للنموذج ميكروي محمل بحمل شد عرضي (اتجاه عمودي).

لذلك تمثل المناطق التي يكون فيها المادة الحاضنة أكثر تشوهاً مقارنة في الشكل (4-3) (b) والشكل (4-4) تبين أن حقل الانفعال المتوقع يتفق مع النمط الملاحظ ويؤكد حدوث تشوه رئيسي في مناطق إجهاد الشد المرتفع للمادة الحاضنة. تشكل التدريجات الحادة للإجهاد على طول اتجاه التحميل ملامح هامة.

يعني التوزيع غير المتجانس للإجهادات والانفعال خلال التحميل العرضي أن نموذج الإجهاد المتساوي البسيط غير كافٍ. يعطي نموذج الكتل تقدير أقل لمعامل يونغ ويمكن أن يعامل كحالة الترابط الضعيف. وضعت علاقات تجريبية من أجل التقدير الأصح. إن أكثر هذه العلاقات نجاحاً لا تعتمد على مبدأ نظرية المرونة. ولكن تأخذ بالحسبان تحمل الألياف للحمل الكبير.

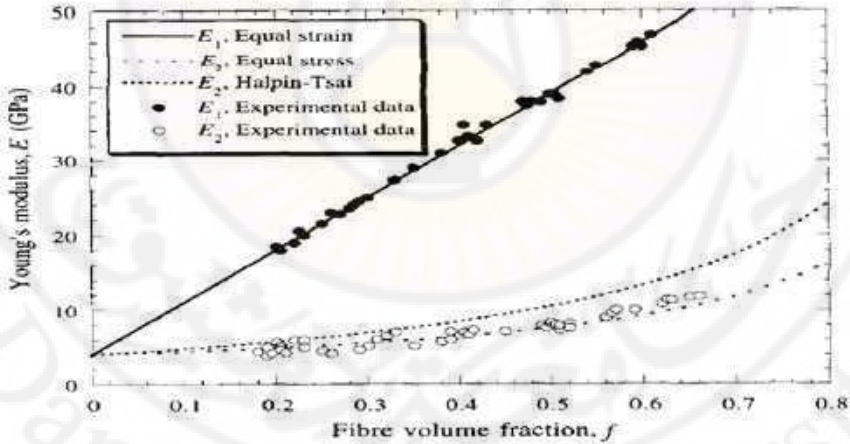
وتعطي الجساءة العرضية بالعلاقة التجريبية التالية:

$$E_2 = \frac{E_m(1 + \varepsilon \eta f)}{(1 - \eta f)} \quad (4-7)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m} - 1\right)}{\left(\frac{E_f}{E_m} + \zeta\right)}$$

إن قيمة ζ يمكن أن تؤخذ وكأنها بارامتر توافقي ولكنه يتأثر بشكل عام بحسب نظام الوحدة. تعطي العلاقة القيم الصحيحة في النهايات $f = 0, f = 1$ وتعطي بشكل عام توافقاً جيداً مع النتائج التجريبية لكل مجال محتوى الألياف.

يبين الشكل (4-5) مقارنة بين القيم المتنبأ بها بالمعادلات 4-3 و 4-6 و 4-7 والقيم التجريبية للمواد المركبة المكونة من الليف الزجاجي / البوليستر. من الواضح أن معالجة الانفعال المتساوي في المعادلة (4-3) تتطابق بشكل مقبول مع قيم بيانات للنموذج المحوري. الحالة أقل وضوحاً للنموذج العرضي. ويتبين ما يلي:



الشكل (4-5) مقارنة بين البيانات التجريبية من أجل معاملات يونغ المحورية والعرضية. معامل يونغ E_2, E_1 للمادة المركبة من البوليستر/ألياف زجاجية والتنبؤات من نموذج الانفعال المتساوي المعادلة (4-3) من أجل E_1 والإجهاد المتساوي المعادلة (4-6) مع $\zeta = 1$ المعادلة (4-7) نماذج من أجل E_2 والقيم التجريبية لـ E_2 التي تؤثر في التشوهات المرنة للمادة الحاضنة.

أولاً : تبين قيم البيانات التجريبية تشتاً كبيراً، تبدو بعض القيم أقل من قيم تتنبؤ الإجهاد المتساوي. المعادلة (4-6) التي سوف تتضمن الترابط الأقل.

ثانياً : تظهر العديد من القيم قيم قريبة من قيم منحني الإجهاد المتساوي، على الرغم من أن ذلك أقل وضوحاً لمحتوى الألياف العالي، هذا السلوك كنتيجة لتشوه مرن للمادة الحاضنة. تم الحصول على هذه القيم بتجارب التحميل الميكانيكي، التي تؤثر فيها الاجهادات الكبيرة لأوقات معتبرة (وهي أقل أهمية خلال التحميل المحوري حيث اجهادات المادة الحاضنة منخفضة).

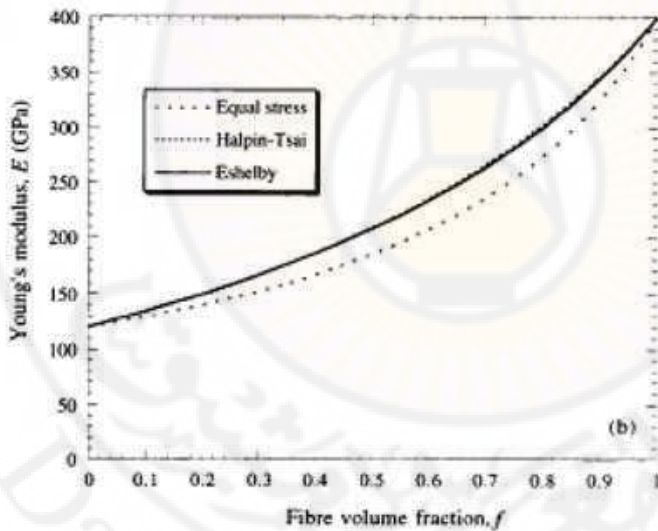
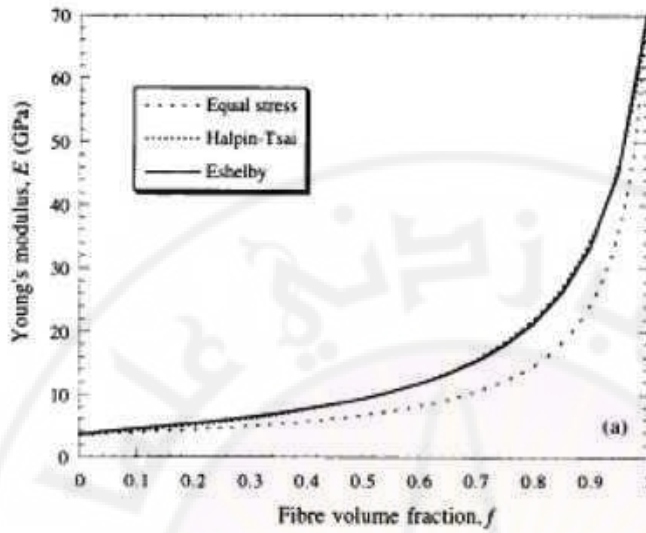
يمكن أن يحدث التشوه المرن والزحف خلال التحميل العرضي لهذا النوع، بشكل خاص مع البوليمرات المتلدنة حرارياً، وسيؤدي ذلك إلى التقدير الأقل للجساءة الحقيقية. حققت الاختبارات بمواد حاضنة أكثر متانة وأكثر مقاومةً للزحف أو تحت الحالات التي فيها كل قيم الإجهاد منخفضة و لفترة قصيرة (كما مع الطرق الديناميكية لقياس الجساءة).

يتوافق المعامل العرضي للمواد لمركبة المقواة بالألياف الطويلة مع المعادلة (4-7).

يوجد أدوات قوية لتحليل المعامل العرضي ولكنها معقدة كما في طريقة إيشلباي "مكافيئ التضمنات المتجانسة" وكذلك التقنيات البرمجية كما في نمذجة العناصر المنتهية.

يعطي الرسم البياني في الشكل (4-6) فكرة عن الأخطاء المحتملة في الحالات الحقيقية بواسطة استخدام طرق تحليلية بسيطة، بالمقارنة مع طريقة إيشلباي. التي يجب أن تكون أكثر موثوقية من النماذج الأبسط. يلاحظ أن لفرضية الإجهاد المتساوي تقديراً أقل لقيم المواد المركبة $PMCs$ و $MMCs$.

بشكل عملي يمكن أن يتأثر السلوك بعوامل أخرى صعب دمجها في النماذج البسيطة. تتضمن هذه تأثيرات درجة عدم اصطفاف الألياف، التباين المرن للألياف أو المادة الحاضنة أو البداية المبكرة للاستجابة غير المرنة. على الرغم من ذلك يجب ملاحظة أنه حتى في غياب مثل هذه التعقيدات فإن استخدام نموذج الإجهاد المتساوي يدخل أخطاء كبيرة على سبيل المثال استخدامه في التحليل المرن للصفائح (انظر الفصل الخامس).



الشكل (4-6) يبين
اعتماد تنبؤ معامل يونغ
العرضي للمواد المركبة
المقواة بألياف مستمرة
على نسبة حجم الألياف
بالمادة المركبة تبعاً
لتمساوي الإجهاد.
المعادلة (4-6)
والمعادلة (4-7)
ونماذج إيشلبي وذلك
للمواد المركبة التالية:
(a) الألياف الزجاجية /
(b) الإيبوكسي
ألياف كربيد السيليكون
/ تيتانيوم.

4-4 جساءة القص : Shear stiffness

يمكن التنبؤ بمعامل القص للمواد المركبة بطريقة مشابهة للجساءة العرضية أو المحورية، باستخدام نموذج الكتلة. يمكن أن يتم بواسطة تقييم انفعال القص الصافي الناشئ عندما يطبق إجهاد القص على المادة المركبة على اعتبار مساهمة كلا المكونين بالإزاحة الخاصة التي يسببها. من المهم تسمية الرموز. إجهاد القص المختار τ_{ij} ($I \neq J$)

يدل على الإجهاد في الاتجاه i على المستوي العامودي في الاتجاه j . بشكل مشابه
انفعال القص γ_{ij} هو دوران باتجاه i للمحور $-j$. معامل القص G_{ij} هو نسبة بين
 τ_{ij} إلى γ_{ij} . حيث أن جسم المادة المركبة لا يدور .

حالة $\tau_{IJ} = \tau_{JI}$ يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار، بالإضافة إلى أن $G_{IJ} = G_{JI}$
ولذلك $\gamma_{IJ} = \gamma_{JI}$. بما أن الاتجاهات 2 و 3 متكافئة للمادة المركبة ذات الألياف
المصطفة (المرتبة) . يتبع ذلك وجود معاملي قص:

$$G_{12} = G_{21} = G_{13} = G_{31} \neq G_{23} = G_{32}$$

هنالك معاملا قص لنموذج الكتل (الشكل 4-7) ولكن هذا مستحيل . يفترض أن تعمل
الاجهادات τ_{12}, τ_{21} بشكل متساوي ضمن كلا المكونين للمادة المركبة. الاشتقاق
مشابه لمعالجة الإجهاد المتساوي التي أدت إلى المعادلة (4-6) للجساء العرضية.

$$\tau_{12} = \tau_{12f} = \gamma_{12f} G_f = \tau_{12m} = \gamma_{12m} G_m$$

حيث $\gamma_{12m}, \gamma_{12f}$ هي انفعالات القص في المكونين وبحسب انفعال القص الكلي
مجمع مساهمة كل منهما في إزاحة القص الكلية في الاتجاه 1.

$$\gamma_{12} = \frac{(U_{1f} + U_{1m})}{f + (1-f)} = f\gamma_{12f} + (1-f)\gamma_{12m}$$

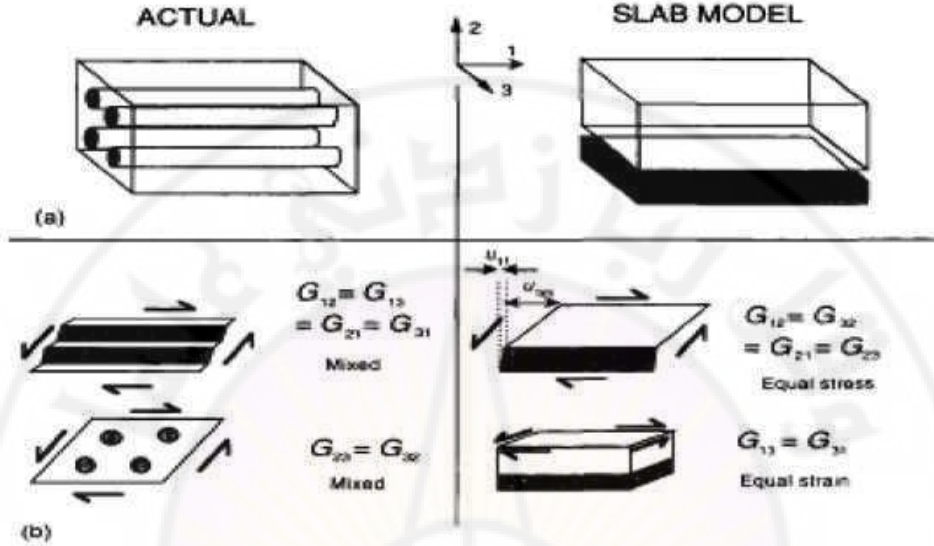
$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} = \frac{\tau_{12f}}{f\gamma_{12f} + (1-f)\gamma_{12m}} = \left[\frac{f}{G_f} + \frac{(1-f)\gamma_{12m}}{\tau_{12f}} \right]^{-1}$$

$$G_{12} = \left[\frac{f}{G_f} + \frac{(1-f)}{G_m} \right]^{-1} \quad (4-8)$$

حالة $G_{13} = G_{31}$ في الشكل (4-7) تمثل انفعال القص المتساوي وهي مشابهة لحالة
معامل الشد المحوري ويكون لدينا:

$$G_{13} = fG_f + (1-f)G_m \quad (4-9)$$

وهي مشابهة للمعادلة (4-3). من الممكن الإشارة إلى أنه ليس حالة الإجهاد المتساوي



الشكل (4-7) شكل تخطيطي لكيفية تعريف معامل القص لمادة مركبة حقيقية ذات تقوية ليفية ولتمثيل نموذج الكتل مبينة كيف قسم الإجهاد والانفعال بين المكونين في كل حالة.

ولا حالة الانفعال المتساوي قريبة من حالة القص للمادة المركبة بالألياف الذي يقسم فيها الانفعال بشكل غير متساوي داخل المادة الحاضنة. لذلك من غير المتوقع أن تكون أي من المعادلات التي في الأعلى موثوقة. وبشكل خاص تعبير الانفعال المتساوي.

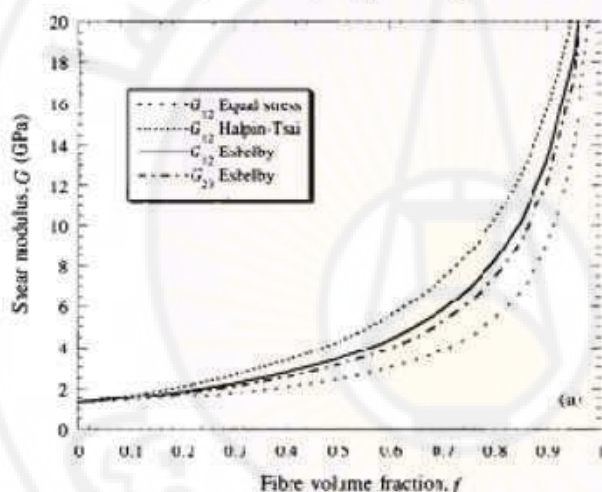
التقريب في المعادلة (4-8) ضعيف حيث لا يقترب أي من معاملي القص الفعليين من القيمة الحقيقية. تنتبأ في الحقيقة الطرق بقيم G_{12} و G_{23} بأنها قريبة بعضها من بعض، ولكن مع G_{12} أكبر قليلاً. تعطي المعادلة (4-8) أقل من التقديرات الحقيقية لكليهما، بينما تعطي المعادلة (4-9) تقديراً مبالغاً فيه.

$$G_{12} = \frac{G_m(1 + \zeta\eta f)}{(1 - \eta f)}$$

المعادلة التجريبية الملائمة في هذه الحالة هي التالية:

$$\eta = \frac{\left(\frac{G_f}{G_m} - 1\right)}{\left(\frac{G_f}{G_m} + \zeta\right)} \quad (4-10)$$

والبارامتر η غالباً يأخذ قيمة حول الواحد. يعرض المنحني في الشكل (4-8) مقارنة بين التنبؤات للمعادلة (4-10) مع تلك حسب الإجهاد المتساوي المعادلة (4-8) ونماذج إيشلباي لكل المواد المركبة ذات الأساس البوليمري وذات الأساس المعدني. ويمكن مشاهدة أن تمثيل هالبن -تساي يمثل تقريباً جيداً لمعامل القص المحوري للمواد المركبة ذات المادة الحاضنة البوليمرية الشكل (4-6) (a) و (4-8) (b) التي هي قريبة لقيم المادة الحاضنة وتصل القيم لتلك النسب الحجمية المرتفعة للألياف. ولو أن في كلتا الحالتين المعاملات الحقيقية ليست منخفضة مثل تنبؤ نموذج الإجهاد المتساوي.



الشكل (4-8) اعتماد التنبؤ

على النسبة الحجمية

للألياف لمعامل قص المادة

المركبة المقواة بالليف

المستمر. تبعاً لمعادلة

G_{12} الإجهاد المتساوي

المعادلة (4-8) لتعابير

هالبن و تساي لقيمة

G_{12} . المعادلة (4-10)

نموذج إيشلباي

G_{12} ، G_{23} البيانات

المبنية في:

(a) المادة المركبة من

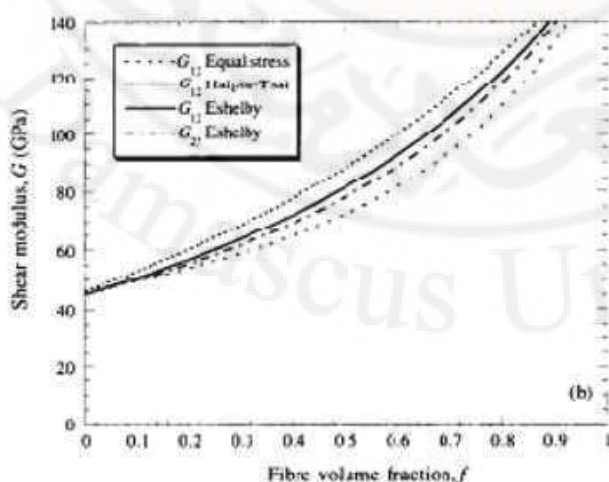
الإيبوكسي/ الألياف

الزجاجية

(b) المادة المركبة

التيتانيوم/ ألياف كربيد

السيليكون.



4-5 تأثيرات انكماش بواسون: Poisson contraction effects

تُصَف نسبة بواسون ν_{IJ} الانكماش في الاتجاه J عند تطبيق الإجهاد في الاتجاه I وتحدد بالمعادلة:

$$\nu_{IJ} = -\frac{\varepsilon_J}{\varepsilon_I} \quad (4-11)$$

يوجد ثلاثة قيم مختلفة لمعامل بواسون للمواد المركبة ذات الألياف المصطفة كما هو مبين في الشكل (4-9). مما يرفع الرقم الكلي لثوابت المرونة المحددة لهذه المواد إلى سبعة. على أية حال، ولأن بعض هذه الثوابت مرتبطة داخلياً، فقط خمسة قيم مستقلة نحتاج إليها لوصف سلوك مواد ذات خصائص موحدة في المحاور العرضية. إن العلاقتين بين الثوابت هما التاليتان:

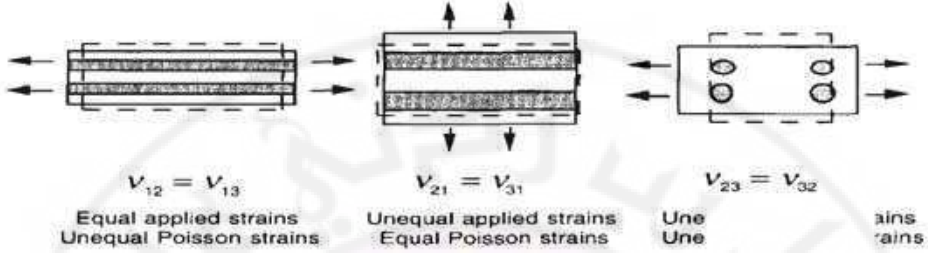
$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (4-12)$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})} \quad (4-13)$$

يواجه التقدير لقيم ν_{IJ} على قاعدة نموذج الكتل صعوبات بسبب درجة الانكماش الكبيرة التي يجب أن ينسجم معها انكماش مكوني المادة. حيث على الرغم من إمكانية تحديد نسب بواسون الثلاث لنموذج الكتل، يمكن إجراء حسابات ذات معنى فقط لحالة انفعال متساوٍ، معطية ν_{12} الشكل (4-9). في هذه الحالة يمكن تقييم انفعالات بواسون لكلا المكونين بشكل منفصل وبشكل مجمع وهكذا:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{2f} &= -\nu_f \varepsilon_{1f} = -\nu_f \frac{\sigma_{1f}}{E_f} \\ \varepsilon_{2m} &= -\nu_m \varepsilon_{1m} = -\nu_m \frac{\sigma_{1m}}{E_m} \\ \varepsilon_2 &= -\left[\frac{f \nu_f \sigma_{1f}}{E_f} + \frac{(1-f) \nu_m \sigma_{1m}}{E_m} \right] \\ &= -[f \nu_f \varepsilon_{1f} + (1-f) \nu_m \varepsilon_{1m}] \\ \nu_{12} &= -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = f \nu_f + (1-f) \nu_m \end{aligned} \quad (4-14)$$

وبذلك قاعدة المزج البسيطة قابلة للتطبيق بسبب دقة افتراض الانفعال المتساوي للمواد المركبة المجهدة محورياً وهذا متوقع للتنبؤ الموثوق.



الشكل (4-12) يوضح كيف تعرف نسب بواسون الثلاث للمادة المركبة المقواة بالألياف.

يمكن أيضاً أن نشق تعابير بسيطة لتعطي تنبؤات واقعية من أجل النسبتين الآخرين. يتم الحصول على نسبة الانكماش المحوري إلى التمدد العرضي عند الإجهاد العرضي، لنحصل على U_{12} من العلاقة المتبادلة المعطاة في المعادلة (4-12) وبذلك:

$$v_{21} = [fv_f + (1-f)v_m] \frac{E_2}{E_1} \quad (4-15)$$

ستكون هذه القيمة أقل من U_{12} الحقيقية لأن الإجهاد عرضي ولأنه سوف تقوم الألياف بمقاومة قوية للانكماش المحوري. لذلك يتوقع أن تكون U_{23} عالية القيمة. يمكن أن نحصل على تعابير لـ U_{23} باعتبار تغير الحجم الكلي الحادث بالمادة.

$$\Delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sigma_H}{K} \quad (4-16)$$

التي فيه σ_H الإجهاد الهيدروستاتيكي المطبق و K معامل بولك للمادة المركبة يطبق هنا فقط إجهاد مفرد σ_2 وبذلك يكون :

$$\sigma_H = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right) = \frac{\sigma_2}{3}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_2}{3K} - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (4-17) \quad \text{وهكذا :}$$

يقود هذا مباشرة إلى :

$$\begin{aligned} v_{23} &= -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2} = -\frac{\sigma_2}{3K\varepsilon_2} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + 1 \\ (4-18) \quad v_{23} &= 1 - v_{21} - \frac{E_2}{3K} \end{aligned}$$

يمكن أن يقدر معامل بولك للمادة المركبة عن طريق افتراض الإجهاد المتساوي والذي يكون دقيقاً تماماً في هذه الحالة وبذلك يكون :

$$\sigma_H = \Delta_f K_f = \Delta_m K_m$$

$$\Delta = f\Delta_f + (1-f)\Delta_m$$

والذي يعطي :

$$K = \frac{\sigma_H}{\Delta} = \left[\frac{f}{K_f} + \frac{(1-f)}{K_m} \right]^{-1} \quad (4-19)$$

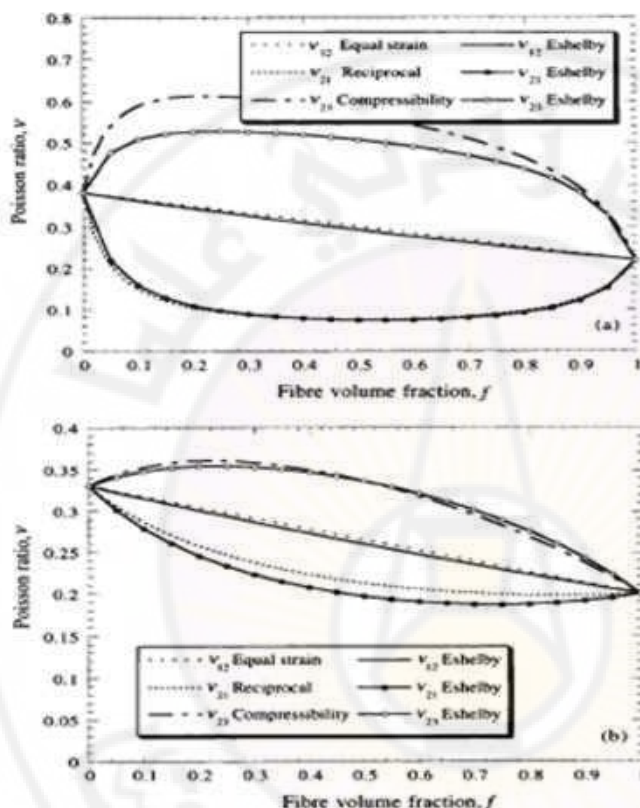
تتعلق معاملات بولك للمكونات بثوابت المرونة الأخرى بواسطة علاقات مثل :

$$K_f = \frac{E_f}{3(1-2\nu_f)}$$

لهذا فإن حساب U_{23} من ثوابت المرونة القياسية للمكونات مسألة بسيطة.

تحدد دقة المعادلة (4-18) بشكل كبير بواسطة الخطأ في E_2 . في المقارنة المبينة في الشكل (4-10) لقيم هالابين وتساوي لـ E_2 ، استخدم التنبؤ بحسب المعادلة (4-8) للحصول على قيم U_{21} و U_{23} وهي تتفق جيداً مع تنبؤات إيشلباي. يحقق هذا المنحني الميل الواضح للمادة المركبة للتقلص تحت التحميل العرضي في اتجاه آخر للاتجاه

العرضي والأفضلية للاتجاه المحوري. مثل هذه التأثيرات مهمة بشكل خاص لسلوك الصفائح الرقيقة. (انظر الفصل الخامس).



الشكل (10-4) اعتماد التنبؤ على النسبة الحجمية للألياف لثلاث نسب لمعامل بواسون للمواد المركبة المقواة بألياف مستمرة، تبعاً لحالة الانفعال المتساوي. المعادلة (14-4) من أجل U_{12} علاقة متبادلة. المعادلة (15-4) من أجل U_{21} تعبير قابلية الانضغاط، المعادلة (18-4) من أجل U_{23} ونموذج إيشلباي من أجل الثلاثة. التنبؤات موضحة من أجل (a) المادة المركبة من الإيبوكسي/ألياف الزجاج (b) المادة المركبة من التيتانيوم/ألياف كربيد السيليكون.

الفصل الخامس

التشوه المرن للمواد المركبة الصفائحية

Elastic Deformation of Laminates

- 1- التشوه المرن للمواد اللامتناهية (متباينة الاتجاهات).
- 2- ثوابت المرونة اللامحورية للصفائح.
- 3- التشوه المرن للصفائح.
- 4- الاجهادات والتشوهات.



1-5- التشوه المرن للمواد اللا متناهيّة (للمواد متباينة الاتجاهات)

Elastic deformation of anisotropic material

1-5-1 قانون هوك Hook's law

يستحسن مراجعة بعض النقاط الأساسية حول الإجهاد والانفعال. تتعين حالة الإجهاد عند نقطة من الجسم بواسطة تسع مركبات لتتصور الإجهاد σ_{ij} التي يعمل فيها الإجهاد في الاتجاه i على المستوى متعامد في الاتجاه j عندما يكون $i = j$ فإن σ_{ij} إجهاد عامودي وعندما يكون $i \neq j$ فإن المركبة σ_{ij} تمثل إجهاد قص و تكتب مركبة إجهاد القص بالشكل τ_{ij} ، وإذا لم يكن الجسم في حالة دوران مستمر فإن المركبات $\tau_{ij} = \tau_{ji}$. لذلك يكون لدينا فقط ستة مركبات مستقلة. يكون ذلك أيضاً صحيحاً للانفعال الناتج الذي يمثل بمركباته تتصور ϵ_{ij} .

يجب أخذ الحذر في تمييز تتصور الانفعال ϵ_{ij} من تتصور الانزياح النسبي e_{ij} . ينتج تطبيق إجهاد القص τ_{ij} مع دورانات زاوية للجسم في الاتجاهين i و j بواسطة المركبات e_{ij} و e_{ji} على التوالي. تمثل هذه الانزياحات النسبية مزيج من التشوه ودوران الجسم الصلب. تظهر حالات محددة عندما يكون $e_{ij} = e_{ji}$ ، و يحدث هذا في حالة عدم الدوران، و $e_{ij} = -e_{ji}$ في حالة عدم وجود تشوه. لاحظ أن المركبة e_{ij} موجبة عند استخدامها في الدوران الموجب الاتجاه j باتجاه الجهة الموجبة للمحور i . بشكل مطابق لمركبات الانفعال ودوران الجسم الصلب، تكتب e_{ij} كمجموع تتصورات تناظرية وغير تناظرية.

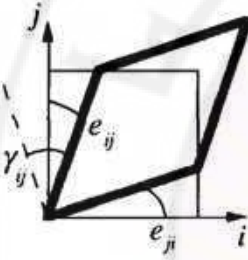
$$e_{ij} = \frac{1}{2}(e_{ij} + e_{ji}) + \frac{1}{2}(e_{ij} - e_{ji}) = \epsilon_{ij} + w_{ij} \quad (5-1)$$

التي تمثل فيها ϵ_{ij} تتصور الانفعال وتمثل w_{ij} تتصور الدوران. لا يوجد أي مجال للارتباك للانفعال الناظمي ($i = j$) لأن $e_{ii} = \epsilon_{ii}$ التي هي الانفعال الهندسي التقليدي وتكتب على الشكل ϵ_i عندما تكون المحاور هي الاتجاهات الرئيسية. من أجل الحالة التي يكون في $i \neq j$ يختلف انفعال القص الهندسي τ_{ij} عن تتصور انفعال القص ϵ_{ij} إن:

$$\tau_{ij} = 2\varepsilon_{ij} = e_{ij} + e_{ji} \quad (5-2)$$

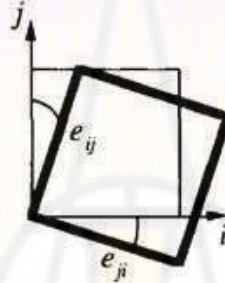
يبين الشكل (5-1) بعض الأمثلة التي تشير إلى العلاقات بين هذه الزوايا لمختلف أنواع تحميل القص. يجب أن تأخذ هذه الملاحظة بحرص وذلك للمعامل 2 الذي يربط انفعالات القص التئسورية والهندسية والسبب أن γ ما تزال الأكثر ملاءمة في الاستخدام العملي. يجب أن تتم وظائف التئسور في مثل دوران المحاور باستخدام المركب ε يمكن أن يعبر عن العلاقة بين المركبات σ_{ij} والمركبات ε_{ij} بالشكل التالي:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (5-3)$$



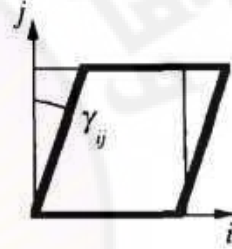
Pure shear ($\omega_{ij} = 0$)

$$e_{ij} = e_{ji} = \gamma_{ij}/2 = \varepsilon_{ij}$$



Pure rotation ($\varepsilon_{ij} = \gamma_{ij} = 0$)

$$e_{ij} = -e_{ji}$$



Simple shear

$$e_{ij} = \gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij} : e_{ji} = 0$$

الشكل (5-1) أمثلة تبين كيف تستطيع مكونات انزياحات 2-D أن تمثل دمج قص ودوران جسم

صلب (a) قص صافي (b) دوران صافي (c) قص بسيط

حيث تسمى C_{ijkl} تئسور الجساءة وهذا التئسور من الدرجة الرابعة ويتشكل من $3^4 = 81$ عنصر أي 81 عنصر والمعادلة (5-3) تمثل تسع معادلات. لكل معادلة (زوج من قيم i, j) يشار إلى المصطلحات التي تظهر باتفاقية مجموع اينشتاين) وهذا يشير إلى أنه عندما تظهر الأدلة مرتين في الناتج عندئذ تجمع الحدود بما يتعلق بتلك اللاحقة (الدليل). لذلك ستكون أول هذه المعادلات كما يلي :

$$\sigma_{11} = C_{1111}\varepsilon_{11} + C_{1112}\varepsilon_{12} + C_{1113}\varepsilon_{13} + C_{1121}\varepsilon_{21} + C_{1122}\varepsilon_{22} + C_{1123}\varepsilon_{23} + C_{1131}\varepsilon_{31} + C_{1132}\varepsilon_{32} + C_{1133}\varepsilon_{33}$$

5-1-2- تأثيرات التناظر Effects of symmetry

عملياً المعادلات أكثر بساطة من تلك الأشكال العامة. كمثال، يعني ذلك التناظر لكل

تتسورات الانفعال والإجهاد عندما يكون الجسم في حالة توازن ستاتيكي وبذلك تكون المعادلات متساوية كما يلي:

$$C_{ijkl} = C_{ijlk} = C_{jilk} = C_{jlik} \quad (5.4)$$

وبهذه الحالة تنقص عدد الثوابت المستقلة في C_{ijkl} إلى 36 . وبالنظر إلى هذا التناظر يعين الشكل المختصر المصفوفة الرمزية الذي يمكن أن تكتب على الشكل:

$$\sigma_p = C_{pq} \varepsilon_q \quad (5-5)$$

وفيها الدليلان p و q يأخذان القيم من 1 إلى 6 . ويمكن أن يظهر ذلك بتحويل الدليل iz إلى p والدليل kl إلى q وفق الوصف التالي:

Tensor notation (الدليل)	11	22	33	23,32	31,13	12,12
Matrix notation (المصفوفة)	1	2	3	4	5	6

ولذلك يمكن أن تكتب المعادلة (5-5) على الشكل التالي:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

من المفيد عملياً في بعض الأحيان أن نستطيع التعبير عن الانفعالات بمصطلحات الإجهادات المطبقة باستخدام تتسور الخضوع S_{ijkl} .

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl}$$

يتم في هذه الحالة إجراء اختزال مشابه لرموز المصفوفة

$$\varepsilon_p = S_{pq} \sigma_q \quad (5-6)$$

يمكن أن يتم هذا الاختزال بمعاملات تحويل إضافية على الشكل التالي:

$$S_{pq} = S_{ijkl} \quad \text{عندما تأخذ كلا } p \text{ و } q \text{ قيمة أحد الأعداد 1 أو 2 أو 3}$$

$$S_{pq} = 2S_{ijkl} \quad \text{عندما تأخذ أي من } p \text{ أو } q \text{ قيمة أحد الأعداد 4 أو 5 أو 6}$$

$$S_{pq} = 4S_{ijkl} \quad \text{عندما تأخذ كلا } p \text{ و } q \text{ قيمة أحد الأعداد 4 أو 5 أو 6}$$

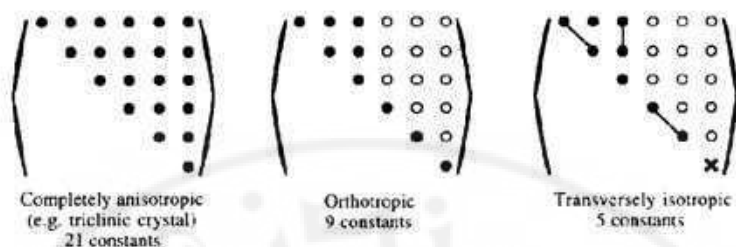
تنشأ هذه العوامل من العلاقة بين انفعالات القص التيسورية والهندسية أخيراً،

تؤدي الدراسات الترموديناميكية المتعلقة بطاقة الانفعال المرنة إلى ما يلي:

$$\begin{aligned} C_{pq} &= C_{qp} \\ S_{pq} &= S_{qp} \end{aligned} \quad (5-7)$$

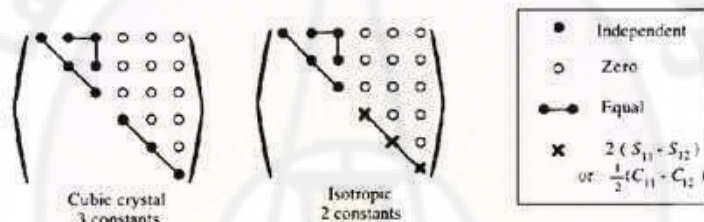
وبالتالي إنقاص إضافي في عدد الثوابت المستقلة في هذه المصفوفات من 36 إلى 21. غالباً ما يكون عدد الثوابت المستقلة في C_{pq} أو S_{pq} أقل من 21، وهذا كنتيجة للتناظر الذي تبديه المواد. أعطي في الشكل (5-2) مؤشر لهذا الرقم والعلاقات الداخلية بين عناصر مركبات المصفوفات C_{pq} أو S_{pq} ، لأنواع متنوعة من المواد.

لاحظ أنه تكون على الأقل شريحة وحيدة بشكل عادي في وضعية عمودية لها ثلاث مستويات متعامدة تبادلياً كنتاظر التي غالباً ما تكون متناظرة عرضياً. يكون في المواد التي لها درجة عالية من التناظر عدد ثوابت المرونة المستقلة صغيراً وكمثال على ذلك فإن المعادلة (5-6) قابلة للتطبيق على المواد ذات الخواص التناظرية ويعطي المصفوفة (5-8).



متماثل الخواص متباين الخواص في اتجاهين غير متساوي القياسات بالكامل
5 ثوابت عموديين أو أكثر (بلوري ثلاثي الميل)

21 ثابت 9 ثوابت



بلورة مكعبة 3 ثوابت متناهي 2 ثابت

الشكل (5-2) بعض الأمثلة لشكل S_{ij} و C_{ij} لمواد حاضنة لمواد تبدي أنواع مختلفة للتماثل. كل المواد الحاضنة متماثلة حول توجه قطري.

(5-8)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} *$$

لذلك من أجل الإجهاد المطبق σ_1

$$\varepsilon_1 = S_{11}\sigma_1$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = S_{12}\sigma_1$$

$$\tau_{23} = \tau_{31} = \tau_{12} = 0$$

يمكن أن يعبر بشكل دائم عن عناصر هذه المصفوفات بمصطلحات ثوابت المرونة الهندسية ويتضح في هذه الحالة أن:

$$S_{11} = \frac{1}{E}$$

$$S_{12} = -\frac{\nu}{E}$$

يمكن أن نرى أن ثابتي المرونة كافيان لتعريف وبشكل كامل سلوك المواد المتماثلة الخواص.

5-2- ثوابت المرونة اللا محورية للصفحة

Off- axis elastic constant laminate

5-2-1- الإجراءات الحسابية calculation procedure

تستلزم التحاليل الأولية افتراض أن كل شريحة في حالة إجهاد مستوي لذلك فإن $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$. وهذا تقريب جيد للصفحة المفردة الرقيقة ولكن يصبح هذا الافتراض نوعاً ما غير دقيق للرقاقة الصفائحية كنتيجة للتأثيرات القسرية للسماكة. انظر الفقرة (5-4) يمكن أن تكتب المعادلة (5-6) الآن بشكل مبسط بافتراض التناظر في الخواص

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ T_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

التي فيها المعادلات المفردة تكون كالتالي:

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}$$

$$S_{12} = -\frac{V_{12}}{E_1} = -\frac{V_{21}}{E_2}$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2}$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

وبدراسة مشابهة للمعادلات (5-5) التي تقود إلى:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

حيث:

$$C_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$C_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$C_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$C_{66} = G_{12}$$

إن الروابط المتوقعة مع خواص التناظر العرضي (انظر الشكل 5-2)

$$S_{66} = 2(S_{11} - S_{12})$$

$$C_{66} = \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12})$$

وهذه المركبات غير قابلة للتطبيق بسبب استبعاد الاتجاه عبر السماكة الذي يحذف التناظر من الصفیحة. وكنتیجة (لهذا الحذف) فإنه یوجد أربع ثوابت مرونة مستقلة و یلاحظ بنظرة مباشرة حول المعادلات (5-9) و (5-10) أنه لا یوجد تبادل بین السلوك

الناظمي والقصي بحيث يعطي الإجهاد الناظمي زيادة في الانفعالات الناظمية، ينتج الإجهاد القصي فقط انفعالات قصية.

لا تكون هذه الحالة عندما تحمل الصفیحة (الرقاقة) في اتجاه اعتباطي ضمن المستوي. يبين الشكل (3-5) هذه الحالة.

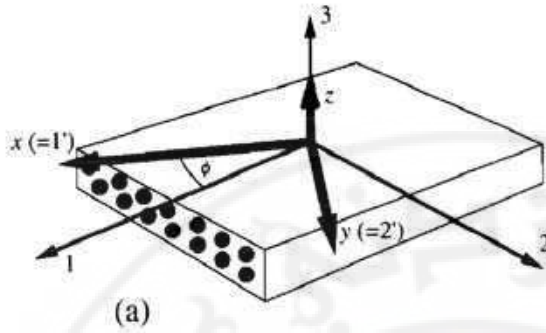
الخطوة الأولى في تحديد الانفعالات ضمن الصفیحة تكون بتعيين الإجهادات المتولدة والمشييرة إلى محاور الليف، $(\sigma_1, \sigma_2 \text{ and } \tau_{12})$ وبمصطلح نظام الإجهاد الخارجي المطبق تكون الجملة $(\sigma_x, \sigma_y \text{ and } \tau_{xy})$. يمكن إجراء ذلك بواسطة بناء هندسي يستلزم تباين القوى، لكن الأسهل أن تستخدم المعادلة المعبرة عن أي تنسور من الرتبة الثانية بما يتعلق بإطار الإحداثيات الجديد.

$$\sigma_{ij} = \alpha_{ik} \alpha_{jl} \sigma_{kl}^I \quad (5-11)$$

التي فيها a_{ik} هي جيب التمام للاتجاه الجديد (i) والاتجاه القديم المشار إليه بـ (k). من الواضح أنه سوف يتم التحويل في أي اتجاه شريطة أن يكون جيوب تمام الاتجاه قد حددت بشكل صحيح. كمثال إن الإجهاد الناظمي الموازي لاتجاه الليف σ_{11} يكتب في بعض الأحيان على الشكل σ_1 التي يمكن أن يعبر عنها بمصطلح الإجهادات المطبقة.

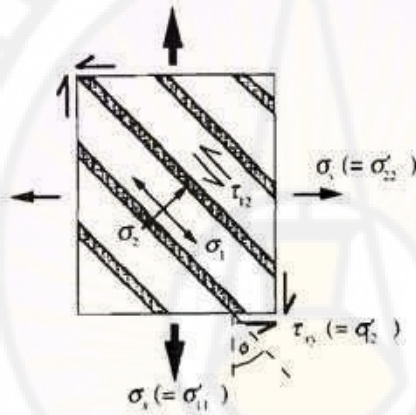
$$\sigma_{12}^I (= T_{xy}) \text{ و } \sigma_{22}^I (= \sigma_y) \text{ و } \sigma_{11}^I (= \sigma_x)$$

$$\sigma_{11} = a_{11}a_{11}\sigma_{11}^I + a_{11}a_{12}\sigma_{12}^I + a_{12}a_{11}\sigma_{21}^I + a_{12}a_{12}\sigma_{22}^I$$



الشكل (5-3)

(a) العلاقة بين المحاور الأساسية للصفحة والمحاور (x,y,z) من أجل الإجهادات الاعتبارية المطبقة في المستوي.



(b) موضحة كيف ينتج الاجهاد المطبق σ'_{ii} (σ_x, σ_y and τ_{xy}) إجهادات في الصفحة

$$\sigma_{ii} (\sigma_1, \sigma_2 \text{ and } \tau_{12})$$

تسمى ϕ الزاوية بين محور الليف (1) ومحور الإجهاد (X) عندئذ وبالإشارة إلى الشكل (3-4 (a)) فإن جيوب تمام هذه الاتجاه تأخذ القيم.

$$a_{11} = \cos \phi$$

$$a_{11} = \cos(90 - \phi) = \sin \phi$$

$$a_{21} = \cos \phi(90 + \phi) = -\sin \phi$$

$$a_{22} = \cos \phi$$

وبإجراء هذه العملية لكل الإجهادات الثلاث سيكون:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

حيث إن

$$[T] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & 2CS \\ S^2 & C^2 & -2CS \\ -CS & CS & C^2 - S^2 \end{bmatrix} \quad (5-13)$$

حيث $S = \sin \phi$ و $c = \cos \phi$ يمكن أن تستخدم نفس المصفوفة لتحويل الانفعالات التتسورية وبذلك:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (5-14)$$

للعمل بصيغة الانفعالات الهندسية نستخدم $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy}$ الخ.. انظر الفقرة (5-1) عندئذ يجب أن تعدل المصفوفة $[T]$ (تتصيف العناصر t_{13} و t_{23} ومضاعفة العناصر t_{31} و t_{32} للمصفوفة) وبذلك:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [T^1] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (5-15)$$

حيث أن

$$[T^1] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & CS \\ S^2 & C^2 & -CS \\ -2CS & 2CS & C^2 - S^2 \end{bmatrix} \quad (5-16)$$

إن الخطوات المباشرة من علاقة الإجهاد-الانفعال عندما تحمل الصفيحة على طول محاورها الرئيسية، المعادلة (5-9)، لواحدة عامة تتضمن تتسور الامتثال المحول $\bar{S}$ التي تعتمد على الزاوية $\bar{\phi}$. الخطوة الأولى هي القيام بكتابة مقلوب المعادلة (5-15) التي تعطي الانفعالات النسبية إلى اتجاه التحميل. يستلزم هذا استخدام مقلوب المصفوفة $[T^1]$ التي تكتب على الشكل $[T^1]^{-1}$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [T^1]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (5-17)$$

حيث إن

$$[T^1]^{-1} = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & -CS \\ S^2 & C^2 & CS \\ 2CS & -2CS & C^2 - S^2 \end{bmatrix}$$

الآن يمكن أن يعبر عن الانفعالات النسبية إلى جهة الليف بمصطلحات الإجهادات في هذه الاتجاهات إلى علاقة الانفعال - القص على المحور من أجل الصفيحة فإنه تعطي المعادلة (5-9):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [T^1]^{-1} [S] \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

وأخيراً يمكن أن تستخدم مصفوفة التحويل الأساسية للمعادلات (5-12) للتعبير عن هذه الإجهادات لتعطي النتيجة.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [T^1]^{-1} [S] [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{S}] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5-18)$$

تستحصل على عناصر المصفوفة $[\bar{S}]$ بواسطة سلسلة من المصفوفات $[T^1]^{-1}$ و $[S]$ و $[T]$ ويستحصل على التعبيرات التالية:

$$\begin{aligned}
\bar{S}_{11} &= S_{11}C^4 + S_{22}S^4 + (2S_{12} + S_{66})C^2S^2 \\
\bar{S}_{12} &= S_{12}(C^4 + S^4) + (S_{11} + S_{22} - S_{66})C^2S^2 \\
\bar{S}_{22} &= S_{11}S^4 + S_{22}C^4 + (2S_{12} + S_{66})C^2S^2 \\
\bar{S}_{16} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66})C^3S - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66})CS^3 \\
\bar{S}_{26} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66})CS^3 - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66})C^3S \\
\bar{S}_{66} &= (4S_{11} + 4S_{22} - 8S_{12} - 2S_{66})C^2S^2 + S_{66}(C^4 + S^4)
\end{aligned} \quad (5-19)$$

وسوف يرى من ذلك أن المصفوفة $[\bar{S}]$ تسعى إلى المصفوفة $[S]$ كما تسعى $\phi \rightarrow 0$ ولا يزال سلوك الصفيحة موصوف بواسطة ثوابت المرونة الأربعة المستقلة. وحيث أنه يمكن أن يعبر عن هذه العناصر الستة عنها بصيغة S_{11} و S_{12} و S_{22} و S_{66} . يمكن أن تستخدم إجراءات مشابهة لاستنتاج عناصر المصفوفة $[\bar{C}]$ تتصور الجساءة المحول :

$$\begin{aligned}
\bar{C}_{11} &= C_{11}C^4 + C_{22}S^4 + (2C_{12} + 4C_{66})C^2S^2 \\
\bar{C}_{12} &= C_{12}(C^4 + S^4) + (C_{11} + C_{22} - 4C_{66})C^2S^2 \\
\bar{C}_{22} &= C_{11}S^4 + C_{22}C^4 + (2C_{12} + 4C_{66})C^2S^2 \\
\bar{C}_{16} &= (C_{11} - C_{12} - 2C_{66})C^3S - (C_{22} - C_{12} - 2C_{66})CS^3 \\
\bar{C}_{26} &= (C_{11} - C_{12} - 2C_{66})CS^3 - (C_{22} - C_{12} - 2C_{66})C^3S \\
\bar{C}_{66} &= (C_{11} + C_{22} - 2C_{12} - 2C_{66})C^2S^2 + C_{66}(C^4 + S^4)
\end{aligned} \quad (5-20)$$

5-2-2- الثوابت الهندسية Engineering Constants

تعين أي من هذه المصفوفات بشكل كامل الاستجابة المرنة للمادة. مهما يكن من المناسب أن تمثل هذه الخواص بصيغة الثوابت الهندسية التقليدية. يمكن أن نحصل على ذلك من تتسورات الجساءة والخضوع بواسطة تفحص للعلاقات في المعادلات (5-9) و (5-10). تكون العلاقات أبسط إذا تم استخدام تتسور الخضوع وبذلك:

$$E_x = \frac{1}{S_{11}} \quad (5-21)$$

$$E_y = \frac{1}{S_{22}} \quad (5-22)$$

$$G_{xy} = \frac{1}{S_{66}} \quad (5-23)$$

$$V_{xy} = -E_x \bar{S}_{12} \quad (5-24)$$

$$V_{yx} = -E_y \bar{S}_{12} \quad (5-25)$$

لذلك يمكن إيجاد هذه الثوابت الهندسية حالما يتم تقدير تنسور الخضوع.

تبين الأشكال (5-4) و (5-5) و (5-7) بعض الأمثلة على السلوك المتنبأ به بالمعادلات (5-19) لمادتين مركبتين مختلفتين بالاعتماد على معامل يونغ ومعامل القص للصفحة على قيم ϕ المبينة بالشكل (5-4 (a)) للمادة المركبة ذات الأساس البوليميري، وباستخدام كلاً من الإجهاد المتساوي المعادلات (4-6) و (4-8) ومعادلات هالپين - تساي Halpin-Tsai المعادلات (4-10 و 4-7) مع افتراض أن $\varepsilon = 1$ مع تعابير معاملات يونغ العرضية للمادة المركبة حيث $(\phi = 90^\circ)$. ينتج افتراض الإجهاد المتساوي أخطاء معتبرة على مجال واسع لزاوية التحميل. تبقى جساءة الشد (معاملات يونغ) قريبة إلى القيمة النظرية العظمى إذا كان محور الإجهاد يقع ضمن بضع درجات من محور الليف، ولكن إذا كانت ϕ أكبر من خمس درجات عندئذ تتناقص بشكل سريع. يكون الانخفاض أقل بشكل واضح للمادة المركبة ذات الأساس المعدني (الشكل (5-4) (b)). تم إثبات هذه التوقعات بواسطة التجارب.

تكون جساءة القص أقل حساسية من معاملات يونغ للزاوية ϕ ولكن القمة (القيمة الأعظمية) واضحة دائماً عند الزاوية 45° وهذا يكافئ وبشكل فعال التقوية القطرية (عند الزاوية 45°) في مقاومة قوى القص التي هي هامة لعدة تطبيقات هندسية.

إن الميزة الهامة للتحميل اللامحوري للصفحة وحيدة الاتجاه هي في ظهور حالة اللاصفرية تبادل (تفاعل) الحدود $(\bar{S}_{16} \text{ و } \bar{S}_{26})$ مشيرة إلى أن الإجهادات الناعمية

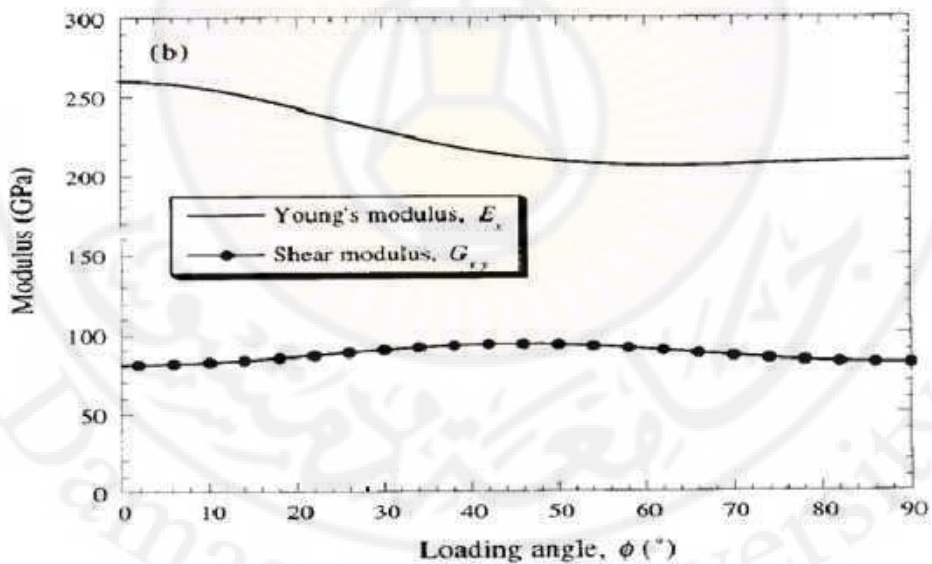
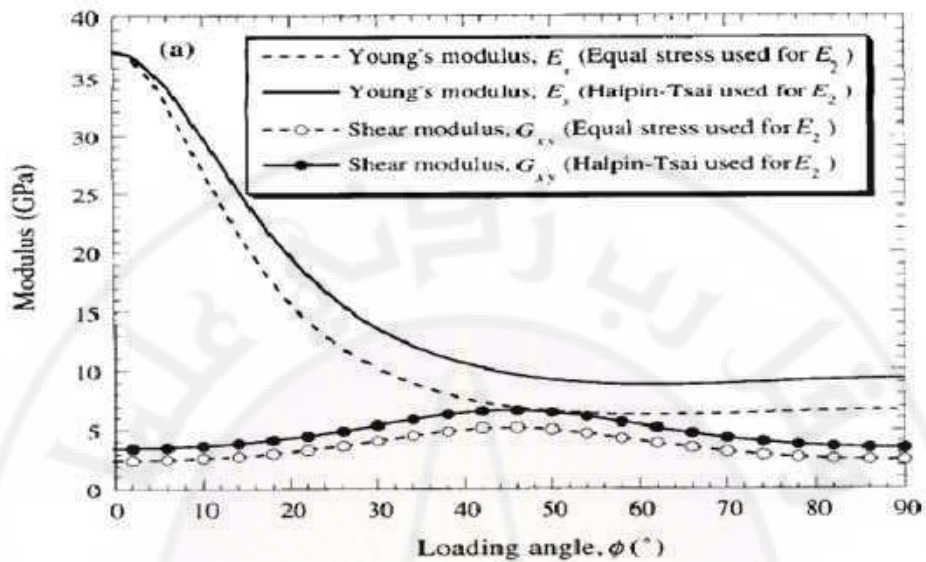
وانفعالات القص ولجهادات القص تنتج انفعالات ناظمية. ولنه من المناسب أن تقدم ثابتين هندسيين آخرين لمميزات المتانة لهذا التأثير المتبادل.

$$\eta_{xyx} = E_x \bar{S}_{16} \quad (5-26)$$

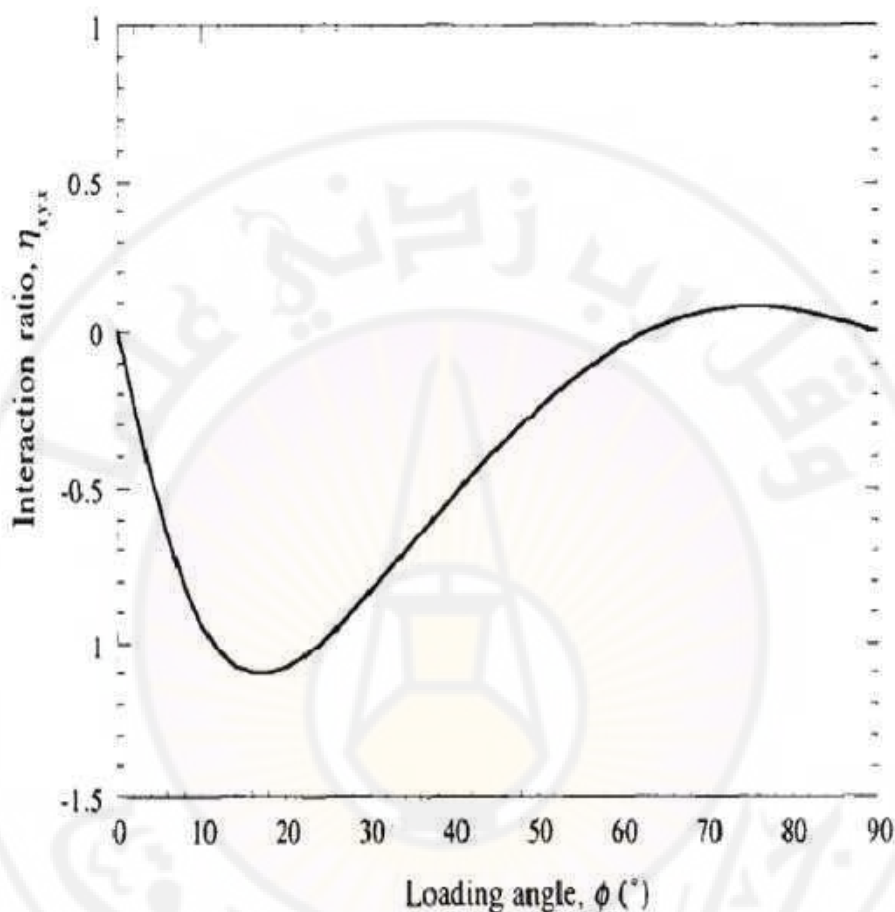
$$\eta_{xyy} = E_y \bar{S}_{26} \quad (5-27)$$

لذلك يمثل البارامتر η_{xyx} نسبة انفعال القص (γ_{xy}) المتولدة بتطبيق الإجهاد الناظمي (σ_x) إلى الانفعال الناظمي (ϵ_x) المتولد بواسطة نفس الإجهاد الناظمي. ويشير إلى طبيعة تفاعل قص شد - قص. على الرغم من ذلك يجب أن يتولد في الذهن أن تلك القيمة ليست متناسبة فقط إلى انفعال القص المستنتج نتيجة تطبيق الإجهاد الناظمي. ولكن تصبح أيضاً أكبر.

غالباً ما يصطلح للبارامترات η_{xyx} و η_{xyy} بالنسب التفاعلية. كمثال على ذلك يبين الشكل (5-5) اعتماد المركبات γ_{xyx} على الزاوية ϕ ، وتظهر في هذه الحالة ميزات عديدة. أولاً تحدث التغيرات المهمة عندما تتغير زاوية التحميل كما هو متوقع من حجج التناظر البسيطة. يكون محدد التبادل مساوياً للصفر عند $\phi = 0^\circ$ و $\phi = 90^\circ$ ولكن التأثير يكون واضحاً عند الزوايا المتوسطة والتأثير معتبراً. من أجل بعض القيم للزاوية ϕ يكون التبادل الداخلي قص انفعال مشابهاً في القيمة لاتجاه الانفعال الناظمي ($\eta_{xyx} \approx -1$). باستخدام فرضية قص الإجهاد المتساوي من أجل E_2 فإنها تعطي تقديراً زائداً (مبالغ فيه) لمحدد التفاعل (التبادل).



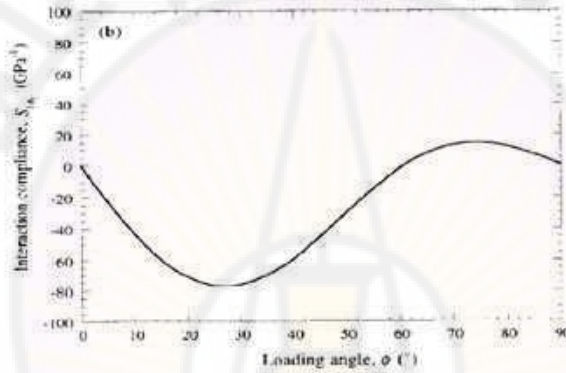
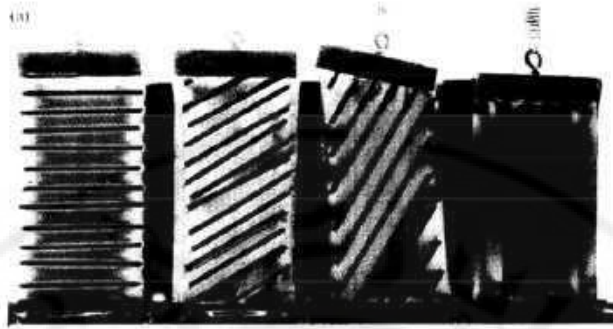
الشكل (4-5) التغيرات لمعاملات يونغ E_x ومعاملات القص G_{xx} مع زاوية التحميل ϕ للمادة المركبة الصفانحية (a) ايبوكسي/50% ألياف زجاجية. (b) تيتانيوم/50% شعيرات احادية من SiC. تم الحصول على معامل يونغ العرضي باستخدام نماذج الاجهاد المتساوي (المعادلة (4-6) و هابيلين تساوي (المعادلة 4-7)) في (a) و فقط نموذج هابيلين تساوي في (b).



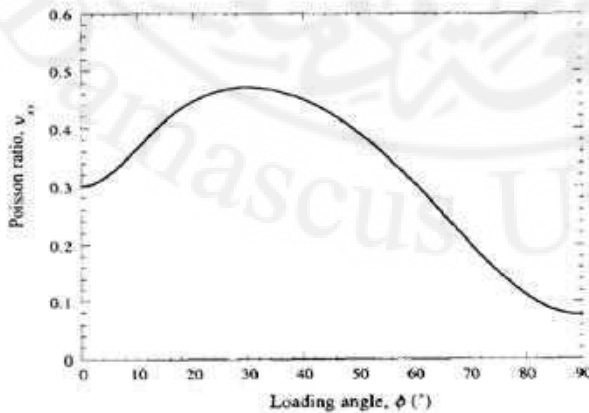
الشكل (5-5) تغيرات نسبة التبادل (التفاعل) مع زاوية التحميل ϕ للصفائح من الإيبوكسي المحتوية على 50% ألياف زجاجية، تم الحصول عليها باستخدام تعبير هابلين تساي من أجل E_2 . هذه المميزات (الخواص) ذات أهمية عملية ويمكن توضيحها باستخدام نموذج بسيط لمادة مركبة. يبين الشكل (5-6 a) صورة لنموذج ماكروبي لتطبيق عملي. هذا النموذج مصنع من أربعة صفائح منفصلة، يتألف كل منها من قضبان معدنية رفيعة مرتبة في مادة حاضنة من مطاط البولي يورثان polyurethane. صفت هذه الألياف المعدنية بحيث أن محور الإجهاد يشكل زوايا (0° , 30° , 60° And 90°) إلى اتجاه الليف. يوجد تشوه قص قوي للصفحة ذات الزاوية 30° ، ولكن هذا مهمل في الصفائح ذات

الزوايا الأخرى. يتوافق هذا مع الرسم البياني. في الشكل (5-6)(b) الذي يبين الاختلاف في الخضوع المتفاعل $\bar{S}_{16}$ مع زاوية التحميل من أجل نموذج المادة المركبة. يتناسب انفعال القص الملاحظ بشكل مباشر مع هذا البارامتر. يمكن أن نرى أن ذلك الخط البياني متناسب مع سلوك النموذج، يتوقع في ذلك النموذج أن يكون انفعال القص الكبير عند الزاوية 30° ، وليس من أجل الجهات الثلاث الأخرى. يمكن أن نلاحظ الدرجة التي تصبح فيها الصفيحة ممتدة بشكل عريض للتوافق مع النظرية (المنحني النظري). وكمثال يمكن التنبؤ بأن معاملات يونغ عند الزاوية 60° للصفيحة تكون أقل بقليل من الزاوية 90° للصفيحة ولا يظهر أنها تصبح أكثر حدية بالامتداد الأكثر.

يكن مفتاح التأويل الفيزيائي لهذه التأثيرات في معرفة دور قص المادة الحاضنة. يبين الشكل (5-6)(a) صورة مرونة للمادة الحاضنة في النماذج الواردة وتظهر تلك الصور حدوث انفعالات قص مهمة في الحالات المائلة. تكون انفعالات القص هذه مسؤولة أيضاً من أجل التأثيرات المبيّنة في الشكل (5-7) التي تظهر قمة (القيمة الأعظمية) لنسبة بواسون ν_{xy} عند زاوية متوسطة. يمكن أن تولد انفعالات القص الكبيرة في المادة المركبة كلا انحرافات قص والتقلصات الجانبية الكبيرة. مثل هذه التأثيرات مهمة في فهم سلوك الصفائح.



الشكل (5-6) (a) أربعة نماذج لمادة مركبة صفانحية مصنعة من قضبان معدنية مرتبة في مادة حاضنة مطاطية من البولي يوريثان كل منها مع نسبة حجمية $f=0.05$ وينفس الأبعاد عندما لا تكون مجهدة. عرضت كلها إلى إجهاد شد يصنع زوايا على محور الليف (0° , 30° , 60° , و 90°). تظهر المادة الحاضنة بلون فاتح عندما تعرض لإنفعال قص كبير. (b) التغير المتنبأ به مع زاوية التحميل ϕ من أجل تفاعل الخضوع $\bar{S}_{16}$ ، استخدم تعبير هابلين تساي لحالة المادة المركبة في (a) من أجل المعاملات العرضية E_2 .



الشكل (5-7) (5-7) تغير نسبة بواسون ν_{xy} مع زاوية التحميل ϕ لمادة صفانحية من الإيبوكسي/50% ألياف زجاجية. تم الحصول عليها باستخدام تعبير هابلين تساي للمعاملات العرضية E_2 .

5-3- التشنو المرن للصفائح Elastic deformation of Laminates

5-3-1- تحميل أكداًس من الرقائق أو الطبقات Loading of a stack of Plies

من الواضح من الشكل (4-5) أنه تميل الصفيحة المفردة المحتوية على ألياف مصطفة إلى إظهار خواص مرونة متباينة. يمكن أن يخفض هذا التباين بتكديس عدد من الصفائح (أو الطبقات) مع الاختلاف في اتجاهات الألياف وترابطهم مع بعضهم لتشكيل الصفيحة، يمكن أن يتنبأ بخواص المرونة لمثل هذه الصفيحة من خواص مرونة الطبقات. شريطة أن يكون هذا التجمع للطبقات بشكل مستو ورقيق. مع عدم وجود إجهادات خلال السماكة وإهمال تأثيرات حواف الطبقات. (تدعى هذه الشروط افتراضيات كيرشوف).

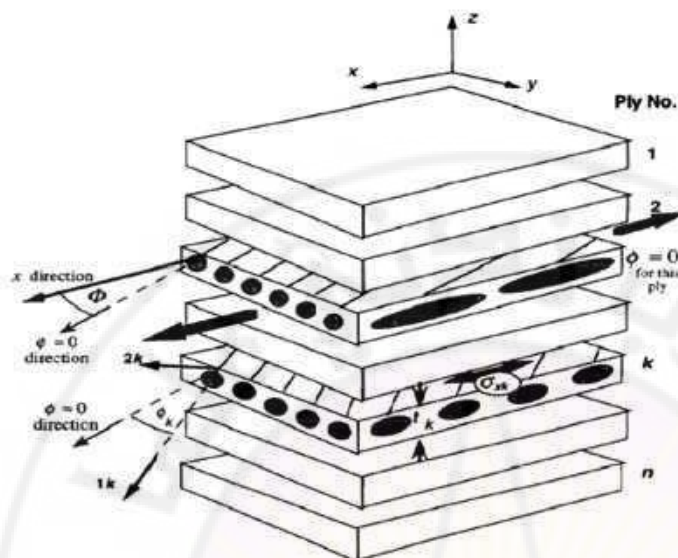
إن التحليل التفصيلي لحالات الإجهاد في الصفائح معقد ولكن أثبتت المعالجات البسيطة المحددة أدناه فائدة (صحيحة) لمجالات تطبيقية.

يتم حساب الثوابت المرنة للصفيحة بحسب الوصف المبين في الشكل (8-5) لاحظ أنه يعبر عن زاوية التحميل بين محور الإجهادات (في الاتجاه X) والاتجاه المرجعي من أجل توجيه الطبقات (الرفاقات) ($\phi = 0^\circ$) بـ Φ . لذلك يقع اتجاه الليف من أجل الطبقة K عند الزاوية $(\phi - \Phi)$ بالنسبة لمحور الإجهاد. يمكن أن يكتب الإجهاد المتوسط في الاتجاه X كلاً منها كتابع للإجهادات في الطبقات المستقلة وبصيغة الانفعالات والجساءة الكلية.

$$\sigma_{xg} = \frac{\sum_{k=1}^n (\sigma_{xk} t_k)}{\sum_{k=1}^n t_k} = \bar{C}_{11g} \epsilon_{xg} + \bar{C}_{12g} \epsilon_{yg} + \bar{C}_{16g} \gamma_{xyg} \quad (5-28)$$

التي فيها t_k هي سماكة الطبقة k والرمز g يشير إلى القيمة الكلية من أجل كامل الصفيحة. كما في الانفعالات المستوية المقيدة لتكون نفسها من أجل كل صفيحة، يمكن أن تكتب الإجهادات في أي صفيحة كما يلي:

$$\sigma_{xk} = \bar{C}_{11k} \epsilon_{xg} + \bar{C}_{12k} \epsilon_{yg} + \bar{C}_{16k} \gamma_{xyg}$$



الشكل (5-8) تصور
تخطيطي لزاوية التحميل
 ϕ بين الاتجاه X
(محور الإجهاد) والاتجاه
المرجعي ($\phi=0^0$)
للصفيحة المكونة من n
رقاقة. يظهر كذلك أن
الزاوية ϕ_k بين الاتجاه
المرجعي ومحور الليف
للرقاقة K.

وباستبدال المعاملات ϵ_{xg}

$$\bar{C}_{11g} = \frac{\sum_{k=1}^n (\bar{C}_{11k} t_k)}{\sum_{k=1}^n t_k} \quad (5-29)$$

بتطبيق عبارات مشابهة للمركبات الأخرى. إذا كانت الخضوعات المتطابقة (المتماثلة)
مطلوبة فإنه يجب أن يستنتجوا بعد هذه العملية بواسطة تطبيق العلاقات العكسية.

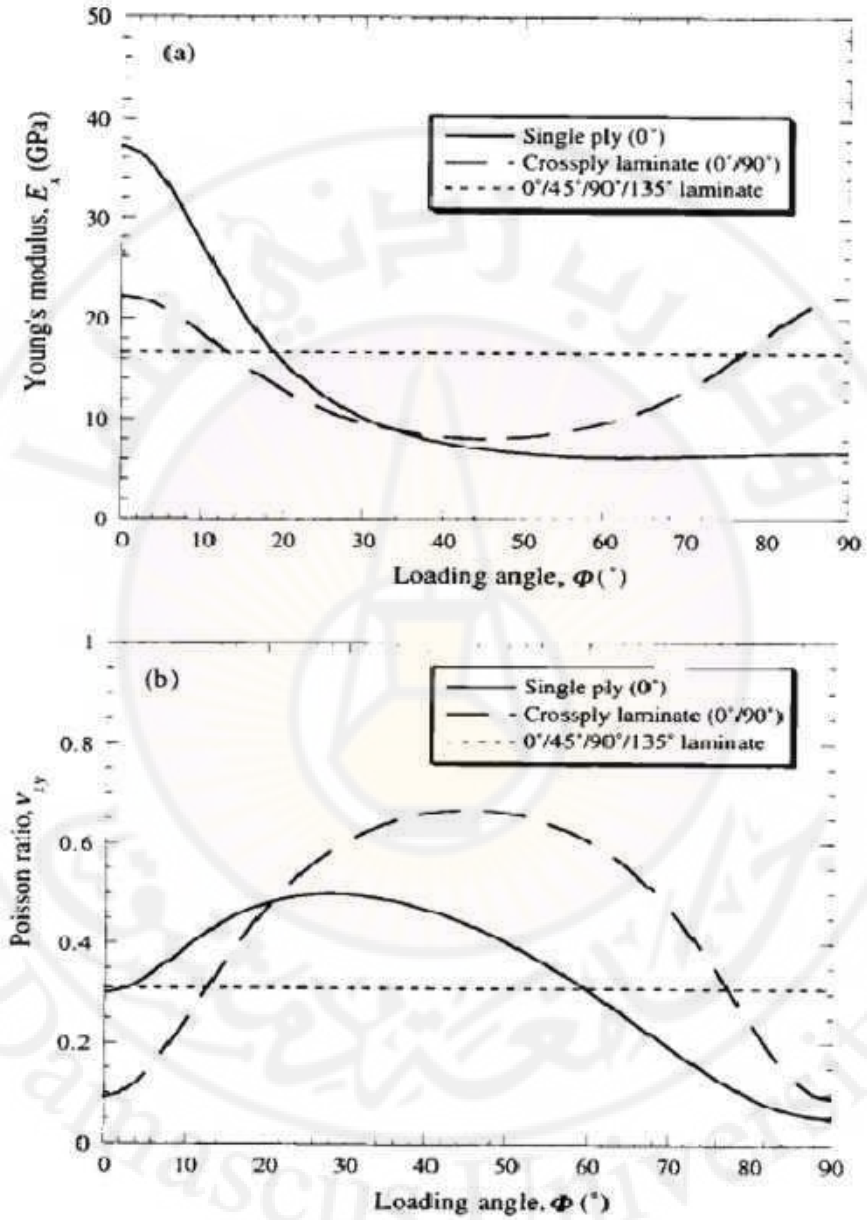
$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{(C_{22}C_{66} - C_{26}^2)}{\Delta} \\ S_{22} &= \frac{(C_{11}C_{66} - C_{16}^2)}{\Delta} \\ S_{12} &= \frac{(C_{16}C_{26} - C_{12}C_{66})}{\Delta} \\ S_{66} &= \frac{(C_{11}C_{22} - C_{12}^2)}{\Delta} \\ S_{16} &= \frac{(C_{12}C_{26} - C_{22}C_{16})}{\Delta} \\ S_{26} &= \frac{(C_{12}C_{16} - C_{11}C_{26})}{\Delta} \end{aligned} \quad (5-30)$$

التي فيها:

$$\Delta = C_{11}C_{22}C_{66} + 2C_{12}C_{16}C_{26} - C_{22}C_{16}^2 - C_{66}C_{12}^2 - C_{11}C_{26}^2$$

2-3-5- السلوك المتوقع Predicted Behaviour

يبين الشكل (9-5 (a)) المخططات البيانية لمعاملات يونغ $E_x = \left(\frac{1}{S_{11g}} \right)$ ، والشكل (9-5 (b)) المخططات البيانية ونسبة بواسون $(\nu_{xy} = -S_{1g} E_x)$ مقابل زاوية التحميل من أجل تكديس صفائحي مختلف ومتتال. تم الحصول على هذه المخططات بالتطبيق المتكرر للمعادلات (29-5) لكل قيمة لزاوية التحميل باستخدام فرضية الإجهاد المتساوي للمعاملات العرضية. على الرغم من أن هذا الافتراض نوعاً ما غير دقيق، فإنه لن يؤثر في هذه الحالة استخدام هذا الافتراض على حالة التطابق (تمائل). تكون الصفحة ذات الاتجاهين 0/90 أقل تناظراً من الصفحة وحيدة الاتجاه. إذا وضعت رقاقات (صفائح) أكثر بما يغطي مجال التوجهات. يصبح عندئذ التباين في الخواص أصغر وربما يزول هذا التباين، لذلك تكون الجساءة نفسها عندما يتم التحميل في أي اتجاه. من أجل الحالة المبينة في الشكل (9-5 (a)) تكون الجساءة حوالي 16.5Gpa. من الممكن أن نشير إلى أنه لا يمكن الحصول على الجساءة المحدودة المنتظمة من علاقة بسيطة مشتقة بإجراءات موحدة.



الشكل (5-9) تغيرات مع زاوية التحميل ϕ من أجل (a) معاملات يونغ E_x (b) نسبة بواسون ν_{xy} (لصفيحة مفردة ولصفيحتين بتتابع تكديس مختلف وتتألف من الإيبوكسي/50% ألياف زجاجية) (استخدم نموذج الإجهاد المتساوي من أجل معامل يونغ العرضي للصفيحة).

تشير البيانات في الشكل (9-5) إلى أنه من غير الضروري أن تتباعد توجيهات الطبقة بشكل قريب جداً لكي يتم الحصول على خواص مرونة متماثلة في المستوي. ومن جهة أخرى تحتفظ الزاويتان (0/90) (المتعامدتان) بالخواص اللاتناظرية للصفائح. تختلف الطبقات الأخرى المتعاقبة التي يختلف فيها التوجيه بين الرقائق المتتابعة بالمقدار $(\phi - \phi + \phi - \phi)$ زوايا الصفائح الرقيقة)، وبشكل عام يكون التنبؤ بخواص المرونة معقداً جداً من أجل تتابع التكديس العشوائي. ولكن سوف تتم هذه العملية بشكل طبيعي (عادي) بإدخال بسيط للبيانات الضرورية في برنامج حاسوبي. تتوفر هذه البرامج للحواسيب الشخصية وهي واسعة الانتشار، وليس من الضروري تفهم تفاصيل التقنيات الرياضية المستخدمة لاستخدام هذه البرامج.

4-5- Stresses and distortions والتشوهات والإجهادات

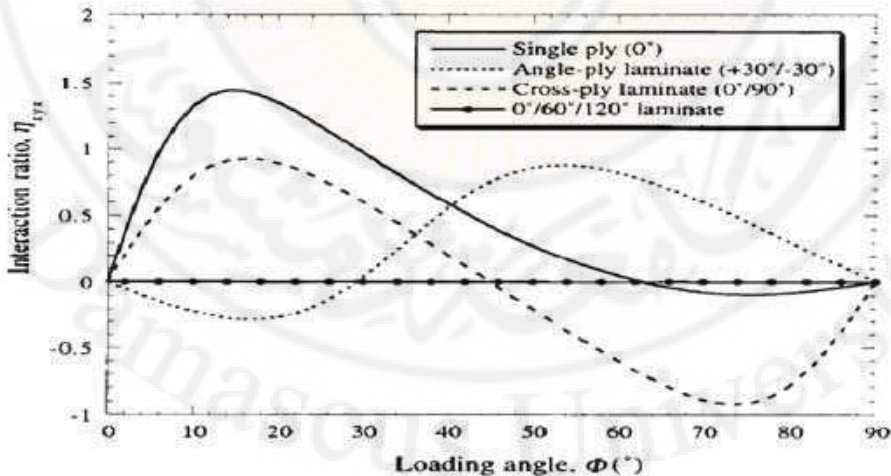
ينتج التحميل الخارجي للصفحة توزع معقد للإجهادات في الصفحة المستقلة وبين الصفائح. يخلق هذا تشوهات في شكل الصفحة ويسبب أذى موضعياً للبنية المجهرية ويؤدي إلى تحطمها، حيث أنه من الهام اختيار تتابع التكديس للتقليل من التأثيرات غير المرغوبة لمثل هذه التشوهات والناجمة بسبب التبادل شد - قص الموصوف في الفقرة (3-5).

1-4-5- Balanced Laminates: الصفائح المتوازنة:

تعتمد تأثيرات تبادل القص - الشد في الصفحة بشكل كامل على وضع توجيهات مجموعة الرقائق. يبين الشكل (10-5) الاختلاف في نسبة التبادل η_{xyx} مع الزاوية Φ بين محور الإجهاد والاتجاه المرجعي للصفحة ($\phi = 0$) (اتجاه زاوية المبدأ) لعدة صفائح. كما هو متوقع يصبح الحد أقل لكل الزوايا Φ عندما يصبح مجموع اتجاهات الليف أكثر اعتدالاً والفراغات أكثر تقارباً، كما تبدي المجموعة تناظراً دورانياً أكبر حول المحور الناظمي لمستوي الصفحة. في الحقيقة فإنه يصبح حد القص - الشد η_{xyx} صفراً والحدود الأخرى في $\bar{S}_{ijg}$ تصبح ثابتة لكل الزوايا Φ ، عندما يكون هنالك N طية حيث ($N \geq 6$) محور تناظري..الخ. إن اتجاهات الليف تكون ذات مسافات متساوية

عند زوايا قيمتها $360^\circ / N$. (لاحظ أنه يجب أن تكون N متساوية حيث أن اتجاه الليف وهمي) توافق الزوايا 0/60/120 الحالة المبينة في الشكل (5-10) إلى $N=6$.

عندما تساهم حدود التبادل شد - قص للصفحة المستقلة فإن الكل يلغي الآخر في هذه الطريقة. إن الصفحة المكسدة ذات الرقاقات الزاوية غير متوازنة من أجل تحميل زاوية عام، على الرغم من أنه سوف يكون كلاهما في حالة توازن عند تحميلهما على الزاوية $\phi = 0^\circ$ (توازي رقاقة واحدة من الرقاقات لأجل الصفحة ذات الرقاقات أو مائلة بشكل متساوي إلى الزوايا $\phi -$ و $\phi +$ حالة الرقاقة الزاوية). إذا كانت الطبقات مختلفة في السماكة أو النسب الحجمية للألياف أو مختلفة في نوع الألياف الذي تحويه عندئذ حتى الصفحة التي يسلك فيها التكديس المتتالي سلوك التناظر الدوراني الضروري. تكون عرضة إلى تشوهات الشد - القص، والحساب ضروري لتعيين التتابع المتتالي الضروري لبناء صفائح متوازن. في كل الحالات، لا يدخل ترتيب التكديس الذي تجمع به الطبقات ضمن هذه الحسابات، على الرغم من أنه قد يكون هاماً لتعيين إجهادات الربط داخل الصفائح.



الشكل (5-10) تغير نسبة التبادل (η_{xy}) مع زاوية التحميل ϕ لصفحة مفردة ولثلاثة صفائح مع تتالي تكديس مختلف. مؤلفة من ايبوكسي/50% ألياف زجاجية. (استخدم نموذج الإجهاد المتساوي لمعاملات يونغ العرضية للصفحة).

2-4-5- الإجهاد في الطبقات المفردة للصفائح

Stress in individual Plies of a Laminate

يمكن أن تقسم الاجهادات الداخلية إلى إجهادات داخل المستوي التي يمكن أن تحسب بطريقة مشار إليها أدناه، والإجهادات داخل الصفيحة أو الإجهادات عبر السماكة التي تظهر كنتيجة تأثيرات قصيرة وتقدير قيمتها صعب جداً. يتبع تعيين الإجهادات داخل المستوي بشكل مباشر الدراسات السابقة التي تم الإشارة إليها في الشكل (8-5) ويفرض تعرض كدسة من الصفائح لحالة الإجهاد σ_x, σ_y and τ_{xy} وأن انفعالات الصفائح تعين من تحول تتسور الخضوع للصفيحة (للصفائح).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{S}_g] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5-31)$$

كما أن هذه الانفعالات مفروضة على كل الشرائح (الرقاقات)، ويمكن تحديد الانفعالات التي تقع ضمن الطبقة (الرقاقة) k (تشير إلى اتجاه الليف للطبقة للاتجاه 1k من المعادلة (5-15) التي تصبح:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{1k} \\ \varepsilon_{2k} \\ \gamma_{12k} \end{bmatrix} = [T^1]_{\phi_k} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (5-32)$$

يمكن بعد ذلك الحصول على الإجهادات في الطبقة من هذه الانفعالات باستخدام مصفوفة الجساءة للطبقة k (على المحور):

$$\begin{bmatrix} \sigma_{1k} \\ \sigma_{2k} \\ \tau_{12k} \end{bmatrix} = [C]_k \begin{bmatrix} \varepsilon_{1k} \\ \varepsilon_{2k} \\ \gamma_{12k} \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

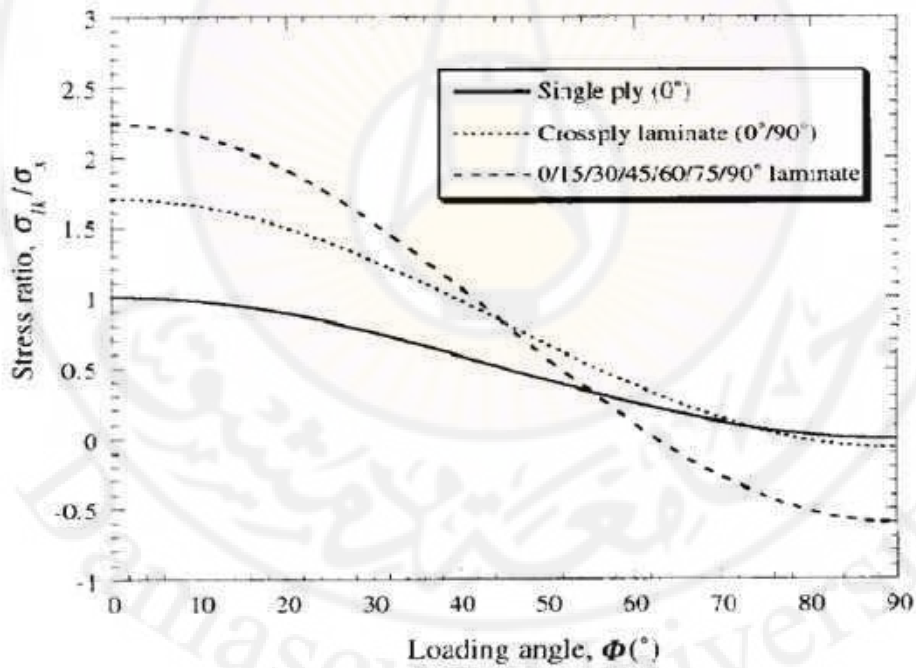
ترتبط الإجهادات في الطبقة k مباشرة بالإجهادات المطبقة بحسب المعادلة:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{1k} \\ \sigma_{2k} \\ \tau_{12k} \end{bmatrix} = [C]_k [T^1]_{\phi=\phi_k} [\bar{S}_g] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5-33)$$

يبين الشكل (5-11) بعض النتائج لمثل هذه الحسابات، الذي يعطي التغيرات في σ_{1k} كنسبة إلى الإجهاد المطبق، مع الزاوية Φ بين اتجاه التحميل واتجاه الليف في الطبقة 0° . يظهر ذلك للصفحة المفردة وللصفيحتين.

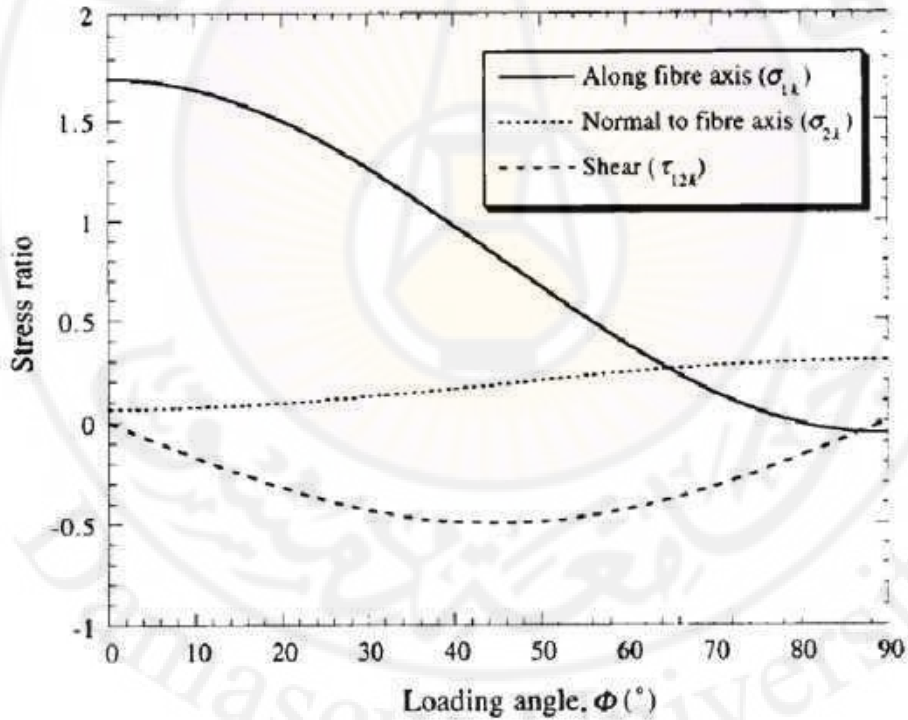
عند وجود رقاقت أكثر، تعتبر الرقاقة 0° تمثل المقطع النسبي الأصغر، وتحمل الصفحة إجهاد أكبر عند الزاوية $\Phi = 0^\circ$.

هذا بسبب أن الطبقة ذات الزاوية 0° أكثر جساءة من تلك ذات التوجهات الأخرى.



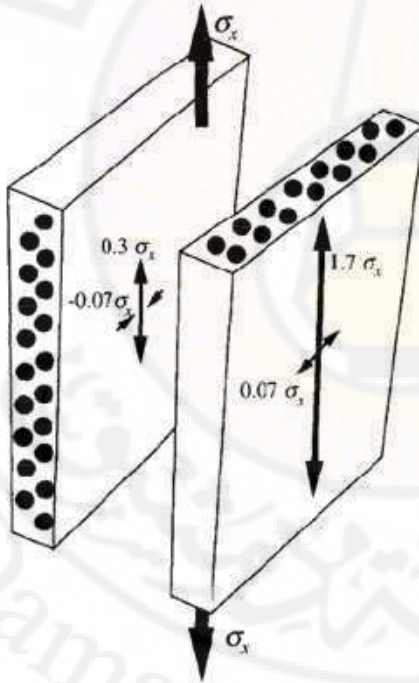
الشكل (5-11) التغيرات للإجهاد σ_{1k} الموازي لمحور الليف لرقاقة موجهة بالأساس على 0° إلى محور الإجهاد مع زاوية التحميل Φ للصفحة مفردة وللصفيحتين من الإيبوكسي/50% ألياف زجاجية. رسم منحني الإجهاد كنسبة إلى الإجهاد المطبق. (استخدم نموذج الإجهاد المتساوي من أجل معاملات يونغ العرضية للصفحة).

لاحظ أيضاً أنه يمكن أن توضع تلك الرقاقة على الضغط عندما يكون توجيهها بزاوية كبيرة على اتجاه التحميل. ينتج هذا عن تأثير انكماش بواسون. يمكن أن يشاهد في الشكل (5-12) الذي يبين كل الإجهادات المتواجدة عند الرقاقة 0^0 للصفحة بالرقاقات عند الزاويتين $(0/90)$. إن الإجهاد الضاغط الموازي للألياف (في الاتجاه 1) الذي له قيمة حوالي 0.07 مرة من الإجهاد المطبق عند الزاوية $\Phi = 90^\circ$ ، وينشأ بسبب أن الرقاقة لها قيمة صغيرة لعامل تقلص بواسون الموازي للألياف، ولكن كونها مجهزة بمقدار تقلص كبير بالنسبة للرقاقات الأخرى (التي تكون محملة على طول محاورها الليلية من أجل الزاوية $\Phi = 90^\circ$).



الشكل (5-12) التغيرات للإجهادات σ_{1x} ، σ_{2x} و τ_{12x} ضمن رقاقة موجهة على 0^0 إلى محور الإجهاد مع زاوية التحميل Φ لصفحة $90/0$ من الأيبوكسي/50% ألياف زجاجية. رسم منحنى الإجهاد كنسبة إلى الإجهاد المطبق. (استخدم نموذج الإجهاد المتساوي من أجل معاملات يونغ العرضية للصفحة).

يبين الشكل (5-13) تخطيطاً للإجهادات الواقعة في رقاقتين من أجل $\Phi = 0^\circ$ كما في الشكل (5-12) للرقاقة 0° والرقاقة عند $\Phi = 90^\circ$. من الواضح من الشكل (5-11) أنه يمكن أن تكون الإجهادات الضاغطة المتولدة في هذه الحالة ضمن رقاقتين مستقلة كبيرة بشكل مفاجئ. تكمن التفاصيل في حساسية الليف والمادة الحاضنة لنسبة بواسون، وحيث أنه للألياف السيراميكية قيم منخفضة (وذلك بالنسبة لكل من المواد البوليميرية والمعدنية). سوف يكون دائماً للمادة المركبة نسبة بواسون من أجل الانكماش الموازي لمحور الليف للرقاقة أقل من الاتجاه العرضي، وبذلك إن هذا التأثير عاماً في المواد المركبة ذات الأساس من هذه المواد الحاضنة.



الشكل (5-13) تمثيل تخطيطي للإجهادات σ_{2k}, σ_{1k} ضمن رقاقتين لصفحة 90/0 من اللابوكسي/50% ألياف زجاجية، موجهة بحيث أن الألياف ناظمية وموازية لإجهاد الشد المطبق σ_x .

3-4-5- الإجهادات المقرونة والصفائح المتناظرة (متناهيّة الخواص)

Coupling Stress and symmetric Laminates

من الصعب أن توصف بدقة الإجهادات خلال سماكة لصفحة. مهما يكن هذه الإجهادات مهمة في التطبيق العملي الذي يمكن أن تؤدي إلى تشوهات معتبرة في

الصفیحة. یمکن أن تمثل الطبیعة العامة لهذه التشوهات بمثالین:

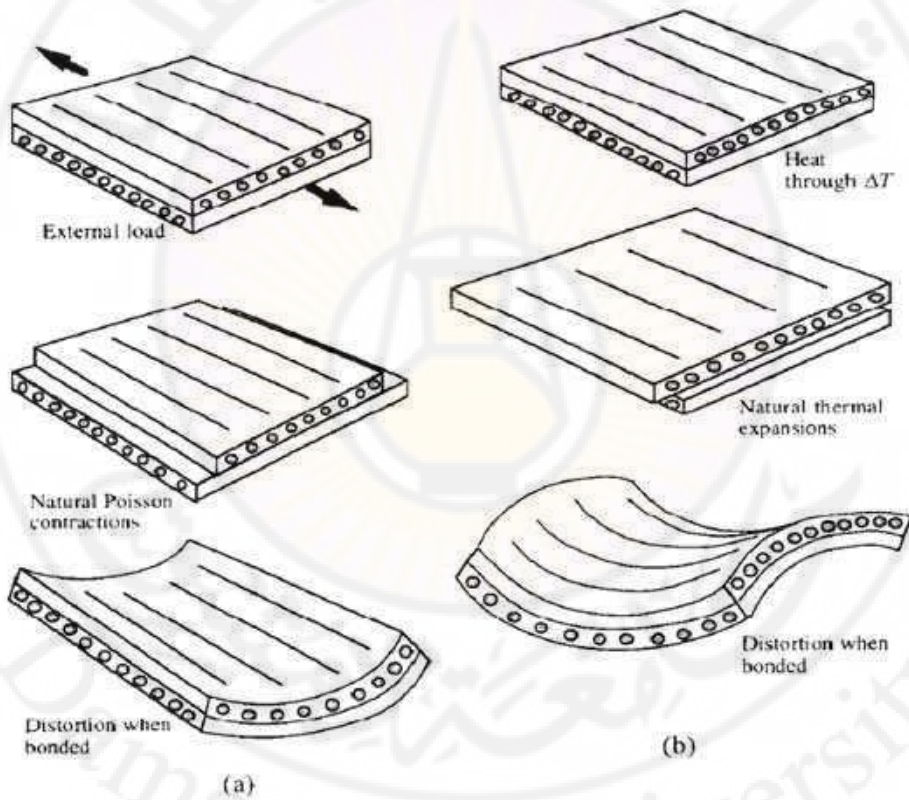
أمن النظر فی الصفیحة الرقائیة البسیطة المرسومة فی الشكل (14-5) إذا حملت هذه الصفیحة باتجاه شاد أحادی المحور كما فی الشكل (a)، ستحدث الاختلاف فی تقلصات بواسون الطبیعیة لرقائتین فی الصفیحة تشوهاً (انحراف) كما فی الأسلوب المبین فی الشكل، ونحتاج إلى إجهادات من خارج المستوی للمحافظة على استقامة الصفیحة. إضافة إلى ذلك تعرض الرقاقة العرضیة أيضاً لتقلصات كبیرة خلال السماكة الواسعة. كما یمکن أن یرى من البیانات فی الشكل (10-4 a)) یمین تأثیر مشابه فی الشكل (14-5 b)) للصفیحة الرقائیة التي سخنت. بسبب اختلاف معاملات التمدد الحراریة الموازیة والعرضیة إلى محور الیاف تتشوه الصفیحة وتصبح بشكل سرج الحصان. مفترض فی هذه الحالة أن القیم α_1 و α_2 التي هی متوقعة حیث معاملات التمدد الحراریة للألیاف السیرامیکیة منخفضة. یمکن أن تسبب الإجهادات التي تظهر ضمن مثل تلك الصفیحة نتیجة تغیر درجات الحرارة أذى فی البنية المیکروبیة.

یمکن أن تخفض مثل هذه التشوهات بشكل كبیر إذا كان ترتیب الطبقات متناظراً حول المستوی الوسطی للصفیحة. المقصود إذا كان فیها مستو عاكس كالمرآة واقعاً فی مستوی الصفیحة. تلغی القوى المقرونة بشكل واسع فی الصفائح المتناظرة، ولن تتشوه الصفیحة ككل . على الرغم من تواجد إجهادات موضعیة عبر الحدود الداخلیة للصفیحة. بالإضافة إلى أن استعمال عدة صفائح رقیقة عوضاً عن صفائح قليلة كبیرة السماكة یقلل من التشوهات ویؤدي إلى تخفیض الإجهادات الموضعیة داخل الصفیحة. یكون تصنیف الصفیحة فیما لو أن التكدیس المتعاقب متوازن أم لا أو أن التكدیس المتعاقب متماثل الخواص أم لا. یشرح الرسم فی الشكل (15-5) ما سبق مع بعض الأمثلة.

یوجد عدة مميزات لاستخدام التوازن المتماثل الخواص للتكدیس المتعاقب وهذا الاستخدام شائع فی التطبيق التجاری. مهما یكن یجب الإشارة إلى أن تلك الصفیحة تصمم فی الغالب على ضوء المعلومات حول حالة إجهاد الخدمة المتوقع. كمثال سوف تختار الزوايا المتعاقبة للرقاقة مع مراعاة ظروف الخدمة للأنایبب التي تخضع لضغط داخلي

أو خارجي أو لشد ثنائي المحور غير متساوي أو لضغط سوف يتم اختيار الزوايا المتعاقبة للرقاقة مع أخذ هذا الأمر في الحسبان.

يحتاج إلى دراسة نموذج الفشل المحتمل بالإضافة إلى الانحرافات المرنة، علاوة على ذلك إن نوع ومقدار الانحرافات والتشوهات ستكون متنوعة بشكل واسع بين مختلف التطبيقات. لذلك هنالك صعوبة فعلية. لتحديد تعاقب التكديس الأفضل دون معلومات مفصلة حول متطلبات العمل.



الشكل (5-14) توضيح تخطيطي يبين أن الصفائح الرقائعية ستميل للتشوه كنتيجة أجهادات المقارنة عبر السماكة عندما تتعرض إلى (a) حمل خارجي (b) تغير في درجة الحرارة.

Unbalanced Asymmetric	Unbalanced Symmetric	Balanced Asymmetric	Balanced Symmetric
0	0	0	0
90	90	60	60
	90	120	120
	0		120
-30		0	60
+30	-30	60	0
-30	+30	120	
+30	+30	0	
	-30	60	
		120	
			0
			135
			90
			45
			45
			90
			135
			0

الشكل (5-15) أمثلة لتعاقب التكديس الذي ينتج تصنيف الصفائح إذا كانت متوازنة أو متناظرة.



الفصل السادس

الإجهادات والإنفعالات في المواد المركبة المقواة
بالألياف القصيرة

Stresses and strains in short-fiber composites

1- نموذج تأخر القص.

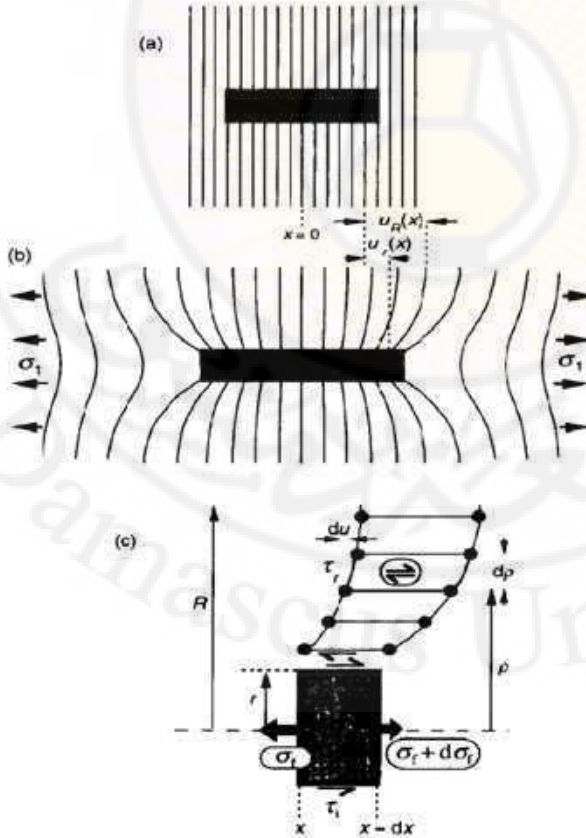
2- طريقة ايشليبي.



The shear lag model

6-1- نموذج تأخر القص:

نموذج تأخر القص من أوسع النماذج استعمالاً. يصف هذا النموذج تأثير تحميل المادة المركبة ذات الألياف القصيرة المصطفة، ويرتكز على نقل إجهاد الشد من المادة الحاضنة إلى الليف بواسطة إجهادات قص بينية (عند السطح البيني). يبين الشكل (1-6) تخطيطاً لقواعد الحسابات. ترسم في هذا التخطيط، الخطوط المرجعية على الليف ومادة الربط (الحاضنة) المحيطة، التي هي مستقيمة وعمودية على محاور الليف. تطبق بعد ذلك حمولة خارجية الشكل (1-6 (b)) موازية لمحاور الليف. تتشوه الخطوط المرجعية بالنمط المبين. يتركز الانتباه على تشوهات القص في المادة الحاضنة القريبة إلى الليف، يمثل ذلك تخطيطاً في الشكل (1-6 (c)) يعتمد النموذج على اعتبار إجهادات القص في مادة الربط (الحاضنة) عند السطح البيني.



شكل (1-6) رسم

تخطيطي لقواعد نموذج

القص المتأخر، يظهر :

(a) نظام غير مجهود.

(b) إحداث إزاحة محورية

u عند تطبيق شد موازي

لليف.

(c) تغير في الموقع

القطري لإجهاد القص

والانفعال في مادة الربط

(الحاضنة).

1-1-6- توزيع الإجهاد والانفعال -Stress and strain distributions

يتم الحصول على الاختلاف القطري لإجهاد القص في المادة الحاضنة τ (على مسافة محورية x من منتصف الليف) بمساواة قوى القص على الحلقات المجاورة (مع أنصاف أقطار $r_1 - r_2$ للطول dx) . الشكل (6-1 c)

$$2\pi r_1 \tau_1 dx = 2\pi r_2 \tau_2 dx$$

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

يتعلق إجهاد القص τ في المادة الحاضنة عند أي نصف قطر ρ بالإجهاد عند السطح البيئي للألياف والمادة الحاضنة (نصف قطر r) ، بـ τ_i

$$\tau = \tau_i \left(\frac{r}{\rho} \right)$$

يمكن أن يحدد حقل الانفعال حول الليف بالإزاحة u للمادة الحاضنة في الاتجاه x بالنسبة إلى الموضع الذي لم يطبق فيه إجهاد الشكل (6-1). تحدد الزيادة في هذه الإزاحة du لدى التحرك خارجا من محور الليف بمسافة قدرها $d\rho$ بواسطة انفعال القص γ ومن هنا بواسطة نموذج القص G_m .

$$\frac{du}{d\rho} = \gamma = \frac{\tau}{G_m} = \frac{\tau_i}{G_m} \left(\frac{r}{\rho} \right)$$

يعطى الاختلاف بين ازاحة المادة الحاضنة عند القطر R وتلك الإزاحة عند السطح البيئي من أجل أي قيمة معطاة لـ x بالتكامل البسيط:

$$\int_{U_r}^{U_R} du = \frac{\tau_i r}{G_m} \int_r^R \frac{d\rho}{\rho} \quad (6-1)$$

$$(U_R - U_r) = \frac{\tau_i r}{G_m} \ln \left(\frac{R}{r} \right)$$

يفترض أن يكون انفعال المادة الحاضنة متجانسا بعيدا عن الليف. يمثل نصف القطر R موضع الحقل البعيد نوعا ما حيث يصبح هذا الطرف فعالا. تتعلق القيمة المناسبة لـ

(R/r) في أي مادة مركبة تحتوي على مصفوفة من الألياف، بتقريب الألياف المتجاورة وبالتالي بالنسبة الحجمية للألياف f .

تعتمد العلاقة بين (R/r و f) على الطريقة التي تترتب بها الألياف، على كل حال تظهر (R/r) بشكل مصطلح لوغاريتمي والنتيجة النهائية غير حساسة لتفاصيل ترتيب الألياف. يؤدي الترتيب الخماسي الوجوه من الألياف إلى :

$$f = \frac{\pi \cdot 2}{(2R)(R\sqrt{3})} \quad (6-2)$$

$$\left(\frac{R}{r}\right)^2 = \frac{\pi}{2f\sqrt{3}} \approx \frac{1}{f}$$

يحدد تراكم إجهاد الشد في الليف σ_f من توزيع إجهاد القص البيني. كما في الشكل (1-6) 6 (c)، إن توازن القوة الأساسية العاملة على عنصر الليف هي :

$$2\pi r dx \tau_i = -\pi r^2 d\sigma_f \quad (6-3)$$

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_i}{r}$$

الآن ، تغير τ_i مع x غير معروف مسبقاً، ولكن يمكن أن تستخدم المعادلة (1-6) لكي تربطه مع الإزاحات وبالتالي مع الانفعالات المحورية. افترض أنه لا يوجد انفعال قص في الليف وبأن الالتصاق البيني تام (لذلك فإن إزاحة سطح الليف $U_r=U_f$). تستخدم العلاقة التالية من أجل نموذج القص للمادة الحاضنة:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}$$

وبالتبديل في المعادلة (1-6) نحصل على ما يلي :

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = \frac{2E_m(U_R - U_f)}{(1+\nu_m)r^2 \ln\left(\frac{1}{f}\right)} \quad (6-4)$$

إن الإزاحات غير معلومة ولكن اختلافاتها متعلقة بانفعالات قابلة للتحديد ولذلك من أجل الليف فإنه :

$$\frac{du_f}{dx} = \varepsilon_f \left(= \frac{\sigma_f}{E_f} \right) \quad (6-5)$$

إن الصيغة المقابلة للمادة الحاضنة أقل تحديداً. إن تغير u_R سيكون قريباً من انفعال المادة الحاضنة للموقع البعيد وعلى الأقل على معظم طول الليف و بالتالي ستكون قريبة إلى انفعال المادة المركبة بشكل كلي والرمز بالرمز ε_1 :

$$\frac{du_R}{dx} \approx \varepsilon_m \approx \varepsilon_1 \quad (6-6)$$

يمثل ذلك تقريباً جيداً نوعاً ما، وانفعال المادة الحاضنة للموقع البعيد موضح بالشكل (1-6 (b))، المتجانس بشكل تقريبي على طول وإلى ما بعد طول الليف. و سيتراكم كل من انفعال ولجهاد الليف بالبعد عن نهايات الليف .

وأخيراً يمكن أن يحدد توزع الإجهاد في الليف بمفاضلة المعادلة (4-6). وبالتبديل فيها نحصل على النتيجة التالية :

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = \frac{n^2}{r^2} (\sigma_f - E_f \varepsilon_1) \quad (6-7)$$

التي فيها n ثابت غير محدد الذي يعطى بالعلاقة التالية :

$$n = \left[\frac{2E_f}{E_f(1+\nu_m) \ln\left(\frac{1}{f}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6-8)$$

المعادلة (6-7) معادلة تفاضلية خطية من الدرجة الثانية مع الحل :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 + B \sinh\left(\frac{nx}{r}\right) + D \cosh\left(\frac{nx}{r}\right) \quad (6-9)$$

وعند التطبيق على الحالات الحدية نحصل على :

$$x = \pm L \quad \text{على} \quad \sigma_f = 0$$

حيث L نصف طول الليف، و باستبدال معامل بعد الليف L/r بالرمز s ، وهذا يعطينا الحل التالي:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 [1 - \cosh(nx/r) \sec h(ns)] \quad (6-10)$$

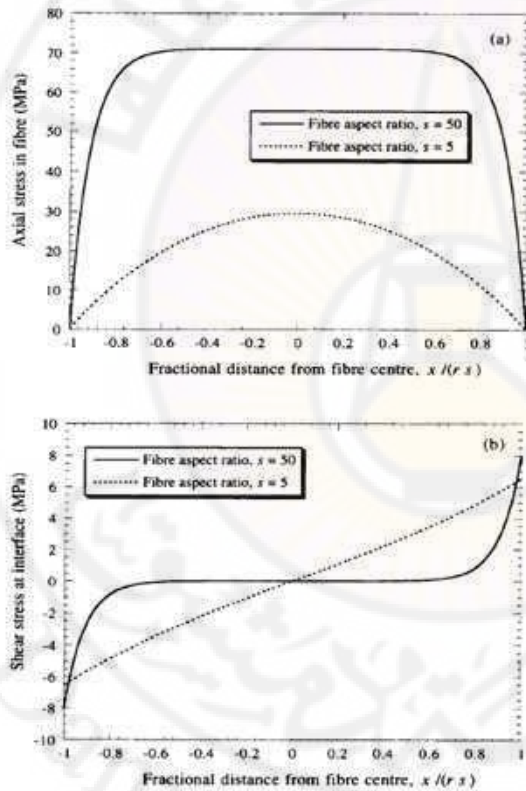
يشتق الاختلاف في إجهاد القص البيني على طول الليف تبعاً للمعادلة (6-3) بمفاضلة هذه المعادلة التي سوف تعطينا :

$$\tau_i = \frac{n\varepsilon_1}{2} E_f \sinh\left(\frac{nx}{r}\right) \sec h(ns) \quad (6-11)$$

2-1-6- نقل الإجهاد الطولي The stress transfer length

تسمح المعادلات (6-10) و (6-11) بنتيؤات توزع الإجهاد على امتداد طول الليف، يبين المثال المبين في الشكل (2-6 a) و (b) الاختلاف في إجهاد شد الليف و إجهاد القص البيني على امتداد طول ليف المادة المركبة المكونة من ألياف زجاجية مصطفة في مادة ربط (حاضنة) من راتنج البوليستر. هذه المنحنيات لنسبتين مختلفتين لمعاملتي أبعاد الليف ولمادة مركبة معرضة لانفعال شد موازي للألياف لـ 0.1% ($\varepsilon_f = 10^{-3}$). إجهاد الشد صفر في نهايات الليف وأعظمي في المركز، وإجهاد القص البيني صفر في المركز وأعظمي في النهايات، الليف طويل كفاية من أجل نسبة الأبعاد الكبيرة $s=50$ -، ليتراكم إجهاد الشد حتى ينفعلي الليف بشكل مساوي لانفعال مادة الربط (الحاضنة) والمادة المركبة. يعطي هذا ارتفاعاً لمنطقة الهضبة في منحنى الشد لليف ومنطقة صفر إجهاد القص البيني، (كل المادة المركبة مع ألياف مصطفة مستمرة في حالة الانفعال المتساوي بحالة الإجهاد في الاتجاه المحوري)، توجد منطقة من الليف قرب النهايات أقل إنقلا بالإجهاد عن منطقة الهضبة المركزية، لذلك معدل إجهاد الليف أقل من تلك للمادة المركبة ذات الليف الطويل الخاضعة لنفس الحمولة الخارجية. تتناقص كفاءة التقوية كلما انخفض طول الليف، بينما يزيد هذا من نسبة الطول الكلي لليف غير المحملة بشكل كامل.

يقود هذا السلوك لمفهوم نقل الإجهاد الطولي، الذي يتراكم فيه الانفعال في الليف حتى قيمة الهضبة (مادة الربط (الحاضنة)) للحالة المبينة، هذا الطول حوالي 10 أقطار الليف (حوالي 40% من المسافة من النهاية حتى نقطة المنتصف لليف لأجل منحنى $S=50$)، طالما أن النظام يبقى مرنا وليس هناك انزلاق بيني، تعتمد هذه القيمة فقط على ثوابت المرونة لليف ومادة الربط (الحاضنة) (مع مادة ربط (حاضنة) أكثر جساءة مثل المعدن سوف يكون نقل الإجهاد الطولي أقصر ، كنتيجة لإجهاد قص بيني أكبر).



الشكل (2-6) الاختلاف المتنبأ فيه:

(a) إجهاد شد الليف .

(b) إجهاد القص البيني على امتداد طول ليف زجاجي في مركب بوليستير / 30% ليف زجاجي معرض لانفعال شد محوري لـ 10^{-3} ، لنسبتي معامل أبعاد ليف .

من اجل معامل نسبة بعد قليلة ($S = 5$) الحالة الموضحة في الشكل (2-6)، الطول الكلي لليف مساوي إلى 5 أقطار الليف فقط، لذلك لا يتراكم الإجهاد في الليف إلى قمة الهضبة، لن تقدم مثل هذه الألياف التقوية الفعالة، لأنها تحمل إجهاد أقل بكثير عن ما ستحملة الألياف الأطول في نفس النظام، يمكن أن تُحدد نسبة أبعاد نقل الإجهاد S_t بأنها النسبة التي تتصرف عندها الألياف بحيث يقترب الإجهاد المركزي في ذروته و

يبلغ القيمة الأعظمية الممكنة (الذي يساوي عنده الانفعال للقيمة المفروضة على المادة المركبة) من المعادلة (6-10)، ستكون الحالة عندما :

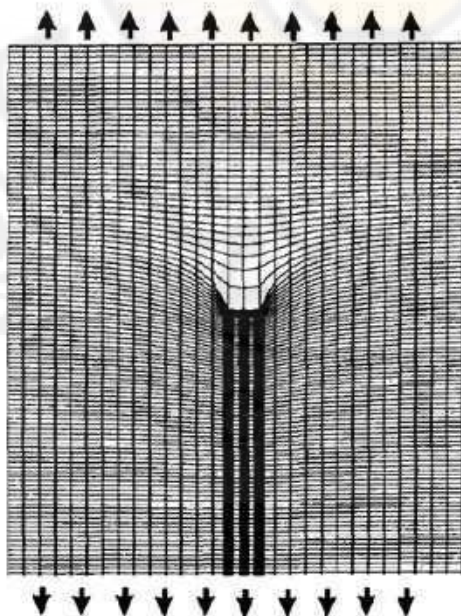
$$\cosh(0) \operatorname{sech}(ns) \ll 1$$

لكن $\cosh(0)=1$ ، و لدينا $\operatorname{sech}(ns) = 1/\cosh(ns)$ لقيمة قليلة مناسبة .

$$\cosh(ns) \geq 10$$

$$s_f \approx \frac{3}{n} \quad (6-12)$$

تصبح قيمة n التي تم الحصول عليها من المعادلة (6-8) أصغر عندما ترتفع نسبة موديول الليف / مادة ربط، وكلما تناقصت قيمة النسبة الحجمية للألياف. لا تتغير في العموم القيمة بشكل واسع، وهذه القيمة نموذجيا حوالي 0.1 للمادة المركبة ذات المادة الرابطة البوليميرية و 0.4 للمواد الرابطة المعدنية. لذلك القيم المناظرة لـ s_f هي 30 و 7 على التوالي، (لأجل المركبات ذات الأساس السيراميكي، قيمة n قريبة للواحدة، وهنا s_f صغيرة. يتم عادة إدخال ألياف السيراميك داخل مادة الربط السيراميكية لأغراض أخرى غير تلك التي تزيد من جساءة المادة، لذلك ليس الهدف الأساسي نقل الحمل بشكل فعال).



الشكل (6-3) خريطة التشوه

المرن حصل عليه بطريقة

الفروق المحددة، يظهر

كيف تصبح الشبكة

المتعامدة أوليا حول نهاية

الليف مشوهه عند تطبيق

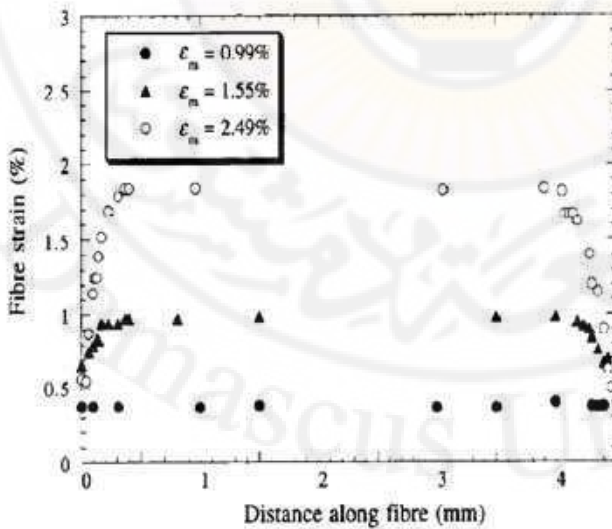
إجهاد شد محوري. (نسبة

جساءة الليف/مادة الربط

(40



الشكل (4-6) مخطط هدي صورة مرنة في وحول اسطوانة من الراتنج (كثيرة العلل) ضمن مادة ربط راتنجية تتعرض لإجهاد محوري . (الأهداب تمثل منحنيات مقفلة من إجهاد قص متساو)



الشكل (5-6) الانفعالات في ليف بولي دياسيتيلين ضمن مادة حاضنة من الإيوكسي. لثلاثة قيم للانفعال الماكروي المطبق على المادة الحاضنة. معدل بعد الليف بحدود 200 ونسبة جساءة الليف/المادة الحاضنة بحدود 16.

إن نموذج القص المتأخر واقعي، كمثال تفسر طريقة استخدام اختلاف النهاية كيف أن انفعالات القص المرتفعة لمادة الربط قرب نهاية الليف تقود لتراكم انفعال شد في الليف

الشكل (3-6). تم تأكيد هذا بواسطة ملاحظات الصورة المرنة. كمثال، الحافات المستوية في الأعلى قرب نهاية الليف الشكل (4-6) مناظرة لمناطق انفعال القص المرتفع، و يكشف الفحص الكمي التناقضات. تبين البيانات في الشكل (5-6) التي تم الحصول عليها بواسطة قياس انفعال الشد المحلي في نقاط مختلفة على طول ليف بولي دياسيتيلن في مادة ربط من الايبوكسي معرض لحمولة شد خارجية. التوافق بالمظهر العام للمنحنيات مع نموذج تأخر القص للانفعالات الأكبر المفروضة. مع عدم توافق، حيث لا ينخفض إجهاد الليف إلى الصفر عند النهايات. إن ذلك بشكل أساسي نتيجة نقل إجهاد الشد عبر نهايات الليف، التي تم إهمالها في النموذج الأساسي وهي غير هامة في المواد المركبة بألياف ذات معامل أبعاد مرتفعة.

3-1-6- نقل الإجهاد النازمي عبر نهاية الليف:

Transfer of normal stress across Fiber ends

أجريت عدة محاولات لإجراء التعديلات من أجل انتقالات الإجهاد عبر نهايات الليف التي تكون مهمة عادة. يجب أن تتضمن أي محاولة للحساب افتراض التعبير التحليلي لإجهاد نهاية الليف مع المحافظة على بساطة نموذج تأخر القص، وذلك ضمن إطار إجهاد ينص على أنه يجب أن يساوي إجهاد القص إلى متوسط قيمة الذروة لإجهاد الليف ومنعزل عن قيمة إجهاد المادة الحاضنة من خلال ستاندرات نموذج تأخر إجهاد القص.

تعطى قيمة إجهاد القص بالعلاقة:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{f0} + \sigma_{m0}}{2}$$

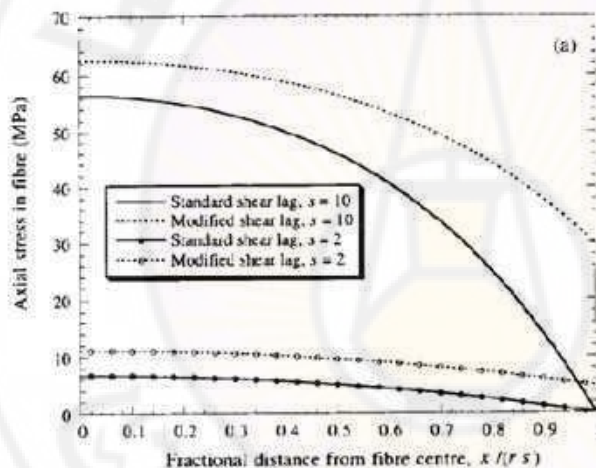
يتم الحصول على σ_{f0} بتعويض $x=0$ في المعادلة (10-6) ويؤخذ σ_{m0} مساوياً إلى $E_m \varepsilon_1$ (متوسط إجهاد المادة الحاضنة). وبذلك يكون σ_c مساوياً لـ:

$$\sigma_c = \frac{\varepsilon_1 [E_f (1 - \text{sech}(ns)) + E_m] + E_m' - \varepsilon_1 E_m'}{2} \quad (6-13)$$

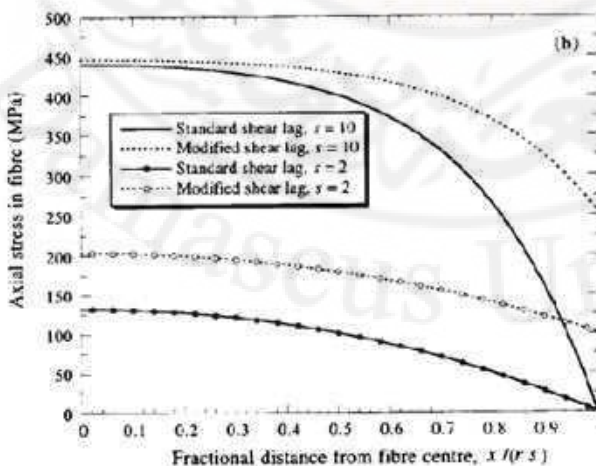
باستخدام الشروط الحدية الجديدة $\sigma_f = \sigma$ عند $x = \pm L$ في المعادلة (9-6) نحصل على المعادلة:

$$\sigma_f = \varepsilon_1 [E_f - (E_f - E_m') \cosh\left(\frac{nx}{r}\right) \operatorname{sech}(ns)] \quad (6-14)$$

يبين الشكل (6-6) مقارنة للتنبؤات من المعادلة السابقة مع تلك للنموذج القياسي المعادلة (6-10) وذلك من أجل (a) المواد المركبة ذات الأساس البوليمري (b) المواد المركبة ذات الأساس المعدني. نجد أن الاجهادات المتنبأ بها بالليف أكبر من تلك للنموذج المعدل، وبشكل خاص بالقرب من نهايات الليف. يقود اعتبار نقل نهاية الليف للإجهاد أن الألياف تحمل حملاً أكثر، وبشكل خاص للألياف القصيرة. مما يؤدي إلى زيادة الجساءة المتنبأ بها للمادة المركبة.



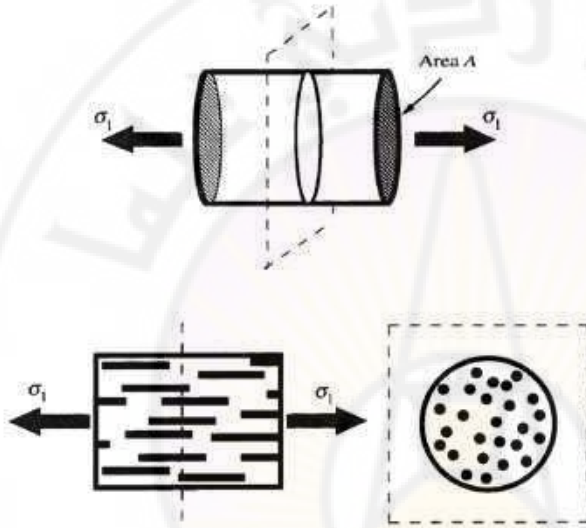
الشكل (6-6) الاختلافات المتوقعة في الإجهاد المحوري في: (a) مادة مركبة من البوليبسترسر/30% ألياف زجاجية.



(b) مادة مركبة من Al / 30% ألياف SiC ، المخططات عند انفعال مادة مركبة مساوي إلى 10^{-3} ، لنسبتي أبعاد ليف (s=10 و s=2) ، تبعاً لنموذجي تأخر القص القياسي والمعدل .

4-1-6- تنبؤ الجساءة Prediction of stiffness

يمكن أن تستخدم النتائج الأولية لمعالجة إجهاد القص لتوقع التشوه المرن للمادة المركبة. بأخذ مقطع مساحته A ناظمي على اتجاه التحميل (حيث تصطف فيه كل الألياف) كما هو مبين في الشكل (6-7).



شكل (6-7) تخطيط إيضاحي للمقطع العشوائي خلال مادة مركبة قصيرة الألياف مجهدة، يوضح كيف يقطع المقطع ألياف منفردة في نقاط متعددة على امتداد طولها .

يقاطع هذا المقطع الألياف المفردة بمواضع عشوائية على طول الألياف. يمكن أن يعبر عن الحمل المطبق بمصطلح مساهمة المكونين كما يلي:

$$\sigma_1 A = f A \bar{\sigma}_f + (1 - f) A \bar{\sigma}_m$$

$$\therefore \sigma_1 = f \bar{\sigma}_f + (1 - f) \bar{\sigma}_m \quad (6-15)$$

حيث σ_f و σ_m هما المتوسط الحجمي للإجهاد المحمول بالليف والمادة الحاضنة. تدعى هذه المعادلة " قاعدة المتوسطات ". يتم تقييم إجهاد الليف من المعادلة (6-10).

$$\bar{\sigma}_f = \frac{E_f \varepsilon_1}{L} \int_0^L \left[1 - \frac{\cosh(nx/r)}{\cosh(ns)} \right] dx$$

$$\bar{\sigma}_f = E_f \varepsilon_1 \left(1 - \frac{\tanh(ns)}{ns} \right) \quad (6-16)$$

من التقليدي للمواد الرابطة اللجوء إلى فرضية انفعال الشد المنتظم المساوي لذلك المطبق على المادة المركبة:

$$\bar{\sigma}_m \approx E_m \varepsilon_l \quad (6-17)$$

تنتج علاقة الإجهاد - الانفعال للمادة المركبة بجمع المعادلتين (6-15) - (6-17):

$$\sigma_l = \varepsilon_l \left[f E_f \left(1 - \frac{\tanh(ns)}{ns} \right) + (1-f) E_m \right] \quad (6-18)$$

يقود إجراء مشابه للنموذج المعدل، مع الأخذ بالحساب نقل إجهاد نهاية الليف إلى المعادلة التالية:

$$\sigma_l = \varepsilon_l \left[f E_f \left(1 - \frac{(E_f - E'_m) \tanh(ns)}{E_f ns} \right) + (1-f) E_m \right] \quad (6-19)$$

ثم التنبؤ بالزيادة الخطية في الإجهاد مع زيادة الانفعال في كلا الحالتين، التعبير في الأقواس المربعة هي معاملات يونغ المتوقعة للنموذجين .

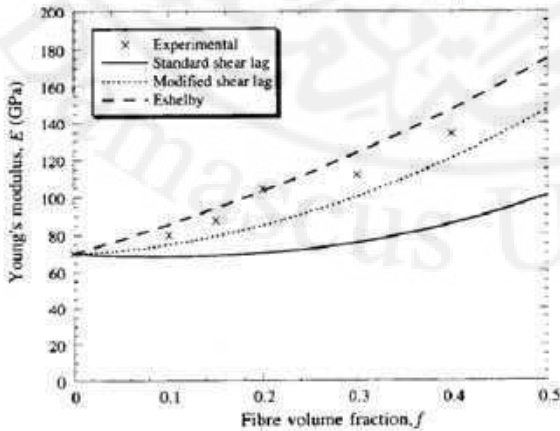
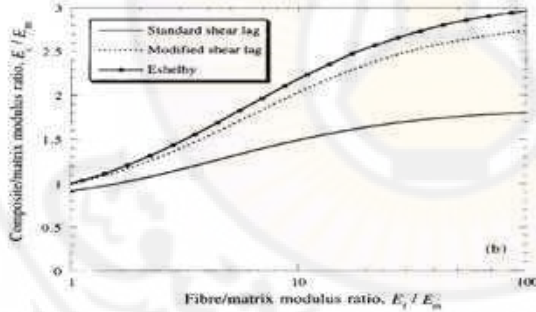
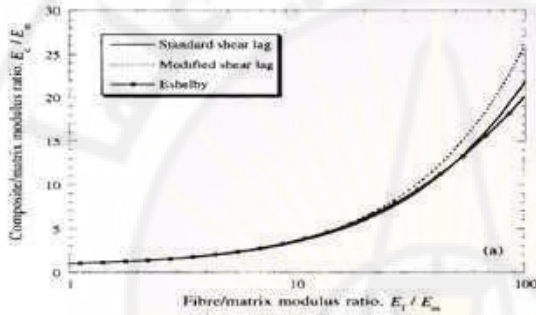
يمكن أن تختبر هذه المعادلات بعمل مقارنات للتنبؤات من نموذج ايشلبي. يبين الشكل (6-8) الاختلاف في معاملات يونغ للمادة المركبة، مع نسب معاملات ليف/مادة ربط لقيمتين لنسبتي أبعاد الليف، يمكن أن يلاحظ أن نموذج تأخر القص القياسي غير دقيق لأجل نسب الأبعاد المنخفضة لليف، تبدي التوقعات للنموذج القياسي عدم ثقة عندما تكون نسب معاملات ليف /مادة ربط صغيرة ، يقترح هذا أن تعديلا لإجهاد نهاية الليف قد يكون مفيداً عملياً لأجل المواد المركبة ذات الأساس المعدني المقواة بشكل منقطع، هذا مؤكد ببيانات الشكل (6-9) الذي يقارن التوقعات للنماذج الثلاثة مع قياسات الجساءة لـ MMCs المقواة بحبيبات. من الواضح أن نموذج القص المتأخر القياسي غير مناسب للتطبيق على هذه المواد.

يمكن أن يلاحظ من العلاقات (6-18) و (6-19) انه وكما هو متوقع، تقارب الجساءة القيمة الحدية (قاعدة المزج) حالما s تصبح كبيرة كفاية لـ $\tanh(ns)/ns$ ليصبح مهماً ($1 \gg$). بينما $\tanh(ns) \sim 1$.

لأجل $ns \geq 3$ ، ويفترض أن 0.1 يمكن أن تأخذ كـ $1 \gg$.

$$s_{RM} \approx \frac{10}{n} \quad (6-20)$$

حيث SRM هي نسبة أبعاد الليف المحتاج لها لمعاملات المادة المركبة لتتقرب من قيمتها العظمى (قاعدة المزج). كما لوحظ مؤخراً، قيم n النموذجية حوالي 0.1 للمادة المركبة البوليميرية و 0.4 للمادة المركبة المعدنية، هذا يقترح قيم لـ SRM حوالي 100 و 25 لـ $PMCs$ و $MMCs$ ، على التوالي. ويمكن أن يعتبر هذا بأنه نسبة الأبعاد المستهدفة (الحد الأدنى) عندما يكون الهدف الرئيسي هو زيادة نقل الحمولة وبالتالي الجساءة.



الشكل (6-8) توقعات نسب معاملات المادة المركبة تبعاً لنسب معاملات ليف/مادة رابطة، للمواد المركبة مع 30% تقوية ونسب أبعاد ليف (a) 30 (b) 3 (أخذت نسب بواسون لليف ولمادة الربط (0.3) و (0.2) على التوالي).

الشكل (6-9) مقارنة بين البيانات التجريبية وتنبؤات نموذج جساءة المادة المركبة Al/SiC (حبيبات) منتجة بالبتق، إن الحبيبات ليست منتظمة وتميل لأن تصبح مصطفة خلال التصنيع استخدمت في التنبؤ نسبة الأبعاد . 2

5-1-6- بداية السلوك غير المرن Onset of inelastic behavior

يمكن أن تحدث بعض الظواهر وتسبب الابتعاد عن السلوك المرن المثالي، يتضمن هذا تشوهاً لدناً (غير مرن) لمادة الربط، فك الترابط وما يتبعه من انزلاق احتكاكي على السطح البيني، تشكل تجاويف أو شقوق في مادة الربط (خصوصاً على نهايات الليف) وتحطم (تنشطي) الألياف. تُغير هذه التأثيرات في توزيع الإجهاد وبالتالي تؤثر في منحنى الإجهاد - انفعال. تتعلق هذه الظواهر أيضاً ببداية الفشل وبالتالي بمتانة المادة. ولكن من الملائم هنا أن نتفحص امتداد بسيط لنظرية تأخر القص الأساسية التي صممت لتوقع بداية مغادرة السلوك المرن.

يتوقع أن تحدث بداية تلدن مادة الربط أو حدوث انزلاق سطح بيني على نهايات الليف، حيث إجهاد قص مادة الربط أعظمي. يمكن أن يحدد إجهاد قص السطح البيني الحرج τ_{i*} لهذه العملية. بإبدال τ_{i*} في المعادلة (6-11)، مع $x=L$ ، مما يعطي انفعال المادة المركبة في بداية هذا السلوك غير المرن :

$$\varepsilon_{1*} = \frac{2\tau_{i*} \cdot \coth(ns)}{nE_f} \quad (6-20)$$

باستخدام العلاقة (6-18) يكون الإجهاد المطبق، حسب العلاقة:

$$\sigma_{1*} = \frac{2\tau_{i*}}{nE_f} \left[f E_f + (1-f)E_m \right] \coth(ns) - \frac{f E_f}{ns} \quad (6-22)$$

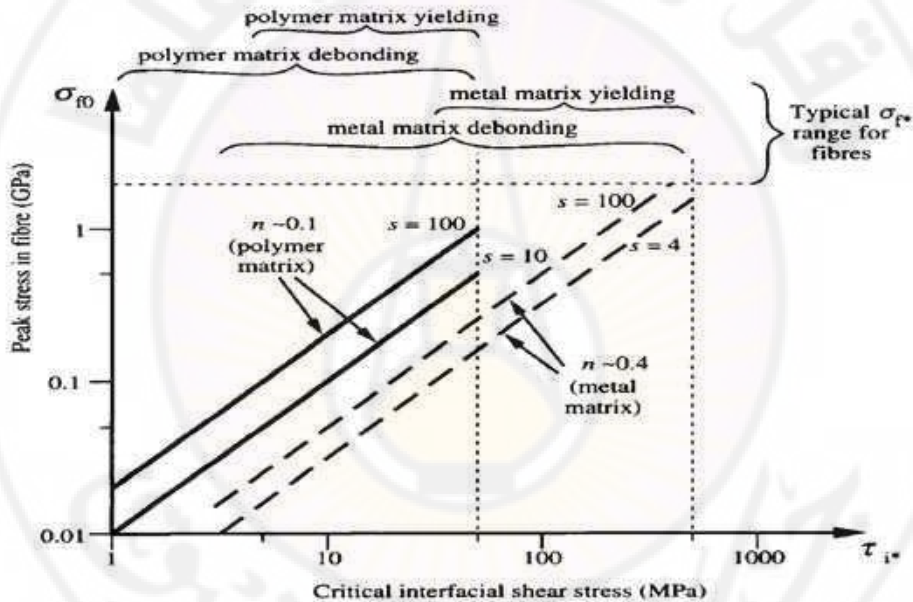
لا تعطي هذه النقطة إجهاد خضوع المادة المركبة بشكل محدد وواضح، حيث يحدث الخضوع (أو انزلاق السطح البيني) في منطقة موضعية صغيرة. سيبدأ عند هذه النقطة منحنى الإجهاد - انفعال بأن يصبح منحنى لا خطي. كإيضاح لاستعمال المعادلة (6-21) في مادة مركبة بوليميرية مقواة بألياف زجاجية، مع $\tau_{i*}=20 \text{ MPa}$ ، إن انفعال المادة المركبة في بداية السلوك غير المرن مساوٍ لحوالي 6% للألياف الطويلة (30~s) وحوالي 0.3% لأجل الألياف القصيرة (5~s).

يمكن أيضاً اختبار إمكانية تحطم (تنشطي) الليف قبل خضوع مادة الربط أو الانزلاق السطحي البيني، يتم إيجاد قمة الإجهاد في الليف في بداية انزلاق السطح البيني أو

الخصوع يوجد من العلاقة (6-10) بوضع $x=0$ وانفعال المادة المركبة بالقيمة المعطاة بالعلاقة (6-21). مما يعطي:

$$\sigma_{f0} = \frac{2\tau_{i*}}{n} [\coth(ns) - \operatorname{cosech}(ns)] \quad (6-23)$$

يبين الشكل (6-10) منحنيات هذه العلاقة الذي يعطي دلالة لمجال القيم المتوقعة لـ τ_{i*} للمواد الحاضنة البوليميرية والمعدنية ولجهاد التحطم σ_{f0} الحادث بالألياف السيراميكية.



الشكل (6-10) منحنيات اعتماد قمة إجهاد الليف σ_{f0} (في بداية انزلاق السطح البيني أو خضوع المادة الرابطة (الحاضنة) على إجهاد القص الحرج لبداية هذه الظاهرة τ_{i*} ، بموجب العلاقة (6-23). تظهر الخطوط البيانية لمعاملات أبعاد مختلفة، مع قيم n خاصة للبوليمير - وللمواد المركبة ذات الأساس المعدني. تشير أيضا إلى مجالات قيم خاصة لتحطم الألياف و خضوع المادة الرابطة (الحاضنة) وفك ترابط السطح البيني.

يجب التمييز بين البوليميرات المتصلبة حراريا والمتلدنة حراريا : حيث المتصلبة حرارياً هشّة وتميل إلى انزلاق السطح البيني و/أو التشقق الميكروي للمادة الرابطة، و ليس الخصوع اللدن).

من الواضح من هذا المنحني انه بزيادة الحمولة المطبقة لأي نوع من انواع المادة المركبة، حدوث خضوع أو انزلاق على السطح البيني قبل أن تبدأ الألياف بالتحطم. بزيادة انفعال المادة المركبة ينتشر خضوع (أو الانزلاق) على امتداد طول الليف، ويزيد من إجهاد الشد في الليف بازدياد إجهاد القص البيني، عندها يمكن أن يصبح تحطم الليف ممكناً ويمكن أن تستعمل معالجة بسيطة لاكتشاف حدود هذا التأثير. إذا افترض أن إجهاد قص السطح البيني يصبح منتظماً عند τ_{i0} على امتداد طول الليف، عندئذ يمكن تحديد نسبة الأبعاد الحرجة s_0 حيث عندما تكون قيم نسبة الأبعاد أخفض لا يخضع الليف لأي تحطم آخر، يمثل ذلك قمة إجهاد الليف فقط عندما يبلغ متانته الأعظمية σ_{i0} ولذلك ، بتكامل العلاقة (3-6) على امتداد نصف طول الليف :

$$s_0 = \frac{\sigma_{i0}}{2\tau_{i0}} \quad (6-24)$$

من ذلك فإن توقع توزع نسبة الأبعاد بين s_0 و $s_0/2$ ، إذا خضعت المادة المركبة لانفعال كبير، يتراوح مجال القيم لـ s_0 فوق 100 للمادة المركبة البوليميرية ذات ترابط السطح البيني الضعيف وإلى حوالي 2-3 للمادة الرابطة المعدنية القوية.

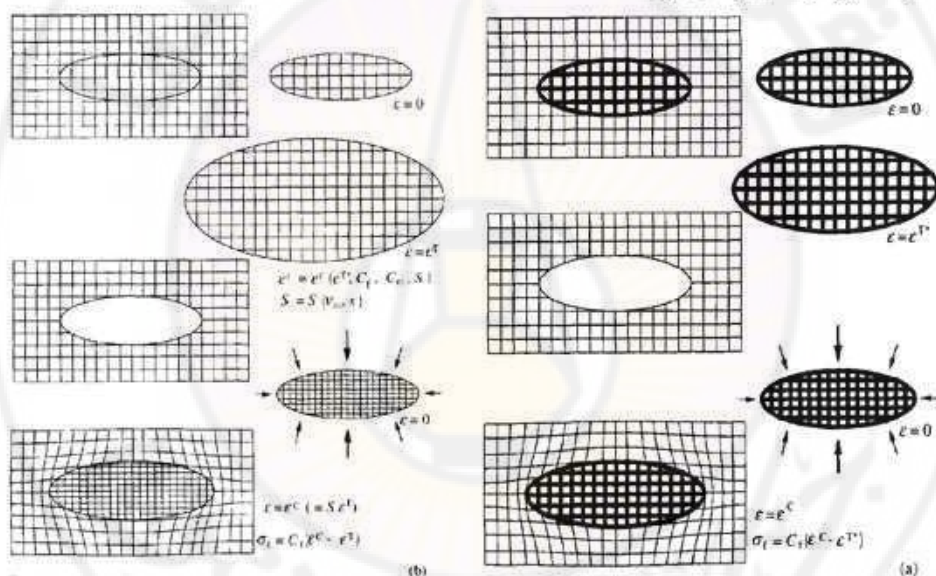
2-6- طريقة ايشلبي (Eshelby) The Eshelby method

تتم الدراسة بحسب طريقة ايشلبي بوضع حالة افتراضية لمادة ربط (حاضنة) غير منتهية تحتوي جسماً جاسئاً حر الإجهاد، ومن ثم يزال الجسم ويخضع لتغيير في الحجم والشكل (انفعال حر الإجهاد)، ثم يتم اخضاع هذا الجسم لقوى سطحية لكي يعود لأبعاده الأصلية واعادته إلى الفتحة التي كان بها، وتزال بعد ذلك القوة، بشكل يسمح للجسم أن يتخذ شكلاً جديداً من خلال تشويه المادة الرابطة (الحاضنة)، هذا ما يحصل فعلاً عندما نرفع حرارة مادة الربط (الحاضنة) المحتوية على شوائب، عندما يكون للثلاثين معاملات تمدد حراري مختلفة (أعدت أمثلة أخرى بواسطة التحول المارتنسيتي للشوائب أو التشوه اللدن المتجانس للمادة الرابطة (الحاضنة))، تتضمن طريقة ايشلبي (Eshelby) حساب الاجهادات الناتجة في الشائبة، إن هذه الاجهادات متجانسة على الشائبة، بافتراض أن شكل الشائبة بيضوي، حيث يقترب العديد من الأشكال من الشكل البيضوي، خصوصاً يمكن أن يمثل الليف القصير بشكل بيضوي متطاوّل ويمتلك نفس معامل

الأبعاد، ويتم اشتقاق تعابير الاجهادات والانفعالات في المواد المركبة ومن ثم ثوابتها المرنة، المعالجة المعطاة مختصرة جدا. إلا أنه يمكن استخدام النموذج دون فهم كامل للاشتقاق .

1-2-6- الشكل البيضوي غير المتطابق A misfitting ellipsoid

لنعتبر التسلسل المبين في الشكل (11-6 (a)) ، تمثل الفراغات الابتدائية لشبكة المادة الرابطة (الحاضنة) و الشائبة (الليف) المادة غير المنفصلة، تدل الخطوط السمكية للشائبة على جساءتها الأكبر .



الشكل (11-6) تخطيط توضيحي للانفعالات خلال عمليات (Eshelby) لإزالة الشائبة من مادة الربط (الحاضنة) وإدخال الانفعال غير المتطابق ϵ^T واستبدالها في الفجوة في المادة الرابطة (الحاضنة). إن العمليات المبينة هي التالية:

(a) الشائبة الفعلية ، و (b) شائبة بنفس ثوابت مرونة كما المادة الرابطة (الحاضنة) التي يجب أن تكون معرضة لانفعال مختلف ϵ^T من أجل إعطاء نفس حالة الانفعال النهائية (تظهر الفراغات في الشبكة انفعال مرن، بينما تمثل الجساءة بسماكة خطوط الشبكة).

بالنسبة لحالة الاختلاف في التمدد الحراري عند التسخين بمقدار ΔT ، يعطى الانفعال غير المتطابق المفروض ϵ^{T*} ، بالعلاقة التالية:

$$\varepsilon^T = \Delta T(\alpha_l - \alpha_m) \quad (6-25)$$

مع ملاحظة أن معامل التمدد الحراري α و الانفعال ε كلاهما قوى تؤثر من الدرجة الثانية، حيث في أكثر الحالات $\alpha_f < \alpha_m$ ، وينتج انخفاض في درجة الحرارة تغير في شكل الشائبة بالنسبة للمادة الرابطة (الحاضنة)، كما هو مبين في الشكل (11-6(a)) تتخذ الشائبة شكلا وحجما جديداً بعد استبدال الشائبة في التجويف وبذلك تشوه المادة الرابطة (الحاضنة) المحيطة كما تفعل عادة. يمثل الحجم والشكل الجديد انفعالا مقيدا ε^C بالنسبة للحالة الأصلية. النقطة الأساسية هنا هي أن الانفعال متجانس في كل أجزاء الشائبة وذلك من أجل الحالة الخاصة بالشكل البيضوي. أيضاً يجب أن يكون هذا صحيحاً للإجهاد ، الذي يمكن أن يكتب :

$$\sigma_f = C_f(\varepsilon^C - \varepsilon^T) \quad (6-26)$$

حيث أن C_f هو تؤثر جساءة الشائبة (الليف) وتمثل العبارة بين قوسين انفعال الشبكة بالنسبة لحالة الإجهاد الحر بعد تطبيق ε^T .

2-2-6- مكافئ الجسم البيضوي المتجانس

The equivalent homogeneous ellipsoid

إن جوهر طريقة ايشلبي (Eshelby) هو أن نتبع نفس العمليات التي أنجزت على جسم بيضوي يمتلك نفس الثوابت المرنة للمادة الرابطة (الحاضنة)، كما هو موضح في الشكل (11-6(b)). المادة المركبة الآن متجانسة من حيث خصائص المرونة، ويمكن أن تتولد نفس حالة الانفعال والإجهاد (في كل من الشائبة والمادة الرابطة (الحاضنة) المحيطة) كما يحدث في المادة المركبة الحقيقية، بشرط أن يكون الانفعال (حر الاجهاد (المفروض مناسب، نطلق على هذا تعبير الانفعال التحويلي ε^T . يوضح الشكل التخطيطي المبين بالشكل (11-6(b)) كيف أن اختيار القيمة المناسبة يقود إلى حالة إجهاد نهائية صحيحة. القيمة المناسبة لـ ε^T تختلف عن الانفعال الفعلي غير المتطابق ε^T .

المساهمة الرئيسية المقدمة من قبل Eshelby كانت إثبات أن الانفعال المقيد ε^C من أجل شائبة مكافئة متجانسة يتعلق بالانفعال المتحول بحسب العلاقة :

$$\varepsilon^C = S\varepsilon^T \quad (6-27)$$

حيث S قوة شد ايشلبي (Eshelby tensor) و هي عمل بسيط لنسبة محاور مجسم القطع الناقص (نسبة أبعاد الليف) و نسبة بواسون (Poissons) للمادة الرابطة (الحاضنة). (يستعمل الرمز S اصطلاحاً لقوى شد ايشلبي. من المهم أن نتجنب الالتباس مع S المستخدم الذي اعتدنا أنه يمثل قابلية المرونة)، يمكن الآن كتابة الإجهاد في الشائبة المتجانسة كما يلي:

$$\sigma_f = C_m(\varepsilon^C - \varepsilon^T) \quad (6-28)$$

وهي مساوية لإجهاد الشائبة الفعلية المعطى بالعلاقة (6-26)، يمكن تعويض قيمة ε^C من العلاقة (6-27) بتقييم ε^T (من أجل قيم ε^T ولثوابت المرونة ولنسب الشكل البيضوي) ويمكن حساب الإجهاد في الشائبة.

3-2-6- الإجهادات المحيطة The background stress

تم تطوير المعالجة السابقة من أجل مادة رابطة (حاضنة) غير منتهية وقابلة للتطبيق على المادة المركبة المميعة (dilute) التي لا تزد فيها f عن بعض النسبة المئوية %. يتعدّد امتداد المادة المركبة غير المميعة بحقيقة أنه تتأثر الشائبة المعطاة بحقل إجهادات المادة الرابطة (حاضنة) الناتجة عن الشوائب المجاورة، وتغير هذه الإجهادات في كل من المادة الرابطة (حاضنة) والشائبة، يمكن أن يعتبر التغيير كإجهادات محيطية يرمز لها بـ σ^b ، متراكبة على حالة الإجهاد للحالة المميعة، استخدمت تعابير أخرى متنوعة لوصف هذا الإجهاد (كمثل الإجهاد التخيلي).

يمكن أن نرى انه، إذا قمنا بتكامل إجهادات المادة الرابطة (الحاضنة) على مجمل الحجم المحيط بالشائبة غير المتطابقة (مع الفجوة)، تكون النتيجة صفر (يمكن توقع هذا من التناظر في الوضع، بشكل خاص عند اعتبار مثال الشائبة الكروية)، على أي حال الإجهاد في الشائبة متجانس وليس صفراً. يمكننا ذلك من تقييم الإجهاد المحيطي في مركبات غير مميعة. يتوقع أن يتصرف الإجهاد المحيطي بتجانس عبر المادة المركبة من أجل حالة شائبة متجانسة مكافئة، لذلك يمكن كتابة قوى التوازن كالتالي:

$$(1 - f)\sigma^b + f(\sigma_f + \sigma^b) = 0 \quad (6-29)$$

التي يمكن منها تقدير σ^* ، بالنسبة لحالة المادة المركبة الحقيقية، من غير الواضح كيف تتأثر الشائبة بالإجهاد المحيطي.

يتم الافتراض أنه تتعرض الشوائب المتجانسة المكافئة والحقيقية لتوزع انفعال متشابه كنتيجة لوجودها في المادة الرابطة (حاضنة) المحتوية على شوائب أخرى، وهذه هي القاعدة للحقل الوسطي التقريبي و قد قدمت نتائج مبرهنة لدعم هذه الفرضية (النظرية)، على الأقل من أجل النسبة الحجمية حتى الحد العملي للمواد المركبة المقواة بألياف قصيرة التي هي بحدود 40 - 50 %. استخدمت عبارة الإجهاد الوسطي $\langle \sigma \rangle$ ، الذي يمثل مقدار الإجهاد المتوسط بحسب الحجم لكل مكون الذي يساهم في توازن القوى :

$$(1 - f)\langle \sigma \rangle_m + f\langle \sigma \rangle_f = 0 \quad (6-30)$$

وسطي الاجهادات هو مؤشر لنقل الحمولة : تحمل الشائبة إجهاد وسطي بإشارة معكوسة (وقيم مختلفة) لتلك في المادة الرابطة (الحاضنة).

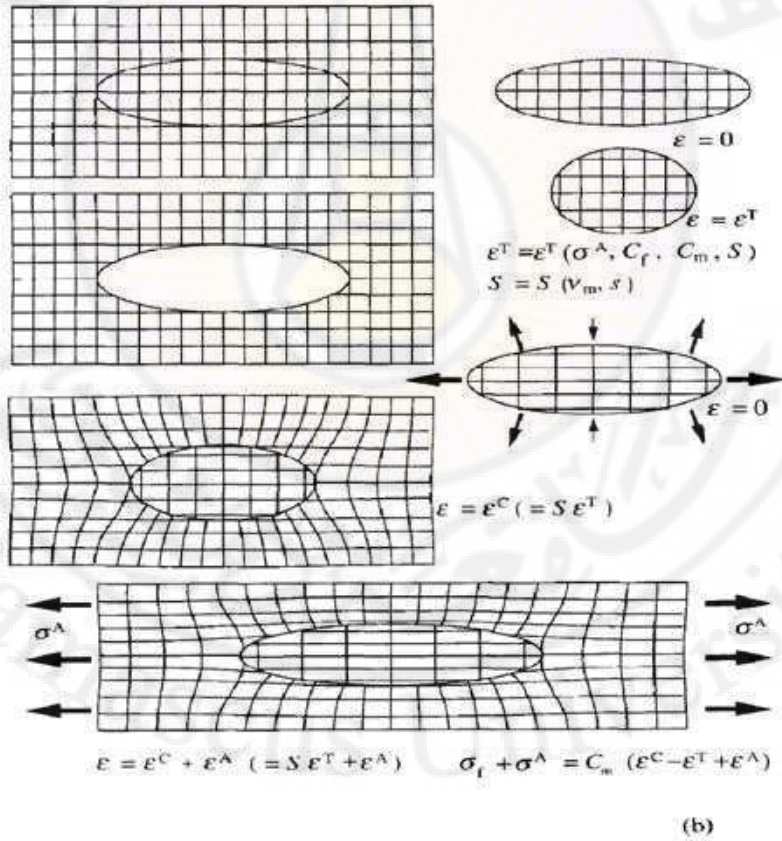
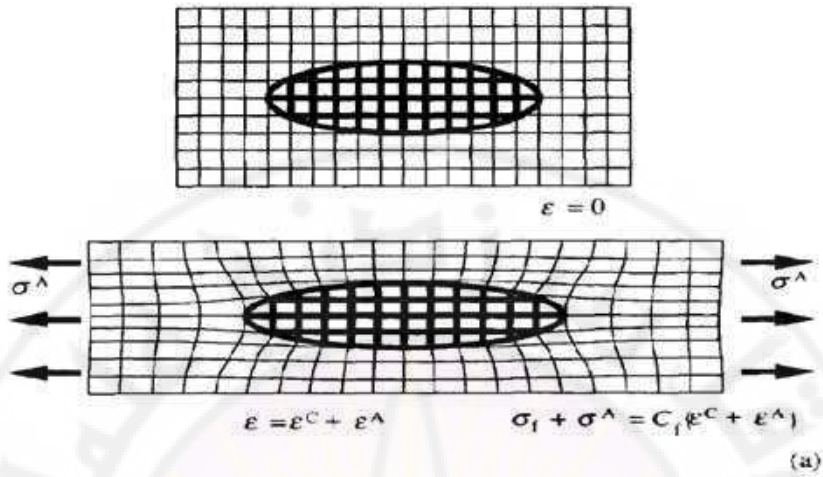
من هنا تسمح بعض المعالجات الحسابية البارة بتقييم الإجهاد الوسطي للمكونين، ومن ثم للمادة المركبة. المعدل الإجمالي لانفعال المادة المركبة لحالة التمدد الحراري التفاضلي (مساو لمجموع الانفعال الوسطي والانفعال من التمدد العادي للمادة الرابطة) عندئذ يحدد تمدد المادة المركبة.

6-2-4- جساءة المادة المركبة Composite stiffness

تتعرض المادة المركبة لإجهاد مطبق σ^A ، وبالتالي يمكن التنبؤ بالجساءة. يبين الشكل (a) و (b) عمليات ايشلبي الملاءمة. ينشأ الآن بشكل فعال عدم التوافق من الاختلاف بين الأشكال التي يمكن أن تتخذها الشائبة (الليف) و الفجوة في المادة الرابطة.

إذا تعرض المكونان وبشكل مستقل للإجهاد المطبق. يعتمد الانفعال التحويلي المناسب ε^T الآن على σ^A لأجل المادة المركبة المكافئة المتجانسة، عوضاً عن المحددة مسبقاً ε^{T*} . أضف الى ذلك يساوي الانفعال الناتج الآن مجموع الانفعال المقيد ε^C والانفعال

الناشئ مباشرة من الإجهاد المطبق ($\varepsilon^A = C^{-1} \sigma^A$)، وبشكل مشابه يتألف الإجهاد



الشكل (6-12) تخطيط توضيحي لعمليات ايشليبي مع إجهاد مطبق σ^A لأجل مركبات (a) فعلية (b) مواد مركبة متجانسة مكافئة.

الكل في الشائبة من σ^A والمساهمة المقدمة لنقل الحمولة بين العناصر والممثلة بـ σ_f) كما في معالجة الانفعال غير المتطابق (.

تستخدم التقنية نفسها في مساواة الاجهادات في الشائبة الفعلية المكافئة المتجانسة :

$$\begin{aligned}\sigma_f + \sigma^A &= C_f(\varepsilon^C + \varepsilon^A) \\ &= C_m(\varepsilon^C - \varepsilon^T + \varepsilon^A)\end{aligned}\quad (6-31)$$

وبتعويض $S\varepsilon^T$ من أجل ε^C يمكن تقييم ε^T كما في السابق .

يبقى توازن القوى للعلاقة (6-30) صحيحاً بالنسبة للمادة المركبة غير المميعة الخاضعة لإجهاد مطبق مع الافتراض أن الإجهاد الوسطي $\langle \sigma \rangle$ في كل مكون هو ليس الممثل لمعدل الحجم الفعلي σ^- ولكن هو قياس للفرق بين هذه و σ^A .

$$\overline{\sigma}_m = \langle \sigma \rangle_m + \sigma^A \quad (6-32)$$

$$\overline{\sigma}_f = \langle \sigma \rangle_f + \sigma^A \quad (6-33)$$

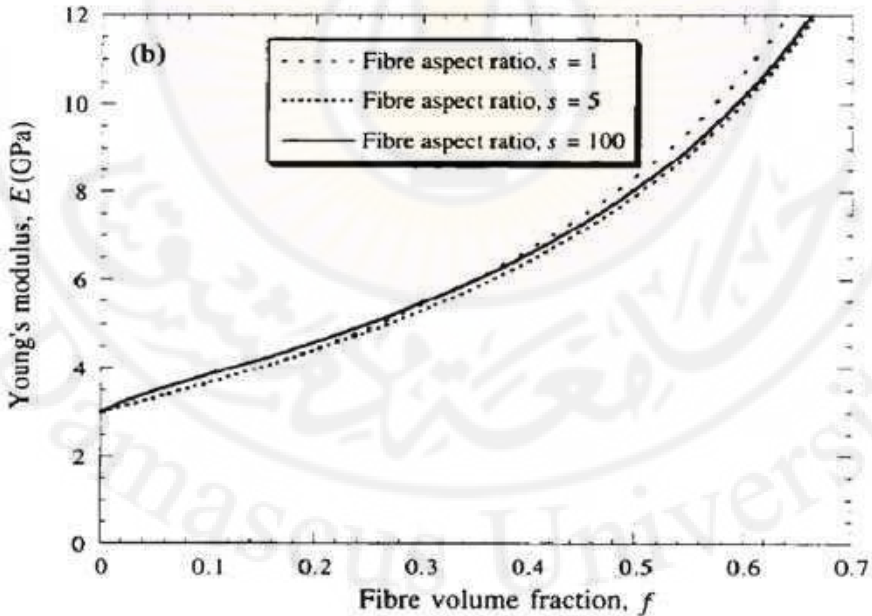
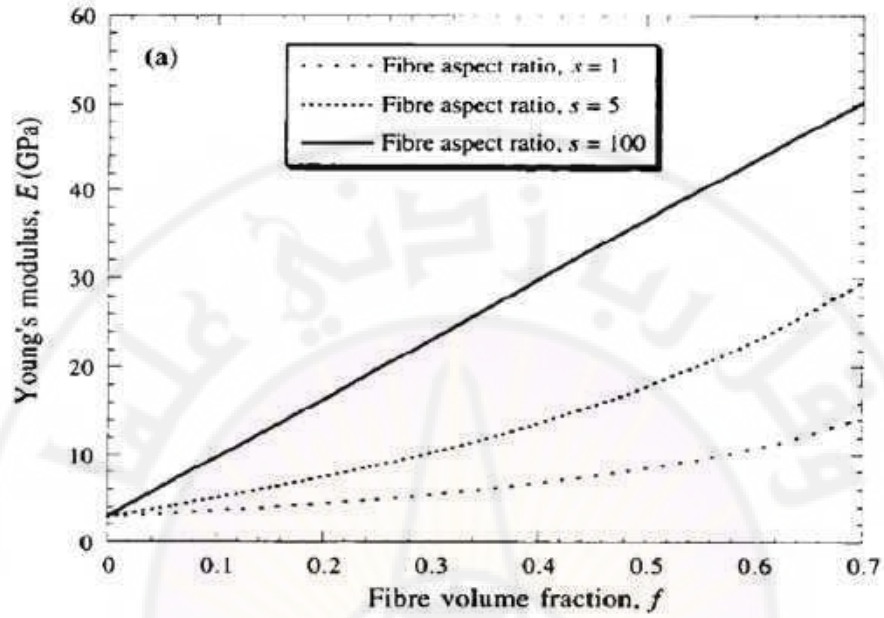
إن للإجهاد الوسطي $\langle \sigma \rangle$ معنى خاص في تحليل إيشلي وهو يرتبط كثيراً بطبيعة مشاركة الحمولة بين المكونين: حجم معدل الإجهاد في الشائبة هو أكبر من تلك المطبقة على المادة المركبة بكاملها بـ $\langle \sigma \rangle_f$ بينما حجم معدل الإجهاد في المادة الرابطة أقل من المعدل الإجمالي بـ $\langle \sigma \rangle_m$ ($\langle \sigma \rangle_m$ سالبة) .

بإجراء العمليات الرياضية ، يمكن اشتقاق تعبير توتر جساءة المادة المركبة :

$$C_c[[C_m^{-1} - f\{(C_f - C_m)[S - f(S - I)] + C_m\}^{-1}(C_f - C_m)C_m^{-1}]]^{-1} \quad (6-34)$$

حيث / هي وحدة التوتر .

يمكن أن تستق الثوابت الهندسية للمادة المركبة من توتر الجساءة، التي تقيم بشكل أفضل ببرامج كومبيوترية. يبين الشكل (6-13) النتائج النموذجية التي تعطي تنبؤات الجساءة العرضية و المحورية للمادة المركبة البوليميرية . يؤكد الشكل (6-13(a)) أنه نحتاج لألياف ذات معدل أبعاد مرتفع نسبياً وذلك بمجال النسبة الحجمية العملية التي تصل حتى 40-50% لكي نحصل على تحسينات جوهرية في الجساءة، تظهر بوضوح تنبؤات الجساءة العرضية في الشكل (6-13(b))، أن نسبة الأبعاد تمتلك تأثيراً قليلاً على الجساءة العرضية، هذه هي الحال لجميع المواد المركبة.



الشكل (13-6) تنبؤات إيشلبي لمعاملات يونغ بدلالة النسبة الحجمية للألياف من أجل الألياف الزجاجية بنسبة أبعاد 1 و5 و100 في مادة رابطة من الإيبوكسي لأجل (a) تحميل محوري و (b) تحميل عرضي.



الفصل السابع

منطقة سطح الارتباط (السطح البيني)

The interface region

- 1- آليات الترابط.
- 2- القياسات التجريبية لمثانة الترابط.
- 3- التحكم بمثانة الترابط.



1-7- مقدمة: Introduction

درست الفصول الثلاثة السابقة السلوك المرن للمواد المركبة عبر افتراضات بأن الترابط السطحي (على السطوح البينية) مثالي لا يحوي عيوب. وهذا يعني أنه لا يوجد انفصال أو ارتباط أو شقوق أو انزلاق ولا عمليات مرنة أو غير مرنة بأي وصف كان. إلا أنه يمكن أن يحدث عملياً العديد من الظواهر الهامة عند السطح البيني. تعتمد هذه الظواهر على بنية السطح البيني والاجهادات المتولدة على هذا السطح.

تميل تلك العمليات لتقوية التشوه اللدن للمادة الحاضنة ويمكن أن تؤثر أيضاً على بداية الانهيار وطبيعته. قبل معالجة سلوك المتانة والتحكم للمواد المركبة (الفصول 9 و 8) من الضروري فحص كيفية استجابة السطح البيني للعوامل المؤثرة عليه ودراسة مميزات هذا السطح. لقد وصف في هذا الفصل معنى وقياس متانة الاتصال "الربط"، كما تمت دراسة تشكل الترابط السطحي لأنظمة متعددة للمواد المركبة، بالإضافة إلى خلاصة عن التقنيات المستخدمة للتأثير على خصائص الترابط.

2-7 آليات الترابط : Bonding mechanisms

يمكن أن يحدث الترابط على السطح البيني بأحد أشكال الترابط التالية أو عبر حدوث أكثر من عملية ترابط وفيما يلي أشكال الترابط:

1- الامتزاز و التبلل : Adsorption and wetting

2- الانتشار الداخلي والتفاعل الكيميائي:

Inter-diffusion and chemical reaction

3- التجاذب بشحنة الكهرباء الساكنة : Electrostatic attraction

4- الترابط الميكانيكي : Mechanical keying

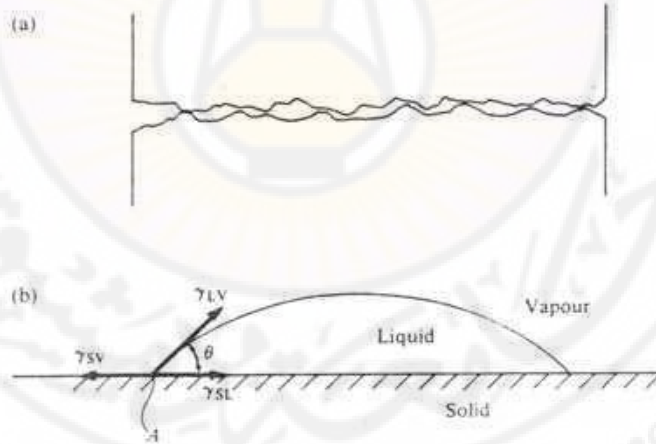
5- الاجهادات المتبقية: Residual stresses

1-2-7- الامتزاز و التبلل : Adsorption and wetting

إذا تماس سطحاً جسمين عندما يقرب الواحد من الآخر بشكل دقيق (على مستوى ذري، وكان أحد الأجسام بشكل سائل) يقال عندئذ أنه قد حدث "تبلل". يحدث الالتصاق بواسطة قوى فاندرفالز مع أنه يمكن أن يقوى هذا الالتصاق بأشكال أخرى للترابط.

يمكن أن يعالج التبلل باستخدام قوانين الترموديناميك البسيط لكن في الواقع العملي يمكن أن تحدث تغيرات كيميائية تعتمد على فترة التلامس بين الجسمين. يوضح الشكل (7-1) السطوح البينية لصلب/صلب و صلب /سائل. إن منطقة التماس (صلب /صلب) محددة في مناطق التماس الخشنة (شكل 7-1-a)، ومتانة الربط الفعالة منخفضة جداً ما لم يعزز التشوه ليزيل الخشونة، كما أنه يعيق ثلوث السطح من التلامس السطحي الفعال. ينشأ تلامس دقيق في حالة سائل / صلب طالما أن السائل ذو لزوجة منخفضة وتوجد قوى محركة ترموديناميكية. وهذا ما يعبر عنه بالقوى السطحية (γ) وهكذا فإن عمل الالتصاق (W_a) هو حاصل إجمالي بسيط ويعطى بالعلاقة التالية والمسماة علاقة (Dupre).

$$W_a = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (7.1)$$



الشكل (7.1) a : تفقد نقاط التماس المنعزلة إلى إضعاف الالتصاق بين سطحين صلبين خشنين. b : زاوية التماس θ والقوى السطحية γ لنقطة سائل على السطح الصلب. يشير الرمز السفلي الدللي S.L.V إلى البخار والسائل والصلب على التوالي. الطور الشائع للبخار هو الهواء، ووفقاً لهذه المعادلة : يحدث التبلل بشكل كبير إذا كانت القوى السطحية للمكونين كبيرة والقوى بين (داخل) السطوح صغيرة.

تمنع القوى الكبيرة القيمة للسطح السائل من انتشار قطرات السائل، نحصل على حالة توازن التبلل من توازن القوى الأفقية الشكل (b-1-7)

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (7-2)$$

يحدث التبلل الكامل عندما تكون $(\theta = 0^\circ)$ إذا كانت قوى السطح للصلب تساوي أو أكبر من مجموع قوى السطح للسائل والقوى بين (داخل) السطوح. إن قوى السطوح البينية صعبة التحديد ويمكن أن تتأثر بتفاعلات كيميائية، لكنها ذات قيم أصغر من قيم القوى للأطوار المعرضة للهواء. إن القوى السطحية للألياف والمادة الحاضنة السائلة معروفة القيمة. يحدث التبلل بسهولة كبيرة بأنظمة المواد المركبة التي تكون فيها قيم القوى السطحية للألياف تفوق كثيراً قيم القوى السطحية للمادة الحاضنة.

مثال: ألياف زجاجية $(\gamma_{SV} = 560 \text{ mJm}^{-2})$

ألياف غرافيتية $(\gamma_{SV} = 70 \text{ mJm}^{-2})$

تتبلل هذه الألياف بسهولة بالبوليستر $(\gamma_{LV} = 35 \text{ mJm}^{-2})$ وراتجات الايبوكسي $(\gamma_{LV} = 43 \text{ mJm}^{-2})$ إلا أنه لا يحدث تبلل ألياف البولي ايثيلين $(\gamma_{LV} = 31 \text{ mJm}^{-2})$ إن عدم التبلل مشكلة في المواد المركبة ذات الأساس المعدني ويستخدم طلاء الألياف لتحقيق التبلل.

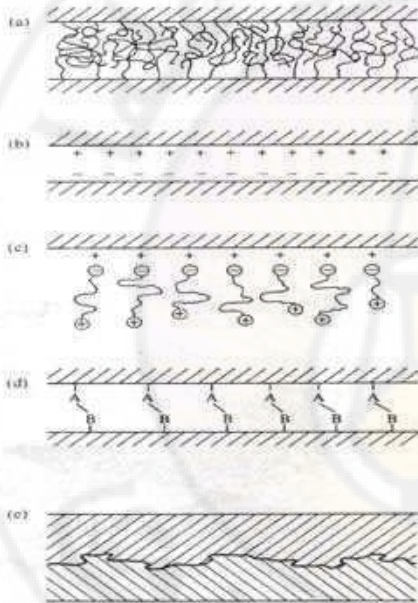
2-2-7- الانتشار الداخلي والتفاعل الكيميائي:

Inter-diffusion and chemical reaction

يمكن أن تحدث أنماط متنوعة من عملية الانتشار التي تقوي الالتصاق على سطوح التلامس.

مثال: الشكل a (7.2) يظهر انتشار نهايات متسلسلة حرة على سطوح التلامس بين مادتين من البوليمر، مما يؤدي إلى تشابكات متسلسلة وزيادة قوة الالتصاق. يستخدم هذا التأثير في بعض عوامل الوصل المستخدمة على الألياف في المواد الحاضنة من اللدائن الحرارية. يحدث أيضاً الانتشار الداخلي في المواد المركبة غير البوليميرية وبشكل خاص إذا كان مترافقاً مع تفاعل كيميائي. تعتمد متانة الالتصاق على طبيعة الترابط الناتج داخل الذرة، وتعتمد أيضاً عن الاجهادات المتولدة عن التفاعل.

تحدث أنماط متنوعة من التفاعل الكيميائي على سطوح التلامس وتبرز هذه التفاعلات إما عن قصد أو عن غير قصد. كما هو مبين في الشكل (d-7.2) الترابط الجديد (B-A) هو الترابط المشكل كنتيجة للتفاعلات الكيميائية لسطوح التلامس. يمكن أن يكون هذا الترابط ترابطاً مشتركاً، ترابطاً شاربياً، ترابطاً معدنياً..... إلخ. إن هذه الروابط في حالات عديدة روابط قوية جداً.



الشكل 7.2 الترابط على سطوح التلامس المشكلة بواسطة:

(a) اشتراك جزيئي متبع بانتشار داخلي.

(b) تجاذب بالشحنة الكهربائية الساكنة.

(c) مجموعة الايونات الموجبة عند نهاية

الجزيئات الجاذبة للأيونات السالبة للسطح،

ناتجة عن توجيه بوليمري عند السطح.

(d) تفاعل كيميائي.

(e) الترابط الميكانيكي.

يوجد العديد من الأمثلة لزيادة متانة الترابط السطحي (البينية) بسبب التفاعلات الكيميائية الموضعية إلا أنه يلاحظ في حالات كثيرة حدوث تفاعل آخذ في التقدم ينتج عنه تشكل ناتج تفاعل هش (قصيف).

ألياف الكربون عرضة لتفاعلات سطحية مع المجموعات العضوية، وتعتمد تفاصيل هذه التفاعلات على طرق التصنيع. تحدث التفاعلات حسب الزاوية التي تتقابل عندها المستويات الأساسية للسطح الحر. حيث تحدث العديد من التفاعلات على حواف تلك المستويات الأساسية. كمثال: الألياف المرتفعة معامل المرونة ذات الأساس من الـ (PAN) لها طبقة سميكة يسود فيها مستويات أساسية موازية للسطح.

يحدث التفاعل بسرعة أقل في ألياف الكربون ذات المستويات الأساسية الناعمة على السطح وتكون الألياف عرضة لفشل الارتباط كنتيجة لضعف الترابط داخل المستوي. تؤدي المعالجات الحرارية المنفذة قبل تصنيع المادة المركبة إلى تقوية متانة الترابط وذلك بسبب أكسدة الألياف وإزالة الطبقات السطحية من على الألياف.

توجد أمثلة عديدة لتقوية متانة الترابط بواسطة التفاعلات الكيميائية الموضعية في أنظمة (MMCs) و (CMCs). تحتوي ألياف الـ δ - (SaffilTM) الألومينا على نسبة قليلة من السيلكا (ثاني أكسيد السيليكون) مركزة في السطح الحر. خلال تعرض هذا الليف للمعادن المنصهرة المحتوية على عوامل مختزلة قوية مثل المغنيزيوم، يهاجم المغنيزيوم السطح إلى العمق الغني بالسيلكا (بضعة نانومترات). يؤدي هذا التفاعل إلى تحسين معتبر لمتانة الترابط مقارنةً مع الحالات التي لا تحتوي فيها المادة الأساس على معدن المغنيزيوم. تزداد متانة الترابط كنتيجة للروابط المشتركة أو الشاردية الممتدة عبر سطح التلامس (السطح البيني). رصد تأثير مشابه خلال المراحل المبكرة للتفاعل في المواد المركبة Ti/SiC. إن التفاعل الحادث في هذه الحالة من النوع المستمر وينتج من التفاعل طبقة سميكة نسبياً من ناتج تفاعل قصف "هش" (مزيج من Ti_3Si_2 و TiC).

3-2-7- التجاذب بشحنة الكهرباء الساكنة : Electrostatic attraction

عندما يحمل السطح شحنات كهربائية ذات إشارات متعاكسة كما هو موضح في الشكل (7.2(b)) ينتج عندئذ قوى دافعة للتصاق. يتم الاستفادة من هذا التأثير في معالجات ليفية معينة. كما في ترسيب مساعدات الترابط على الألياف الزجاجية. يحصل السطح على مزايا الأيونات الموجبة أو الأيونات السالبة وذلك بحسب الأكسيد في الزجاج و pH المحلول المائي المستخدم لتطبيق مساعدات الارتباط.

باستخدام سيلينات (هيدريدات السيليكون) ذات الوظيفة الأيونية الموجبة ستجذب إلى السطح الموجب الشحنة مجموعة الأيونات ذات الشوارد السالبة والعكس بالعكس (شكل (c) 7.2).

لا تشكل قوى التجاذب بشحنة الكهرباء الساكنة ترابط الالتصاق الرئيسي في المواد المركبة و تنخفض بسرعة قوى الترابط هذه، كمثال: تنخفض قوى ترابط شحنات الكهرباء الساكنة بواسطة تفريغ الشحنة عند وجود مذيب قطبي قوي مثل الماء.

7-2-4 -الترابط الميكانيكي: Mechanical keying

تسهم خشونة سطح الألياف في متانة سطح التلامس، إذا حدث تبلل جيد كما هو مبين في الشكل (7.2.e). تأثير الترابط الميكانيكي أكثر أهمية عند فك الالتصاق بنتيجة حمولة القص من فك الالتصاق بنتيجة حمولة شد. ينتج بعض التحسن بمقاومة الانهيار على الشد إذا وجدت زوايا ترابط ميكانيكي معكوسة (منفرجة)، كما توجد زيادة في المتانة تحت تأثير كل أنواع التحميل كنتيجة لزيادة مساحة التماس.

7-2-5 -الاجهادات المتبقية: Residual stresses

تتأثر طبيعة التلامس للسطوح البينية بشكل كبير بوجود الاجهادات المتبقية. تنشأ هذه الاجهادات المتبقية من عدد من المصادر مثل التشوه اللدن للمادة الحاضنة وتغيرات الحجم الناشئة عن التغيرات الطورية. يوجد أيضاً تغيرات الحجم المصاحبة لمعالجة تصلب الراتنجات المصلدة بالتسخين.

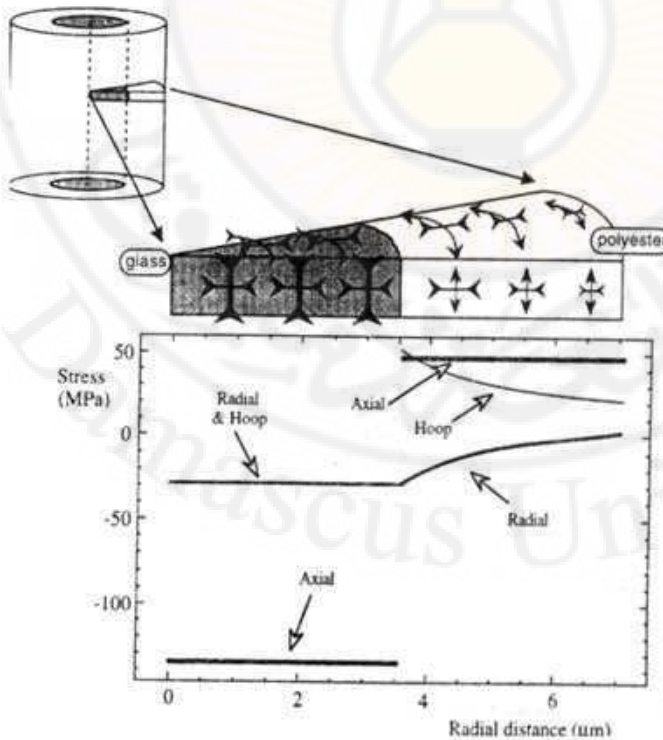
أحد أهم مصادر الاجهادات المتبقية هو التقلص الحراري الذي يحدث خلال التبريد بعد عملية التصنيع. حيث يكون للليف تمدد حراري (معامل تمدد حراري) أصغر من المادة الحاضنة. الاجهادات الناتجة اجهادات ضاغطة على الليف وشادة في المادة الحاضنة. تنشأ هذه الاجهادات بسبب تقلص وضغط المادة الحاضنة على الألياف.

يوضح الشكل (7.3) طبيعة مجال الإجهاد. يظهر الشكل الاجهادات الرئيسية (في المحور و الطوق و الاتجاهات الشعاعية) من أجل ليف زجاجي طويل محاط بأنبوب من راتنج البوليستر بعد التبريد من درجة الحرارة (100°C). (مجال الإجهاد في نظام متعدد الألياف الذي لا يمكن استخدام وإنشاء نموذج تحليلي للتنبؤ به مشابه جداً لهذا النظام ما عدا المنطقة قرب السطح الخارجي).

تحرر في المواد المركبة ذات الأساس البوليميري بعض الاجهادات المتولدة بسبب تباين التقلص بواسطة الانسياب اللزج المرن أو الزحف في المادة الحاضنة.

إن تغيرات درجات الحرارة خلال التبريد في المواد المركبة ذات الأساس المعدني أكبر و المواد الحاضنة المعدنية مقاومة للزحف والانسياب اللدن، لذلك تكون الاجهادات المتبقية أكبر بشكل استثنائي. إن الاجهادات الناعمية عبر السطوح البينية (شعاعية أو نصف قطرية) هي إجهادات ضاغطة، وهذه الإجهادات الضاغطة مناسبة للترابط السطحي. حيث يؤمن الضغط على بقاء الليف والمادة الحاضنة في تماس شديد ويزيد من مقاومة فك الارتباط والانزلاق. تكون متانة القص على السطوح البينية كبيرة عندما تكون الإجهادات المتبقية كبيرة.

تختلف طبيعة الاجهادات بحسب النسبة الحجمية للألياف فإذا كانت النسبة الحجمية للألياف المحتوة في المادة المركبة كبيرة جداً عند ذلك تتجزأ المادة الحاضنة إلى مناطق منعزلة محاطة من كل الجوانب بالألياف. تميل المادة الحاضنة في هذه الحالة إلى القاص بعيداً عن الألياف مما يؤدي إلى إجهاد شد ناظمي على سطح التلامس (السطح البيني).



الشكل (7.3) : حقل الاجهاد المرن المتوقع في مادة مركبة مؤلفة من البوليستر المحتوي على 35% ليف زجاجي طويل %. وفقاً لنموذج أسطواني تحليلي متحد المحور.

3-7- القياسات التجريبية لمتانة الترابط :

Experimental measurement of bond strength

تؤثر طبيعة ترابط سطوح التلامس (السطوح البينية) على خواص المرونة والانهييار للمواد المركبة. تستخدم الاختبارات على الليف المفرد للحصول على معلومات كمية عن متانة الترابط. تتضمن معظم قياسات متانة الترابط فك الارتباط بالقص والانزلاق (تستخدم غالباً متغيرات بسيطة لنظرية القص المتبقي لتفسير البيانات).

إن سطح التلامس ذو المقاومة الكبيرة لإجهاد قص فك الترابط سيكون أيضاً ذو مقاومة كبيرة لإجهاد الشد الناظمي. إن ذلك ليس صحيحاً حيث تزيد خشونة سطوح التلامس من مقاومة إجهاد القص بينما تملك تأثيراً قليلاً على مقاومة الإجهاد الناظمي. يتبين ذلك في بيانات الاختبارات على السطوح البينية للسلوك الميكروي للمواد المركبة.

تستخدم بعض الاختبارات مادة مركبة تحتوي ليفاً اصطناعياً وحيداً. تختلف السطوح البينية في هذه العينات عن تلك في المواد الحقيقية المماثلة وذلك بسبب استخدام تقنيات صناعية مختلفة ووجود درجات مختلفة من القيود بغياب الألياف المجاورة. يتم تفسير بيانات الاختبار بحسب مستويات الإجهاد الحرج، إلا أنه يمكن أن يكون التحليل المعتمد على الطاقة (ميكانيك التصدع)، أكثر فائدة. انظر الفصل (9)

1-3-7- اختبار سحب الليف مفرد: Single-Fiber pull-out test

طبق هذا الاختبار على المواد المركبة ذات الأساس البوليميري. حيث يستخلص ليف مفرد نصف مغمور في المادة الحاضنة تحت تأثير حمولة الشد. يمكن أن تفسر بيانات حمولة الإزاحة باستخدام نظرية القص المتبقي. يعطى المخطط التوضيحي الشكل (4-7) التوزيع المحوري للإجهاد الناظمي في الليف ولجهاد القص عند سطح التلامس. توجد ثلاث مراحل للسحب بدءاً من التحميل المرن وصولاً إلى فك الترابط، مع انتشار جبهة فك الارتباط وسحب الليف لاحقاً بواسطة الانزلاق الاحتكاكي. هناك افتراضات أساسية لنموذج نظرية القص المتبقي هذه الافتراضات هي التالية:

-عدم وجود انفعال قص في الليف.

-عدم نقل الإجهاد الناظمي عبر نهاية الليف.

يفترض بديهياً أن الذروة المزاحة في مخطط الحمولة توافق بدء فك الارتباط الحادث عند الإجهاد المطبق σ_0 (انظر الشكل 7.4). تتطابق هذه الدراسة مع الدراسة المشروحة في الفقرة (8.6.1) لكن بنسبة نصف القطر للمادة الحاضنة إلى نصف القطر لليف (R/r) ، باستخدام النسبة الحجمية للألياف المحتواة في المادة الحاضنة. تكون المعادلة التالية منازرة للمعادلة (6.4) والمعادلة هي:

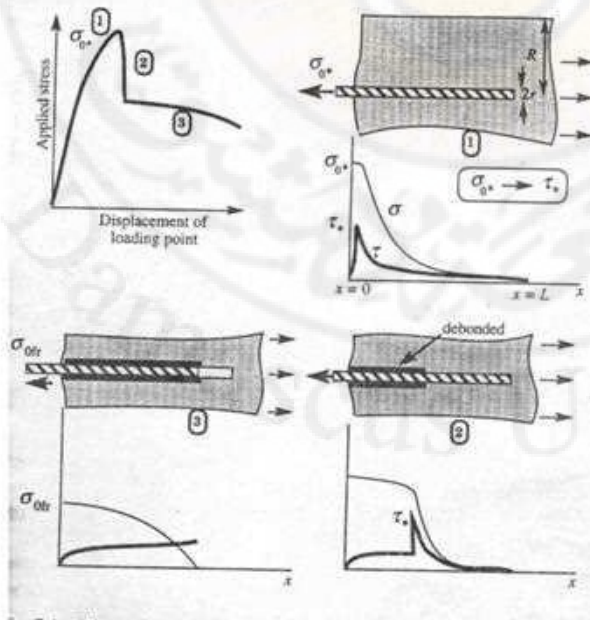
$$\frac{d\sigma_f}{dx} = \frac{E_m (U_R - U_r)}{(1 + \nu_m) v^2 \ln(R/r)} \quad (7.3)$$

شروط الإنزياح بتعويض المعادلة (6.6) والمعادلة (6.5) :

$$\frac{du_f}{dx} = \epsilon_f \quad (7.4)$$

$$\frac{du_g}{dx} = 0 \quad (7.5)$$

تكافئ الشروط السابقة ارتباط السطح البيني بشكل تام (حتى نقطة فك الارتباط) والمادة الحاضنة لا تزيل انفعال سطح التلامس.



الشكل (7.4) مخطط توزيع الإجهاد مع انزياح الحمولة خلال اختبار سحب ليف مفرد. تولد الحمولة المطبقة إجهاد قص عند سطوح التلامس التي تقع ذروتها بالقرب من جبهة السطح الأمامي. عند الحمولة المطبقة الحرجة σ_0 .

تسبب إجهادات القص فك ارتباط السطوح البينية. ينتشر بعد ذلك فك الارتباط على طول السطح البيني وتكون الحركة اللاحقة للسطح البيني انزلاقاً احتكاكياً. إن الجزء الثاني الخطي للمعادلة التفاضلية لتغيرات σ_f على طول الليف هي أبسط قليلاً من المعادلة (6.7).

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = \frac{n^2}{r^2} \sigma_f$$

حيث يعطى الثابت n بالعلاقة:

$$n = \left[\frac{E_m}{E_f (1 + \nu_m) \ln(R/r)} \right]^{1/2} \quad (7.7)$$

بتطبيق الشروط الحدية $\sigma_f(0) = \sigma_0$ (عندما يظهر الليف من المادة الحاضنة) و $\sigma_f(L) = 0$ (لا ينقل الإجهاد عبر نهاية الليف المغمور) ينتج لدينا المعادلة التالية:

$$\sigma_f = \sigma_0 \left\{ \frac{\sinh[n(L-x)/r]}{\sinh(nL/r)} \right\} \quad (7.8)$$

يصبح عندئذ إجهاد القص للسطح البيني، وفقاً للمعادلة الأساسية لنموذج القص المتبقي المعادلة (6.3) كما يلي:

$$\tau = -\frac{r}{2} \frac{d\sigma}{dx} = \frac{n\sigma_0}{2} \cosh\left[\frac{n(L-x)}{r}\right] \operatorname{cosech}\left(\frac{nl}{r}\right)$$

وبتطبيق هذه العلاقة عند $x = 0$ يستنتج إجهاد قص فك الارتباط τ^* من ذروة إجهاد الليف (σ_0^*)

$$\tau^* = \frac{n\sigma_0 \coth(nL/r)}{2} \quad (7.10)$$

نشرت بعض الأبحاث لنماذج متغيرة بعض الشيء عن النموذج الرئيسي ضمن إمكانية نقل الإجهاد عبر نهاية الليف مع تأكيد أن الحمولة المحمولة بالليف الحر متوازنة مع تلك الموجودة في المادة المركبة. يقود هذا النموذج إلى معادلات أكثر تعقيداً لكن التوقعات متشابهة. وبشكل خاص، إن نسبة τ^* إلى σ_0 قريبة جداً لتلك في مناقشة نموذج القص المتبقي. لم يأخذ بالحسبان أي من هذه النماذج حقيقة انخفاض إجهاد

القص إلى الصفر عند السطح الحر في المادة الحاضنة عندما يبرز الليف من هذا السطح.

بينت بعض الدراسات حدوث التراكم للوصول إلى قيمة الذروة على مسافة مساوية لحوالي ربع قطر الليف. وضعت الدراسات أيضاً نماذج لجزء الانزلاق الاحتكاكي من منحنى سحب الليف. لكنها أكثر تعقيداً من حالة حدوث فك الارتباط.

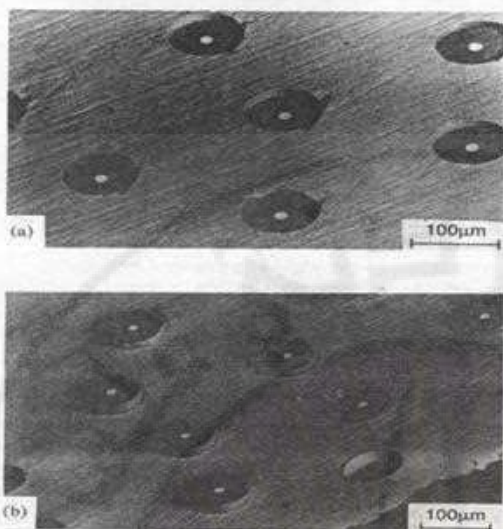
تتوفر الآن بيانات أساسية كثيرة من أجل اختبار السحب للمواد المركبة ذات الأساس البوليميري . حيث قيم إجهاد قص فك الارتباط في المجال (5-100 MPa)، وتوجد صعوبات عملية في تحضير العينة وتثبيت هذه العينة، وبشكل خاص عند تطبيق تلك الإجراءات على المواد المركبة الصلدة نسبياً، لذلك تم استخدام الاختبار الموصوف في الفقرة التالية لأنه أكثر سهولة.

2-3-7- اختبارات الضغط خارجاً والضغط سفلياً لليف مفرد:

Single-fiber push-out and push-down tests

اختبارات الضغط خارجاً والضغط سفلياً لليف مفرد أسهل للتطبيق على أجزاء المادة المركبة الحقيقية من اختبار سحب الليف. يتم هذا الاختبار بتطبيق حمولة ضاغطة محورية على قمة سطح الليف المغمور حتى يحدث فك الارتباط. العينة المستخدمة في اختبار الضغط خارجاً هي بشكل شريحة رقيقة يكون فيها محور الليف عامودي على مستوي الشريحة. يزاح الليف ويبرز من أسفل العينة. تظهر الصورة المجهرية المأخوذة بمجهر المسح الإلكتروني (SEM) الشكل (5-7) الشعيرة الأحادية من SiC التي دفعت خارجاً بهذه الطريقة. يطبق هذا الاختبار بسهولة للألياف ذات الأقطار الكبيرة، لكن توجد صعوبة من أجل الألياف الصغيرة القطر (المترابطة بشكل قوي) من حيث تحضير ومسك عينات رقيقة المقطع.

يتبع فك الارتباط في اختبار الضغط السفلي للعينة انزلاق احتكاكي لليف باتجاه الأسفل لمسافة معينة تاركاً إزاحة دائمة بين قمة الليف والسطح العلوي للمادة الحاضنة عند إزالة الحمولة المطبقة.



الشكل (7.5): صورة بمجهر

المسح الالكتروني لحافة عينة من

المادة المركبة

(Ti-6Al-4V/30%SiC)

الألياف من الشعيرات الأحادية بعد

الضغط للخارج على ليف مفرد يبين

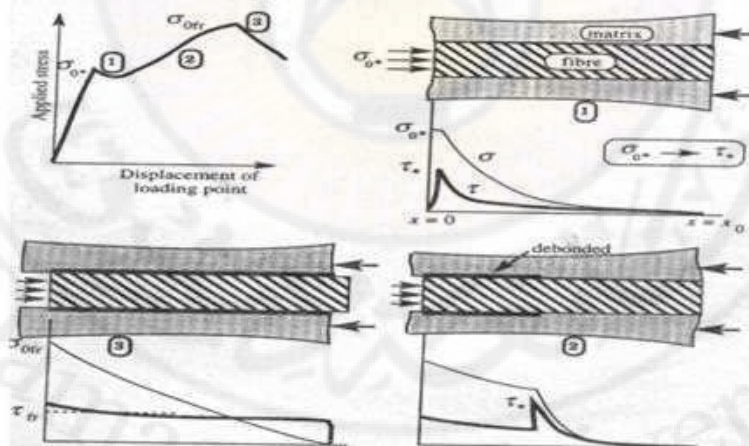
الشكل:

(a) السطح العلوي.

(b) الجانب السفلي للنهاية الرقيقة

للحافة.

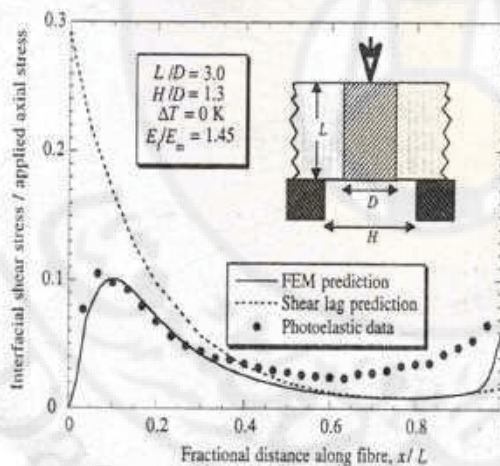
يوضح الشكل (7.6) رسماً تخطيطياً لتوزيع الإجهاد ومنحني الحمل المزاخة لاختبار الضغط الخارجي. يلاحظ أنه يزيد تأثير بواسون من إجهاد الانزلاق الاحتكاكي بدلاً من تخفيفه.



الشكل (7.6) مخطط الحمل المزاخة وتوزيع الجهد خلال اختبار الضغط الخارجي لليف المفرد. تأثير بواسون الذي يجعل الليف يتمدد (عوضاً عن التقلص) هو الاختلاف الوحيد عن اختبار الضغط الخارجي (انظر شكل 7.4) ، الذي يزيد الإجهادات القطرية الضاغطة عبر سطوح التماس بسبب التقلصات الحرارية المتفاوتة.

أسس التحليل على طريقة القص المتبقي البسيط حيث تم وضع نماذج من أجل كلاً من سلوك الانزلاق الاحتكاكي وفك الارتباط.

طبقت حديثاً تقنيات العناصر المنتهية (FEM) بهدف تفحص حقل الإجهاد بشكل مفصل أكثر، حيث يتبين أن نماذج القص المتبقي تقدر وبشكل زائد ذروة إجهاد القص على سطح التلامس من أجل حمولة الشد المطبقة. يوضح ذلك بالبيانات من الشكل (7-7)، التي تقارن (FEM) وتوقعات القص المتبقي لتوزيع إجهاد القص مع بيانات تجريبية لنظام ضغط خارجي ماكروي من أجل مادتين من الراتنج ذات خصائص مرونة متأثرة بالضوء. يتضح من المخطط أن ذروة منحنى القص المتبقي عالية جداً وحوالي الثلاثة أضعاف. لقد استنتج من طريقة (FEM) أن توزيع إجهاد القص على سطوح التلامس أكثر انتظاماً من نماذج القص المتبقي المتوقع، لذلك يمكن أن نعتبره في العديد من الحالات ثابت القيمة.



الشكل 7.7: مقارنة بين البيانات التجريبية (مرونة ذات خصائص ضوئية) وتوقعات من نموذج القص المتبقي ونموذج FEM من أجل توزيع إجهاد قص سطح التلامس على طول الليف بداية من القمة من خلال الضغط الخارجي للليف محتوي ضمن مادة حاضنة من أنواع مختلفة من الراتنج.

نحصل من توازن القوى على قيمة τ_* من الإجهاد المطبق على الليف σ_0^*

$$\sigma_0^* \pi r^2 = \tau_* L 2\pi r$$

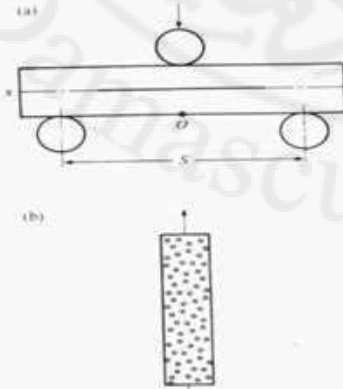
$$\tau_* = \frac{\sigma_0^*}{4s} \quad (7.11)$$

حيث s معامل أبعاد الليف (aspect ratio) ويساوي طول الليف (L) مقسوماً على قطره d . سلطت حسابات FEM الضوء على أهمية الاجهادات الحرارية المتبقية التي

ستؤثر بقوة على توزيع الإجهاد في العديد من نظم PMC و MMC. من المحتمل أن يكون هذا التأثير بالإضافة إلى الأخطاء الناتجة عن استخدام نماذج تحليلية بسيطة، مسؤولاً عن قلة التوافق بين البيانات الناتجة عن اختبارات مختلفة. طورت حديثاً أسس متنوعة لاختبارات الضغط الخارجي تتضمن تطبيق شد خارجي في مستوي العينة، تسمح هذه الطريقة باستكشاف تأثير إجهاد الشد الناظمي على سطوح التلامس.

3-3-7- اختبارات أخرى: Other tests

تدعى الطريقة التي استخدمت من أجل MMCs وبعض PMCs بتقنية "التجزئة الكاملة"، تستخدم هذه الطريقة من أجل استنتاج متانة القص اللازمة لغمر ليف مفرد في المادة الحاضنة والانفعالات للمادة الحاضنة في حالة الشد الموازي لمحور الليف. يتحطم الليف وينجزاً إلى عدد من القطع، ويقاس معدل الأبعاد (aspect ratio) لأجزاء الليف الناتجة. يعتمد التحليل على ثابت τ مع معامل (weibull modulus) لليف معتبر. طبقت تقنيات مشابهة على الطلاء الخزفي على عنصر معدني مستوي. تتم في بعض الأحيان الاختبارات على صفيحة كاملة، عوضاً عن التركيز على ألياف مخصصة. يظهر الشكل (7-8) الاختبارات المصممة لقياس متانة القص الداخلية للصفائح ومتانة الشد العرضي. يمكن أن تكون هذه القياسات مفيدة (كمثال يحتاج إلى هذه الاختبارات من أجل توقع فشل الصفائح)، لكن من الصعب ربط البيانات الناتجة عن هذا الاختبار مع الخواص الفعلية لسطح التلامس بين الليف والمادة الحاضنة.



الشكل (7-8) الاختبارات على الصفائح المقواة من أجل قياس:
(a) متانة القص داخل الصفيحة.
(b) متانة الشد العرضية.

4-7- التحكم بمتانة الترابط: Control of bond strength

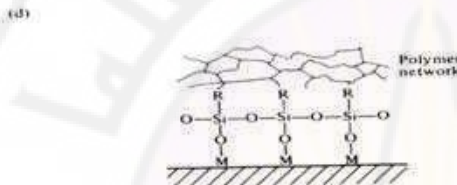
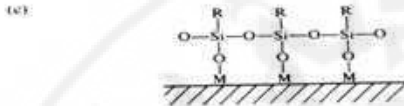
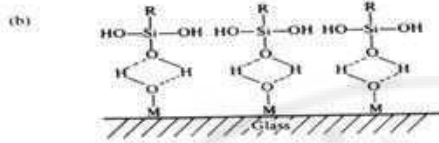
يمكن أن يؤثر على متانة ترابط سطح التلامس بطرق متعددة. وفيما يلي شرح للأنواع الرئيسية للتأثير على متانة سطح الترابط.

1-4-7- عوامل الربط والتأثيرات البيئية:

Coupling agents and environmental effects

طُور العديد من الطلاءات من أجل تحسين المتانة الميكانيكية للترابط بين الليف والمادة الحاضنة ويطلق عادةً على هذه الطلاءات عوامل الربط.

المثال الجيد عن عوامل الربط تلك المستعملة على الألياف الزجاجية، حيث تعاني الألياف الزجاجية من مشاكل امتصاص الماء، حيث تشكل بعض الأكاسيد الموجودة في ألياف الزجاج- هذه الأكاسيد مثل SiO_2 ، Fe_2O_3 ، Al_2O_3 - أثناء تلامس ألياف الزجاج مع الماء روابط مع هيدروجين جزيئات الماء، تمتص الألياف الزجاجية نتيجة ذلك الماء بشكل سريع. يؤدي التعرض لمدة طويلة للماء إلى تنقية ألياف الزجاج من بعض العناصر، وبشكل خاص Na و Ca، لينتج سطح مسامي ضعيف. كما أنه يقلل وجود الماء من قابلية تبلل الألياف، تنخفض قيمة γ من $500-600 \text{ mJm}^{-2}$ إلى mJm^{-2} 10-20. وتنخفض متانة قص سطح التلامس للمواد المركبة ذات الأساس البوليميري المعرضة لامتصاص الماء، بالرغم من ملاحظة زيادة في متانة القص لسطح التلامس لبعض المواد المركبة ذات الأساس من اللدائن الحرارية.



الشكل (7-9) عوامل الربط

السيلكونية:

a) تمي السيلكون العضوي إلى

سيلكون موافق.

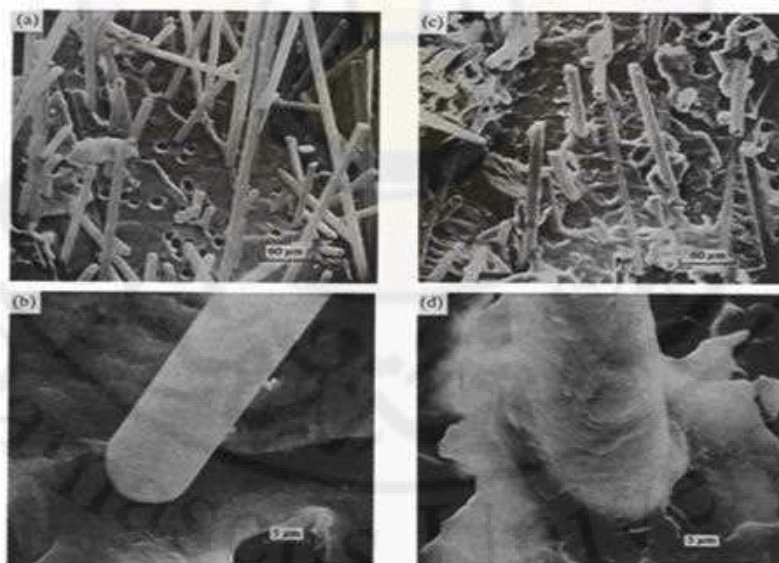
b) ترابط هيدروجين

تصمم الطلاءات التي تعمل كمعامل ربط لإزالة تأثير تآقية السابق ذكرها. تزيد عوامل الربط هذه من قيمة γ الفعالة إلى حوالي $40-50 \text{ mJm}^{-2}$. تكمن الوظيفة الأساسية لعوامل الربط بتأمين رابطة كيميائية قوية بين مجموعات الأكسيد على سطح الليف وجزيئات البوليمر للراتنج. وقد طورت أنواع تجارية مختلفة من عوامل الربط. يوضح الشكل (7-9) المبادئ البسيطة لترابط هذه العوامل. يبين الشكل عوامل ربط هيدريدات السيليكون، التي لها الصيغة الكيميائية العامة $R-Si-X_3$ إن هذا الجزيء متعدد الوظيفة حيث يتفاعل من جهة مع سطح الليف الزجاجي ويتفاعل في الجهة الأخرى مع طور البوليمر. تشكل الوحدات X مجموعات hydrolysable مثل مجموعة أيثوكسي $(-OC_2H_5)$. يمتد السيلكون إلى هيدريدات السيليكون في المحلول المائي المعرضة له الألياف (الشكل 7-9 a)). تشترك جزيئات السيليكون هذه مع جزيئات الماء لتكوين

روابط هيدروجين مع ربط المجموعات المائية (الهيدروكسيل) إلى سطح الليف الشكل (7-9 b)). عندما تجفف الألياف يخرج منها الماء الحر ويحدث بعد ذلك فعل تكاثف الماء، وذلك على كلا سطح اتصال السيلكون / ليف وبين جزيئات السيليكون المجاورة الشكل (7-9 c)). وتتكون بالنتيجة طبقة متعددة السيلكونات مترابطة إلى سطح الليف لزجاجي، مقدمة صفوف مجموعات R ضد البيئة المؤثرة.

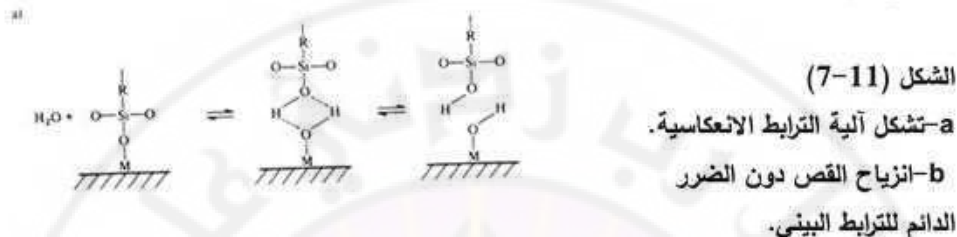
إن هذا الطلاء مقاوم للماء ويمكنه أن يشكل رابطة قوية للمادة الحاضنة البوليمرية. إذا كانت المادة الحاضنة من لدائن الراتنج حرارية التصلب، يتم عندئذ اختيار مجموعة R بحيث تتفاعل مع الراتنج أثناء عملية البلمرة، وتشكل بذلك رابطة دائمة. يتم تشكيل كافة الروابط المشتركة أثناء تصنيع البوليمير في المواد المركبة ذات المادة الحاضنة اللدنة بالحرارة. مع العلم أن اختيار R كسلاسل قصيرة يسمح بانتشارها داخلياً مع سلاسل المادة الحاضنة مما يؤدي إلى تشكيل ترابط قوي.

يبين الشكل (7-10) سطوح التحطم للمادة المركبة البلاستيكية المقواة بألياف زجاجية، حيث تتضح فعالية عوامل الربط، وأثر هذه العوامل على سلوك المادة المركبة، وذلك لمواد مركبة مصنعة بطريقة القولية بالحقن لمادة البولي بروبيلين المحتوية على ألياف زجاجية قصيرة بوجود أو دون وجود عوامل ربط. من الواضح أنه تعزز عوامل الربط من الارتباط القوي وتؤدي إلى التصاق طبقة من البلاستيك إلى الألياف وتسبب تشوه لدن معتبر للمادة الحاضنة.



الشكل (7-10) صور بمجهر المسح الإلكتروني (SEM) لأسطح تحطم البولي بروبيلين المقولب بالحقن والمحتوي على ألياف زجاجية قصيرة. يوجد عامل ربط على الألياف في العينات (c) و (d)، أما العينات (a) و (b) فهي دون عوامل ربط. يتضح أن متانة الترابط الأكبر هي للعينات مع عوامل الربط وهذا واضح من البوليمر الملتصق على الألياف.

توجد وظيفة أخرى لعوامل الربط تكمن هذه الوظيفة بإمكانية تشكيل رابطة انعكاسية. لقد اقترح أنه ستؤدي التحركات على سطح التلامس إلى تحرير الإجهادات الموضعية، وهذا موضح في الشكل (7-11) .



يجعل وجود كميات قليلة من الماء على السطوح بأن تصبح السطوح قابلة للانزلاق فوق بعضها دون حدوث الفشل الدائم للترابط.

لا توجد ضرورة فعلية لتعزيز الارتباط في المواد المركبة ذات الأساس المعدني MMCS، وذلك بسبب حدوث بعض التفاعلات الكيميائية التي تحصل عادة أثناء عملية التصنيع. إلا أنه توجد أنظمة مواد مركبة ذات أساس معدني ضعيفة التبلل وتستخدم الطلاءات لتحسين التبلل.

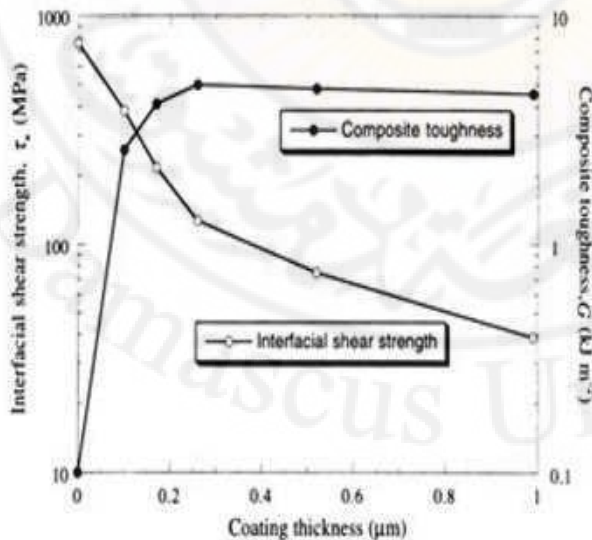
بالنسبة للمواد المركبة ذات الأساس السيراميكي CMCS، بالرغم من أنه تم تطوير مواد طلاء مختلفة لهذه المواد، إلا أنها نادراً ما تصمم من أجل تحسين عملية التبلل أو الالتصاق. تضاف عادة الألياف إلى المواد الحاضنة السيراميكية بهدف تحسين الجساءة وتخفيض إجهاد فك الترابط، تستخدم هذه الطلاءات عادة لتعزيز الانزلاق الاحتكاكي أثناء عملية سحب الليف من المادة الحاضنة.

7-4-2 طلاءات تخفيض الجساءة Toughness-reducing coatings:

يفضل في بعض الأحيان أن يكون سطح التلامس ليف/مادة حاضنة ذا جساءة قليلة، وبذلك يتم فك ارتباط سطح التلامس بسهولة. تستخدم هذه الحالة عادة من أجل زيادة جساءة المادة المركبة، وذلك بواسطة تعزيز انحراف الشقوق عند سطوح التلامس، مما

يؤدي إلى سحب الألياف بواسطة الاحتكاك الإنزلاقي، الذي يمتص بدوره كمية وافرة من الطاقة. الشكل (12-7) مثال على ما سبق، لاحظ في الشكل بيانات تأثير طلاءات الكربون المترسبة على ألياف Nicalon™ SiC قبل تضمين هذه الألياف ضمن المادة الحاضنة وتزايد سماكة طبقة الطلاء. تنخفض متانة قص سطح التلامس بشكل متتالي، لكن تزداد الجساءة الماكروية. الغرافيت شائع الاستخدام لهذا الغرض في أنظمة المواد المركبة السيراميكية، استخدمت كذلك طبقات سطح تلامس أكثر سماكة في صفائح SiC المستوية.

تعتبر عملية تعزيز فك الارتباط لسطح التلامس ذات أهمية كبيرة لأنظمة المواد المركبة السيراميكية، كما أنه يمكن أن يكون مرغوب في المواد المركبة البوليميرية، وبشكل خاص ذات المادة الحاضنة من اللدائن الحرارية. لسوء الحظ، تؤدي سطوح التلامس التي يفك ارتباطها بسهولة إلى خصائص ضعيفة للمتانة العرضية ولمتانة القص، بالإضافة إلى مقاومة ضعيفة لعوامل البيئة، كنفوذ الماء. إن أثر عملية سحب الألياف على الجساءة الكلية في المواد المركبة ذات الأساس المعدني MMCs قليل، وبالتالي لا يوجد حافز لتشجيع فك ارتباط سطوح التلامس بسهولة.



الشكل (12-7) تأثير طلاء ألياف Nicalon™ بالكربون على الخواص الميكانيكية للمادة الأساس من SiC. يعطي المنحنى قيم متانة سطح الارتباط (اختبار الدفع للأسفل) وجساءة المادة (من المساحة تحت منحنى الإجهاد الانفعال خلال التحميل باتجاه محور الليف) وتأثير سماكة الطلاء.

3-4-7- التفاعل الكيميائي على سطوح التلامس وطلاءات إعاقة الانتشار :

Interfacial chemical reaction and diffusion barrier coating

يمكن أن يكون التفاعل الكيميائي على سطوح التلامس واسعاً في بعض المواد المركبة، وبشكل خاص في المواد المركبة ذات الأساس المعدني. يمكن أن يحدث هذا التفاعل خلال عملية تصنيع المادة المركبة وخلال ظروف خدمتها (استثمارها). يفضل حدوث التفاعل الكيميائي في العديد من التركيبات ليف/مادة حاضنة وذلك من الناحية الترموديناميكية. بينما لا يرغب غالباً بالتفاعل الواسع، لأن التفاعل الواسع يسعى إلى تعزيز تشقق سطح التلامس، ويكون ناتج التفاعل من السيراميك القصف (الهش) أو يتشكل مركب جديد غير معدني.

تعتمد التقنيات المستخدمة لتجنب التفاعل الزائد إما على بقاء الطاقة الحركية للتفاعل أو إدخال طبقة من مواد واقية من التفاعل (عائق انتشار).

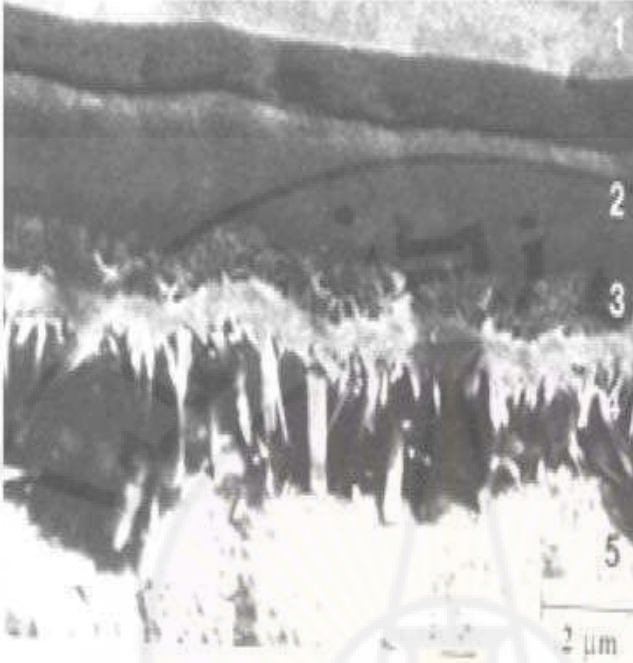
إن التفاعلات الكيميائية على سطح التلامس مهمة بشكل خاص في المواد المركبة ذات الأساس من التيتانيوم. يتفاعل معدن التيتانيوم وخالطه مع مواد التقوية. تستخدم المواد المركبة ذات الأساس من التيتانيوم في درجات الحرارة العالية من 550°C إلى 700°C . إلا أنه ينحل غشاء أكسيد السطح (الذي يحمي هذا المعدن الفعال) في المادة الحاضنة وذلك في درجات حرارة أعلى من 600°C . كما أنه يتفاعل التيتانيوم مع كافة مواد التقوية خلال التصنيع، حيث يتطلب تصنيع المواد المركبة أساساً من خلائط التيتانيوم درجات حرارة لا تقل عن 850°C . لذلك يحدث تفاعل فعال جداً بشكل خاص عند التصنيع مع الألياف أحادية الشعيرات SiC، التي تعتبر من أكثر مواد التقوية استخداماً كالألياف طويلة مع التيتانيوم.

تظهر بضعة مشاكل للتفاعل على سطح التلامس عند استخدام الألمنيوم. حيث يؤدي التعرض الطويل الأمد لألياف SiC ومصهور الألمنيوم إلى حدوث تفاعل كيميائي، ولكن هذه ليست مشكلة كبيرة حتى من أجل طرق السكب. تحدث مشاكل التفاعل مع خلائط المغنيزيوم، بالرغم من أن المغنيزيوم لا يشكل كبريت مستقر فإنه مستقر ترموديناميكاً وذلك أثناء تلامسه مع SiC، يميل المغنيزيوم للتفاعل مع معظم الأكاسيد.

صممت طلاءات لحماية الألياف من التفاعل الكيميائي على سطح التلامس، وتمت دراستها بشكل كثيف من أجل المواد المركبة ذات الأساس المعدني MMCs وبشكل خاص من أجل معدن التيتانيوم، وكذلك من أجل المواد المركبة ذات الأساس السيراميكي CMCs .

يجب أن تتوفر لهذه الطلاءات الشروط التالية :

- 1- يجب أن تكون هذه الطلاءات مستقرة ترموديناميكاً.
 - 2- يجب أن تكون هذه الطلاءات ذات نفاذية قليلة لهجرة ناتج التفاعل وذات مقاومة عالية للضرر الميكانيكي.
- يحد الشرط الأول من اختيار المواد، أما الشرط الثاني يحدد بشكل فعال السماكة الأصغرية الفعالة لطبقة الطلاء.
- تستخدم تقنيات ترسيب الأبخرة فيزيائياً (PVD)، ترسيب الأبخرة كيميائياً (CVD)، والترسيب بالرش وذلك للحصول على طلاءات ذات بنية حبيبية ناعمة متطاولة قطرياً، تؤمن فيها حدود الحبيبات طرق جيدة للانتشار عبر سماكتها.
- تم تطوير معظم الطلاءات من أجل استخدامها للمواد المركبة ذات الأساس من التيتانيوم وهي غير ثابتة ترموديناميكياً عند تماسها مع التيتانيوم، ولكنها تتفاعل بشكل بطيء نسبياً مما يؤمن حماية الألياف لمدة أطول. استخدمت للحماية الطبقات المضاعفة على الألياف مثل هذه الطبقات هي C/TiB_2 . يبين الشكل (13-7) صورة مجهرية لمنطقة سطح التلامس للمادة المركبة Ti/SiC مع الطلاء C/TiB_2 المستخدم على الألياف بعد التحميل الميكانيكي بدرجات حرارة مرتفعة. يحدث في هذه الحالة بعض التفاعل أثناء عملية التصنيع ليتشكل TiB ، ويحصل فك الارتباط بين هذه الطبقة و المادة الحاضنة من التيتانيوم.



الشكل (7-13) صورة بمجهر المسح الإلكتروني (SEM) للمادة المركبة من التيتانيوم المحتوية على 30% من شعيرات أحادية من SiC بعد التحميل العرضي وتعرضها لدورات حرارية. 1-ألياف SiC . 2-الطلاء الداخلي من الكربون. 3-الطلاء الخارجي من TiB_2 . 4-طبقة التفاعل من TiB . 5-الخليطة الحاضنة Ti-6Al-4V

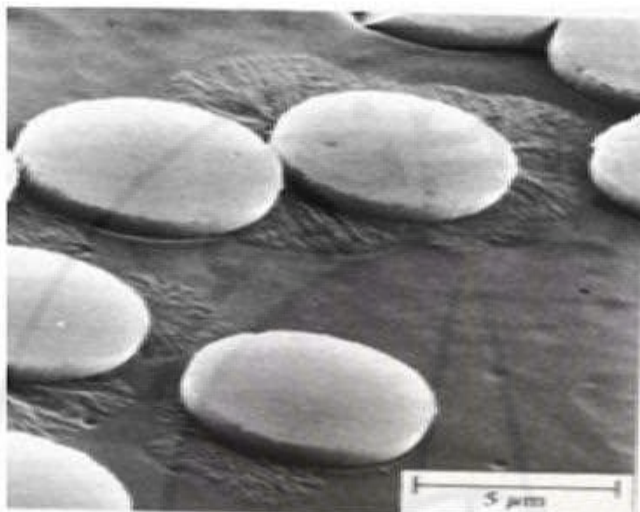
4-4-7- المنطقة داخل الطور البيني: The inter-phase region

يمكن أن يعمم مفهوم التفاعل البيني ليشمل تعديلات متنوعة على البنية الميكروية للمادة الحاضنة بالمنطقة المجاورة للألياف.

الشكل (7-14) عبارة عن صورة مجهرية تبين أنه تتميز المادة الحاضنة المحيطة بألياف الكربون / PEEK بحدوث التبلور. تسمى أجزاء المادة الحاضنة التي تأثرت بوجود الألياف بالمنطقة داخل الطور البيني، بما أنه تحدث غالباً تعديلات على البنية الميكروية، لذلك يؤدي وجود منطقة داخل الطور البيني إلى تغيرات في السلوك الميكانيكي وبالتالي إلى حدوث أثر قوي على خواص المادة المركبة.

يسعى تنوي البلورات الكربونية على سطح الليف إلى الازدياد في التبلور مما يؤدي إلى تقليل جساءة التحطم ويزيد من متانة الشد للمادة الحاضنة، بالإضافة إلى أنه سيولد التقلص الحجمي المرافق للتبلور إجهادات متبقية التي تؤثر بدورها على سلوك المادة المركبة، كذلك يمكن أن تنشأ تأثيرات قوية في لدائن التصلب الحرارية. يمكن أن تؤثر

طبيعة سطوح الألياف على نشاط معالجة التصلب (curing) وعلى كثافة الاتصال المستعرض للمادة الحاضنة .



الشكل (7-14) صورة بمجهر المسح الإلكتروني (SEM) للمادة المركبة المحضرة بالتخريش من fiber/PEEK . يتبين تبلور جزئي للمادة الحاضنة حول الألياف .

يمكن أن يعدل طلاء السطوح في سلوك تبلور المادة المركبة، كما يمكن أن تكون نسبة المادة الحاضنة الموجودة بالقرب من سطح الليف المتأثرة بهذا الطلاء كبيرة وبشكل خاص في المواد المركبة التي تحتوي على نسبة كبيرة من الألياف.



الفصل الثامن

متانة المواد المركبة

Strength of composites

- 1- أنماط فشل المواد المركبة ذات الألياف الطويلة.
- 2- انهيار الصفائح نتيجة تأثير الحملات اللامحورية.
- 3- متانة الصفائح.
- 4- انهيار الأنابيب بتأثير الضغط الداخلي.



1-8- مقدمة: Introduction

تم وصف السلوك المرن للمواد المركبة ذات الألياف الطويلة والقصيرة في الفصول من 4 وحتى 6. وقد تم تفحص الإجهادات في المواد المركبة الصفائحية تحت تأثير الحمل الخارجي، ودراسة توزع الإجهادات على طول الألياف القصيرة. لقد استخدمت هذه المعلومات لاستكشاف الطرق التي يتم فيها تعرض المادة للضرر في البنية المجهرية، التي تؤدي إلى انهيار القطعة كلياً. يمكن تحليل هذا السلوك بأمرين هامين وهما : أولاً: وجود الانحراف الذي هو درجة من الضرر والانهيار للمادة المركبة بتأثير الحمولة المطبقة.

ثانياً : تواجد طرق تسبب امتصاص الطاقة ضمن المادة المركبة عند تعرضها للانفعال، حيث يحدد ذلك جساءة المادة المركبة الذي تمت معالجته في الفصل 9. يتركز الاهتمام في الفصل الحالي على التنبؤ بقيمة الإجهادات الحادثة في المادة المركبة التي يحدث عندها الضرر والانهيار. تركزت الدراسة على المواد طويلة الألياف والمواد المؤلفة من صفائح، وخصوصاً المواد المركبة ذات الأساس البوليميري. تطبق معظم هذه المبادئ بشكل متساوٍ على المواد المركبة ذات مادة التقوية غير المستمرة (منقطعة) وعلى أنواع أخرى من المواد الأساس (الحاضنة).

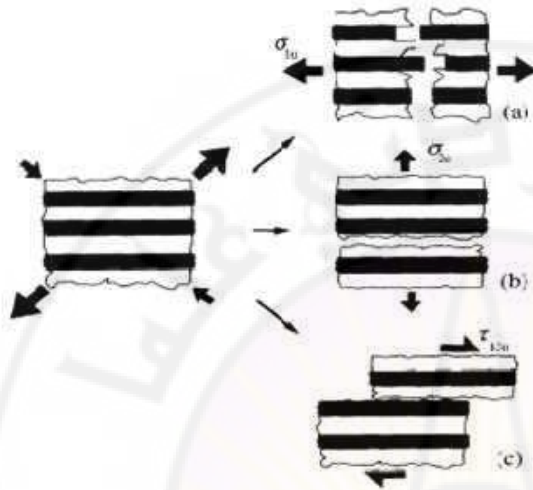
2-8: أنماط فشل المواد المركبة ذات الألياف الطويلة:

Failure modes of long-fiber composites

يمكن أن يؤدي الإجهاد المطبق على الألياف وحيدة الاتجاه إلى واحد أو أكثر من طرق الفشل الأساسية. شرحت أنماط الفشل الثلاثة الرئيسية في الشكل (1-8). تؤدي إجهادات الشد الكبيرة الموازية للألياف σ_1 إلى تحطم الليف والمادة الحاضنة، بمسار تحطم عمودي على اتجاه الليف. إن المتانة أقل بكثير في حالة الشد العرضي (المستعرض) وكذلك في حالة القص، وتتحطم المادة المركبة على السطوح الموازية لاتجاه الألياف وذلك عندما يكون كل من الإجهادات σ_2 أو τ_{12} كبيرة لتؤدي للانهيار. يمكن أن يحدث التحطم كلياً ضمن المادة الحاضنة، على سطح التلامس (السطح البيني) بين مادة حاضنة /ليف أو ضمن الليف. من أجل التنبؤ بمتانة الصفائح

المدمعة بالألياف، يجب تحديد القيم الأعظمية لإجهادات التحطم (σ_{1u}) ، σ_{2u} ،

τ_{12u}



الشكل (8-1): رسم تخطيطي يوضح

كيفية حدوث الانهيار.

(a) إجهاد الشد المحوري σ_{1u} .

(b) إجهاد الشد المستعرض σ_{2u} .

(c) إجهاد القص τ_{12u} .

8-2-1 : الانهيار نتيجة الشد المحوري: Axial tensile failure

إن فهم الانهيار الناتج عن إجهاد الشد المطبق بصورة موازية للألياف مسألة بسيطة، طالما نتصرف مكونات المادة المركبة بشكل مرن وتتحطم بالطريقة القصية. تم استنتاج أن إجهاد التحمل والانفعال المحوري هما بنفس النسبة التي تحدد معامل يونغ للمادة. يمكن تحديد حالتين:

1- اعتماداً على أن المادة الحاضنة ذات الانفعال الأقل.

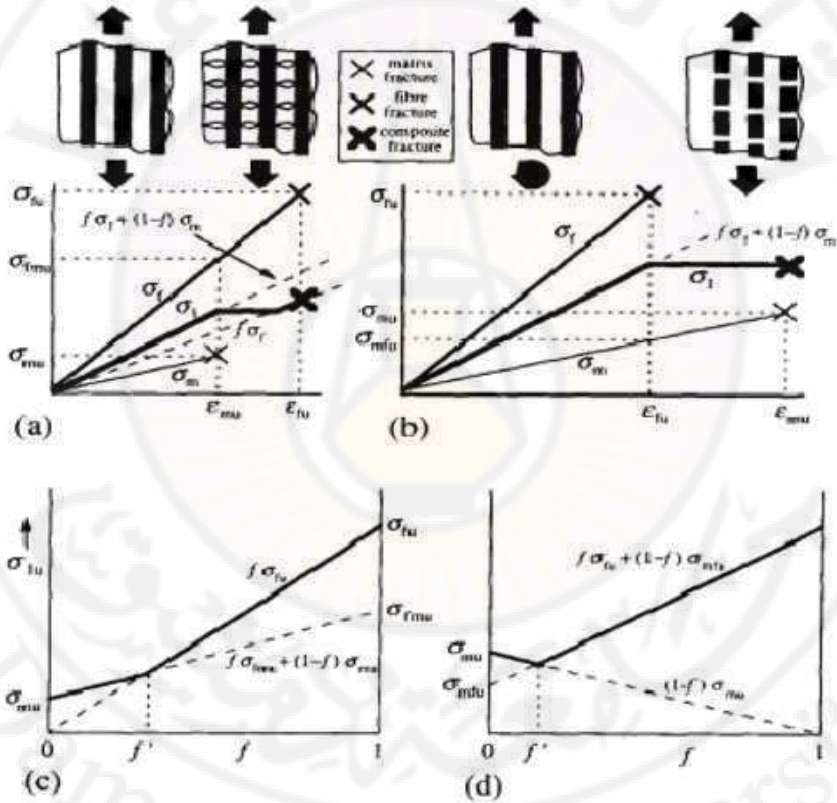
2- اعتماداً على أن الليف ذا الانفعال الأقل. كما هو موضح في الشكل (8-2) a و b. إذا كانت المادة الحاضنة ذات انفعال تحطم أقل أي ($\epsilon_{mu} < \epsilon_{fu}$). يعطى إجهاد المادة المركبة بالعلاقة البسيطة التالية:

$$\sigma_1 = f\sigma_f + (1-f)\sigma_m \quad [(8-1)]$$

وذلك من أجل انفعالات تصل حتى قيمة انفعالات المادة الحاضنة ϵ_{mu} .

عند قيم الانفعال الأكبر تبدأ المادة الحاضنة بإظهار تشققات ميكروية ويمثل هذا بشكل انحراف في مسار منحنى الإجهاد/الانفعال.

الشكل (8-2) (a)، وتَسْتَطِيل المادة مع زيادة قليلة في الإجهاد المطبق. ينقل الحمل تدريجياً إلى الألياف مع استمرار نمو الشق في المادة الحاضنة. إذا لم تصل قيمة انفعال المادة إلى قيمة انفعال الألياف ϵ_{fu} ، سوف تحدث استئطالة إضافية بالمادة المركبة مسببة ازدياد الإجهاد في هذه المادة ونقل الحمل كلياً بواسطة الألياف. يحصل التخطم النهائي عندما تصل قيمة انفعال المادة إلى قيمة انفعال الألياف ϵ_{fu} . و يعطى إجهاد التخطم للمادة المركبة σ_{lu} بدلالة $f\sigma_{fu}$.



الشكل (8-2) : رسم تخطيطي يمثل المواد المركبة ذات الألياف الطويلة مع سلوك قصف لكلا مكوني المادة المركبة. (a) و (c) تشير إلى أن الألياف في المادة المركبة تمتلك قيمة انفعال لاتتهيار أكبر من المادة الحاضنة وتظهر على التوالي العلاقة ما بين الانفعال / الإجهاد (للألياف، المادة الحاضنة، والمادة المركبة) ويعتمد إجهاد التخطم بالمادة المركبة على الحجم النسبي للألياف المتضمنة في المادة المركبة. (b) و (d) يظهران نفس المخططات البيانية عندما يكون للمادة الحاضنة قيم انفعال تحطم أكبر.

إذا انكسرت الألياف قبل أن يمتد تشقق المادة الحاضنة بشكل كافٍ لنقل كل الحمل لهذه الألياف فإنه تعطى متانة المادة المركبة بالعلاقة التالية:

$$\sigma_{lu} = f \sigma_{fmu} + (1-f) \sigma_{mu} \quad (8-1)$$

حيث أن σ_{fmu} هو إجهاد الليف في مقدمة تشقق المادة الحاضنة ($\epsilon_l = \epsilon_{mu}$). وفقاً لذلك يعتمد إجهاد انهيار المواد المركبة على النسبة الحجمية للألياف المحتواة في المادة المركبة وفقاً للنمط الموضح بالشكل (8-2) (c). ويتم الحصول على قيمة النسبة الحجمية للألياف المحتواة في المادة المركبة الذي تكون عندها الألياف قادرة على تحمل الحمل المنقول كلياً من خلال تعويض قيمة σ_{fu} في المعادلة (8-1) وتنتج المعادلة التالية:

$$f' = \frac{\sigma_{mu}}{\sigma_{fu} - \sigma_{fmu} + \sigma_{mu}} \quad (8-2)$$

الحالة (b)، الموضحة بالشكل (8-2) حيث تكون ($\epsilon_{mu} > \epsilon_{fu}$). تنهار أولاً الألياف عندما تصبح قيمة انفعال المواد المركبة مساوية لـ ϵ_{fu} . وتسبب الانفعالات الإضافية تكسر الألياف تدريجياً لأطوال أقصر وتسمح بانتقال الحمل إلى المادة الحاضنة. و يستمر هذا حتى يصبح لكل الألياف نسب أبعاد (aspect ratio) أقل من القيمة الحرجة.

يفترض في المعالجات البسيطة أن تتحمل المادة الحاضنة الحمل بالوقت الذي تتكسر فيه الألياف بالكامل. سوف يحدث التحطم اللاحق عند تطبيق الإجهاد $\sigma_{mu} (1-f)$. إذا حدث تشقق المادة الحاضنة بينما لا تزال الألياف متحملة لبعض الأحمال، يعطى عندها إجهاد تحطم المواد المركبة بالعلاقة التالية:

$$\sigma_{lu} = f \sigma_{fu} + (1-f) \sigma_{mfu} \quad (8-3)$$

كما هو موضح بالشكل (8-2) (b).

حيث أن σ_{mfu} هو إجهاد المادة الحاضنة في مقدمة تشقق الليف. يخفض وجود نسبة حجمية صغيرة للألياف من إجهاد تحطم المواد المركبة إلى مادون إجهاد تحطم المادة

الحاضنة غير المقواة، الشكل (8-2)(d). يحدث هذا حتى القيمة الحدية لـ f' الناتجة من خلال وضع الطرف الأيمن بالمعادلة (8-3) مساو إلى $\sigma_{mu} (1-f)$:

$$f' = \frac{\sigma_{mu} - \sigma_{mfu}}{\sigma_{fu} - \sigma_{fmu} + \sigma_{mu}} \quad (8-4)$$

يبين الجدول (8-1) مثالاً على تطبيق هذه التحاليل وذلك لمادتين مركبتين إحداهما ذات أساس بوليميري والثانية ذات أساس سيراميكي. (من غير الواقعي تطبيق مثل هذه الحسابات للمادة الأساس المعدنية المطيلية والمادة الأساس الملدنة حرارياً، التي لا تبدي السلوك المرن الخطي قبل حدوث التحطم).

الجدول (8-1): بيانات الانهيار الناتج عن الشد استناداً للسلوك الخطي المرن.

Composite system	Young's modulus (GPa)	Failure strain (%)	Failure stress (MPa)	σ_{fu} (MPa)	σ_{fmu} (MPa)	f' (vol. %)	σ_u for $f = 50\%$ (MPa)
Type 1 (HM) C fibre	350	0.7	2500	35	—	2.3	1267
Epoxy matrix	4	2.0	100	—	—	—	—
Glass fibre	71	2.8	2000	—	1430	10.9	1000
Polyester matrix	3	2.0	70	—	—	—	—
Nicalon™ fibre	130	0.8	1000	—	175	10.1	500
Glass matrix	70	0.14	100	—	—	—	—

Data for the matrices and fibres are typical experimental values. Three composite systems are being considered, formed by taking the listed fibres and matrices in pairs. The parameters σ_{mfu} , σ_{fmu} , f' and σ_u refer to the failure behaviour of these composites under axial tensile loading; they are defined by the plots in Fig. 8.2. Their values have been calculated from the data for the fibres and matrices.

من أجل تلك الحالة التي يحدث فيها أولاً فشل المادة الحاضنة، إن النسبة الحجمية للألياف المحتواة في المادة المركبة f' هي بحدود 11% التي إذا كبرت قيمتها يمكن أن تنقل الألياف كل الحمل. تقاوم الألياف في المواد المركبة المكونة من الكربون/إيبوكسي إجهاد الانهيار عند محتوى ألياف تزيد كميته عن 2.5%. وبما أن النسبة الحجمية للألياف المحتواة في معظم المواد المركبة المقواة بالألياف الطويلة بين 30% و 70%. فمن الواضح سيطرة متانة الليف على تحديد المتانة المحورية للمادة المركبة والقيمة σ_{fu} تعطي تقديراً موثقاً لـ σ_{fu} (على الأقل من أجل المواد المركبة ذات المادة الحاضنة البوليميرية).

إن الاستنتاجات السابقة عن تقدير قيمة σ_{1u} صحيحة، تمثل المعالجة السابقة تبسيطاً كبيراً. لا تؤدي الشقوق الميكروية للمادة الحاضنة إلى أن تصبح غير محملة وتستمر الألياف في حمل بعض الإجهادات حتى بعد تكسر الألياف لأطوال قصيرة. يحدث بعد حدوث الضرر تغير في ميل منحنى الإجهاد/الانفعال، لكن لا ينحدر إلى الصفر. الشكل (2-8 a)). تزداد هذه التأثيرات بسبب انتقال الحمولة عبر السطح البيني (سطح التلامس بين المادة الحاضنة والألياف) حتى بعد تحطم الليف أو المادة الحاضنة.

من الافتراضات الأخرى في المعالجة السابقة أن متانة الليف ثابتة وأن الألياف تنهار عند عزل الألياف بعضها عن بعض. تبدي معظم أنواع الألياف مجالاً من المتانة، تغيرات المتانة أو المقاومة أكبر عندما تكون معاملات ويبل للألياف منخفضة Weibull modulus.

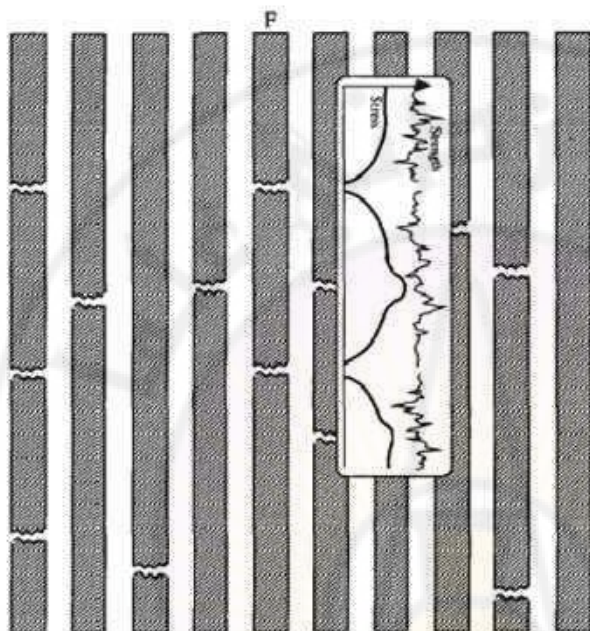
عندما يطبق الحمل بشكل مواز للألياف، يحدث الانهيار الأولي عند النقطة الأضعف. إذا لم يكن إعادة توزيع الإجهاد المرتبط بهذا الفشل كافياً ليسبب كسر في الألياف المجاورة، يزداد الإجهاد المطبق وتحدث تحطيمات أخرى بشكل عشوائي ضمن المادة، كما هو مبين في الشكل (3-8).

لقد اقترحت أنماط مختلفة لشرح هذه العملية وهي:

1- نماذج الضعف التراكمي: يحدث مع ازدياد الحمل تتابع عشوائي لتحطم الألياف حتى الوصول لقيمة الإجهادات المتبقية للمادة المركبة في المقطع العرضي وذلك على امتداد طول الليف. ويعطي هذا المتانة الأكبر للترابط، حيث يوجد ميل ليكون الضرر مركزاً في مناطق معينة.

2- نماذج انتشار كسر الليف: يستلزم الفشل الابتدائي حدوث تحطم الألياف الفردية في النقاط الضعيفة. عندما ينكسر كل ليف يحدث إعادة توزيع الإجهادات مما يؤدي إلى إجهادات إضافية في الألياف المجاورة والمتراكمة بتأثير تعاضل الإجهاد الموضعي. وهكذا فإن هناك احتمالية متزايدة لحدوث التحطم في الألياف المتجاورة، وقد شرح الرسم البياني

في الشكل (3-8) توزيع الإجهادات، الذي يبين قمماً عند نقاط انكسار الألياف المتجاورة.

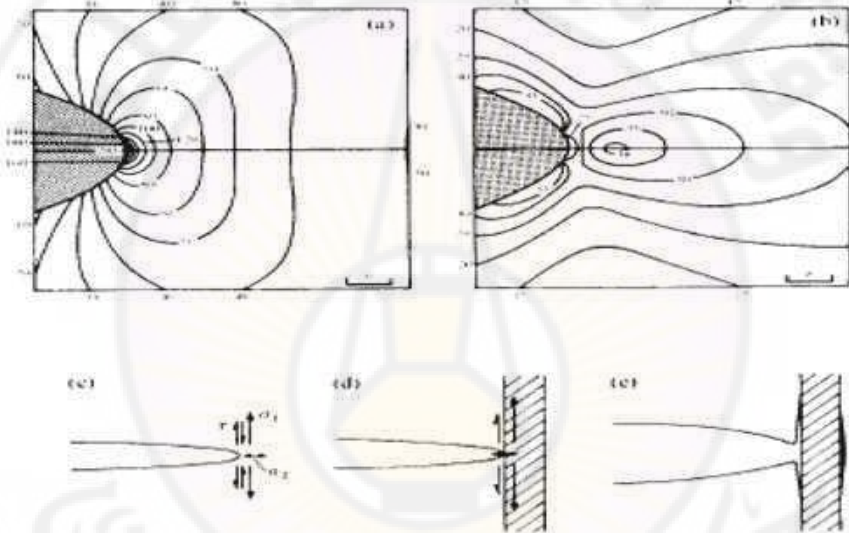


الشكل (3-8): رسم تخطيطي يصف تحطم الليف الحادث عند انهيار المواد المركبة ذات الألياف الطويلة المتوازية على الشد. يظهر توزيع الاجهادات المحورية ومتانة الليف الموضعية (الناتجة عن وجود انسياب) على امتداد طول الليف من أجل الليف المشار إليه بالرمز F

إن البيانات قيم تجريبية نموذجية من أجل المواد الحاضنة والألياف. تم اعتبار ثلاثة نماذج من البيانات للمواد الأساس والألياف. شكلت المواد المركبة الثلاث المعتبرة بأخذ زوج الألياف والمادة الحاضنة المدرجة في الجدول. تشير المتغيرات (البارامترات) σ_{mfu} ، f ، σ_{fu} إلى سلوك الانهيار لهذه المواد المركبة تحت تأثير حمل شد محوري، وقد وضحت بالرسوم البيانية في الشكل (2-8). وحسبت هذه القيم من بيانات الألياف والمواد الحاضنة.

أعطت النماذج السابقة قدرة تنبؤية محدودة، بسبب حساسية حقل الإجهاد في المنطقة المحيطة بالألياف المكسورة لبنية السطح البيني (انظر الفصل 7) وبسبب خضوع المادة الحاضنة وبسبب سلوك التحطم الذي يمكن أن يتأثر بعدد كبير من العوامل المختلفة. يتضح من هذا اعتماد نموذج الضعف التراكمي ونموذج انتشار كسر الليف على معاملات ويبل Weibull وعلى خصائص السطح البيني. على سبيل المثال، يصبح نموذج انتشار كسر الليف أكثر أهمية عندما تكون معاملات ويبل عالية القيمة، بينما

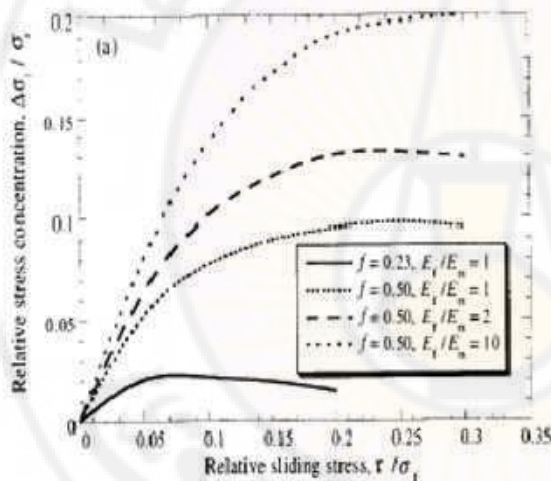
يسود التحطم الموزع عشوائياً عند وجود مجال واسع من التغيرات الموضعية لمتانة الألياف، ممثلاً بانخفاض في معاملات وييل. من المتوقع أن تظهر مقاومة إنهيار المواد المركبة تغيرات أقل وحساسية لحجم العينة مما تظهره الألياف. برهن التنبؤ بحقول الإجهاد حول الشقوق باستخدام النمذجة الرقمية بأنه مفيد باستكشاف ما الذي يمكن حدوثه بعد تحطم الليف. لقد تم تكبير خطوط الإجهاد حول الطرف المستقيم من الكسر، كما في الشكل (4-8).



الشكل (4-8): الإجهادات بالقرب من الطرف المكسور إهليلجياً والمتنبأ بها بواسطة النمذجة

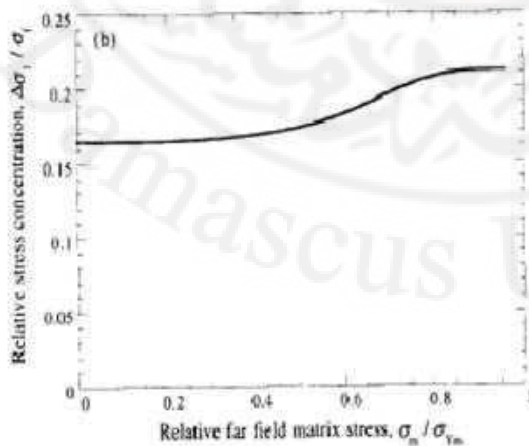
- (a): خطوط الإجهاد σ_1 كنسبة عن الإجهاد المطبق.
(b): خطوط الإجهاد σ_2 في الاتجاه العرضي كنسبة عن الإجهاد المطبق.
(c): هندسية الإجهادات σ_1 ، σ_2 و τ .
(d): تقارب حافة الشق للسطح البيني ليف / مادة حاضنة.
(e): فك الرابطة عند السطح البيني نتيجة الإجهاد σ_2 يؤدي لعمل تثليم بالشق.
حيث يبين بأنه بينما يكبر بشكل كبير الإجهاد σ_1 الموازي للحمل المطبق (انظر الشكل 4-8 (a))، يوجد أيضاً الإجهاد العرضي σ_2 في اتجاه انتشار الشق (شكل 4-8 (b)). وقد يتسبب الإجهاد العرضي الذي تبلغ ذروته عند نقطة في مقدمة حافة الكسر بفقد الرابطة عند السطح البيني لليف/المادة الحاضنة في مقدمة الشق، كما يوضحه الشكل

ثانياً: يصبح تركيز الإجهاد مهماً عندما تنخفض متانة القص عند السطح البيني للصفر، يفقد تأثير الشق على تركيز الإجهاد إذا لم تنتقل الإجهادات إلى المادة الحاضنة المجاورة. ثالثاً: ينخفض تركيز الإجهاد إذا كانت الألياف المتجاورة بعيدة عن بعضها بما فيه الكفاية (محتوى الألياف قليل). يظهر الشكل (6-8(b)) تأثير إضافي وهو تأثير الانسياب اللدن الحاصل في المادة الحاضنة. حيث يزداد تركيز الإجهاد وذلك عند قيم مرتفعة للنسبة ما بين إجهاد المادة الحاضنة ولجهاد خضوع هذه المادة (وجود خضوع زائد عن الحد)، وهو أمر متوقع حيث إن لخضوع المادة أثراً مشابهاً لتأثير انخفاض جساءة المادة الحاضنة.



الشكل (6-8): يبين التنبؤات المقترحة حيث رسم التزايد $\Delta\sigma_1$ لجهد الليف في اتجاه تطبيق الحمل، بسبب وجود الشق في الألياف المتجاورة كنسبه للإجهاد المنقول من قبل الألياف البعيدة عن الشق σ_1 .

(a): تأثير إجهاد القص τ من أجل انزلاق السطح البيني المجاور للشق.

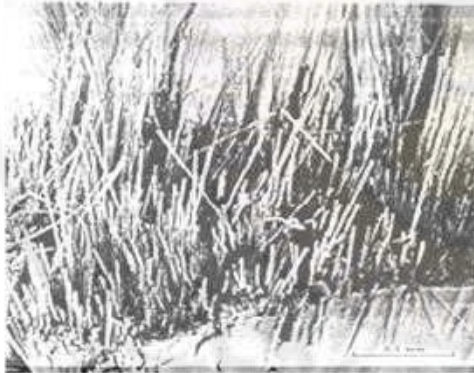


(b): تأثير النسبة ما بين إجهاد المادة الحاضنة البعيدة عن الشق ولجهاد خضوع المادة الحاضنة، من أجل الحالة:

$$f = 50\% \text{ and } E_f / E_m = 3$$

$$\tau / \sigma_1 = 0.2.$$

شرح التأثير العملي لتغير مقاومة القص عند السطح البيني في الأشكال (7-8 و 10-8)، حيث أظهرت سطوح مختلفة لتحطم المواد المركبة ذات الألياف الطويلة المعرضة لحمولة شد محورية. إن متانة الترابط عند السطح البيني للمواد المركبة ذات ألياف إيبوكسي/كربون والمبينة بالشكل (7-8) كبيرة ومسببة تركيز إجهادات قوية وميلاً لتمرير الشقوق من خلال الحزم الليفية الكبيرة دون انحرافات كبيرة. الرابطة أضعف للمواد المركبة بوليستر / زجاج و epoxy / KevlarTM التي تظهرها الأشكال (8-8 و 8-9). ويحدث تملص الألياف من المادة الحاضنة. ومن الواضح في الشكل (9-8) ميل ألياف KevlarTM لأن يحدث فيها تخرصاً و تليفاً. أخيراً يظهر الشكل (10-8) تأثير البيئة غير الملائمة على تأثير حمض كلور الماء، الذي يتغلغل على طول الشق النامي ويقلل بشكل كبير من متانة الليف (نسبةً إلى متانة السطح البيني). و يسبب ذلك حدوث تحطم مستوي مع إجهاد انهيار منخفض جداً.

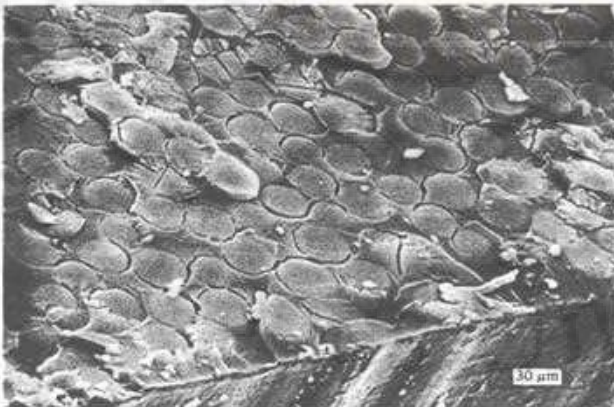


الشكل (7-8): صورة بمجهر المسح الإلكتروني لسطح تحطم المادة المركبة من الإيبوكسي / 60% كربون بشكل صفائح والمختبرة تحت تأثير حمولة شد محورية. إن سطح التحطم ناعم نسبياً ويتألف من شبكة لبروزات الألياف والراتنج في مستويات مختلفة

الشكل (8-8): صورة بمجهر المسح الإلكتروني لسطح تحطم المادة المركبة من بوليستر / 60% زجاج بشكل صفائح، والمختبرة تحت تأثير حمولة شد محورية. وقد حدث هنا انسحاب للألياف.

الوضع مختلف في حالة المواد المركبة الصفائحية ذات الأساس المعدني حيث يكون للمادة الحاضنة قدرة للتشوه بشكل لدن بانفعالات كبيرة. يمكن رسم مخطط مشابه للشكل

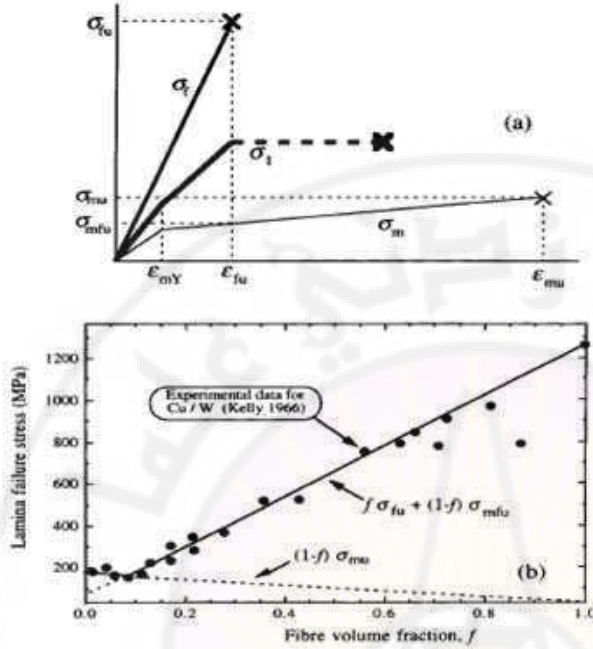
8-2 (b) آخذين في الحسبان سلوك التقسية بالتشغيل للمادة الحاضنة - work-hardening.



الشكل (8-9): صورة
بمجهز المسح الالكتروني
لسطح تحطم المادة
المركبة من إيبوكسي /
Kevlar™ 49 %40
بشكل صفائح، والمختبرة
تحت تأثير حمولة شد
محورية.

(b) منظر مكبر أكثر
لليف مرموز له بـ X .
(a) ويظهر التليف
وتشكل تخلص في الليف.

الشكل (8-10): صورة
مكبرة بمجهز المسح
الالكتروني لسطح
التحطم لصفائح المادة
المركبة من بوليستر /
60% زجاج، والمختبرة
تحت تأثير حمولة شد
محورية مع وجود وسط
من حمض كلور الماء
المخفف.



الشكل (8-11 (a)) يبين رسماً
تخطيطياً لمنحني الإجهاد -
الانفعال.

(b) العلاقة بين إجهاد الفشل
والنسبة الحجمية للألياف وذلك
في المواد المركبة والمؤلفة من
مادة حاضنة نحاس وأسلاك
تنغستن اعتماداً على التنبؤ
والجربة. لقد توافقت البيانات
التجريبية مع النظرية البسيطة.

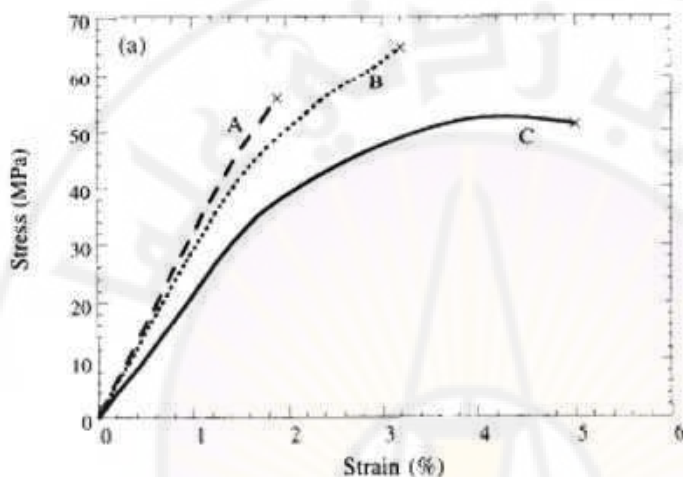
8-2-2: الانهيار نتيجة الإجهاد العرضي:

Transverse tensile failure

من غير الممكن التقدير البسيط لـ σ_{2u} ، بالمقارنة مع تقدير σ_{1u} الموصوف في المقطع
السابق. تتأثر المتانة العرضية بعوامل متعددة مثل طبيعة الترابط عند السطح البيني،
وتوزع الألياف ووجود فجوات.... الخ. إن المتانة العرضية أقل من متانة المادة الحاضنة
غير المقواة، كما يمكن أن ينخفض انفعال الانهيار بشكل مفاجئ. ونتيجة ذلك تبدأ
الطبقات العرضية في الصفائح ذات الطبقات المتعاكسة بالتشقق قبل الطبقات الموازية.
على الرغم من أنها ذات جساءة أقل وتقل حمولات أقل.

يبين الشكل (8-12) شرح تأثير الألياف على المتانة العرضية من خلال البيانات
التجريبية، يقارن الشكل بين المخططات البيانية للإجهاد - الانفعال الناتج عن الشد
العرضي لصفائح من ثلاثة أنواع من ريزينات (راتنج) البوليستر مع سلوك هذه المواد
دون تقويتها. انخفضت كلاً من المتانة والانفعال للانهيار بشكل ملحوظ بسبب وجود
الألياف. يعود هذا للنزعة المتأصلة للإجهادات والانفعالات الموضعية الكبيرة لكي تتطور

في المادة الحاضنة. تبدي الألياف إسهاماً قليلاً على المقاومة. تميل الشقوق للتشكل عند السطح البيني إذا كان الترابط عند السطح البيني ضعيفاً، وتتصل هذه الشقوق خلال المقاطع المجهد كثرًا للمادة الحاضنة.



الشكل (8-12):

منحنيات الإجهاد-

الانفعال ::

(a) ثلاثية

ريزينات (راتنج) من

البوليستر غير المقواة.

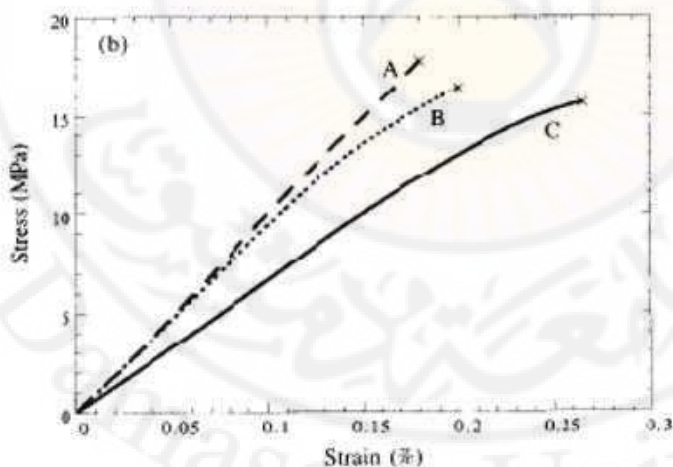
(b) صفحية مؤلفة من

ثلاثية راتنجيات، مع

48% من الألياف

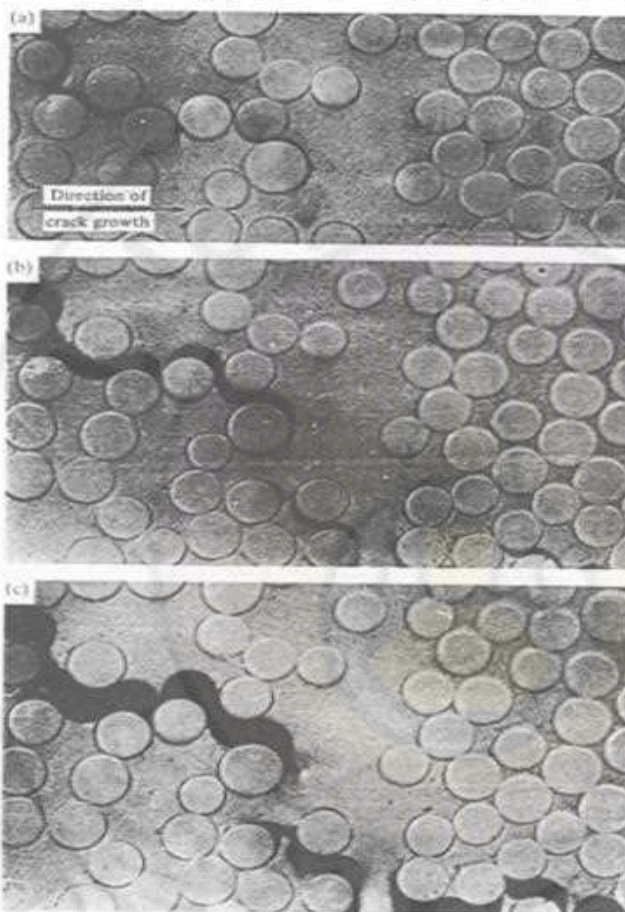
الزجاجية، اختبرت

بالشد العرضي.



كما هو مبين في الصورة المجهرية في الشكل (8-13). عند وجود مقاومة قوية لفك الترابط عند السطح البيني، عندئذ تميل الشقوق للتشكل في المادة الحاضنة بجانب السطح البيني- حيث تتركز الإجهادات وتتواجد القيود الثلاثية المحاور، يؤدي هذا لمنع

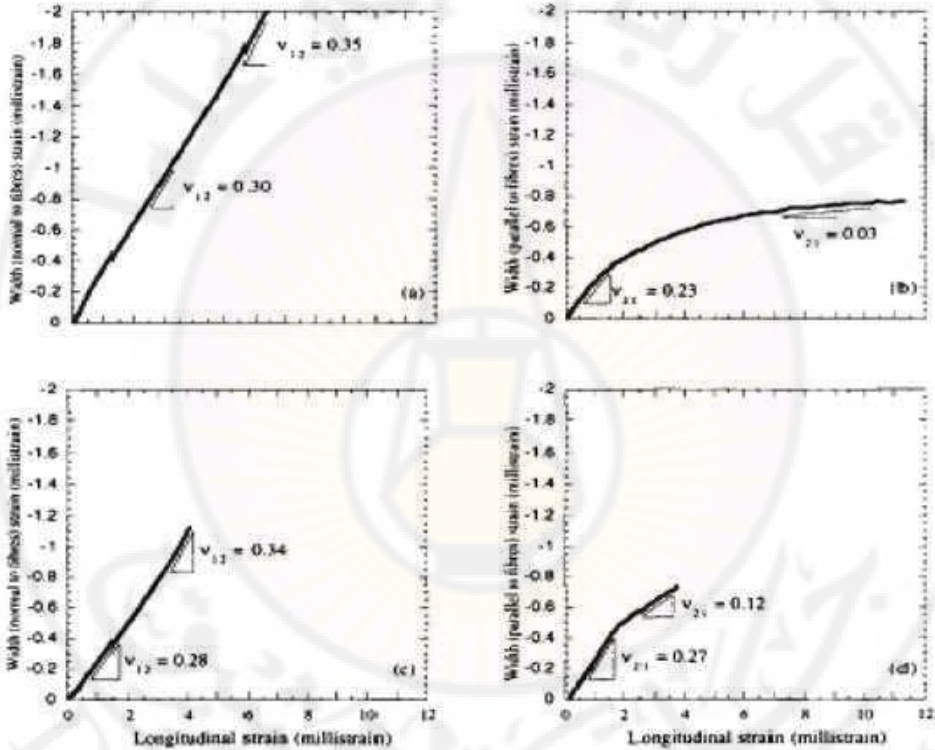
تلدن المادة الحاضنة. بصورة مغايرة، تبدي بعض الألياف ذات البنيات الطبقيّة (مثل الألياف الكربونيّة) مقاومة عرضية قليلة ويمكن لهذه الألياف أن تتهار داخلياً .



الشكل (8-13): صورة
بمجهز المسح الالكتروني
توضح انتشار الشق العرضي
الموجود في صفيّة
البوليستر / زجاج .

إن للمادة الحاضنة المعدنية ميزات مشابهة . تبين المخططات البيانية بالشكل (8-14) تأثير متانة الترابط عند السطح البيني للمواد المركبة من التيتانيوم. تلك هي مخططات بواسون، التي أظهرت الانفعال العمودي على اتجاه الحمل كتابع للانفعال الموازي للحمل المطبق. يعطي الميلان في المخطط البياني نسبة بواسون. كما أن هذه المخططات البيانية هي للأحمال العرضية والمحورية، قبل وبعد المعالجة الحرارية التي ترفع مقاومة الارتباط عند السطح البيني. ترتفع نسبة بواسون بشكل طفيف بتأثير التحميل المحوري

حالما يبدأ السلوك غير المرن، وذلك بسبب الانسياب اللدن في المادة الحاضنة (مع نسبة بواسون 0.5). أما عند التحميل العرضي، فإنه يوجد ميل لانخفاض نسبة بواسون، بنتيجة انفتاح السطح البيني، مما يسمح بالاستطالة في اتجاه التحميل مع تناقص قليل في المقطع العرضي. إن هذا التأثير محدود بعد المعالجة الحرارية، ويظهر الانهيار عند انفعال أخفض بكثير.



الشكل 8-14: بيانات تجريبية لاختبار الشد المحوري والعرضي لصفحة وحيدة الليف من الـ 6Al-4V/SiC -- TI كنابغ للاستطالة في اتجاه التحميل من أجل :

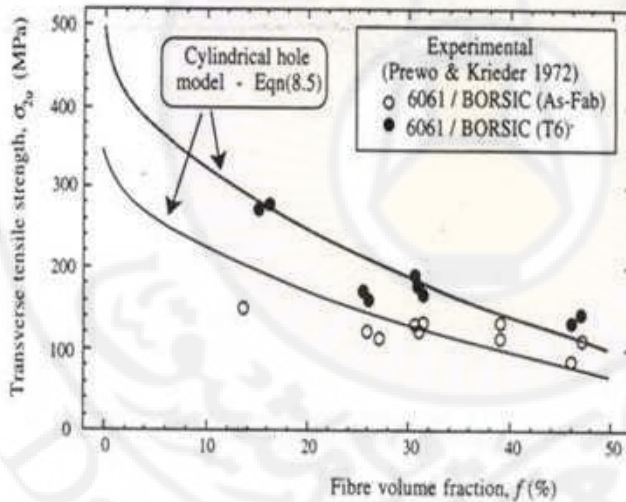
- (a) حمولة محورية (b) حمولة عرضية لمواد مركبة حديثة التصنيع .
- (c) حمولات محورية بعد المعالجة الحرارية التي تزيل التغطية الغرافيتية عن الألياف.
- (d) حمولات عرضية بعد المعالجة الحرارية التي تزيل التغطية الغرافيتية عن الألياف.

يمكن تقدير أثر وجود الألياف على المتانة العرضية من خلال اعتبار الألياف في المادة المركبة على أنها مجموعة من الثقوب الاسطوانية واعتبار التخفيض التي تقدمه على تأثير الحمولة بالمقاطع العرضية. (هذه عملية غير دقيقة، حيث سيؤدي فك الترابط فيما

بين الألياف إلى توزع إجهادات في المادة الحاضنة مختلف عن التوزع الذي تبديه الثقوب، ولكن يمكن اعتبار هذا التقريب مفيداً للاسترشاد به). من أجل مصفوفة ثقوب مربعة بسيطة باعتبار أن التخفيض في مساحة المقطع العرضي للمادة الحاضنة أعظمي. تحسب المتانة العرضية للصفائح المحتوية على النسبة الحجمية f من الألياف بالعلاقة التالية:

$$\sigma_{2u} = \sigma_{mu} \left[1 - 2 \left(\frac{f}{\pi} \right)^{1/2} \right] \quad (8-5)$$

يبين الشكل (8-15) مقارنة بين البيانات المتنبأ بها باستخدام المعادلة وبين البيانات التجريبية للمواد المركبة Borsic / Al(6061). النتائج التجريبية متوافقة بشكل جيد مع النتائج النظرية.



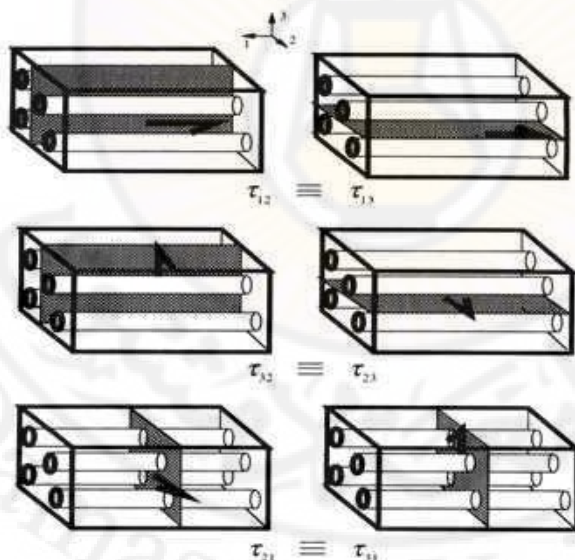
الشكل (8-15): بيانات تجريبية لقيمة متانة الشد العرضية لصفائح المركبة Al/BORSIC بتغير النسبة الحجمية للألياف في المادة المركبة، مقارنة مع البيانات المتنبأ بها التي تم الحصول عليها من المعادلة (8-5).

هنالك اهتمام في تحسين الخصائص العرضية للصفائح، وخاصة انفعال الانهيار. يتم ذلك بتأمين طبقة عالية الطواعية على سطح الليف (كالمطاط)، وذلك لإنقاص الانفعالات الموضعية والقيود المفروضة من المادة الحاضنة على الألياف. لسوء الحظ، تميل الطبقة ذات السماكة الكافية لزيادة انفعال الانهيار العرضي لأن لها تأثير عكسي على المواصفات الأخرى كجساءة القص.

Shear failure

8-2-3: الانهيار نتيجة القص:

كما رأينا في التحطم الناتج عن الشد، فإنه يميل انهيار القص لأن يحدث على المستويات المحددة باتجاه الليف. يبين الشكل (16-8) التوافقيات الست الممكنة لمستوي القص واتجاهه. هناك ثلاث مجموعات بأزواج متكافئة. نجد عادة مقاومة كبيرة لتحطم الألياف. بحيث يكون من غير المحتمل حدوث زوج من الأنماط المشار إليها بـ τ_{21} و τ_{31} . أما بالنسبة للزوجين الآخرين اللذين يشملان انزلاق الألياف بعضها فوق بعض ما محورياً τ_{12} أو جانبياً τ_{32} ، فمن غير الواضح أن يكون احتمال حدوث أي منهما قبل الآخر. على كل حال، عندما يتركز اهتمامنا على إجهادات الصفائح الرقيقة بمستوى واحد أو مستويين، فإنه لا تظهر الإجهادات من النوع τ_{32} وتكون قيمة τ_{12u} القيمة الهامة فقط. يمكننا القول إن هذا الاجهاد يتأثر بنفس العوامل المؤثرة بمتانة الشد العرضي، والسبب في ذلك أن تصبح إجهادات القص والانفعال مركزه في المادة لحاضنة بين الألياف بصورة تشابه ما ذكر سابقاً من أجل إجهادات وانفعالات الشد.

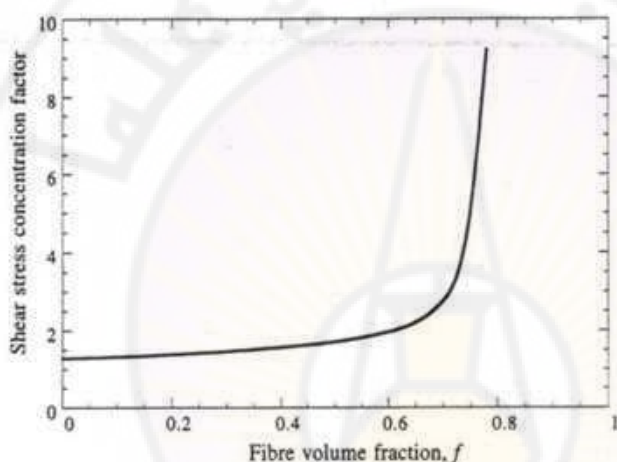


الشكل (16-8):
المستويات والاتجاهات
لإجهادات القص المؤثرة
ضمن المواد المركبة ذات
الألياف المترصة.

لا توجد علاقات تحليلية بسيطة تعطي تأثير الألياف المحتواة على τ_{12u} . استخدمت طريقة العناصر المتناهية الصغر لاستنتاج كيف يتغير عامل تركيز إجهادات القص بتغير النسبة الحجمية للألياف المحتواة في المادة المركبة. يبين الشكل (17-8) نتائج استخدام طريقة العناصر المتناهية الصغر. ينتهي عامل تركيز إجهادات القص إلى

الواحد و يتوقع أن تكون قيمة τ_{12u} قريبة جداً من قيمة τ_u للمادة الحاضنة، وذلك إذا لم تكن النسبة الحجمية للألياف المحتواة في المادة المركبة كبيرة (يصبح القيد على تشوه المادة الحاضنة صارماً عندما تكون النسبة كبيرة). تم تأكيد هذا الاستنتاج من خلال البيانات التجريبية المبينة في الجدول (8-2). من الملاحظ وجود صعوبات نظرية وعملية في الحصول على مثل هذه البيانات.

الشكل (8-17): تغير



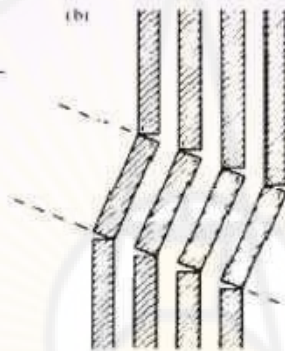
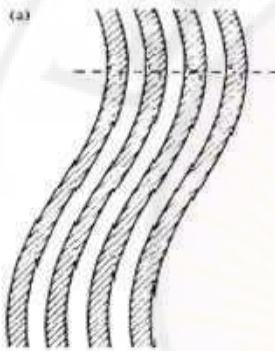
عامل تركيز إجهاد القص
بتغير النسبة الحجمية
للألياف المحتواة في
المادة المركبة، حيث تم
توقع هذا العامل من
خلال النمذجة للعناصر
المتناهية الصغر من
أجل مصفوفة مربعة من
الألياف

الجدول (8-2): بيانات الانهيار التجريبية النموذجية لصفائح مادة مركبة بمادة حاضنة ذات تلدن حراري.

Composite	Axial strength σ_{1u} (MPa)	Transverse strength σ_{2u} (MPa)	Shear strength τ_{12u} (MPa)	Axial failure strain ϵ_{1u} (%)	Transverse failure strain ϵ_{2u} (%)
Polyester/50% glass	700	20	50	2.0	0.3
Epoxy/50% carbon (HM)	1000	35	70	0.5	0.3
Epoxy/50% Kevlar TM	1200	20	50	2.0	0.4

4-8-2-: الانهيار نتيجة الضغط: Failure in compression

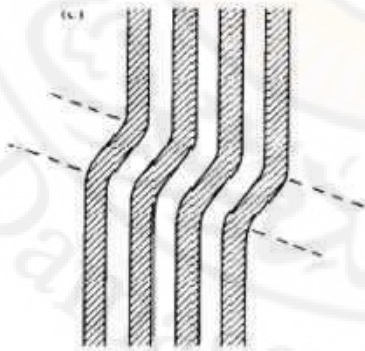
يعتمد الانهيار الناتج عن الضغط على الطريقة المطبق فيها الحمل وبشكل خاص على درجة القيود الجانبية. تميل الألياف لأن تنتثني تحت تأثير الضغط المحوري. ماعدا حالة النسبة الحجمية المنخفضة للألياف، حيث تكون الألياف المتجاورة مقيدة، كما يظهر في الشكل (8-18). يعطي هذا الالتواء إجهادات شد وضغط عبر أجزاء مختلفة من مقطع الليف، مؤدية إما إلى التحطم أو التشوه الموضعي (إذا كان الليف من KevlarTM، فإنه يستطيع التشوه بصورة كبيرة). إذا أصبح الالتواء كبيراً سيحدث انهيار عام، وفشل العينة المختبرة.



الشكل (8-18): (a) إجهادات الشد والضغط في الليف نتيجة الالتواء في الوجه الواحد، مؤدية إلى منطقة ملتوية.

(b) مستويان من التحطم في الألياف الكربونية الهشة.

(c) منطقة التواء غير محطمة مشكلة بألياف KevlarTM 49.

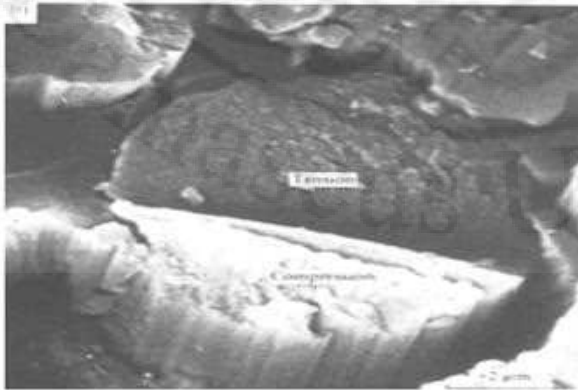


يحدث النوع الأكثر شيوعاً من الانهيار عند بداية عدم استقرار الالتواء الموضعي. يمكن أن يحدث للألياف غير الموجهة التواء عقدي، كما يوضحه الشكل (8-19).



الشكل (19-8): صورة مجهرية لمقطع مصقول من عينة ألياف كربونية / راتنج إيبوكسي، تظهر العقد الالتوائية المتشكلة في منطقة الضغط لعينة اختبرت عند أربع نقاط التواء .

ويبين الشكل (20-8) تحطم مادة مركبة مقواة بألياف كربونية التي فشلت (انهارت) بهذه الطريقة في منطقة الانضغاط لعينة محملة على الانحناء بأربع نقاط. تبين الدراسات بأن معظم الانهيارات تحت تأثير الضغط المحوري هي من هذا النوع، الذي يشير إلى الالتواء اللدن الميكروي. من الضروري جداً لبدء هذه الآلية أن يحدث التشوه اللدن للمادة الحاضنة.



الشكل (20-8): صورة بمجهر المسح الإلكتروني لسطح تحطم صفيحة مادة مركبة من ألياف كربونية/ راتنج إيبوكسي بعد فشل انحناء الليف بسبب إجهاد الضغط الطولي.

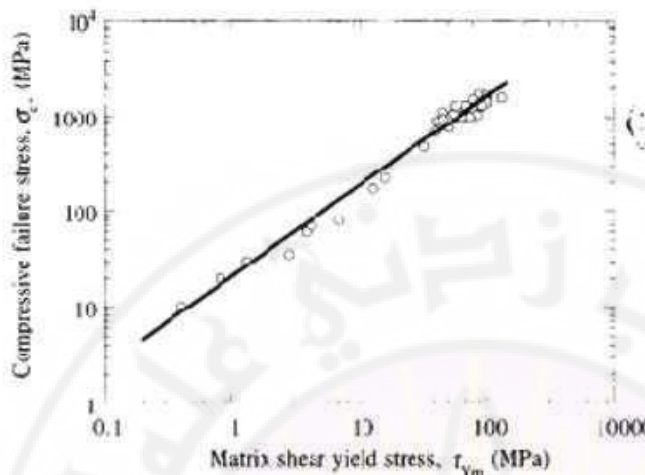
(a) صورة بالتكبير المنخفض تظهر سطح تحطم أملس.
(b) صورة بالتكبير العالي تظهر التحطم الناتج عن الشد والضغط في ليف واحد.

إن العوامل الرئيسية التي تؤثر على هذا النوع من عدم الاستقرار، بغض النظر عن محتوى الألياف هي إجهاد الخضوع على القص للمادة الحاضنة τ_{ym} ، و زاوية اختلاف محاذاة الليف $\Delta\Phi$. يعطى إجهاد الانهيار على القص بالعلاقة:

$$\sigma_c = \frac{\tau_{ym}}{\Delta\Phi} \quad (8-6)$$

حيث أن $\Delta\Phi$ تقاس بالراديان. لقد افترض أن النسبة الحجمية للألياف المحتواة في المادة الحاضنة كبيرة بشكل كاف حتى يرجح حدوث هذا النوع من الانهيار. من المتوقع في هذا النظام استقلالية إجهاد الانهيار عن كمية الألياف المحتواة. كما أنه من المفترض أن تكون متانة الرابطة السطحية كبيرة لنضمن ألا يؤدي التحميل إلى الانهيار الأولي نتيجة لفك الارتباط على السطح البيني.

أخذت البيانات في الشكل (8-21) من عدد من الدراسات المختلفة. تؤكد هذه البيانات وجود علاقة قوية بين إجهاد خضوع قص المادة الحاضنة و إجهاد الانهيار على الضغط للمادة المركبة. استنتج أفضل ميل خط لهذا الرسم البياني من المعادلة 6-8 لقيمة $\Delta\Phi$ مساوية تقريبا إلى 3° ، وهذه القيمة مقبولة فيزيائياً، حيث تساوي قيمة عدم المحاذاة في المواد المركبة وحيدة الاتجاه هذه القيمة تقريباً. يمكن أن تؤدي الأخطاء في هندسية قمت العينة إلى وصول قيمة عدم المحاذاة حتى $\sim 1^\circ$. تكون المواد المركبة التي تظهر محاذاة جيدة ذات متانة ضغط ممتازة. لذلك من الصعوبة التقدير الدقيق لوثوقية المعادلة 6-8، حيث أنه من غير الواضح ما هي كمية مجموعة الألياف المحتاج لها حتى تكون غير منحازة من أجل $\Delta\Phi$ لكي يبدأ تشكل العقد الإلتوائية. لذلك يحتاج هذا الجانب إلى أبحاث إضافية.



الشكل (21-8): إجهاد

(
الانهيار نتيجة الضغط لمواد
مركبة متنوعة وحيدة المحور.
أخذت من دراسات عدة،
رسمت بعلاقتها مع إجهاد
خضوع القص للمادة الحاضنة

يمكن كذلك أن تنهار المواد المركبة تحت تأثير الضغط المحوري بحدوث قص ماكروبي (يمكن أن تراه العين) على مستويات معينة. يجب أن يؤدي ذلك إلى تحطم الألياف أو التشوه الفادح للألياف. حيث أنه لا تنشأ إجهادات قص على أي مستوي مواز لمحور الليف، يحدث ذلك عند الحمولات المطبقة المماثلة لتلك الحمولات الضرورية المسببة لانهيار الشد المحوري.

يمكن أن تنخفض حمولات الانهيار نتيجة الضغط بصورة تدعو للانتباه إذا حدث التواء الليف. إن ذلك مفضل بالإجراءات التي تنقص جساءة المادة الحاضنة، مثل التسخين أو مع بعض المواد الحاضنة البوليميرية، أو التعرض لفترة طويلة للماء. كما يعطي أيضا الانخفاض في متانة الترابط عند السطح البيني تسهيلات لهذه العملية. أخيرا إن لقطر الليف تأثيرا كبيرا. فالألياف ذات القطر الكبير تقاوم بصورة كبيرة الالتواء من الألياف الرفيعة القطر. يمكن أن نستدل على حساسية قطر الليف من معادلة إيلر للالتواء Euler buckling formula ومن قيم مرونة الألياف .

إن المخطط البياني الإجهاد-الانفعال للمواد المركبة المعرضة لحمولة ضغط محورية مماثل للمخطط البياني الممثل لعملية الشد. حيث يكون بالبداية انخفاض قليل جدا في درجة الميل وإجهاد الانهيار تحت تأثير الضغط أقل. تعكس هذه التغيرات الانفعال وتطور الضرر الذي يحدث بتأثير الضغط عندما تصبح الألياف غير محاذاة. تصبح

اختبارات الضغط هذه بلا معنى إذا أتيحت لحدوث التواءات إيلر الماكروية. إذاً من الضروري التأكد من أن للعينة نسبة أبعاد منخفضة (الطول / القطر) أو تستخدم موجهات مناسبة ضد الالتواء.

استخدمت اختبارات الضغط على MMCs من أجل الحصول على معلومات حول تطور الضرر وآلية الانهيار، واهتمت أيضاً بالإجهادات المتبقية في المادة الحاضنة. يمكن أن يكون الاختلاف في سلوك خضوع المادة تحت تأثير حمولات الضغط والشد ذا علاقة بمستويات تلك الإجهادات المتبقية. كما يمكن الحصول على معلومات أخرى من اختبارات التحميل المعكوس، الذي تشوه فيه العينة بشكل لدن على الشد ومن ثم تتعرض لحمولات ضغط (أو العكس بالعكس).

تظهر MMCs التأثيرات الواضحة لـ Buschinger effect (خضوع أسهل بعد عكس الانسياب اللدن). ولقد تركز الاهتمام بشكل رئيسي على المواد المقواة بألياف غير مستمرة (مقطعة).

يمكن أن يحدث الانهيار نتيجة الضغط العرضي Transverse comprission تحت تأثير بعض الظروف، مشتملا القص على مستويات موازية لمحور الليف عندما يصل إجهاد القص من النوع τ_{32} (انظر الشكل 16-8) إلى القيمة الحرجة التي ستكون مماثلة في القيمة لـ τ_{12u} . إذا يتوقع هذا النوع من الانهيار عند تطبيق إجهاد ضغط مساوي لحوالي $2\tau_{12u}$ على مستويات مائلة بزاوية 45° بالنسبة لاتجاه الحمل المطبق وموازية لمحور الليف. على سبيل المثال، إذا أدت متانة الترابط إلى الانهيار بسبب خضوع القص ضمن المادة الحاضنة البوليميرية، عندئذ سوف يحدث ذلك بتأثير الضغط بشكل أقل من تأثير الشد.

8-3: انهيار الصفائح نتيجة تأثير الحمولات اللامحورية:

Failure of laminate under off-axis loads

يمكن فهم انهيار الصفائح المعرضة لحالة إجهادية في مستوي الصفيحة بآليات الانهيار الثلاثة (المعرفة بالقيم لـ σ_{1u} , σ_{2u} و τ_{12u}) المبينة بالشكل (1-8). (تم افتراض عدم

تواجد حمولات ضاغطة كبيرة ولجهادات عبر السماكة). تم اقتراح عدد من معايير الانهيار. المهم معرفة ما إذا كان هنالك أي من التأثيرات المتبادلة بين نماذج الانهيار.

1-3-8-معيار الإجهاد الأعظمي: Maximum stress criterion

افترض في معيار الإجهاد الأعظمي أن الانهيار يحدث عندما يصل الإجهاد الموازي أو الناضمي على محور الليف إلى قيمة الإجهاد الحرج. أي عندما يتحقق التالي:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\geq \sigma_{1u} \\ \sigma_2 &\geq \sigma_{2u} \\ \tau_{12} &\geq \tau_{12u} \end{aligned} \quad (8-7)$$

يمكن تقييم هذه الإجهادات من أجل أي نظام إجهاد $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ باستخدام المعادلة التالية:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

حيث تعطى قيمة $[T]$ بالمعادلة التالية:

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}$$

$$c = \cos \phi, s = \sin \phi$$

بمتابعة الإجهادات σ_1, σ_2 و τ_{12} مع ازدياد الحمل المطبق، نستطيع تحديد حدوث الانهيار بالنقطة التي يحدث فيها عدم المساواة لإحدى القيم في المعادلة (8-7). بملاحظة $[T]$ وباعتبار حمل الشد المطبق غير محوري، يمكن رسم المخطط البياني لقيم σ_x الضرورية لحدوث الانهيار بتأثير زاوية التحميل ϕ بين محور الإجهاد ومحور الليف، وذلك من أجل كل موديل من موديلات الانهيار الثلاثة:

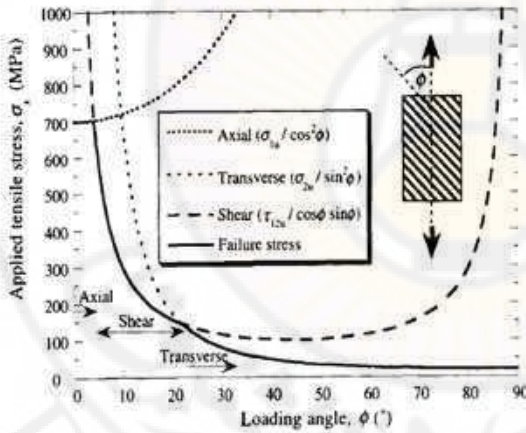
$$\sigma_{xu} = \frac{\sigma_{1u}}{\cos^2 \phi} \quad (8-8)$$

$$\sigma_{xu} = \frac{\sigma_{2u}}{\sin^2 \phi} \quad (8-9)$$

$$\sigma_{xu} = \frac{\tau_{12u}}{\sin \phi \cos \phi} \quad (8-10)$$

يبين الشكل (8-22) المنحنيات الثلاثة المرسومة باستخدام قيم τ_{12u} و σ_{1u} و σ_{2u} المناسبة لمادة مركبة صفائحية من البوليمستر المحتوي على 50% ألياف زجاجية (الجدول 8-2). يبين الخط المستمر تغيرات إجهاد الانهيار بازياد ϕ حسب معيار الإجهاد الأعظمي .

يتوقع نموذجياً الانهيار المحوري من أجل زوايا تحميل صغيرة جداً ولكن يمكن أن يحدث الانتقال من الانهيار على القص إلى الانهيار العرضي في أي مكان بين 20° و 50° بالاعتماد على القيم المحددة لـ σ_{2u} و τ_{12u} .



الشكل (8-22) تغير الإجهاد المطبق بتغير زاوية التحميل ϕ من أجل بداية أشكال فشل مختلفة للمادة المركبة الصفائحية من البوليمستر المحتوي على 50% ألياف زجاجية حسب معيار الإجهاد الأعظمي .

Other failure criteria

8-3-2 معايير أخرى للانهيار:

تم إجراء محاولات عديدة لتوقع انهيار المواد المركبة الحاوية على ألياف طويلة تحت تأثير الاجهادات المركبة، وبشكل خاص من أجل الإجهاد المستوي المطبق على الألياف المجدولة بشكل إفرادي في الصفيحة.

تعتمد أغلب الدراسات على توافقها مع قواعد خضوع المعادن. إن أكثر قواعد الخضوع شيوعاً هي قاعدة Tresca التي نقول إنه يحدث الخضوع عندما يصل إجهاد القص الأعظمي إلى قيمة حرجة.

يمكن كتابة ذلك على الشكل :

$$[(\sigma_p - \sigma_q)^2 - \sigma_y^2][(\sigma_q - \sigma_r)^2 - \sigma_y^2][(\sigma_r - \sigma_p)^2 - \sigma_y^2] = 0$$

حيث $\sigma_r, \sigma_p, \sigma_q$ الاجهادات الرئيسية و σ_y إجهاد الخضوع عند التحميل أحادي المحور .

عند الإجهاد المستوي يكون ($\sigma_r = 0$) وتصبح المعادلة (8-11) مساوية إلى :

$$\sigma_p - \sigma_q = \sigma_y \quad (8-12)$$

يقول معيار **von Mises** بأنه يحدث الخضوع عندما تصل طاقة الانفعال التشويهية (المغيرة للشكل) المخزنة في المادة للقيمة الحرجة، ويمكن التعبير عن ذلك بالعلاقة:

$$(\sigma_p - \sigma_q)^2 + (\sigma_q - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_p)^2 = 2\sigma_y^2 \quad (8-13)$$

تصبح العلاقة تحت ظروف الإجهاد المستوي :

$$\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_y}\right)^2 - \frac{\sigma_p \sigma_q}{\sigma_y^2} + \left(\frac{\sigma_q}{\sigma_y}\right)^2 = 1 \quad (8-14)$$

يجب أن يؤخذ بالحسبان عند تبني هذا المعيار لوصف انهيار المواد المركبة عدم التباين للمواد المركبة الحاوية على ألياف ويجب أن يؤخذ بالحسبان الاختلافات بين آليات خضوع المعدن وانهيار المواد المركبة .

يتعلق تأثير عدم التباين بالمعادن بأن المعادن منسوجة بشكل كبير لذلك تكون غير متباينة الخواص. تمت معالجة تأثير التباين على سلوك الخضوع وتم اشتقاق معيار معدل لمعيار خضوع **von Mises** للمعادن ذات التناسق العمودي (لها ثلاث مستويات

من التناسق) ويمكن كتابة هذا المعيار عند تأثير الإجهاد المستوي بالشكل:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1Y}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2Y}}\right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_{1Y}^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_{2Y}^2} + \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_{3Y}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12Y}}\right)^2 = 1 \quad (8-15)$$

حيث $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ الإجهادات المفروضة والعائدة إلى الاتجاهات المتعامدة في المستوي $\sigma_{1Y}, \sigma_{2Y}, \sigma_{3Y}, \tau_{12Y}$ إجهادات الخضوع على الشد والقص.

يتم إتباع هذا المعيار لانهيار المواد المركبة وحيدة الاتجاه عن طريق استبدال إجهادات الخضوع بإجهادات الانهيار المناسبة. وبما أن هذه المواد المركبة موحدة الخواص في الاتجاه العرضي فإن إجهادي الانهيار بالاتجاهين 2 و 3 متساويين و تصبح المعادلة :

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1u}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2u}}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_{1u}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12u}}\right)^2 = 1 \quad (8-16)$$

تدعى المعادلة السابقة بمعيار **Tasi-Hill** وتستخدم غالباً في برامج تحليل الصفائح. تعرف المعادلة بغطاء مساحة الإجهاد. إذا كانت حالة الإجهاد $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ تمتد لخارج هذا الغطاء أي إذا كان مجموع الحدود على الجانب اليساري مساوياً أو أكبر من الواحد، عند ذلك يكون الانهيار متوقعاً. إن آلية الانهيار غير معروفة على الرغم من أن فحص قيم المصطلحات في المعادلة (8-16) يعطي دليلاً على الانهيار حسب موديلات الأشكال الثلاثة للانهيار. يجب الانتباه إلى أن الإجهادات النازمية هي إجهادات الشد، حيث يمكن أن تكون قيم الانهيار مختلفة في الضغط (ويشكل خاص σ_{2u}). من أجل إجهاد شد وحيد مطبق $\sigma_\phi = \sigma_x$ (بالنسبة لزاوية ϕ إلى محور الألياف) وتكتب المعادلة (8-16) كما يلي:

$$\sigma_\phi = \left[\frac{\cos^2 \phi (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi)}{\sigma_{1u}^2} + \frac{\sin^4 \phi}{\sigma_{2u}^2} + \frac{\cos^2 \phi \sin^2 \phi}{\tau_{12u}^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (8-17)$$

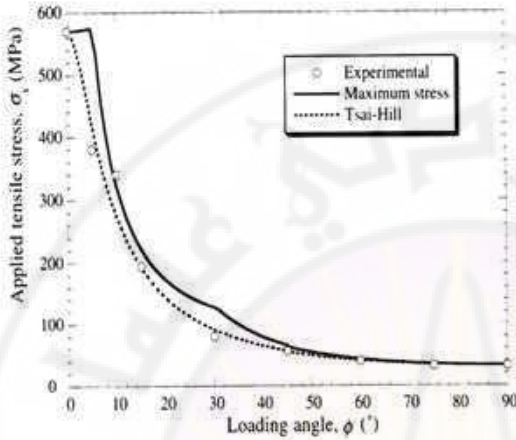
تعطي هذه المعادلة الإجهاد المطبق المتوقع عنده الانهيار كتابع لزاوية التحميل ϕ .

8-3-3 معطيات تجريبية لطبقة صفائحية واحدة:

Experimental data for single laminate

يبين الشكل (8-23) تنبؤات معيار الإجهاد الأعظمي لـ Tasi و Hill والناتجة باستخدام نفس مستويات الإجهاد الحرجة $\sigma_{1u}, \sigma_{2u}, \tau_{12u}$. تتطابق هذه القيم الحرجة مع المعطيات التجريبية لصفحة مواد مركبة من الإيبوكسي المحتوي على 50% ألياف كربون. تم أخذ العينات المختبرة على الشد بقطع قطع مربعة مستوية بزوايا مختلفة بالنسبة لاتجاه الألياف. إن المعطيات التجريبية تلائم منحني Tasi و Hill أفضل ما

يمكن عند عينة بزاوية $\phi = 30^\circ$ التي تمت دراستها على الفشل عند كل من القص والشد العرضي .

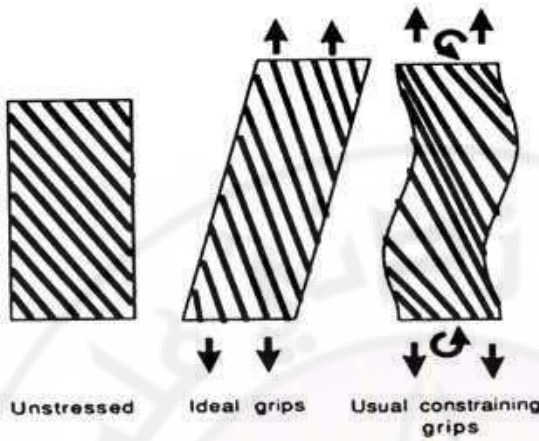


الشكل (8-23) اعتماد إجهاد الشد المطبق لحدوث الانهيار بالنسبة لصفحة مادة مركبة من الإيبوكسي المحتوي على 50% ألياف الكربون على زاوية التحميل . يبين المخطط المعطيات التجريبية مع التنبؤات من معيار الإجهاد الأعظمي لـ Tsai و Hill

من المناسب التنويه إلى أن هناك صعوبات محددة في تنفيذ الاختبارات للحصول على معطيات عن الإجهاد الحرج من أجل حالات الفشل المختلفة. على سبيل المثال تصادفنا عدة تعقيدات في اختبار الشد الأساسي غير المحوري .

يبين الشكل (8-24) أحد هذه التعقيدات ويظهر الشكل أن تبادل التداخل للشد والقص يمكن أن يسبب تشويهاً للصفحة الواقعة تحت الحمل، كمثال على ذلك التقييد المفروض بنظام قمت القطعة (الإمساك غير الصحيح للقطعة المختبرة) الذي ينتج إجهادات معقدة غير منتظمة.

بالإضافة لذلك فإن من الصعب إمساك العينات دون انزلاق، وتكون تأثيرات الحواف مهمة، وليس هناك حرية في اختيار $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ بشكل مستقل للتمييز بفعالية بين معيار الانهيار.



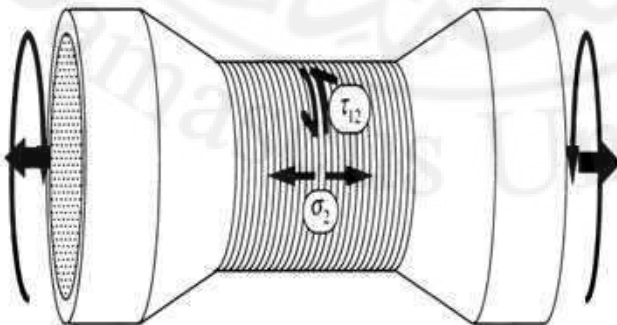
الشكل (8-24) تأثير القمط والتقييد على اختبار صفحية تحت أحمال غير محورية تحت ظروف كنشوء تداخل متبادل ما بين انفعالات الشد والقص .

نوع آخر من الاختبارات هو إنتاج عينات أنبوبية واختبارها تحت ترتيبات متنوعة للإجهادات المطبقة. إن أداء الأنواع المختلفة من الأنابيب والمواسير المصنوعة من المواد المركبة (وبشكل خاص المؤثر عليها ضغط داخلي) ذو أهمية تجارية.

يبين الشكل (8-25) تركيبة على شكل أطواق مع قابلية تطبيق شد /أو فتل . يمكن أن يطبق أي تركيب من σ_2 و τ_{12} مع إجهاد حلقي صفري σ_1 . من أجل أنبوب رقيق الجدار وبقطر d وبسماكة جدار $t \ll d$. نحصل على إجهاد القص في الجدار من عزم الفتل المطبق T (N.m) باستخدام العلاقة :

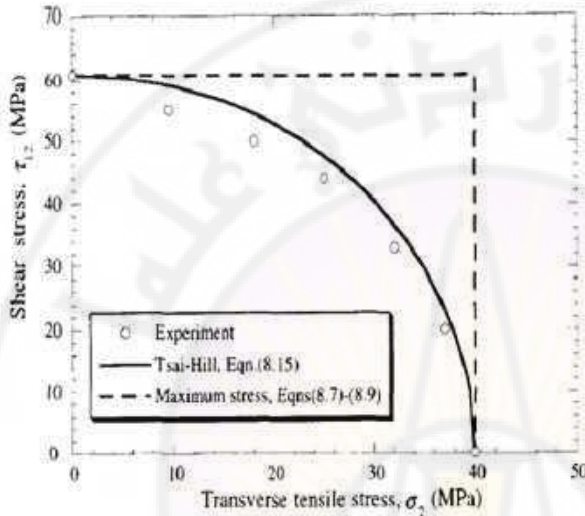
$$\tau_{12} = \frac{2T}{\pi d^2 t} \quad (8-18)$$

يمكن تطبيق عزم كبير دون حدوث انزلاق في المماسك وذلك باستخدام مماسك ذات قطر أكبر من الأنبوب المختبر كما هو مبين في الشكل (8-25).



الشكل (8-25) توضيح تخطيطي لكيفية تعرض أنبوب ملفوف عليه أطواق لشد وفتل في آن واحد واستخلاص آليات الانهيار وقواعده.

تغطي البيانات حسب الشكل (8-26) تركيبات متعددة لـ σ_2 و τ_{12} التي تنتج انهياراً في أنابيب المواد المركبة من الإيبوكسي المحتوية على 65% ألياف زجاجية على شكل أطواق.



الشكل (8-26) مقارنة بين معطيات الفشل التجريبية التي تم الحصول عليها من خلال اختبارات الشد والقتل المركبة والمطبقة على أنابيب مادة مركبة من الإيبوكسي المحتوي على نسبة 65% ألياف زجاجية على شكل أطواق. وتوقعات من قواعد الإجهاد الأعظمي و Tsai-Hill .

إن ظروف الفشل بسيطة لكلا المعيارين. تعطي نظرية الإجهاد الأعظمي الخطين التاليين $\tau_{12} = \tau_{12u}$ و $\sigma_2 = \sigma_{2u}$ كنهايات حدية وتبسط حالة Tsai-Hill حيث تصبح المعادلة (8-16) بالشكل التالي:

$$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2u}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12u}}\right)^2 = 1 \quad (8-19)$$

تعطي قاعدة Tsai-Hill تنبؤ أكثر وثوقية وذلك حسب البيانات في الشكل (8-26). على الرغم من أن قاعدة Tsai-Hill مفيدة إلا أنها لا تعتمد على نظرية دقيقة جداً ولا يمكن تطبيقها على كل الحالات.

8-4 - متانة الصفائح: Strength of laminates

تتغير الإجهادات الواقعة في صفيحة تحتوي طبقات متقاطعة والواقعة تحت قوة شد وحيدة المحور بتغير زاوية التحميل. عندما تعرف هذه الإجهادات (بدلالة الحمل المطبق) يمكن تطبيق معيار الانهيار المناسب ويمكن التنبؤ ببدء الانهيار المحتمل وطبيعته. إلا أنه لا يعني فشل طبقة فردية في صفيحة أن كامل القطعة لم تعد صالحة للاستخدام لأنه قد

تكون الطبقات الأخرى قادرة على الصمود بشكل جيد وتحت أحمال أكبر دون حدوث الانهيار.

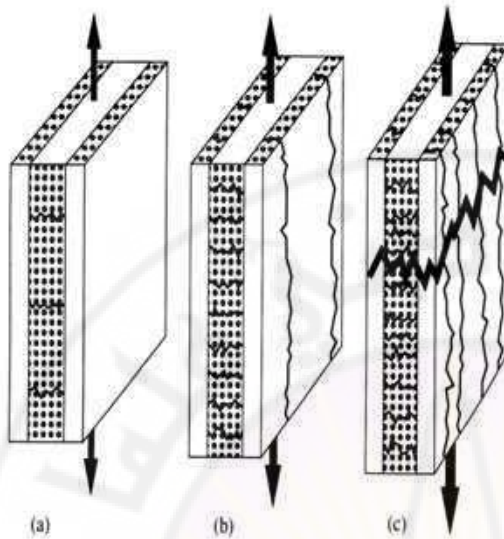
إن تحليل سلوك المادة بعد المرحلة المرنة الابتدائية معقد بسبب عدم التأكد من الدرجة التي تستمر عندها الطبقات المخربة بتحمل بعض الحمل. ومع ذلك يمكن إجراء حسابات مفيدة في هذا النظام (على الرغم من أن الاهتمام يتركز على تجنب حدوث أي تخراب في القطعة الأساسية).

1-4-8 التصدع الناتج عن الشد: Tensile cracking

لدى دراسة صفيحة مؤلفة من طبقات متقاطعة (0/90) محملة على الشد على طول أحد اتجاهات الألياف. تبين أن فعل الإجهادات في كل طبقة للمادة المركبة من الإيبوكسي المحتوي على 50% ألياف زجاجية، يحتمل حدوث الانهيار بسبب الشد المحوري أو العرضي في أي طبقة وذلك لعدم وجود إجهادات قص تؤثر على المستويات الموازية لاتجاه الألياف. ويبين الشكل (8-27) تخطيطياً تتابع الانهيار عندما تحمل الصفيحة بشكل متزايد.

حسب قيم ϵ_{11} و ϵ_{22} المعطاة في الجدول (8-2) تنهار أولاً الطبقات العرضية كما هو مبين في الشكل (8-27) (a) على الرغم من أنها مجهدة بإجهاد قيمته أقل بكثير من إجهاد الطبقات المحورية.

بما أن معظم الحمل مطبق على الطبقات المحورية (حوالي 85%) فإن تشقق الطبقات العرضية لا يزيد كثيراً من الإجهاد σ_1 وتبقى الطبقات المحورية غير متضررة. عندما يزداد الإجهاد المطبق يحدث الضرر التالي وهو التشقق الموازي للألياف في الطبقات المحورية الشكل (8-27) (b). ينتج هذا التشقق عن إجهاد الشد σ_2 مما يزيد مقاومة الطبقات العرضية لتقلص بواسون الجانبي للطبقات المحورية. تشكل هذه الإجهادات حوالي 7% من الإجهاد المطبق.



الشكل 8-27: تحميل صفيحة مؤلفة من طبقات متقاطعة بشكل مواز لأحد اتجاهات الألياف .

a : تشقق الطبقات العرضية عندما تصل σ_2 إلى σ_{2u} .

b : بداية التشقق الموازي للألياف في الطبقات المحورية عندما تصل σ_2 إلى σ_{2u} (من منع تقلص بواسون) .

c : الانهيار النهائي عندما تصل σ_1 في الطبقات المحورية إلى σ_{1u} .

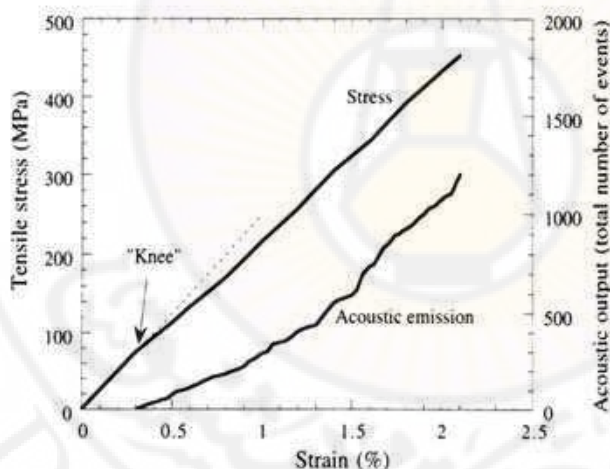
من أجل المقارنة بين الإجهادات σ_1 و σ_2 في الطبقات المحورية نفترض حالة حدية حيث أن التشقق في المستويات العرضية قد جعلها خالية من الإجهاد في اتجاه التحميل، وبذلك يصل الإجهاد في الطبقات المحورية σ_1 إلى ضعف الإجهاد المطبق. (تتحمل الطبقة المحورية كل الحمل المطبق، وتشكل الطبقة المحورية نصف سماكة العينة).

إن قيمة σ_1 في الطبقات المحورية تحت هذه الظروف أكبر بحوالي ثلاثين مرة من قيمة σ_2 . ومع ذلك تتغير النسبة $(\sigma_{1u}/\sigma_{2u})$ من حوالي 30 إلى 60 ضعف للمواد المركبة المصنعة من البولييميرات الثلاثة المصنفة في الجدول (8-2). لذلك تلاحظ الشقوق العرضية في الطبقات المحورية قبل الانهيار النهائي المبين في الشكل (8-27). (c)8. ن هذا التشقق أقل احتمالاً في المواد الحاضنة (matrices) المعدنية، حيث يكون فيها النسبة σ_{1u}/σ_{2u} أصغر والإجهادات σ_2 أصغر، وذلك بسبب أن معامل بواسون للمادة الحاضنة منخفض، وتطبق نفس المناقشة على الصفائح ذات المادة الحاضنة السيراميكية).

على الرغم من أن الصفائح الظاهرة في الشكل (8-27(b)) غير محطمة بشكل كامل لا أنها تحوي ضرراً ميكروبياً واسعاً. إن شبكة بقوق الصفيحة ممررة للغازات والسوائل من خلال جدرانها، إحكام الضغط مهم في أوعية الضغط. حيث إنه يسرع دخول سوائل

مساعدة (التسرب) على الانهيار النهائي- مثال تأثير الحمض المخفف المبين في الشكل (8-10).

يبين الشكل (8-28) مخططاً من جهاز الإصدار السمعي. تم إجراء هذه القياسات على المرسل الكهربائي الموصول إلى سطح العينة، الذي يلتقط الأمواج المرنة الناتجة عن ظهور الشقوق ونموها. يظهر بداية التشقق العرضي على شكل كل من إشارة سمعية وانتشاء في منحنى الإجهاد/الانفعال، ينتج ذلك عن نقصان في صلادة العينة عندما لا تحمل الطبقات العرضية. يلاحظ نقصان الصلادة في البداية، ولكنه يستمر حتى مدى من الانفعال. عندما تصبح الشقوق في الطبقة العرضية أكثر قرباً بعضها من بعض. تحمل الطبقات المحورية كل الحمل ويصبح ميل المخطط ثابتاً مرة ثانية. تحدد عوامل كثيرة تفاصيل كيفية نشوء الشقوق العرضية.

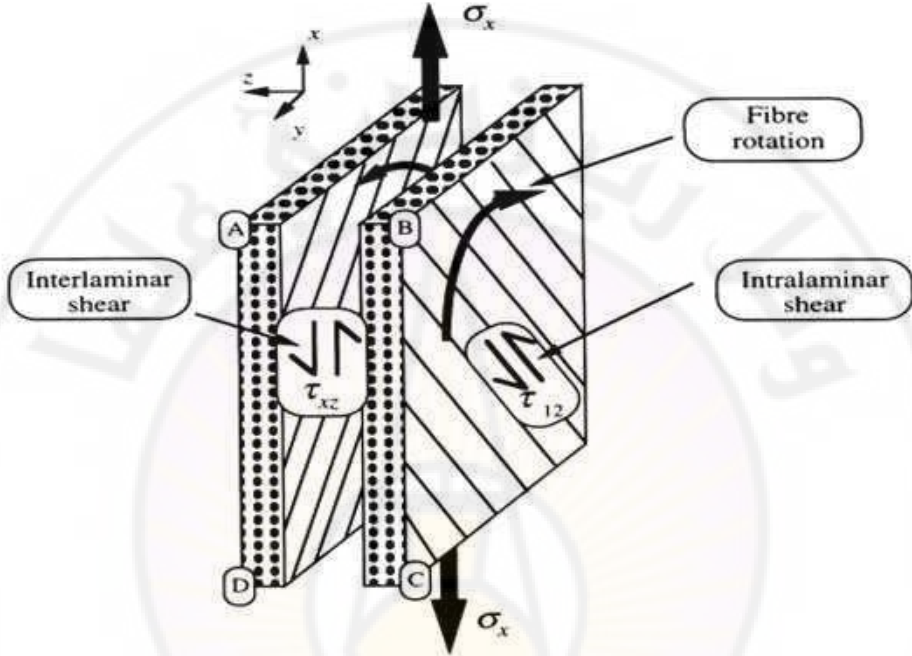


الشكل (8-28) المخطط النموذجي للإجهاد-الانفعال ومخطط الإصدار السمعي للصفحة ذات الطبقات المتعارضة والمختبرة بالشد المحوري.

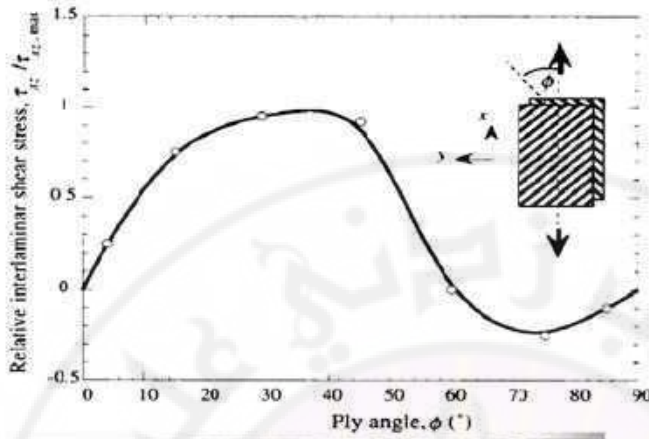
8-4-2 الإجهادات داخل الصفحة: Inter-laminar stresses

من مصادر الضرر في الصفائح المجردة الإجهادات داخل الصفحة. تحدث الإجهادات المتقابلة عبر سماكة الصفحة تشوهات التي يمكن تقليلها باستخدام " الموازنة " الأوتاد المتسلسلة. يوجد أيضاً داخل الصفائح إجهادات قص تعمل على نقل الحمل بين الصفائح مما قد يزيد التشقق داخل الصفائح.

تظهر إجهادات القص τ_{xz} من دوران الصفيفة المفردة كما هو مبين في الشكل (29-8)
 (8) للصفيفة ذات الطبقات المتوضعة فيها الألياف بزاوية.



الشكل (29-8) يبين كيف يولد إجهاد الشد المحوري في الصفائح المتوضعة فيها الألياف بزاوية مع إمكانية دوران أجزاء الرقاقة، مما يزيد من قيمة إجهادات القص داخل الصفيفة .
 يتناسب إجهاد القص الناتج عن الدوران مع طواعية التفاعل S_{16} من أجل إجهاد الشد المطبق. وبحسب زاوية التحميل فمن أجل زاوية التحميل أقل من 60° تميل الألياف للدوران بحيث تتوضع ناظرية على اتجاه التحميل، هذا واضح من البيانات في الشكل (30-8) التي تظهر النتائج الحاسوبية. حيث تتمثل مضاعفات τ_{xz} كتابع لزاوية توضع الألياف ϕ لصفيفة متعددة الطبقات الزاوية من الراتنج/إيبوكسي.
 يبين الشكل (31-8) الضرر الناتج عن هذه الإجهادات بالصورة المجهرية للسطح المرمز بـ ABCD بالشكل (29-8). يتضح قص المادة الحاضنة من انزياح علامات الصقل عبر XX، بينما حدوث حركة المستوي واضحة من اختلاف الوضوح المحرقى للمجهر لكلا جانبي الشق.



الشكل (8-30) يبين المخطط البياني لإجهادات القص داخل الصفحة وتغيرها مع زاوية توضع الألياف ϕ وذلك لصفحة الراتنج / ألياف الكربون المتوضعة بزاوية.

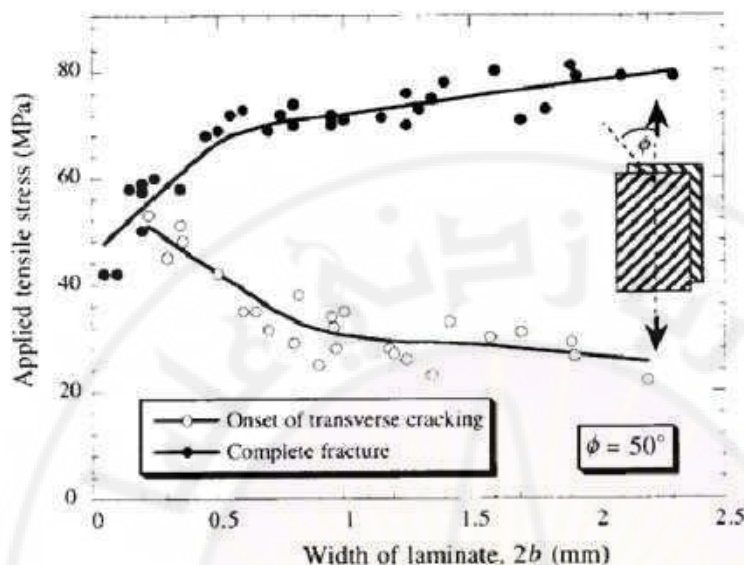


الشكل (8-31) صورة مجهرية للسطح المرمز بـ ABCD بالشكل (8-29). وذلك لصفحة البوليستر / ألياف الزجاج المتوضعة بشكل زاوية.

8-4-3- تأثيرات الحافة: Edge effects

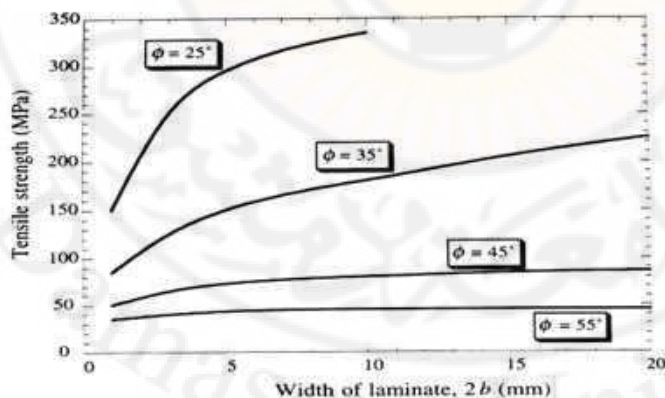
يعتمد الفشل بالقص داخل الصفحة المبين بالشكلين (8-29 و 8-31) على عرض العينة. ينشأ هذا الضرر على سطح الحافة الجانبية كما هو مبين بالشكل (8-29) الرمز ABCD. ويمكن أن يكون له دور مسيطر على الانهيار الكلي للصفائح الرقيقة. يبين الشكل (8-32) هذا التأثير الذي يبين تبعية عرض العينة للإجهادات التي يحدث عندها التشقق العرضي والتحطم النهائي وذلك لصفحة متوضعة فيها الألياف على الزوايا $50^{\circ} \pm$.

يصبح تشقق القص داخل الصفحة النموذج المسيطر للانهيار ويمكن أن يحدث تحت تأثير إجهاد مطبق قليل وتتخامد التشققات العرضية بشكل كامل إذا كانت العينة ضيقة جداً. هذه التأثيرات أكثر وضوحاً في الصفائح ذات الرقاقت الزاوية المتوقع فيها أكبر قيمة لـ τ_{xz} . بالإضافة إلى ذلك تزداد قيمة إجهاد التحطم بنقصان قيمة ϕ وتزداد قيمة



الشكل (8-32)
تأثير عرض عينة
الاختبار على إجهاد
الشد من أجل
التشقق العرضي
والتحطم الكامل
لصفائح برقاقات
زاوية $\phi = 50^\circ$
(مادة المركبة من
البوليستر / 50%
ألياف زجاجية.

σ_1 بالنسبة إلى قيمة σ_2 وقيمة τ_{12} كما هو مبين في الشكل (8-33). لذلك يجب تحديد عرض العينة المناسب لذلك الاختبار. تسمح عينات الصفائح ذات الرقاقات الزاوية لعرضة جداً من التخلّص من أثر القص داخل الصفيحة وهذا هو أحد أسباب الاهتمام باختبار الأنابيب.



الشكل (8-33) تأثير
عرض عينة الاختبار
على متانة تحطم الشد
لصفائح متعددة
الطبقات الزاوية من
البوليستر / 50% ألياف
زجاجية، من أجل زوايا
مختلفة.

8-5- انهيار الأنابيب بتأثير الضغط الداخلي:

Failure of tubes under internal pressure

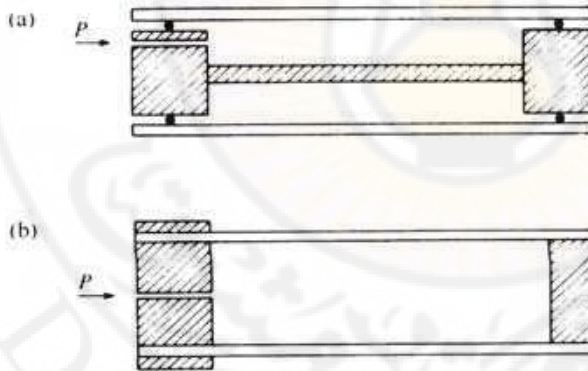
بالإضافة إلى الأهمية الصناعية لسلوك لانهيار أنابيب المواد المركبة بتأثير الضغط الداخلي. يقدم هذا النموذج للاختبار طريقة مناسبة لتوليد حالة إجهادية مختارة في

الصفحة مع تجنب تعقيدات تأثيرات الحافة. يؤثر الضغط الداخلي p على السطح الأسطواني للأنبوب ليسبب إجهاداً حلقياً في جدار الأنبوب σ_H ويولد على النهاية المحكمة الإغلاق إجهاداً محورياً σ_A . إذا كانت سماكة جدار الأنبوب أقل بكثير من نصف قطر الأنبوب . تعطى عند ذلك الإجهادات بالعلاقات التالية :

$$\sigma_H = \frac{Pr}{t} \quad (8-20)$$

$$\sigma_A = \frac{Pr}{2t} = \frac{\sigma_H}{2} \quad (8-21)$$

استخدم نموذجين للاختبار كما هو مبين بالشكل (8-34). يتم التخلص من الإجهادات المحورية أي $\sigma_A = 0$ عندما يتم حصر الضغط بممانعات مطاطية بشكل " O " ويستطيع الأنبوب الانزلاق عليها بحرية. يعطى الإجهاد المحوري بالعلاقة (8-21) عندما يتم إحكام نهايتي الأنبوب. تستخدم بطانة مطاطية لمنع تسرب السائل المضغوط وذلك عندما يراد أن يستمر الاختبار إلى ما بعد نشوء الشقوق وحتى الانهيار النهائي.



الشكل (8-34) رسماً
تخطيطياً يوضح تصميم اختبار
الأنبوب.

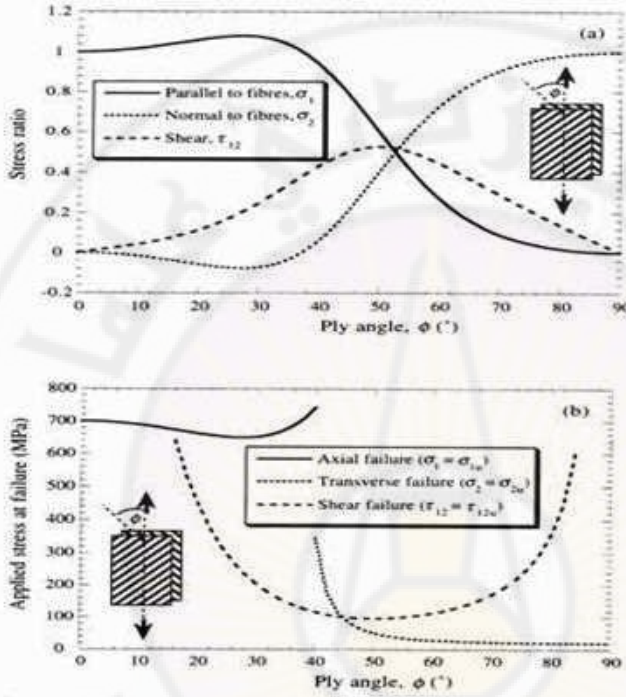
(a) تحميل للطوق بشكل
صافي $\sigma_A = 0$.

(b) تحميل طوقي ومحوري
 $\sigma_A = \frac{Pr}{2t} = \frac{\sigma_H}{2}$.

8-5-1- تحميل الطوق بشكل صافي: Pure hoop loading

تصنع الأنابيب المتعددة الطبقات الزاوية باستخدام طرق لف الشعيرة. يتعرض جدار الأنبوب عندما يختبر تحت تأثير التحميل الطوقي الصرف باستخدام التركيبة المبينة بالشكل (8-34-a) إلى نفس شروط التحميل كما في اختبار الصفائح المستوية تحت تأثير حمل الشد أحادي المحور. يمكن التنبؤ بإجهادات الانهيار باستخدام معيار الانهيار

و تقاس القيم التالية $\sigma_{1u} - \sigma_{2u} - \tau_{2u}$. يبين الشكل (8-35) النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام معيار الإجهاد الأعظمي.

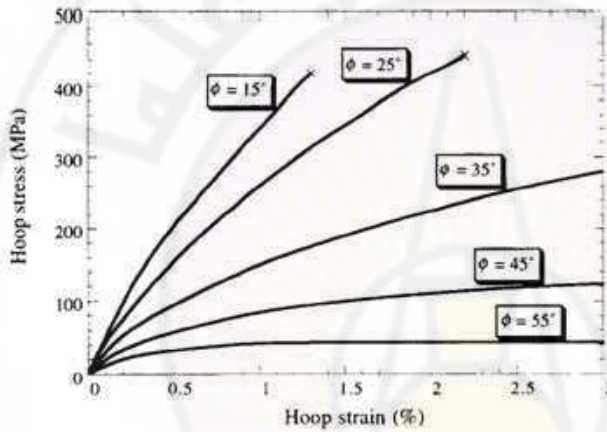


الشكل (8-35) يبين:
 (a) الإجهادات الداخلية
 للطبقات بالنسبة لإجهاد
 الشد المطبق.
 (b) الإجهاد المطبق
 اللازم لحدوث الفشل
 وذلك بالنسبة لزاوية
 الرقاقة ϕ لصفحة برقاقة
 زاوية بوليستر / 50%
 ألياف زجاجية.

تبين هذه النتائج كيف يتغير كل من الإجهاد في الرقاقات ولجهاد التحطم مع زاوية الرقاقة ϕ وذلك لصفائح البوليستر / 50% ألياف زجاجية. (القيم المستخدمة من أجل $\sigma_{1u} - \sigma_{2u} - \tau_{2u}$ هي تلك القيم الموجودة في الجدول 8-2). مخطط إجهاد الانهيار الشكل (8-35-b) ليس مماثلاً للمخطط المبين بالشكل (8-22) للصفحة المفردة. يظهر الاختلاف بسبب القيد المفروض على كل رقاقة بسبب وجود الرقاقة الأخرى. يمكن تقدير إجهاد الطوق على الانهيار بواسطة المعالجة المنعزلة للرقاقة المفردة، وبذلك يمكن استخدام العلاقة (8-16). يمكن أيضاً تطبيق أسلوب مماثل عندما يتواجد كلا الإجهادين المحوري والطوقي.

تقود الدراسات التجريبية على سلوك الإجهاد الانفعال لمثل هذه الأنابيب إلى بيانات حسب الشكل (8-36). باستمرار تقدم الشقوق يبتعد المنحني عن الشكل الابتدائي

(كنتيجة لبعض السيلان اللزج اللدن للمادة الحاضنة الراتنجية). تظهر بداية عدم الخطية بشكل ميكرو للصفائح المتعددة الطبقات ذات الزوايا (زاوية الألياف داخل الطبقة) الأكبر، كما هو متوقع من الشكل (8-35-b) يحدث الضرر الابتدائي بواسطة التشقق العرضي وذلك من أجل قيمة ϕ أكبر من 40° ، لكن لا يمكن أن يحدث ذلك للقيم الأقل حيث يصبح σ_2 سالب القيمة الشكل (8-35-a). تحدث عدم الخطية في هذه الحالات كنتيجة لانزياح القص.

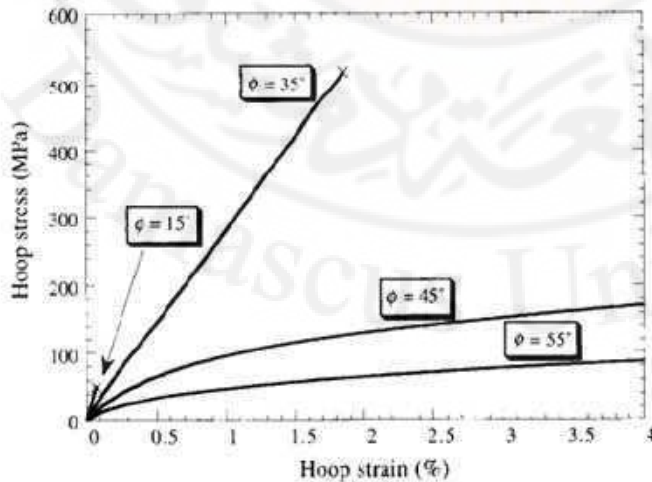
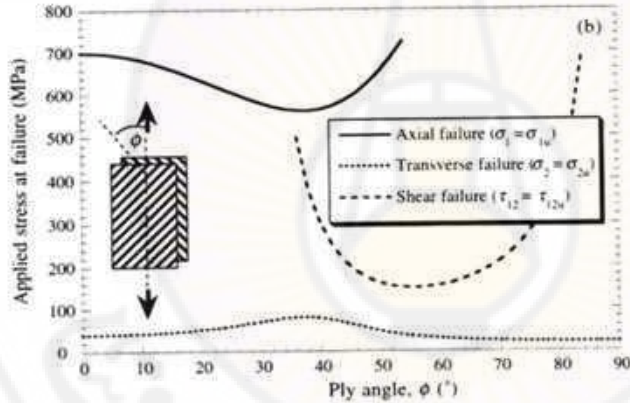
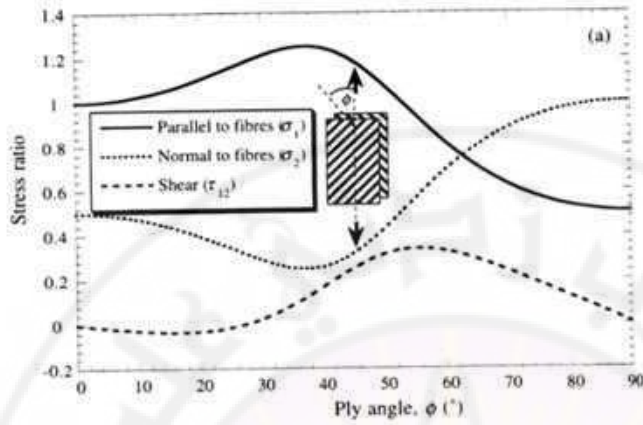


الشكل (8-36) منحنى إجهاد الطوق بالنسبة لانفعال الطوق وذلك لأنابيب صفائحية برقاقات زاوية من البوليمستر 50% ألياف زجاجية اختبر على تحميل طوقي صرف.

8-5-2- التحميل المتحد المحوري والطوقي:

Combined hoop and axial loading

تتعرض الصفيحة المشكلة للأنبوب عندما يختبر الأنبوب المحكمة نهايته كما بالشكل (8-34-b) إلى إجهادات شد ثنائية المحور وهي إجهادات شد σ_H في اتجاه الطوق وإجهادات $\sigma_A = \frac{Pr}{2t} = \frac{\sigma_H}{2}$ ناظرية على الإجهاد المحوري. نتائج هذه الحالة مبينة بالشكل (8-37). الإجهاد العرضي في هذه الحالة إجهاد موجب وكبير ويؤدي إلى نموذج بدء الانهيار بالتشقق العرضي لكل الرقائق الزاوية. يمكن مقارنة هذا التوقع مع البيانات التجريبية للإجهاد-الانفعال المبينة بالشكل (8-38). يظهر بدء الانهيار في كل الحالات كما تم توقعه بالتشقق العرضي. محدثاً الابتعاد عن الخطية عند الإجهادات المنخفضة. وتأخر هذه الحالة أكثر للصفيحة ذات الزاوية 35° .



الشكل (8-37) يبين:
(a) إجهادات الطبقات
بالنسبة لإجهاد الشد
المطبق.

(b) الإجهاد المطبق اللازم
من أجل حدوث الفشل
وذلك بالنسبة لزاوية
الرقاقة ϕ وذلك لصفحة
برقاقة زاوية بوليستر
50% ألياف زجاجية.
يوجد كذلك إجهاد شد ثاني
مطبق عامودي على
إجهاد الشد الأول ويساوي
مرة ونصف من قيمة الأول
كما هي الحالة في الأجزاء
المضغوطة داخليا.

الشكل (8-38) منحنى
إجهاد الطوق بالنسبة
لأنابيب وذلك لأنابيب
صفانحية برقاقات زاوية من
البوليستر 50% ألياف
زجاجية اختبر بتحميل متحد
محوري وطوقي.

3-5-8- تحليل الشبكة: Netting analysis

يفترض في تحليل الشبكة أن يدعم الحمل فقط بالألياف. وبذلك $\sigma_2 = \tau_{12} = 0$. لا يمكن إجراء التحليل الدقيق لمثل هذه الحالة، ولكن يمكن إجراء التقدير التقريبي كما يلي: يعتبر في الصفيحة ذات الرقاقة الزاوية كل صفيحة رقاقة مستقلة وتتخذ زاوية الرقاقة ϕ الزاوية بين محور الليف والمحور X (أي اتجاه الطوق). باستخدام علاقة الإجهادات المطبقة والإجهادات الداخلية مع $\sigma_x = \sigma_H, \sigma_y = \frac{\sigma_H}{2}$ و $\sigma_2 = \tau_{12} = 0$ يكون لدينا :

$$\begin{aligned}\sigma_H &= \sigma_1 \cos^2 \phi \\ \frac{\sigma_H}{2} &= \sigma_1 \sin^2 \phi\end{aligned}\quad (8-22)$$

هنالك ارتباطك بهذه المعادلات بسبب أن قيمة σ_1 في علاقات سابقة تساوي إلى: $\sigma_1 = \sigma_H \cos^2 \phi + (\sigma_H \sin^2 \phi)/2$ ولا يمكن أن تتجاوز قيمة σ_H . يظهر ذلك بسبب أنه لا تستطيع الرقاقة المفردة دعم إجهادات الطوق والإجهادات المحورية، والمحافظة على $\sigma_2 = 0$ دون أن تمنع الرقاقة الأخرى من الفشل بالاتجاه العرضي. باعتماد هذا التحليل المبسط توجد قيمة مميزة للزاوية ϕ التي تطبق عندها كلا المعادلتين (8-22) إن قيمة الزاوية ϕ تساوي:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1}{2^{1/2}} \right) \approx 35^\circ \quad (8-23)$$

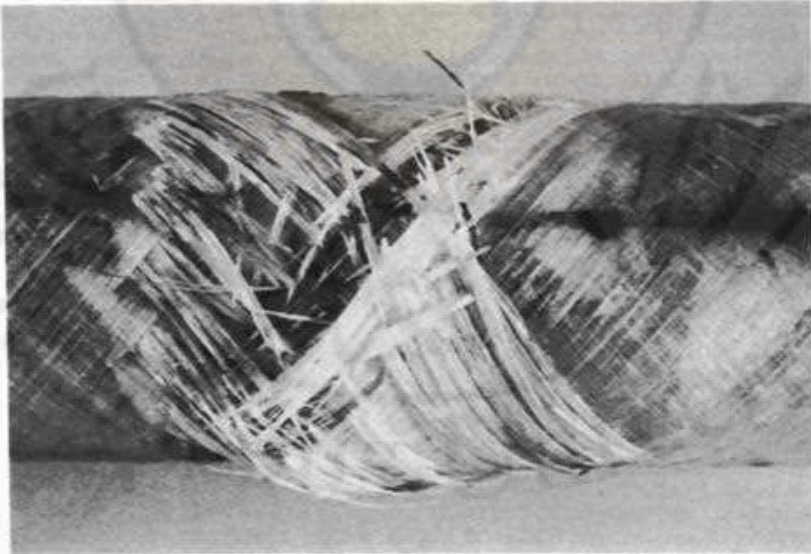
تدعى قيمة ϕ بالزاوية المثالية للأنايب المضغوطة داخلياً. إذا صحت افتراضات تحليل الشبكة، عند ذلك يجب أن تدور الألياف باتجاه الزاوية 35° بالصفائح ذات الرقاقات الزاوية غير المساوية لقيمة 35° . لاحظ السلوك في الشكل (8-38)، الذي يبين إجهادات انهيار أكبر بكثير من الزاوية 35° . يحتاج عملياً لدوران الصفائح الأخرى باتجاه هذه الزاوية ويحدث الضرر الشديد للمادة الحاضنة وتحطم الألياف. يمكن أن يستخدم التحليل لاستكشاف الصلادة بعد بدء الضرر. تساوي قيمة إجهاد التحطم النهائي باستخدام شروط تحليل الشبكة والزاوية $\phi = 35^\circ$ إلى:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_H}{\cos^2 \phi} = 1.5\sigma_H \quad (8-24)$$

تسهم الألياف بالصلادة ($E_1 = f.E_f$)، وحيث تتساوى في هذه الحالة انفعالات الليف والمحور والطوق، تعطى صلادة الطوق بالعلاقة التالية:

$$E_H = \frac{E_f f}{1.5} \quad (8-25)$$

قيمة E_H للبوليستر/50% ألياف زجاجية بحدود 25-30 GPa، تتوافق هذه القيمة مع التدرج المنحني للزاوية $\phi = 35^\circ$ في الشكل (8-38)، بعد الجزء الأولي، يمكن أن تقارن مع قيمة جزء اللدونة المساوية إلى حوالي 90-100 GPa، تم الحصول على كلتا القيمتين تجريبياً ومن تحليل الصفيحة. يحدث الانهيار النهائي عند إجهاد $\sigma_H \sim 500 \text{ MPa}$ معطياً قيمة σ_{12} مساوية إلى حوالي 750 MPa، بما أن متانة الليف بحدود 1.5 GPa. إن هذه القيمة مساوية إلى حوالي نصف قيمة متانة الألياف الزجاجية لمسحوبة حديثاً (بعد التصنيع مباشرة). يبين الشكل (8-39) شكل موقع التحطم النهائي.



الشكل (8-39) صورة لمنطقة التحطم النهائي لأنبوب رقاقة زاوية أختبر على شد ثنائي المحور. تشكل شق موازي لمجموعة من الألياف وحدث تحطم الألياف بالمجموعة الأخرى.



الفصل التاسع

جساءة المواد المركبة

Toughness of composites

- 1- ميكانيك التحطم.
- 2- الإسهامات في عمل التحطم.
- 3- نمو الشق الحرج الفرعي.



9-1- مقدمة: Introduction

درست الفصول السابقة العوامل المؤثرة على المتانة والمتعلقة بالإجهادات التي يحدث عندها عطب وانهييار المواد المركبة. إن الطاقة الممتصة بالمادة بتأثير الحمل مهمة. المادة الجاسئة هي تلك المادة التي تحتاج إلى كمية كبيرة من الطاقة لإحداث الانهييار. تتوفر في أشكال تحميل متعددة كمية طاقة متناهية في الصغر لإحداث الانهييار كما في حالة ضرب الجزء بواسطة مقذوف. نحتاج في حالات أخرى إلى درجة انفعال متناهية في الصغر لكي تصبح الإجهادات صغيرة كما في حالة ازدياد الحمل من تغيرات درجة الحرارة. في مثل هذه الحالات الخاصة التي تحدد ملائمة المادة خاصية الجساءة وليس خاصية المتانة. درس هذا الفصل ميكانيك التخطم باختصار، مع دراسة طاقة تحطم السطح البيني مع دراسة مصادر امتصاص الطاقة في المواد المركبة. درست بالنهاية المواد المركبة من حيث النمو البطيء للشق للحالات غير المفضل فيها من حيث الطاقة التخطم السريع.

9-2- ميكانيك التخطم: Fracture mechanics

9-2-1- مبادئ أساسية: Basic concepts

تعود دراسة ميكانيك التخطم إلى العالم Inglis (1913)، الذي بين أنه في المادة المعرضة للحمولة تكون الإجهادات بالقرب من طرف الشق أكبر بكثير من الإجهادات في المادة كلها، σ_∞ . تبين العلاقة التالية الإجهاد على طرف شق ذي الطول c (أو $2c$ إذا كان داخلياً) ونصف قطر طرف الشق r .

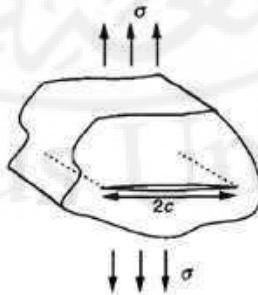
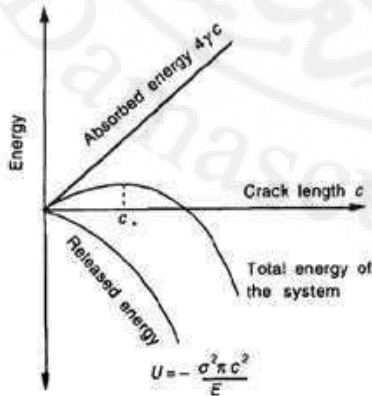
$$\sigma = \sigma_\infty \left(1 + 2\sqrt{\frac{c}{r}} \right) \quad (9-1)$$

لذلك عامل تركيز إجهادات النقب الدائري ($c=r$) مساوٍ إلى 3. هذه القيمة مقبولة فيزيائياً بينما في حالة الشق الحاد ($r \rightarrow 0$) يصبح تركيز الإجهادات كبيراً جداً وذلك حسب المعادلة (9-1)، وبحسب هذه المبادئ ستفشل معظم المواد (البنى) تحت تأثير أحمال صغيرة وذلك عند الخدوش الناعمة السطحية التي على الغالب لا يمكن تجنب

تواجدها. يتناقض ذلك مع الخبرة الهندسية حيث إن معظم البنى الهندسية وبشكل خاص المعدنية منها قادرة على العمل حتى عندما يتواجد شقوق وخدوش صغيرة. بينت الدراسات أنه لا يستطيع الشق النمو ما لم تتناقص طاقة النظام. تتحرر الطاقة عندما يتقدم الشق ويحرر الانفعال المرن المخزن في المادة المحيطة. لا يستطيع الشق التقدم إذا لم تتوازن الطاقة المتحررة مع الطاقة الممتصة في المادة. تحفز آليات فعالة لامتصاص الطاقة الداخلية بواسطة الإجهادات الكبيرة على طرف الشق وبذلك لن تتوازن طاقة نمو الشق وتبدي المادة جساءة كبيرة (مقاومة تحطم). يحدث ذلك في معظم المعادن، حيث تكون حركة الإنزياحات (الإنخلاعات) فعالة جداً. عند دراسة مواد قصفة (هشة) مثل الزجاج . لا يحفز امتصاص الطاقة في هذه المواد القصفة. وتأتي الطاقة المعتبرة لنمو الشق من مساحة السطح الجديدة لأسطح الشق. يحدث تغير الطاقة المخزنة بالصفحة المحملة ذات السماكة المساوية لواحدة القياس بسبب تقدم شق داخلي بطول مساوي إلى $2c$ ، وذلك حسب العلاقة:

$$U = -\frac{\sigma^2 \pi c^2}{E} \quad (9-2)$$

حيث: الإجهاد المطبق $\sigma = \sigma_\infty$ و E معامل يونغ. مساهمة أخرى لتغير الطاقة الكلية المحتاج لها لإنشاء مساحة سطح جديدة، وهي موجبة وقيمتها مساوية إلى $4c\gamma$ ، حيث γ طاقة السطح. يبين الشكل (9-1) تغير المساهمات مع طول الشق.



الشكل (9-1) مخططات المساهمات إلى الطاقة المصاحبة لتواجد شق في مادة قصفة (هشة) بالنسبة إلى طول الشق. سينمو شق ذو الطول c أو أكبر طولاً ذاتياً مع انخفاض الطاقة الكلية.

ستتمو الشقوق تلقائياً (مع انخفاض الطاقة) إذا كانت بطول أكبر من الطول الحرج c_* . يتم إيجاد الطول الحرج بتفاضل الطاقة الكلية بالنسبة لطول الشق ومساواة الناتج بالصفر وتنتج العلاقة التالية:

$$c_* = \frac{2\gamma E}{\sigma^2 \pi} \quad (9-3)$$

تم وضع علاقة معدل الطاقة المتحررة G ووحدته Jm^{-1} بالاعتماد على العلاقة (9-3)، وذلك لإجهاد مطبق ولمقاس شق مسبق التواجد والعلاقة هي التالية:

$$G = \frac{\sigma^2 \pi c}{E} \quad (9-4)$$

حتى يحدث التحطم يجب أن تتجاوز G قيمة حرجية، يطلق على هذه القيمة الحرجية مقاومة الشق R . تمثل هذه القيمة الحرجية الطاقة الكلية الممتصة لواحدة مساحة تقدم الشق ويعبر عنها بالرمز G_c : المعدل الحرج للطاقة المحررة أو طاقة التحطم.

يتم الحصول تجريبياً على قيم G_c . كمثال يعطى العمل المبذول في اختبار الشد أو الإنحناء بالمساحة تحت منحنى الحمولة-الاستطالة، بشرط أن تكون هذه الطاقة قد امتصت كلها في العينة، نحصل على طاقة التحطم بالقسمة على مساحة مقطع العينة الذي حدث عنده التحطم. تتلم عادة العينة بشكل مسبق حتى نضمن ظهور نمو الشق. يبين الجدول (9-1) قيم G_c لمواد متنوعة. قيم طاقة تحطم المعادن الجاسئة (طرية) مساوية أو أكبر من $100 Jm^{-1}$ بينما قيم طاقة تحطم المواد القصفة (هشة) مثل الزجاج منخفضة ويحدود $0.01 Jm^{-1}$. يعطى الإجهاد الضروري لإحداث التحطم التلقائي في الجزء ذي المقاس c (2c إذا كان الشق داخلياً) حسب المعادلة (9-4) بالعلاقة التالية:

$$\sigma_* = \sqrt{\frac{G_c E}{\pi c}} \quad (9-5)$$

هذه الدراسة مفيدة من الناحية العملية، لا يزال هناك اهتمام بالظواهر الحادثة موضعياً بالقرب من طرف الشق. باستخدام عامل تركيز الإجهاد K يتم الربط بين الطاقة وحقل الإجهاد، ويحسب بالعلاقة التالية:

$$K = \sigma\sqrt{\pi c} \quad (9-6)$$

تتضمن العلاقة السابقة تأثير الحمل المطبق ومقاس الشق المسبق الحدوث وقد تم استخدام كلا البارامترين لتحديد قيمة G (معدل تحرر الطاقة) وذلك بالمعادلة (9-4). تحدد قيمة K شدة حقل الإجهاد حول طرف الشق، ولها قيمة حرجة عندما تصل قيمة G إلى قيمة G_c .

$$K_c = \sigma_*\sqrt{\pi c} = \sqrt{EG_c} \quad (9-7)$$

يدعى K_c عامل تركيز الإجهاد الحرج. يبين الجدول (9-1) قيم العامل K_c لمواد متنوعة، يمكن أن تتجاوز جساءة التحطم $100MPa\sqrt{m}$ للمواد الجاسئة، بينما قيم جساءة التحطم للمواد القصفة (الهشة) بحدود $1MPa\sqrt{m}$. تكمن فائدة عامل تركيز الإجهاد بالطريقة التي تتعلق بهيئة طرف الشق الموضعي. كمثال يتعلق مقاس المنطقة اللدنة أمام طرف الشق بإجهاد خضوع المادة حسب العلاقة:

$$r_y \approx \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (9-8)$$

يعطى انزياح فتح الشق δ بالعلاقة التالية:

$$\delta \approx \left(\frac{k^2}{\sigma_y E} \right) \quad (9-9)$$

9-2-2- تحطم السطح البيني وانحراف الشق:

Interfacial fracture and crack deflection

يبين الجدول (9-1) قيمة طاقة تحطم المادة المركبة المصنعة من راتنج الإيبوكسي وألياف الزجاج المساوية إلى $(G_c \sim 0.01-0.1 \text{ kJm}^{-2})$ وبمقارنة هذه القيمة مع طاقة تحطم المعادن المساوية إلى $(G_c \sim 50 \text{ kJm}^{-2})$ على الرغم من أن كلا مكوني المادة المركبة قصفين. تتعلق الجساءة الكبيرة للمواد المركبة بالسطح البيني.

الخطوة الأولى في الدراسة هي تحليل الحالات التي يحدث عندها فك ارتباط السطح البيني، المقصود حدوث نمو الشق على طول السطح البيني بين المادتين المختلفتين. تحت ظروف التحميل يزيد نمو الشق على طول السطح البيني بين المكونين من معدل

الطاقة المحررة G_i ، بطريقة مشابهة لحالة الشق في المادة المتجانسة. حتى ينمو الشق يجب أن تصل قيمة G_i إلى القيمة الحرجة لطاقة تحطم السطح البيني G_{ic} .
جدول (9-1) قيم طاقة التحطم وجساءة التحطم لمواد متنوعة.

Material	Fracture energy G_c (kJ m ⁻²)	Fracture toughness K_{Ic} (MPa √m)
<i>Polymers</i>		
epoxy resins	0.1–0.3	0.3–0.5
Nylon 6.6	2–4	3
polypropylene	8	3
<i>Metals</i>		
pure Al	100–1000	100–350
Al alloy	8–30	23–45
mild steel	100	140
<i>Ceramics</i>		
soda glass	0.01	0.7
SiC	0.05	3
concrete	0.03	0.2
<i>Natural materials</i>		
woods (crack ⊥ grain)	8–20	11–13
woods (crack // grain)	0.5–2	0.5–1
bone	0.6–5	2–12
<i>Composites</i>		
fibreglass (glass/epoxy, planar random fibres)	40–100	42–60
Al-based particulate MMC	2–10	15–30
SiC laminate (crack ⊥ layers)	5–8	45–55

تعطي الجداول قيم G_c للمواد المتجانسة ولاتتوفر قيم G_{ic} للسطح البيني، وذلك للأسباب التالية:

السبب الأول: إن جساءة السطح البيني حساسة للطريقة التي صنع بها السطح البيني فضلاً عن أن جساءة السطح البيني استثنائية بالمقارنة مع جساءة زوج المكونات على كل جانب.

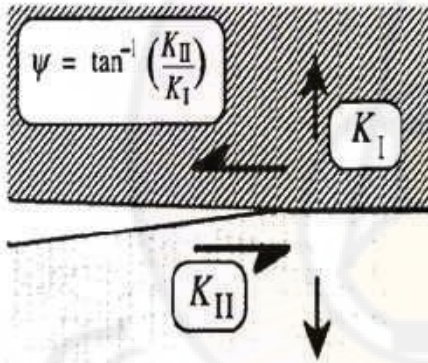
السبب الثاني: تنمو شقوق السطح البيني تحت ظروف تحميل مختلطة mixed mode. بالمقارنة مع الشق في المادة المتجانسة الذي سيتقدم بالاتجاه الذي يكون فيه حقل الإجهاد على طرف الشق هو إجهاد شد صافي (I mode). بينما يجبر شق السطح البيني على إتباع المسار المحدد مسبقاً.

يمكن أن يتضمن حقل الإجهاد حسب شكل التحميل على طرف الشق مركبة إجهاد قص مؤثرة على مستوي السطح البيني (II mode)، وتكون الطاقة اللازمة لفك ارتباط

السطح البيني في حال تواجد مركبة إجهاد قص (mode II) أكبر من حالة التحميل الصافي (mode I). وهذا ما يعقد القياس التجريبي للقيمة G_{IC} . كما أنه يمكن أن يتغير حقل الإجهاد مع الوضعية في العينة وبشكل خاص في السطوح البينية ليف/مادة حاضنة. تكون الحالة أكثر تعقيداً بتواجد إجهادات متبقية.

يعبر غالباً عن نسبة الفتحة على طرف الشق بتعبير زاوية الطور ψ phase angle. تحدد هذه الزاوية بمعاملات تركيز الإجهاد mode I و mode II والمبينين تخطيطياً بالشكل (9-2).

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{K_{II}}{K_I} \right) \quad 9-10$$

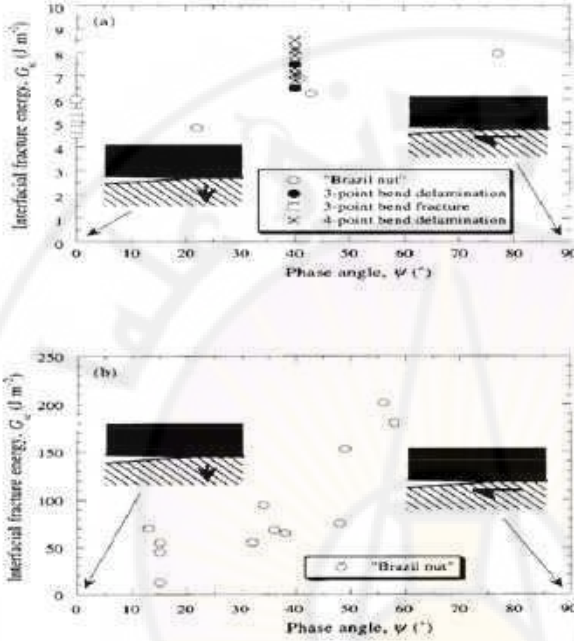


الشكل (9-2) تمثيل تخطيطي لحقل الإجهاد على شق السطح البيني. تستخدم زاوية الطور ψ لتمييز شكل تحميل طرف الشق، وتحدد هذه الزاوية بمعاملات تركيز الإجهاد K_I و K_{II} من أجل أشكال التحميل، الشكل I والشكل II. يمكن أن تتغير قيمة ψ من 0° (شكل تحميل I صرف، فتح الشق) إلى 90° (شكل تحميل II قص صرف).

قيمة الزاوية ψ مساوية إلى 0° لإجهاد الشد الصافي ($K_{II}=0$) وقيمتها 90° لإجهاد القص الصافي ($K_I=0$) يمكن أن تحدد زاوية الطور لترتيبات تحميل متنوعة. بالإضافة إلى أنه تتغير ψ مع الموضع عندما يكون السطح البيني غير مسطح.

تبين البيانات التجريبية اعتماد قيمة G_{IC} على قيمة ψ وذلك بالاعتماد على نوع نظام المواد المركبة. يبين الشكل (9-3) أمثلة أسطح بينية مسطحة في شكل طبقات داخلية رقيقة بين عنصرين أكثر سماكة. تم الحصول على هذه البيانات باستخدام اختبارات مختلفة متضمنة مجالاً واسعاً من الفتحات (إجهاد الشد) وشكل القص. يتبين ازدياد G_{IC} كنتيجة لازدياد مركبة القص، قد يكون ذلك بسبب العمل الاحتكاكي الحادث مباشرة خلف طرف الشق حيث تنزلق الخشونة على أطراف الشق على بعضها عن بعض. يكون

الاعتماد على $1/\psi$ أكثر عندما يستطيع أحد المكونات أن يتشوه بشكل لدن. أنظر الشكل (3-9b).



الشكل (3-9) بيانات تجريبية من أجل طاقة تحطم السطح البيني G_{ic} بالنسبة إلى زاوية الطور ψ التي تميز حقل الإجهاد على طرف الشق.

(a) $(5 \sim 10 \mu m)$ طبقات غرافيتية رقيقة بين صفائح SiC.

(b) $(100 \sim 400 \mu m)$ طبقات رقيقة من راتنج الإيبوكسي بين كتل ألومنيوم.

يتعلق أحد الأسباب الرئيسية للاهتمام بجساءة السطح البيني بانحراف الشق. لكي يكون للمادة المركبة جساءة مرتفعة، يجب أن ينحرف الشق العابر خلال المادة الحاضنة بشكل مستمر على السطح البيني ليف/مادة حاضنة، على الأقل للمواد المركبة ذات الأساس من الراتنجات البوليميرية أو السيراميك.

ركزت أعمال العلماء على شروط انحراف الشق على حقل الإجهاد في طرف الشق. بينت الدراسات أنه يتواجد إجهاد عرضي في مقدمة طرف الشق عندما يصل الشق إلى الليف في المادة المركبة المحملة بشكل موازي لمحور الليف، يميل هذا الإجهاد العرضي إلى فتح السطح البيني ومن ثم يثلم ويحرف الشق عن دخول الليف. إن القيمة العظمى لهذا الإجهاد العرضي بحدود 20% من الإجهاد المحوري الأعظمي، تم اقتراح فك ارتباط السطح البيني إذا كانت متانته أقل من حوالي خمس متانة المادة الحاضنة.

إلا أنه لم تحدد متانة السطح البيني بشكل جيد وهي حساسة إلى وجود وتوزيع سيلان المادة وإلى طريقة التحميل.

تم اقتراح معيار انحراف الشق المعتمد على الطاقة، وذلك باعتبار كتلتين مترابطتين مع بعضهما ومحملين بشد موازي للسطح البيني. يوجد في إحدى الكتلتين شق يصل إلى السطح البيني حسب الشكل (4-9). قدر الحمل المطبق الذي سيخترق الشق بتأثيره الكتلة الأخرى أو ينحرف عبر السطح البيني، مع افتراض أنه يحتاج الشق إلى الحمل الأقل لكي يسود، وينتج بذلك المعيار التالي للانحراف:

$$\frac{G_{ic}}{G_{fc}} \leq \left(\frac{h_m E_m + h_f E_f}{h_f E_f} \right) \left[\frac{1}{4\pi(1-\nu^2)} \right] \quad (9-11)$$

حيث: G_{ic} و G_{fc} طاقتي التحطم للسطح البيني والكتلة غير المتشقة (الليف).

h_m و h_f سماكة كتلة المادة الحاضنة المتشقة والليف غير المتشق.

E_m و E_f معاملي يونغ للمادة الحاضنة والليف.

ν معامل بواسون (قد أخذ متساوي لكلا مكوني المادة).

إذا أخذ h_m و h_f متساويي القيمة. يماثل ذلك شقاً يعبر خلال المادة الحاضنة بين الألياف غير المتكسرة في المادة المركبة، يكون عندئذ معدل القيمة الحرجة بحدود 20%

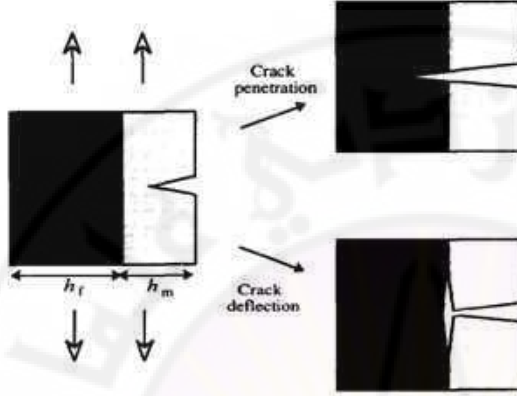
من أجل قيمة $E_m \sim E_f$ وتتناقص إلى قيمة 10% من أجل $E_f \ll E_m$.

اعتمد التحليل السابق على إعطاء الشق المخترق أو الشق المنحرف أكبر طاقة صرفة محررة. يعطي هذا التحليل معدل طاقة تحطم حرجة بحدود 20% لحالة $E_m \sim E_f$.

يتوقع تزايد في هذا المعدل (عوضاً عن التناقص) من أجل $E_f \ll E_m$.

يجب أن تكون طاقة تحطم السطح البيني أخفض من طاقة تحطم مادة التقوية حتى تتحرف شقوق المادة الحاضنة بشكل مستمر. إن للألياف السيراميكية طاقة تحطم منخفضة (انظر الجدول 1-9)، مما يستوجب الحاجة إلى سطوح بينية منخفضة الجساءة إذا كان انحراف الشق أساسياً. إن الحصول على جساءة سطح بيني منخفضة

وبشكل خاص في المواد المركبة ذات الأساس السيراميكي عبر مراحل تصنيع هذه المواد يمثل تحدياً تكنولوجياً كبيراً.



الشكل (4-9) هندسة انحراف الشق على السطح البيني.

3-9- الإسهامات في عمل التحطم:

Contributions to work of fracture

الجساءة المرتفعة نسبياً أساسية لمعظم المواد الهندسية. أحد مميزات المواد المركبة هي إمكانية المادة في تعزيز آليات امتصاص الطاقة. من المهم فهم كيفية التحكم بهذه الآليات.

1-3-9 تشوه المادة الحاضنة: Matrix deformation

يبين الجدول (1-9) بيانات التحطم لبعض المواد الحاضنة. تتمتع معظم المواد الحاضنة المعدنية بجساءة مرتفعة، كنتيجة رئيسية لحركة الإنزياحات المكثفة التي تظهر بالقرب من الشق. إن البوليميرات وبشكل خاص المتصلبة حرارياً وكذلك المواد السيراميكية منخفضة طاقة التحطم.

يمكن أن يختلف حجم تشوه المادة الحاضنة خلال تحميل المادة المركبة عن تشوه نفس المادة وهي غير مقواة. السبب الرئيسي هو تأثير المكبحات (المعيقات)، وبذلك لا تستطيع المادة الحاضنة التشوه بحرية بسبب وجود الألياف المتينة الجاسئة. وهذا بنتيجة نقل الحمولة ضمن المادة التي تقلل من إجهادات المادة الحاضنة كما أنه يكبح وجود الألياف من السيلان لللدن للمادة الحاضنة. كمثال عندما تستطيل منطقة من المادة الحاضنة بشكل لدن مع تقلص مصاحب للمناطق الأخرى، قد يقاوم هذا التقلص بواسطة

تجمعات الألياف الصلبة المحيطة. يؤدي ذلك لنشوء إجهادات شد عرضية تقلل من مركبات إجهاد تغيير المادة الحاضنة. وتكبح هذه بدورها السيلان اللدن لكن يمكن أن تشجع التكهف والتحطم.

يفسر ما سبق طاقة التحطم المنخفضة للمادة المركبة المعدنية ذات الأساس من الألمنيوم عندما تقارن بالألمنيوم غير المقوى الجدول (1-9). يمكن تقليل فقدان الجساءة للحد الأصغري بالتخلص من تكتلات مادة التقوية وعدم التجانس مثل المسامية والأسطح البينية المفكوكة الارتباط والألياف أو الحبيبات المتشقة. تتمتع معظم المواد المركبة ذات الأساس المعدني بمتانة مرتفعة للسطح البيني. إن جساءة السطح البيني المنخفضة مهمة فقط في المعادن منخفضة الجساءة نسبياً (مثل التوتياء) المقواة بألياف طويلة، حيث يفضل في هذه الحالات تجسيئها بواسطة نزع (سحب) الليف للاحتفاظ ما أمكن بقيمة جساءة المادة الحاضنة.

تعمل تأثيرات الكبح المشار لها سابقاً مع المواد الحاضنة الغير معدنية. في تلك الحالات هنالك مجال محدود لامتناس الطاقة في المادة الحاضنة.

تم تحقيق تحسينات معتبرة في جساءة المواد المركبة ذات الأساس البوليميري بواسطة زيادة جساءة المادة الحاضنة، التي تستطيع أن تغير من الآلية الميكروية للعطب وتزيد من امتناس الطاقة المصاحب.

2-3-9- تحطم الليف: Fiber fracture

يتضمن تحطم المادة المركبة تحطم الألياف، يعتمد التحطم على هندسة الليف وشكل التحميل. إن مساهمة الألياف في طاقة تحطم المادة قليلة، حيث لا تتجاوز طاقات تحطم ألياف الزجاج والكربون و SiC بضعة عشرات من Jm^{-1} . إن بعض الألياف البوليميرية ليست قصفة بشكل كامل ويتم عليها تشوهات لدنة معتبرة. مثال على ذلك الشكل (2-7-b)، الذي يبين ليف الكيفلر KevlarTM المحطم. إن معظم الألياف الطبيعية لها نفس التصرف وتحطم ألياف السيلولوز لها إسهام مهم في طاقة تحطم الخشب. يسهم تحطم هذه الألياف إلى طاقة التحطم الكلية ببضعة KJm^{-1} . مبدئياً يمكن أن تسهم الألياف المعدنية بشكل أكبر. وهكذا تزيد القضبان المعدنية من جساءة الإسمنت المسلح حتى

بمحتوى حجمي قليل، وتحسن من متانة الشد. إلا أنه في معظم المواد المركبة تقدم الألياف إسهامات قليلة أو لا تقدم أي مساهمة للجساءة الكلية.

3-3-9 فك ارتباط السطح البيني: Interfacial debonding

يحدث عادةً خلال تحطم المادة المركبة فك ارتباط السطح البيني. يحدث فك الارتباط إذا كان نمو الشق ناظماً على اتجاه توضع الألياف بشرط انحراف الشق عند وصوله للسطح البيني. يمكن أن يحفز فك الارتباط تحت ظروف تحميل عرضية أو قص. بشرط أن تعرف قيمة طاقة تحطم السطح البيني G_{ic} ، كما يمكن تقدير مساهمة فك الارتباط إلى طاقة التحطم الكلية.

يبين الشكل (5-9) مبادئ الحساب من أجل الألياف القصيرة المصطفة. يستخدم اقتراح القص المتبقي البسيط. بشرط أن قيمة معامل الأبعاد aspect ratio $(s = \frac{L}{r})$ أقل

من القيمة الحرجة، $(s_c = \frac{\sigma_{f'}}{2\tau_i})$ ، ستسحب بالتالي كل الألياف من مقراتها في المادة

الحاضنة مع فك ارتباط الشق. يمكن أن يحسب العمل المبذول عندما يتم فك ارتباط السطح البيني للليف مفرد بالعلاقة التالية:

$$\Delta U = 2\pi r x_0 G_{ic} \quad (9-12)$$

حيث :

x_0 هو طول الليف المغموس على طرف الشق الذي يحدث عنده فك الارتباط $(x_0 \leq L)$.

للحصول على عمل فك ارتباط المادة المركبة G_{cd} ، التي هي لكل الألياف المتداخلة بالشق. فإذا كان هناك عدد N من الألياف في كل m^2 ، سيكون عندئذ $(\frac{Ndx_0}{L})$ لكل m^2 مع طول مغموس بين x_0 و $(x_0 + dx_0)$. ويعطى العمل الكلي المبذول لفك الارتباط بالعلاقة التالية:

$$G_{cd} = \int_0^L \frac{Ndx_0}{L} 2\pi r x_0 G_{ic} \quad (9-13)$$

تتعلق قيمة N بالنسبة الحجمية للألياف f وينصف قطر الليف r .

$$N = \frac{f}{\pi r^2} \quad (9-14)$$

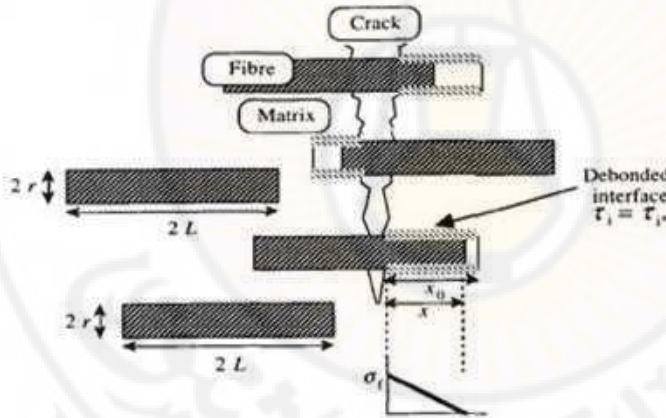
بالتعويض بالعلاقة (9-13) ولجراء التكامل يكون لدينا:

$$G_{cd} = \frac{f 2\pi r G_{ic} L^2}{\pi r^2 L} \cdot \frac{1}{2}$$

بإصلاح العلاقة السابقة ينتج لدينا العلاقة التالية:

$$G_{cd} = fs G_{ic} \quad (9-15)$$

كمثال إذا كانت $s = 50$ ، $f = 0.5$ ، و $G_{ic} = 10 \text{ Jm}^{-2}$ تكون عندئذ قيمة $G_{cd} = 0.25 \text{ KJm}^{-2}$. إذا كان معدل الأبعاد أو طاقة تحطم السطح البيني أكبر بكثير من هذه القيم (s أو G_{ic})، عندئذ من المحتمل أن يتحطم الليف في مستوي التحطم وسوف لا يحدث فك الارتباط.



الشكل (9-5) يظهر تخطيطياً الشق العابر من خلال مادة مركبة مقواة بألياف مصفوفة قصيرة، ويظهر فك الارتباط ونزع (سحب) الليف اللاحق لفك الارتباط.

4-3-9- الانزلاق الاحتكاكي ونزع (سحب) الليف:

Frictional sliding and fiber pull-out

إن الانزلاق الاحتكاكي للسطح البيني من أهم مصادر تحطم المواد المركبة المقواة بالألياف. يعتمد الانزلاق الاحتكاكي على خشونة السطح البيني، وعلى ضغط التلامس وعلى مسافة الانزلاق، تمتص عملية الانزلاق كميات كبيرة من الطاقة. الحالة الأكثر أهمية هي سحب الألياف من مقراتها في المادة الحاضنة.

تبين الأشكال (7-8 وحتى 10-8) أسطح التحطم الموضحة لأشكال متنوعة لسحب الألياف. إن معدلات سحب الألياف بمجال عدة عشرات أو حتى المئات. يمكن حساب العمل المبذول باعتبار ليف ذي طول متبقي مغموس x قد سحب مسافة صغيرة dx . يعطى العمل المصاحب بناتج القوة العاملة على الليف والمسافة التي تحركها حسب العلاقة:

$$dU = (2\pi x \tau_i) dx \quad (9-16)$$

حيث: τ_i إجهاد قص السطح البيني، ويؤخذ هنا كقيمة ثابتة على طول الليف. يعطى العمل المبذول لسحب الليف بشكل كامل بالعلاقة التالية:

$$\Delta U = \int_0^{x_0} 2\pi x \tau_i dx = \pi x_0^2 \tau_i \quad (9-17)$$

يعطى عمل السحب للتحطم G_{cp} بالعلاقة التالية:

$$G_{cp} = \int_0^L \frac{N dx_0}{L} \pi x_0^2 \tau_i \quad (9-18)$$

بتعويض N بقيمتها حسب العلاقة (14-9) تصبح العلاقة:

$$G_{cp} = \frac{f s^2 r \tau_i}{3} \quad (9-19)$$

كمثال، عندما $f = 0.5$, $s = 50$ و $r = 10 \mu m$ و $\tau_i = 20 MPa$ تنتج قيمة G_{cp} المساوية إلى 80 kJm^{-2} . حيث قيمة σ_r مساوية إلى 3 Gpa ومعدل الأبعاد الحرج

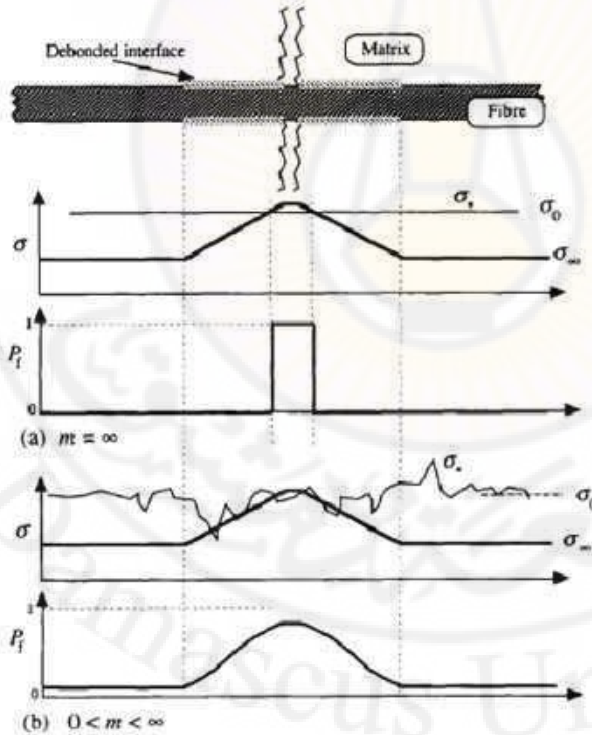
يعطى بالعلاقة $(s_* = \frac{\sigma_r}{2\tau_i})$ وقيمة G_{cp} تساوي إلى 75 من أجل قيمة τ_i السابقة.

وحيث إن قيمة معدل أبعاد الألياف أكبر من قيمة معدل الأبعاد الحقيقية، يتوقع لذلك أن يحدث سحب الألياف (عوضاً عن تحطم الألياف). إن طاقة سحب الليف أكبر عندما يكون ليف قطر أكبر، بفرض أنه لليف نفس معدل الأبعاد.

إن مساهمة سحب الليف على الجساءة استثنائية. يمكن أن تعمل هذه الآلية فقط مع الألياف قصيرة نسبياً ($s_* < s$)، حيث من المتوقع أن تتكسر الألياف المستمرة في مستوي الشق، حيث يوجد دائماً أطوال مغموسة على كلا طرفي مستوي الشق التي هي طويلة

بشكل كافٍ ليتراكم الإجهاد في الألياف ليكسرها. (مازال يمكن حدوث فك ارتباط السطح البيني ربما على مسافة معينة ولكن واضح من الفقرة السابقة أنه من غير المحتمل أن يساهم فك الارتباط في طاقة التحطم)، يتضح باستخدام هذه المناقشة أنه يجب أن لا يحدث سحب الألياف في المواد المركبة ذات الألياف الطويلة. يعود السبب في ذلك إلى تغيرات متانة معظم الألياف.

يتميز تأثير تغير متانة الليف بمعامل ويبول (Weibull modulus, m) المبين تخطيطياً بالشكل (9-6). يبين الشكل (a) حالة القمة المفردة لمتانة الليف حيث ($m = \infty$) وتصبح احتمالية p_f لكسر الليف في مستوي الشق مساوية إلى 100%، بينما تبقى صفر في مناطق أخرى.



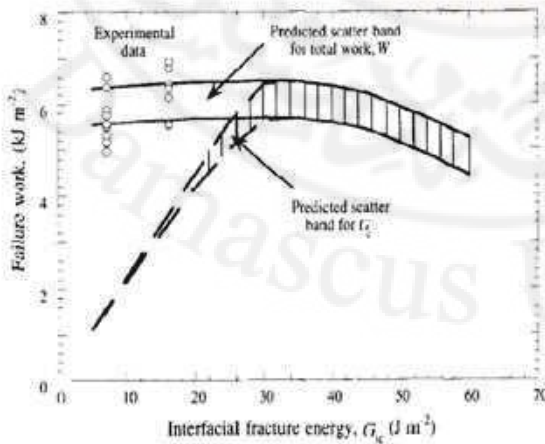
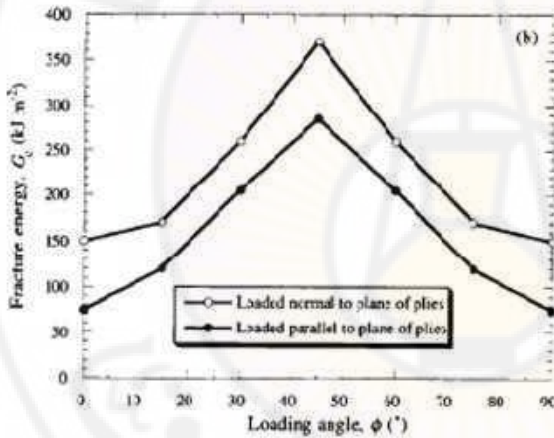
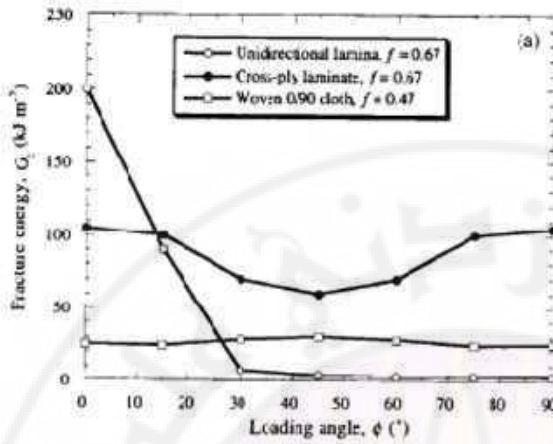
الشكل (9-6) رسم تخطيطي لتوزيع الإجهاد واحتمالية التحطم المصاحبة p_f عبر الطول للليف طويل بشكل جسراً لشق المادة الحاضنة. (a) متانة ثابتة للليف ($m = \infty$). (b) متانة ليف متغيرة على طول الليف (m منتهية).

من أجل قيمة منتهية لـ m ، الشكل (b) 9-6 (b) إن القيم المرتفعة لـ p_f منتشرة فوق مسافة معتبرة على كلا جانبي مستوي الشق. لكن من المحتمل أن يكسر الليف في أي مكان. تحت هذه الظروف تصبح تقديرات طاقة التحطم أكثر صعوبة، حيث يجب أن

يؤخذ بالحسبان احتمالات حساب المساهمات من اختلاف أطوال السحب، يجب أن يؤخذ بالحسبان تأثير التوزع على احتمالات التحطم في حالة الليف القصير. يجب ملاحظة أنه يؤدي معامل Weibull المنخفض لزيادة عمل سحب الليف للألياف الطويلة، لكن ليس بالضرورة أن يكون مفيداً للألياف القصيرة.

5-3-9- تأثيرات البنية: Effects of microstructure

هنالك مجال للتحكم بطاقة تحطم المواد المركبة بتغيير طول الليف، وتوجهه ومميزات السطح البيني. يبين الشكل (7-9) أمثلة لتأثير التوجه. يبين الشكل طاقات التحطم المقاسة باستخدام إختبار صدم شاربي. تنخفض طاقة التحطم للرقاقة وحيدة الاتجاه الشكل (7-9 (a) بشكل حاد بتناقص الزاوية بين مستوي الشق ومحور الليف (تزداد زاوية التحميل). مما يسبب كبح سحب الليف ويظهر التحطم موازياً لمحور الليف. تبدي الصفائح المتصلبة الطبقات والمواد المقواة بالنسيج المحاك أكثر تجانساً بالخواص. من الصعب توقع تأثير زاوية التحميل نظراً لحدوث تفاعلات معقدة متبادلة بين الرقاقات المختلفة والألياف. يتضمن التحطم فك ارتباط السطح البيني، وتحطم الألياف وسحب ألياف، ولذلك الجساءة مرتفعة. هذه صفة مهمة للصفائح المقواة بألياف طويلة. يبين الشكل (7-9 (b) أنه يمكن تعزيز جساءة بعض المعادن بهذه الطريقة. (طاقة تحطم المادة الحاضنة في هذه الحالة بحدود 90 KJm^{-2}). كذلك يوضح الشكل أنه يمكن الحصول على جساءة جيدة عندما يقع اتجاه نمو الشق في مستوي الصفيحة، بشرط أن تكون جبهة الشق ناظرية على هذا المستوي. ومن المهم التحكم بخواص السطح البيني. يبين الشكل (8-9) بيانات المادة المركبة السيراميكية من صفائح SiC وبينها طبقات داخلية رقيقة من الغرافيت.



الشكل (7-9) يعطي نتائج تجريبية لطاقة التحطم G_c الناتجة خلال اختبار الصدم شاربي وبحسب زاوية التحميل المحصورة بين محور عينة الاختبار وبين اتجاه الألياف المستخدمة.

(a) يتم استخدام ريزين الأبوكسي مع ألياف الزجاج المحمل ناظماً لمحور الصفيفة.

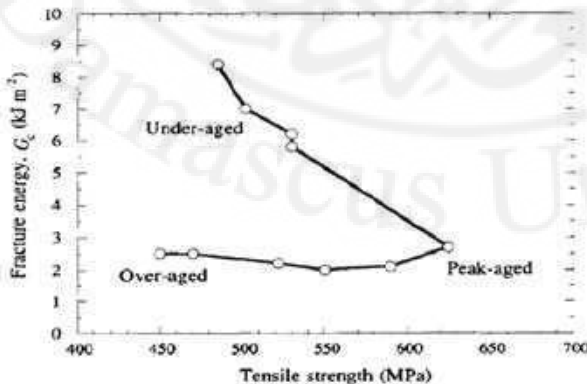
(b) يستخدم الصفائح الشطرنجية crossply والمكونة من (Zn- 8Al-Cu) و من 50% ألياف الكربون محملة بشكل عمودي وبشكل مواز أيضاً لمستوي الصفيفة.

الشكل (8-9) مقارنة بين القيمة المتوقعة والتجريبية للعمل الكلي المبذول W على طاقة تحطم السطح البيني لمادة SiC الصفائحية المحتوية طبقات داخلية غرافيتية. حيث يمكن ملاحظة أيضاً علاقة القيم المتوقعة الحقيقية لطاقة التحطم G_c التي يصعب قياسها في هذه الحالة بشكل مباشر.

عندما تحمل هذه المادة على الانحناء ينتشر الشق خلال الصفائح المتتابعة، يحدث انحراف وفك ارتباط واسع بين الطبقات أي الغرافيت، بشرط أن تكون جساءة السطح البيني منخفضة بشكل كافٍ (انظر الفقرة 2-2-9).

بالاعتماد على كيفية التحميل وعلى أبعاد العينة يكون العمل المبذول (W = المساحة تحت منحنى الحمل - الانزياح). يمكن أن تزيد قيمة هذا العمل عن الطاقة الفعلية التي تمتصها العينة (تبدد هذه الزيادة من خلال نظام التحميل) يمكن نمذجة تشققات السطح البيني من تحديد القيمة الحقيقية لطاقة التحطم G_c . يبين الشكل (8-9) أنه يؤدي رفع جساءة الطبقة البينية (يتم رفع جساءة الطبقة البينية بتغيير ظروف إنتاج المادة المركبة) إلى زيادة الطاقة الناتجة عن التحطم G_c وذلك على الرغم من أنه يتأثر قليلاً بالعمل الكلي المنجز على W ، وعلى أية حال لا يمكن بهذه الطريقة تحقيق الزيادات الإضافية للقيمة G_c حيث يمكن أن يعزز السطح البيني الأكبر جساءة (قيمة أكبر لـ G_{ic}) من انحراف الشقوق، على الرغم من أنه تحدث الجساءة فك ارتباط السطح البيني، حيث أنه بحسب مساحات سطح التحطم فإن قيم طاقات التحطم كبيرة نسبياً للمادة السيراميكية.

تكون الطاقة الممتصة من فك الارتباط ونزع الحبيبات للمواد المركبة المقواة بحبيبات قليلة القيمة. ينصب الاهتمام الرئيسي في المواد المركبة المقواة بحبيبات MMCs حول المحافظة ما أمكن على تعزيز جساءة المادة الحاضنة. يبين الشكل (9-9) بيانات طاقة تحطم خليطة ألومنيوم مقواة بالتعتيق ومحتوية على حبيبات من SiC. بالتحميل على الشد.



الشكل (9-9) القيم التجريبية لطاقة التحطم G_c مع متانة الشد خلال استمرار التعتيق لخليطة الألومنيوم Series- 7000 المقواة بـ 15% حبيبات SiC.

عند الاستمرار في التعتيق، تزداد المتانة لفترة من الزمن ثم تنخفض. إن الانخفاض في طاقة التحطم خلال الارتفاع متوقع على أساس حركة الإنخلاقات. من الصعب جداً شرح فشل ارتفاع الجساءة عند حدوث التعتيق الزائد، لكن يمكن أن يكون ذلك بسبب تشكل رواسب مفضلة عند السطح البيني، مما يجعله مكاناً مفضلاً لتشكل الفجوات. أخيراً يمكن أن يكون تقييم الطاقة الممتصة للمادة المركبة الصفائحية معقداً بشكل خاص، حيث تكون المساهمات ناتجة عن فك الارتباط داخل الطبقات.

4-9- نمو الشق الفرعي الحرج: Sub-critical crack growth

لا يحدث التحطم السريع عندما يكون مستوى تحرر الطاقة خلال انتشار الشقوق (القوة المحركة) أقل من القيمة الحرجة. تحت بعض الظروف، يمكن أن تتقدم ببطء الشقوق الموجودة تحت تأثير هذه القوة المحركة. بما أنه يؤدي نمو الشق إلى ازدياد القوة المحركة (لبعض الحمل المطبق) مما يؤدي إلى تسارع معدل الضرر. هنالك حالتان يرجح فيهما حدوث نمو الشق الحرج الفرعي وهما:

أولاً: إذا كان الحمل المطبق متذبذباً، فإنه يمكن أن يحدث تقدم صغير بطرف الشق خلال كل دورة.

ثانياً: يمكن أن يخفض اختراق السوائل الأكالة لمنطقة طرف الشق من الجساءة الموضوعية ويسمح للشق بالتقدم بمعدل يحدد بآلية اختراق السائل أو بتأثير التفاعل الكيميائي المتبادل. في كلا الحالتين مع التحطم السريع يكمن الاهتمام المركزي في التخلص من العيوب البدائية التي تسمح للعملية بالبداية.

1-4-9- التعب: Fatigue

يشكل تحطم المعادن على التعب موضوعاً مهماً. تم إجراء التحليلات في شروط اختلاف عامل كثافة الإجهاد بين أعظم وأصغر حمل مطبق (Δk). سبب ذلك أنه عندما تكون القيمة أعظمية k_{max} عندما يحدث التحطم السريع فإن تبدد دورة الطاقة يعتمد على (Δk). من الشائع حساب معدل الإجهاد ($R = K_{min}/K_{max}$). يمكن تقدير قيمة K

من أجل قيمة معطاة لـ (Δk) . تعطى مقاومة المواد لنمو الشق بصيغة معدل نمو الشقوق لكل دورة الحمل (dC/dN) . يعطى معدل نمو الشق عند القيم المتوسطة

لـ (Δk) بالعلاقة التالية:

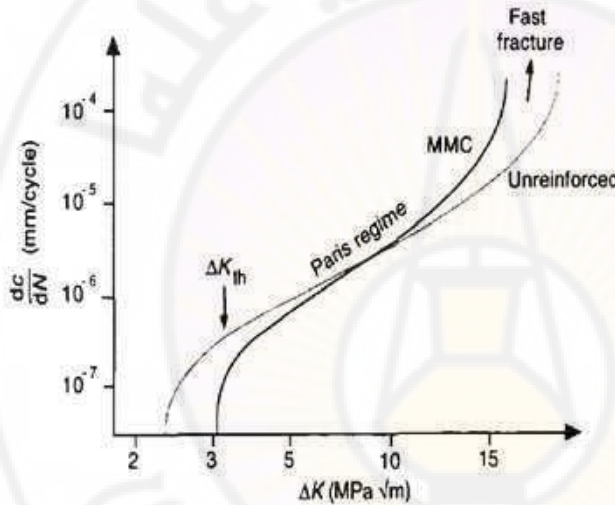
$$dC/dN = \beta(\Delta k)^n \quad (9-20)$$

حيث β ثابت. سيكون المخطط اللوغاريتمي لمعدل نمو الشق $(m/cycle)$ مع Δk خطاً مستقيماً (Paris regime) مع ميل مساوي إلى n . توجد عتبة عند كثافة الإجهاد المنخفضة ΔK_{th} تحت هذه العتبة لن يحدث نمو الشق. يتسارع معدل نمو الشق كمستوى سرعة التحطم التي تقترب من K_c .

إن الطريقة البديلة للتعبير عن معلومات التعب تكون بتشكيل منحنى S/N_f الذي يبين عدد الدورات للفشل N_f كتابع لسعة الإجهاد (S) . تبدي العديد من المواد نمو سريع جداً للشق عندما تكون سعة الإجهاد مرتفعة. الجزء الجوهري في تناقص S مع ارتفاع N_f في المخطط وحد التعب هي سعة الإجهاد الدنيا التي لا يحدث الفشل بالقيم الأقل منها حتى بعد عدد كبير من الدورات. تمثل هذه سعة الإجهاد تحت ΔK_{th} .

يمكن أن توضح بعض ميزات هذا الإجهاد بواسطة الكشف عن كيفية تأثير حبيبات التقوية على سلوك المعدن. هذا مبين تخطيطياً في الشكل (9-10) تحت ΔK_{th} ، الشقوق غير قادرة على النمو مطلقاً. للمواد المركبة ذات الأساس المعدني مثل (Al/SiCp) إن القيمة حوالي $4-2 \text{ MPa } \sqrt{m}$ التي هي تقريباً ضعف القيمة الخاصة بخلائط الألمنيوم غير المقواة والمساوية إلى $(1-2 \text{ MPa } \sqrt{m})$. إن التفسيرات المقترحة تتضمن انحراف الشق على السطوح البينية وتقليل انسياب البنية بسبب الحبيبات. يؤدي هذا التأثير المفيد للتقوية إلى منع نشوء التشقق التعب. مما يعتبر ميزة مفيدة في المواد المركبة ذات الأساس المعدني MMC_s ، على أي حال إن للمواد المركبة ذات الأساس المعدني جساءة تحطم أقل من المعادن غير المقواة وبشكل رئيسي كنتيجة للقيد المفروض على المرونة لأسباب لخصت في وقت سابق الجدول (9-1).

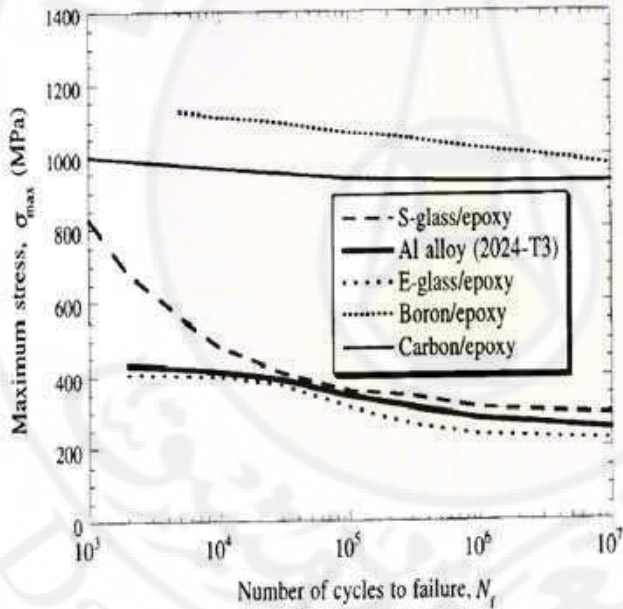
يكون عادة الخط المستقيم في المخطط قصيراً والقوة المرفوع لها n بحدود 5-6 $n \approx$ وهي أعلى من قيمة المادة الحاضنة دون تقوية التي هي بحدود $n \approx 4$. يبدأ التحطم السريع عند قيم ΔK أقل من تلك التي للمعدن غير المقوى. لذلك فإنه يمكن أن تقدم المواد المركبة ذات الأساس المعدني تحسيفاً في الأداء التعبى مقارنة مع المعادن الأخرى، شريطة أن تكون مستويات الإجهاد المطبق منخفضة. إن التحكم بتصنيع المواد المركبة ذات الأساس المعدني مهماً مثل إزالة عدم التجانس الذي يكون مهماً لضمان ذلك .



الشكل (9-10) رسم تخطيطي يصف معدل نمو الشق التعبى كنتيجة لتطبيق عامل كثافة الإجهاد ΔK للمادة المركبة المقواة بالحبيبات والخليطة المماثلة غير المقواة. يبين المخطط تأثير التقوية على تجاوب التعب.

بينما تنتج حبيبات التقوية تعديلات بسيطة نسبياً لسلوك المادة الحاضنة فإن وجود الألياف الطويلة له تأثير أكبر من حبيبات التقوية. هذا صحيح بشكل خاص للمواد المركبة البوليميرية وذلك حسب نوع واتجاه الألياف. يبين عادة توليد الشقوق خلال المادة الحاضنة وعلى طول السطح البيني كيفية تطور التعب. لكن يتأثر ذلك بشكل كبير بكيفية تأثير الألياف على توزيع الإجهاد. انفعال تحطم المادة الحاضنة مهم أيضاً. يكمن الاختلاف الآخر عن حالة الحبيبات في توزيع الضرر. تتشكل في عدة مواضع في المواد المركبة ذات الألياف الطويلة جسور الألياف عبر المادة الحاضنة مقللة من كثافة الإجهاد على طرف الشق. على العكس من ذلك يتضمن نمو الشق التعبى في المواد المقواة بحبيبات عادة شقاً مفرداً مسيطراً بطول محدد.

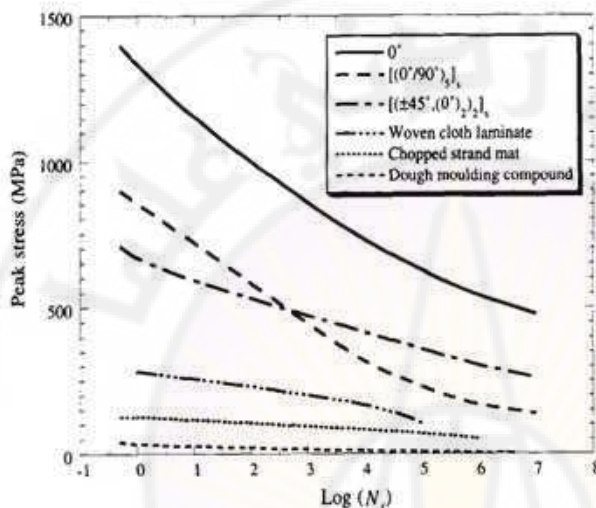
يوضح منحنى S/N_f المبين في الشكل (9-11) بعض ميزات الأداء التعبي للمواد البوليميرية المقواة بألياف طويلة عند التحميل على طول محور الليف. تظهر المواد المركبة المقواة بالألياف الصلبة مثل البورون و الكربون مقاومة تعب ممتازة و لديهما القدرة على تحمل حمولات متتابة بحدود 1 GPa لعدد كبير جداً من الدورات. يتفوق سلوك تعب هذه المواد بشكل ملحوظ على سلوك تعب خليطة الألمنيوم النموذجية. من جهة أخرى إن للألياف الزجاجية صلادة منخفضة مما يؤدي إلى تقليل نقل الاجهاد، معرضاً المادة الحاضنة إلى اجهادات و انفعالات أكبر. يؤدي ذلك إلى ضرر متسلسل عند حمولات مطبقة أقل بكثير من تلك المطبقة على الألياف الصلبة.



الشكل (9-11) مخطط تجربة S/N_f مبيناً عدد الدورات للتحطم عند تحميل التعب المحوري للمادة المركبة البوليميرية المقواة بألياف طويلة أحادية الاتجاه بفعل حمل مطبق أعظمي. معدل الإجهاد R هو 0.1 في كل الحالات. يبين المخطط كذلك خللنط الألمنيوم غير المقواة.

في حين إن مقاومة التعب المحورية للمواد المركبة ذات الألياف الطويلة جيدة جداً، و خاصة مع الألياف العالية الصلادة، يكون الأداء أقل من أجل الصفائح ذات الرقاقات أو عند التحميل غير المحوري. يمكن تفسير ذلك عن طريق الخطوط البيانية في الشكل (9-12) لمادة البوليمر المقوى بألياف الزجاج، فشلت الصفائح المقواة بنسيج عند حمولات أقل بكثير من المواد المقواة بألياف أحادية الاتجاه و أظهرت دليلاً صغيراً على أنه يمكن تحديد قيمة حد إجهاد التعب. يبدأ الضرر على المناطق ذات التوضع العرضي

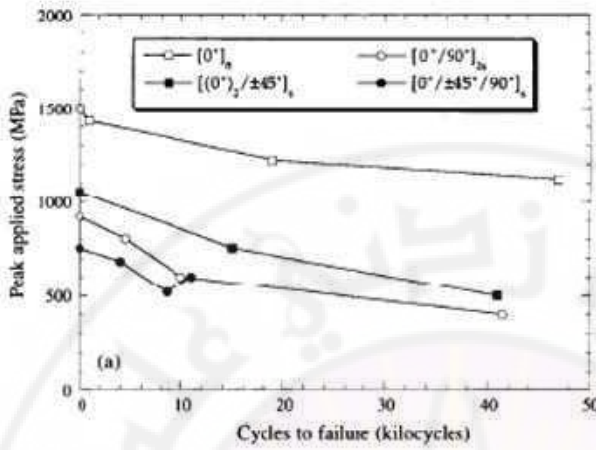
الاتجاه عند تطبيق حمولات قليلة، ناقلاً حمولة إضافية و بالنهاية يتسبب بنشوء الشقوق في المناطق المحورية. و تعتبر مقاومة تعب مثل هذه المواد جيدة جداً مقارنة مع العديد من المعادن.



الشكل (9-12) مخطط S/N_f التجريبي مبيناً عدد الدورات للتحطم عند تحميل التعب المحوري للمادة المركبة البوليميرية من البوليستر المقوى بألياف زجاجية بفعل حمل مطبق أعظمي. معدل الإجهاد R ($R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$) وهو 0.1 في كل الحالات.

أخيراً، تظهر المواد المقواة بالألياف مقطعة متشابكة (CSM) ومركب عجينة القولية (DMC) مقاومة تعب ضعيفة نسبياً. إن الألياف في هذه المواد سيئة التوضع ولها معامل أبعاد منخفض نسبياً، وبشكل خاص لمركب عجينة القولية (DMC).

يظهر سلوك مماثل في صفائح MMC، يبين الشكل (9-13) (a) بيانات مخطط S/N_f . تبدي المواد المقواة بشكل أحادي الاتجاه و بالألياف موازية للحمولة المطبقة السلوك الأفضل. يمكن تحديد سلوك الصفائح الأخرى بحساب مدى الإجهاد التي تتعرض له خلال التحميل الصفيحة 0° ply (موازي للحمولة المطبقة). يرسم مخطط هذا الإجهاد مقابل عدد دورات الفشل الشكل (9-13) (b). تتخفض بعد ذلك بيانات الصفائح المختلفة في منحنى عام. يلقي ذلك ضوءاً على نقطة و هي أنه لا تفشل الصفيحة حتى تتحطم الألياف في الـ 0° ply. يمكن أن تصبح خصائص التعب سيئة بشكل كبير إذا لم تحرف شقوق المادة الحاضنة على السطح البيئي لليف و المادة الحاضنة.



الشكل (9-13) مخطط

S/N_f التجريبي لعدة مواد

مركبة صفائحية من

Ti-15V-3Cr-

SCS.6SiC %35/3Sn

شعيرات أحادية

(a) مبيّن الحمل المطبق

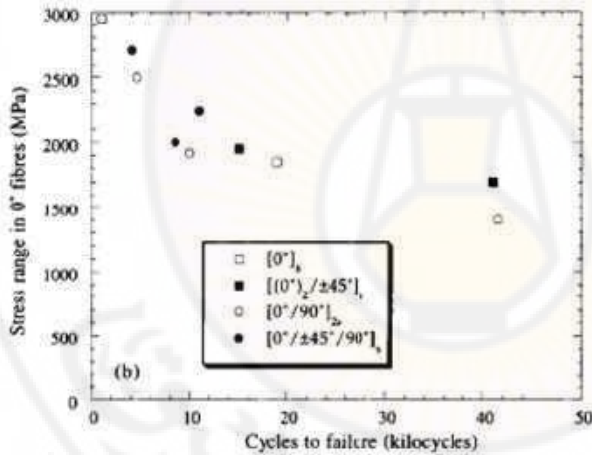
لعدد الدورات للتحطم .

(b) رسمت نفس البيانات

حيث يطبق مجال الإجهاد

على حزمة 0° عدد الدورات

للفشل.



الشكل (9-14) مخطط

S/N_f التجريبي مبيّن عدد

الدورات للتحطم عند تحميل

التعب المحوري للمادة

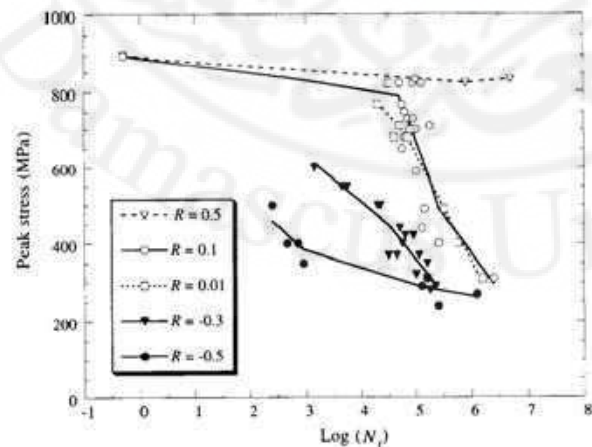
المركبة المقواة بألياف كيفلر

وحيدة الاتجاه مع قيم

مختلفة لمعدل الإجهاد

R (بفعل $R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$)

حمل مطبق أعظمي.



توجد نقطة أخرى مهمة لها علاقة بتعب المواد المركبة و هو أن السلوك غالباً ما يكون حساساً للقيم المطلقة للإجهادات المطبقة، وليس فقط للمدى Δk . وبشكل خاص غالباً ما تنقص إدخال الإجهادات الضاغطة من المقاومة للتعب. يمكن أن يكون هذا بسبب أن الألياف المصفوفة بشكل محوري لها مقاومة ضعيفة للتحذب، الذي يسبب ضرراً للألياف و المادة الحاضنة المحيطة و يسمح أيضاً بظهور إجهادات أكبر في الجوار، و يتسارع تفكك المناطق ذات التوجيه العرضي. إن ألياف الكيفلار بشكل خاص عرضة لهذا التأثير، حيث أن لها مقاومة ضغط ضعيفة. و يمكن تفسير هذا في بيانات الشكل (14-9) الذي يظهر أنه تصبح مقاومة التعب للمواد المركبة من الكيفلار ضعيفة من أجل قيم R السالبة (يجب ملاحظة أن ذلك التأثير مبالغ فيه عند رسم قمة الإجهاد بدلاً من تغير الإجهاد الذي هو أكبر من أجل قيم R الأقل). تميل الألياف الأحادية ذات القطر الأكبر إلى مقاومة التحذب مما يؤدي إلى تحسين الأداء عند قيم R الأقل.

نقطة أخيرة تخص تواتر الدورات. إن لتواتر الدورات تأثير قليل على المعادن، ولكن غالباً ما يسرع التواتر العالي في المواد المركبة من البوليمر من الفشل، الذي هو بسبب الاستجابة اللدنة و لزجة البوليمرات. إن ضرر المادة الحاضنة أكثر حدوثاً إذا فرض الانفعال بشكل سريع لا يتيح الوقت لاسترخاء الزحف و الإجهاد. يظهر تأثير ثاني من الموصلية الحرارية الضعيفة للبوليمرات، و بالأخص إذا ما كانت الألياف أيضاً ذات موصلية ضعيفة (الزجاج، الكيفلار.... الخ). تميل هذه المواد المركبة إلى أن تزداد درجة حرارتها أثناء التحميل التعبي، و كنتيجة للصعوبات في تبديد الحرارة المتولدة محلياً عن طريق الضرر و التشوه اللدن اللزج، يسارع ذلك في التواترات العالية للدورات وبما أنه تنخفض متانة المادة الحاضنة بزيادة درجة الحرارة مما يؤدي إلى تسريع الفشل.

2-4-9- تشقق التآكل الإجهادي: Stress corrosion cracking

تشقق التآكل الإجهادي هو مصطلح يطلق على نمو شق حرج فرعي الذي يحدث كنتيجة لتأثير مائع أكال واصل إلى حافة الشق المتقدمة. تختلف الميكرو ميكانيزمات المسؤولة عن تخفيض هذه الجساءة الموضعية للمادة بشكل واسع بين مختلف المواد و البيئات. كمثال على ذلك، في المواد ذات الأساس من Al يؤدي وجود الرطوبة أو الهواء المحمل

بالأملاح إلى تسارع نمو تشقق التعب بين 5 إلى 10 مرات. وقد تم ملاحظة نتيجة مماثلة للمواد المقواة بالحبيبات MMCs. تعطي الألياف في الألمنيوم المقوى بالألياف الطويلة زيادة في قدرة الاحتفاظ على المقاومة ضد التعب و ذلك عند التحميل المركزي، بينما في الاتجاه العرضي تتأثر مقاومة التعب بالبيئة الأكلة الى درجة تتعلق مباشرة بنسبة المادة الحاضنة والألياف في المادة المركبة.

غالباً ما يكون تشقق التآكل الاجهادي في حالة الألمنيوم ناتج عن توليد الهيدروجين (الذري) على حافة الشق، الذي يتطور بتواجد سوائل مختلفة، الذي يميل إلى حدوث النقص عن طريق حركة الانخلاع المعيقة.

إن سلوك المادة الحاضنة حساس جداً لوجود الموائع في المواد المركبة البوليمرية، و كمثال على ذلك تتغير خصائص العديد من البوليمرات عند امتصاص الرطوبة. في العديد من الحالات يحدث هذا الاختراق عن طريق الانتشار عبر المادة الحاضنة الذي لا يقيد المرور عبر الشق. يزيد امتصاص الماء من الجساءة و الانفعال للفشل للمادة الحاضنة، و هكذا يمكن أن تزداد مقاومة التعب للإيبوكسي المقوى بألياف زجاجية عند غليانها المسبق بالماء. ومع ذلك يميل امتصاص الماء إلى تعزيز فك ترابط السطح البيني و إضعاف الصلادة و المتانة و بالتحديد تحت تحميل القص والتحميل العرضي. تقلل بعض السوائل من متانة الألياف كثيراً. يبين الشكل (10-8) مثلاً على ذلك حيث يظهر تحطم سطح مادة مركبة من البوليستر 60% أليافاً زجاجية تم الاختبار مع وجود حمض كلور الماء المخفف. لقد أثر هذا الحمض على سطح الليف عند حافة الشق مما خفض من متانته بشكل كبير، و لم يقل فقط من متانة المادة المركبة، كذلك انخفضت الجساءة و مقاومة التعب بشدة ولأن كل الألياف تحطمت في مستو الشق فإن عمل سحب الألياف صفر. يجب ان تكون مخاطر هذه التأثيرات حاضرة دائماً في الذهن عند استخدام المواد المركبة من البوليمر المقوى بألياف زجاجية وتحت حمولات في بيئات كيميائية عدائية و بالتحديد الأحماض غير العضوية.



الفصل العاشر

السلوك الحراري للمواد المركبة

Thermal behavior of composites

1- التمدد الحراري والاجهادات الحرارية.

2- الزحف.

3- الناقلية الحرارية.



10-1 - مقدمة: Introduction

إن سلوك المواد المركبة لتغيرات درجات الحرارة حساس جداً. تظهر حساسية المواد المركبة للحرارة من سببين رئيسيين.

أولاً: تتعلق استجابة المادة الحاضنة للحمل المطبق عليها بدرجة الحرارة.

ثانياً: قد يسبب تغير درجة الحرارة إجهادات داخلية نتيجة تفاوت التمدد والتقلص بالحرارة لمكوني المادة المركبة، تؤثر هذه الإجهادات الداخلية على عامل التمدد الحراري للمادة المركبة. إضافة إلى ذلك، تتواجد إجهادات كبيرة في المادة (في درجة حرارة المحيط) نتيجة تبريد المواد بعد عملية التصنيع، يمكن أن يؤثر تغير حالة الإجهادات الداخلية الناتجة عن الحرارة على استجابة المادة المركبة للحمل مطبق.

يتأثر سلوك الزحف (زحف المعدن) بهذه التغيرات وبشكل خاص تحت ظروف التغير الدوري لدرجة الحرارة. كذلك تشكل الناقلية الحرارية للمواد المركبة أهمية كبيرة حيث تتضمن تطبيقات وعملیات معالجة كثيرة بعض أنواع التدفق الحراري. يمكننا التكهن بهذه الخاصية من معرفة الناقلية الحرارية لمكونات المادة المركبة رغم أنه قد لا يكون هذا التكهن صحيحاً نتيجة التماس الحراري السيئ عبر سطوح تلامس مكونات المادة المركبة.

10-2 - التمدد الحراري والإجهادات الحرارية:

Thermal expansion and thermal stresses

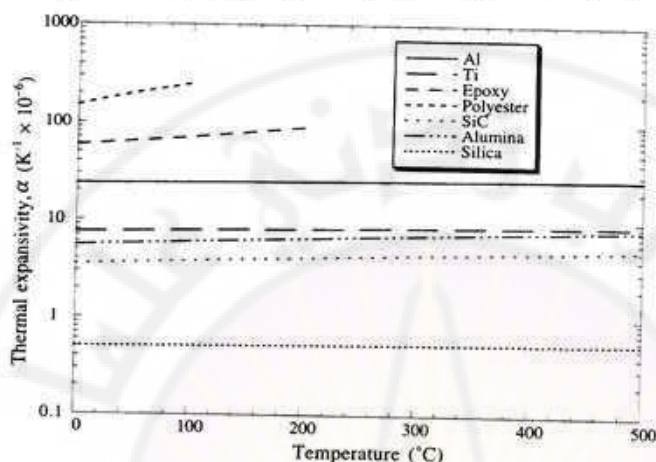
10-2-1 - الإجهادات والانفعالات الحرارية:

Thermal stresses and strains

يبين الشكل (10-1) عوامل التمدد الحراري (α) للمواد الحاضنة ومواد التقوية بدلالة درجة الحرارة. تتمدد البوليميرات والمعادن أكثر من السيراميك. يصل الاختلاف في عوامل التمدد بين المواد الحاضنة ومواد التقوية لعدة مرات.

يتضمن تصنيع المادة المركبة عملية اندماج بدرجة حرارة عالية نسبياً (الفصل الحادي عشر) لذلك تحوي المواد المركبة في درجات الحرارة العادية إجهادات ضغط كبيرة ناتجة عن فروقات إجهادات التقلص الحرارية.

ستتعرض كذلك المادة الحاضنة في المواد المركبة ذات الأساس من الريزن (الراتنج) للتقلص خلال المعالجة (عملية التصلب) مما يضيف المزيد إلى تفاوت التقلص.



الشكل (10-1)

بيانات تجريبية من
أجل معاملات التمدد
الحراري لمواد حاضنة
ومواد تقوية مختلفة.

بفرض أن المادة غير مجهددة (في درجة الحرارة المرتفعة T_{esf})، يمكن اعتبار أن الحالة الإجهادية في درجة الحرارة الأخفض ناشئة عن عدم التلاؤم الناتج عن وضع شائبة كبيرة في داخل ثقب صغير في المادة الحاضنة.

ويكون انفعال عدم التلاؤم (شائبة كبيرة في ثقب صغير) الناتج عن التفاوت في الأحجام مساوياً إلى $\Delta\alpha \Delta T$ ، حيث:

$$\Delta\alpha = \alpha_m - \alpha_f \quad \text{و} \quad \Delta T = T_{esf} - T_0$$

T_0 = درجة حرارة المحيط.

نستطيع حساب الحالة الإجهادية الناشئة عن عدم التلاؤم (التفاوت في الأحجام) بشكل تحليلي، تكون أبسط حالة عندما تكون مادة التقوية كرة معزولة في مادة حاضنة لانهائية. إن الإجهادات في المادة الحاضنة هي نفس الإجهادات التي تسببها فقاعة كروية نصف قطرها a تحت تأثير ضغط P .

وتكون الإجهادات القطرية والمماسية في المادة الحاضنة:

$$\sigma_\theta = Pa^3 / 2 r^3 \quad , \quad \sigma_r = - Pa^3 / r^3 \quad 10-1$$

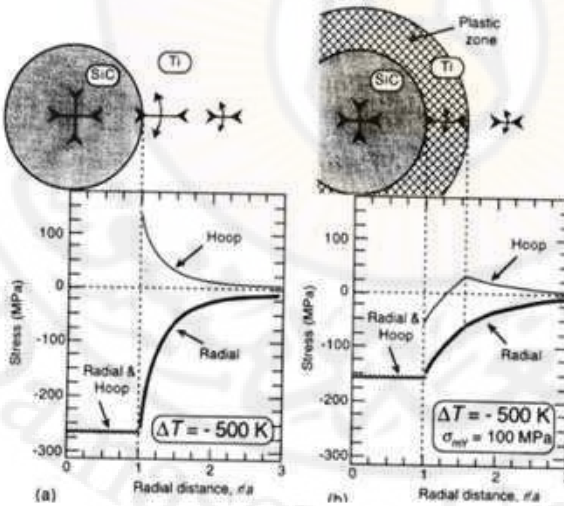
يمكن تحليلياً حساب الضغط في حبيبة كروية بسبب الانفعالات الناتجة عن التفاوت الحجمي لعدم التلاؤم $\Delta\alpha \Delta T$:

$$P = \frac{4G_m \frac{(1+\nu_m)}{3(1-\nu_m)} \frac{K_p}{K_m} \Delta\alpha\Delta T}{\frac{(1+\nu_m)}{3(1-\nu_m)} \left(\frac{K_p}{K_m} - 1 \right) + 1} \quad (10-2)$$

حيث :

G : معامل القص، ν : عامل بواسون، K : معامل تغير الحجم، p,m : للحبيبة والمادة الحاضنة.

يبين الشكل (10-2a) نتائج تطبيق هذه المعادلات على حالة كرة من SiC في مادة حاضنة من التيتانيوم Ti بعد التبريد من درجة حرارة (500k). ينشأ حسب الشكل إجهاد ضغط كبير في الاتجاه القطري، لكن الإجهاد الحلقي (المماس) في المادة الحاضنة هو إجهاد شد. لذلك يحدث انحراف كبير (تغير شكل) لمنطقة الحالة الإجهادية في المادة الحاضنة بجانب كرة SiC وقد تحدث لإجهادات خضوعاً في المادة الحاضنة.



الشكل (10-2)، (a) : نحقل الإجهاد المرن في مادة حاضنة لانهائية من التيتانيوم متضمنة حبيبات كروية من SiC بعد التبريد من درجة حرارة 500 k (b) : حالة إجهادية جديدة بعد انسياب موضعي لدن بفرض إجهاد خضوع المادة الحاضنة (100 MPa) دون إجراء تقسية.

يبين الشكل (10-2b) توزيع الإجهادات حيث تحدث تغيرات كبيرة في توزيع الإجهادات بسبب الانسياب اللدن، ويحدث انخفاض ضغط السائل الساكن الذي تتعرض له الحبيبة. بينما يؤثر وجود الحبيبات المجاورة على الوضع في المادة المركبة الحقيقية، حيث تغير

لدونة المادة الحاضنة حالة الإجهاد المتنبأ بها، أما من أجل حالة المرونة تبقى الدراسة صحيحة ويجب أخذها دوماً بعين الاعتبار .

يمكن تحليلياً دراسة حقل الإجهاد المرن للليف وحيد وطويل بشكل لانتهائي محاط بمادة حاضنة أسطوانية نصف قطرها منته، إن المعادلات المستخدمة أكثر تعقيداً من الحالة السابقة. إن نتيجة تلك الدراسة مبينة في الشكل (3-7) في الفصل السابع، وذلك لمادة مركبة من ألياف الزجاج والبولىستر بعد التبريد من درجة حرارة ($k = 100$). إن حقل الإجهاد الناتج مشابه لحالة الكرة على الرغم من أن الإجهادات المحورية هي الإجهادات المسيطرة على غلاف الليف. إن حقل الإجهاد في المادة المركبة المقواة بألياف قصيرة أكثر تعقيداً وخصوصاً عندما نأخذ بعين الاعتبار أثر الألياف المجاورة، يتطلب في هذه الحالة حساب حقل الإجهاد اتباع طرق عديدة تتطلب جهداً حسابياً كبيراً.

نستطيع أن نستنتج من المثالين السابقين البسيطين الطبيعة العامة لتوزيع الإجهادات، كما يمكن أن نأخذ فكرة تقريبية عن كمية الإجهاد، كما يمكن أن نستخدم طريقة (إشيلبي) للتنبؤ بالإجهادات المتوسطة للمادة الحاضنة بالنسبة للحجم والناتجة عن التفاوت في التقلص الحراري.

قبل تفحص كيفية تأثير الإجهادات التي تسببها الحرارة على عمليات التشوه غير المرنة، من المفيد أن نرى كيف يتحكم الاستيعاب المرن للانفعال الناتج عن عدم التلاؤم (التفاوت في الحجم) بمعامل التمدد الحراري الإجمالي للمادة المركبة.

2-10-2 - عوامل التمدد الحرارية: Thermal expansivities

يسمح تحليل الإجهادات الناتجة عن تغيرات درجة الحرارة بالتنبؤ بعامل التمدد الحراري (CTE). ستتصاحب هذه الإجهادات بانفعالات ويمكن حساب أو تقدير التأثير النهائي لهذه الإجهادات على طول المادة المركبة. يضاف التغير الإجمالي في الطول الناتج عن الإجهادات الداخلية إلى عامل التمدد الإجمالي للمادة الحاضنة ليعطي التغير الكلي في الطول وبالتالي عامل التمدد الكلي للمادة المركبة. تسمح هذه النظرة المبسطة للتمدد الحراري بتوضيح بعض النقاط، فمثلاً: مادة مسامية (وهي مادة ذات فراغات) لا تولد عند التسخين أية إجهادات داخلية لأن "الشوائب" معدومة الجساءة، لذلك لا يؤثر وجود

المسامات (مهما كان شكلها -أبعادها وحجمها- ونسبتها الحجمية) في عامل التمدد الحراري، على الرغم من أنها تنقص الجساءة بشكل كبير. أبسط حالة لمعالجة التمدد المحوري هي حالة المادة المركبة المحتوية على ليف طويل، يبين الشكل (3-7) أن الإجهادات المحورية منتظمة في كلا المكونين، مما يبسط المسألة.

يعطي نموذج متوازي المستطيلات أساساً جيداً للحساب، ولحساب معامل يونغ. يوضح الشكل (3-10) عملية الحساب، حيث يجب اعتبار أنه يُسمح لكلا المكونين بالتمدد بحرية ثم يجبران على الاحتفاظ بالطول نفسه في الاتجاه المحوري وذلك بتطبيق إجهادات مناسبة عليهما.

يمكن اعتبار أن التمدد النهائي مكون من حدين، يمثل الحد الأول التمدد الطبيعي (عادة يعتبر تمدد المادة الحاضنة) والحد الثاني التمدد أو التقلص الإضافي المسبب للإجهاد الداخلي، أي :

$$\alpha_c \Delta T = \alpha_m \Delta T + \varepsilon_m \quad \dots (10-3)$$

حيث α_c : عامل التمدد الحراري للمادة المركبة .

ε_m : الإنفعال المرن للمادة الحاضنة المصاحب للإجهاد الداخلي الشكل (3-10).

تُحسب قيمة ε_m باستخدام علاقتين بسيطتين تعتمدان على / توازن الانفعال / و / توازن القوى /.

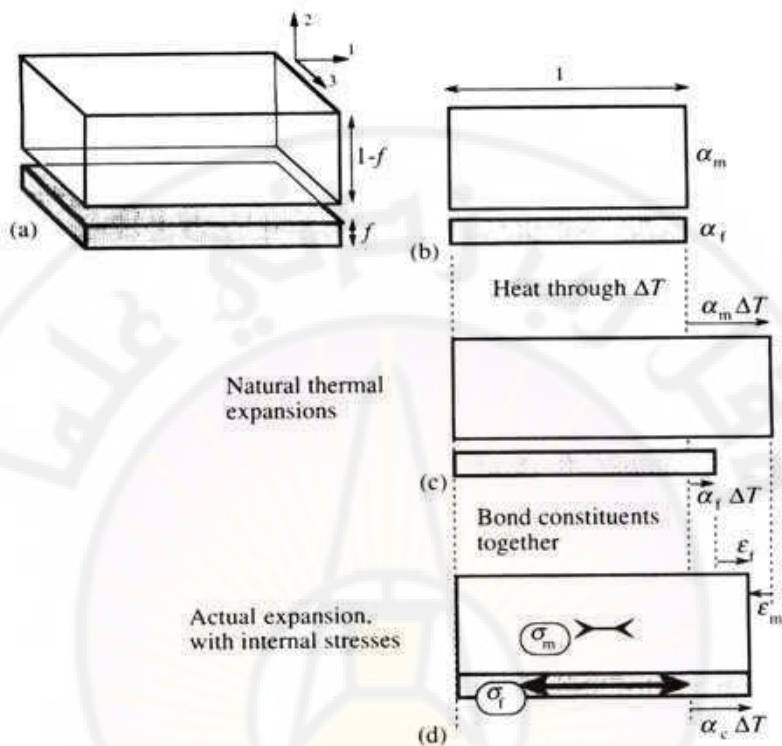
توازن الانفعال: يعبر عن مجموع الانفعالات المتولدين بالإجهادين الداخليين كالفرق بين الانفعالات الحرارية الطبيعية :

$$(\alpha_m - \alpha_f) \Delta T = \varepsilon_f - \varepsilon_m \quad (10-4)$$

توازن القوى: بما أنه لا يوجد أي إجهاد مطبق لذلك يجب أن يتوازن الإجهادان الداخليان عندما يحولان إلى قوى (مضروبة بسطوح المقاطع المناسبة لها) :

$$(1-f) \sigma_m + f \sigma_f = 0 \quad (10-5)$$

$$(1-f) E_m \varepsilon_m + f E_f \varepsilon_f = 0$$



الشكل (10-3) استخدام نموذج اللوح من أجل استنتاج علاقة رياضية تعبر عن التمدد المحوري لمادة مركبة مقواة بألياف طويلة .

(a) : أبعاد اللوح، (b) : الطول البدائي باتجاه الليف، (c) : التمددات الحرارية الطبيعية (دون إعاقة) لمكوني المادة المركبة، (d) : الأبعاد النهائية والإجهادات الداخلية عندما يتم المحافظة على السطح البيني (سطح التلامس).

بحل المعادلتين أعلاه نجد :

$$(1-f) E_m \epsilon_m + f E_f [\epsilon_m + (\alpha_m - \alpha_f) \Delta T] = 0 \quad (10-6)$$

$$\epsilon_m = [-f E_f (\alpha_m - \alpha_f) \Delta T] / [(1-f) E_m + f E_f]$$

بالتعويض في المعادلة (10-3) يمكننا الحصول على معامل التمدد الحراري المحوري للمادة المركبة:

$$\alpha_c = \alpha_m - \frac{f E_f (\alpha_m - \alpha_f)}{(1-f) E_m + f E_f} = \frac{\alpha_m (1-f) E_m + \alpha_f f E_f}{(1-f) E_m + f E_f} \quad (10-7)$$

يمكن الوثوق بتوازن القوى المحورية في حالة نموذج متوازي المستطيلات لذلك هذه الحسابات صحيحة (هذه الحسابات غير دقيقة تماما بسبب إهمال اختلافات التقصص معامل - بواسون).

إن حساب عامل التمدد الحراري في الاتجاه العرضي وحساب قيمة عامل التمدد الحراري للمواد المركبة المقواة بألياف قصيرة أو بالحبيبات أمر صعب حيث تتغير الإجهادات والانفعالات بحسب الموضع.

يتم حساب عامل التمدد الحراري العرضي للمواد المركبة المتضمنة ليف طويل باستخدام أسلوب يعتمد على الطاقة حيث:

$$\alpha_c^{tr} = \alpha_m (1-f)(1+v_m) + \alpha_f f(1+v_f) - \alpha_c^{ax} v_{12c} \quad (10-8)$$

حيث يعطى عامل التمدد الحراري المحوري α_c^{ax} بالعلاقة (10-7) ويحدد معامل بواسون v_{12c} من قانون الخلانط البسيط.

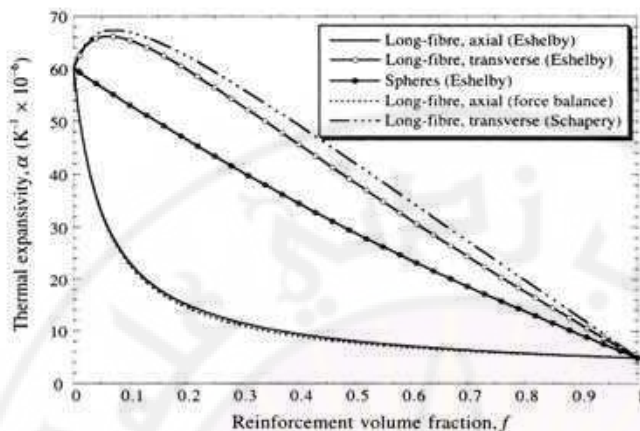
يبين الشكل (10-4) تغير معاملي التمدد الحراري المتنبأ بهما مع النسبة الحجمية للألياف المحتواة ضمن المادة المركبة ذات الأساس من البوليمير والمعبر عنه في العلاقتين "10-7"، "10-8"، كما يبين الشكل التنبؤات التي حصل عليها باستخدام طريقة إيشيلي "Eshelby" الذي يتم فيها حساب الحجم المتوسط للإجهادات في كلا المكونين نتيجة انفعال عدم التلاؤم (التفاوت في الحجم) وبذلك يمكن التنبؤ بعوامل التمدد الحراري. ومنه تكون العلاقة الناتجة :

$$\alpha_c = \alpha_m - f \{ (C_m - C_f) [S - f (S-1)] - C_m \}^{-1} C_f (\alpha_f - \alpha_m) \quad (10-9)$$

حيث الجساءة C ، وعامل التمدد α ، وقيمة إيشيلي S (والمتعلقة بنسبة معامل أبعاد الليف Aspect ratio) وأيضا قيمة التماثل λ .

تعطي المنحنيات المبينة في الشكل (10-4) الملاحظات التالية :
أولاً: تتوافق معادلة توازن القوى / 10-7 / ومعادلة شابري / 10-8 / مع نموذج إيشيلي مما يؤكد وثوقيتهما.

ثانياً: يمكن تمثيل حالة الحبيبات الكروية بواسطة قاعدة المزج -قانون الخلانط- (تغير خطي بين عوامل التمدد للمكونات).



الشكل (10-4)، وثوقية

(ثقة) التنبؤ بالتمدد الحراري
لمادة الإيبوكسي بطرق
متنوعة من التسليح - تبعا
لمعادلة ميزان القوى حسب
المعادلة (10-7) و شابي
(10-8) وإيشيلبي (10-
9). تم الحصول على
المنحنيات باستخدام بيانات
الخواص في الجداول (2-
&2) (5-2).

ثالثاً: يزداد عامل التمدد العرضي للمادة المركبة المقواة بليف طويل بزيادة محتوى الألياف، وذلك بسبب أن تسخين المادة المركبة يجمع التمدد المحوري وذلك بنتيجة وجود الألياف، ويولد الانضغاط المحوري الناتج بالمادة الحاضنة تمدد بواسون في الاتجاه العرضي الذي هو أكبر من أن يعوض تأثير التناقص بسبب وجود الألياف (على الأقل من أجل محتوى ضئيل من الألياف).

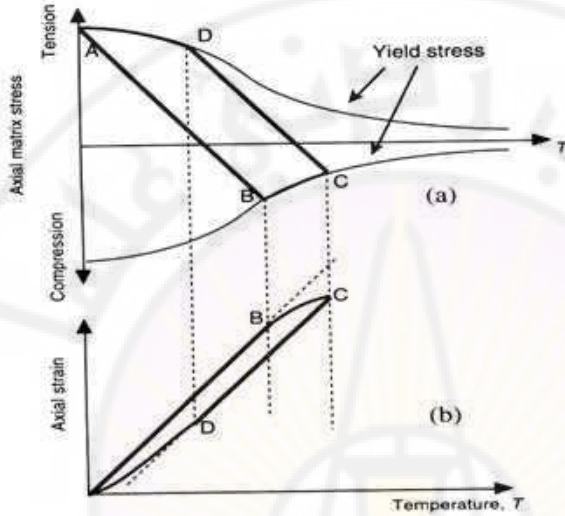
يهتم المهندسون بمنحنيات مماثلة للشكل 4-10/، حيث تسمح هذه المنحنيات بتحديد عامل التمدد الحراري عن طريق انتقاء مكونات المادة المركبة ونسبة التقوية المستخدمة فيها، يجب ملاحظة أنه تم افتراض السلوك المرن عند حساب هذه القيم، إذا كانت التغيرات الحرارية كبيرة عند ذلك تصبح الإجهادات الداخلية المصاحبة كبيرة، وفي هذه الظروف تتعرض المادة الحاضنة لانسحاب لدن (أو زحف)، الذي قد يعدل من تغيرات أبعاد المادة المركبة ويجعل المادة صعبة التنبؤ.

3-2-10- الدورات الحرارية للمواد المركبة وحيدة الاتجاه:

Thermal cycling of unidirectional composites

تتولد إجهادات داخلية كبيرة عندما تتغير درجة حرارة المادة المركبة، يحدث عادة هذا التغير لدى استخدام المادة المركبة، حيث يمكن أن يحدث تأرجح بالحرارة (على الأقل عدة عشرات الدرجات) حتى بالمواد المركبة التي ليست معدة بالأصل للاستخدام في درجات الحرارة العالية أو المنخفضة. من المهم دراسة سلوك المواد المركبة أثناء تغيرات

الحرارة المذكورة. قد تستجيب المواد المركبة بطريقة لدنة لتغيرات الإجهاد الداخلي المصاحب لتغيرات الحرارة. فمثلاً: ظهر عادةً قياسات استطالة المواد المركبة وجود تخلف (منحنيات التسخين والتبريد لا تتوافق).



الشكل (10-5) تأثير الدورات الحرارية حيث يظهر تغيرات في الإجهاد المحوري للمادة الحاضنة وانفعال المادة المركبة على مجال حراري كبير وذلك من أجل مادة حاضنة لها حد للخضوع (حد الخضوع، كالمعادن والبلاستيك الحراري).

حسب الشكل (10-5) تملك المادة الحاضنة (النقطة A) بالبداية إجهاد شد متبقي مساوٍ لإجهاد الخضوع (بسبب دورة التبريد). ينقص هذا الإجهاد لدى التسخين ويصبح ضاغطاً ويسبب خضوعاً على الضغط (النقطة B). يلي ذلك فترة سيلان لدن مضطرد. تتعرض المادة الحاضنة لدى التبريد (النقطة C) للخضوع على الشد في النقطة D ثم تعود إلى A. يتوقع أن تبدي منحنيات قياس التمدد {الانفعال المحوري مع درجات الحرارة} تخلفاً وأن لا تبدي تغيراً في الأبعاد.

يمكن استخدام تحليل بسيط لمنحنيات قياس التمدد وذلك لتقدير تغير الإجهادات المحورية للمادة الحاضنة في المادة المركبة ذات الألياف الطويلة.

يجب أن يساوي الانفعال المحوري للمادة المركبة نظيره بالنسبة للألياف وذلك بفرض عدم وجود انزلاق في سطح التماس (بين المادة الحاضنة والألياف) وعدم انفعال الألياف، يعبر عن هذا بمجموع التمدد الحراري الطبيعي والانفعال المرن :

$$\epsilon_{lc} = \epsilon_{lf} = \alpha_f \Delta T + [\sigma_{lf} - \nu_f(\sigma_{2f} + \sigma_{3f})] / E_f \quad (10-10)$$

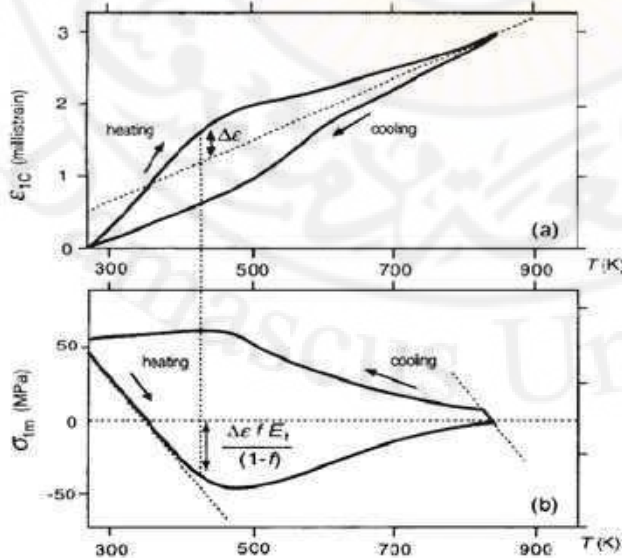
بما أن الإجهادات القطرية والمماسية في الليف (σ_{2f}) و (σ_{3f}) صغيرة بالنسبة للإجهاد المحوري، الشكل (3-7)، وبما أن معامل بواسون للألياف السيراميكية منخفض جداً (0.2~)، يمكن إهمال تأثير إجهادات الليف العرضية.

يمكن استخدام توازن القوى المحورية $(f \sigma_{1f} + (1-f) \sigma_{1m} = 0)$ لإيجاد الإجهاد المحوري في المادة الحاضنة.

$$\sigma_{1m} = [f E_f (\alpha_f \Delta T - \epsilon_{1c})] / (1-f) \quad (10-11)$$

ومنه تتناسب σ_{1m} مع الفرق $\Delta \epsilon$ بين الانفعال الحراري الطبيعي للليف وبين الانفعال المقاس للمادة المركبة .

يمكن استنتاج الإجهاد الحراري الأولي في المادة الحاضنة بتسخين المادة المركبة لدرجة حرارة مرتفعة $(\sim 0.8 T_m)$ حيث يصبح الإجهاد في المادة الحاضنة صغيراً جداً، ثم بإرجاع خط التمدد الحراري لليف من تلك المنطقة، وهذا موضح في الشكل (6-10). يبين المخطط النتائج التجريبية لمنحنيات قياس التمدد والإجهاد الناتج في المادة الحاضنة وبما أن هذا الأخير له نفس الشكل المبين في الشكل (5-10) تعطي هذه العملية البسيطة طريقة مناسبة لدراسة الإجهاد الأولي في المادة الحاضنة في درجة الحرارة المرتفعة.



الشكل (10-6)

(a) قيم الانفعال التجريبية خلال الدورة الحرارية.

(b) التغير المستنتج للإجهاد المحوري في المادة الحاضنة

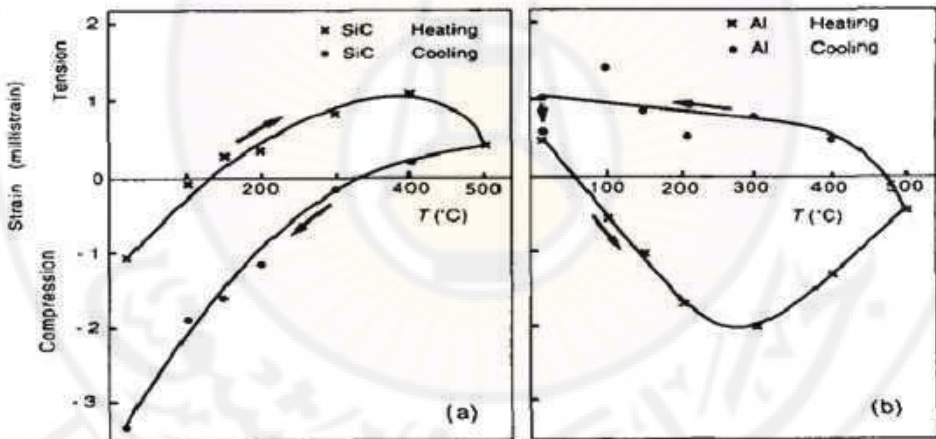
من أجل مادة مركبة Al

3Mg/30%SiC

بألياف طويلة. يشرح المخطط

العلاقة (10-11) .

يؤدي تغطيس المادة في الأوت السائل ثم التسخين لدرجة حرارة الغرفة إلى إجهاد ضاغط في المادة المركبة Al/SiC تقدر قيمته بمقدار (25 MPa) مقارنة مع إجهاد شد مساوي إلى 50 MPa بعد التسخين ثم التبريد لدرجة حرارة الغرفة . يشابه سلوك المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة أثناء الدورات الحرارية السلوك الموصوف أعلاه ولكن هناك مجالاً أوسع لعمليات تراخي الإجهادات، تم توضيح ذلك في بيانات انحراف النيترونات حسب الشكل (7-10) الذي يظهر الانفعالات المحورية المتغيرة (وبالتالي الإجهادات) في كلا الليف والمادة الحاضنة. إجهاد المادة الحاضنة مشابه للإجهاد السابق الموضح في الشكل (5-10) و (6-10) على الرغم من ملاحظة انخفاض الإجهاد المتبقي النهائي وذلك على مدى 8 ساعات في درجة حرارة الغرفة، يعتقد أن ذلك ناشئ عن عمليات استمرار تراخي الإجهاد (الزحف).



الشكل (7-10) قياسات انحراف النيترون لاختلاف الانفعالات الدقيقة الناتجة عن دورة حرارية لمركب Al متضمننا 5% من شعيرات SiC المتراسة في حالتها:

(a) مادة التقوية، (b) المادة الحاضنة. حدوث ارتخاء الإجهاد المدروس عند نهاية الدورة الحرارية وذلك بعد مدة 8 hours.

يتغير تراخي الإجهاد كثيراً بحسب نوعية المادة الحاضنة وطول الليف والمجال الحراري. قد تحدث شقوق ميكروية في المادة الحاضنة عندما لا يحدث تراخي الإجهاد بسهولة، وعندما تكون المادة الحاضنة هشة، يكون هذا أكثر حدوثاً في المادة المركبة الصفائحية المقواة بألياف أحادية الاتجاه.

4-2-10- الدورات الحرارية للمواد الصفائحية:

Thermal cycling of laminates

إن المشاكل المرافقة للإجهادات الحرارية في المواد الصفائحية قد تكون كثيرة. يتزايد في المواد الصفائحية الانفعال الناجم عن عدم التلاؤم -تفاوت في الحجم- بسبب الحرارة، ليس فقط بين الليف والمادة الحاضنة، وإنما بين طبقات المادة الصفائحية. بما أنه للصفحة عامل تمدد حراري في الاتجاه العرضي أعلى بكثير من عامل التمدد في الاتجاه المحوري، سيؤدي التسخين عبر طبقات الصفحة إلى عرقلة شديدة للتمدد العرضي لكل طبقة نتيجة وجود الطبقة المجاورة. هذا مفيد حيث سيجعل تغيرات الأبعاد أصغر وأكثر تجانساً، لكنه سيؤدي إلى إجهادات داخلية في الصفحة وقد تشوه هذه الإجهادات الصفحة فلا تعود مستوية، هذا موضح في الشكل (14-5). لكن حتى لو لم تحدث هذه التشوهات، فقد تؤدي الإجهادات الناشئة نتيجة تغير الحرارة إلى ضرر في البنية الميكروية وتشويهها للخواص.

يمكن حساب الإجهادات الحرارية ضمن الصفحة باستخدام الطرق العديدة المبينة في الفصل الخامس. ويمكن استخدام طريقة تحليلية بسيطة من أجل الحالة الخاصة لصفحة ذات طبقات متعامدة.

يمكن حساب الإجهادات والانفعالات الموازية والعمودية على الألياف في كل طبقة باستخدام الطريقة المتبعة في الفقرة 2-2-10 الشكل 3-10. ونعتبر مكوني المادة المركبة طبقتين (واحدة موجهة محورياً والأخرى عرضياً) وليس المادة الحاضنة والألياف. نتوصل إلى نفس العلاقة إلا أنه يتغير معنى البارامترات، مثلاً إذا اعتبرنا أن الطبقة العرضية المادة الحاضنة والطبقة المحورية الألياف.

تعطي النسخة المعدلة من المعادلة 6-10 الانفعال المرن في الصفحة العرضية لدى التسخين في مجال حراري ΔT بالعلاقة:

$$\varepsilon_2 = - [E_1(\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T] / [E_1 + E_2]$$

حيث E_1 و E_2 عاملا يونغ المحوري والعرضي على الترتيب (معطيان في المعادلتين 3-4 و 4-7) α_1, α_2 هما عاملا التمدد الحراريان (المحوري والعرضي) ومعطيان في المعادلتين (10-7) (10-8).

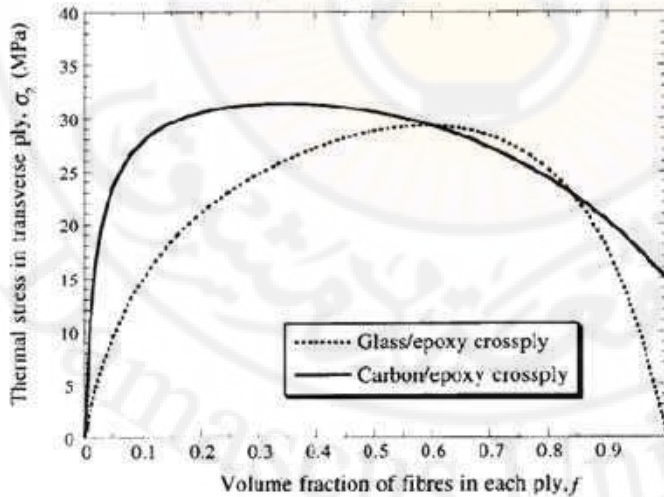
لم تستخدم في المعادلات النسبة الحجمية f لكلا المكونين، حيث تساوي النسبة الحجمية لصفحة ذات طبقات متعامدة متساوية السمك إلى (0.5) فيفني بعضها بعضا في المعادلة (10-6)، يمكن تحويل هذا الانفعال مباشرة إلى إجهاد حيث أنه ناجم عن إجبار الطبقتين على التساوي في الطول (ولا يحتوي التمدد الحراري الحر).

يمكن حساب الإجهاد الذي تتعرض له الطبقة العرضية باستخدام العلاقة التالية:

$$\sigma_2 = - [E_1 E_2 (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T] / [E_1 + E_2] \quad \dots (10-12)$$

إن الإجهاد في الطبقة المحورية يساوي القيمة σ_2 ويعاكسها اتجاهًا.

يوضح الشكل (10-8) المنحنيات الناتجة عن تطبيق العلاقة (10-12). تبين هذه المنحنيات الإجهادات في الطبقات العرضية لصفحتين ذات طبقات متعامدة بدلالة النسبة الحجمية للألياف f بعد التبريد من درجة حرارة (100 K).



الشكل (10-8) علاقة الإجهاد الحراري في الاتجاه العرضي مع نسبة الألياف المحتواة ضمن كل طبقة لصفحتين ذات طبقات متعامدة، ضمن مجال تبريد 100 K.

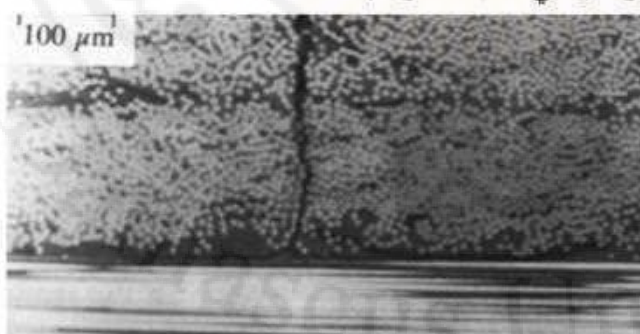
تم الحصول على بيانات خواص الألياف والمادة الحاضنة من الجدولين (2-2) و (2-5). يوجد للشكل العديد من النقاط الهامة:

A- يلاحظ وجود ذروة بزيادة محتوى الألياف. هذه الذروة متوقعة حيث أنه تنتج الإجهادات عن تباين خواص α . توجد ذروة للاختلاف بين α_1 و α عند بعض القيم الوسطية لـ f (الشكل 4-10).

B- لا يندعم الإجهاد حينما تتزايد قيمة f إلى 100% وذلك لمادة مركبة مقواة بألياف كربونية، وهذا بسبب أن الألياف الكربونية متباينة خواص معاملات التمدد الحراري، الجدول (2-2). تظهر هذه المادة عند التسخين التمدد الصفري (أو السلبى) بالاتجاه المحوري، لكن تتمدد بالاتجاهات القطرية (العرضية).

C- إن مستويات الإجهاد الحراري مهمة من أجل التنبؤ بنشوء الضرر. يتوقع نشوء إجهادات مساوية تقريباً إلى 25-30 MPa وذلك من أجل محتوى ألياف بحدود 40-70 % كما في الشكل (8-10). قيمة هذا الإجهاد مساوية تقريباً لقيمة إجهاد الفشل بالاتجاه العرضي لصفحة نموذجية حسب الجدول (2-8). يتبين مما سبق أنه يحتمل أن يسبب التبريد من درجة حرارة (100K) ضرراً في الصفحة.

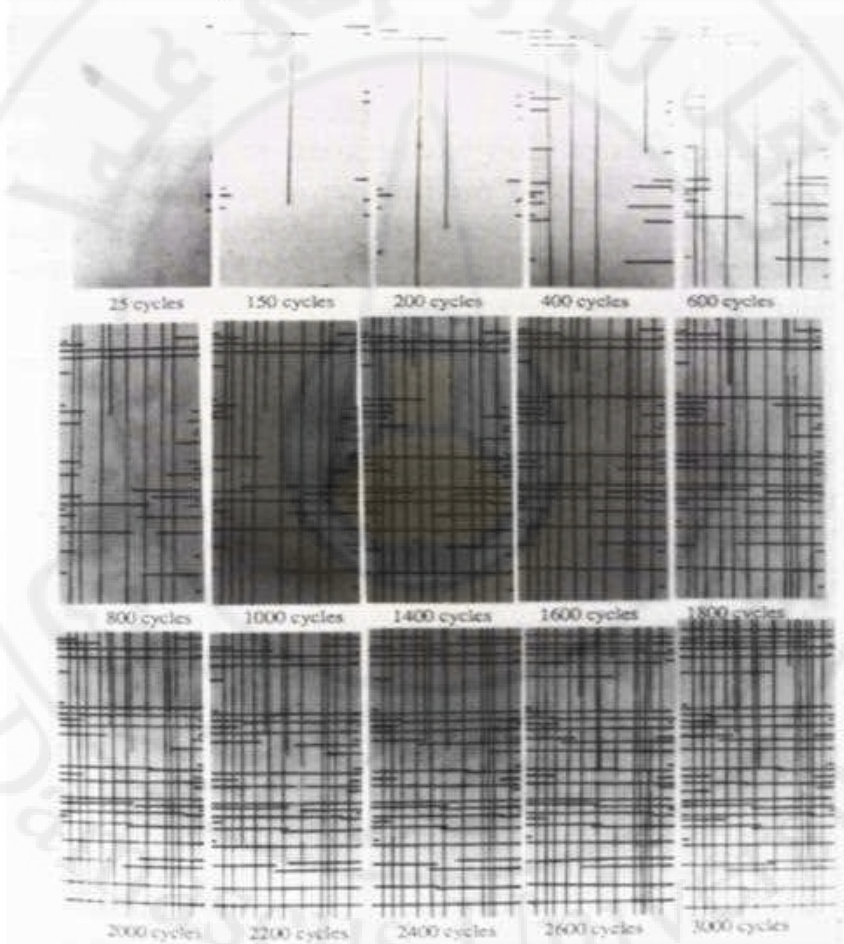
تتفق هذه الدراسة مع النتائج التجريبية. كمثال، الشكل (9-10) هو عبارة عن مقطع في صفحة ذات طبقات متعامدة من الألياف الكربونية بعد الدورة الحرارية في المجال (50 C°) و (-50 C°)، يظهر شق في الطبقة العرضية.



الشكل (9-10) صورة ميكروية للتشققات الميكروية في صفحة ذات طبقات متعامدة من الألياف الكربونية بعد الدورة الحرارية.

ويظهر الشكل (10-10) تتابع نمو الشق، حيث يبين الشكل (10-10) سلسلة من الصور الشعاعية (أشعة X) لنفس المادة والمأخوذة بعد عدد من الدورات الحرارية. يبين تتابع نمو الشقوق بالاتجاه الموازي للألياف في كل طبقة.

إن الإجهادات المتولدة خلال كل عملية تبريد قريبة من الحد الحرج لتشكل الشقوق. متطلبات تجنب هذا الضرر أن تكون الصفيحة قادرة على تحمل انفعال عرضي معين دون ضرر، ولا يكون للصفيحة مستوى متانة عرضية معينة. لذلك يوجد اهتمام بتحسين تركيب مادة البوليمير وطرق التصنيع من أجل أن تتحمل انفعالات عرضية كبيرة حتى الانهيار، بشكل خاص المواد المركبة الخاضعة لتغيرات كبيرة في درجات الحرارة.



الشكل (10-10) سلسلة من الصور الشعاعية (X-Ray) تظهر نمو الشقوق الميكروية الموازية للألياف في صفيحة ذات طبقات متعامدة من ألياف كربونية بعد دورة حرارية في المجال (50 + 50 -) (C°).

10-3- الزحف: Creep

10-3-1- أساسيات سلوك المادة الحاضنة وسلوك الألياف:

Basics of matrix and fiber behavior

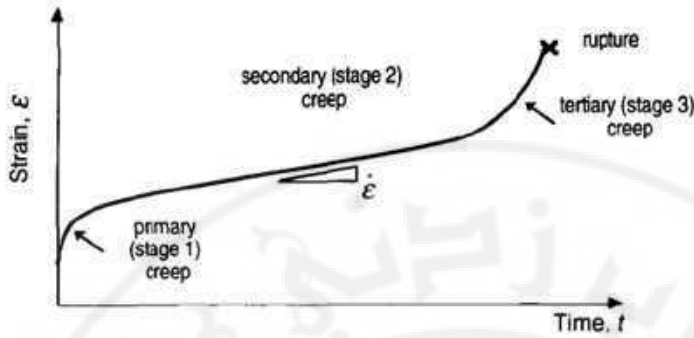
يستخدم مصطلح الزحف لوصف التشوهات المتزايدة للمواد عندما تخضع لحمل ثابت. إن الزحف غير مرغوب فيه هندسياً، حيث يمكن أن تنشأ مع الزمن انفعالات كبيرة في الجزء المعرض للزحف.

تبدأ أغلب المواد بإظهار زحف كبير القيمة عندما تكون الأحمال ($>10\text{Mpa}$)، و بدرجات حرارة أكبر من $0.4-0.5T_{m,p}$ } 40-50% من $T_{m,p}$: درجة حرارة الانصهار مقدرة بالـ k . ينتج الزحف بشكل أساسي بسبب تنشيط عمليات الانتشار مما يسمح بإعادة ترتيب الجزيئات والانفعالات المصاحبة لذلك. ليس لمواد البلاستيك المتصلب حرارياً (الريزينات) درجات حرارة صهر محددة، لكنه يحدث تدهور في خواصها الكيميائية والميكانيكية عندما تخضع لزيادة متوسطة نسبياً في درجات الحرارة عن درجة حرارة الوسط المحيط وبحدود ($100 - 200\text{ k}$). وهي مقاومة للزحف عند درجة حرارة الغرفة.

بنية بوليمرات البلاستيك الحراري غير متبلورة ولها درجات حرارة انصهار (تبلور) حيث تتحول عندها إلى سائل (لزجة)، إن درجات حرارة انصهارها منخفضة نسبياً ($400 \sim 600\text{ k}$) وهي عرضة للزحف عند درجة حرارة الغرفة ($\sim 300\text{ k}$).

تستخدم المعادن كمادة إنشائية مجالات انصهار هذه المعادن ($\sim 600\text{ k}$) للرصاص وحتى ($\sim 1950\text{ k}$) للتيتانيوم. تظهر أغلب المعادن زحفاً صغيراً عند درجة حرارة الغرفة، إلا أنها تصبح حساسة للزحف في مجال الحرارة الأعلى ($\sim 900\text{ k} \sim 600\text{ C}^\circ$)، التي نحتاجها من أجل تطبيقات تكنولوجية عديدة.

يبين الشكل (10-11) سلوك تشوه العينة خلال الزحف كتابع للزمن.



الشكل (10-11)

سلوك انفعال العينة
خلال تشوهات الزحف
تحت تأثير حمولة
ثابتة كتابع للزمن.

يوضح الزحف كما يلي:

1- المرحلة الأولى: مرحلة الزحف الابتدائي ويتم فيها الحصول على نوع من توازن البنية الميكروية.

2- المرحلة الثانية: مرحلة الزحف الثانوي ويتم فيها المحافظة على توازن البنية الميكروية بشكل شبه ثابت.

3- المرحلة الثالثة: مرحلة الانهيار حيث يزداد الانفعال كتابع من الدرجة الثالثة.

يظهر الانهيار كضرر في البنية يتعدى إصلاحه كتشكل الفجوات الداخلية، يتركز الاهتمام على معدل الانفعال خلال الزحف الثانوي (المرحلة الثانية)، مع أن خواص انفعال تمزق الزحف مهمة كذلك.

من أهم الإيجابيات الرئيسة للمواد المركبة وخصوصاً في المواد المعدنية والبلاستيك الحراري هي التحسينات في مقاومة الزحف الناتجة عن مادة التقوية. الألياف الزجاجية تتلين حسب الجدول (2-3) عند درجة الحرارة (900-1000 k)، لكنها تقاوم الزحف حتى درجة حرارة مساوية إلى (550 k)، ليس للألياف البوليميرية (KevlarTM). خواص جيدة بدرجات الحرارة المرتفعة. تظهر المواد السيراميكية مثل الألومينا $T_m \sim 2300 \text{ k}$ زحفاً صغيراً تحت درجة حرارة (1100 k)، بينما يقاوم SiC و الكربون الزحف بشكل جيد عند درجة حرارة أكثر من (1200K) وذلك حسب بنيتها الميكروية.

يعتمد سلوك الزحف للمادة المركبة ككل على الحمولة الموزعة والقيود المطبقة التي تتعلق بعوامل الشكل الهندسي، يعتمد سلوك الزحف على طبيعة السطح البيني (سطح التلامس).

2-3-10- الزحف المحوري للمواد المركبة المقواة بألياف طويلة:

Axial creep of long-fibre composites

يساوي الانفعال الأولي (شريطة بقاء الألياف مرنة) إلى الإجهاد المطبق مقسماً على معامل يونغ للمادة المركبة (معامل المرونة) والمعطى بقانون الخلط حسب العلاقة:

$$\varepsilon_0 = \sigma / [f E_f + (1-f) E_m] \quad (10-13)$$

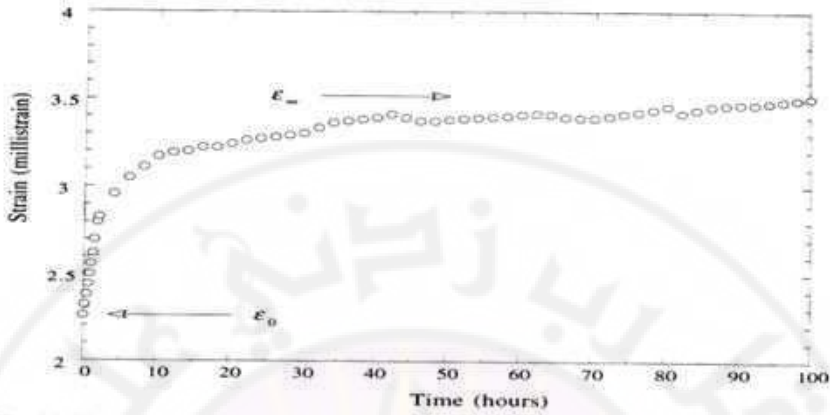
يحدث الزحف في المادة الحاضنة، وينتقل الإجهاد المطبق بشكل متدرج إلى الألياف حيث تتفعل الألياف بشكل مرن، ويزداد الإجهاد في الألياف. يحدث الانفعال الحدي عندما تحمل الألياف كامل الحمل المطبق، ويعطى انفعال الألياف وبالتالي المادة المركبة بالعلاقة:

$$\varepsilon_{\infty} = \frac{\sigma}{f E_f} \quad (10-14)$$

يقترّب الانفعال من هذه القيمة حيث ينخفض معدل زحف المادة الحاضنة بسبب انخفاض إجهاد المادة الحاضنة، ولن تتم حالة الاستقرار. هذه الحالة مهمة من وجهة نظر هندسية حيث لا يمكن أن يتجاوز انفعال الزحف المستوى المحدد مسبقاً (الذي هو صغير القيمة) شريطة عدم تكسر الألياف. تتسجم النتائج التجريبية مع هذه التحاليل البسيطة. يبين الشكل (10-12) الانفعال في المادة المركبة Al/40%SiC الذي يقترّب ببطء من القيمة المحسوبة.

يمكن التنبؤ بالمعدل الذي نقترّب عنده من الانفعال الحدي من خلال معرفة خواص ومواصفات الزحف للمادة الحاضنة. إن قانون الزحف للمادة الحاضنة (power-law) في حالة الاستقرار ($d\varepsilon / dt = A \sigma^n$).

يعطى معدل زحف المادة المركبة بحسب العلاقة التالية:



الشكل (10-12) البيانات التجريبية للتشوه (الانفعال) كتابع للزمن، للمادة المركبة المقواة بألياف طويلة من Al 40 vol.% SiC، الحمولة موازية للألياف. الإجهاد المطبق 266 MPa ودرجة حرارة 673 K، ϵ_0 ، ϵ_∞ محسوبتان من المعادلتين (10-13) (10-14) باستخدام القيم المعطاة في الجدولين (2-2) and (2-5).

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{A\sigma^n \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_\infty}\right)^n}{\left[1 + \frac{fE_f}{(1-f)E_m}\right](1-f)^n} \quad (10-15)$$

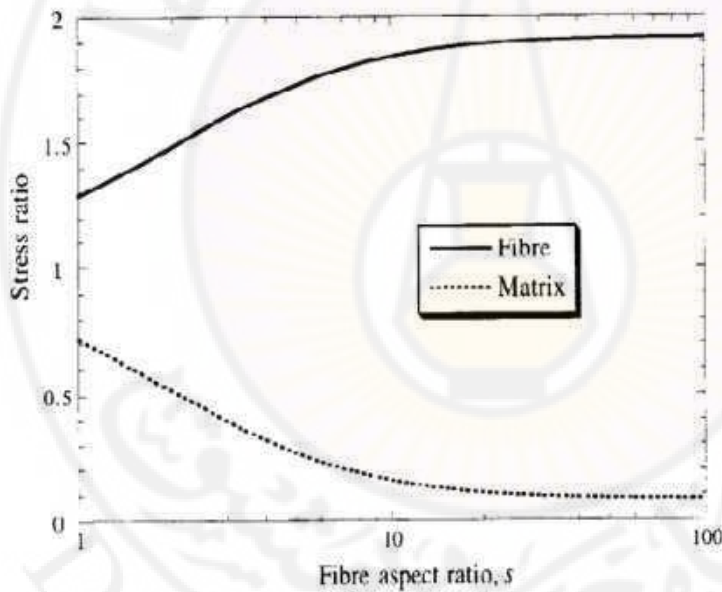
نحصل بتكامل هذه المعادلة على علاقة الانفعال (التشوه) بتابعية الزمن. أعطت هذه المعادلة توافقاً جيداً بين الحسابات النظرية والقيم التجريبية، إلا أن الحالة معقدة أكثر بسبب بعض العوامل المتعلقة بالمادة الحاضنة في المادة المركبة حيث تختلف خواص هذه المادة الحاضنة عن نفس المادة دون تقوية (مثلاً وجود الكثير من الإخلاعات في حالة المعادن). كما أنه تحدث الإجهادات الحرارية المتبقية. بالرغم من أنه تبقى هذه الإجهادات الحرارية المتبقية صغيرة إذا بقيت المادة المركبة بدرجة حرارة مرتفعة.

3-3-10- الزحف العرضي، والمواد المركبة المقواة (بشكل متقطع):

Transverse creep and discontinuously reinforced composites

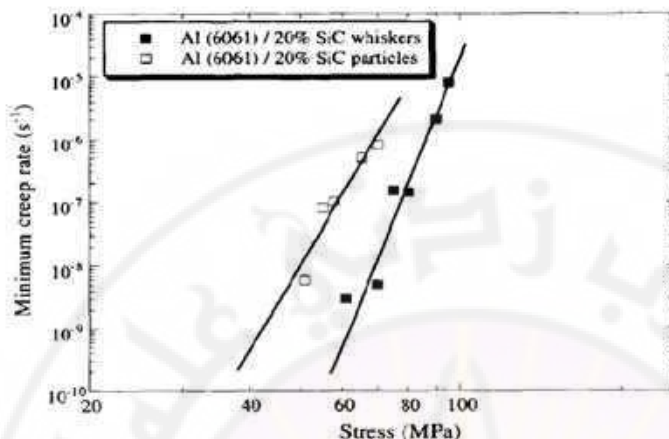
تختلف الحالة كثيراً إذا حملت المادة المركبة بشكل عرضي، أو إذا كانت مادة التقوية متقطعة كألياف قصيرة أو حبيبات. إن المادة المركبة قادرة في هذه الحالة على أن تتشوه بشكل تدريجي ويمكن أن يتشكل الزحف بصورة مستقرة.

تتأثر معدلات الزحف كثيرا بمواصفات زحف المادة الحاضنة، لكن توجد أهمية للمدى الذي تخلص فيه الألياف المادة الحاضنة من الحمل. مثلا في حالة المادة المركبة المقواة بألياف قصيرة وتحت تأثير حمل محوري، تعتمد تجزئة الحمل بشكل كبير على معدل أبعاد الألياف aspect-ratio. يبين الشكل (10-13) تغير الإجهاد الوسطي الحجمي مع معدل أبعاد الألياف aspect-ratio وذلك في المادة الحاضنة والألياف من أجل حمل مرن لمادة مركبة من البوليستر مقوى بألياف الزجاج (polyester / 50 % glass). ينخفض في هذه الحالة الإجهاد في المادة الحاضنة بمعدل (5) مرات عندما يزداد معدل أبعاد الألياف aspect-ratio من (1) إلى (10).



الشكل (10-13) التنبؤ المتوقعة لمعدل أبعاد الألياف aspect-ratio مع الإجهاد الوسطي الحجمي في كل من المكونات (Fibre, Matrix) من أجل تحميل محوري لمادة مركبة من Polyester / 50 % glass fibre المحسوبة حسب نموذج ايشيلبي.

تظهر معظم البيانات التجريبية لزحف المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة تحت تأثير حمل محوري حساسية شديدة لمعدل أبعاد الألياف aspect-ratio. يعطي المثال الموضح بالشكل (10-14) نسب زحف (حالة مستقرة) أصغرية من أجل خليطة الألمنيوم المقواة بحبيبات SiC (معدل أبعاد الألياف aspect-ratio ~ 1) و بشعيرات SiC-whisker (معدل أبعاد الألياف aspect-ratio ~ 5). معدلات زحف المواد الشعرية أخفض بحوالي مرتين مقارنة بالحبيبات وذلك عند أي مستوى إجهاد معطى.



الشكل (10-14)

البيانات التجريبية

لمعدل زحف الحالة

الثابتة. الزحف للمادة

المركبة عند ثبات درجة

الحرارة عند القيمة

Al(6061) .561 k

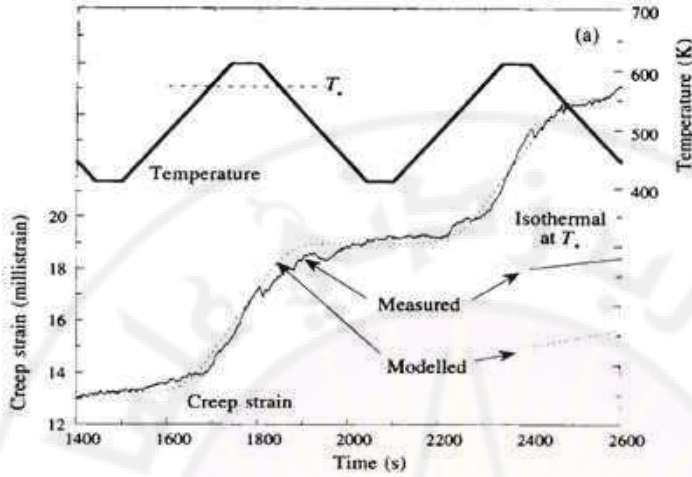
/ 20 vol. % of

SiC particles or

SiC whiskers

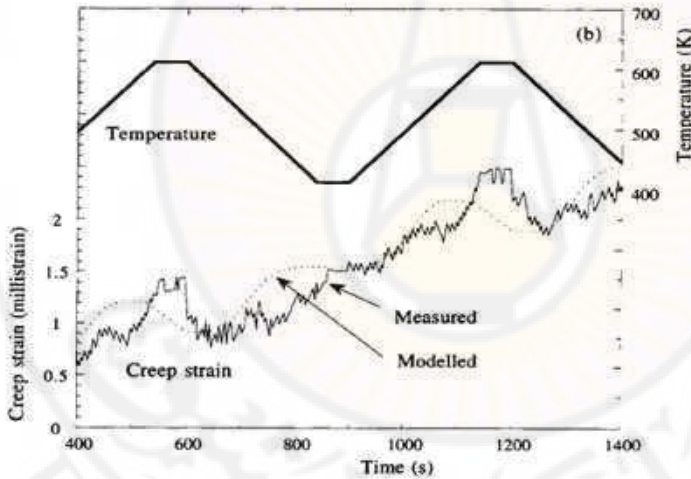
يؤثر في زحف المواد المركبة المقواة بشكل منقطع عامل آخر مهم وهو تأثير الإجهاد الحراري المتبقي، حيث سيتغير مستوى الإجهاد الحراري في المادة الحاضنة عند تغيير درجة الحرارة حسب المعادلة (10-1)، قد يؤدي ذلك إلى زيادة أو نقصان الإجهادات الناتجة عن الحمل المطبق وهذا سيؤثر بدوره زيادة أو نقصانا على معدل الزحف .

يوضح الشكل (10-15) تأثير العوامل السابقة على معدل الزحف. حيث توضح علاقة قيم الانفعال الناتجة خلال زحف الدورة الحرارية مع الزمن للألمنيوم المقوى بألياف قصيرة حسب نموذج (Eshelby) للتنبؤ بمخطط إجهادات المادة الحاضنة بسبب الحمل المطبق كنتيجة لتغيرات درجات الحرارة وذلك للمادة المركبة $Al/10\%Al_2O_3$. يبين المخطط معدلات الزحف الحراري المقاسة للمادة المركبة عند درجة الانتشار الوسطية T . للدورة الحرارية. يمكن ملاحظة أن الانفعال الوسطي خلال الدورة الحرارية أكبر من المعدل الحراري وذلك انعكاسا لتأثير الإجهادات الحرارية المتبقية. نجد أنه تستطيع هذه الدورات الحرارية أن تسرع من زحف المواد المركبة ذات الأساس المعدني، لذلك من المهم اعتبار ذلك حيث تتعرض المواد المركبة ذات الأساس المعدني لتلك الحالة في العديد من التطبيقات.



الشكل (10-15)
مقارنة بين تطور
انفعال الزحف بالدورة
الحرارية النظري
(الرياضي) والتجريبي
من أجل:

Al / 10 % : (a)
Saffil (short
Al₂O₃ fiber)



Al / 20 % : (b)
Saffil تحت إجهاد
محوري مطبق
مساوي إلى 20MPa
البيانات في (a) من
أجل الزحف عند
ثبات درجة الحرارة
عند درجة حرارة
الانتشار متوسطة
T_c.

أخيراً، إن للسطوح البينية (Interface) دوراً مهماً خلال زحف المواد المقواة بشكل متقطع. مثال ذلك مبين في الشكل (10-16) وذلك حسب الفحوصات الدقيقة لعدد من العلماء عند التحميل العرضي للنتانايوم المقوى بألياف طويلة. تستخدم في الوقت الحاضر أغلب المواد المركبة شعيرات أحادية من SiC مع طبقة طلاء سطحية من الغرافيت. يحمي الطلاء الألياف من ضرر التناول والتفاعل الكيميائي خلال التصنيع. لكن لا تسمح طبقة الطلاء هذه بالترابط الكيميائي القوي بين الألياف والمادة الحاضنة. تبقى الألياف ملتصقة بشكل جيد مع المادة الحاضنة عند درجة حرارة الغرفة وذلك بسبب

الإجهادات الحرارية المتبقية الضاغطة. إلا أنه عند درجة حرارة مرتفعة ($t > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) يصبح الإجهاد القطري المتبقي إجهاداً شاداً. يسمح هذا الإجهاد الشاد بفتح السطح البيني عند أحمال مطبقة قليلة القيمة. يمكن أن تنشأ فجوات كبيرة عند السطح البيني عندما يزيد معدل الزحف بسبب الدورة الحرارية، كما هو موضح في الشكل (10-16) الذي يبين صور مجهرية للمادة المركبة Ti بعد التحميل العرضي تحت شروط الدورة الحرارية. تؤدي الفجوات الكبيرة على السطح البيني إلى معدلات زحف كبيرة (المرحلة الثالثة لمخطط الزحف مع الزمن) وبالتالي بداية سريعة (مبكرة) لتمزق الزحف.



الشكل (10-16) صورة بمجهر المسح الإلكتروني (SEM) لمقطع مصقول قرب سطح التحطم للمادة المركبة Ti-6 Al-4V/30%SiC تحت تأثير تحميل عرضي عند إجهاد 25MPa و بدورة حرارية بين $400\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (بمعدل $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) بالدقيقة. اتجاه التحميل موضح بالأسهم.

10-4 - الناقلية الحرارية: Thermal conduction

تفيد الناقلية الحرارية الكبيرة في تحسين مقاومة المواد للصدمة الحرارية وتجنب نشوء "البقع الساخنة" خلال التسخين المركز.

من ناحية أخرى تفيد الناقلية الحرارية المنخفضة في العزل الحراري.

لا بد من استعراض آليات التوصيل الحراري قبل أن نأخذ بعين الاعتبار الناقلية في الألياف-المواد الحاضنة-المواد المركبة.

1-4-10- آليات النقل الحراري: Heat transfer mechanisms

تجري الحرارة ضمن المادة بواسطة إرسال الفونونات (اهتزازات بترددات عالية جداً) والإلكترونات الحرة (إن وجدت)، إن لكلا هذين الحاملين مساراً حراً محدداً λ ، وسرعة وسطية v . وترتبط الناقلية الحرارية K بهذه البارامترات بواسطة المعادلة البسيطة المشتقة من نظرية الحركة:

$$K = \frac{1}{3} c v \lambda \quad (10-16)$$

حيث C : الحرارة النوعية الحجمية.

تتعدم الناقلية الحرارية لكل المعادن (فونون - إلكترون) وغير المعادن (فقط فونون) عند درجة حرارة الصفر المطلق ($T=0$ K)، (حيث تتعدم عندها قيمة C). تزداد الناقلية الحرارية بشكل حاد إلى قيمة عظمى عندما ترتفع درجة الحرارة عن درجة الصفر المطلق ويحدث بعد ذلك انخفاض تدريجي بالناقلية الحرارية عندما تزداد درجة الحرارة بشكل تدريجي. يعكس الارتفاع في الناقلية ازدياد في قيمة ($3NK \sim C$ حيث N عدد أفوغادرو، K ثابت بولتزمان لكل نماذج الاهتزازات لكل الجزيئات النشطة).

إن السبب في انخفاض الناقلية الحرارية هو تناقص قيمة λ حيث يحدث المجال الكبير للاهتزاز تشتت أكثر للحوامل وبالتالي للطاقة (توافق القيمة العظمى لـ λ درجة الحرارة المنخفضة). تتأثر قيمة λ في حالة الإلكترونات بالعيوب في الذرات أما في حالة الفونونات بقياسات العينة.

لا تتأثر السرعة الوسطية للحوامل بدرجة الحرارة. إن سرعة الفونونات (Phonon) مرتفعة -سرعة الضوء-. يتأثر المسار الحر الوسطي للفونون ببنية المادة ويمكن أن يكون المسار كبيراً جداً في العينات غير المعابة (الكاملة) وذات الحجم الكبير للحبيبات. لذلك تتمتع المواد ذات البلورات الوحيدة (مثل الألماس... و... SiC) بناقلية حرارية مرتفعة، وكذلك تتمتع بعض أنواع ألياف الكربون المطورة حديثاً ذات النواة الأساسية من القطران (pitch-based) بناقلية حرارية مرتفعة.

تتميز المعادن بأكثر ناقلية حرارية، وذلك بسبب المسار الحر الوسطي للإلكترونات الذي هو أكبر بكثير من الفونونات. وتقل هذه الناقلية بوجود الذرات المنحلة (solute atoms)

والعيوب المتنوعة التي تسبب تشتت الإلكترونات. لا تملك البوليميرات إلكترونات حرة وجساءة منخفضة (سرعة الفونونات منخفضة) لذلك ناقليةها الحرارية منخفضة، وذلك موضح في الجدول (10-1).

الجدول (10-1) قيم الناقلية الحرارية لعدد من المواد.

Material	$K (W m^{-1} K^{-1})$	
	at 300 K	at 900 K
Diamond	600	
Graphite (parallel to <i>c</i> -axis)	355	
Graphite (normal to <i>c</i> -axis)	89	
Ag	425	325
Cu	400	340
Cu 2%Ag	~ 390	~ 340
Cu-2%Be	~ 130	
Cu-40% Ni	~ 20	~ 40
Al	~ 220	~ 180
Ti	~ 18	~ 18
Ti 6Al 4V	~ 8	~ 12
SiC (single crystal)	~ 100	~ 70
SiC (polycrystal)	~ 10-50	~ 5 30
Al ₂ O ₃ (single crystal)	~ 100	~ 30
Al ₂ O ₃ (polycrystal)	~ 5-30	~ 3 10
Epoxy resin	0.2-0.5	
Polyester resin	0.2-0.24	
Nylon	0.2 0.25	

2-4-10 - الناقلية الحرارية للمواد المركبة:

Conductivity of composites

المعادلة الأساسية لجريان الحرارة :

$$q = -k \nabla T \quad (10-17)$$

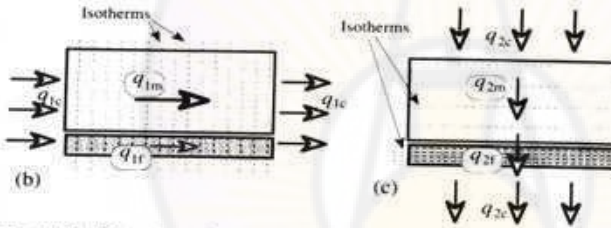
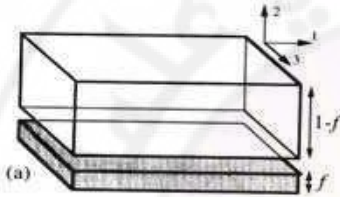
حيث q : تدفق الحرارة ($W.m^{-2}$) بسبب التدرج الحراري (∇T) ($K.m^{-1}$).

k : الناقلية الحرارية ($W.m^{-1}K^{-1}$).

من المهم التمييز بين الناقلية الحرارية k والانتشارية الحرارية $\alpha=k/c$ ، حيث إن الانتشارية الحرارية عبارة عن بارامتر يحدد المعدل التي تصل به المادة إلى حالة التوازن الحراري، وحسب معادلة الانتشار للحالة غير الثابتة:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha T'' \quad (10-18)$$

يمكن التنبؤ بناقلية المادة المركبة إذا توفرت المعلومات الكافية حول جريان الحرارة عبر مكونات المادة المركبة (مثلا : شكل الإيزوترمات). يمكن استخدام نموذج اللوح من أجل جريان الحرارة في المادة المركبة ذات الألياف الطويلة. يوضح الشكل (10-17) جريان الحرارة المحوري والعرضي.



الشكل (10-17) استنتاج

التعابير من أجل الناقلية العرضية والمحورية.

(a) : نموذج اللوح من أجل المادة المركبة ذات الألياف الطويلة.

(b) : جريان الحرارة الطولي.

(c) : جريان الحرارة العرضي.

أولا : حالة الجريان المحوري: إن التدرج الحراري (المسافة بين الإيزوترمات) ثابت في كل مكون من مكونات المادة المركبة، ويساوي الجريان الحراري الكلي مجموع الجريانات خلال الليف والمادة الحاضنة:

$$q_{1c} = f \cdot q_{1f} + (1-f) \cdot q_{1m} \quad \dots (10-19)$$

يمكن كتابة المعادلة بحسب الناقلية الحرارية والتدرج الحراري:

$$K_{1c} \cdot T' = f \cdot K_f T' + (1-f) \cdot K_m T'$$

وبذلك تعطى ناقلية المادة المركبة بقانون التخليط البسيط:

$$K_{1c} = f k_f + (1-f) k_m \quad \dots (10-20)$$

ثانياً - الناقلية العرضية: يتم الحصول على الناقلية العرضية في نموذج اللوح بمساواة جريان الحرارة خلال مكوني المادة المركبة (الشكل : 10-17-c) :

$$q_{2c} = K_{2c} \cdot T'_c = q_{2f} = K_f \cdot T'_f = q_{2m} = q_m \cdot T'_m \quad \dots (10-21)$$

يعطى التدرج الحراري في المادة المركبة:

$$T'_c = f \cdot T'_f + (1-f) \cdot T'_m$$

يقودنا هذا التدرج إلى علاقة الناقلية الحرارية العرضية التالية:

$$K_{2c} = (f / k_f + (1-f) / k_m)^{-1} \quad \dots (10-22)$$

تعطي العلاقة قيم منخفضة للناقلية الحرارية، وتصبح غير دقيقة عندما يكون للألياف ناقلية حرارية منخفضة (الألياف العازلة)، حيث من المتوقع أن يكون للمادة المركبة ناقلية حرارية معذومة حتى عندما تكون النسبة الحجمية للألياف النقية صغيرة.

يوجد العديد من الطرق لحساب الناقلية الحرارية العرضية، مثلاً: طريقة (إشيلبي) التي يمكن أن نتبنا بناقلية المواد المركبة المقواة بمواد مهما كان معامل شكلها. ويمكن استخدام المعادلة التالية :

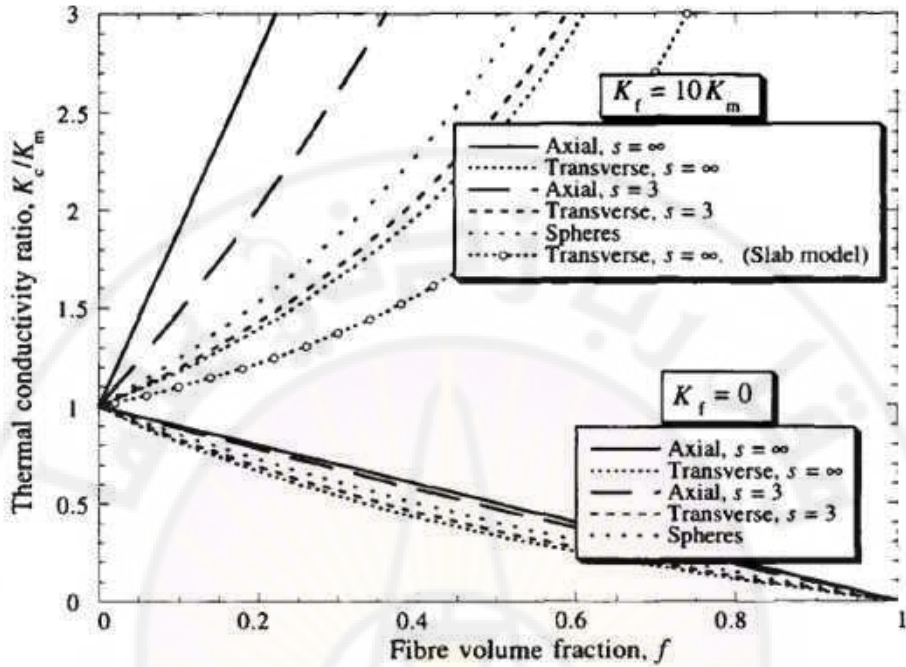
$$K_c = [K_m^{-1} + f\{(K_m - K_f)[S - f(S - 1)] - K_m\}^{-1} (K_f - K_m) K_m]^{-1} \quad \dots (10-23)$$

التي هي مشابهة تقريباً لمعادلة الجساءة (34-6)، يمكن استخدام معادلة مختزلة للناقلية العرضية للمادة المركبة المقواة بليف طويل:

$$K_{2c} = K_m + \{K_m(K_f - K_m)f\} / \{K_m + (1-f)(K_f - K_m)/2\} \quad \dots (10-24)$$

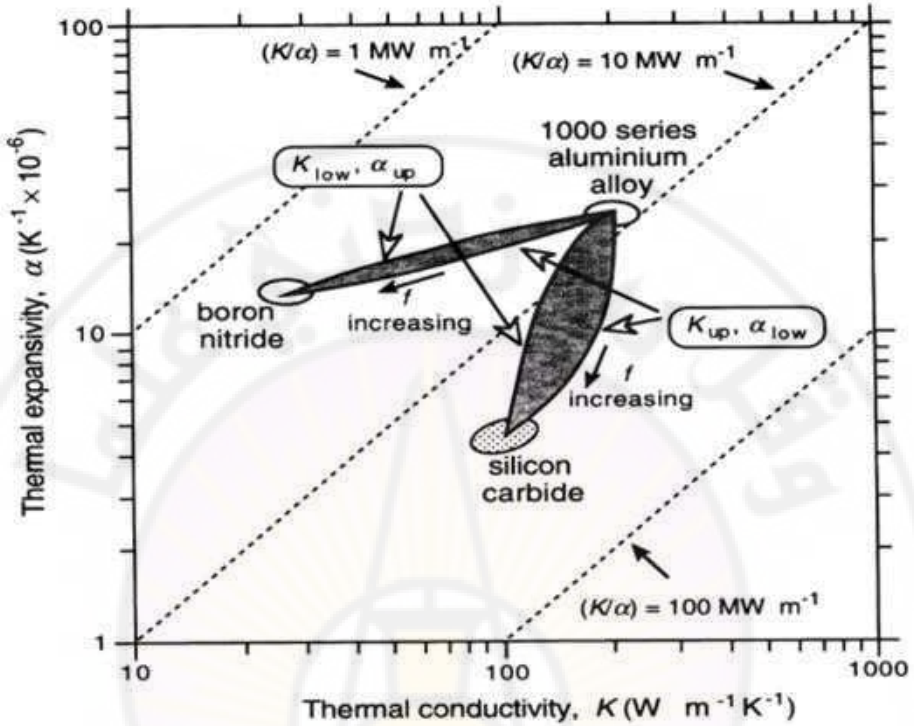
يبين الشكل (10-18) الحسابات الناتجة من هذه المعادلات.

يعطي قانون الخلط توقعاً من أجل الناقلية الحرارية المحورية للمادة المركبة ذات الألياف الطويلة لكن من الممكن ملاحظة أن استخدام نموذج اللوح من أجل الناقلية الحرارية العرضية المعادلة (10-22) غير دقيق للألياف العازلة و تعطي خطأ كبيراً عندما تكون الألياف عالية الناقلية. إن لمعامل أبعاد الألياف aspect ratio تأثير قليل على الناقلية الحرارية العرضية وذلك للألياف عالية الناقلية المعادلة (10-24) تتأثر الناقلية الحرارية الطولية بشكل كبير بمعامل الأبعاد aspect ratio للألياف، حيث تعطي المعادلة (10-20) قيم أكبر من القيم الحقيقية للمادة المركبة ذات الألياف القصيرة والمواد المركبة المقواة بالحببيات.



الشكل (10-18) المنحنيات المتوقعة لنفاذية المادة المركبة (بالنسبة للمادة الحاضنة)، من أجل مواد عازلة ($K_f = 0$) ومادة ذات نفاذية مرتفعة ($K_f = 10K_m$) كتابع لمحتوى الألياف ولمواد تقوية متنوعة معاملات الأبعاد. تم الحصول على هذه المنحنيات بطريقة ايشيلبي، المعادلة (10-23) باستثناء النفاذية العرضية للمادة المركبة ذات الألياف الطويلة المرتفعة النفاذية، وعرضت أيضاً الحالة المتوقعة من المعادلة (10-22) الناتجة عن نموذج اللوح.

يبين الشكل (10-19) كيفية استخدام هذه التوقعات في اكتشاف خواص أداء أنظمة مختلفة للمادة المركبة يعرض الشكل خارطة (حسب ايشيلبي) التمدد الحراري بالنسبة للنفاذية الحرارية وذلك للألمنيوم المقوى بكربيد السيليكون أو نتريدات البورون. يمكن أن تؤخذ النسبة k/α كفهرس المزايا "merit index" لتخفيض التشوه الحراري خلال التسخين أو التبريد. يظهر المخطط أن فهرس المزايا مرتفع في أسفل اليمين ومنخفض في أعلا اليسار. لذلك تبين البيانات تحسن مقاومة الألمنيوم للتشوه الحراري بتضمينه بكربيد السيليكون ولكن تضعف مقاومته إذا أضيف له نتريدات البورون.



الشكل (10-19) الخارطة المتوقعة للتمدد الحراري α مع الناقلية الحرارية k للمادة المركبة المصنعة من الألمنيوم إما مع SiC أو نتريدات البورون. تمثل الخطوط المنقطة القطرية القيم الثابتة لفهرس المزاي المعطاة بـ K/α المأخوذة كدليل لمقاومة التشوه الحراري. المناطق المظلمة حددت بحدود عليا ودنيا لبارامترين، تظهر إمكانية التوفيق بين K و α المتوقعة من أجل المواد المركبة AL / SiC , AL / BN , اعتماداً على كل من لنسبة الحجمية للألياف المحتواة وتوضع توزع التقوية شكلاً واتجاهاً.

3-4-10- المقاومة الحرارية لسطح التلامس (السطح البيني):

Interfacial thermal resistance

اعتمدت الحسابات السابقة على افتراض وجود اتصال حراري تام بين المادة الحاضنة والليف، يمكن أن يقل النقل الحراري بوجود طبقة من نوع ما على سطح التلامس أو بوجود الفجوات والشقوق بالقرب من سطح التلامس. كما أنه قد يحدث ضياع في كفاءة النقل الحراري (حتى في غياب حدود الجريان الحراري) عبر سطح التلامس إذا كانت الحوامل (النواقل) مختلفة المكونات (كما في أنظمة المعدن / السيراميك).

وصف المقاومة الحرارية بمعامل النقل الحراري لسطح التلامس أو الموصلية الحرارية

h ($W m^{-2} K^{-1}$)، وتعرف كثابت نسبي بين جريان الحرارة خلال حدود سطح التلامس وهبوط درجة الحرارة عبر هذا السطح:

$$q_i = h \cdot \Delta T_i \quad (10-25)$$

تمت دراسة الناقلية الحرارية للمادة المركبة بوجود مقاومة سطح التلامس وذلك من أجل الناقلية العرضية للمادة المركبة ذات الليف الطويل:

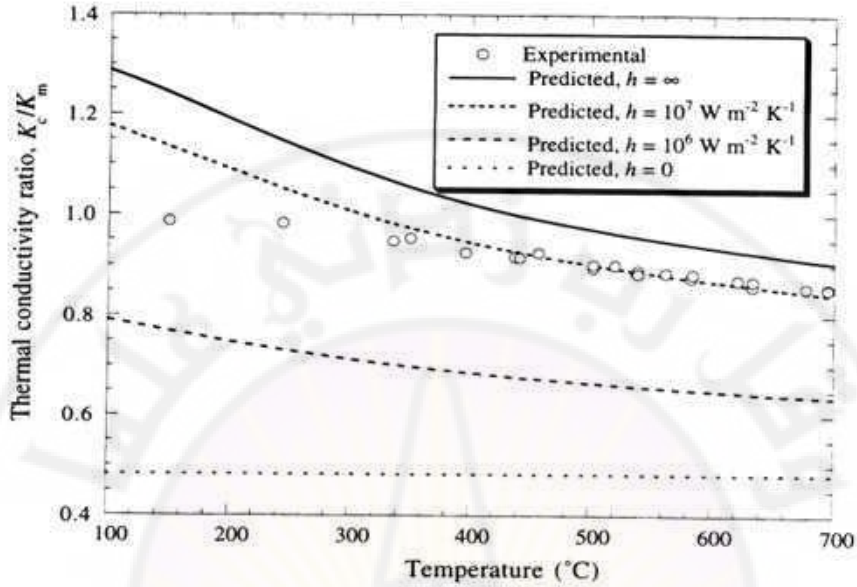
$$K_c = K_m \left[\frac{f \left(\frac{K_f}{K_m} - \frac{K_f}{rh} - 1 \right) + \frac{K_f}{K_m} + \frac{K_f}{rh} + 1}{f \left(1 - \frac{K_f}{K_m} + \frac{K_f}{rh} \right) + \frac{K_f}{K_m} + \frac{K_f}{rh} + 1} \right] \quad (10-26)$$

حيث r : نصف قطر الألياف. إن مقياس البنية مناسب بسبب أنه يقرر كيف يواجه سطح التلامس بالجريان الحراري بشكل متكرر. يمثل تأثير هذا المقياس بمعدل الأبعاد $\frac{k_f}{rh}$.

كما يمكن استخدام المعادلة (10-26) مع قيم الناقلية الحرارية التجريبية لتقدير ناقلية سطح التلامس للمادة المركبة. كمثال يبين الشكل (10-20) الناقلية الحرارية المقاسة على مجال حرارة من أجل المادة المركبة ذات أساس (Ti) مع ألياف طويلة، رسمت كنسبة للمادة الحاضنة. كما يبين المخطط القيم المحسوبة بالمعادلة (10-26) الموافقة لعدة قيم لـ h ، تتطابق هذه القيم مع قيمة $h = 106 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ، وذلك عند استخدام نصف قطر الليف المناسب ($\approx 50 \mu m$).

على الرغم من أن هذا الشكل يمثل تماساً حرارياً ضعيفاً نسبياً على سطح التلامس (ليف/مادة حاضنة)، نجد أنه لن تكون الناقلية الإجمالية أكبر بكثير من تلك عندما يكون سطح التلامس كاملاً ($h = \infty$) وهذا يوضح تأثير الحجم.

لا يوجد للقطر الكبير للشعيرات الأحادية من SiC أهمية كبيرة على مقاومة سطح التلامس (إلا عندما تكون غاية في الكبر). توحي البيانات المبينة في الجدول (10-1) بإمكانية زيادة ناقلية (Ti-6Al-4V) بإضافة شعيرات أحادية من SiC. إن التحسن بالناقلية ناتج عن البنية الحبيبية الناعمة جداً للمادة المركبة.



الشكل (10-20) منحنيات معدل الناقلية الحرارية K_c / K_m بالنسبة لدرجة الحرارة، من أجل الخليطة Ti-4V 6Al المقواة بـ 35% SiC أحادي الشعيرة مع جريان حراري عرضي على محور الليف. كلا البيانات التجريبية والمتوقعة بحسب المعادلة (10-26) اعتمدت على قيم متعددة لـ h قد بينت في المخطط. يمكن توضيح نقطتين إضافيتين ببعض بيانات المادة المركبة من Ti المقواة بالحبيبات من أجل النسبة الحجمية للحبيبات الكروية (نصف قطرها r) المحتواة f في المادة المركبة. حيث يمكن التنبؤ بناقلية المادة المركبة بحسب العلاقة التالية:

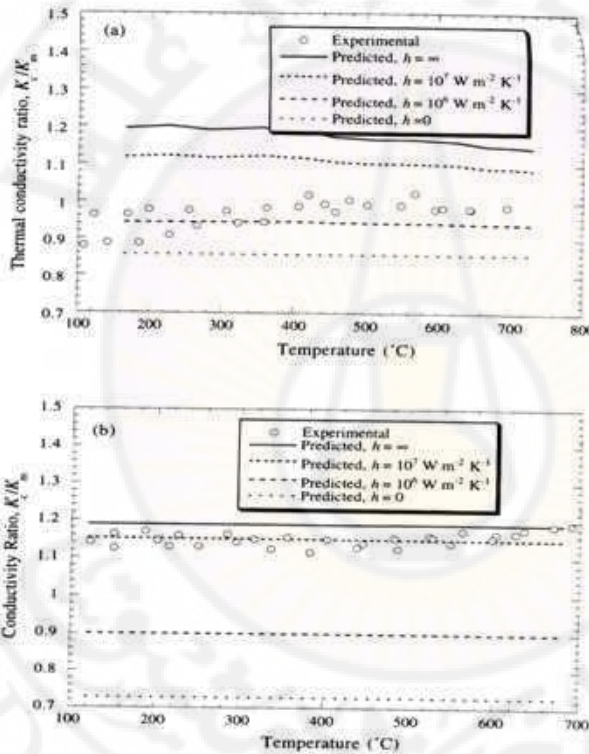
$$K_c = K_m \frac{\left[2f \left(\frac{K_p}{K_m} - \frac{K_p}{rh} - 1 \right) + \frac{K_p}{K_m} + 2 \frac{K_p}{rh} + 2 \right]}{\left[f \left(1 - \frac{K_p}{K_m} + \frac{K_p}{rh} \right) + \frac{K_p}{K_m} + 2 \frac{K_p}{rh} + 2 \right]} \quad (10-27)$$

حيث K_p : ناقلية الحبيبات،

يبين الشكل (10-21a) منحنيات الناقلية (التجريبية) للمادة المركبة Ti/10%SiC كنسب للمادة الحاضنة على مجال من الحرارة.

إن حساب الناقلية الحرارية بحسب المعادلة (10-27) والمقابلة لعدة قيم من h ، باستخدام قيم ناقلية تجريبية للمادة الحاضنة وعناصر التقوية عند درجات حرارة مناسبة

ونصف قطر الحبيبات (10μ)، هذه البيانات مناسبة لقيمة h ($10^6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)، وذلك بنتيجة الحجم الأصغر لعنصر التقوية (حيث تمت مقارنتها مع بيانات المادة المركبة المقواة بالألياف والمبينة في الشكل 10-20)، إن الناقلية الإجمالية أخفض من تلك لحالة تماس سطح التلامس التام. إن قيمة الناقلية قريبة كثيراً من تلك المتوقعة مع سطح التلامس العازل ($h = 0$).



الشكل (10-21)
منحنيات معدل الناقلية الحرارية K_c/K_m مقابل درجة الحرارة، من أجل المادتين المركبتين المقواة بحبيبات، تظهر المنحنيات كلا البيانات التجريبية والمتوقعة من المعادلة (10-27) اعتمدت على قيم متعددة لـ h باستخدام الناقلات المقاسة لكل من مادة التقوية والمادة الحاضنة. المنحنيات المبينة من أجل
(a) Ti / 10% SiC
(b) Ti / 10% TiB₂

يثبتين بحسب بيانات الشكل (10-21b) أن خواص سطح التلامس مختلفة للمادة المركبة (حبيبات) Ti / TiB₂. بينت هذه المنحنيات أن ناقلية سطح التلامس بهذه المادة المركبة أكبر بحوالي عشرة أضعاف، والناقلات المعطاة أقرب إلى تلك المتوقعة مع تماس تام لسطح التلامس، يعود الاختلاف بين الناقلات إلى طبقة تفاعل سطح التلامس السميكة في المادة المركبة Ti/SiC ويتصاحب هذا التفاعل بنقص كبير في الحجم مما قد يحدث شقوقاً في سطح التلامس.

الفصل الحادي عشر

تصنيع المواد المركبة

Composite Materials Fabrication

- 1- المواد المركبة البوليميرية.
- 2- المواد المركبة المعدنية.
- 3- المواد المركبة السيراميكية.



11-1- مقدمة: Introduction:

تعتبر تقانة تصنيع المواد المركبة هامة جداً في المواد المركبة، تعتمد طريقة التصنيع على طبيعة المادة الحاضنة وطبيعة الألياف وأساليب البناء المطلوبة من أجل توزيع الألياف، يمكن أن يكون الإنتاج ببنية ذات نوعية مناسبة وبتكلفة معتدلة مشكلة للتحدي. يتم في معظم الحالات تصنيع المنتج النهائي وإنتاج المادة المركبة بنفس الوقت ضمن عملية تصنيع واحدة. يؤمن ذلك التوضع الأمثل للألياف، لكن يتطلب ذلك التفهم الجيد للاحتياجات الميكانيكية للجزء المصنع لئلا تتناسب طريقة التصنيع وفقاً لذلك. أصبحت طرق تصنيع أغلب المواد المركبة البوليميرية ناضجة من الناحية التكنولوجية و التجارية، بينما مازالت أغلب عمليات التصنيع المستخدمة للمواد المركبة السيراميكية والمعدنية في طور التطوير. سيعتمد الاستثمار التجاري في الكثير من حالات المواد المركبة السيراميكية والمعدنية على تحسين فعالية الإنتاج.

11-2- المواد المركبة البوليميرية: Polymer composites

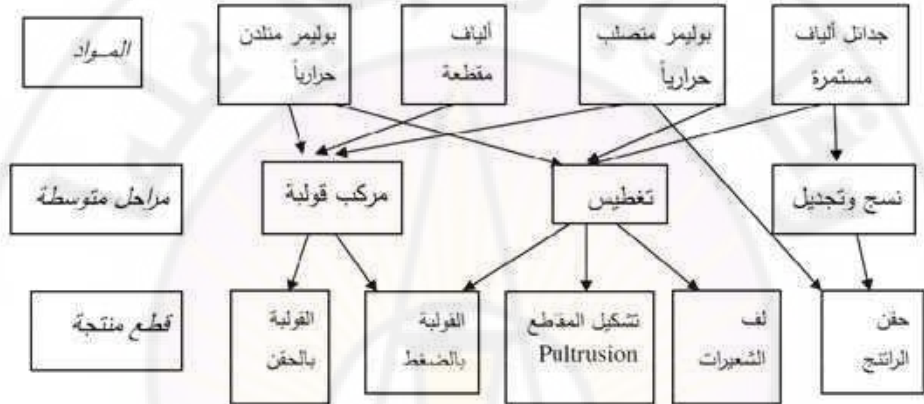
يوجد العديد من الطرق التجارية لتصنيع الأجزاء من المواد المركبة البوليميرية PMC. يمكن أن تقسم طرق تصنيع الريزين المتصلد حرارياً والمقوى بالألياف إلى ثلاث طرق رئيسية، وهي التالية:

- 1- طرائق التشرب بالريزین السائل.
- 2- طريقة الدمج تحت الضغط للريزین المسبق الإقحام، وينتج فيها منتجات متوسطة التي هي عبارة عن شرائط وصفائح ومن ثم تستخدم في تصنيع المادة المركبة النهائية.
- 3- طريقة دمج مركبات قلبية الريزین، وينتج فيها منتجات متوسطة وهي مركب صفائح مقولبة (SMC) و مركب عجین مقولب (DMC)، ومن ثم تستخدم في تصنيع المادة المركبة النهائية.

وتقسم طرق تصنيع المواد المركبة من المواد اللدنة حرارياً إلى طريقتين. وهما:

- 1- طريقة القولبة بالحقن للبلاستيك الحراري.
- 2- طريقة القولبة بالضغط على الساخن للبلاستيك الحراري.

سيتم التعرض لكل طريقة تصنيع في فقرة منفصلة. يبين الشكل (11-1) المخطط الصندوقي البسيط لتصنيع المواد المركبة البوليمرية. إن الهدف الأساسي لدراسة البنية المجهرية هو التأكد من التبلل الجيد للألياف وأنها قد توزعت بشكل منتظم وتوضعت بشكل صحيح. كما أن اعتبارات تكلفة رأس المال وسرعة التصنيع وحجم الجزء المنتج و قابلية الحصول على الشكل المطلوب ذات أهمية كبيرة.



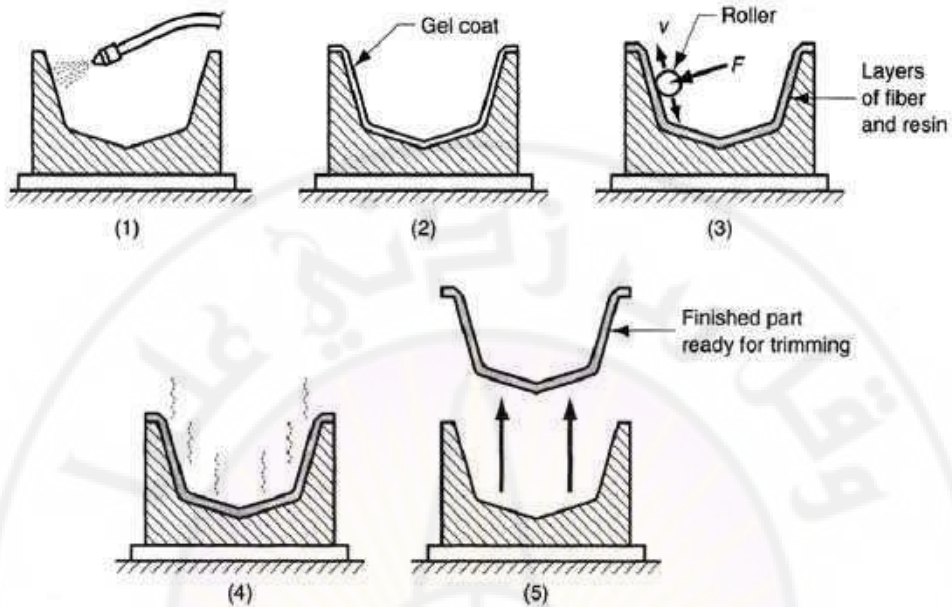
الشكل (11-1) المخطط الصندوقي البسيط من أجل تصنيع المواد المركبة البوليمرية.

11-2-1- طرائق التشريب بالريزين السائل:

Liquid resin impregnation routes

يتم في هذه الطريقة تشريب الريزين منخفض الكثافة إلى داخل ترتيب معين من الألياف الجافة، يمكن أن تتم عملية التشريب بطرق متنوعة.

1- طريقة المد اليدوي الشكل (11-2): إن أبسط طرق التشريب هي طريقة إنتاج طبقات رطبة متتالية تشرب فيها الألياف التي على شكل جذائل متوضعة على قالب صقل أو مشكل، حيث تشرب بالريزين بتغليفها أو بخها بالريز. يخلط عادة الريزين ومعامل التصلب مباشرة قبل التطبيق، ويحدث التصلب عند درجة حرارة المحيط (درجة حرارة الغرفة).



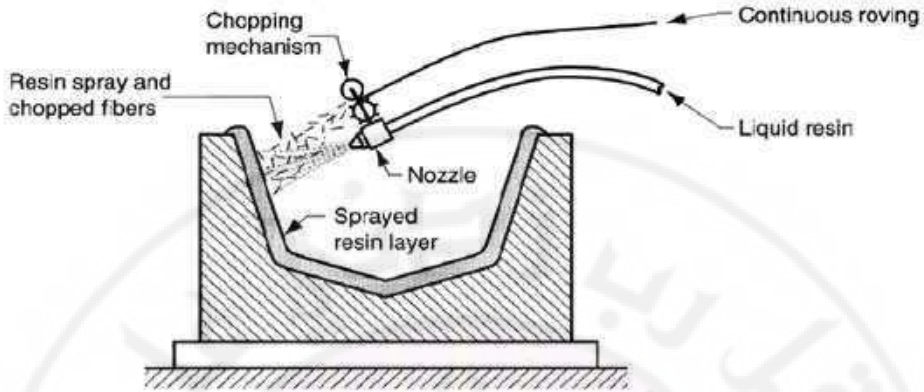
الشكل (2-11) طريقة المد اليدوي لتصنيع المواد المركبة ذات الأساس البوليميري:

1- ينظف القالب ويدهن بمائع التصاق. 2- يطلى القالب بطبقة طلاء جيلاتينية تحوي اللون المطلوب. 3- عندما تبدأ الطبقة الجيلاتينية بالاستقرار (التصلب) جزئياً، تطبق طبقات متتالية من الألياف (بشكل متشابك أو نسيج) والراتنج تضغط كل طبقة بواسطة الرول وذلك من أجل التشرب الجيد للألياف بالراتنج وإزالة الفقاعات الهوائية. 4- تتم معالجة تصلب الجزء. 5- يزال الجزء المتصلب من القالب.

تتضمن التطورات الحالية البخ المضاعف للسوائل، الذي يحدث فيها الخلط عندما تبخ الريزينات على الألياف أو مع الألياف الشكل (3-11).

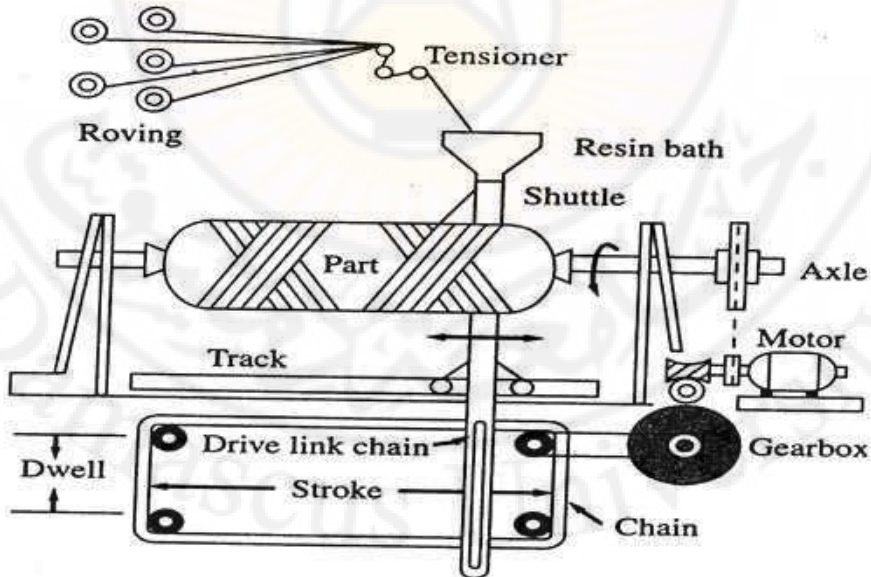
تكمن الميزة الرئيسية لهذه الطريقة بعموميتها وانتشارها، كما يمكن إنتاج أي شكل والتكلفة محدودة فقط بتكلفة القالب. استخدمت هذه التقنية في عمليات صغيرة متنوعة. مثل إصلاح الهيكل الخارجي للسيارة، باستخدام الألياف الزجاجية المنسوجة أو المقطعة. يتزايد استخدام هذه الطريقة لأعمال الكبيرة: مثال، تستخدم هذه التقنية بشكل واسع في صناعة بناء القوارب حيث استخدمت التقنية من أجل إنتاج مراكب ضخمة نسبياً مثل كاسحات الألغام التي يصل طولها إلى 50 متر.

إن سبئة هذه الطريقة هي الصعوبة في تأكيد التشرب الكامل وكمية العمل اللازم لإنجاز العملية.



الشكل (11-3) طريقة البخ لتصنيع المواد المركبة ذات الأساس البوليميري.

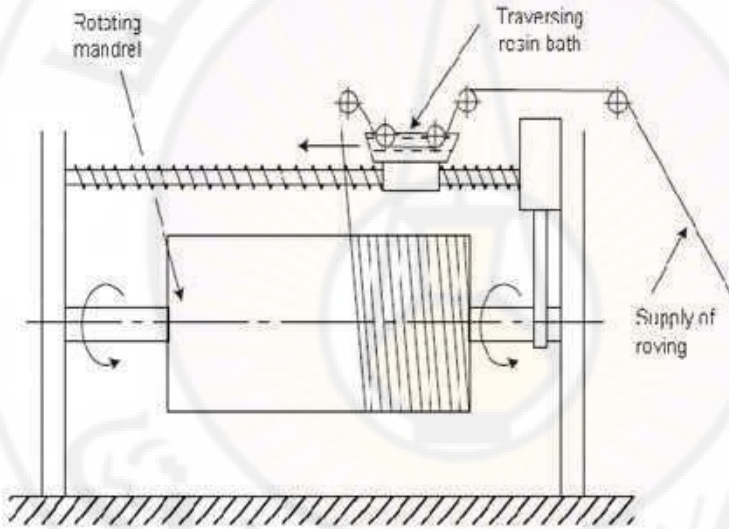
2- طريقة تصنيع الأشكال الدورانية الأشكال (11-4) و (11-5): تتناسب هذه الطريقة أتمنتها بشكل كبير، وهذه الأتمنة محدودة ببعض الأشكال، مثلاً لف الشعيرات حيث تسحب حزمة من الألياف من خلال حوض الرززين، قبل أن تلف على عامود الدوران أو على شكل مطلوب مشكل مسبقاً.



الشكل (11-4) طريقة تصنيع المواد المركبة ذات الأساس البوليميري بطريقة تشرب الرززين ولفها على المحور الدوار.

تتألف التجهيزات من التالي:

(a) منصة تعليق، حيث تغذى منها الألياف تحت تأثير قوى شد مطلوبة من مثبت البكرات، (b) حوض الريزين الذي تمر من خلاله الألياف وفقاً لمجموعة من الموجّهات، (c) عين التوزيع التي تتبثق من خلالها الألياف، يتم التحكم بوضعية تواضع الألياف من خلال نظام ميكانيكي. (d) عمود الدوران الذي تسحب إليه الألياف. البارامترات الرئيسية هي قوة الشد على الألياف، وفعالية أخذ الألياف للريزين وهندسة اللف.



الشكل (11-5)

طريقة تصنيع

المواد المركبة

ذات الأساس

البوليميري بطريقة

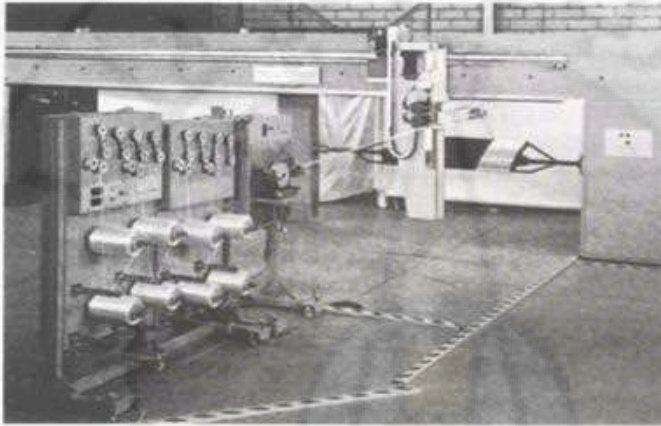
تشريب الريزين

ولفها على

المحور الدوار.

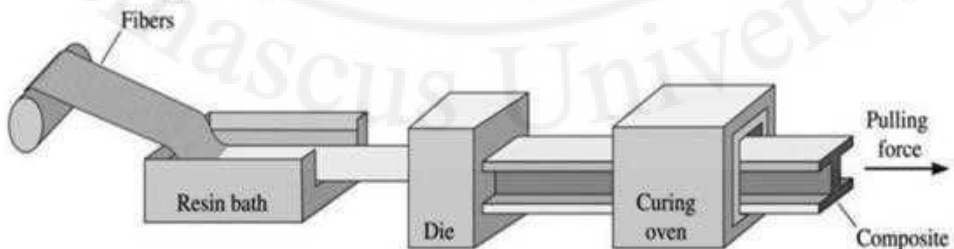
يوجد العديد من التصاميم المختلفة لحركة عين التوزيع. يبين الشكل (11-6) أحد تصاميم حركة عين التوزيع الذي يتضمن جائزاً عرضياً لتحقيق الحركة العرضية. يتم التحكم بحركة العين وأنظمة دوران عمود الدوران بواسطة الكمبيوتر، يمكن أن تكون أشكال المواد المركبة المصنعة بهذه الطريقة معقدة، وتظهر أيضاً درجة عالية من التناسق. إلا أن هناك بعض المحدودية في مسار الألياف فوق سطح الجزء المشكل. سوف تتبع الألياف المسار الأقصر على السطح المنحني. يمكن أن يحدث هذا مشاكل في بعض الأشكال، حيث من الصعب التأكد من تغطية الألياف لبعض أجزاء السطح،

أو أن هذه الألياف تتوضع في توجيه محدد. من الممكن التأكد أن الألياف لا تتبع المسارات الأقصر، وذلك بتأمين حركة عين التوزيع على نحو ملائم وتأمين احتكاك كافي بين الألياف والسطح تحت الألياف. يستخدم لف الشعيرات لإنتاج مواد مركبة عالية الفعالية وهي مناسبة للأشكال البسيطة، مثل الأتابيب.

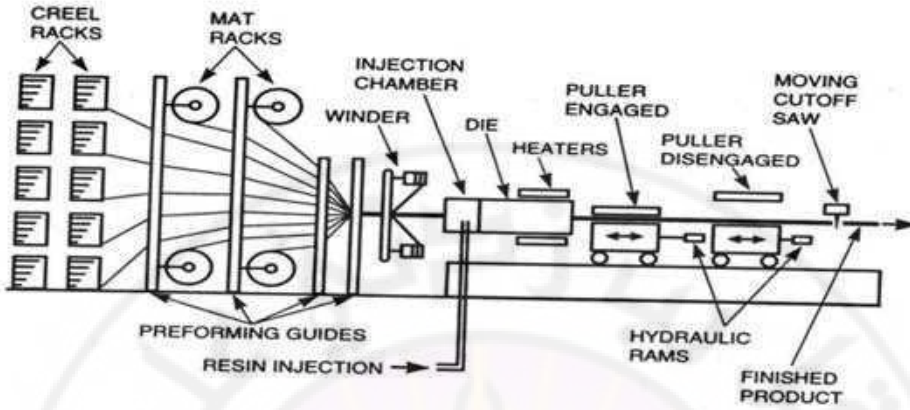


الشكل (11-6) آلة لف الألياف ذات الجانز العرضي.

3- طريقة PULTRUSION لتصنيع المقاطع الإنشائية الأشكال (11-7) و (11-8): تشابه طريقة PULTRUSION عملية لف الليف. تتم هذه الطريقة بتمرير الألياف من خلال حوض الريزين، و تغذى الألياف المتشربة بالريزن إلى داخل قالب أنبوبي مسخن، الذي تصبح الألياف خلاله متكاثفة ويعالج (يتصلب) الريزن. يمكن أن يكون للقالب مقاطع أشكال معقدة نسبياً. تنزع المواد المركبة من القالب عن طريق نظام الاستخراج الاحتكاكي. تنتج هذه الطريقة مواداً خاماً، أكثر من المواد المركبة النهائية، والمادة المركبة المنتجة مشابهة للبرلاستيك والمواد المعدنية المنتجة بالبثق التقليدي.



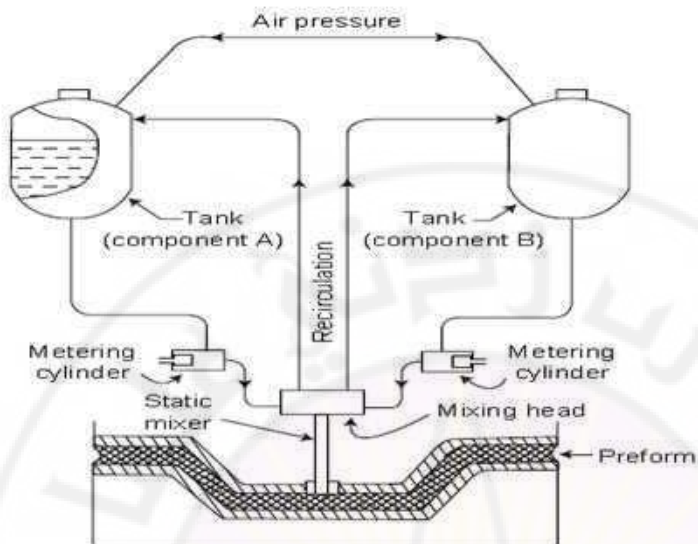
الشكل (11-7) طريقة PULTRUSION لتصنيع المقاطع الإنشائية.



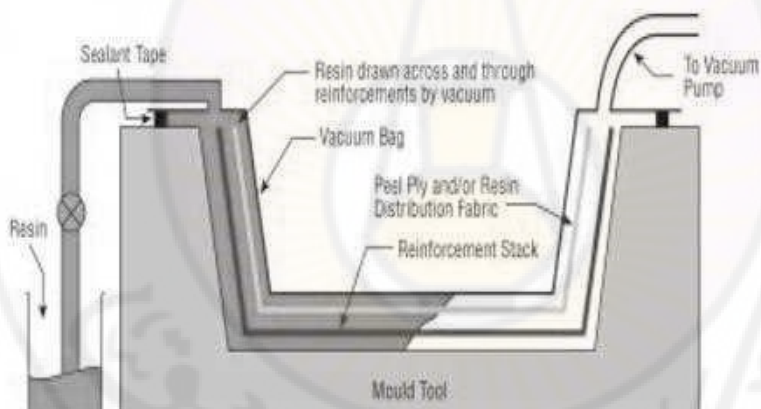
الشكل (11-8) طريقة PULTRUSION لتصنيع المقاطع الإنشائية.

4- طريقة القوالب بنقل الريزين :

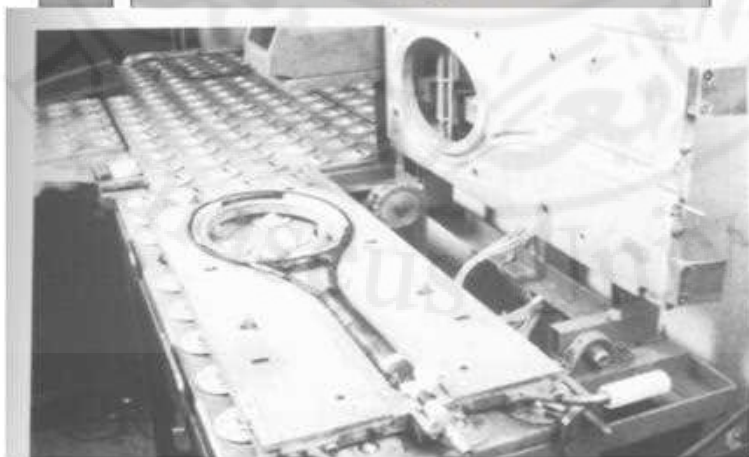
تستلزم هذه الطريقة لتشرب الألياف حقن الريزين إلى داخل قالب وضع ضمنه الألياف في موضعها المناسب. يغذى الريزين إلى داخل القالب إما تحت تأثير الجاذبية أو بتأثير ضغط خارجي. يستخدم في هذه الطريقة أنواع مختلفة للآلات. تسمى الطريقة الشائعة الاستخدام طريقة قالب تحويل الريزين (RTM) الشكل (11-9)، تحبس الألياف في هذه الطريقة ضمن قالب ويحقن الريزين المنخفض الكثافة المسبق التحفيز (تحفيز التصلب) في القالب وذلك بضغط منخفض نسبياً. تحدث معالجة تصلب الريزن ضمن القالب، ويساعد التصلب باستخدام التسخين يستخدم عادةً القالب المصنوع من المعدن، الذي يتميز بالناقلية الحرارية الجيدة وله عمر طويل أي يقوم بعمليات قوالب عديدة. يبين الشكل (11-10) استخدام التخلية من أجل إملء القالب بالريزن، بينما يبين الشكل (11-11) قالب إنتاج مضرب التنس والمشكل من ألياف الكربون المسبقة التشكيل الموضوعة بمكانها ضمن القالب. يتم في بعض الأحيان تفريغ القالب من الهواء قبل عملية حقن الريزين وذلك من أجل حث الريزن على التخلخل الجيد للألياف. صنع بهذه الطريقة الأجزاء المقولبة الضخمة نسبياً حيث استخمت هذه الطريقة في صناعة السيارات من أجل تصنيع معظم أجزاء جسم السيارة.



الشكل (11-9)
طريقة قالب تحويل
الريزين (RTM).



الشكل (11-10)
استخدام تخلية
الهواء لإملاء
القالب في طريقة
قالب تحويل
الريزين (RTM).



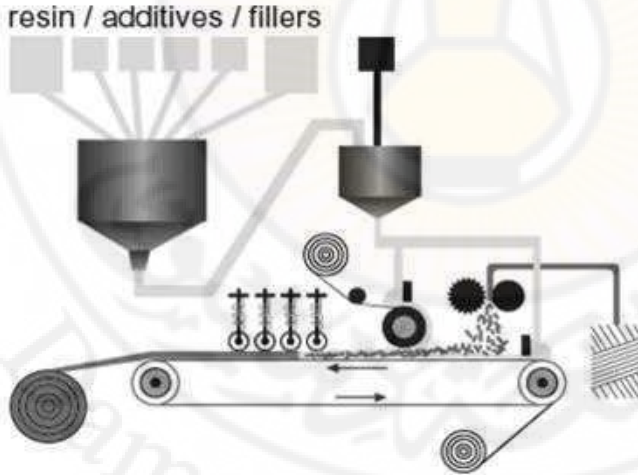
الشكل (11-11)
قالب من أجل
إنتاج مضرب
النتس.

2-2-11- الدمج تحت الضغط للريزن المسبق الإقحام:

Pressurized consolidation of resin pre-pregs

تشمل هذه الطريقة إنتاج المسبق الإقحام، الذي هو شرائط أو صفائح من الألياف المشربة بالريزن. تتم عملية تصنيع مسبق الإقحام الشكل (11-11) بمد الألياف و الريزن بين صفائح ورق السيلكونيد أو غشاء بلاستيكي، التي تضغط أو تدرفل للتأكد من دمج وتبلل الألياف بالريزن، وتعالج للتصلب بشكل جزئي وتنتج مادة مركبة مرنة يتم التعامل معها بسهولة. تسمح هذه الطريقة بمحاذاة جيدة للألياف في طبقات أحادية الاتجاه.

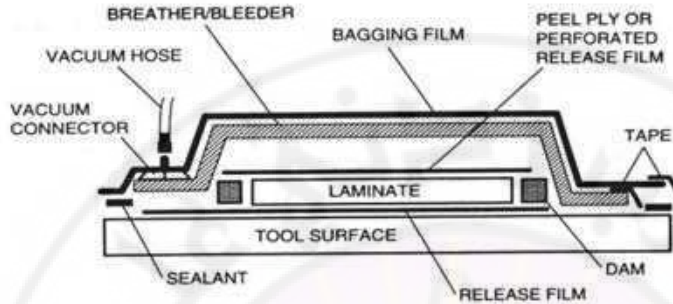
يشكل الجزء المطلوب من المواد المركبة بتجميع طبقات مسبقة الإقحام في اتجاهات مسبقة التحديد، وتجعل متماسكة بواسطة الضغط، وتعالج أخيراً لتتصلب بتسخينها تحت الضغط. يستلزم الترتيب الأبسط مكبس ضغط هيدروليكي، يستخدم لتطبيق الضغط على زوج من أنصاف القوالب المتماثلة.



الشكل (11-11) عملية
تصنيع مسبق الإقحام.

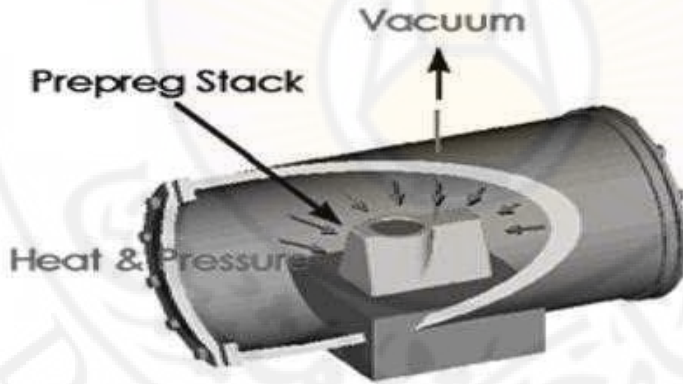
توجد طريقة بديلة وهي طريقة قالب التخلية (الفاكيوم) الشكل (11-12)، وتتم بتغليف المسبق الإقحام (الموضوع على قالب التشكيل) بطبقة مرنة غير نفاذة. ومن ثم يفرغ الهواء، وبالتالي يؤثر الضغط الجوي على الغشاء ويضغط المسبق الإقحام على قالب التشكيل.

تتميز الطرق المذكورة سابقاً بأنها سريعة نسبياً و سهلة التطبيق، إلا أنها تعاني من محدودية نوعية المواد المركبة المنتجة وحجم وشكل الأجزاء التي يمكن تصنيعها.



الشكل (11-12)
طريقة قالب التخلية
(الفاكيوم).

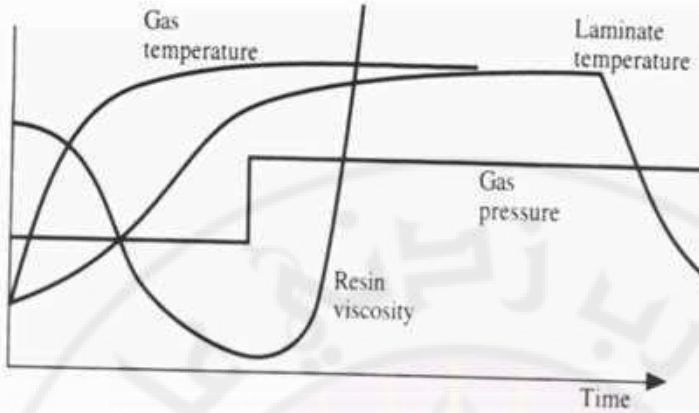
يفضل غالباً القولبة بالضغط باستخدام autoclave moulding الشكل (11-13) وذلك من أجل تطبيقات محددة. تشابه هذه العملية القولبة بالتخلية، حيث يوضع في هذه الطريقة مجمع المادة المركبة المسبق الإقحام والمغلف في داخل حجرة كبيرة حيث يمكن ضغطه، بما يوافق 10-20 ضغط جوي.



الشكل (11-13)
جهاز القولبة بالضغط
باستخدام
autoclave
moulding.

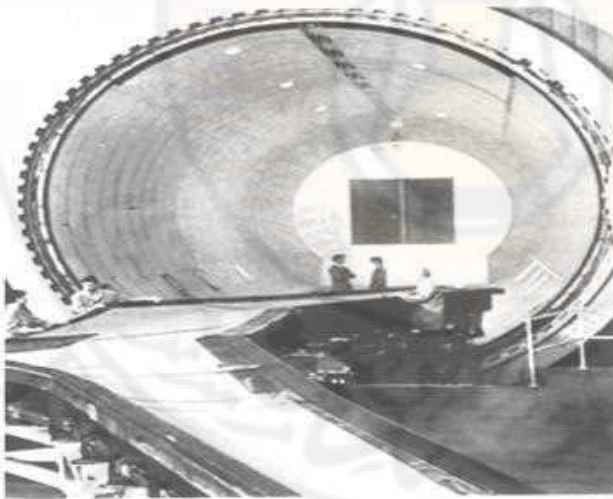
Autoclave Molding Apparatus

تتم معالجة تصلب الريزين وذلك بالتسخين خلال عملية الضغط. ترفع درجة الحرارة أولاً إلى مستوى متوسط وذلك كي تنخفض لزوجة الريزين ولنتأكد من إزالة جميع الفجوات. يؤمن التسخين التالي اكتمال معالجة التصلب. يبين الشكل (11-14) تغيرات درجة الحرارة والضغط ولزوجرة الريزين خلال عملية القولبة بالضغط باستخدام autoclave moulding.



الشكل (11-14)
يبين تخطيطياً دورة
معالجة التصلب
باستخدام
autoclave.

يمكن أن تستخدم هذه الطريقة لإنتاج الأجزاء الضخمة.
يوضح الشكل (11-15)(a)، معالجة أجنحة الطائرة داخل غرفة ضغط كبيرة
autoclave. والشكل (11-15) (b) الطائرة المستخدمة فيها الأجنحة المذكورة في
الشكل (a).



(a)



(b)

الشكل (11-15)
(a)، غرفة ضغط
كبيرة autoclave
المستخدمة لإنتاج
أجنحة طائرة.
(b) الطائرة Beech
Starship أثناء
الطيران.

3-2-11-دمج مركبات قوالب الريزن:

Consolidation of resin moulding compounds

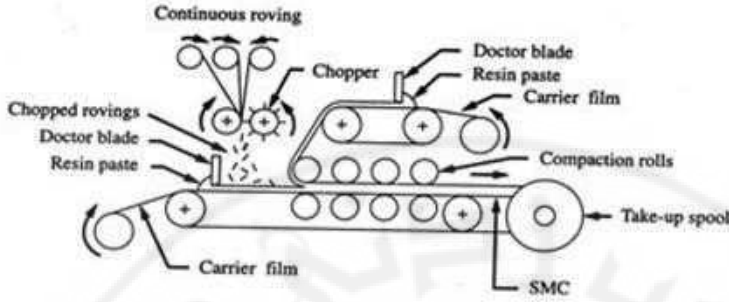
الطريقة الثالثة للريزن الحراري هي تعديل على طريقة المسبق الإقحام. ينتج فيها منتجات متوسطة وهي:

مركب صفائح مقولبة (SMC) الشكل (11-16).

مركب عجين مقولب (DMC) الشكل (11-17)، اللذين يعتمدان على بوليمير الريزن. لتصنيع (SMC) يخلط الريزن بالألياف المقطعة مع عوامل تكثيف وجسيمات مألئة مثل كربونات الكالسيوم من أجل تشكيل ملاط رقيق القوام. يتم تغذية هذا الملاط بين طبقتين رقيقتين بلاستيكتين، ومن ثم يغذى عبر سلسلة من الدرافيل لذلك يأخذ التشرب بالحدوث وتنتج صفيحة مدمجة. تتوضع الألياف بشكل رئيسي في مستوي الصفيحة و نسبة الألياف الحجمية المحتواة تكون عادة في المجال من 15 إلى 40 %. تتراوح سماكة الصفائح بين 3 إلى 10 mm.

تصنع ال DMCs بخلط مكونات مشابهة لتلك الموجودة في SMCs، لكن تتم عملية الخليط بشكل مختلف. يستخدم عادة من أجل DMCs خلاط يولد معدل قص عالي. يؤدي استخدام هذا الخلاط إلى تكسر الألياف إلى أطوال قصيرة وينتج أيضاً توزيع الألياف بشكل أكثر عشوائية في التوجه.

تتم عملية التصنيع النهائية للمواد المركبة لكلا المنتجين المتوسطة من SMC و DMC بالقولبة بالضغط الساخن في قوالب مغلقة، وتخضع المواد خلال ذلك لمعالجة التصلب النهائية لإنتاج المنتج النهائي. يتم تصنيع SMCs إلى أجزاء بواسطة الضغط الساخن أو القولبة بالضغط. يتم التصنيع بإزالة طبقات البلاستيك، وقطع الصفائح إلى أشكال مناسبة ومن ثم وضع الصفائح المقطوعة بحسب الشكل في قالب مسخن.



الشكل (11-16)

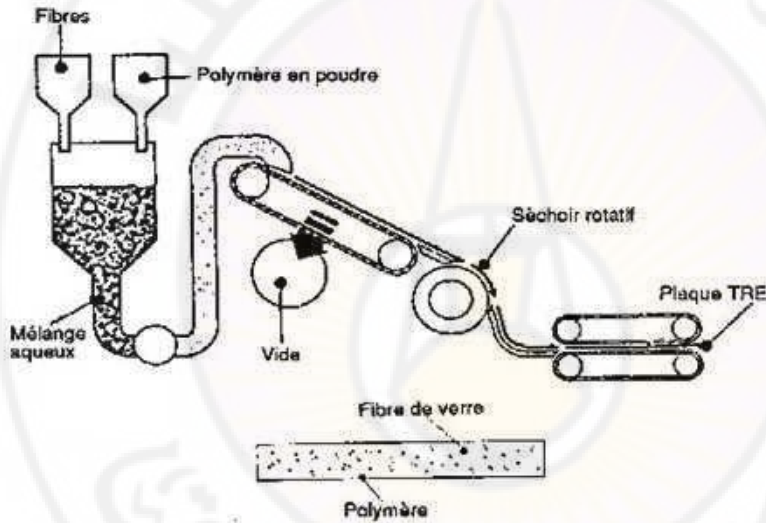
طريقة إنتاج

المنتجات

المتوسطة من

صفائح المواد

المركبة (SMC).



الشكل (11-17)

طريقة إنتاج

المنتجات

المتوسطة من

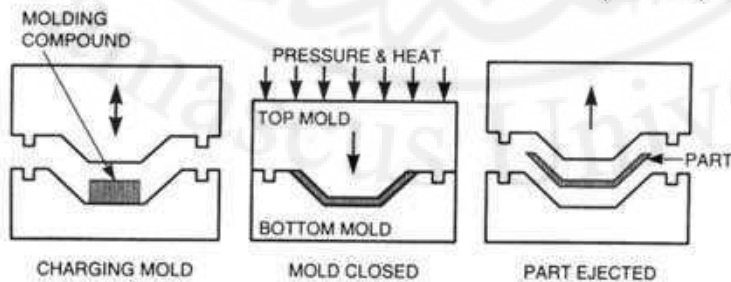
عجين المواد

المركبة (DMC)

.

استخدمت طرق مشابهة من أجل DMCs، يشكل هذا الخليط إلى أشكال أكثر تعقيداً

ثلاثية الأبعاد الشكل (11-18).



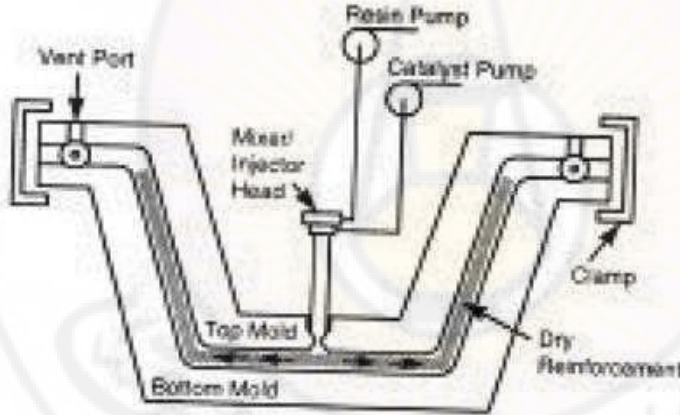
الشكل (11-18)

طريقة قولبة

عجين المادة

المركبة (DMC).

طريقة أخرى من طرق القولبة هي طريقة القولبة بالحقن التفاعلي الشكل (11-19)، يمكن أن تتم هذه الطريقة مع تقوية أو دون تقوية الألياف. يوجد بعض التشابه بين هذه الطريقة وطريقة القولبة بنقل الريزين، إلا أنه عوضاً عن استخدام ريزين مسبق التحفيز الذي يتصلب ببطء، كما في RTM، يتم في طريقة القولبة بالحقن التفاعلي مزج المركبين اللذين يتفاعلان بسرعة بعضهما مع بعض حيث يخلطان معاً مع بعض الألياف القصيرة، و يحقن مباشرة المزيج إلى داخل القالب. يزيد وجود الألياف من لزوجة الخليط على نحو كبير ويعيق سيولته بشكل كبير، حتى لو كانت الألياف قصيرة نسبياً، وبالتالي يمكن أن تصبح عملية القولبة غير عملية ويجب أن يكون محتوى الألياف قليلاً حتى يكون للمزيج لزوجة وسيولة مناسبة من أجل عملية الحقن.



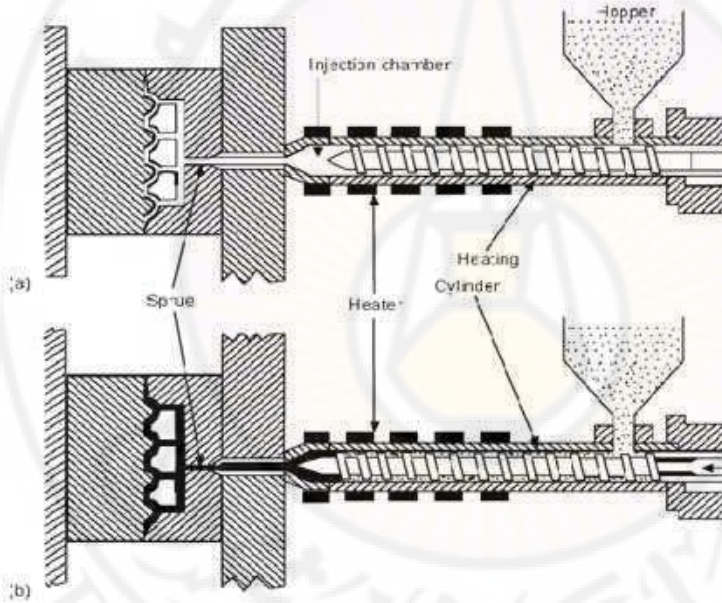
الشكل (11-19)
طريقة القولبة
بالحقن التفاعلي.

4-2-11- القولبة بالحقن للبلاستيك الحراري:

Injection moulding of thermoplastic

تستخدم المواد البلاستيكية المقواة بالألياف القصيرة لتصنيع أجزاء من المواد المركبة بالقولبة بالحقن. طبقت هذه الطريقة بشكل واسع للبلاستيك الحراري غير المقوى. يستخدم في هذه الطريقة ثلاثة بوليمرات هي البولي بروبيلين، النايلون والبولي كربونات (انظر الجدول 2-5). إن البولي بروبيلين، والنايلون من المواد شبه المتبلورة يتراوح تبلورها من 25-50 %، والبولي كربونات مادة غير متبلورة.

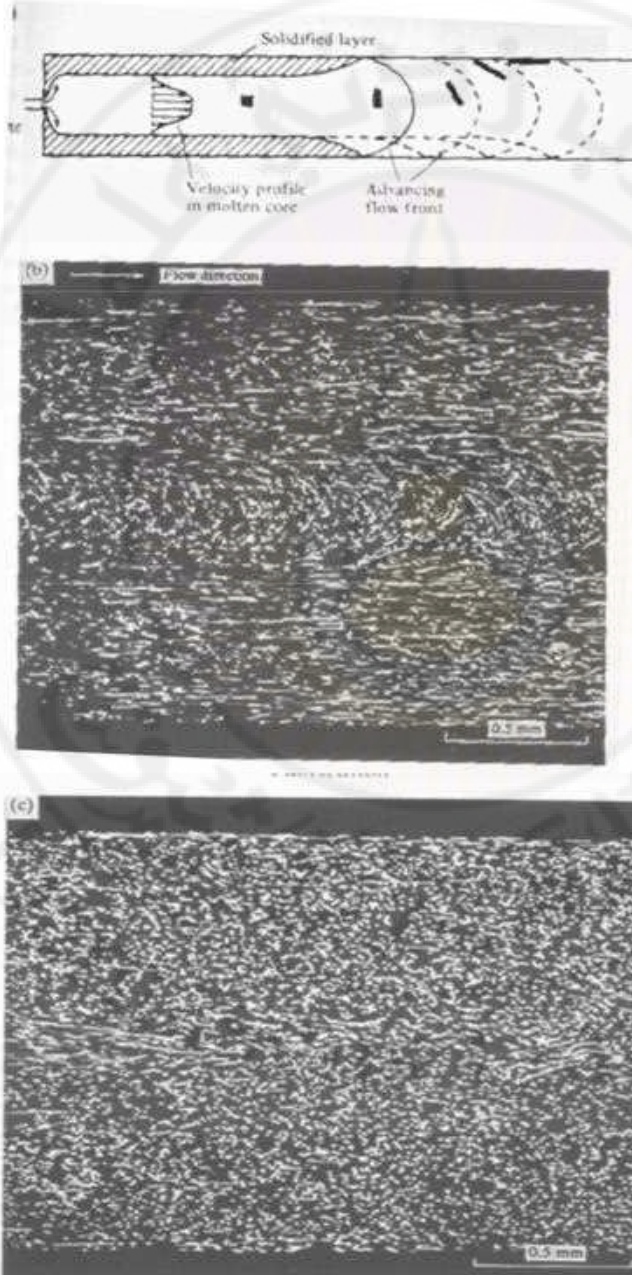
تغذى حبيبات البوليمر داخل أسطوانة التسخين للحجرة الحاوية على حلزون أرخميدس الذي يقوم بنقل الشحنة (المواد المسخنة). تساعد حركة الشفرات على تجانس المواد (الخليط) و إذابة البوليمر، الذي يحقن في القالب. يمكن أن تتم هذه العملية باستخدام الحبيبات البلاستيكية الحاوية على ألياف قصيرة، طولها بحدود 1-5 mm، تخلط الألياف وتتوزع ضمن المادة الحاضنة. يصبح جريان الخليط المحتوي على نسبة حجمية كبيرة من الألياف صعباً، لذلك لا تكون عادة النسبة الحجمية للألياف المحتواة أكبر من 10-20%.



الشكل (11-20)
القولبة بالحقن
للبلاستيك
الحراري.

من المهم جداً دراسة توزيع الألياف في أجزاء المواد المركبة المقلوبة بالحقن. على سبيل المثال: من الممكن دراسة الحصول على توزيع الألياف بحيث تتوجه بشكل موازي لاتجاه الإجهاد وذلك في أجزاء المنتج التي تتعرض لحمولات كبيرة أثناء الخدمة. يتم التحكم بتوجيه الألياف بحسب طبيعة الجريان خلال عملية ملء القالب. تميل الألياف للاصطفاف بشكل مواز للاتجاه الذي تستطيل فيه المادة (يشترط بالجريان أن لا يكون مضطرباً). يبين الشكل (11-21) تخطيطياً نموذج الجريان خلال عملية الحقن في قالب مستطيل بسيط، ويظهر كذلك الصورة الإشعاعية الموافقة.

يتضح من الشكل أنه ستصطف الألياف بشكل جيد في الطبقات الخارجية للقالب، ولكن بتوجه أكثر عشوائية بالاتجاه نحو النواة. من الممكن التحكم بالتوزيع النهائي للألياف وذلك بالتنبؤ بسلوك الجريان تحت ظروف حقن مختلفة من أجل مكونات محددة.



الشكل (11-21)

(a) مخططاً تخطيطياً

لعملية إملاء القالب

خلال القولية بالحقن.

يظهر تشوه العنصر

المربع الابتدائي للسائل

عند أوضاع متتالية

لجبهة تقدم الجريان.

(b) صورة إشعاعية

ميكروية بالتلامس

للمقطع الطولي لمادة

البولي برويلين

المحتوية على 15%

ألياف زجاجية والمقولة

بالحقن.

(c) المقطع العرضي

لنفس المادة المقولة

5-2-11- القولبة بالضغط على الساخن للبلاستيك الحراري:

hot press moulding of thermoplastic

يستخدم البلاستيك الحراري المقوى بالألياف المتصلة أو الطويلة في البنية الصفائحية. تتم المرحلة الأولى للتصنيع بإنتاج المسبق الإقحام وذلك بتشرب الألياف لمصهور البلاستيك، الذي يمكن أن يكون بشكل صفائح مستمرة تتوجه فيه الألياف، نسيج قماشى... الخ.

توضع الصفائح المسبقة الإقحام بعضها فوق بعض حسب التوجه المطلوب ويتم تشكيل المنتج النهائي بالكبس على الساخن. تسوق منتجات صفائح مسبقة الإقحام مصنعة من مواد عديدة مثل البولي بروبيلين والبولي سولفان و البولي إثير-إثير-كيتون (PEEK). تتم طريقة التصنيع بأسلوب مشابه للأسلوب المستخدم بطريقة التصلب بالضغط للريزن المسبق الإقحام. لا تحتاج مواد البلاستيك الحراري لمعالجة تصلب المادة الحاضنة، وتضبط عادة درجة الحرارة عند الحد الأدنى الضروري من أجل أن تذوب المادة الحاضنة وتسيل بشكل كافٍ لحدوث عملية الدمج. على أية حال حتى في حالة الذوبان الكامل يكون البلاستيك الحراري المذاب أكثر لزوجة من الريزين غير المعالج للتصلب، لأن البلاستيك الحراري متبلمر بشكل كامل. لذلك من الضروري تطبيق التسخين والضغط، ويتم الحفاظ على أقصر مسافة ممكنة من أجل تشريب البلاستيك الحراري إلى داخل صفوف الألياف.

3-11- المواد المركبة المعدنية: Metal Composites

الإنتاج التجاري للمواد المركبة ذات الأساس المعدني MMCs أقل تطوراً من إنتاج المواد المركبة ذات الأساس البوليمري PMCs. ما يزال الاستثمار الصناعي للمواد المركبة ذات الأساس المعدني MMCs في مراحله الأولى ولم تنشأ بعد تكنولوجيا الإنتاج الصحيحة. توجد جهود بحث مكثفة في جوانب التصنيع، وقد حد من استخدام هذه المواد صعوبات وكلفة التصنيع.

يبين الشكل (11-22) تعقيدات تصنيع هذه المواد المركبة. إن العديد من طرائق الإنتاج المبينة في الشكل محدودة الاستخدام التجاري، وذلك بسبب أنها مكلفة أو صعبة

التطبيق. إلا أنه قد تجد بعض الطرق استخدام صناعي في القريب العاجل، حيث تستخدم بعض هذه المواد لتطبيقات معينة قد تبرر كلفة التصنيع المرتفعة. إن طرائق المعدن السائل هي طرائق رخيصة نسبياً (ما عدا تقنية الرذاذ)، وتقدم طرق الحالة الصلبة فوائد محددة لكن بتكلفة زائدة. اعتمد تصنيف طرق تصنيع المواد المركبة المعدنية على تلامس أو عدم تلامس المعدن المصهور مع مادة التقوية السيراميكية. الطرق التي يحدث فيها تلامس بين المعدن السائل و سيراميك التقوية هي التالية:

1- طريقة التخلخل بالضغط. Squeeze infiltration

2- طريقة المصبوبات الممزوجة Stir casting

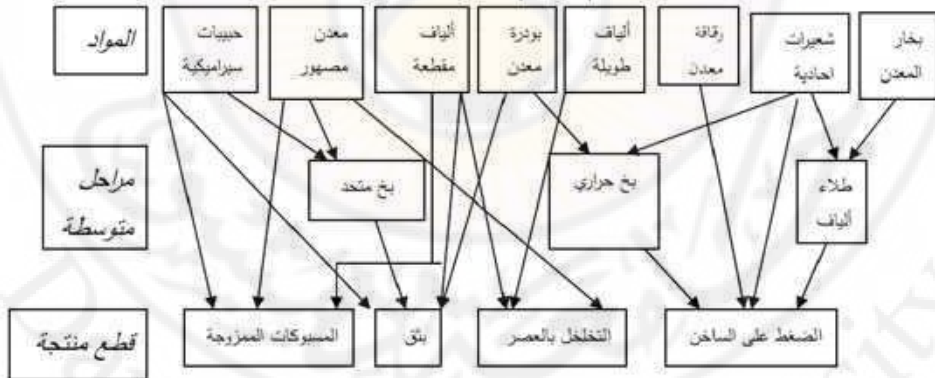
3- طريقة الترسيب بالرذاذ Spray deposition

بينما الطرق التي لا يحدث فيها تلامس بين المعدن السائل ومادة التقوية هي التالية:

1- طريقة التصلب و مزج المسحوق Powder blending and consolidation

2- طريقة الترابط الانتشاري للرقاقات Diffusion bonding of foils

3- طريقة ترسيب البخار فيزيائياً (PVD) Physical vapour deposition

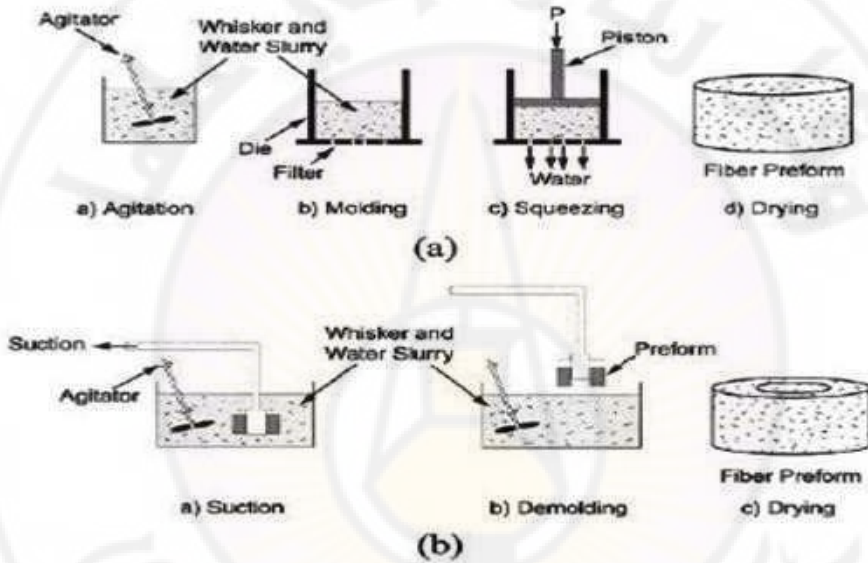


الشكل (11-22) مخطط صندوقي يبين طرق التصنيع المستخدمة من أجل المواد المركبة ذات الأساس المعدني.

11-3-1- التخلخل بالضغط: Squeeze infiltration

التخلخل بالضغط من أكثر طرق التجمد بمساعدة الضغط لمنتجات MMC. يحقن المعدن السائل إلى داخل مجمع للألياف القصيرة، الذي يدعى " المسبق التشكيل ". يصمم عادة المسبق التشكيل ليشكل جزء من المنتج النهائي بعد عملية السباكة.

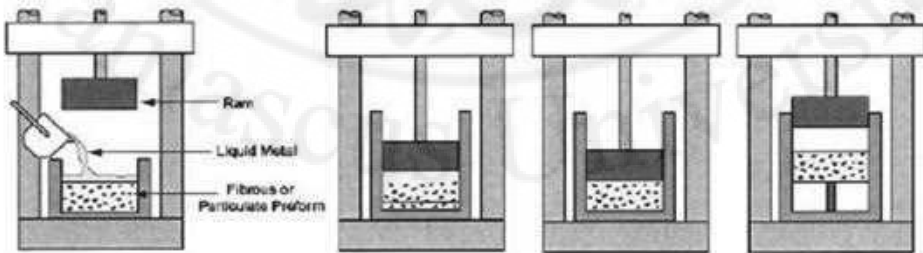
تصنع الأجزاء المسبقة التشكيل بواسطة ترسيب الألياف الصغيرة من معلق سائل، عادة تستخدم ألياف الألومينا القصيرة مثل "Saffil™"، يمكن كذلك أن تستخدم العملية للمواد المركبة MMCs مع الحبيبات. لتشكيل مسبق التشكيل تستخدم مادة ترابط (ذات أساس من السيليكا) حتى يحافظ مسبق التشكيل على شكله. يبين الشكل (11-23) طريقة تحضير المسبق التشكيل.



الشكل (11-23) طريقة تحضير المسبق التشكيل.

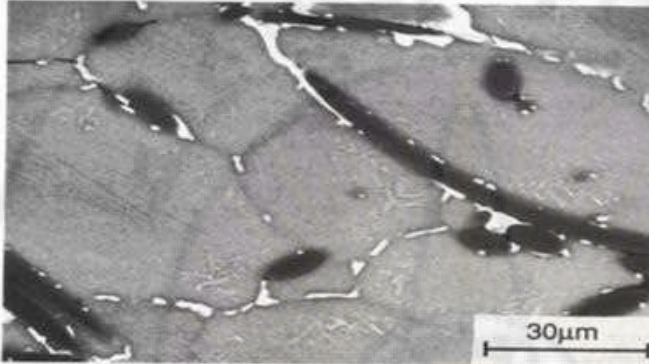
(a) عملية التحضير باستخدام الضغط. (b) عملية التحضير باستخدام الشفط.

يتم بعد ذلك اجبار المعدن على التخلخل ضمن مسبق التشكيل وذلك مبين بالشكل التالي (11-24).



الشكل (11-24) استخدام القوة الضاغطة من أجل التخلخل لمادة التقوية المسبقة التشكيل.

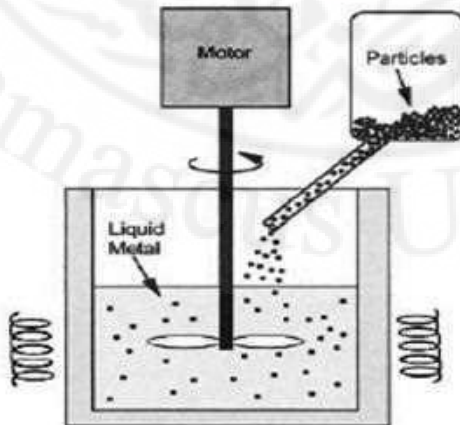
لا تشكل الألياف نوى مفضلة للتبلور خلال تجمد المصهور. نتيجة لذلك يميل المعدن السائل الذي سينتهي عنده التجمد إلى التوضع حول الألياف. يتضح ذلك بالشكل (11-25). يتم تشكيل سطح ترابط قوي بسبب التلامس لمدة طويلة تحت الضغط المرتفع بين الألياف والمصهور الغني بالمحلول. كما أنه لا تتشكل أغشية من الأكسيد بسبب عدم توافر الأكسجين. قد يكون السبب في تشكيل سطح ترابط متين.



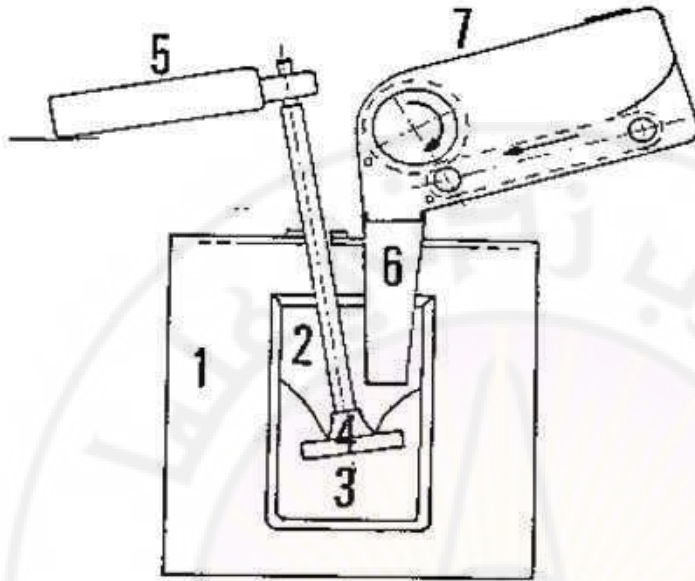
الشكل (11-25) صورة
بمجهز المسح الإلكتروني
للمادة المركبة من Al-
4.5wt%Cu المحتوي على
ألياف "Saffil™"، تظهر
مناطق غنية بالنحاس (فاتحة
اللون) حول الألياف.

11-3-2 - المصبوبات الممزوجة: Stir casting

تتضمن هذه التقنية التحريك والمزج للمعدن السائل مع الحبيبات السيراميكية الصلبة أو الألياف القصيرة و من ثم السماح للمزيج بالتجمد. يمكن أن يتم ذلك باستخدام تجهيزات التصنيع التقليدية يبين الشكل (11-26) طريقة المصبوبات الممزوجة مع تقوية الحبيبات، ويبين الشكل (11-27) طريقة المصبوبات الممزوجة مع تقوية الألياف القصيرة، ويمكن أن تتم بشكل مستمر أو نصف مستمر.



الشكل (11-26)
طريقة المصبوبات
المرموجة مع تقوية
الحبيبات.



الشكل (11-27) يبين

طريقة المصبوبات

الممزوجة مع تقوية

الألياف القصيرة حيث :

1- فرن الصهر

الكهربائي،

2- البوتقة، 3- المعدن

المصهور + الألياف،

4 - الخلاط من كربيد

السيليكون،

5- محرك متغير السرعة،

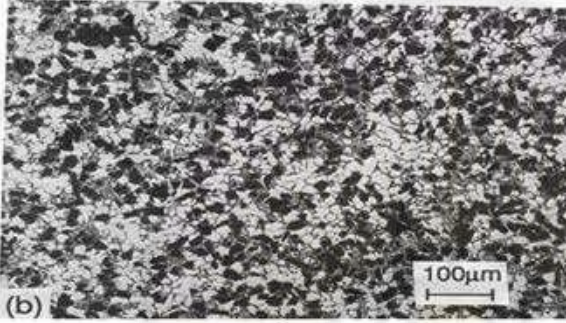
6 - قناة، 7 - جهاز

تفريق الألياف.

استخدمت الطريقة تجارياً للمواد المركبة ذات الأساس من الألمنيوم والمقواة بالحبيبات المادة المركبة المنتجة مناسبة من أجل عمليات تصنيع إضافية مثل السباكة بالضغط. يؤدي استخدام التقنية التقليدية للتعامل مع المصهور إلى حدوث زيادة باللزوجة بسبب وجود حبيبات سيراميكية في المصهور بنسبة مئوية مساوية إلى 25% وذلك بسبب تكتل وتجمع الحبيبات. إن أكثر مشاكل هذه الطريقة هي عدم تجانس البنية، وحدث تكتل الحبيبات و ترسبها في المصهور وإعادة توزيع الحبيبات بسبب دفع الحبيبات بواسطة جبهة التجمد المتقدمة، لا تزال هذه الحالة غير مفهومة ومن الصعوبة إزالتها.

يظهر الشكل (11-28) البنية المجهرية الموضحة لتأثير دفع الحبيبات خلال عملية التجمد.

تستلزم طريقة المصبوبات الممزوجة التلامس لمدة طويلة بين السيراميك والمصهور، وبذلك يمكن أن يحدث تفاعل قوي على سطح التلامس. درس ذلك بالتفصيل من أجل $AlSiC$ ، تظهر الدراسة تشكل Al_4C_3 و Si . يفسد هذان المركبان الخواص النهائية للمادة المركبة ويزيدان من لزوجة المزيج، مما يؤدي إلى صعوبة صبه.



الشكل (11-28) البنية

المجهريّة للمادة

Al-7wt% Si/20 vol. %

SiC_p

(a) صب دقيق (تبريد بطيء).

(b) صب بالضغط (تبريد سريع

). دفعت حبيبات SiC إلى داخل

مناطق الدندريت وذلك بالدندريت

النامي محدثاً تكتلاً شديداً وذلك

عند التبريد البطيء.

يمكن تخفيض معدل التفاعل، بحيث يمكن أن يصبح مساوياً للصفير، يتم ذلك باستخدام معدن مصهور غني بعنصر Si. تتناسب المسبوكات من المادة المركبة Al/SiC_p مسبوكات الخلط (المرتفعة نسبة Si) ولا تتناسب هذه المادة المركبة الخلط المطواعة للتشكيل، تستلزم المسبوكات من المادة المركبة Al/SiC_p مدة طويلة للتلاصق (حفظ المصهور بدرجة حرارة التصنيع) وذلك من أجل آلية التفاعل ومحتوى Si من أجل عدم حدوث التفاعل. يوجد اهتمام تجاري بمسبوكات Al/Al₂O_{3p}، على الرغم من أن كثافة هذه المواد مرتفعة مقارنة مع Al/SiC.

11-3-3- الترسيب بالرذاذ: Spray deposition

طورت طريقة الترسيب بالرذاذ من قبل Osprey Ltd -UK كطريقة لبناء أجزاء من المواد المعدنية وهي بنوعين ترسيب بالتبريد المؤين والترسيب بالرذاذ الحراري. يتم الترسيب بالتبريد المؤين من خلال توجيه تيار مؤين من الرذاذ على الطبقة الأساسية. استخدمت هذه الطريقة لإنتاج مواد مركبة MMC تحتوي على حبيبات وذلك من خلال حقن بودرة السيراميك إلى داخل الرذاذ، إلا أن النجاحات التجارية للطريقة محدودة.

تكمّن أحد مشاكل الطريقة في عدم تجانس توزيع حبيبات السيراميك، حيث تشاهد الطبقات الغنية بالسيراميك ناظرية تقريباً على اتجاه النمو الإجمالي. تقارب المسامية في حالة الترنيد قيمة 5-15%، وتحتاج المادة المركبة الناتجة إلى عملية تكثيف أخرى. يتضمن الرذاذ الحراري حقن البودرة المعدنية أو السلك إلى داخل مشعل ذي درجة حرارة عالية، وتتبعث من خلاله قطرات المصهور بسرعة عالية. مقارنة مع تكنولوجيا ترنيذ المصهور المؤين، إن معدلات الترسيب أخفض (عادة $\sim 1 \text{ g/s}$) لكن سرعة الحبيبات أكبر بحدود ($200-700 \text{ m/s}$)، كما أنه تحتوي المواد المرسبة بالرذاذ الحراري على مسامية بنسبة مئوية قليلة جداً.

حظي الترسيب بالرذاذ الحراري على توضع الألياف لتشكيل المادة المركبة MMCs ببعض الاهتمام. بشكل خاص لمعدن التيتانيوم، حيث تتعرض بشكل طفيف لدرجات الحرارة المرتفعة، مما يمكن من تجنب مشاكل التفاعل الكيميائي (مادة حاضنة / الألياف) المفرط خلال عملية التصنيع. يمكن زيادة تأثير التكاثر الكامل على الفجوات ونزع هذه الفجوات باستخدام المعالجة الحرارية. من الصعب جداً الترنيد على ترتيبات الألياف لإنتاج مواد مركبة MMCs ذات محتوى فجوات مقبول ($<10\%$). توجد كذلك مشكلات تضرر طلاء الألياف و التوزيع غير المنتظم للألياف.

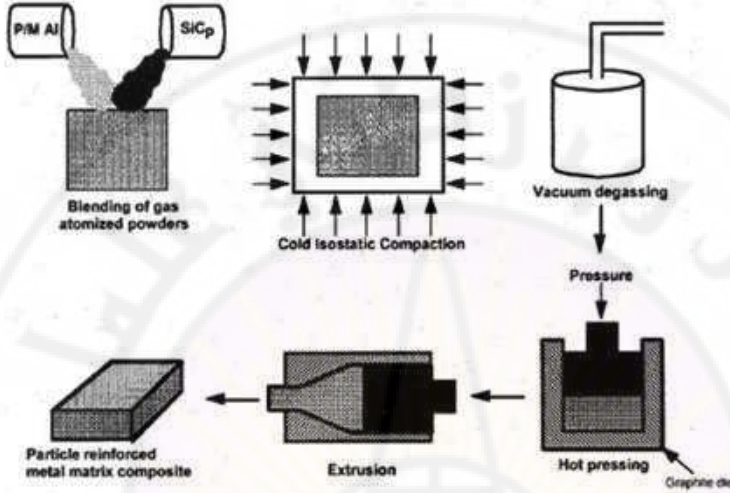
4-3-11- التصلب و مزج المسحوق:

Powder blending and consolidation

تتميز عملية مزج المساحيق المعدنية و الألياف السيراميكية أو الحبيبات في أحكام الإغلاق على المحتوى السيراميكي. يتبع عملية المزج الدمج على البارد، والتخلية لإزالة الغازات ومن ثم مرحلة التصلب بدرجات الحرارة المرتفعة مثل التسخين تحت الضغط المرتفع (HIP) أو البثق الشكل (29-11).

تتميز معظم طرق مواد المساحيق بوجود حبيبات الأكسيد الناعمة، التي تتواجد عادة في Al-MMCs على شكل حبيبات شبه صفائحية بسماكة بضع عشرات من النانومترات. تشكل هذه الرقاقت الأكسيدية حوالي 0.05-0.5 vol%. تعمل طبقة الأكسيد الناعمة

كعامل تقوية موزع، وذلك تبعاً لنوعية المسحوق ولشروط التصنيع، وتؤثر بشكل كبير على خواص المادة الحاضنة، وبشكل خاص بدرجات الحرارة المرتفعة.



الشكل (11-29)

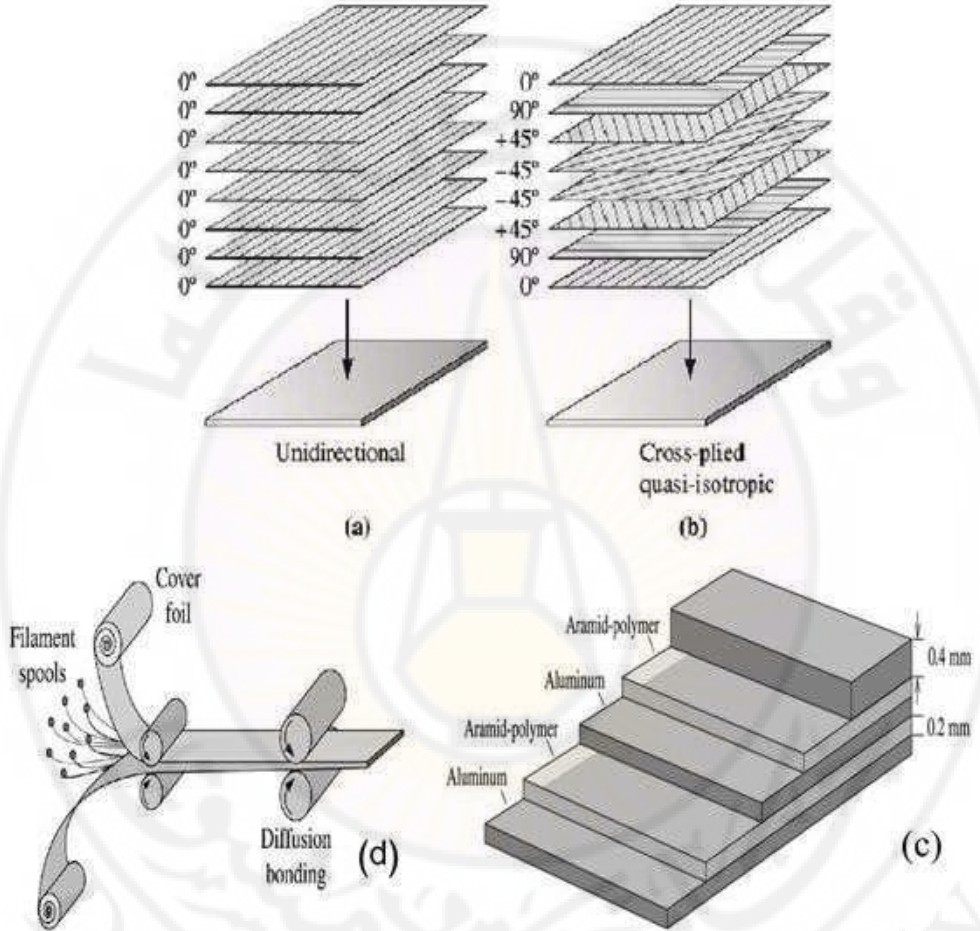
مراحل التصنيع
بتقانة المساحيق
المعدنية.

تحدث تغيرات في البنية المجهرية خلال عملية البثق، حيث تصبح الألياف متوضعة بشكل موازي لمحور البثق، إلا أنه يصاحب ذلك بتكسر زائد بالألياف، وتنخفض كمية الألياف المتحطمة بزيادة درجة الحرارة وبإنقاص معدل الانفعال الموضعي. تتضمن البنية المجهرية للمواد المركبة MMCS المبنوقة تشكل حزمة غنية بالسيراميك موازي لمحور البثق. لا تزال آلية تشكل الحزمة غير واضحة، ويتركز انفعال القص في المناطق التي تتجمع فيها حبيبات السيراميك أو الألياف.

5-3-11- الترابط الانتشاري للرقاقات: Diffusion bonding of foils

أنتجت المواد المركبة من التيتانيوم مع الألياف الطويلة تجارياً بوضع ترتيبية من الألياف بين طبقات معدنية رقيقة الشكل (11-30)، تتبع العملية بالضغط على الساخن. تتناسب هذه الطريقة معدن التيتانيوم، حيث يحل معدن التيتانيوم أكسيده عند درجات حرارة أكبر من 700°C ، ويتم كذلك تجنب التفاعل الكيميائي السريع الحادث على سطح التلامس الذي يحدث عند التلامس بين مصهور التيتانيوم والسيراميك. تكمن إحدى المشكلات الرئيسية للمواد المركبة ذات الأساس من التيتانيوم في تجنب التفاعل الكيميائي المفرط

على سطح التلامس، الذي يؤدي إلى الهشاشة. لذلك يتركز الاهتمام على تصميم طلاءات الألياف للتقليل من مشاكل التفاعل على سطح التلامس.



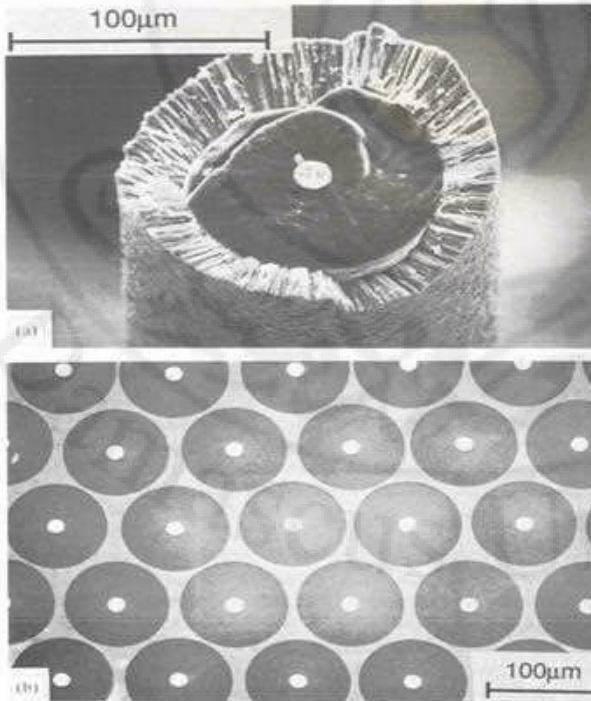
الشكل (11-30) طرق تصنيع الصفائح بطريقة الترابط الانتشاري للرقاقات (a) تقوية احادية الإتجاه. (b) تقوية متعددة الإتجاهات. (c) تقوية صفائح الألمنيوم بألياف الأراميد العضوية. (d) استخدام الدرفلة لتصنيع صفائح المادة المركبة بالترابط الانتشاري.

11-3-6- ترسيب البخار فيزيائياً:

Physical vapour deposition (PVD)

استخدمت طرق PVD لتصنيع مواد مركبة MMCs. تستخدم طريقة التبخير لتصنيع خلائط التيتانيوم المقواة بالألياف طويلة.

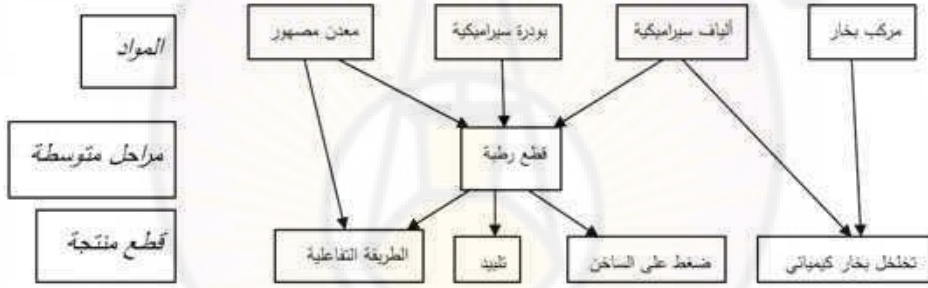
تتم هذه الطريقة بتمرير الألياف بشكل مستمر من خلال حجرة مفرغة من الهواء، يحدث التكاثف على الألياف وتنتج طبقة طلاء سميكة نسبياً. يتم إنتاج بخار المعدن بتوجيه شعاع الكتروني عالي القدرة ($\sim 10 \text{ kW}$) من أجل صهر نهاية قضيب معدني مغذى لداخل الحجرة. يمكن أن يستخدم مجال واسع من الخلائط، يتم تعويض الاختلافات في معدل التبخير بين المحاليل المختلفة بواسطة تغيرات التركيب الكيميائي لحوض المعدن المصهور المشكل عند نهاية القضيب، عند الوصول للحالة الثابتة التي يكون فيها تركيب الخليطة المترسبة هي نفسها تركيبة القضيب المصهور. يكتمل تصنيع المادة المركبة بتجميع طبقة الألياف في حزم و تدمج بطريقة الضغط على الساخن أو Hipping (الضغط الهيدروستاتيكي على الساخن). تنتج ألياف موزعة بشكل متجانس تماماً، مع محتوى ألياف بحدود 80%. يبين الشكل (11-31) الألياف المطلية والمادة المركبة بالتيتانيوم المدمج. معدلات الإنتاج بطيئة والطريقة مرتفعة التكلفة، إلا أن لها بعض الإمكانيات التجارية.



الشكل (11-31) (a) شعيرة أحادية من SiC وقد ترسب عليها طبقة بسماكة $35 \mu\text{m}$ من الخليطة Ti-5Al-5V. (b) المادة المركبة من الخليطة Ti-5Al-5V مقواة بكمية مساوية إلى 80% حجماً من شعيرات SiC والمنتجة بواسطة Hipping لحزمة من الشعيرات المطلية بسماكة $8 \mu\text{m}$.

11-4-المواد المركبة السيراميكية: Ceramic composites

يواجه تصنيع المواد المركبة السيراميكية CMCS العديد من المشكلات التقنية. ويعزى ذلك إلى الطبيعة الهشة للمواد السيراميكية، مما يصعب من طرق تشكيل هذه المواد. كما أنه يمكن أن تتشقق المادة الحاضنة وذلك بسبب عدم قدرتها على احتواء تغيرات الحجم المرافقة لعملية التصلب. هذه مشكلة خاصة عند تضمين الألياف، حيث تقاوم الألياف تقلص المادة الحاضنة كالتخلص من الفجوات. يسهم استخدام درجات الحرارة المرتفعة ($1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) خلال معظم طرق التصنيع في صعوبات هذه المواد المركبة. يوجد عدد محدود من الطرق الملائمة لتصنيع منتجات من CMCS ، وقد استخدم القليل من هذه الطرق تجارياً.



الشكل (11-32) مخطط صندوقي لطرق تصنيع المواد المركبة السيراميكية.

يبين الشكل (11-32) المخطط الصندوقي لطرق تصنيع المواد المركبة السيراميكية. تستلزم معظم الطرق مادة أولية بشكل مسحوق السيراميك، يتطرق القسم الأول إلى كيفية التعامل مع هذه المساحيق. ومن ثم نتعرض لطرق التصنيع التفاعلية والمواد المركبة ذات الطبقات، لا تستلزم بالضرورة أي من هذه الطرق وجود الألياف. أخيراً يتم شرح طريقة تصنيع المواد المركبة من كربون / كربون ذات الأهمية التجارية حيث تختلف طريقة تصنيعه عن طرق تصنيع معظم المواد المركبة السيراميكية CMCS.

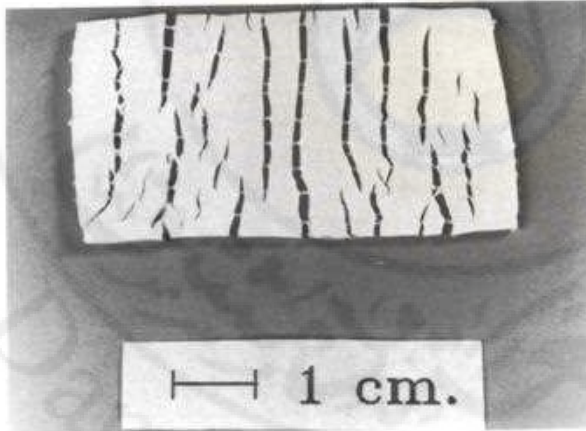
11-4-1- الطرق المعتمدة على المسحوق (البودرة):

Powder-based routes

ثبت إنتاج المنتجات السيراميكية للتطبيقات الصناعية باستخدام الطرائق المعتمدة على

المسحوق. تنتج الأجزاء الرطبة (الخضراء) بالاندماج البارد للمساحيق الناعمة الممزوجة مع مادة رابطة ذات نوع معين، تلبد بعد ذلك الأجزاء الرطبة أو تكبس على الساخن وبالتالي تزال الفجوات بواسطة العمليات الانتشارية. يوجد سائل في بعض الحالات خلال عملية الاندماج، تتم مساعدة إزالة الفجوات في هذه الحالة بالفعل الشعري و يكون الاندماج أسرع بكثير. تظهر المشاكل عند إدخال الألياف في هذه الطريقة. يمكن أن تمزج الألياف بجزيئات المسحوق، بواسطة الخلط أو بعبور (جر) الألياف من خلال مادة ملاط مناسبة رقيقة القوام.

تكبح بقوة عملية التكتيف التالية حيث تقاوم الألياف التقلص الحجمي للمادة الحاضنة عندما يتم تكتيفها. وتنتج تشققات كثيرة في المادة الحاضنة، يبين الشكل (11-33) تشققات المادة الحاضنة. يمكن أن توازن إجهادات التقلص جزئياً بواسطة تطبيق إجهاد الضغط الهيدروستاتيكي الكبير، كما في عملية الضغط على الساخن (HIP). إلا أنه تزيد هذه العملية من تكلفة التصنيع و قد لا تزال التشققات بشكل كامل.



الشكل (11-33) مادة مركبة مصنعة بتليد بودرة تحتوي على ألياف $ZrO_3-3\% Y_2O_3$ في مادة حاضنة من نفس المادة. تشكلت شقوق كبيرة مستعرضة على اتجاه الألياف على الاتجاه الذي نشأت به إجهادات الشد في المادة الحاضنة أثناء حدوث تكتيفها.

يتم حل مشكلة التقلص والتشققات المصاحبة باستخدام مادة حاضنة تكون سائلة جزئياً أو كلياً عند درجة حرارة التكتيف، يجبر حل هذه المشكلة اختيار مواد حاضنة ذات خواص متوازنة نسبياً عند درجات الحرارة المرتفعة. وبالرغم من ذلك يوجد اهتمام باستخدام هذه الطريقة لتصنيع المواد المركبة CMCS و باستخدام مواد حاضنة من الزجاج أو الزجاج

السيراميكي. زجاج سيليكات البورو cordierite (سيراميك-زجاج). تعاني هذه المواد المركبة من المشاكل المرافقة للاختلافات في التقلص الحراري، حتى عندما يمكن تحقيق التصليب دون التشقق الشديد للمادة الحاضنة، حيث يكون عدم توافق الانفعال كبير في الأنظمة التي تكون فيها المادة الحاضنة سائلة عند درجات الحرارة المرتفعة، حيث تظهر المادة الحاضنة تمدد حراري أكبر من الألياف. يبين الشكل (34-11) مثلاً على نتائج اختلافات التقلص الحراري. أعاققت القيود والصعوبات في تصنيع المواد السيراميكية المقواة بالألياف بشكل كبير من تطورها تجارياً.



الشكل (34-11) صورة مجهرية للمادة المركبة المصنعة من ألياف الكربون القصيرة ضمن مادة حاضنة من المقنزيا. حدث تشقق المادة الحاضنة كنتيجة لاختلافات التقلص الحراري خلال التبريد بعد التصنيع.

2-4-11- الطريقة التفاعلية: Reactive processing

تم تطوير عمليات تصنيع حيث يوضع فيها مكونات المادة المركبة معاً بظروف تحدث فيها تفاعلات كيميائية خلال تصلب المزيج. يستخدم السائل المعدني في العديد من هذه الطرق، ويؤكسد بشكل مضطرب. على سبيل المثال، استخدم التأكسد الموجه للألمنيوم في طرق متعددة مسجلة تحت الاسم التجاري 'XD'. هذه الطريقة مثيرة للاهتمام حيث يمكن بهذه الطريقة تشكيل قطع شبه منتهية بالشكل. يتم صنع مجمع مكثف من مسحوق مناسب ويخلخل السائل المعدني إلى داخله. يمكن الحصول على مسامية منخفضة ومستويات إجهاد منخفضة بواسطة التحكم الجيد بالتفاعل والتدرج الحراري ومعدل تخلخل السائل. يوجد في العديد من الحالات معدن متبق غير متفاعل وهذا المعدن المتبقي يمكن تعديله بالتفاعل كما يمكن أن يساعد في زيادة الجساءة. طورت أنظمة مواد مركبة

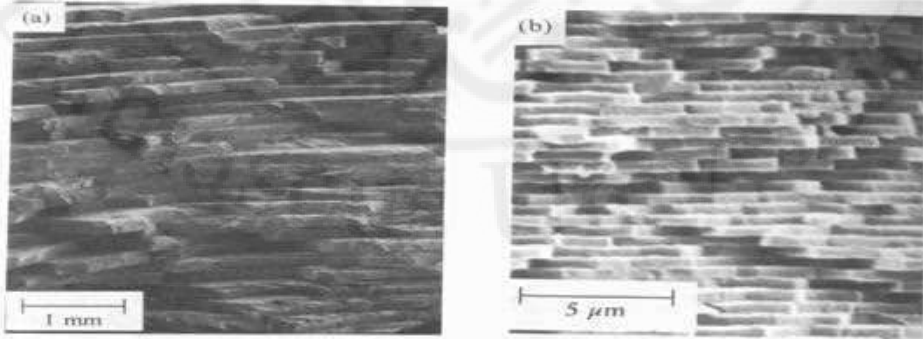
متضمنة العديد من المواد المركبة المعتمدة على مواد حاضنة شبه معدنية. لقد استثمرت طريقة التفاعلات المؤكسدة من قبل شركة Lanxide. حيث يمكن باستخدام هذه الطريقة تحقيق بعض الخواص الجيدة، على سبيل المثال تظهر المادة المركبة من سيليكات الموليبيديوم $MoSi_3$ المقواة بكرييد السيليكون المصنعة بهذه الطريقة مقاومة زحف جيدة.

3-4-11- المواد مركبة السيراميكية ذات الطبقات:

Layered ceramic composites

تتضمن الطريقة البسيطة لصنع المواد المركبة السيراميكية الصلدة نسبياً تكديس صفائح رقيقة أو أشرطة في الحالة الرطبة (الخضراء) ومن ثم تصليب هذه الصفائح أو الأشرطة بواسطة عملية التلبيد. طورت الطريقة من أجل المواد المركبة من SiC . تتم هذه الطريقة بمزج المسحوق السيراميكي الناعم بمحاليل البوليمر اللزجة و من ثم يدرفل لإنتاج الأشرطة، سماكة الشريط التقريبية حوالي 200 ميكرون. تكس هذه الأشرطة وتلبد، وذلك بعد طلائها بطبقة رقيقة بسماكة ~5 ميكرون. تصمم طبقة الطلاء هذه من أجل تأمين أسطح تلامس ضعيفة التي تسبب انحراف الشق مما يرفع من الجساءة.

لقد أثبتت الطبقات الغرافيتية فعاليتها بتحقيق زيادة الجساءة وانحراف الشقوق، إلا أنه تعاني الطبقات الغرافيتية من سيئة المقاومة الضعيفة للأكسدة الشديدة عند درجات الحرارة المرتفعة. يبين الشكل (11-35) (a) البنية المجهرية المشابهة للطبقات الصخرية الرقيقة.



الشكل (11-35) صورة بمجهر المسح الالكتروني (a) للمادة المركبة SiC /غرافيت بشكل طبقات، سماكة طبقة SiC بحدود 200 ميكرون (b) مادة مركبة بشكل طبقات من البروتين وكربونات الكالسيوم.

يحدث التقلص الحجمي بشكل منتظم عند التلييد والتبريد اللاحق، ولا يؤدي إلى توليد إجهادات داخلية كبيرة. على الرغم من أن تمدد الطبقات الغرافيتية مختلف عن تمدد SiC، إلا أنه للطبقات الغرافيتية معامل مرونة منخفض وهي قادرة على استيعاب القص المتصاحب مع التقلص دون أن تتضرر هذه الطبقة. المادة المركبة متراكبة، وهي مقبولة للعديد من التطبيقات (مثل جسم حجرة احتراق توربين غازي في الفصل الثاني عشر).. إن طريقة الإنتاج سريعة نسبياً وقليلة التكلفة، حيث لا تستلزم التعامل بالألياف أو تطبيق الضغط.

4-4-11-المواد المركبة كربون / كربون:

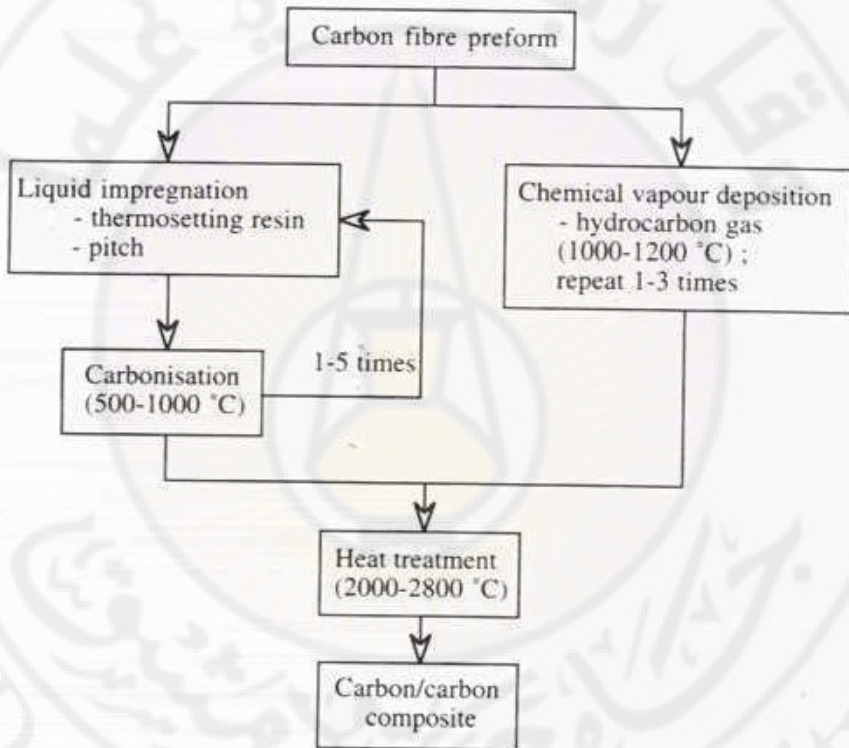
Carbon/carbon composites

الكربون من المواد الممتازة بدرجات الحرارة المرتفعة، بشرط أن لا يتعرض لبيئة مؤكسدة. يتمتع الكربون بثبات ميكانيكي ممتاز عند درجات الحرارة المرتفعة وبشكل خاص عند تواجد سطوح تلامس داخلية مناسبة، أدت هذه الميزات إلى استخدام الكربون في تطبيقات هامة. استخدمت المواد المركبة كربون/كربون في مكابح الطائرة.

لا يمكن تلييد الكربون وذلك بسبب ثباته، تستخدم طريقتان أساسيتان من أجل إنتاج المواد المركبة كربون / كربون. تستلزم كلتا الطريقتين تخلخل المادة السائلة الحاملة للكربون إلى داخل الحيز بين ترتيب ألياف الكربون. يجب في كلتا الحالتين تحقيق التخلخل الكامل في وقت قصير. يبين الشكل (36-11) الطريقتين بشكل تخطيطي حيث يحقق سائل إما القطران أو الريزن من أجل التشريب. يتم بعد ذلك التسخين ليتفكك السائل إلى راسب من الكربون.

طريقة التصنيع الأخرى هي التشريب بالبخار الكيميائي (CVI). تتم هذه الطريقة بحقن غاز هيدرو كربون مناسب مثل الميثان بالإضافة إلى غاز الهيدروجين وغاز الأزوت، يتفكك الغاز عند درجة حرارة التخلخل ليرسب الكربون على الألياف. من الضروري إجراء دورات متعددة من التسخين والتبريد لإتمام العملية في كلتا طريقتي تشريب السائل وتشريب الغاز.

كذلك من الشائع ترتيب تدرج حراري عبر الجزء لتشجيع التخلخل الكامل قبل أن يكبح السائل المزود بسبب إغلاق القنوات القريبة من مصدر السائل. يتم بعد ذلك تحويل الكربون إلى غرافيت بالمعالجة الحرارية بدرجة حرارة $2000-2800\text{ }^{\circ}\text{C}$. تستغرق الطريقة وقتاً طويلاً ومكلفة.



الشكل (11-32) المخطط الصندوقي لطرق تصنيع المادة المركبة كربون /كربون.

الفصل الثاني عشر

تطبيقات المواد المركبة

Application Of Composite Materials

- 1- التطبيقات الصناعية.
- 2- الاستخدامات البحرية.
- 3- الاستخدامات في الفضاء.
- 4- الاستخدامات في الطائرات.
- 5- الاستخدامات في وسائط النقل.
- 6- الاستخدامات في الرياضة.
- 7- الاستخدامات في الإلكترونيات.



1-12- مقدمة: Introduction

تستخدم المواد المركبة في مجال واسع من التطبيقات الصناعية والاستخدامات البحرية ووسائل النقل (السيارات والأليات) وفي الفضاء والطائرات الحربية والمدنية والأجهزة الإلكترونية والأدوات الرياضية.

سوف نخصص هذا الفصل للتعريف ببعض تطبيقات المواد المركبة المستعملة في الاستثمار التجاري. تغطي الأمثلة المعطاة جزءاً من المواد المركبة، ذات التعقيد الهندسي، مع طريقة التصنيع، حجم السوق، الوضع التنافسي قياساً إلى المواد المعروفة. وضعت قائمة عند بداية دراسة كل حالة تُعرف هذه القائمة بالأسباب التي أدت إلى اللجوء لاستخدام المواد المركبة عوضاً عن المواد الهندسية العادية. على الرغم من أن الأمثلة تغطي كل أنواع المواد الحاضرة فإن كمية المواد المركبة المنتجة سنوياً تقدر حالياً بحوالي 10 مليون طن وهي على شكل PMCs. وضعت لائحة في بداية كل مثال بالمتطلبات الخاصة بكل تطبيق.

2-12- التطبيقات الصناعية : Industrial Applications

استخدمت المواد المركبة ذات الأساس البوليميري وذات الأساس المعدني وذات الأساس السيراميكي في العديد من التطبيقات الصناعية وسنستعرض فيما يلي أحد هذه التطبيقات.

1-12-2 درافيل معالجة الصفائح: Sheet processing rolls

متطلبات مادة الدرافيل هي التالية:

- جساءة عتبة مرتفعة (معامل يونغ).
- جساءة التواء عالية .
- كثافة منخفضة.
- استقرار حراري جيد.
- سطح نهائي جيد.

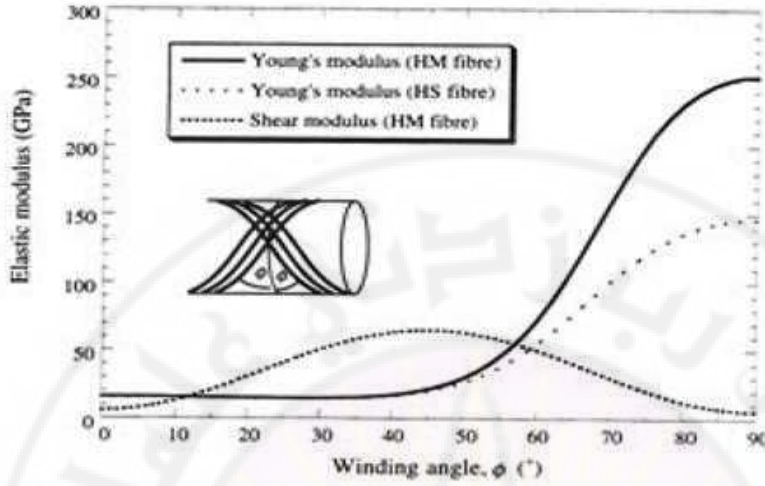
نحتاج إلى الدرافيل ذات الأداء العالي في الكثير من طرق التصنيع، مثلاً خلال التعامل مع الصفائح الرقيقة مثل المطابع الحديثة، الصفائح البلاستيكية .. الخ. يحتاج في معظم الحالات إلى درافيل عريضة نسبياً ولذلك تحتاج إلى جساءة عتبة مرتفعة (=عزم عطالة المقطع × معامل يونغ للمادة)، وذلك بهدف تجنب الانحناء الزائد. هناك متطلب آخر قد تحتاجه بعض الدرافيل وهو أن تدور بسرعات كبيرة مما يؤدي إلى صعوبات كون الدرافيل ذات عتبة الجساءة الكبيرة ثقيلة الوزن، مما يؤدي إلى عدم استقرارها عند الدوران بسرعات كبيرة، إضافة إلى ذلك لا يمكن تغيير سرعات دورانها بشكل مفاجئ.

استخدم سابقاً الدرافيل الفولاذية إلا أنه لتحقيق المتطلبات المذكورة أعلاه التي هي خفة الوزن والبنية الجاسئة تم استبدال الدرافيل الفولاذية بأخرى مصنوعة من ألياف الكربون/إيبوكسي التي صنعت بطريقة اللف.

تتجلى المشكلة في تصنيع الدرافيل من هذه المواد المركبة في الحاجة إلى كلا جساءة الانحناء وجساءة الالتواء، نحتاج إلى جساءة الالتواء للتأكد من عدم تشوه الدرافيل عندما يطبق عليه العزم ليدور الدرافيل. تعتمد جساءة الالتواء على معامل قص المادة .

يبين الشكل (1-12) تغير معامل يونغ المحوري E، ومعامل القص G مع زاوية اللف ϕ وذلك للمادة المركبة إيبوكسي/65% ألياف كربون ملفوفة زاوياً عندما تكون زاوية اللف صغيرة جداً يكون كلا المعاملين صغيرين. تحدث قمة جساءة القص عند الزاوية

$\phi = 45^0$ ، في حين أن القيمة العظمى لمعامل يونغ تكون عند الزاوية $\phi = 90^0$. إن قيمة E، G عند الزاوية $\phi = 60^0$ حوالي 70Gpa و 50Gpa على التوالي، بينما القيم للفولاذ (E=210Gpa, G=80GPa)، مع العلم أن كثافة المادة المركبة 1/5 كثافة الفولاذ. تم تحقيق تقليل في الوزن بحدود 75% وذلك باستبدال الدرافيل الفولاذية بدرافيل من المادة المركبة. تم إنتاج درافيل يصل طولها إلى 9m وقطرها إلى 0.35m. يتم الحصول على الإنهاء الممتاز لسطح الدرافيل المصنوعة من المواد المركبة، بطليها بطبقة رقيقة من المعدن أو المطاط.



الشكل (12-1)

قيمة معامل
المرونة ومعامل
القصر بتغير
زاوية اللف.

12-3- الاستخدامات البحرية: Marine Applications

استخدمت المواد المركبة ذات الأساس البوليميري في العديد من التطبيقات البحرية (سفن، يخوت زوارق) الشكل (12-2)-(12-3)، وذلك لما توفره من خفة الوزن والمتانة والمقاومة الجيدة للتآكل الممكن حدوثه بتأثير ماء البحر، وفيما يلي دراسة أحد هذه التطبيقات.



الشكل (12-2)

قارب سباق
مصنوع بالكامل
من المواد
المركبة.



الشكل (12-3)

السفينة كاسحة
الآلغام
المصنعة من
المواد المركبة.

1-3-12- السفينة كاسحة الألغام: Minesweeper hull

متطلبات المادة المصنوعة منها السفينة كاسحة الألغام هي التالية:

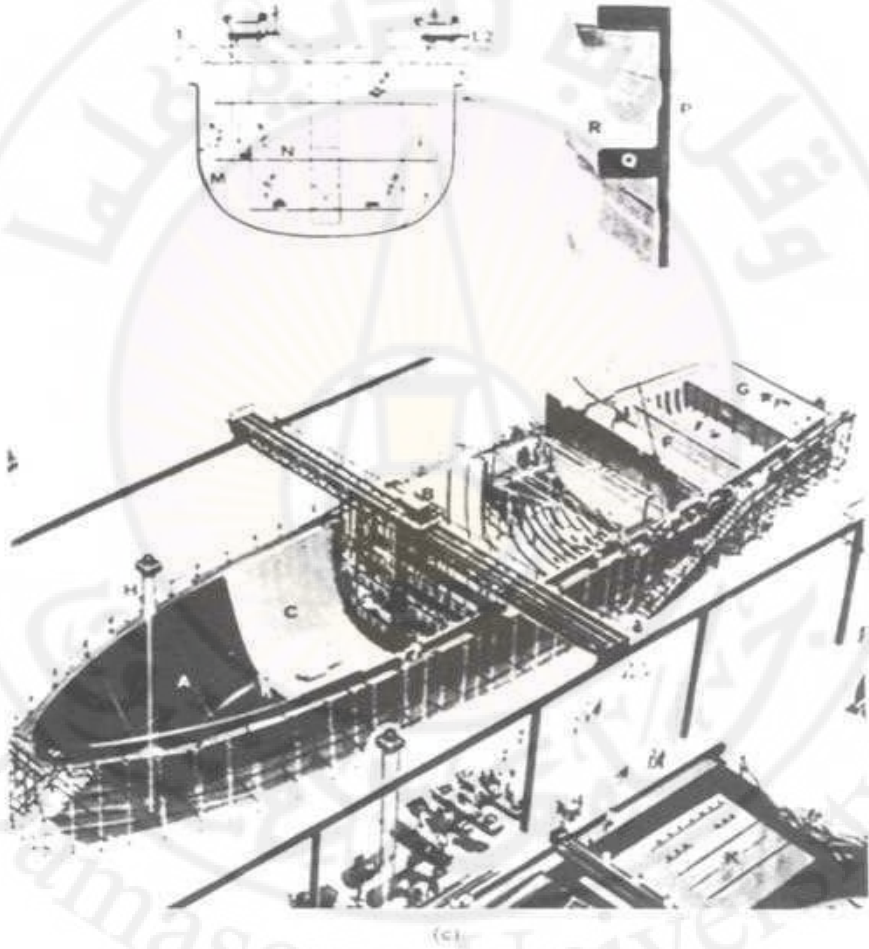
- كثافة منخفضة.
- سهولة قولبتها إلى شكل معقد.
- غير قابلة للمغنط.
- مقاومة جيدة للإهتراء والانساخ بماء البحر.
- مقاومة جيدة للتعب والتشقق الناتج عن إجهاد التآكل.

يعتمد على البلاستيك المقوى بألياف الزجاج (GRP) كثيراً في تطبيقات النقل البحري والأرضي. تبنى السفن الكبيرة من الفولاذ إلا أن أكثر من 80% من السفن البحرية ذات الطول أقل من 40m مصنوعة من (GRP)، بسبب أن استخدام هذه المواد لتصنيع السفن الصغيرة أقل كلفة نسبياً، كما أنها تحقق متطلب خفة الوزن وهي أسهل بالصيانة، إضافةً لذلك إن الموصفات المغناطيسية الكهربائية والحرارية لمادة (GRP) مفضلة على مثيلاتها للفولاذ.

نستعرض كمثال كاسحات الألغام التي يجب أن تكون غير مغناطيسية بحيث يمكنها تجنب تفعيل الألغام المغناطيسية، يصنع عادةً هذا النوع من السفن بطريقة القولية بالمد اليدوي أو المؤتمت باستخدام راتنج البوليستر الذي يتصلب على البارد والألياف الزجاجية نوع E، مع أنثى قالب فولاذي مفتوح .

يتم تحضير وجه القالب بصقله وطلائه بعامل فصل وبمادة الوجه من الإيبوكسي. يتم وضع الليف الزجاجي على القالب وغالباً على شكل تسلسل من الطبقات من الحصائر المقطعة المنسوجة والصفائح أحادية الاتجاه. إن سماكة الطبقة المستخدمة مساوية تقريباً إلى 30-50mm وذلك للسفن متوسطة الحجم، مثل كاسحة الألغام ذات الطول m 40. إن هذه السماكة كبيرة جداً لإجراء عملية التوضع والتشريب بالراتنج بسهولة بالطرق اليدوية، تستخدم عادةً تجهيزات نصف مؤتمتة لخطوط التصنيع وهي موضحة في الشكل (4-12). يتم نسج ترتيبية الألياف المتوضعة، ومزجها مع الراتنج والوسيط الكيميائي

وضخ المزيج لأجهزة التشريب الدوارة بواسطة القناطر المتحركة، وزن الطبقة المتوضعة حوالي $2\text{Kg}/\text{m}^2$ ، يمكن باستخدام هذه التجهيزات الترطيب بسرعة لهذه الطبقة بشكل كامل، يستغرق إنشاء مثل هذه السفينة بهذه الأبعاد حوالي خمسة أسابيع.



الشكل (12-4) بناء السفن من المواد المركبة باستخدام القناطر.

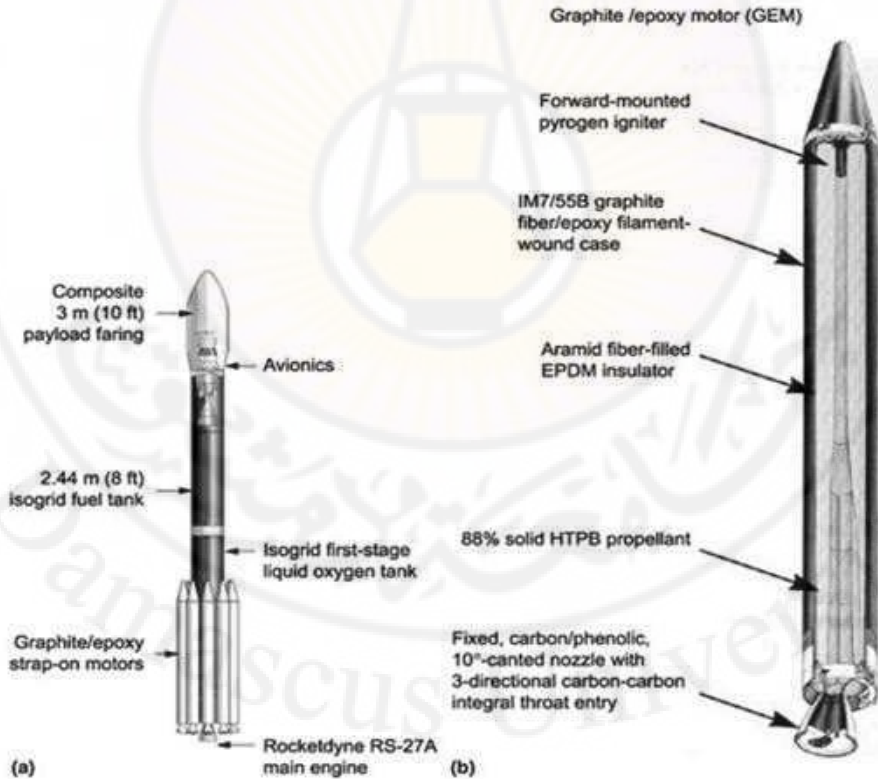
12-4- الاستخدامات في الفضاء: Space Applications

إن التوفير في الوزن ذو أهمية حاسمة في ميدان البنى الفضائية، نظراً إلى الكلفة الهائلة التي يستلزمها رفع أية بنية من الأرض إلى الفضاء الخارجي. وهكذا نرى أن المواد

المركبة تلعب دوراً إلزامياً في كل البنى الفضائية الموجودة فعلياً، وستلعب المواد المركبة دوراً أكبر في المستقبل مع تطوير تطبيقات جديدة.

يمكن تكييف المواد المركبة المكونة من الإيبوكسي/غرافيت بحيث يصبح معامل التمدد الحراري فيها معدوماً، وفي هذا فائدة كبيرة للهوائيات الضخمة التي يجب عليها أن تمر إلى داخل أشعة الشمس وإلى خارجها مع الحفاظ على ثبات أبعادها من دقة تعيين الإشارة. مثال ذلك تستخدم عوارض هيكل من الإيبوكسي/غرافيت لحفظ توازن مقرب هبل الفضائي ودعمه (Hubble Space Telescope).

استخدمت المواد المركبة في الأقمار الصناعية وفي الصواريخ المستخدمة لإرسال الأقمار الصناعية إلى مدارها الشكل (5-12).



الشكل (5-12) الصاروخ ديلتا II .

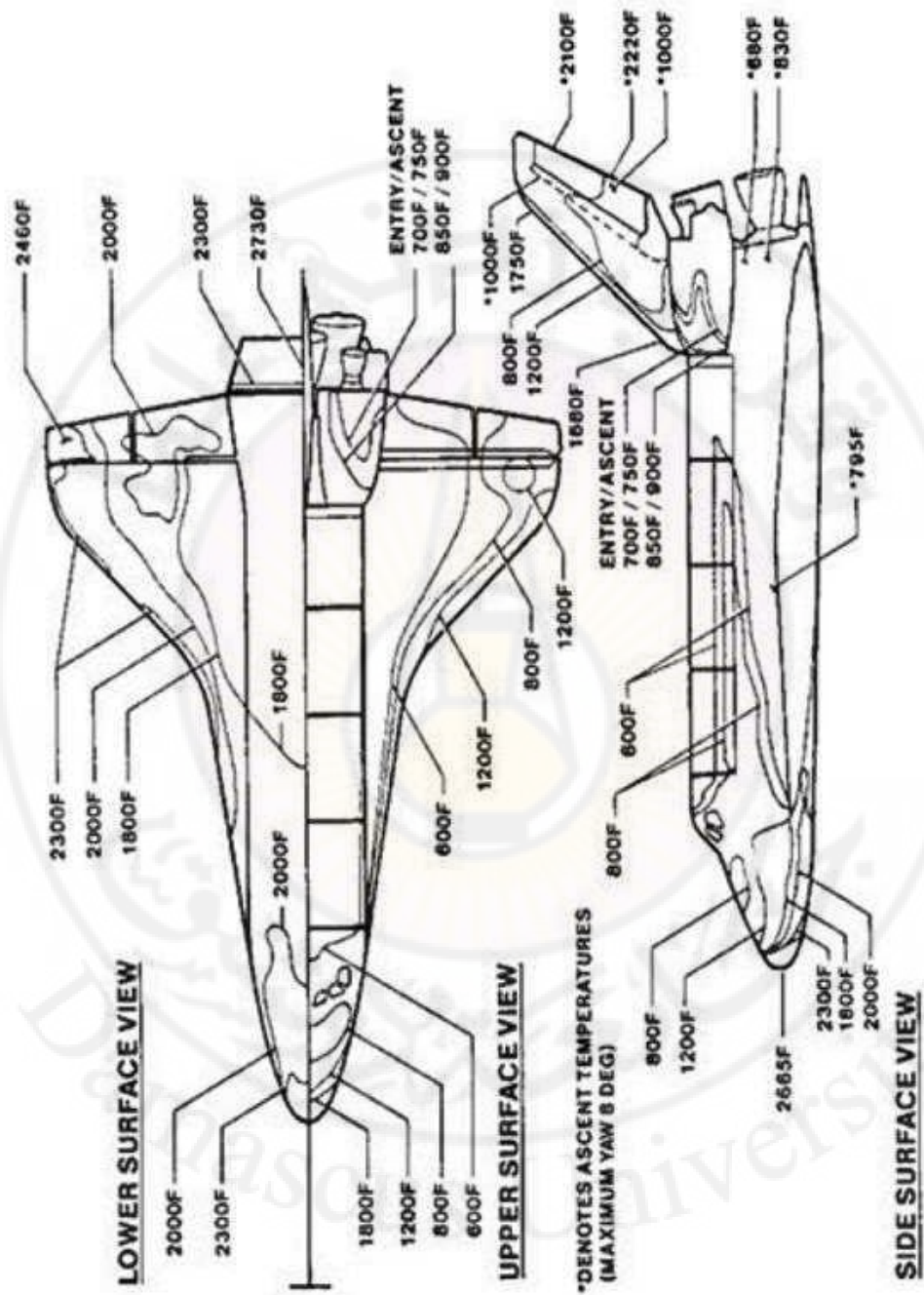
(a) يبين الصاروخ الصلب مربوط على محركات غرافيت/إيبوكسي.

(b) يبين الأجزاء المختلفة للصاروخ.

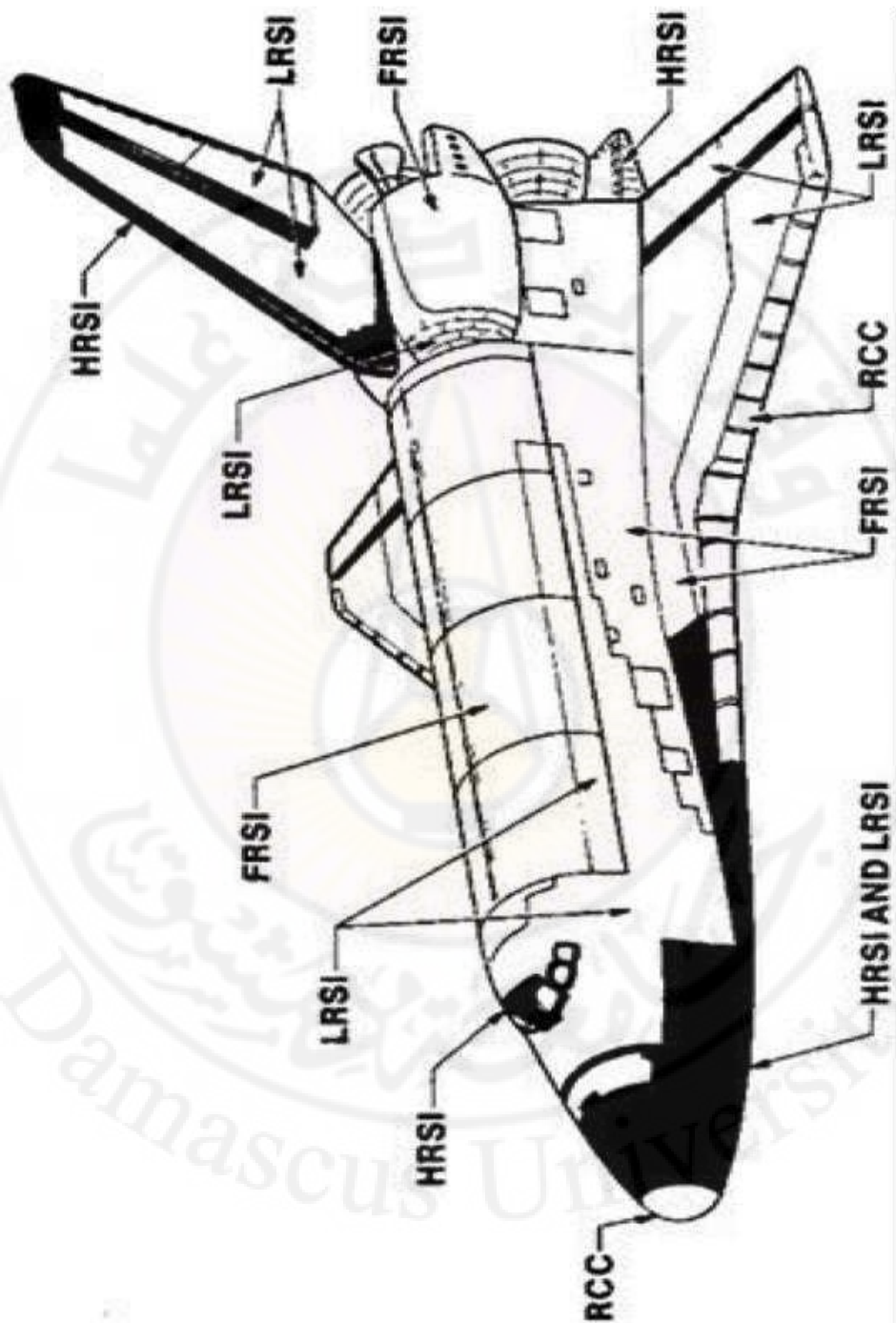
أفضل مثال على استخدام المواد المركبة بالفضاء هو Space Shuttle. حيث يكمن النجاح في استخدام Space Shuttle في تطوير نظام حماية حرارية ممكن استخدامه لعدد من المرات (Thermal Protection System (TPS) وهذا النظام يمكن استخدامه حتى 100 سفرة للـ Shuttle. يتألف نظام الحماية من آلاف البلاطات السيراميكية التي تحمي Space Shuttle أثناء عودته من المدار ودخوله المجال الجوي الأرضي.

يبين الشكل (6-12) Space Shuttle ودرجات الحرارة التي يصل إليها هيكله خلال عودته ودخوله المجال الجوي الأرضي.

خلال عودة Space Shuttle ودخوله المجال الجوي الأرضي تصل درجة حرارة سطحه إلى 1260°C ، حيث تستخدم البلاطات السيراميكية. يتعرض أنف Space Shuttle وحواف الأجنحة لدرجة حرارة تصل إلى 1650°C حيث يجب استخدام مواد مركبة مقواة من الكربون/كربون (RCC). يبين الشكل (7-12) المواد المستخدمة في المناطق المختلفة من Space Shuttle.



الشكل (6-12) الخطوط الحرارية التي يصل لها هيكل Space Shuttle أثناء عودته ودخوله المجال الجوي الأرضي.



الشكل (7-12) المواد المستخدمة للحماية الحرارية في المناطق المختلفة من Space Shuttle.

والجدول التالي يبين المواد المستخدمة للحماية الحرارية وأماكن استخدامها في Space Shuttle، حيث استخدم أكثر من 30000 بلاطة سيراميكية في نظام الحماية الحرارية. وكذلك حوالي 44 لوحاً وقلنسوة الأنف من المواد المركبة المقواة كربون/كربون و 333m^2 من لبادات عازلة للسطح قابلة لإعادة الاستخدام.

Material generic name	Material temperature capability, °C (°F) ^(a)	Material composition	Areas of orbiter
Reinforced carbon-carbon (RCC)	to 1650 (3000)	Pyrolyzed carbon-carbon, coated with SiC	Nose cone, wing leading edges, forward external tank separation panel
High-temperature reusable surface insulation (HRSI)	650–1260 (1200–2300)	SiO ₂ tiles, borosilicate glass coating with SiB ₄ added	Lower surfaces and sides, tail leading and trailing edges, tiles behind RCC
Low-temperature reusable surface insulation (LRSI)	400–650 (750–1200)	SiO ₂ tiles, borosilicate glass coating	Upper wing surfaces, tail surfaces, upper vehicle sides, OMS ^(b) pods
Felt reusable surface insulation (FRSI)	to 400 (750)	Nylon felt, silicone rubber coating	Wing upper surface, upper sides, cargo bay doors, sides of OMS ^(b) pods

(a) 100 missions; higher temperatures are acceptable for a single mission.

(b) Orbital maneuvering system (OMS) engines

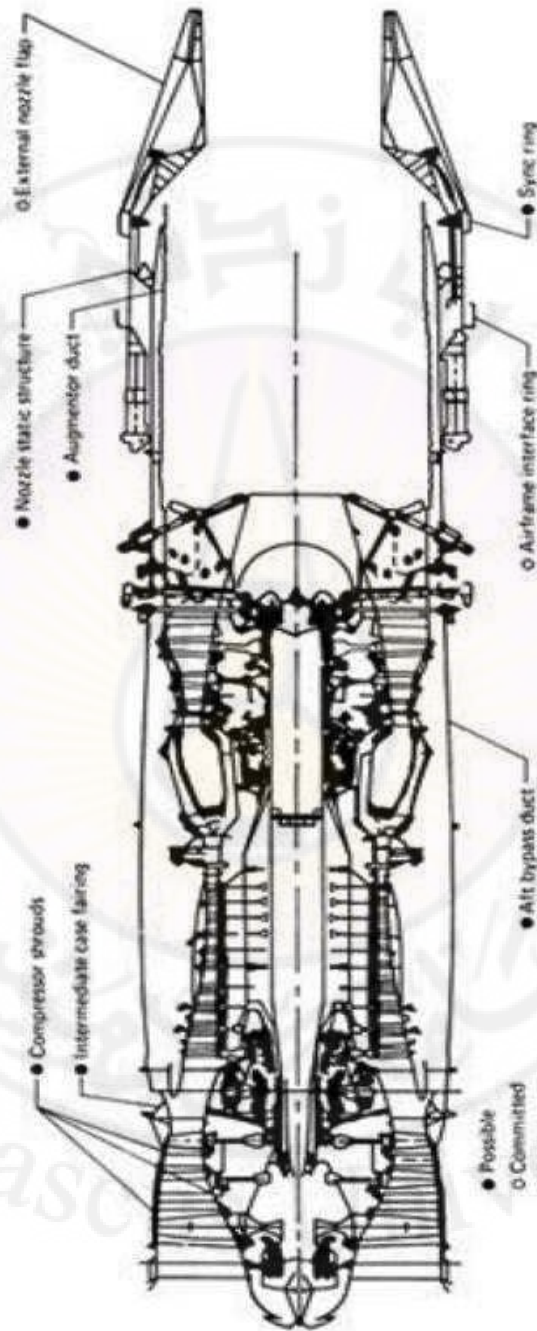
5-12 - الاستخدامات في الطائرات: Airplanes Applications

تقوم في الوقت الراهن كل شركات الطيران بتطوير منتجات مصنوعة من المواد المركبة بالألياف. وقد تطور استخدام المواد المركبة عبر عدة مراحل منذ ستينات القرن العشرين. في البداية بنيت قطع للإيضاح (demonstration)، لأن الهدف كان القيام بخطوة أولى تجاه التعلم في مجال بنى المواد المركبة. في المرحلة الثانية، كانت قطع الاستبدال، حيث كان جزء من الهدف المتوخى هو أن تخضع لاختبار - طيران قطعة تم تصميمها لاستبدال قطعة معدنية على طائرة موجودة.

في المرحلة الثالثة، كانت قطع الإنتاج الحالية، حيث كانت تصمم الطائرة منذ البدء على أساس أن تحتوي قطعاً متنوعة مصنوعة من المواد المركبة المقواة بالألياف. أما المرحلة الأخيرة، فهي مرحلة الطائرة الكاملة من المواد المركبة التي حلم العديد من الأشخاص بنائها منذ سنوات. لقد تم الاقتراب من هذا الهدف الأخير بالأسلوب المتأني المحافظ متعدد المراحل الذي شرحنا للتو خطوطه العريضة. لقد تم بناء قاعدة تقانية وتصنيعية حقيقية متينة للمواد المركبة.

سوف تبنى الطائرات في المستقبل القريب بشكل تكون فيه نسبة عالية من مكوناتها مصنوعة من المواد المركبة، وعندها فقط سوف يتم تحقيق الفوائد الكاملة لإنقاص الوزن، لأن جميع الأجزاء في الطائرة تتأثر تقريباً بأجزاء أخرى أو تدعمها، ومن هنا يحدث تقليل وزن جزء واحد في الطائرة أثراً تصاعدياً يمتد ليشمل كل الطائرة. وهناك انعكاسات متعددة لتخفيض الوزن بشكل معتبر. إذ يمكن أن تتضاعف الحمولة أو يزداد المدى أو تتحسن كفاءة التشغيل أو يحدث نوع من التجميع بين بعض هذه العناصر وعوامل أخرى.

يعتبر تأثير استخدام المواد المركبة في أداء المحركات النفثة كبيراً للغاية الشكل (8-12). يمكن في الوقت الحاضر مع السبائك المعدنية المتنوعة تحقيق نسب قوة دفع - إلى - الوزن تعادل 5 إلى 1، ويمكن أن يؤدي استعمال المواد البلاستيكية والمعدنية المقواة بالألياف إلى الوصول إلى نسب عالية حتى درجة 16 إلى 1 وأخيراً، مع المواد المركبة ذات ألياف الغرافيت المتقدمة تبدو نسب قوة الدفع - إلى - الوزن من مرتبة 40

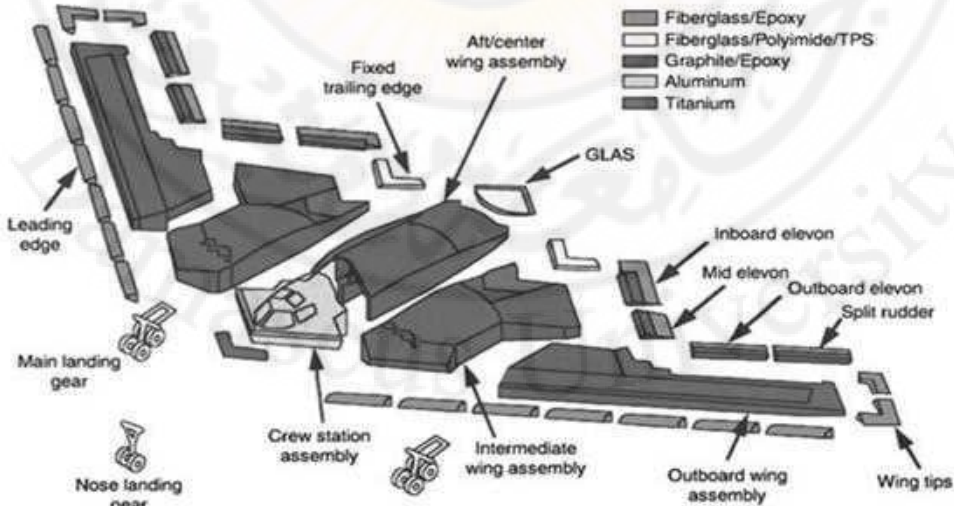


الشكل (8-12) التطبيقات المستخدمة والمحتملة الاستخدام للأجزاء من ألياف الغرافيت PRM-15 البولياميد في المحرك النفاث طراز PW1120 .

إلى 1 ممكنة. يجب أن يؤدي ازدياد مؤشر الأداء لنسبة قوة الدفع - إلى - الوزن بمقدار ثمانية أضعاف إلى توفير كبير في وزن الطائرة .

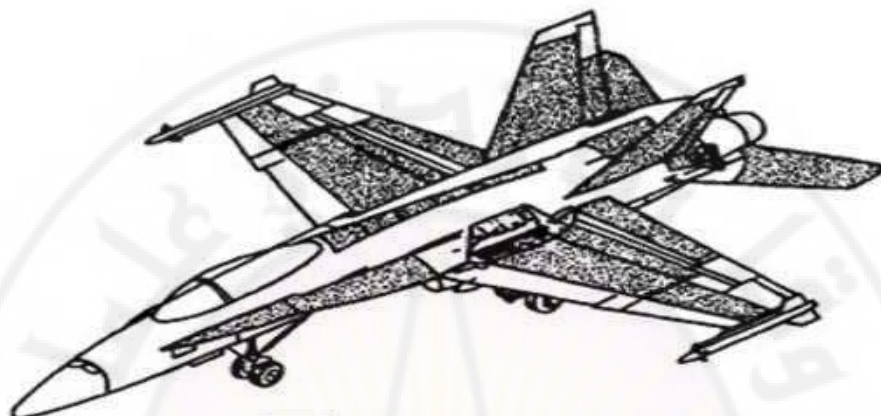
لقد ظهرت عبر السنين مشاريع متنوعة في مجال الطائرات الحربية، وهي أكثر بكثير من أن نستطيع تلخيصها. لذلك سوف نكتفي بذكر بعض هذه التطبيقات.

مثال طائرة الشبح ب-2 قاذفة القنابل الميمنة بالشكل (9-12) وهي من صناعة شركة نورثروب غرومان. تتكون جميع الأجزاء الخارجية لهذه الطائرة من مواد مركبة متنوعة، والسبب في ذلك هو ميزات هذه المواد الممتازة للرادار و/أو القدرة على صنعها بأشكال تقلل بشكل طبيعي البصمة الرادارية للطائرة. ولكن تفاصيل هذا الأمر ليست متوفرة للنشر، وينطبق نفس الشيء على طائرة الشبح F-117A المقاتلة التي تصنعها شركة لوكهيد مارتين.



الشكل (9-12) الطائرة القاذفة B-2 المطورة التي بنيت من المواد المركبة المطورة.

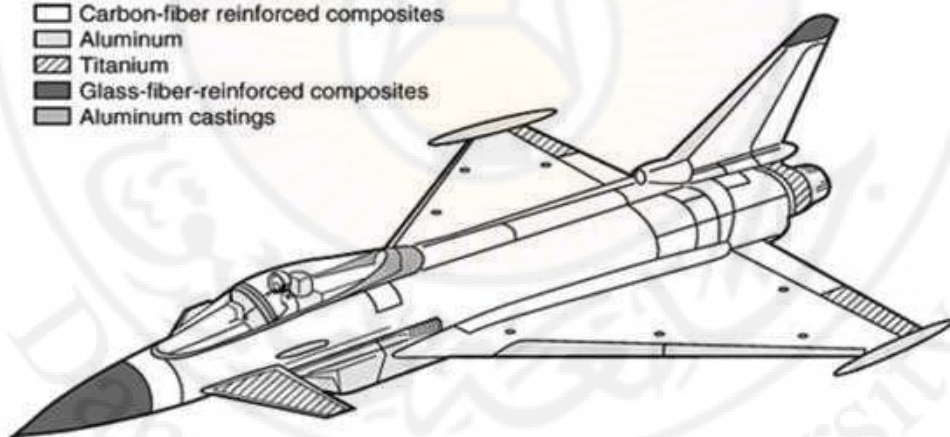
تبين الأشكال (12-10) و (12-11) و (12-12) بعض أنواع الطائرات الحربية وأماكن استخدام المواد المختلفة في هيكليها.



**Carbon fiber reinforced epoxy,
10.3% structural weight**

الشكل (12-10) استخدام المواد المركبة في الطائرة F-18 .

- ☐ Carbon-fiber reinforced composites
- ☐ Aluminum
- ☐ Titanium
- ☐ Glass-fiber-reinforced composites
- ☐ Aluminum castings



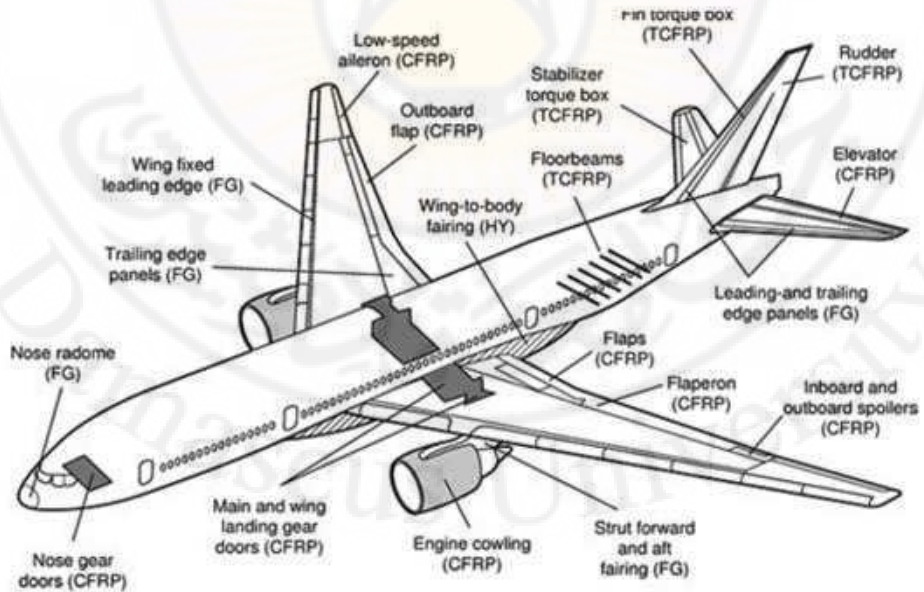
الشكل (12-11) استخدام المواد المركبة في الطائرة (Eurofighter) Typhoon.

أما في الطائرات المدنية فقد استخدمت المواد المركبة فيها بشكل واسع وأفضل مثال على ذلك طائرة بوينغ 777 الضخمة مزدوجة المحرك ذات الجسم العريض التي دخلت الخدمة في عام 1995 الشكل (12-13)، وقد استعملت فيها المواد المركبة أكثر من أية طائرة بوينغ تجارية سابقة، إذ استخدم حوالي 8400 Kg من المواد المركبة في كل

طائرة ضمن كل من البنية الأولية والبنية الثانوية، مما شكل بشكل إجمالي 10% من الوزن الإنشائي.



الشكل (12-12) استخدام المواد المركبة في الطائرة V-22 .



الشكل (12-13) استخدام المواد المركبة في الطائرة المدنية بوينغ 777.

وفيما يلي دراسة بعض التطبيقات المستخدمة في مجال الطيران.

1-5-12 شفرة مروحة الحوامة: Helicopter rotor blade

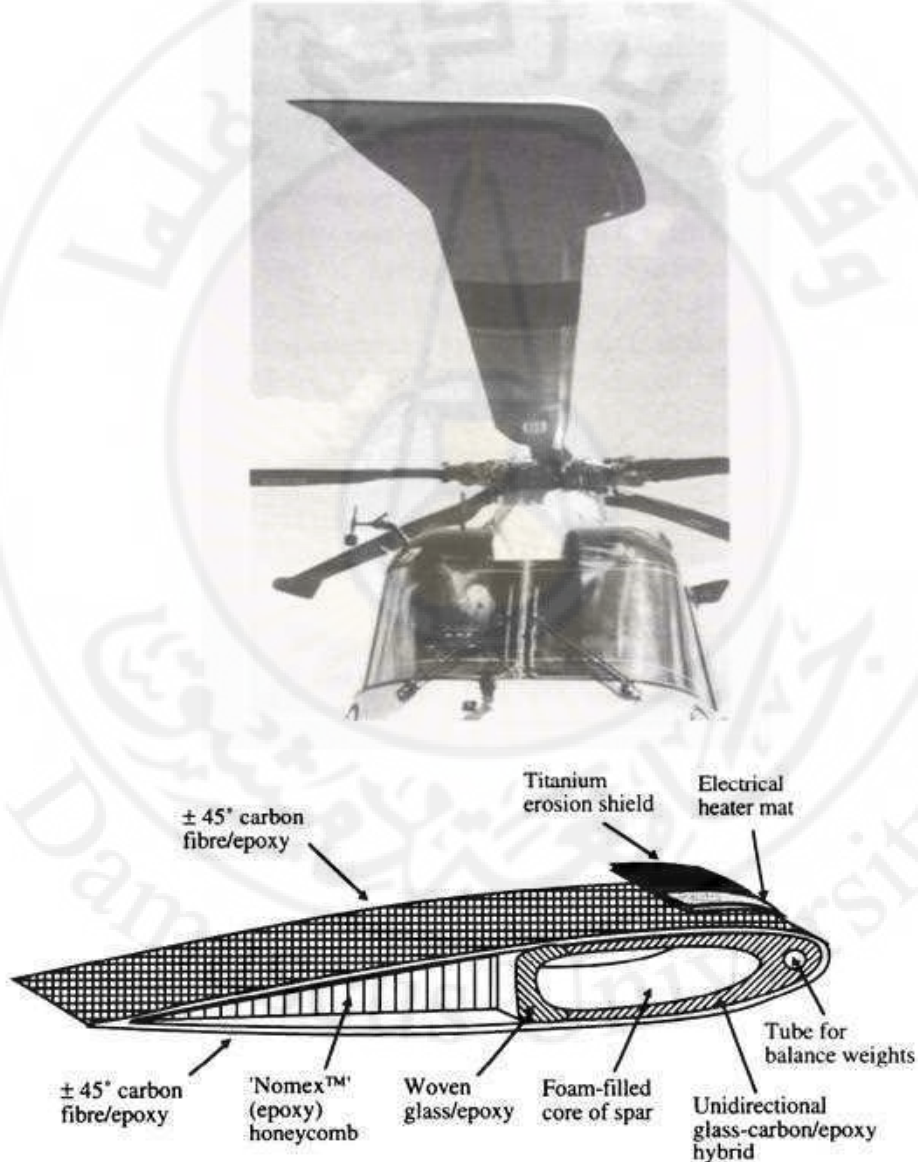
متطلبات مادة شفرة مروحة الحوامة هي التالية:

- عتية جساءة عالية. (معامل يونغ)
- جساءة التواء عالية . (معامل قص)
- كثافة قليلة.
- مقاومة تعب جيدة.

تؤمن الشفرة الدوارة للحوامة مثلاً جيداً للجزء الذي يتطلب جساءة ممتازة، تولد الشفرة سطحاً هوائياً رافع يولد قوة رفع الحوامة، يبين الشكل (12-14) الشكل النموذجي للشفرة. استخدمت المواد المركبة في الشفرات الدوارة وفي أجزاء أخرى من الحوامة منذ مطلع الستينيات، الأولويات التي جذبت استخدام المواد المركبة هي المقاومة الجيدة للتعب و الجساءة الخاصة. تم تنفيذ الاستخدام الكامل من وجهة نظر مواصفات المرونة وعلاقتها بالتحكم بهندسة توزع الألياف وتحسن التصميم الأيروديناميكي للشفرة.

توجد مشكلة خاصة في شفرات الحوامة وهي وجود كلتا حركتي التقدم والدوران. إن سرعة تقدم الطائرة بحدود 100 ms^{-1} والسرعة الخطية للشفرة الدوارة عند طرفها أكثر بقليل من 200 ms^{-1} . إن سرعة الهواء على الشفرة خلال حركة التقدم أكبر من السرعة خلال حركة الرجوع للخلف. إذا كانت زاوية انحدار الشفرة نفسها في كلتا الحالتين التقدم والتراجع، عندئذ ستتغير قوى الرفع على جانبي الطائرة بشكل كبير مما يؤدي إلى قلب هذه الطائرة. تم تعويض هذا التأثير بتعديل زاوية الانحدار لكل شفرة خلال كل دوران. كما استخدمت تغييرات إضافية في زاوية الانحدار لتعديل الاتجاه خلال الانحناء (المناورة). لذلك من المهم جداً أن تتمتع الشفرات بجساءة التواء كافية، حتى تتجاوب بسرعة لتغيرات زاوية الانحدار المطبقة على صرة الدوران. يجب أن تكون أيضاً عتية جساءة الشفرة مرتفعة، حتى لا يتأخر طرف الشفرة بالتجاوب خلال الدوران أو أن يرفرف بشكل زائد تحت تأثير وزنه. إن هذه الاحتياجات للشفرة مشابهة لاحتياجات الدرافيل إلا أنه تمثل الشفرة تعقيداً أكبر بكثير وذلك من حيث شكل مقطعها العرضي، وتعرضها للحمولة وأداء التعب. يبين الشكل (12-14) الشكل النموذجي لبناء مقطع الشفرة. يتم

تأمين جساءة الالتواء الضرورية من خلال توزيع ألياف الكربون بزاوية ($\pm 45^\circ$) بالنسبة لمحور الشفرة. تؤمن ألياف الكربون والألياف الزجاجية المتوضعة بشكل موازي لمحور الشفرة عتبة الجساءة الضرورية من أجل التقليل من التأخر بالتجاوب وترفف النهاية إلى الحدود الدنيا. يحقق هذا البناء أيضاً مقاومة ممتازة للتعب.



الشكل (12-14) بنية شفرة مروحة الحوامة.

2-5-12-جسم حجرة احتراق توربين غازي: Gas turbine combustor can

المتطلبات الأساسية لمادة جسم حجرة احتراق توربين غازي هي التالية:

- متانة في درجة حرارة مرتفعة.
- مقاومة عالية للصدمة الحرارية.
- كثافة منخفضة.
- مقاومة جيدة للأكسدة.
- استقرار حتى درجة حرارة 1450°C .

تتعرض عادة أجزاء هذه الحجرة الموجودة بالقرب من المنفذ الحار للتوربين الغازي لدرجات الحرارة المرتفعة جداً وإلى ظروف صدمات حرارية شديدة. يبين الشكل (12-15) حجرة الاحتراق. يتم التغذية بمزيج الوقود والهواء من خلال الفتحة الرئيسية العلوية، ويتم ضخ هواء مضغوط عبر المجموعة الأولى من الفتحات الجانبية، يمكن أن تصل درجة الحرارة في محيط اللهب إلى قيمة 1500°C ، مما يؤدي إلى تسخين سريع لجوانب الحجرة إلى درجة حرارة قريبة من هذه الدرجة. تتصهر معظم لمعادن في درجة الحرارة هذه أو تصبح لينة جداً، أما المعادن الحرارية مثل الموليبدنيوم فإنها تتعرض للأكسدة السريعة، تمتلك بعض المواد السيراميكية متانة جيدة، ومقاومة جيدة للتأكسد في درجة الحرارة هذه، ولكنها قد تتعرض للتشقق بسبب الاجهادات المتولدة بسبب التدرج الحراري. تم تصنيع الحجرة المبينة بالشكل (12-15) من طبقات SiC (بسمائة $200\mu\text{m}$)، مفصول بعضها عن بعض بطبقة رقيقة وسيطة من الغرافيت-طبقات داخلية غرافيتية-بسمائة حوالي $(7\mu\text{m})$. تم الحصول على ازدياد ملحوظ في الجساءة والمقاومة للصدمات الحرارية بسبب وجود المناطق البينية (سطوح التلامس)، التي تؤمن انعكاس أي تشققات عبر السماكة.



الشكل (12-15) صورة فوتوغرافية لحجرة احتراق توربين غازي.

3-5-12- مكابح الطائرات : Aircrafts brakes

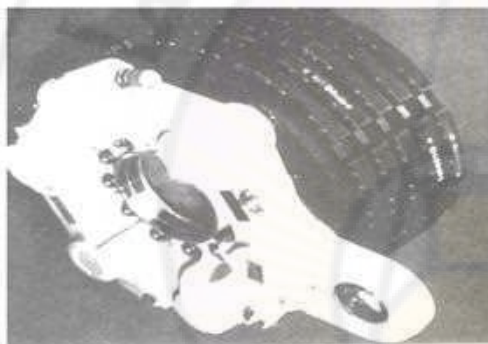
يجب أن يتوفر في مادة مكابح الطائرات المتطلبات التالية:

- استقرار حراري جيد ومقاومة للصدمات الحرارية.
- كثافة قليلة.
- سعة حرارية عالية.
- ناقلية حرارية عالية.
- خواص احتكاكية جيدة.
- مقاومة جيدة للاهتراء.
- متانة جيدة بدرجات الحرارة المرتفعة.

تتطلب مكابح الطائرات مجموعة من المواصفات الخاصة، حيث يقع على عاتق مكابح الطائرة امتصاص كمية هائلة من الطاقة خلال زمن قصير دون انهيار وذلك خلال الهبوط الاضطراري أو عند الإلغاء المفاجئ لعملية الإقلاع. يعتمد التصميم النموذجي لآلية الفرملة على مجموعة من الأقراص الدوارة وأخرى ثابتة الشكل (16-12). يمكن أن يؤدي الاحتكاك بين هذه الأقراص إلى رفع درجة حرارة الأقراص إلى درجة حرارة وسطية بحدود 1500°C وتصل درجة حرارة السطح الحراري إلى حدود 3000°C . لذلك يجب أن تكون مادة الأقراص ذات مقاومة ممتازة للصدمات الحرارية ومتانة كبيرة بدرجات الحرارة المرتفعة، يجب أن تتمتع مادة الأقراص بميزة الناقلية الحرارية الجيدة من أجل تجنب التسخين الزائد لسطوح القرص. تتمتع مادة الكربون بالناقلية الحرارية الجيدة وبلاستقرار بدرجات الحرارة المرتفعة لذلك يشكل الغرافيت الصلب مادة منافسة خاصة كما أنه أرخص بكثير من المادة المركبة كربون/كربون. إلا أنه تتفوق المادة المركبة بالجساءة والمتانة على الغرافيت، تصنع الأقراص باستخدام تقنيات التخلخل المشار إليها في الفصل السابق.

وزن فرامل الطائرة وأهميتها استثنائية، يكون عادةً في الطائرة المدنية الكبيرة ثمانين مكابح، يصل وزن المكابح إلى أكثر من 1000Kg وذلك إذا تم تصنيع هذه المكابح من أقراص فولاذية مقابل أقراص احتكاكية. أما في حال صنعت هذه المكابح من مادة مركبة

كربون/كربون فسوف يكون وزنها أقل من 700Kg. يشكل النقص الحاصل في الوزن - عدة مئات من الكيلو غرامات- وفراً كبيراً بالوقود على مدار عمر الطائرة. تستخدم حالياً الفرامل المصنوعة من المادة المركبة كربون/كربون في معظم الطائرات الحربية وكذلك في الطائرات المدنية، إن طائرة الكونكورد مزودة بهذه المكابح وأيضاً طائرات البوينغ 777 و 767 وعدة موديلات من الأيروباص. العامل الأساسي الذي يثبط من استخدام المواد المركبة كربون/كربون هو قلة مقاومتها للأكسدة وذلك في التطبيقات التي يتم فيها التعرض المطول لدرجات الحرارة المرتفعة، تستمر الأبحاث على تطوير طلاءات واقية مناسبة للاستخدام.



الشكل (16-12) صورة فوتوغرافية لمكابح الطائرة

الجدول التالي يبين مقارنة بين تقديرات العمر للمكابح المصنعة من الفولاذ ومكابح كربون/كربون.

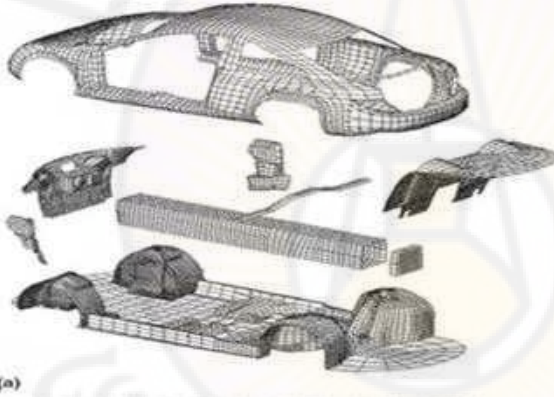
Aircraft	Estimated Loading	
	Carbon-carbon	Steel
B-747	2000	800
B-757	3000	1500

بينما الجدول التالي يبين مقارنة الوفرة في الوزن عند استخدام مكابح كربون/كربون بالمقارنة مع المكابح المصنعة من الفولاذ.

Aircraft	Weight Saving (Kg)
B-747	635
B-757	272
B-767	408

6-12- الاستخدامات في وسائط النقل: Transport Applications

يجب على تطبيقات المواد المركبة في العربات أن تحقق السعر المنخفض ومعدل الإنتاج المرتفع. وتعتبر هذه الثنائية في زوج العوامل الاقتصادية المعهود المتمثل في الإنتاج ذي الكلفة المنخفضة المقترن بالمعدل العالي للإنتاج أمراً أساسياً للمحافظة على الكلفة الحالية للمركبات مع معدلات الإنتاج المرتفعة الحالية، وبنفس الوقت يتمثل في زيادة المسافة المقطوعة مقابل الوقود المصروف. لقد جرت محاولات عديدة لإدخال المواد المركبة ضمن إنتاج العربات والشكل (12-17) يبين السيارة الكهربائية المصنعة من المواد المركبة .



الشكل (12-17) السيارة
الكهربائية المصنعة من المواد
المركبة .

(a) القطع المكونة لمجمع
الهيكل.

(b) يوضح خفة وزن الهيكل من
المواد المركبة.



(b)

تتمتع بعض قطع السيارات بمميزات فريدة وسجلات إنتاج مجربة من حيث الكلفة المنخفضة ومعدلات الإنتاج العالية، إضافة إلى التوفير الكبير في الوزن الذي يستطيع أن يفي بمتطلبات إنقاص كتلة الجسم لتحقيق الأهداف الاقتصادية لتوفير الوقود.

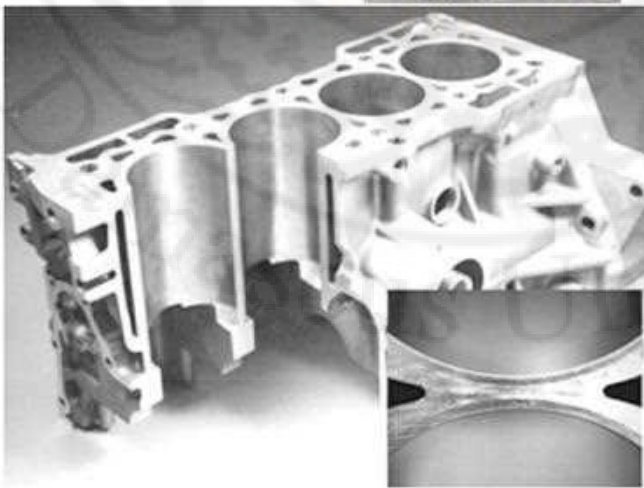
تبين الأشكال (12-18) و (12-19) و (12-20) بعض القطع من المواد المركبة المعدنية المستخدمة في محركات السيارات مما حسن من الأداء للمحرك وخفف الوزن وتحسن المردود وقلل من استهلاك الوقود.



الشكل (12-18) أجزاء
المكبج المصنع من المواد
المركبة ذات الأساس من
الألمنيوم.



الشكل (12-19) يبين ذراع
التوصيل المصنع من المواد
المركبة ذات الأساس من
الألمنيوم. وكذلك الصمامات
المصنعة من المادة المركبة
من خلانط التيتانيوم المقواة
بألياف مقطعة.



الشكل (12-20) كتلة
اسطوانات محرك الإحتراق
الداخلي مسبوك من
الألمنيوم مع بطانة
اسطوانات من المواد المركبة
ذات الأساس المعنني.

1-6-12-مكبس محرك ديزل: Diesel engine piston

يجب أن تتمتع المادة المصنوع منها مكبس محرك الديزل بالخواص التالية:

- مقاومة جيدة للاهتراء.
- استقرار حراري جيد.
- متانة مرتفعة في درجات حرارة عالية.
- ناقلية حرارية جيدة.

يمثل هذا التطبيق نجاحاً للاستخدام الصناعي للمواد المركبة ذات الأساس المعدني MMCs. لقد زاد الإنتاج في اليابان خلال السنوات السابقة حيث يتراوح الإنتاج حالياً بحوالي عدة ملايين من الوحدات سنوياً، استخدمت مدخلات من النيكل حديد الصب ($Ni-resist^{TM}$) تم إدخال هذه المادة على مناطق حلقات المكبس المصنوع من الألمنيوم بهدف منع الالتحام بسبب الحرارة والضغط لإسوار المكبس مع أخدود الإسوار العلوي وجوف الاسطوانة. تعيق هذه المادة المقحمة من الانتشار الحراري، وتزيد من الوزن والاهتراء. استبدلت شركة تويوتا للسيارات عام 1983 مادة النيكل بوضع مادة مدخلة ذات ألياف قصيرة من $5\% Al_2O_3$ مما أدى إلى إنقاص الوزن بمعدل 5-10%. تم تحقيق عملية التقوية هذه باستخدام الصب تحت الضغط المباشر (Squeeze Casting) إلى داخل مسبقة التشكيل من الألومينا لإنتاج أجزاء منتقاة التقوية الشكل (12-21)، بينت بيانات الاختبار انخفاض الإهتراء بمقدار أربع مرات وتضاعف إجهاد الالتحام بسبب الحرارة والضغط مقارنةً مع خلأئط الألمنيوم غير المقوى. بالإضافة إلى أن النقل الحراري أكبر بأربع مرات من مقحمت النيكل ($Ni-resist^{TM}$) المستخدمة بالتقنية السابقة.

أحد العوامل الهامة هو عمر التعب الحراري، يحدد عمر التعب الحراري بظهور التشقق بين أخدود الإسوار وجسم المكبس، أو بعدم استقرار الأبعاد، تتفوق المقحمت من Al_2O_3 بالأداء على كلا ($Ni-resist^{TM}$) والخليطة الأساس. تشكل الألياف المحتواة توازن بين تحسن مقاومة الاهتراء ومقاومة الالتحام، بالإضافة إلى القابلية الجيدة للتشغيل بالمقارنة مع النيكل، وتدهور طفيف مقبول في متانة التعب وفي الناقلية الحرارية مقارنةً

بخليطة الألمنيوم غير المقوى، طورت كذلك مكابس مقواة بشكل متجانس مصنوعة بطريقة الصب من المادة المركبة Al/20%SiCp.



الشكل (21-12) المكبس
ويظهر عليه منطقة
التقوية.

12-7- الاستخدامات في الرياضة: Sport Applications

تشق بعض المواد المركبة طريقها للاستخدام في التجهيزات الرياضية بسرعة بالغة، وذلك في حال كانت التكاليف تحت السيطرة أو لم تكن قضية. على سبيل المثال، أنتجت صنارات صيد السمك المصنعة من ألياف زجاجية منذ أربعينيات القرن العشرين، وأصبحت فعلياً الصنارات العيارية. كذلك أصبحت منتجات أخرى عديدة مكونة من الألياف الزجاجية شائعة الانتشار مثل: القوارب، مضارب التنس، مضارب الهوكي، والمزالج، وألواح ركوب الأمواج، والدراجات الهوائية.

وتستعمل نظم أعلى ثمناً من ألياف إيبوكسي بورن وإيبوكسي -غرافيت في نوادي الغولف ومضارب التنس على الرغم من كلفتها العالية، لأن الزبائن المتنافسين بحدة راضون تماماً عن ذلك، بل إنهم متلهفون حتى لإنفاق المزيد من المال على نظام ألياف "فريدة" عسى أن تمنحهم فارق تفوق في لعبتهم. وفيما يلي أمثلة عن استخدامات المواد المركبة في التجهيزات الرياضية.

1-7-12- دراجة السباق: Racing bicycle

متطلبات مادة تصنيع دراجة السباق هي التالية:

- جساءة كبيرة.
- مقاومة تعب جيدة.
- كثافة منخفضة.

استخدمت تجارياً لجسم الدراجة كلا المادتين المركبتين DURALCAN والمادة المركبة للفضاء (AMC). استخدمت المادة المركبة DURALCAN التي هي $Al(6061)/10\%Al_2O_3p$ من أجل الدراجة الجبلية "Stumpjumper M₂" المصنعة بواسطة شركة أجزاء الدراجات الخاصة. بينما استخدمت المادة المركبة $Al(2124)/20\%SiCp$ لتصنيع جسم دراجة سباق الرالي وتم اختبار نموذجي الدراجة بنجاح في الميادين الرياضية. يتم تصنيع جسم الدراجة الجبلية بشكل أنبوبي بسماكة جدار $1.5mm \sim$ ، وذلك بطريقة البثق وإعادة الضم تحت الضغط حول قالب التشكيل. يتم بعد ذلك لحام مقاطع الأنبوب باستخدام التقنيات التقليدية للحام بالصهر بطريقة MIG. تستخدم تقنية تصنيع البودرة لتصنيع جسم الدراجة من المادة المركبة AMC، ويتم جمع جسم الدراجة بعملية لصق الأنابيب بطرق اللصق. تمتع كلا التصميمين بمقاومة تعب جيدة ودائمة وذلك بالإضافة إلى الجساءة المتميزة التي تم الوصول إليها، وذلك كنتيجة لزيادة قيمة المعامل ΔK_{III} (فقرة 1-3-9) مقارنةً مع المادة غير المقواة. أظهرت معطيات مقاومة التعب للأنابيب الملحومة أن أداء المادة المركبة بالحبيبات MMCs متفوق على أداء الألمنيوم غير المقوى. يظهر الشكل (12-22) صورة الدراجة "Stumpjumper M₂".



الشكل (12-22) صورة فوتوغرافية لدراجة السباق.

2-7-12- مضرب الغولف: Golf driving club

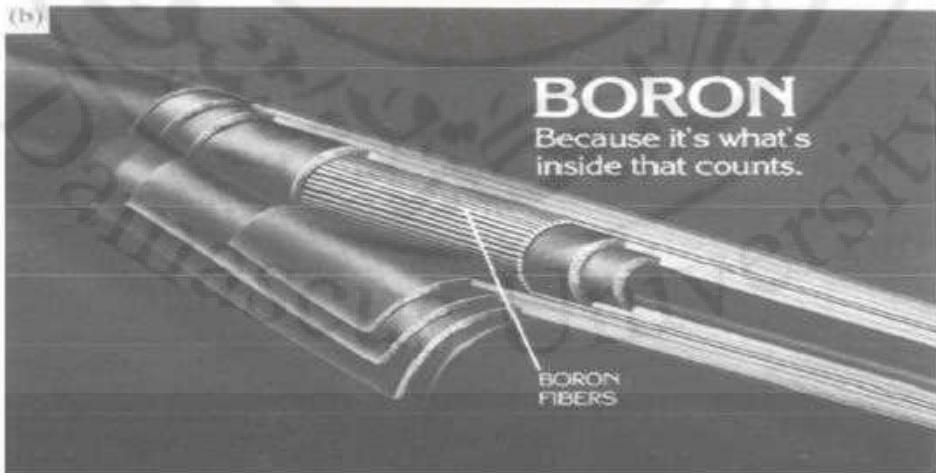
متطلبات مادة تصنيع مضرب الغولف هي التالية:

- عتبة جساءة عالية. (معامل يونغ)
- جساءة التواء عالية . (معامل قص)
- كثافة قليلة.
- متانة كبيرة.

تطلب العديد من التطبيقات في المعدات الرياضية توفر عارضة رقيقة و جاسئة، مثال ذلك قصبات صيد السمك، مضارب التنس، المزاليج، وعصي الغولف. تحتل المواد المركبة ذات الأساس البوليميري مجاًلاً واسعاً في سوق المعدات الرياضية، يبرر سوق المعدات الرياضية الزيادة في كلفة المواد وكلفة تصنيعها عندما تتأمن بالمنتج تحسينات بسيطة في الأداء، تشكل عصا الغولف مثلاً جيداً لسوق تنافسي عند رفع كفاءة الأداء. توجد حاجة لأن يتمتع محور عصا الغولف بالجساءة العالية لمقاومة الانحناء والالتواء. إن جساءة الالتواء المرتفعة مهمة جداً، حيث تؤمن هذه الجساءة عدم دوران المحور تحت تأثير العزم المطبق عليه وذلك عندما يضرب رأس العصا بالكرة. قد يؤدي أي دوران إلى خطأ في اتجاه طيران الكرة. إن المتطلبات الخاصة بجساءة الانحناء أكثر تعقيداً، حيث إن بعض الانحناء للمحور مفيد أثناء الاصطدام مع الكرة حيث قد تزيد الاستقامة اللاحقة من زمن التلامس بين رأس المضرب والكرة مما يزيد من قوة الدفع لانتقال الكرة. إن التصاميم المفضلة هي التصاميم التي يكون فيها رأس المضرب كبيراً وجزع العصا طويلاً ورقيقاً الشكل (a 12-23)، أما في حال كان الجزع ذا قيمة جساءة منخفضة فسوف تتولد لدينا أثناء التلامس مع الكرة إجهادات محورية أكبر وقد يكون خطر التضرر أو التحطم أكبر. مما يستوجب أن تكون المتانة المحورية للمرفق كبيرة.

لتحقيق هذه المتطلبات تم تطوير بعض الألياف الهجينة (التي يستخدم فيها أكثر من نوع من الألياف). كمثال لهذا التصميم البناء النموذجي المبين في الشكل (b 12-23)، حيث يتكون مرفق العصا من عدة طبقات من ألياف الكربون التي تشكل زوايا كبيرة بالنسبة لمحور المرفق، يؤمن هذا التركيب جساءة التواء كبيرة، كما يوجد بعضاً من الرقائق

المحورية مقواة بألياف أحادية الشعيرة من البورن التي لها نفس جساءة الكربون (HM)، ولكن متانتها أكبر انظر الجدول (2-2). تتمتع ألياف البورن بمتانة انضغاط كبيرة، ومقاومة كبيرة للتحدب أكثر من باقي الألياف وذلك بسبب قطرها الكبير ($\sim 100\mu\text{m}$)، تحسن هذه الألياف من متانة التحطم على الشد و تقلل من خطر الانهيار عند تشكل العقد على الجانب المضغوط من الذراع. تبرر هذه المزايا السيئات الناجمة عن الكثافة الكبيرة والكلفة المرتفعة لألياف البورن .



الشكل (12-23) شكل رأس مضرب الغولف وبنية عصا المضرب من المواد المركبة.

12-8- الاستخدامات في الإلكترونيات: Electronic Applications

تتطلب بعض الأجهزة الإلكترونية بعض الشروط الخاصة لكي تعمل بشكل جيد، من هذه الشروط مقاومة التشويش والاستقرار الميكانيكي والكهربائي والحراري، ويمكن تحقيق هذه المتطلبات عند استخدام المواد المركبة. وهذا مبين في المثال التالي.

12-8-1- تصنيع مقرات الإلكترونيات الدقيقة:

Microelectronics housing

متطلبات مادة المقرات الإلكترونية هي التالية:

- تمدد حراري يكفي $(8 \times 10^{-6} K^{-1})$

- كثافة قليلة.

- ناقلية حرارية عالية $(> 120 W m^{-1} K^{-1})$

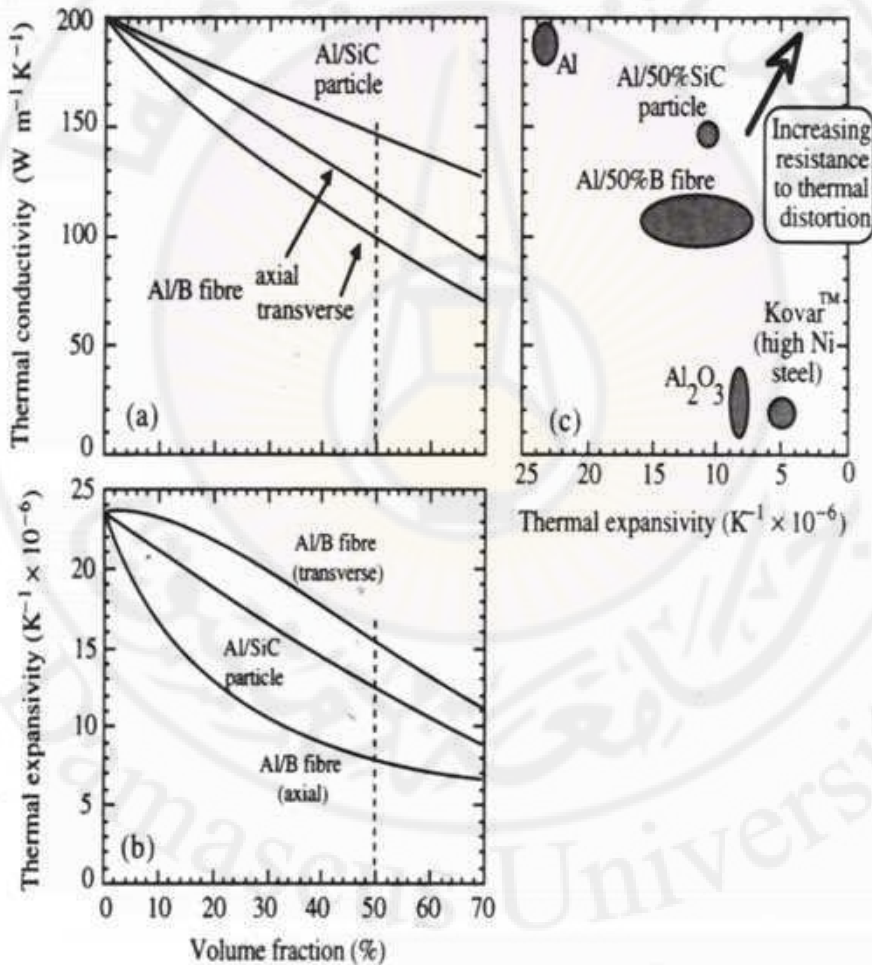
- ناقلية كهربائية.

تتطلب الوسائط الإلكترونية الدقيقة ظروف محيطيه مستقرة. كمثال يحتاج الرادار ذو الموجات الميكروية، ومنظومات الاتصال أن تتوضع مكوناته الإلكترونية في مقرات تؤمن لها العزل عن مجالات التشويش، وأن تكون مستقرة ميكانيكياً وكهربائياً وحرارياً.

استخدم KovarTM (فولاذ عالي النيكل) أو الفولاذ الملحوم بالموليبدينوم ليدعم السيراميك Al_2O_3 لتشكيل مقرات هذه الأجهزة. تؤمن هذه المواد توافقاً معقولاً بالنسبة للتمدد الحراري مع الألومينا $(8 \times 10^{-6} K^{-1})$ على الرغم من أن هذه المواد كثيفة وذات موصلية حرارية قليلة، حيث تشكل الكثافة المرتفعة عائقاً أساسياً، كما يؤدي الازدياد بكثافة المكونات إلى الحاجة المتزايدة لتبديد الحرارة بشكل فعال.

تتضمن الحلول المقترحة استخدام المواد المركبة من Al/SiC_p أو $Al/boron\ fibre$. يبين الشكل (12-24) مخططات علاقة التمدد الحراري والناقلية الحرارية مع المحتوى السيراميكي لكلا نوعي المواد المركبة. يبين المخطط (c-12-24) أنه يمكن أن نحدد المواد ذات المقاومة الجيدة للتشوه الحراري (ذات قيمة K/α الكبيرة) وذلك من أجل النسبة الحجمية للألياف مساوية إلى 50%. يتضح من المخطط أن المواد الأكثر فعالية هي المواد المقواة بحبيبات SiC . كما أن وزن غلاف الأجهزة الإلكترونية نقص بمقدار

65%>، كما نقصت تشوهات اللحام والتشغيل إلى الحد الأصغر $\pm 50\mu\text{m}$. بالإضافة إلى أنه يمكن تصنيع غلاف الأجهزة الإلكترونية بالسباكة وترك مناطق في أعلى الجدران الجانبية غير مقواة لتساعد في لحام الغطاء على غلاف الأجهزة الإلكترونية. يمكن أن تصب مثل هذه الأغلفة بمقاطع جدران رقيقة من المواد المركبة المقواة بالحبيبات.



الشكل (8-12) مخططات علاقة التمدد الحراري والناقلية الحرارية مع المحتوى السيراميكي لكلا نوعي المواد المركبة Al/SiC_p أو Al/boron fibre .



الفصل الثالث عشر

القسم العملي

Laboratory Section



A-13- التجارب المخبرية

التجربة رقم 1 : تحديد متانة المادة الرابطة البوليمرية.

التجربة رقم 2 : تحديد متانة الألياف الزجاجية.

التجربة رقم 3 : تصنيع المواد المركبة باستخدام طريقة المد الرطب.

التجربة رقم 4 : تحديد تأثير النسبة المئوية لألياف التقوية على متانة المادة

المركبة.

التجربة رقم 5 : تحديد تأثير تركيز الإجهادات على متانة المادة المركبة.



التجربة رقم 1

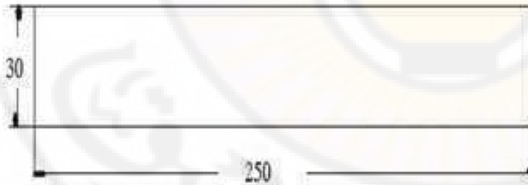
تحديد متانة المادة الرابطة البوليمرية

الهدف من التجربة :

- تصنيع عينات من المواد البوليمرية.
- اختبار المتانة على الشد لعينات من المواد البوليمرية.

المواد والتجهيزات :

- تجهيزات سلامة مهنية من قفاز وكمامة.
- طلاء فصل ذو أساس شمعي.
- مادة بوليمرية من الايبوكسي أو فينيل ايستر مع مساعد التصلب المناسب.
- قالب من أجل صب المادة البوليمرية. ينتج عن القالب عينات اختبار بالأبعاد التالية: كما هو مبين في الشكل (1) الطول 250 mm، العرض 30، 35، 40 mm سماكة العينة 3 mm.
- رجاج اهتزازي أو مضخة تخلية هواء.



الشكل (1) أبعاد
عينة اختبار الشد
من المادة الأساس
البوليمرية ذات
العرض 30 mm.

- آلة اختبار الشد عمومية نوع Instron 1195 انكليزية الصنع الشكل (2).



الشكل (2) آلة اختبار
الشد العمومية نوع
Instron 1195

1. طريقة تحضير العينات والاختبار:

- 1- يطلّى القالب (الذي يصنع في أغلب الأحيان من المواد المركبة أو الجبس أو الخشب أو المعدن) بمادة فصل تساعد على النزاع التي وتكون غالباً من الشمع.
- 2- صب المادة البوليميرية ضمن القالب إجراء الاهتزاز أو التخلية للتخلص ما أمكن من جميع الفقاعات الهوائية. هذه الفقاعات إذا بقيت ضمن المادة فإنها قد تؤدي إلى التهشم وانحطاط المواصفات الميكانيكية للمادة المركبة وربما الخصائص الأخرى الكيمائية مثلاً.
- 3- ترك العينات المدة اللازمة للتصلب بشكل كامل. هناك بعض المواد الرابطة التي تتصلب في الدرجة العادية وأنواع أخرى بحاجة لتيار من الهواء الساخن.
- 4- تصنيع خمسة عينات على الأقل من أجل الاختبار.
- 5- ربط العينات ضمن فكوك آلة الشد وإجراء اختبار العينات باستخدام سرعة تحميل مساوية إلى 10 mm/min.
- 6- حساب القيمة المتوسطة لمتانة شد المادة الرابطة البوليميرية.

التجربة رقم 2

تحديد متانة الألياف الزجاجية

الهدف من التجربة :

تحديد متانة الألياف الزجاجية.

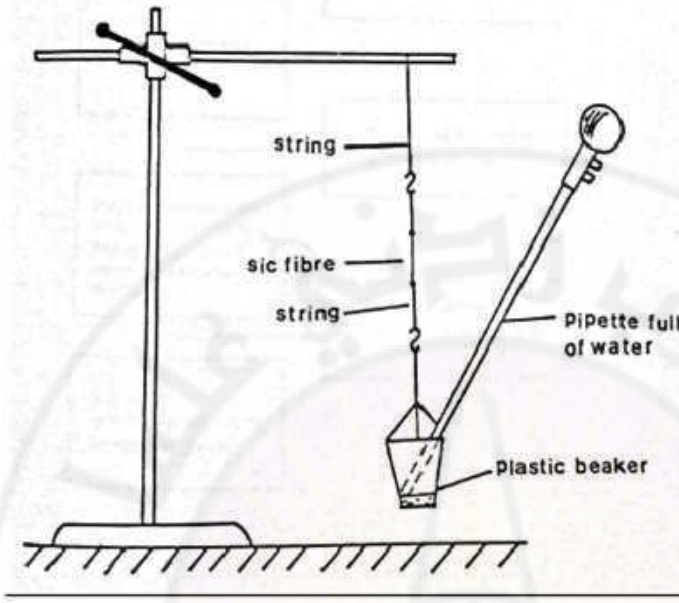
المواد والتجهيزات :

- ألياف زجاجية.
- مادة لاصقة قوية Super Glue.
- عدسة مكبرة لاستخدامها من أجل لصق الليف الزجاجي على الخيط من البوليستر المتين حسب الشكل (3).
- مجهر ضوئي من نوع Olympos مع أحد متممات المجهر التي هي صفيحة بلورية مدرجة من أجل قياس قطر الألياف الزجاجية.



الشكل (3) الليف
الزجاجي الملصوق
على خيط البوليستر
المتين.

- التركيبة المبينة بالشكل (4) المتضمنة حاملاً مع ماصة يمكن التحكم بالتدفق للماء الخارج من خلالها من أجل ملء الكأس البلاستيكي الخفيف.
- ميزان دقيق بدقة 0.1 g .



الشكل (4)
تركيبة تحميل
الليف الزجاجي
على الشد.

2. طريقة تحضير العينات والاختبار:

- 1- يتم قياس قطر الليف الزجاجي باستخدام مجهر ضوئي من نوع Olympus بعد معايرته باستخدام متمم المجهر وهو صفيحة بلورية مدرجة كما يلي:
تدريجة $100 = 1\text{mm}$. يتم استخدام تكبير يساوي 400 مرة مع استخدام كاميرا موصولة بالمجهر والحاسب وتتم المعايرة باستخدام شاشة الحاسب والميكرومتر من أجل القياس. يتم على الأقل قياس أقطار خمسة ألياف زجاجية.
- 2- يتم لصق الألياف الزجاجية على خيط البوليستر المتين باللاصق القوي وبمساعدة العدسة المقربة.
- 3- يعلق الليف الملصوق بالخيط على الحامل ويعلق بأسفل الخيط الكأس البلاستيكي ويتم تحميل الليف بقوة شادة بتنقيط الماء ضمن الكأس حتى انهيار الليف بتأثير القوة الشادة.
- 4- تحدد القوة المؤدية لتحطم الليف على الشد بوزن الكأس المتضمن الماء.
- 5- يتم تحديد إجهاد الشد على الليف بتقسيم القوة المؤدية لتحطم الليف على الشد على مساحة المقطع العرضي للليف.

التجربة رقم 3

تصنيع المواد المركبة

باستخدام طريقة المد الرطب

الهدف من التجربة :

حساب النسبة الوزنية للألياف المستخدمة في التقوية.
التعامل مع المواد المركبة البوليميرية بطريقة المد اليدوي الرطب.

المواد والتجهيزات :

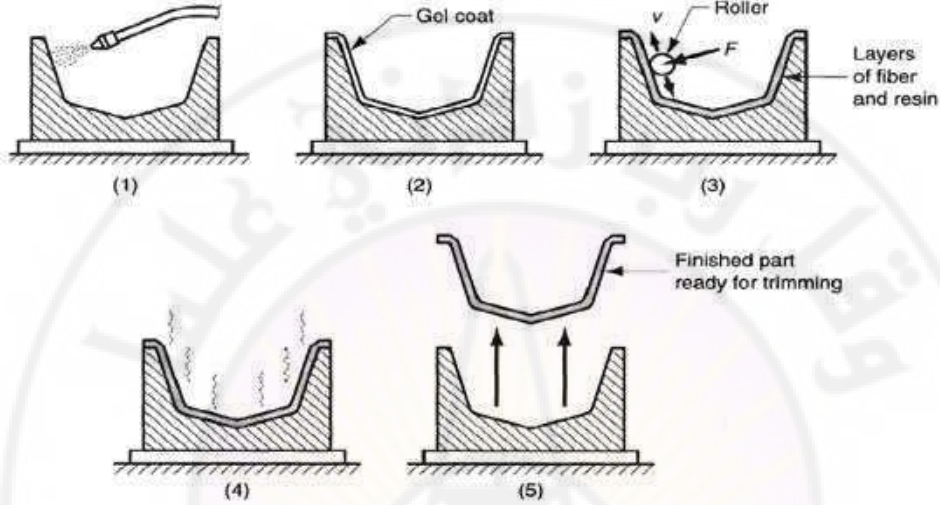
- تجهيزات سلامة مهنية من قفاز وكمامة.
- مادة التقوية: نسج ألياف زجاجية (عشوائية أو ذات تركيبة معينة)
 $V_f = 30\% - 40\%$ بنسبة
- ميزان دقيق بدقة 0.1 g .
- طلاء فصل ذو أساس شمعي.
- مادة بوليميرية من الايبوكسي أو فينيل ايستر مع مساعد التصليب المناسب.
- قالب من أجل تشكيل المادة المركبة ذات الأساس البوليميري.
- فرشاة وروول من أجل مد وضغط المادة المصنعة.

3. طريقة التحضير:

- 1- حساب النسبة المئوية الوزنية الموافقة لنسبة الألياف المستخدمة.
- 2- يطلّى القالب (الذي يصنع في أغلب الأحيان من المواد المركبة أو الجبس أو الخشب أو المعدن) بمادة فصل تساعد على النزع وتكون غالباً من الشمع.
- 3- بخ أو دهن طبقة من مادة خاصة تسمى (طبقة هلامية) gel-coat وظيفتها إعطاء نعومة وجمالية لسطح المادة المركبة.
- 4- توضع طبقة من نسيج الألياف على القالب بعد تفصيلها بما يناسب شكل القالب.
- 5- طلاء طبقة من المادة الرابطة.
- 6- إمرار رولو خاصة لإزالة الفقاعات الهوائية. الشكل (5).

7- الانتظار حتى تصلب المادة الرابطة.

8- تكرار الخطوات 3-4-5-6 حتى الحصول على السماكة المطلوبة.



الشكل (5) طريقة المد اليدوي لتصنيع المواد المركبة ذات الأساس البوليميري:

1- ينظف القالب ويدهن بمائع التصاق. 2- يطلى القالب بطبقة طلاء جيلاتينية تحوي اللون المطلوب. 3- عندما تبدأ الطبقة الجيلاتينية بالاستقرار (التصلب) جزئياً، تطبق طبقات متتالية من الألياف (بشكل متشابه أو نسيج) والراتنج تضغط كل طبقة بواسطة الرول وذلك من أجل التشرب الجيد للألياف بالراتنج وإزالة الفقاعات الهوائية. 4- تتم معالجة تصلب الجزء. 5- يزال الجزء المتصلب من القالب.

9- ترك العينات المدة اللازمة للتصلب بشكل كامل. هناك بعض المواد الرابطة التي تتصلب في الدرجة العادية وأنواع أخرى بحاجة لتيار من الهواء الساخن.

ملاحظة:

من الضروري جداً أن تتغلغل المادة الرابطة بشكل جيد ضمن المادة الداعمة وبحيث يتم طرد جميع الفقاعات الهوائية. هذه الفقاعات إذا بقيت ضمن المادة فإنها قد تؤدي إلى التهشم وانحطاط المواصفات الميكانيكية للمادة المركبة وربما الخصائص الأخرى كالكيميائية مثلاً.

إذاً يجب أن تكون مهارة الطالب في هذه الطريقة عالية لأنها تؤثر بشكل مباشر على جودة المنتج.

المادة التي سوف نحصل عليها سيكون أحد طرفيها خشناً والآخر ناعماً لذلك يجب أخذ هذا الأمر بعين الاعتبار عند اختيار القالب.

أهم التطبيقات:

- أحواض للاستخدام في الصناعات الكيميائية والغذائية.
- كبائن وهياكل الشاحنات و الباصات.
- أغطية الجرارات والآلات.
- قوارب الصيد والزوارق السريعة.
- المسابح (أحواض وأغطية) زلاجات الأطفال .

التجربة رقم 4

تحديد تأثير النسبة المئوية لألياف التقوية

على متانة المادة المركبة.

الهدف من التجربة :

- حساب النسبة الوزنية للألياف المستخدمة في التقوية.
- تصنيع عينات اختبار من المواد المركبة.
- دراسة تغير متانة المواد المركبة البوليمرية المقواة بالألياف الزجاجية بتغيير النسبة الحجمية لألياف التقوية.

المواد والتجهيزات :

- تجهيزات سلامة مهنية من قفاز وكمامة.
- مادة التقوية: نسج ألياف زجاجية (عشوائية أو ذات تركيبة معينة)
- بنسبة % 30 - 40 - 50 - 60 V_f
- ميزان دقيق بدقة 0.1 g .
- طلاء فصل ذو أساس شمعي.
- مادة بوليميرية من الايبوكسي أو فينيل ايستر مع مساعد التصلب المناسب.
- قالب من أجل تشكيل المادة المركبة ذات الأساس البوليميري.
- فرشاة و رول من أجل مد وضغط المادة المصنعة.
- آلة اختبار الشد عمومية نوع Instron 1195 انكليزية الصنع.

4. طريقة التحضير والاختبار:

- 1- حساب النسبة الوزنية للألياف وللمادة الرابطة والموافقة للنسب الحجمية التالية:
 $V_f = 30 - 40 - 50 - 60 \%$
- 2- يطلّى القالب (الذي يصنع في أغلب الأحيان من المواد المركبة أو الجبس أو الخشب أو المعدن) بمادة فصل تساعد على النزع وتكون غالباً من الشمع.

- 3- توضع طبقة من نسيج الألياف على القالب بعد تفصيلها بما يناسب شكل القالب.
- 4- (وضع) طلاء طبقة من المادة الرابطة.
- 5- إمرار رولو خاصة لإزالة الفقاعات الهوائية. الشكل (5).
- 6- الانتظار حتى تصلب المادة الرابطة.
- 7- تكرار الخطوات 3-4-5-6 حتى الحصول على السماكة المطلوبة.
- 8- ترك العينات المدة اللازمة للتصلب بشكل كامل. هناك بعض المواد الرابطة التي تتصلب في الدرجة العادية وأنواع أخرى بحاجة لتيار من الهواء الساخن.
- 9- تصنيع ثلاث عينات اختبار موافقة لكل نسبة مئوية حجمية للألياف في المادة المركبة أبعاد العينة مبينة بالشكل (1).
- 10- حساب إجهاد المادة المركبة المتوسط لكل نسبة مئوية حجمية مختبرة. الإجهاد يساوي قوة التحطم مقسوماً على مساحة المقطع العرضي للعينة المختبرة.
- 11- رسم المخطط البياني لإجهاد المادة المركبة بدلالة النسبة المئوية الحجمية للألياف التقوية.
- 12- إجراء الحسابات النظرية لمثانة المواد المركبة بالاعتماد على التجارب (1 و 2) وقارن بين النتائج النظرية والنتائج العملية.

التجربة رقم 5

تحديد تأثير تركيز الإجهادات

على متانة المادة المركبة.

الهدف من التجربة :

حساب النسبة الوزنية للألياف المستخدمة في التقوية.
تصنيع عينات اختبار من المواد المركبة.
دراسة تأثير الثقوب وبالتالي تركيز الإجهادات على متانة المادة المركبة. وغالباً ما تحتوي المواد المركبة على ثقوب من أجل عملية الوصل والتثبيت.

المواد والتجهيزات :

- تجهيزات سلامة مهنية من قفاز وكمامة.

- مادة التقوية: نسج ألياف زجاجية (عشوائية أو ذات تركيبة معينة)

بنسبة $V_f = 40\%$

- ميزان دقيق بدقة 0.1 g .

- طلاء مادة فصل ذات أساس شمعي.

- مادة بوليميرية من الايبوكسي أو فينيل ايستر مع مساعد التصلب المناسب.

- قالب من أجل تشكيل المادة المركبة ذات الأساس البوليميري.

- فرشاة ورول من أجل مد وضغط المادة المصنعة.

- آلة اختبار الشد عمومية نوع Instron 1195 إنكليزية الصنع.

- منقب من أجل ثقب العينات بالمنتصف بالأقطار 4 و 6 و 8 mm.

5. طريقة التحضير والاختبار:

1- حساب النسبة الوزنية للألياف وللمادة الرابطة والموافقة للنسبة الحجمية

التالية: $V_f = 40\%$

2- تصنيع ثلاث عينات اختبار موافقة لكل ثقب في عينات المادة المركبة أبعاد العينة الطول 250 mm، العرض 30، 35، 40 mm سماكة العينة 3 mm. الشكل (1).

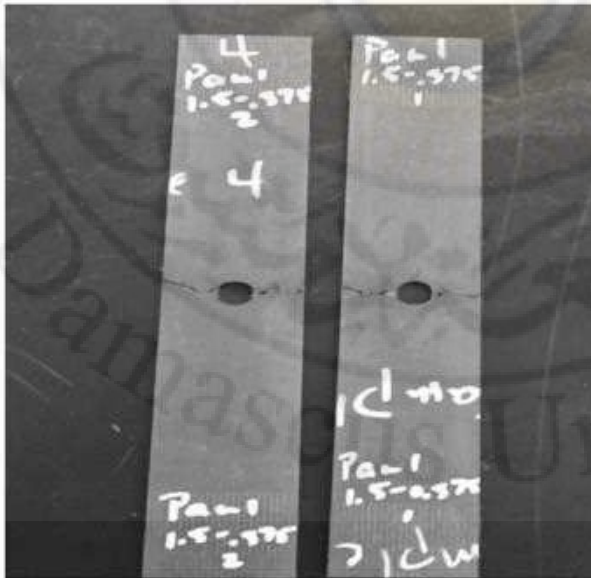
3- إتباع الخطوات السابقة المذكورة في التجربة رقم 3 من أجل تصنيع العينات.

4- تصنيع تسعة عينات اختبار موافقة لكل عرض عينة من المادة المركبة أبعاد العينة مبينة بالشكل (1).

5- ثقب العينات بالمنتصف بالأقطار 4 و 6 و 8 mm. تتقّب كل ثلاث عينات ذات العرض الواحد بنفس قطر الثقب.

6- ربط العينات ضمن فكوك آلة الشد وإجراء اختبار العينات باستخدام سرعة تحميل مساوية إلى 10 mm/min.

7- حساب إجهاد المادة المركبة المتوسط لكل مجموعة عينات لها نفس العرض ومتقوية بنفس القطر. الإجهاد يساوي قوة التحطم مقسوماً على مساحة المقطع العرضي للعينة المختبرة. الشكل (7) يبين العينات المختبرة.

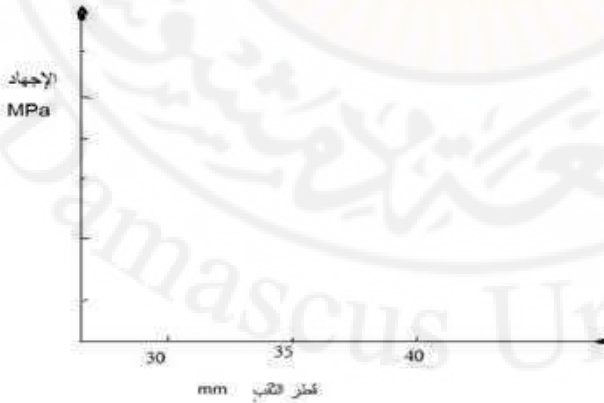


الشكل (7) عينات المواد المركبة المثقوبة والمختبرة على الشد.

8-إنشاء جدول بالقيم الناتجة :

عرض العينة	قطر الثقب	Max Load(KN)			(MPa) Max Stress			القيمة المتوسطة
Width (mm)	Hole Size (mm)	العينة (1)	العينة (2)	العينة (3)	(1)	(2)	(3)	MPa
30	4							
	6							
	8							
35	4							
	6							
	8							
40	4							
	6							
	8							

11- رسم المخططات البيانية لإجهاد المادة المركبة للعينات ذات العرض الواحد بدلالة قطر الثقب. الشكل (8).



الشكل (8) تغير متانة
المادة المركبة بحسب قطر
التثبيت المستخدم. عرض
العينة 30 mm .

B-13-مراجعة و مسائل

- 1- المواد المركبة ذات الأساس البوليميري.
- 2- المادة المركبة ذات المادة الحاضنة- المعدنية (MMCs)
- 3- المادة المركبة ذات المادة الحاضنة - السيراميكية (CMCs)
- 4- أنماط الانهيار للمواد المركبة.



B-13-المواد المركبة ذات الأساس البوليميري:

(PMC) Composite materials with Polymer matrices

1-B-13-المواد المركبة البوليميرية المقواة بالألياف:

السؤال: اشرح وظيفة كل من المكونات المختلفة المستعملة لإعطاء الخواص الفيزيائية للمواد المركبة البوليميرية المقواة بالألياف .

*-المواد المركبة هي عبارة عن دمج اثنين أو أكثر من المكونات غير المنحلة والمختلفة كيميائياً. إن البنية والخواص للمادة المركبة الناتجة متفوقة على كل عنصر من العناصر المكونة للمادة المركبة كل على حدة.

تتميز المواد البلاستيكية عادةً بجساءة متانة ومقاومة زحف منخفضة عن تلك للمعادن والخلائط. ينتج عن إضافة مواد التقوية (الأطوار) إلى مادة الأساس الحاضنة البلاستيكية تغيرات معتبرة وتحسناً بالخواص، وبذلك تتميز المادة المركبة الناتجة بتحسين الخواص السابقة وبمعدلات المتانة للوزن والجساءة للوزن إضافة إلى الخواص الفيزيائية المحسنة.

مثال: إن راتنج (ريزن) الأيبوكسي له الخواص التالية :

$$UTS [MPa] = 35-140,$$

$$E [GPa] = 3.5-17, \text{ الاستطالة } \% 1-10.$$

المادة المركبة ذات الأساس من الأيبوكسي لها الخواص التالية :

$$UTS [MPa] = 70-1400,$$

$$E [GPa] = 21-52, \text{ الاستطالة } \% 2-4.$$

1-الدور الذي تلعبه المكونات المختلفة بإعطاء الخواص الفيزيائية للمواد المركبة.

1-B-13-مواد التقوية- الألياف:

تتكون مواد التقوية من الزجاج، الغرافيت (الكربون)، البورن. تتميز كل هذه المواد بالمتانة المرتفعة جداً. إن كل من هذه المواد عبارة عن مواد هشة، قاسية ومنخفضة الاستطالة بشكل كبير ولا يمكن استخدامها لوحدها كمادة إنشائية. تتألف المادة المركبة

من مادة أساس بلاستيكية ذات طبيعة متجانسة، وهي المادة الحاضنة التي توزع ضمنها الأطوار الأخرى (الطور الآخر) للألياف، وبذلك تحتل جزءاً من الحجم الكلي. إن محتوى الألياف في المادة المركبة المصنعة عادةً بين 10% و 60%. تتغير خواص المادة مع نسبة الألياف المتضمنة في المادة المركبة ونوع مادة التقوية ونوع المادة الحاضنة.

مثلاً: تقدم الألياف الزجاجية المتانة المرتفعة، المطيلية والكثافة المرتفعة (بالمقارنة مع الكربون). تقدم ألياف الكربون المتانة المرتفعة ومعامل يونغ E مرتفعاً وكثافة أخفض (مقارنةً مع ألياف الزجاج والبورن). تستطيع المواد المركبة الكربونية الصمود لدرجات الحرارة المرتفعة ($1500-3000^{\circ}\text{C}$). يتميز الأراميد "Kevlar" بمتانة مرتفعة جداً، بالإضافة إلى ذلك يعطي بعضاً من التشوه اللدن. يحتوي البورن ألياف رقيقة من التتغستين بقطر خارجي مساوي إلى 0.012 mm وتقدم متانة شد مرتفعة جداً وثبات بدرجة الحرارة المرتفعة. وهذا بسبب انتظام الجزيئات على طول الليف ومساحة المقطع العرضي الصغيرة للألياف. كلما صغرت مساحة المقطع العرضي للألياف كلما صغر إجهاد الانحناء على الألياف.

2-1-B-13- شكل وأبعاد وتوضع ألياف التقوية.

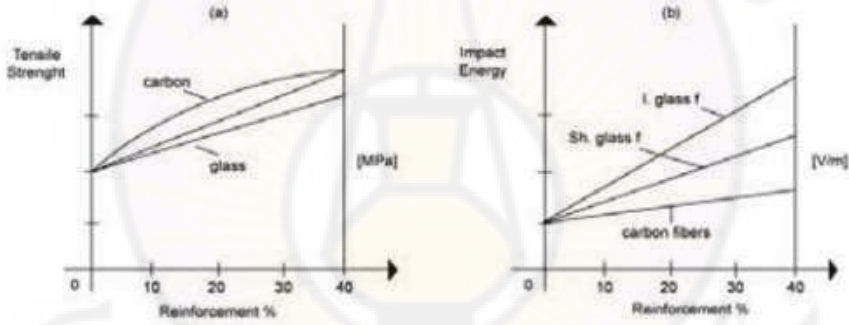
يمكن أن تكون الألياف قصيرة (20 ~ 60 mm) أو طويلة (200 ~ 500 mm). الألياف هي عادةً بشكل ألياف طويلة مستمرة أو قماش منسوج أو مغزولة وحصيرات بتراكيب متنوعة. كما يمكن كذلك أن يكون عنصر التقوية بشكل قشور وحبيبات. يمكن أن تنتظم إما طولياً، عرضياً أو مبعثرة ضمن المادة الحاضنة.

3-1-B-13- الدور الذي تلعبه المادة الحاضنة.

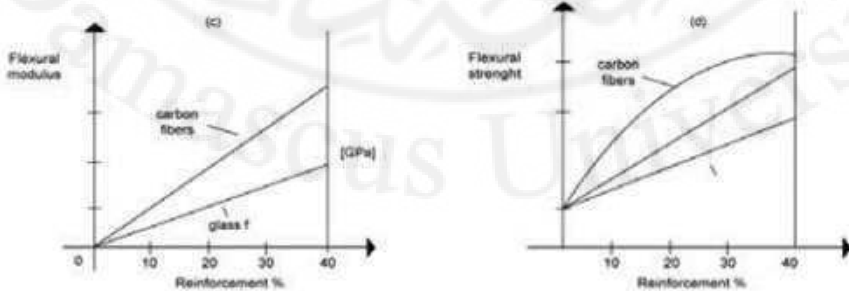
عمل المادة الحاضنة هو امتصاص ونقل الإجهاد إلى الألياف وحماية الألياف من الضرر الفيزيائي الحادث عن ظروف التحميل وتقليل انتشار الشقوق داخل المادة المركبة بواسطة فعل المطيلية والجساءة للمادة الحاضنة. استخدمت عادة مواد ريزينات الإيبوكسي، الفينولات... الخ. استخدمت ريزينات البوليأمايد التي تصمد حتى درجة الحرارة 300°C مع ألياف الغرافيت.

4-1-B-13- خواص المادة المركبة:

يمكن أن نقول إن خواص المادة المركبة تعتمد على جودة نوعية المكونات الداخلة في تركيبها، شكل وانتظام توزيع الألياف وطول الألياف والنسبة المئوية للمادة الحاضنة وللألياف. الألياف القصيرة تؤثر بالتقوية أقل من الألياف الطويلة ويعتمد تأثيرها على الخواص بشكل أكثر على الزمن والحرارة. تعطي الألياف الطويلة انتقال أفضل للحمل من خلال المادة الحاضنة ولذلك تستخدم لتطبيقات الظروف الحرجة- حرارة وتحمل حرج. تظهر تلك العلاقة بوضوح في مخططات متانة الشد / % لمادة التقوية (لألياف متنوعة)، طاقة الصدم / % لمادة التقوية،....الخ. كما هو مبين في الشكل (1).

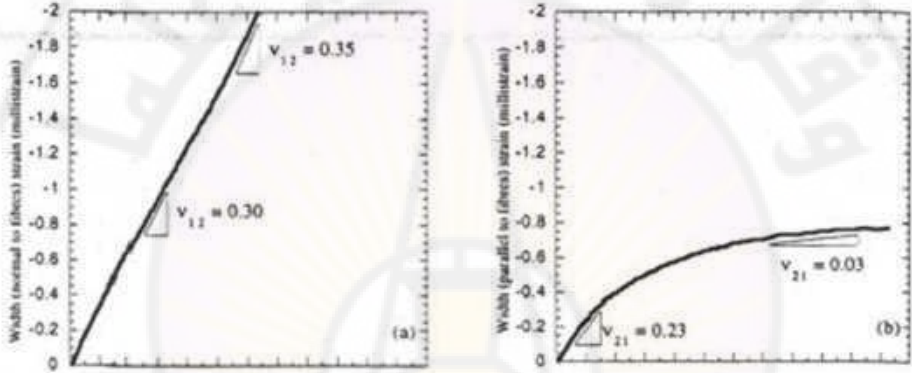


الشكل (1) يبين مخططات متانة الشد / % لمادة التقوية (لألياف متنوعة)، طاقة الصدم / % لمادة التقوية تؤثر تقوية الألياف على خواص كثيرة أخرى للمادة المركبة مثل الناقلية الحرارية والاستطالة الحرارية والمقاومة الكهربائية ومقاومة الامتطاط والانهيار الشكل (2).



الشكل (2) تغير خواص المادة المركبة حسب النسبة المئوية للألياف التقوية.

إن متانة الترابط بين الألياف والمادة الحاضنة البوليميرية هو عامل حرج في البلاستيك المقوى، لأن الحمل ينتقل من خلال السطح البيني بين الألياف والمادة الحاضنة. يحدث الترابط الضعيف سحب الألياف من داخل البنية. يمكن تحسين الالتصاق على سطح الترابط بواسطة معالجة سطحية خاصة مثل الطلاء ومعاملات الترابط. يتم الحصول على أكبر متانة وجساءة في المواد البلاستيكية المقواة عندما يتم تنظيم وتوضع الألياف باتجاه متوافق مع حمولة الشد - الشكل (3).



يبين الشكل (3) تأثير النسبة المئوية للألياف في المادة الحاضنة وتوضع هذه الألياف بالنسبة لمتانة الشد. (a) حمولة محورية. (b) حمولة عرضية.

2-13-B-13 - المتانة ومعامل المرونة للبلاستيك المقوى:

يعطى الحمل الكلي على المادة المركبة بالعلاقة: $P_C = P_f + P_m$

معامل مرونة المادة المركبة يساوي إلى: $E_c = A_f E_f + (1 - A_f) E_m$

حيث: A_f - مساحة المقطع العرضي للألياف المتضمنة في المادة الحاضنة.

E_f - معامل مرونة الألياف. E_m - معامل مرونة للمادة الحاضنة.

يحسب الحمل الكلي على الألياف والمادة الحاضنة باستخدام العلاقة:

$$P_f / P_m = A_f E_f / A_m E_m$$

حيث: A_f - مساحة المقطع العرضي للألياف في المادة المركبة. A_m - مساحة المقطع العرضي للمادة الحاضنة في المادة المركبة.

3-B-13-النسب الوزنية والحجمية للألياف:

تلعب نسب توزع كل من الألياف والمادة الرابطة (نسب حجمية أو كتلية) دوراً أساسياً في تحديد خصائص ومواصفات المواد المركبة.

نستخدم النسب الكتلية عند التصنيع والتحضير للمواد المركبة بينما نستخدم النسب الحجمية في الحسابات والموديلات الرياضية المستخدمة لمعرفة سلوك المواد المركبة.

1-3-B-3-النسب الحجمية:

بفرض إن V_c حجم مادة مركبة ما يتضمن هذا الحجم كلاً من حجم الألياف V_f + حجم المادة الرابطة V_m

سنرمز إلى كل ما يتعلق بالمادة المركبة بالدالة C ونرمز إلى كل ما يتعلق بالمادة الرابطة بالدالة m . وسنرمز إلى كل ما يتعلق بالألياف بالدالة f . وتكون النسبة الحجمية للألياف V_f

$$\begin{aligned} V_f &= v_f / v_c \\ V_m &= v_m / v_c \end{aligned} \quad \text{وتكون النسبة الحجمية للمادة الرابطة } V_m$$

لكن : $V_c = v_f + v_m$

$$V_f + V_m = 1 \quad \text{بتعويض ما سبق نجد:}$$

2-3-B-13-النسب الكتلية: يمكن بنفس الطريقة استنتاج:

$$\begin{aligned} M_f + M_m &= 1 \\ m_f + m_m &= m_c \end{aligned}$$

حيث : $M_f = m_f / m_c$ & $M_m = m_m / m_c$

3-3-B-13-العلاقة بين النسب الكتلية والحجمية:

يمكن الربط بواسطة الكتلة الحجمية ρ (الوزن النوعي) حسب العلاقات:

$$m_c = \rho_c \cdot V_c$$

$$m_f = \rho_f \cdot V_f$$

$$m_m = \rho_m \cdot V_m$$

حسب هذه العلاقات والعلاقات السابقة يمكن استنتاج:

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m (1 - V_f)$$

إذا كانت المادة المركبة مؤلفة من عدة مواد يمكن أن نكتب : $\rho_c = \sum \rho_i V_i$

حيث: $i = 1 - n$

ملاحظة:

يمكن أن نجد اختلافاً بين قيمة الكتلة الحجمية المحسوبة حسب العلاقات السابقة وبين قيمة الكتلة الحجمية المقاسة. يعزى هذا الخلاف إلى تواجد بعض المسامية داخل المادة المركبة.

1. يمكن أن تسبب المسامية انخفاضاً ملحوظاً في المواصفات وتشتت الخواص المقاسة.

2. ترفع المسامية من حساسية المادة المركبة للجو الخارجي.

○ زيادة امتصاص الرطوبة.

○ نقصان المقاومة ضد المواد الكيماوية.

يجب أن لا تزيد نسبة المسامية في المواد المركبة عن:

1 % في المواد المركبة ذات المواصفات الجيدة. 5 % في المواد المركبة

العادية أو المتوسطة

مسألة نموذجية :

مركب إيبوكسي - ألياف كفلر 49 أحادي الاتجاه يحتوي على 60% من الحجم ألياف كفلر 49 و 40% راتنج الإيبوكسي، كثافة ألياف الكفلر 49 هي 1.48 Mg/m^3 وهي لراتنج الإيبوكسي 1.20 Mg/m^3 .

1. ما هي النسبة المئوية الوزنية للكفلر 49 وراتنج الإيبوكسي في المادة المركبة .

2. ما هي الكثافة للمادة المركبة .

الحل:

المبدأ الأساسي هو m^3_1 من المادة المركبة. لذلك لدينا 0.60 m^3 للكفلر 49 و 0.40 m^3 لراتنج الإيبوكسي .

الكثافة = الكتلة / الحجم

$$\rho = m / v \quad \text{و} \quad m = \rho v$$

$$\rho_f v_f = (1.48 \text{ Mg/m}^3) (0.60 \text{ m}^3) = 0.888 \text{ Mg} = \text{كتلة الكفلر 49}$$

$$\rho_m v_m = (1.20 \text{ Mg/m}^3) (0.40 \text{ m}^3) = 0.480 \text{ Mg} = \text{كتلة راتنج الإيبوكسي}$$

$$c = m_f + m_m = 0.888 + 0.480 = \text{كتلة المادة المركبة}$$

$$m_c = \rho_c v = 1.368 \text{ Mg}$$

$$= \text{النسبة المئوية الوزنية للكفلر 49 (49 kevlar Wt \%)}$$

$$\text{Wt \%} = (0.888 \times 100 \% = 64.9 \%$$

$$\text{Mg} / 1.368 \text{ Mg})$$

$$= \text{النسبة المئوية الوزنية لراتنج الإيبوكسي (epoxy resin Wt \%)}$$

$$\text{Wt \%} = (0.480 \times 100 \% = 35.1 \%$$

$$\text{Mg} / 1.368 \text{ Mg})$$

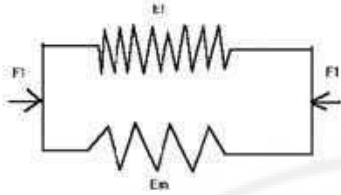
= الكثافة للمادة المركبة

$$\rho_c = m v = 1.368 \text{ Mg} / 1 \text{ m}^3 = 1.37 \text{ Mg/m}^3$$

4-13-B-معادلات معاملات المرونة للمادة المركبة البوليميرية المقواة

بالألياف:

1-4-13-B-شروط تساوي الانفعالات:



الشكل (A-1)

لندرس عينة اختبار لمادة مركبة صفائحية مثالية مع طبقات متعاقبة لألياف طويلة مستمرة و المادة الرابطة، كما يظهر في الشكل (A-1) والشكل (A-2). يسبب في هذه الحالة الإجهاد على المادة انفعالاً متماثلاً على جميع طبقات المادة المركبة. سوف نفرض أن الترابط بين الطبقات يبقى سليماً أثناء التحميل. يدعى هذا النوع من الحمولة على عينة المادة المركبة ظروف الانفعال المتساوي .

لنوجد معادلة تربط معامل مرونة المادة المركبة مع معامل مرونة الليف و معامل مرونة المادة الرابطة ونسبة حجمهم المئوية. أولاً، يساوي الحمل على المادة لمركبة الحمل على طبقات الليف مضافاً إليه الحمل على طبقات المادة الرابطة، وبالتالي:

$$P_c = P_f + P_m \quad (1.1)$$

$$\text{Since } \sigma = P / A ,$$

$$P = \sigma A$$

$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_m \cdot A_m + \sigma_f \cdot A_f \quad \text{إذا } P_c = \sigma_c \cdot A_c , P_f = \sigma_f \cdot A_f \quad (2.1)$$

$$P_m = \sigma_m A_m$$

حيث σ_m و σ_f ، σ_c هي الإجهادات و A_m و A_f و A_c هي المساحات للمادة المركبة، الليف، والمادة الرابطة، على التوالي. بما أن أطوال الطبقات للمادة الرابطة والليف متساوية.

يمكن أن تستبدل:

A_m و A_f ، A_c في المعادلة 2.1 بالنسب الحجمية V_m ، V_f ، V_c و V_m .

$$\sigma_c V_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (3.1)$$

بما أن الحجم النسبي للمادة المركبة ككل يساوي الواحد عندئذ $V_c=1$ ،

المعادلة (3.1) تصبح :

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m$$

$$\sigma_c = P_c / A_c = E_c \varepsilon_c = E_c \varepsilon_f = E_c \varepsilon_m$$

$$\Leftrightarrow \sigma_c = E_c \sigma_f / E_f = E_c \sigma_m / E_m$$

$$P_c = P_f + P_m$$

$$P_f = E_f \varepsilon_f A_f = E_f \varepsilon_c A_f$$

$$P_m = E_m \varepsilon_m A_m = E_m \varepsilon_c A_m$$

$$P_f + P_m = \varepsilon_c (E_f A_f + E_m A_m) = P_c \quad (a)$$

$$\sigma_c = P_c / (A_f + A_m) = E_c \varepsilon_c \quad \text{لكن :}$$

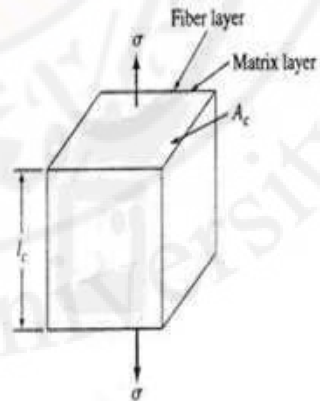
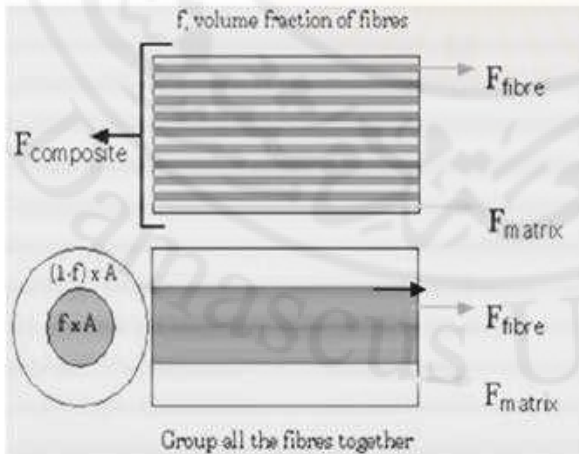
$$\Rightarrow P_c = E_c \varepsilon_c \cdot (A_f + A_m) \quad (b)$$

بمساواة (a) و (b) نجد : $E_c = E_f A_f / (A_f + A_m) + E_m A_m / (A_f + A_m)$

ولدينا : $V_f = A_f / A_c$ ، $A_m / A_c = V_m$

$$\boxed{E_c = E_f V_f + E_m V_m} \quad (5.1)$$

هذه المعادلة معروفة بقاعدة المزج الثنائي للمواد المركبة ويمكن من حساب قيم عامل المرونة للمادة المركبة إذا عرفت عوامل المرونة لكل من الألياف والمادة الرابطة ونسبتهم الحجمية. إن هذه المعادلة من أجل قوة مؤثرة على المادة المركبة بشكل موازي للألياف .



الشكل (A-2) بنية مادة مركبة تتألف من طبقات من الألياف والمادة الرابطة تحت ظروف تساوي

الانفعال (حجم المادة المركبة : $V_c = A_c \times l_c$ الطول)

وتكون نسبة الحمل على الألياف بالنسبة للمادة الحاضنة حيث سنرمز للقوة F بالرمز P:

$$P_f / P_m = (\sigma_f \cdot A_f) / (\sigma_m \cdot A_m) = (E_f \cdot \varepsilon_f \cdot A_f) / (E_m \cdot \varepsilon_m \cdot A_m)$$

$$P_f / P_m = (E_f \cdot A_f) / (E_m \cdot A_m)$$

نسبة الحمل المطبقة على الألياف :

$$P_f / P_c = (E_f \cdot v_f) / (E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m)$$

إذا كانت القوة الكلية مؤثرة على عينة مجهدة بقوة موازية للألياف معروفة عندئذ نطبق المعادلة التالية :

$$P_c = P_f + P_m$$

مسألة نموذجية :

احسب عامل المرونة وإجهاد الشد ونسبة الحمل المطبقة على الألياف من أجل المادة المركبة المكونة من ألياف الزجاج المستمرة والمادة الرابطة الإيبوكسي وذلك باستخدام 60 % من الحجم ألياف الزجاج. المادة المركبة محملة بقوة موازية للألياف.

$$\sigma_f = 350000 \text{ psi} , \quad E_f = 10.5 \cdot 10^6 \text{ psi}$$

$$\sigma_m = 9000 \text{ psi} , \quad E_m = 0.45 \cdot 10^6 \text{ psi}$$

الحل :

1- عامل المرونة للمادة المركبة :

$$E_c = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m$$

$$E_c = (10.5 \cdot 10^6) \cdot (0.60) + (0.45 \cdot 10^6) \cdot (0.40) = 6.48 \cdot 10^6 \text{ psi}$$

2- إجهاد الشد للمادة المركبة :

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_m \cdot v_m$$

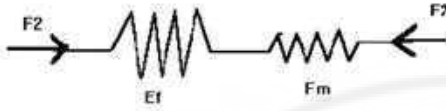
$$\sigma_c = (350000 \cdot 0.60) + (9000 \cdot 0.40) = 214000 \text{ psi}$$

3- نسبة الحمل المطبقة على الألياف :

$$P_f / P_c = (E_f \cdot v_f) / (E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m)$$

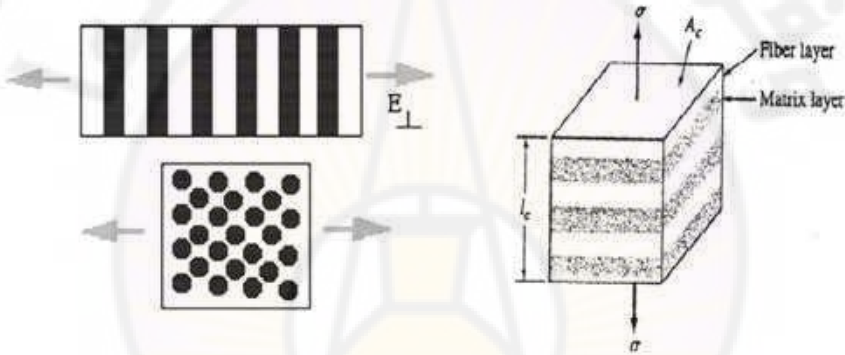
$$P_f / P_c = (10.5 \cdot 10^6 \cdot 0.60) / (10.5 \cdot 10^6 \cdot 0.60 + 0.45 \cdot 10^6 \cdot 0.40) = 0.97$$

2-4-B-13- حالات الإجهاد المتساوي :



الشكل (A-3)

دعنا نعتبر حالة مقطع عرضي متناه في الصغر. بنية المادة المركبة تتألف من طبقات من الألياف والمادة الرابطة التي تكون فيها الطبقات متعامدة مع اتجاه تطبيق القوة كما هو مبين في الشكل (A-3) و الشكل (A-4) في هذه الحالة:



الشكل (A-4) بنية مادة مركبة تتألف من طبقات من الألياف والمادة الرابطة تحت ظروف تساوي الانفعال (حجم المادة المركبة : الطول $V_c = A_c \times l_c$)

ينتج الحمل على المادة المركبة حالة إجهاد متساوي على كل الطبقات ولذلك تدعى حالة الإجهاد المتساوي .

لاستنتاج معادلة عامل المرونة للمادة المركبة المؤلفة من طبقات. سوف نبدأ بالمعادلة التي نقول أن الإجهاد على كامل المادة المركبة يساوي إلى الإجهاد على طبقات الألياف ويساوي الإجهاد على المادة الرابطة .

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f \quad (1.2)$$

إن الانفعال الكلي للمادة المركبة في اتجاهات الإجهاد يساوي مجموع الانفعالات في طبقات الليف والمادة الرابطة :

$$\epsilon_c = \epsilon_f + \epsilon_m \quad (2.2)$$

بافتراض أنه لا تتغير المساحة المتعامدة مع الإجهاد وافترض
أن للمادة المركبة وحدة الطول إذن :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m \quad (3.2)$$

حيث V_f ، V_m هي الحجوم الجزئية لصفائح الليف و المادة الرابطة، على التوالي.
على فرض أن قانون هوك صحيح تحت تأثير الإجهاد، إذن :

$$\varepsilon_c = \sigma / E_c \quad \varepsilon_f = \sigma / E_f \quad \varepsilon_m = \sigma / E_m \quad (4.2)$$

بتعويض المعادلة (4.2) بالمعادلة (3.2) يعطي :

$$\sigma / E_c = \sigma V_f / E_f + \sigma V_m / E_m \quad (5.2)$$

بتقسيم كل حد من المعادلة (5.2) على σ تعطي :

$$1 / E_c = V_f / E_f + V_m / E_m \quad (6.2)$$

بتوحيد المقامات : (7.2) $1 / E_c = V_f E_m / E_f E_m + V_m E_f / E_m E_f$

$$1 / E_c = (V_f E_m + V_m E_f) / E_f E_m \quad \text{بالإصلاح :}$$

أو :

$$E_c = E_f E_m / (V_f E_m + V_m E_f) \quad (8.2)$$

مسألة نموذجية :

احسب عامل المرونة لمادة مركبة مؤلف من 60 % من الحجم ألياف الزجاج و 40 %
مادة رابطة - ايبوكسي - تؤثر على المادة مركبة حمولة عامودية على محاور
الألياف - حالة تساوي الإجهاد - .

حيث عامل المرونة لألياف الزجاج وعامل المرونة للمادة الرابطة كما يلي :

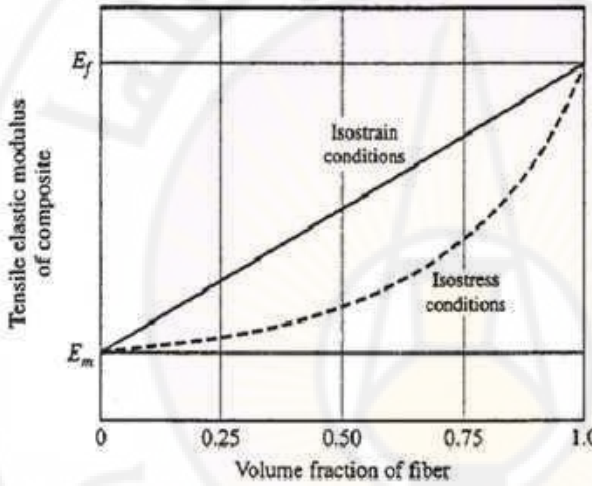
$$E_f = 10.5 \cdot 10^6 \text{ psi} \quad E_m = 0.45 \cdot 10^6 \text{ psi}$$

$$E_c = (E_f \cdot E_m) / (V_f \cdot E_m + V_m \cdot E_f)$$

$$E_c = (10.5 \cdot 0.45 \cdot 10^{12}) / (0.4 \cdot 10.5 \cdot 10^6 + 0.6 \cdot 0.45 \cdot 10^6) = 10.6 \cdot 10^6 \text{ psi}$$

لاحظ أن الإجهاد في حالة تساوي الإجهاد لمادة مركبة ينتج عامل مرونة من أجل 60 % ألياف زجاج و 40% مادة رابطة حوالي ست مرات أقل مما هو عليه في حالة تساوي الانفعال.

يبين الشكل (A-5) المقارنة بين تأثير حمل تساوي الإجهاد وحمل تساوي الانفعال على المادة المركبة. يظهر الشكل أنه نحصل على قيم أعلى لعامل المرونة في حالة حمل متساوي الانفعال وذلك من أجل حجم ألياف متساوي .



الشكل (A-5) يبين عامل مرونة الشد كتابع لحجم الألياف في المادة الحاضنة البلاستيكية المقواة بالألياف بشكل صفائحي المادة المركبة المجهددة باتجاه واحد تحت حمل متساوي الإجهاد أو متساوي الانفعال. من أجل حجم ألياف متساوي في المادة المركبة المواد المحملة بانفعال متساوي (باتجاه محاور الألياف) لها عامل مرونة أعلى .

دراسة حالة :

عند استخدام المواد الرابطة البوليميرية المقواة بألياف سيراميكية كألياف الزجاج. إن مواصفات مادة التقوية في هذه الحالة أفضل بكثير من مواصفات المادة الرابطة. ولذلك تؤدي زيادة النسبة الحجمية للألياف ضمن المادة المركبة إلى تحسن خصائص المادة المركبة مباشرة. لكن ... ما هي كمية الألياف المناسبة ؟

سيكون لدينا في هذه الحالة:

$$\epsilon_f < \epsilon_m \quad \& \quad E_f > E_m$$

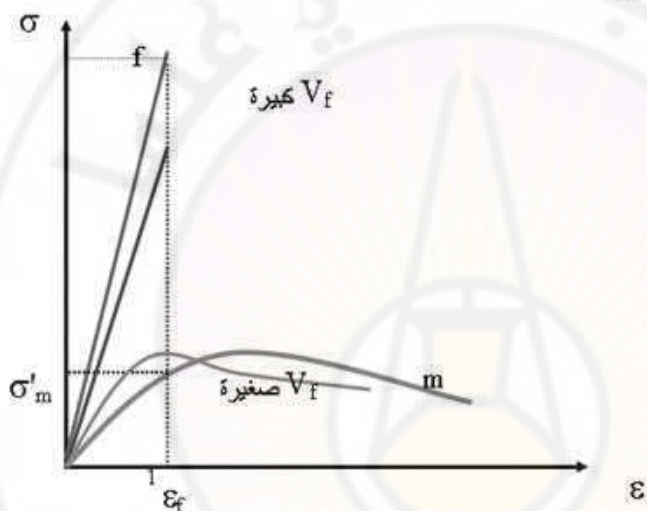
عندما تكون النسبة الحجمية للألياف V_f كبيرة فسوف تأخذ المادة سلوكاً خطياً وتتهار بانتهيار الألياف ويمكن حساب الإجهاد المطبق على المادة خلال فترة التحميل حسب

$$\sigma_x = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad \text{العلاقة :}$$

عند الانتهيار تكون المعادلة على الشكل التالي:

$$\sigma_x^R = \sigma_f^R V_f + \sigma_m' V_m \quad (1)$$

حيث (حسب الشكل (A-6) : $\sigma_m' = E_m \varepsilon_f^R$



الشكل (A-6) مخطط
الإجهاد الانفعال للألياف
والمادة الحاضنة والمادة
المركبة.

عندما تكون النسبة الحجمية للألياف صغيرة ستكون المادة المركبة ضعيفة حيث تنقطع الألياف ضمن المادة الرابطة الواحد تلو الآخر وتكون المادة الرابطة هي المسؤولة عن مقاومة الإجهاد. نكتب الإجهاد عند الانتهيار يساوي إلى :

$$\sigma_x^R = \sigma_m' V_m \quad (2)$$

لنرسم σ_x^R بدلالة V_f حسب العلاقتين (1) و (2) . من العلاقة (1) نجد:

$$V_f = 0 \Rightarrow \sigma_x^R = \sigma_m'$$

$$V_f = 1 \Rightarrow \sigma_x^R = \sigma_f^R$$

نجد من العلاقة (2) :

$$V_f = 0 \Rightarrow \sigma_x^R = \sigma_m'$$

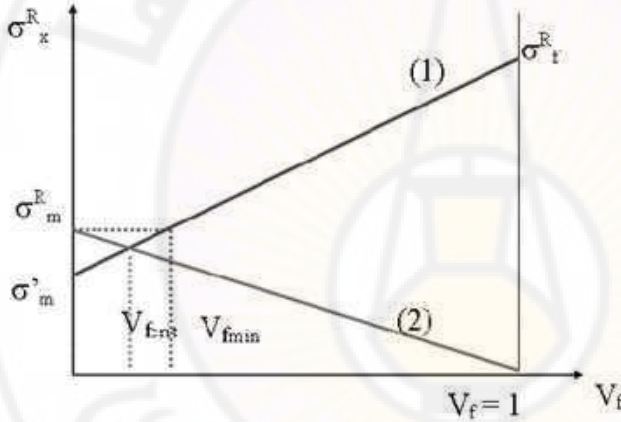
$$V_f = 1 \Rightarrow \sigma_x^R = 0$$

نلاحظ من الشكل السابق انه عند تقاطع المنحنيين (1) و (2) نحصل على ما يسمى بالنسبة الحدية للألياف V_{crit} الذي يساوي إلى:

$$V_{f_{crit}} = \frac{\sigma_m^R - \sigma_m'}{\sigma_f^R + \sigma_m^R - \sigma_m'}$$

يمكن أن نكتب هذه العلاقة أيضا

$$V_{f_{crit}} = \frac{E_m(\varepsilon_m^R - \varepsilon_f^R)}{E_m \varepsilon_m^R + E_m(\varepsilon_m^R - \varepsilon_f^R)}$$



الشكل (A-7) الذي يبين تغيرات إجهاد الشد مع النسبة المئوية للألياف المستخدمة في المادة المركبة.

لكن نجد من الشكل (A-7) الذي يبين تغير إجهاد الشد مع النسبة المئوية للألياف المستخدمة في المادة المركبة ولا يمكن أن نعتبر أن الألياف تدعم المادة الرابطة إلا إذا كان: $\sigma_x \geq \sigma_m^R$

هذا يعني وجود نسبة حجمية أخرى للألياف تدعى النسبة الاصغرية حسب الشكل

السابق حيث يتم تعويض : $V_f = V_{fmin} \Leftrightarrow \sigma_x = \sigma_m^R$

ومنه :
$$V_{f_{min}} = \frac{\sigma_m^R - \sigma_m'}{\sigma_f^R - \sigma_m'}$$

أو :
$$V_{f_{min}} = \frac{E_m(\varepsilon_m^R - \varepsilon_f^R)}{\varepsilon_f^R(E_f - E_m)}$$

سؤال نمونجي : إنتاج الألياف الزجاج - المدعمة لتصميم المواد المركبة:

أ) تحدث باختصار عن كيفية إنتاج ألياف الزجاج، وكيف يتم معالجة هذه الألياف لحمايتها من الضرر السطحي.

عين القيمة الأعظمية لطول الشق عند متانة شد أصغرية لألياف الزجاج مساوية إلى 2,200MPa

علماً أن : - معامل يونغ (المرونة) $E=100 \text{ GPa}$

- طاقة التشوه (الطاقة السطحية) $\gamma = 0.8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$

- تستخدم الألياف الزجاجية على نحو واسع جداً باعتبارها أقل الألياف كلفة وتحتوي المادة المركبة ذات الأساس البوليمري المقوى بألياف الزجاج (GFRP) على الألياف بنسبة حجمية تتراوح بين 30% و 60%.

- يتم إنتاج هذه الألياف عن طريق سحب مصهور الزجاج عبر قوالب من البلاتينيوم مزودة بفتحات صغيرة، حيث تسحب الألياف المستمرة والشعيرات ذات القطر 2mm من خلال صفيحة مسخنة من البلاتينيوم عبر العديد من الفتحات (200-400) فتحة وبسرعة تصل حتى 500m/s .

- تعالج الألياف بعد ذلك عبر طلائها بمواد كيميائية، وتعد هذه المعالجة ضرورية من أجل : 1- منح الألياف اللون والقوام الخاص بها.

2- تحسين مقاومة الأكسدة والاهتراء الاحتكاكي.

3- تحسين القساوة ومقاومة التعب.

-علاقة غريفيث (طاقة الانهيار):

حيث : σ_f الإجهاد الحرج لتوليد الشق $[\text{m} \cdot \text{N}^{-2}]$

γ الطاقة السطحية (طاقة التشوه) $[\text{m} \cdot \text{J}^{-2}]$

E معامل يونغ (معامل المرونة) $[\text{m} \cdot \text{N}^{-2}]$

$$\pi = 3.14$$

a طول الشق [m]

متانة الشد لألياف الزجاج

$$\sigma_f = 2200 \text{ MPa} = 2.2 \text{ GPa} = 2.2 \times 10^9 \text{ N.m}^{-2}$$

الطاقة السطحية $\gamma = 0.8 \text{ J.m}^{-2}$

معامل يونغ $E = 100 \text{ GPa} = 100 \cdot 10^9 \text{ N.m}^{-2}$

حل أول :

$$2.2 \cdot 10^9 = \sqrt{\frac{2.0,8 \cdot 100 \cdot 10^9}{\pi \cdot a}} = \frac{\sqrt{2.0,8 \cdot 100 \cdot 10^9}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{a}}$$

$$(\sqrt{a}) = \left[\frac{\sqrt{2.0,8 \cdot 100 \cdot 10^9}}{\sqrt{\pi} \cdot 2,2 \cdot 10^9} \right]^2$$

$$a = \frac{2.0,8 \cdot 100 \cdot 10^9}{\pi \cdot (2,2 \cdot 10^9)^2} = \frac{2.0,8}{3,14 \cdot 2,2^2 \cdot 10^7} = \frac{1,6}{3,14 \cdot 4,84 \cdot 10^7}$$

$$a = 0,105 \cdot 10^{-7}$$

$$a = 10,5 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

حل ثاني :

$$(2,2 \cdot 10^9)^2 = \frac{2.0,8 \cdot 100 \cdot 10^9}{3,14 \cdot a}$$

$$a = \frac{1,6 \cdot 100 \cdot 10^9}{3,14 \cdot 4,84 \cdot (10^9)^2} = \frac{1,6 \cdot 100}{3,14 \cdot 4,84 \cdot 10^9} = 10,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

ب) باستخدام الجدول المبين صمم مادة مركبة مدعمة لا محورياً وأقل كلفة باعتبار:

القيمة الأصغرية لمتانة الشد المحوري = 1000 MPa

القيمة الأصغرية لمعامل يونغ المحوري = 40 GPa

المادة	E(GPa)	متانة الشد (MPa)	الكثافة (kg / cm^3)
مادة الراتنج	2	60	1
ألياف الزجاج	100	2200	4

• بتعويض القيمة الأصغرية لمتانة الشد المعطاة بعلاقة الإجهاد الكلي للمادة المركبة

σ_c نحصل على :

$$\sigma_c = \rho [\sigma_F \cdot V_f + \sigma_m \cdot (1 - V_f)]$$

$$\sigma_c = 1000 = 1 [2200 V_f + 60 (1 - V_f)]$$

$$(2200 - 60) \cdot V_f = 1060$$

$$2140 \cdot V_f = 1060$$

$$V_f = \frac{1060}{2140} = 0.495 \text{ m}^3$$

$$V_m = 1 - 0.495 = 0.505 \text{ m}^3$$

- للتحقق من القيمة الأصغرية لمعامل يونغ نعوض بعلاقة معامل المرونة للمادة المركبة:

$$E_c = p. [E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f)]$$

$$E_c = 1 \cdot [100 \cdot 0.495 + 2 \cdot (1 - 0.495)] = 0.495 \cdot 100 + 0.505 \cdot 2$$

$$E_c = 49.5 + 1.01$$

$$E_c = 50.51 \text{ Gpa}$$

التصميم يكلف :

$$V_f = 0.495 \text{ m}^3 : V_m = 0.505 \text{ m}^3$$

تقدر الكلفة ب (ل/ kg) والحجم بال m^3

$$1 \text{ kg} = 1 \text{ dm}^3$$

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ dm}^3$$

وبالتالي :

$$V_f = 0.495 \cdot 1000 \rightarrow V_f = 495 \text{ dm}^3$$

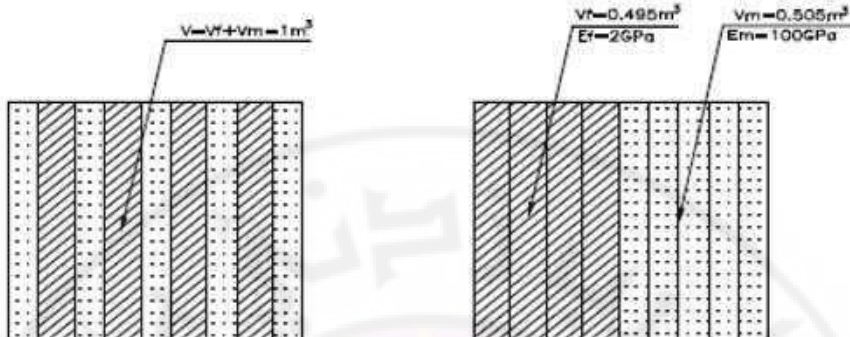
$$V_m = 0.505 \cdot 1000 \rightarrow V_m = 505 \text{ dm}^3$$

$$495 \cdot 4 = 1980 \text{ ل/ dm}^3$$

$$505 \cdot 1 = 505 \text{ ل/ dm}^3$$

$$\Sigma = 2485 \text{ ل/ dm}^3$$

تصميم المادة المركبة المدعمة بشكل لا محوري:



ج) ما هي التغيرات التي قد تطرأ على خواص المادة المركبة في المثال السابق في حال احتواء المادة الرابطة على فقاعات هوائية.

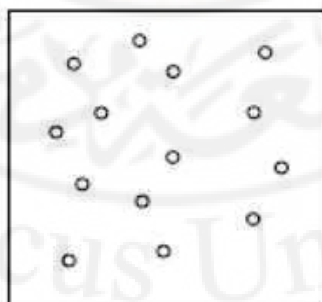
• يؤدي وجود الفقاعات الهوائية ضمن المادة الرابطة إلى زيادة في تركيز الإجهادات الموضعية وذلك نتيجة للتغير المفاجئ في تركيب البنية.

- تقوم المادة الحاضنة في المواد المركبة بالوظائف الثلاث الآتية:

1- نقل الإجهادات إلى الألياف التي تتحمل القسم الأكبر من الحمل.

2- حماية الألياف من الضرر الفيزيائي والتآكل البيئي.

3- التقليل من توليد الشقوق في المادة المركبة بفضل قابلية التطريق (المطيلية) والصلابة.



• يؤدي تواجد الفقاعات إلى إضعاف متانة الربط بين الألياف والمادة الحاضنة البوليميرية.

ف عند تحميل المادة المركبة بحمل ستاتيكي سيؤدي ذلك إلى انسحاب الليف
وخصوصاً في حال كانت الظروف معاكسة للبيئة .

- يؤدي تواجد الفقاعات إلى تقليل قابلية التطريق (المطيلية) والصلابة للمادة المركبة.

وعند تحميل المادة بحمل ستاتيكي (منقول عبر السطح البيني للألياف والمادة
الحاضنة) من المتوقع تحطم المادة (تحطم قصف هش).
بحالة مشابهة لحالة وجود فجوات ضمن بناء قرميدي مما يؤدي إلى إضعاف الربط بين
أحجار القرميد والاسمنت.

ينهار التركيب تحت تأثير الحمل والإجهاد الممتد عبر السطح.

5-B-13 - بعض طرق تصنيع المواد المركبة البوليميرية:

1-5-B-13 - طريقة تصنيع البروفيلات من المواد المركبة البوليميرية

:Pultrusion

*-السؤال: اشرح مع الرسم طريقة تصنيع المقاطع من المود المركبة
"Pultrusion".

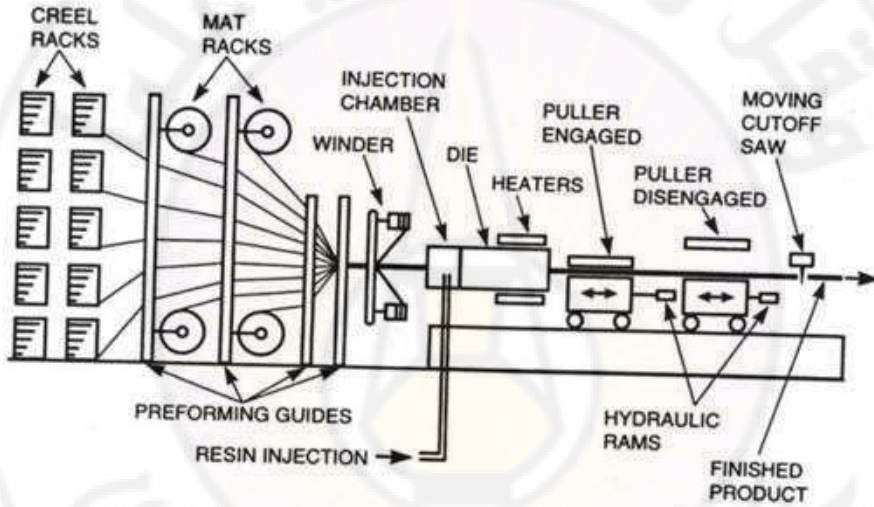
Pultrusion - هي الطريقة المستخدمة من أجل تصنيع قضبان بأشكال متنوعة مثل
القضبان المستديرة أو مقاطع عرضية مختلفة ذات شكل وأبعاد ثابتة على كل طول
القضيب. تماثل هذه الطريقة عملية سحب القضبان الفولاذية الطويلة. أمثلة على بعض
المنتجات المصنعة من هذه القضبان عصي الغولف، صنارة صيد السمك، محاور
الآلة، سكك التوجيه، الموجهات، ممرات للمشاة.... الخ.

مراحل التصنيع بطريقة **Pultrusion** - هي كالتالي:

يتم تزويد مادة التقوية التي هي ألياف غير مجدولة من مقراتها Creel racks. يتم
نقل مجمع الألياف إلى حوض التغطيس أو حجرة حقن الريزن Injection chamber
المحتوي على راتنج التغطيس (الأيبوكسي ، البوليستر أو راتنج آخر).
يفك ويفرد بشكل صفائح مجمع الألياف مع مادة مبطنة بواسطة ميكانيزم خاص ويتم
قبل ذلك إجراء التشكيل المسبق على موجه التشكيل المسبق لمجمع الألياف

Preforming guides وكذلك Winder.

ينقل مجمع الألياف المستمرة المشكلة (بحرقة مناسبة) إلى قالب التشكيل المسخن Die and heaters. يعطي القالب المنتج المطلوب شكل المقطع العرضي ويصلب المنتج. تتم حركة المنتج هذه بواسطة آلية سحب مناسبة Puller. يتم قطع المنتج - القضبان - المصنعة إلى الأطوال المطلوبة بواسطة منشار القطع المتحرك Moving cut-off saw.



مخطط طريقة تصنيع مقاطع المواد المركبة - Pultrusion -

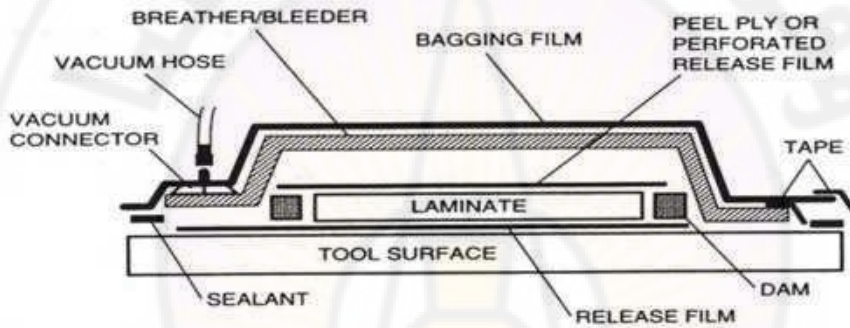
2-5-B-13- القولية باستخدام التخلية:

*- السؤال: اشرح مع الرسم طريقة استخدام التخلية في عملية تصنيع المادة المركبة.

تتم طريقة القولية باستخدام التخلية كالتالي:

توضع وتمد المادة الأساس الخام الشبه منتهية التصنيع -المادة المركبة الأساس عبارة عن ألياف مغطسة بالراتنج وهي بشكل يسمى مسبق الإقحام "PREPREG" - في داخل قالب الجزء المراد تصنيعه 1. إن مادة مسبق الإقحام "PREPREG" عبارة عن مادة خام غير متصلبة وهي مكونة من الراتنج والألياف إن هذه المادة بحالة بلاستيكية متصلبة غير مستقرة.

يتم تغطية هذه المادة المركبة بكيس بلاستيكي مرن 3 ويوضع بين الكيس البلاستيكي والمادة المركبة نسيج قابل للإزالة لا يلصق عليه الراتنج أو نسيج نفوذ 2 وذلك لمنع الالتصاق. إن هذا النسيج مصنوع من الورق أو القماش أو البلاستيك. يضخ الهواء من الفراغ بين المادة المسبقة الإقحام والكيس البلاستيكي من خلال الفوهة 4 وذلك من أجل أن تأخذ 2 شكل القالب 1. وينتج بذلك تخلية فراغ بين 1 و 3 مع تأثير الضغط الجوي على 3 وكل الطبقات الموجودة تحته وبذلك تأخذ الشكل الدقيق لجدران القالب 1.



طريقة قالب التخلية (الفاكيوم). 1- القالب Tool Surface. 2- الراتنج والألياف Laminat. 3- كيس بلاستيكي (غطاء).

4- مصيدة تخلية. 5- مقط احكام Tape. 6- مانعة مطاطية Sealant. 7- طبقة تغطية جيلاتينية (مادة نزع عن القالب). 8- نسيج عدم التصاق، Release Film نسيج إسال. 9- غطاء. 10- أنابيب بخار.

يثبت الكيس البلاستيكي من نهايته ليؤمن اتصال محكم لا يسمح بتسرب الهواء إلى القالب 1 وذلك بواسطة مقامط 5 وجوانات 6. يتم تزويد طبقة طلاء جيلاتينية gel coat 7 بين 1 و 2 لتسهيل لفظ المنتج النهائي من القالب.

يجب الانتباه وملاحظة توضع وتوجه الألياف وذلك عندما يتم وضع الراتنج والألياف يدوياً في داخل القالب. كذلك يحتاج لتوضع وتوجه الألياف في مسبق الإقحام عندما نستخدم أكثر من طبقة واحدة. يمكن كذلك أن يبخ الراتنج والألياف إلى داخل القالب. يتم إجراء العملية الموصوفة سابقاً في درجة حرارة الغرفة وهي خطوة تمهيدية قبل وضع المادة المركبة في غرفة مسبقة التسخين لتسريع عملية التصلب.

يغلق القالب بشكل محكم مانعاً تسرب الهواء وذلك بالغطاء 9 الذي تؤثر عليه قوة ضغط الإطباق ويضغط مساوٍ إلى [345 KPa] يطبق هذا الضغط على 1 من أجل الإحكام والضغط بإحكام لطبقات الراتنج وألياف التقوية على القالب. يسخن بعد ذلك القالب في حجرة مسبقة التسخين وذلك بواسطة البخار أو الماء الساخن. يتم إنهاء المنتج ومن ثم نزعها من 1.

3-5-B-13-مبادئ القولبة بنقل الراتنج :

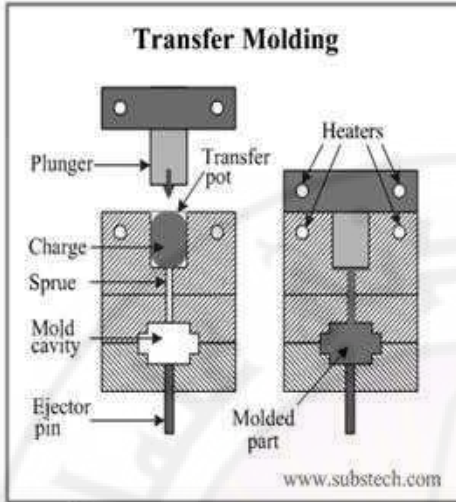
(THE RESIN TRANSFER MOULDING -RTM-)

*-السؤال: اشرح باختصار المبادئ الأساسية للقولبة بنقل الراتنج (RTM) وذلك

فيما يتعلق بالتصميم والإنتاج للبلاستيك المقوى بالألياف؟

تعتمد طريقة القولبة بنقل الراتنج على صب الراتنج مخلوط بمواد من أجل التقسية (الكتاليسيت) وتدفع إلى داخل القالب بواسطة مكبس ضاغط. توضع مواد التقوية، الألياف، بالقالب قبل بدء العملية. إن هذه التقنية بديلة عن القولبة اليدوية للراتنج والبخ للراتنج والقولبة بالضغط. تستعمل هذه العملية عادة لإنتاج القطع ذات الحجم المتوسط - تتم العملية كما يلي :

- يملأ الرزین 4 في حجرة اسطوانية الشكل في القالب 3. وعندما يتحرك القسم العلوي للقالب 1 باتجاه الأسفل يدفع المكبس كتلة البلاستيك لمنطقة المنتج 5 للقالب 2 عبر قناة التغذية 2 وعندما تنتهي عملية القولبة ينزع المنتج عن طريق مسمار اللفظ 7. يسخن القالب مسبقاً قبل بدء العملية وتتولد حرارة إضافية خلال عملية حقن الراتنج وعبره من خلال القنوات الضيقة والمقاطع الرقيقة للمنتج -الجدران الرقيقة للمنتج- .



- 1-القسم العلوي للقالب الضاغط Plunger.
- 2-القالب المحتوي على فجوة القالب Mold .
- 3-القسم المتوسط للقالب المحتوي على الشحنة .
- 4- شحنة الراتنج Charge .
- 5-منطقة الجزء المكون للشكل Mold Cavity .
- 6-المنتج Molded Part .
- 7-قلم اللفظ Ejector Pin .
- 8-قناة تغذية براس مدبب Sprue.

إن طريقة (RTM) مناسبة لتصنيع المنتجات ذات الأشكال المعقدة نسبياً وذات الجدران المختلفة السماكات. عندما يتدفق الرززين خلال المقاطع الضيقة للمنتج يساعد الجريان والحرارة المتولدة على تحقيق تجانس إضافي للراتنج، وعلى المزج الجيد مع ألياف التقوية في داخل القالب والحصول على نوعية عالية لمنتج المادة المركبة.

- القوالب المستخدمة في طريقة "RTM" مكلفة أكثر من طريقة القوالب الضاغطة كما أن هنالك كمية مفقودة من الراتنج في قناة التغذية. تستخدم هذه الطريقة في تصنيع عدد من أجزاء السيارات و الطائرات .

- بقدر ما يؤخذ التصميم بعين الاعتبار فإن هذه الطريقة تضمن دقة عالية ونوعية عالية وأبعاد مستقرة وتسامح مناسب والعملية مرتفعة المردود، لذلك تستخدم للإنتاج الكمي من ألف إلى عشرة ملايين قطعة.

*-السؤال: ناقش المتطلبات لموانع المداخل في أنظمة الدفع العكسي لمحركات الهواء في الطائرات ولماذا اختيرت طريقة (RTM) لتصنيع الايبوكسي المقوى بألياف الكربون لهذه الموانع ؟

(a) موانع الدخول بشكل عام :

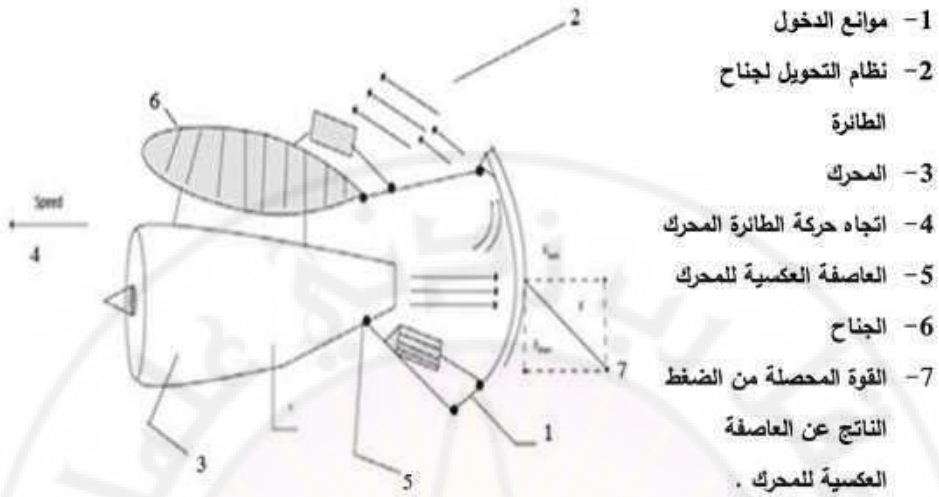
الدفع العكسي له عدة أنواع من موانع الدخول. النمط الصدفي الشكل يستخدم مدخلان في الطرف الخلفي من المحرك اللذان يحرقان معاً الهواء المنطلق ليتدفق باتجاه

معاكس لاتجاه الحركة وهي الطريقة الشائعة والبسيطة المستخدمة في محركات JT8D المستخدمة في محركات البوينغ 737-100-200 .

قنوات C هي الطريقة الحديثة ولها عدة فوائد. الفائدة الأساسية هي الدفع العكسي. قنوات C بشكل نصفين وللدفـع العكسي توجد جلبـة متحركة عندما ترجع إلى الـوراء تفتح فتحات الدخول للهواء فيدخل الهواء وينحرف عبر موجهات للحركة التي توجه الهواء باتجاه معاكس لاتجاه الحركة. والفائدة الأخرى لهذا النمط تخميد الضجيج والأصوات العالية وهناك أنماط أخرى مستخدمة مشابهة لقنوات C ولكن لا تكون على نصفين وإنما بشكل دائري كامل. ويستخدم هذا النوع بشكل شائع في وحدات RB 211-524 و G/H. ويستخدم أيضاً جلبـة متحركة ومداخل ذات موانع ليحرف اتجاه الهواء بالاتجاه المعاكس لحركة الطائرة.

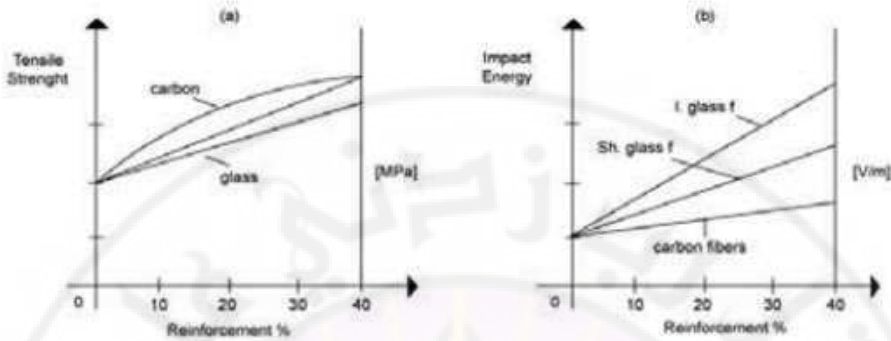
نظام الدفع العكسي يعمل دائماً مع الفرامل من أجل تخفيف السرعة أثناء هبوط الطائرة عندما تلامس الطائرة الأرض. وتستخدم بشكل فعال في حال فشل الفرامل أو في حال وجود مدرج طائرة قصير .
متطلبات التشغيل وظروفه:

موانع بوابات الدخول مصممة بشكل عام في الدفع العكسي على أساس ظروف التحميل العالية : ضغط العاصفة المتشكلة والحرارة العالية لغازات العادم والمحرك المشتعل والاهتزازات والصدمات التي تنتج عند بداية التشغيل للمحرك وأكثر من ذلك يجب أن تكون المكونات ذات وزن خفيف ومواصفات متانة عالية وأيضاً يجب أن تكون قادرة على تحمل تعب كبير. وتتضح فائدة موانع الدخول في الشكل 1.

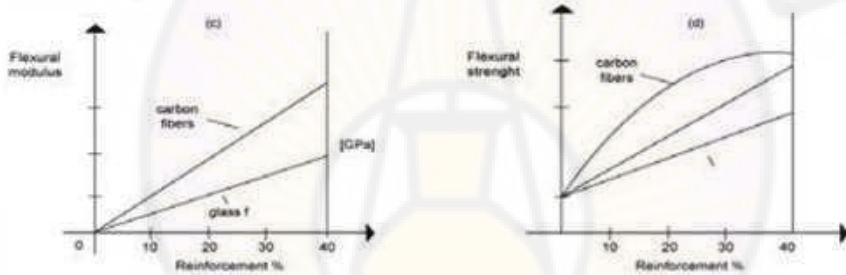


مادة موانع الدخول :

المادة المختارة هي ألياف الكربون مع الأيبوكسي وهي المادة المناسبة لهذا النوع من التطبيقات. تستبدل الآن الأجنحة لطائرات الهليكوبتر بمواد مصنوعة من المواد المركبة من الألياف S الزجاجية ومادة الأيبوكسي. حيث تمتاز هذه المواد المركبة بصفات عالية من الصلابة والمتانة والمرونة ومقاومة الحرارة والتعب. تمتاز الألياف الزجاجية S بمواصفات حياة تعبئة أفضل من الألياف الزجاجية E وهي قريبة ومتفوقة على المواد المركبة المقواة بالكربون أو بالاراميد. واصبحت الآن ألياف الكربون أو ألياف الزجاج المقوية للبلاستيك متطورة في مجال التطبيقات ذات الحرارة العالية حتى 300 درجة مئوية مع الاستخدام المستمر. وهي مستعملة أيضاً في DC-10 وأيضاً في طائرات بوينغ 727 و 777. خفض البلاستيك المقوى من استهلاك الفول بنسبة 2% . يمكن أن يخفض استبدال المواد المصنعة للطائرات بمادة الأيبوكسي المقوى بالغرافيت من التكلفة ومن الوزن بنسبة 30% مع تحسين التعب ومقاومة الاهتراء. تبين الأشكال التالية مخططات متانة الشد مع نسبة التقوية وقوة الصدم مع نسبة التقوية و معامل الالتواء مع نسبة التقوية و متانة الالتواء مع نسبة التقوية.



مخططات متانة الشد / % لمادة التقوية (ألياف متنوعة)، طاقة الصدم / % لمادة التقوية.



تغير خواص المادة المركبة معامل الالتواء / % لمادة التقوية (ألياف متنوعة)، متانة الالتواء / % لمادة التقوية.

13-B-6- تأثير العوامل الجوية على المواد المركبة ذات الأساس البوليميري:

يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار تأثيرات العوامل الجوية على المواد المركبة في المراحل الأولى من التصميم والا فإن تكرار التصميم والانهيار سيؤدي إلى مضیعة للوقت والمال. تكون عادة درجة تأثر المواد المركبة بكل عامل من العوامل الجوية على حدة مختلفا. فمثلا من أجل تصميم ريشة عفة من مواد مركبة فإن درجة الحرارة والرطوبة هما من أكثر العوامل الجوية التي يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار. سوف يتم تحديد تأثير هذين العاملين الجويين بشكل منفصل. على كل حال سيكون لدمج تأثير هذين العاملين الجويين تأثيرات سلبية أكثر على الخواص الميكانيكية من تأثير كل عامل على حدة. وسيتغير نمط الانهيار عند درجات حرارة أعلى من أجل نفس مستوى

الرطوبة. ستكون التأثيرات الأساسية للعوامل الجوية على المادة الرابطة ومن المحتمل على السطح البيني في حين يكون تأثير الألياف أقل عند نفس الشروط من درجة الحرارة والرطوبة. في الحقيقة إن الدور الأساسي للمادة الرابطة هو حماية الألياف من التأثيرات الجوية الكيميائية.

1-6-B-13-درجة الحرارة :

تتعرض المواد المركبة خلال مراحل الاستثمار إلى تغيرات في درجة الحرارة من 20-°C وحتى 50°C. إن تعرض بعض البوليمرات لدرجات حرارة منخفضة يجعلها أكثر قسافة في حين يزداد معامل المرونة.

تم تنفيذ العديد من التجارب لتقييم استجابة المواد المركبة لدرجات الحرارة العالية. لقد تبين أن تأثير درجة الحرارة على السطح البيني لليف والمادة الرابطة مثل تأثيره على خواص الألياف والريزين. تبين أيضاً انخفاض الخواص الميكانيكية عند درجات الحرارة العالية مثل مقاومة الضغط، مقاومة الشد العظمى. تمت دراسة تأثيرات درجة الحرارة على خواص التحطم بشكل موسع حيث تبين انخفاض طاقة التحطم للسطح البيني بمقدار 25-30% عندما تزداد درجة الحرارة من 50°C إلى 100°C.

تم استنتاج تأثير درجة الحرارة على الخواص الميكانيكية للمواد المركبة من الاجهادات الداخلية الناتجة عن اختلاف عوامل التمدد الحراري لمكونات المواد المركبة. يزداد تغير هذه الاجهادات الداخلية مع تغير الحرارة. يسبب في بعض الحالات تغير الإجهاد تصدع المادة الرابطة عند درجات الحرارة المنخفضة جداً. تمتلك كل مادة بوليميرية في التطبيقات العملية مجال درجة حرارة تشغيل خاصة بها. وينبغي أن تكون درجة حرارة التشغيل العظمى أقل من درجة حرارة التحول الزجاجي التي هي درجة الحرارة التي يتحول عندها البوليمير من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة أو المطاطية، حيث تعاني المادة البوليميرية انخفاضاً كبيراً في خواصها الميكانيكية عند هذه الدرجة. سيزيد دمج تأثير درجة الحرارة مع الرطوبة من حدة المشكلة عن طريق انخفاض إضافي في درجة حرارة التحول الزجاجي بالإضافة إلى الخواص الأخرى.

2-6-B-13- الرطوبة :

يمكن أن تنتشر جزيئات الماء ضمن شبكة المواد المركبة لتؤثر على الخواص الميكانيكية. يزيد التعرض لفترة قصيرة للماء من متانة التحطم، بينما يؤدي التعرض لفترة طويلة إلى انخفاض المتانة. تنخفض مقاومة الشد العظمى ومعامل المرونة مع زيادة محتوى الرطوبة، يمكن أن يصل هذا الانخفاض إلى % 50 - 90. عندما تنتشر الرطوبة في المواد المركبة فإنها تؤدي إلى انهيار السطح البيني، وانخفاض درجة حرارة التحول الزجاجي، وانتفاخ، وتلدن، وحلمهة وأحيانا تشقق المادة الرابطة. من الضروري التنبؤ بانتشار الماء وتأثيرها على خواص الرزين للتنبؤ بسلوك المادة المركبة. يتم قياس امتصاص الرطوبة بالزيادة الحاصلة في الوزن.

1-2-6-B-13- امتصاص الرطوبة في المواد المركبة البوليميرية:

تخضع المواد المركبة البوليميرية المعرضة للرطوبة للعديد من التغيرات الفيزيائية. أظهرت التجارب إن الحلمهة والتلدن هما السببان الرئيسيان لانحلال المواد الرابطة البوليميرية والمواد المركبة ذات الأساس البوليميري خلال عملية التعتيق hygrothermal .

قبل التعمق في دراسة عمليات الانهيار (degradation)، من المهم جداً فهم آليات الانتقال وعمليات الانتشار في المواد المركبة البوليميرية .

تتفكك جزيئات الماء على سطح المادة البوليميرية وتنتشر خلال المادة المركبة بواسطة سلسلة من الخطوات تحت تأثير القوة الناتجة عن فرق التركيز. كلا من قابلية الذوبان والانتشار متضمنتان في هذه العملية.

الانتشار عملية يتم خلالها انتقال جزيئات الماء من مكان إلى آخر كنتيجة للحركة العشوائية للجزيء.

يتصف سلوك الانتشار الكلاسيكي في المواد الرابطة البوليميرية بما يلي :

1- الحالة الأولى أو انتشار Fickian : معدل الانتشار أقل بكثير من معدل

حركة الجزيء .

2- الحالة الثانية : معدل الانتشار أكبر بكثير من معدل حركة الجزيء. ويعتمد الانتشار بشكل كبير على آليات الانتفاخ (swelling) .

3- الانتشار الشاذ أو non-Fickian: تقارن معدل الانتشار وقابلية حركة الجزيء. يمكن أن يعتبر السلوك الشاذ كحالة وسطية بين أنواع الانتشار (الحالة الأولى والثانية) .

حللت بيانات امتصاص الرطوبة باستخدام نمطي الانتشار Fickian و non Fickian

1- انتشار Fickian الكلاسيكي :

يُتصف انتشار Fickian بالسمات التالية :

1- كل من منحنيات امتصاص الرطوبة هي توابع للجذر التربيعي للزمن وخطية في المرحلة الأولى وتمتد الخطية حتى $M_t / M_m = 0.6$

حيث M_t : الرطوبة الممتصة من قبل المادة المركبة في الزمن t .

M_m : محتوى الرطوبة الأعظمي الممتصة من قبل العينة .

2- التناظر المتعكس بين كسب الوزن للعينة الجافة في البداية وفقد الوزن للعينة المشبعة عندما يكون معامل الانتشار ثابت .

3- ينخفض معدل الانتشار بعد الجزء الخطي حتى الوصول إلى محتوى رطوبة التوازن.

4- يطبق سلوك الامتصاص على طبقة صغيرة جداً. تتوافق منحنيات الامتصاص

التي يتم الحصول عليها برسم الخط البياني لـ M_t / M_m مع $\sqrt{t/h}$ بغض

النظر عن سماكة العينة. حيث t : الزمن و h : سماكة العينة.

5- معامل الانتشار D تابع لدرجة الحرارة (كلفن) ويمكن أن يعبر عنه بالعلاقة :

Ea : طاقة التنشيط

حيث D_0 ثابت

K : درجة الحرارة بالكلفن

R : ثابت الغازات العام

يجب ملاحظة أنه لا يتوافق نمط الانتشار Fickian مع جميع درجات الحرارة ومحتوى الرطوبة.

تفترض نظرية انتشار Fickian أنه يحدث خلال عملية امتصاص الرطوبة فقط التفاعلات الفيزيائية العكوسة في المادة الرابطة البوليميرية.

2- انتشار Non-Fickian :

لوحظ في العديد من الحالات أن سلوك الانتشار لا يتوافق مع انتشار Fickian وتبين حدوث زيادة تدريجية في محتوى رطوبة مع محتوى رطوبة توازن لن تحقق أبداً. يحدث الامتصاص على مرحلتين حيث الامتصاص الأولي سريع وتابع خطي للجذر التربيعي للزمن. بعدئذ يقترب منحنى الامتصاص من شبه التوازن ليقترّب من ثم من التوازن الحقيقي.

تتصاحب الزيادة السريعة في محتوى الرطوبة بتشوهات كبيرة وانهيار ميكانيكي. وأخيراً يحدث فقد الوزن الذي ينسب للانحلال الكيميائي والفيزيائي للمادة غير القابل للعكس.

2-2-6-B-13- العوامل المؤثرة على عامل الانتشار :

يمكن أن يعرف الانتشار بأنه عملية تنتقل فيها المادة من مكان إلى آخر كنتيجة للحركة العشوائية لجزيئات المادة. يصف معامل الانتشار نسبة (معدل) انتشار الجزيئات، اعتماداً على حجم الجزيئة، اللزوجة، درجة الحرارة. إن معامل الانتشار تابع لدرجة الحرارة ولقد تبين ازدياد عامل الانتشار مع زيادة درجة الحرارة. يرتبط معامل الانتشار مع درجة الحرارة وفق العلاقة التالية :

Ea : طاقة التنشيط

حيث D_0 ثابت

K : درجة الحرارة بالكلفن

R : ثابت الغازات العام

بما أن هذه العلاقة علاقة أسية فإن أي تغير بسيط في درجة الحرارة أو طاقة التنشيط تسبب تغير كبير في معدل الانتشار .

تحسب طاقة التنشيط لعملية الانتشار بإيجاد D عند درجات حرارة مختلفة T . وبرسم المنحني اللوغاريتمي لـ D ومقلوب درجة الحرارة T وتحديد ميل الخط المستقيم الذي يمر من أغلب النقاط، هذا الميل يمثل طاقة التنشيط.

يعتمد معامل الانتشار أيضا على تركيز الرطوبة في الجو، التركيب الكيميائي وعيوب المادة الرابطة مثل الشقوق الميكروية في المادة الرابطة، درجة التصالب (الروابط العرضية) للبولىمير. لقد برهن أن معدل انهيار المادة البولىميرية المعرضة للرطوبة يتعلق مباشرة بمعدل امتصاص المادة البولىميرية للرطوبة. تتأثر عملية امتصاص الرطوبة بالعوامل الداخلية مثل النسبة الحجمية للألياف وتوجيه الألياف، وبالعوامل الخارجية مثل تركيز الرطوبة ودرجة الحرارة. ولوحظ أيضا تناقص معاملات الانتشار مع زيادة النسبة الحجمية للألياف.

3-2-6-B-13-العوامل المؤثرة على محتوى رطوبة التوازن:

تشير الأدلة التجريبية بأن محتوى الرطوبة الأعظمي غير حساس لدرجة الحرارة لكن يعتمد على تركيز رطوبة الجو. من أجل مادة معينة مغمورة في سائل فإن محتوى الرطوبة الأعظمي M_m ثابت. يتأثر محتوى الرطوبة الأعظمي بالأضرار الموجودة في المادة المركبة وبلاستقرار الكيميائي للريزين .

a- التعتيق Hydrothermal للمواد المركبة :

يسمى تدهور الخواص الميكانيكية للمواد المركبة بعد التعرض لكل من الحرارة والرطوبة بـ Hydrothermal ageing.

Hydrothermal ageing : هو مجموع التغيرات الفيزيائية والكيميائية في المواد المركبة. يمكن أن تكون التغيرات في الخواص الميكانيكية للمواد المركبة بسبب Hydrothermal ageing معكوسة أو غير معكوسة أو كليهما وذلك اعتمادا على زمن التعرض ودرجة الحرارة.

التأثيرات الكيميائية للرطوبة على المواد المركبة ناتجة من تفاعل جزيئات الماء مع واحدة أو أكثر من مكونات المادة الرابطة أو مع الألياف.

تحلل جزيئات الماء روابط المادة البوليميرية مؤدية إلى ذوبان وترشيح الماء القابل لذوبان جزيئات البوليمير. بالإضافة إلى أن منتجات الذوبان تتفاعل مع جزيئات البوليمير مؤدية إلى انهيار إضافي للبوليمير.

إن المواد المركبة تصنع من مجموعة مختلفة من الألياف مع مادة رابطة بوليميرية، فإن معدل التفاعلات الكيميائية مع الرطوبة يعتمد على التركيب الكيميائي والفيزيائي للمواد المركبة. الضرر المسبب للألياف، تصدع المادة الرابطة وفصل السطح البيني بسبب التغيرات الكيميائية الناتجة عن امتصاص الرطوبة مما يغير من الخواص الميكانيكية للمادة المركبة .

1-a- تأثيرات Hydrothermal ageing على المادة الرابطة البوليميرية :

تؤثر الرطوبة على المواد المركبة ذات الأساس البوليميري فيزيائيا حيث تلدن المادة الرابطة وبذلك تخفض درجة حرارة تحولها الزجاجي. التغيرات المسببة نتيجة التلدن والانتفاخ عموما تغيرات عكوسة بإزالة الرطوبة الممتصة من المادة. تتعلق ظاهرة التلدن بالحجم الحر للبوليمير وبانهيار الروابط الهيدروجينية داخل الجزيء. درجة حرارة التحول الزجاجي T_g هو خاصية فيزيائية مهمة في البوليميرات المقساء حراريا مثل الفينيل إيستر، الأيبوكسي .

تعرف درجة حرارة التحول الزجاجي بأنها درجة حرارة حرجة يخضع عندها البوليمير لتغير من حالة زجاجية مرنة إلى حالة مطاطية لزجة. يكون البوليمير عند درجات الحرارة المنخفضة في حالة شبه زجاجية وتميز بالقيم العالية لعوامل المرونة والسلوك المرن والحركة الوحيدة المحتملة للجزيء هي الاهتزاز حول موقع ثابت لأنه لا توجد طاقة كافية لتسهيل الدوران والانتقال. ولكن عندما تزداد درجة الحرارة فإن زيادة الطاقة الحرارية تجعل الاهتزاز والانتقال والدوران ممكنا ويصبح البوليمير عندها مثل الجلد المرن ويحدث الانخفاض الحاد في عوامل المرونة. هذه المنطقة تدعى بمنطقة

التحول. بعد التحول الزجاجي تنخفض خواص المتانة والصلابة للبوليمير مقارنة مع خواص البوليمير عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة التحول الزجاجي .
تأثير فيزيائي آخر للرطوبة على المواد البوليميرية هو توليد إجهادات داخلية بسبب تراكم جزيئات الماء في الشقوق الميكروية والفراغات في المادة الرابطة البوليميرية. تسبب هذه الاجهادات الداخلية انهيارات موضعية (محلية) في المادة.

2-a- تأثيرات Hydrothermal ageing على الألياف:

الألياف الزجاجية، خلافا لألياف الكربون الخاملة، عرضة للتأثر بالرطوبة والانحلال بالماء. لوحظ بأنه يحدث انخفاض المتانة في المواد المركبة ذات الأساس البوليميري والمدعمة بالألياف الزجاج بسبب تطبيق الحمل لفترة زمنية طويلة وهذا الانخفاض يكون أكبر في حال الظروف الجوية الرطبة منها في حال الظروف الجوية الجافة. يمكن أن يوضح التأثير الكيميائي على ألياف الزجاج بالمعادلة التالية التي تظهر سلسلة من التفاعلات مؤدية إلى انقسام روابط الأوكسجين - سيلكون وتحويلهم إلى

Hydroxysilane



يسبب التفاعل الإجمالي، الذي يحفز ذاتيا بسبب الزيادة التدريجية في مستوى الـ PH، الانهيار وتشكيل عيوب في سطح الليف الزجاجي ويؤدي أيضا إلى انخفاض كبير في متانة المواد المركبة المدعم بالألياف الزجاج .

تنخفض متانة الشد، الضغط والقص البيني في المواد المركبة (بوليستر - ألياف الزجاج) المعرضة لـ Hydrothermal ageing.

ألياف الكربون غالبا ما تكون محصنة من هجوم الرطوبة عند درجات الحرارة المنخفضة وأي انهيار بالتالي يكون بسبب انهيار المادة الرابطة البوليميرية. تعاني عموما المواد المركبة البوليميرية والمدعمة بالألياف الكربون من فصل عند السطح البيني وذلك عند درجات حرارة أعلى من 100°C . من جانب آخر تعاني المواد

المركبة البوليميرية المقواة بالألياف الزجاج GFRP من ضرر هام بسبب نقر (pitting) الألياف وفصل السطح البيني (ليف - مادة رابطة) .

لقد تبين أن الماء يسرع معدل نمو الشقوق في ألياف الزجاج ويرجع ذلك لعاملين أساسيين :

1- يخفض الماء الطاقة السطحية للليف الزجاج مسببة انخفاض الطاقة المطلوبة لتشكيل الشق .

2- يخفض الماء الطاقة المطلوبة لكسر الرابطة Si - O بمقدار كبير وهذا يساعد في توليد الشقوق.

3-a- تأثيرات Hydrothermal ageing على المنطقة البينية :

يعرف السطح البيني بأنه منطقة غير متجانسة تقع بين الليف والمادة الرابطة. يجب أن يكون الالتصاق بين الليف والمادة الرابطة جيدا للحصول على خواص مفيدة. لكي تحافظ المادة المركبة على خواصها لدى التعرض للرطوبة فإن السطح البيني يجب أن يقاوم الانحلال بسبب امتصاص الرطوبة.

3-B-6-13- تأثير الرطوبة على المواد المركبة :

يصل محتوى رطوبة التوازن إلى قيمة ثابتة عندما تغمر المادة بالكامل في الماء ولكن تتغير قيمتها مع الرطوبة النسبية عندما تعرض المادة لرطوبة الهواء. يمكن أن يعبر عن محتوى رطوبة التوازن لمادة معرضة للهواء الرطب بالعلاقة التالية :

$$M_m = a \phi^b$$

حيث a و b ثوابت و ϕ الرطوبة النسبية .

4-13-B-6- الأشعة فوق البنفسجية:

الأشعة فوق البنفسجية هي موجة كهرومغناطيسية ذات طول موجي أقصر من الضوء المرئي لكنها أطول من الأشعة السينية سميت بفوق البنفسجية لأن طول موجة

اللون البنفسجي هو الأقصر بين ألوان الطيف. ومداها الموجي يبدأ من 400 نانومتر إلى 10 نانومتر، وطاقتها تبدأ من 3 eV إلى 124 eV.

توجد الأشعة فوق البنفسجية في أشعة الشمس، وتتبعث بواسطة القوس الكهربائي. وكما هي أشعة مؤينة فقد تسبب تفاعلاً كيميائياً، وتجعل العديد من المواد متوهجة. وقد أدرك الكثير من الناس تأثير الأشعة فوق البنفسجية على الجسم مسببة حالات من ضربة شمس، ولكن طيف تلك الأشعة له تأثيرات أخرى قد تكون مفيدة أو مضرّة لصحة البشر.

تتحلل المواد المبلّرة المستخدمة بالمنتجات الاستهلاكية بالتعرض للإشعاع فوق بنفسجي، وتحتاج إلى إضافات لمنع الإشعاع كالمواد المحتوية على اللدائن الحرارية مثل البولي بروبيلين والبولي إيثيلين والألياف الاصطناعية المتخصصة مثل الأراميد، يؤدي امتصاص الأشعة فوق بنفسجية إلى ضعف تركيبة المواد، بالإضافة إلى أن العديد من الألوان والأصباغ تمتص تلك الأشعة فيتغير لونها، لذلك يخلط مع معظم الأصباغ والمنسوجات مواد خاصة للحماية من الشمس والإشعاع.

5-6-B-13-التأثيرات المتزايدة لأشعة الشمس فوق البنفسجية على المواد;

تمتص مجموعة واسعة من المواد البوليميرية الصناعية والموجودة بشكل طبيعي الإشعاع الشمسي فوق البنفسجي وتتعرض لتغيرات في تفاعلات الأكسدة الضوئية والحرارية التي تتسبب بانحلال المادة. يمكن أن يتراوح الانحلال الذي تعانيه هذه المواد من تغير لون السطح الذي يؤثر على جمالية شكل المنتج وحتى انخفاض كبير في الخواص الميكانيكية للمنتج. إن أكثر البوليميرات شيوعاً والمستخدمات في مجال البناء تحتوي (Photostabilizers) للتحكم بالضرر الناتج عن الضوء ويضمن عمر خدمة مقبول تحت تأثير العوامل الخارجية. إن استخدام المواد البلاستيكية في مجالات البناء هو استخدام شائع في الدول المتقدمة بسبب التكلفة المنخفضة والاستخدام السهل لمكونات البلاستيك مقارنة مع المعادن التقليدية، الزجاج، الخشب، الاسمنت ومواد أخرى .

إن درجات حرارة الجو العالية مسئولة عن انخفاض عمر الخدمة للمنتج حتى زيادة صغيرة في مستوى الإشعاع فوق البنفسجي الشمسي يمكن أن يسرع عملية التدهور وذلك في المناطق التي فيها درجة حرارة المحيط عالية، على سبيل المثال تتناقص مقاومة الشد للفينيل كلوريد، PVC، للأنايب المعرضة لمدة 24 شهر في المملكة العربية السعودية بمقدار 43 % بينما التعرض لنفس الفترة في فلوريدا يسبب انخفاض بمقدار 26 %.

يحدد الانخفاض في عمر الخدمة بسبب زيادة الإشعاع فوق البنفسجي لأية مادة بواسطة :

1- توزيع كثافة التدفق الطيفي للإشعاع الشمسي والعوامل الجوية مثل درجات الحرارة العالية.

2- الحساسية الطيفية وميزات استجابة المادة لجرعة الإشعاع .

3- فعالية الموازنات الضوئية المتوفرة والمعرضة للظروف الضوئية المتبدلة بشكل طيفي.

المواد الفعالة التي تمتص الضوء مثل benzophenones, benzotriazoles و الفينيل ايسثير بالإضافة إلى موازنات الضوء هندريد أمين hindered amine light stabilizers

يمكن أن يظهر في معظم المواد نوعان خطيران من الأضرار الناتجة عن الضوء وهذان الضرران هما :

1- الاصفرار .

2- النقص في الخواص الميكانيكية.

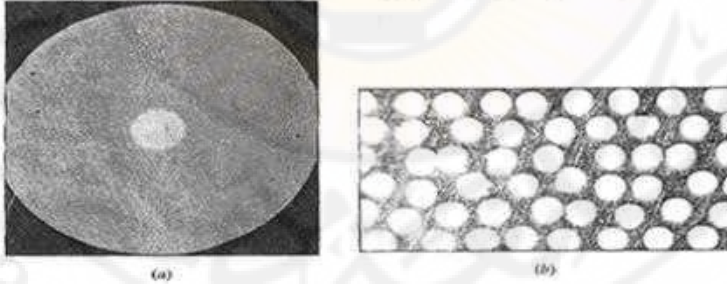
METAL-MATRIX AND CERAMIC-MATRIX- 13-C COMPOSITES

13-C-1 - المادة المركبة ذات المادة الحاضنة - المعدنية (MMCs):

جرى بحث المواد المركبة ذات المادة الحاضنة -المعدنية بشكل مكثف جداً على مدى السنوات الماضية بحيث أنتج العديد من المواد الجديدة العالية المقاومة إلى الوزن. لقد طورت معظم هذه المواد لصناعة المركبات الفضائية، و قد تم استعمال بعضها في تطبيقات أخرى مثل محركات السيارات. بحسب نوع التقوية تميز ثلاثة أنواع رئيسية من MMCs هي المقواة بألياف - مستمرة، و المقواة بألياف - مقطعة، و المقواة بالحبيبات .

13-C-1-MMCs المواد المركبة المقواة بألياف -مستمرة:

يؤدي استخدام الألياف الدقيقة المستمرة إلى تحسين أعظمي لمعامل يونغ (معامل المرونة) و للمتانة لـ MMCs. إن أول MMCs المطورة ذات الألياف المستمرة كانت النظام المقوى بألياف البور ذي المادة الحاضنة من خليطة ألومنيوم. يصنع ليف البور بواسطة ترسيب بخار البور على نواة مركزية من سلك تنغستين الشكل (a - B-1).



الشكل (B-1)

(a) 100µm - قطر ليف البور الدقيق المحيط بـ 12.5µm -نواة قطر سلك التنغستين .

(b) الصورة الميكروية لمقطع عرضي لمركب خليطة ألومنيوم - بور (تكبير 40 ×) .

يصنع مركب Al-B بضغط الطبقات على الساخن لألياف البور بين رقائق ألومنيوم و بذلك تنتشوه الرقائق حول الألياف و تلتصق بعضها مع بعض. يوضح الشكل B-1 - (b) مقطعاً عرضياً لتكوين خليطة ألومنيوم - مقواة بألياف بور مستمرة.

الجدول (1) يدرج بعض الخواص الميكانيكية لمواد مركبة مكونة من خليطة ألومنيوم مقواة بألياف B. مع إضافة 51%B حجمياً، ازدادت مقاومة الشد المحورية لخليطة الألومنيوم 6061 من 310 MPa إلى 1417 MPa، بينما ازداد معامل يونغ (معامل المرونة) من 69 GPa إلى 231 GPa. إن تطبيقات المادة المركبة Al-B في بعض العناصر البنيوية في جسم المكوك الفضائي المداري.

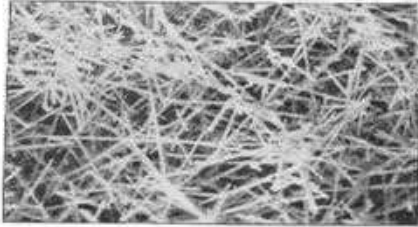
لقد استعمل للتقوية في MMCs ألياف مستمرة أخرى وهي ألياف كربيد السيلكون، و الألومينا، و التتغستن جرى استخدام المادة المركبة من Al 6061 المقواة بألياف SiC المستمرة لمقطع الذيل العمودي للطائرات المقاتلة المتطورة. يوجد اهتمام خاص من أجل الاستخدام المتوقع لتقوية المادة الحاضنة من خلائط التيتانيوم بالألياف المستمرة للطائرة فوق الصوتية.

الجدول (1) الخواص الميكانيكية للمواد المركبة ذات المادة الحاضنة المعدنية				
معامل المرونة		مقاومة الشد		الانفعال حتى الانهيار (%)
Msi	GPa	Ksi	MPa	
				MMCs بالألياف المستمرة:
32	220	211	1458	Al 2024-T6(45%B) (محوريا) 0.810
33.6	231	205	1417	Al 6061-T6(51%B) (محوريا) 0.735
29.6	204	212	1462	Al 6061-T6(47%SiC) (محوريا) 0.89
				MMCs بالألياف المقطعة:
18.4	127	94	650	Al 2124-T6(20%SiC) 2.4
17.7	115	70	480	Al 6061-T6(20%SiC) 5
				MMCs المقواة بالحبيبات:
15	103	80	552	Al 2124(20%SiC) 7.0
15	103	72	496	Al 6061(20%SiC) 5.5
				بدون تقوية :
10.3	71	66	455	Al 2124-F 9
10	86.9	45	310	Al 6061-F 12

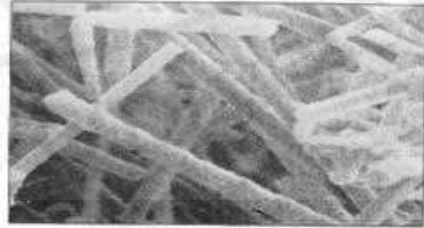
2-C-13- المواد المركبة المقواة بألياف مقطعة و المقواة بالحبيبات :

لقد أنتجت أنواع كثيرة من MMCs المقواة بالألياف المقطعة و المقواة بالحبيبات. تكمن الفائدة الهندسية لهذه المواد بأن لها أعلى مقاومة، و صلابة مرتفعة، وأفضل ثبات أبعاد من الخلائط المعدنية غير المقواة. تتم التقوية بالحبيبات على خلائط الألمنيوم منخفضة الكلفة باستخدام حبيبات غير منتظمة الشكل من الألومينا و كربيد السيلكون بمجال أبعاد حوالي 3 حتى $200\text{ }\mu\text{m}$ في القطر. يتم أحياناً استخدام تغطية خاصة على هذه الحبيبات، يمكن أن تمزج هذه الحبيبات السيراميكية مع خليطة الألمنيوم المصهورة و تصب في القوالب. يشير الجدول (1) إلى أنه يمكن أن تزداد مقاومة الشد النهائية لخليطة 6061 Al من 310 MPa إلى 496 MPa بإضافة 20 بالمئة من SiC، بينما يمكن أن يزداد معامل يونغ (معامل المرونة) من 69 GPa إلى 103 GPa . تتضمن تطبيقات هذه المادة الأجهزة الرياضية و أجزاء محرك السيارة.

أنتجت MMCs المقواة بألياف مقطعة بشكل رئيسي بواسطة تقانة المساحيق وعمليات الإضافة للمصهور. في عملية تقانة المساحيق تُخلط شعيرات كربيد السيلكون شبه الإبري (WHISKERS) التي هي حوالي 1 إلى $3\text{ }\mu\text{m}$ في القطر و من 50 إلى $200\text{ }\mu\text{m}$ في الطول الشكل (B-2) بالمساحيق المعدنية، و تُدمج بالضغط على الساخن و تُبثق أو تُطرق بعد ذلك إلى الشكل المطلوب. يوضح الجدول (1) أنه يمكن أن تزداد مقاومة الشد النهائية لخليطة الألمنيوم 6061 من 310 MPa إلى 480 MPa بإضافة 20 بالمئة من شعيرات SiC، بينما معامل يونغ (معامل المرونة) يمكن أن يرتفع من 69 GPa إلى 115 GPa .



(a)



(b)

الشكل (B-2) الصورة المجهرية لشعيرات كربيد السيلكون الوحيد البذرة المستعملة لتقوية المادة الحاضنة المعدنية. الشعيرات من $1\text{ }\mu\text{m}$ إلى $3\text{ }\mu\text{m}$ في القطر ومن $50\text{ }\mu\text{m}$ إلى $200\text{ }\mu\text{m}$ بالطول.

على الرغم من أنه يمكن أن تتحقق الزيادات الأكبر في المقاومة و الصلابة مع إضافات شعيرات بالمقارنة مع المادة الحبيبية، فإن تقانة المساحيق وعمليات الصهر أكثر كلفة. تتضمن تطبيقات MMCs لخليطة الألمنيوم المقواة بألياف مقطعة أجزاء توجيه الصاروخ وأسطوانات السيارات عالية الأداء.

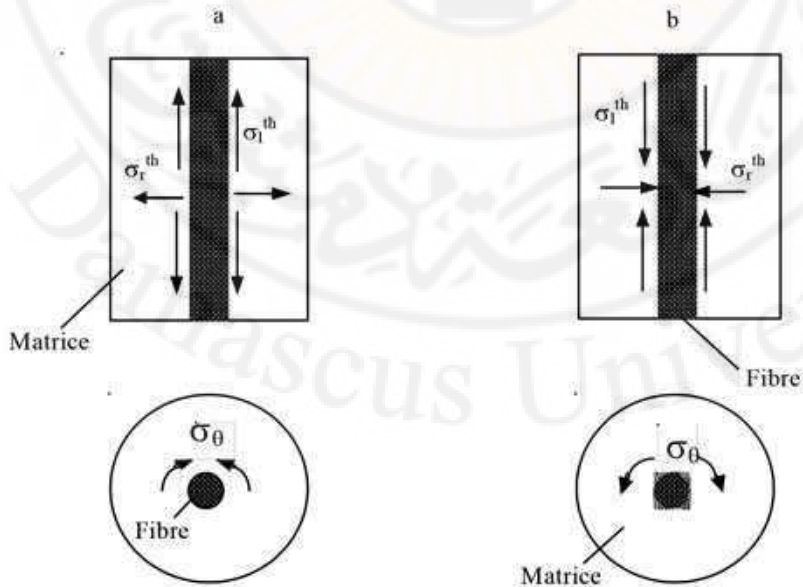
السؤال المطروح : كيف يتم تحديد طول الألياف المستخدمة ؟

مفهوم الطول الحرج للألياف l_c : الطول المناسب للألياف الذي يمكن من خلاله نقل الحمولة المطبقة في المادة المركبة إلى الألياف.

إذا كان طول الألياف أقل من l_c فلن تتحمل المادة المركبة الإجهادات المصممة من أجلها وستتسقق المادة الرابطة وتتهار المادة المركبة.

من الضروري عند اختيار عناصر المادة المركبة ذات الألياف القصيرة تحديد هذا الطول الحرج للألياف l_c .

يجب أن نفهم أن عملية نقل الحمولة من المادة الرابطة إلى الألياف تعتمد بشكل كبير على إجهاد الحصر (القطري) المطبق على الليف من قبل المادة الرابطة الذي يرتبط بمقاومة إجهاد القص في السطح البيني (ليف / مادة رابطة).

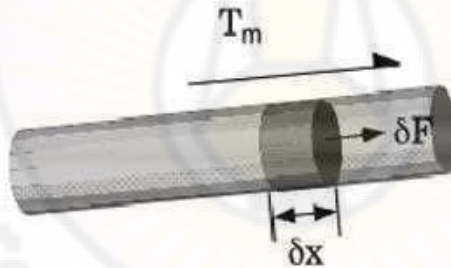


كيف نتصور انتقال الحمولة من المادة الرابطة إلى الألياف :

(محاولة سحب إصبع السبابة من أصابع الكف الأخرى المحاصرة له والشعور بشد السبابة عند نقاط التلامس نتيجة انتقال الحمولة لها لكن لا نشعر بهذا الشد في النهاية الحرة للإصبع. الحمولة تتدرج من الصفر في النهاية الحرة وحتى القيمة العظمى في نقطة التلامس ثم تعود للتناقص من جديد إلى الصفر في الطرف الآخر).

إذاً يستعمل إجهاد القص لنقل الحمولة المطبقة إلى الليف الذي يؤدي دوره بنفس الطريقة ولا يكون إجهاد لشد المؤثر على الليف متساوياً في جميع نقاطه فمن الصفر في نهايته الحرة إلى قيمة معينة في منتصفه ومن ثم تتناقص هذه القوة إلى الصفر في النهاية الحرة الأخرى.

إذا رمزنا إلى إجهاد القص في المادة الرابطة بـ τ_m . بالنظر للعنصر الصغير المظلل بالأحمر.



$$\sigma(x) = \frac{\int_0^x \frac{\pi d}{2} \sigma_m dx}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} = \frac{2 \sigma_m x}{d}$$

القوة العمودية المؤثرة على العنصر الصغير هي δF يجب ان تساوي قوة القص المؤثرة على السطح الجانبي للعنصر الصغير. يمكن ان نكتب:

$$\delta F = \pi \cdot d \cdot \delta x \cdot \sigma_m$$

ونحصل على القوة الكلية المؤثرة على كامل الليف بتكامل هذه العلاقة:

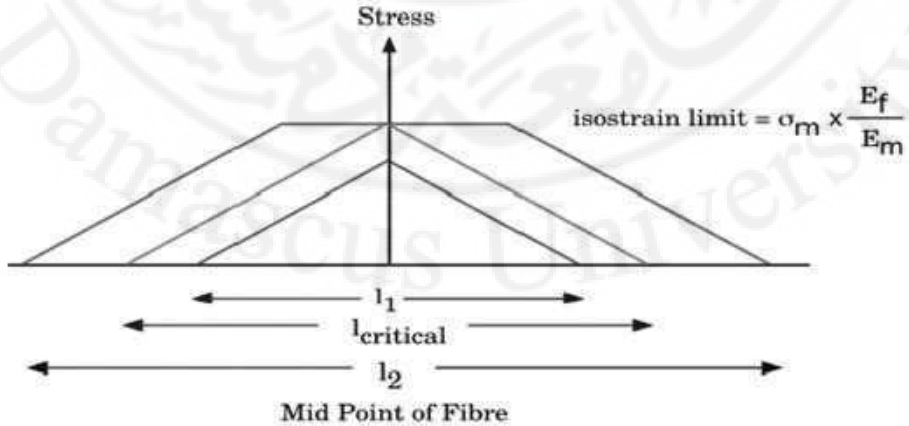
$$F = \int_0^x \frac{\pi d \sigma_m}{2} dx$$

استبدلنا τ_m بـ $\sigma_m/2$ حيث إن الإجهاد الرئيسي العمودي للمادة الرابطة وهو يساوي نصف إجهاد القص حسب نظرية تريسكا (Tresca) (هنا يوجد إجهاد رئيسي واحد مطبق بشكل مواز لمحور الليف).

يمكن الحصول على علاقة الإجهاد المطبق على الليف عند أية نقطة منه بالتقسيم على مساحة مقطع الليف حسب هذه العلاقة يزداد الإجهاد من الصفر في نهاية الليف إلى القيمة الاعظمية في مركز الليف.

يتناول الليف نتيجة الإجهاد المطبق في منتصفه ويجب الحذر من انهيار الليف إذا تخطى الإجهاد المطبق عليه قيمة إجهاد الانهيار. قبل الوصول إلى هذه الحالة من الضروري أن ينشأ انسجام مابين الليف والمادة الرابطة لأن الانفعال الطولي للليف لا يمكن أن يتجاوز انفعال المادة الرابطة القريبة منه.

بقول آخر يمكن أن يزداد الإجهاد في الليف فقط إلى قيمة يكون فيها الانفعال في الليف مساوٍ للانفعال فيما لو كان الليف طويلاً (isostrain rule).



نشاهد تغير الإجهاد على طول الليف l_1 عندما يكون أقل من الطول الحرج l_c وكذلك عندما يكون أكبر l_2 .

$$\sigma_{fmax} = E_f \sigma_m = E_f \sigma_m / E_m = \sigma_m E_f / E_m$$

من اجل المواد الرابطة المرنة يجب ان لا يتجاوز الإجهاد الاعظمي المطبق على الليف، قيمة إجهاد الانهيار للليف:

$$\sigma_{fmax} \leq \sigma_f^R$$

نستخدم الليف بكفاءة أكثر عندما يكون طوله l_c (الطول الحرج للليف). حيث ينهار الليف والمادة الرابطة بنفس الوقت عند نفس الانفعال وبحسب هذا الطول كما يلي:

$$\sigma_f^R = l_c \sigma_m / d$$

$$l_c = \sigma_f^R d / \sigma_m$$

$$l_c = \sigma_f^R d / 2\tau_i$$

حيث τ_i إجهاد القص لروابط السطح البيني مابين الليف والمادة الرابطة

- عندما $l < l_c$ يكون من المستحيل انهيار الليف وسيزداد الإجهاد خطياً مع المسافة عن نهايتي الليف ليصل إلى قيمة أعظمية:

$$\sigma_{max} = l \sigma_m / d$$

لكن لا يلاحظ أي تأثير داعم للألياف على المادة المركبة يمكن أن يصل طول الليف إلى 15 l_c عندها تقترب المادة المركبة من سلوك المواد المركبة ذات الألياف الطويلة.

- حساب عامل المرونة للمواد المركبة قصيرة الألياف

يمكن استخدام نفس الطريقة للحصول على عامل المرونة للمواد المركبة قصيرة الألياف كما فعلنا في المواد المركبة طويلة الألياف.

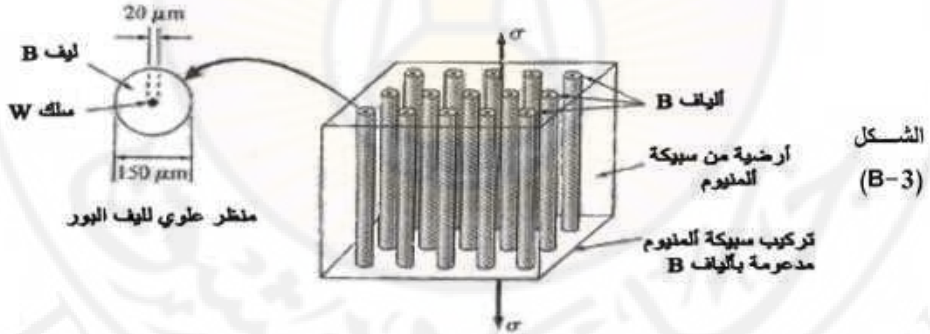
$$E = (1 - f) E_m \left(1 - \frac{1}{2d}\right) \quad \text{عندما } l < l_c \quad \text{نجد}$$

$$E = f E_f \left(1 - \frac{1}{2l}\right) + (1 - f) E_m \quad \text{وعند } l > l_c$$

إذا أردنا حساب عامل المرونة في الاتجاه المتعامد على محور الليف فإننا نستخدم نفس الطريقة التي استخدمت في الألياف الطويلة. لكن في الحقيقة تكون الألياف ذات اتجاه عشوائي في بعض المواد المركبة ذات الألياف القصيرة. لذلك يجب اللجوء لطرق أخرى لأخذ هذا الأمر في الحسبان. يمكن أن تقدر مقاومة المواد المركبة ذات الألياف القصيرة حسب العلاقة التالية:

$$\sigma_c = V_f \sigma_f (1 - l_c/2l) + V_m \sigma_m$$

مثال نموذجي (1): مادة مركبة ذات مادة حاضنة معدنية مصنوعة من خليطة الألمنيوم مقواة بألياف B الشكل (B-3). لتشكيل ليف البور، يغطي سلك التتغستين (W) (r=10 μm) بالبور، معطياً نصف قطر نهائي 75 μm. تلتصق بعد ذلك خليطة الألمنيوم حول ألياف البور معطية جزءاً حجمياً مساوياً إلى 0.65 لخليطة الألمنيوم. بافتراض أنه تطبق قاعدة الخلطات الثنائية أيضاً على الخلطات الثلاثية، احسب معامل مرونة الشد للمادة المركبة تحت ظروف الإيزو انفعال .



الحل:

$$f_{W+B} = 0.35$$

$$E_{comp} = f_W E_W + f_B E_B + f_{Al} E_{Al}$$

$$f_W = \frac{\text{مساحة سلك W}}{\text{مساحة ليف B}} \times f_{W+B}$$

مساحة ليف B

$$f_{Al} = 0.65$$

$$f_W = \frac{\pi(10\mu m)^2}{\pi(75\mu m)^2} \times 0.35 = 6.22 \times 10^{-3}$$

$$f_B = \frac{\text{مساحة ليف B} - \text{مساحة سلك W}}{\text{مساحة ليف B}} \times f_{W+B}$$

$$= \frac{\pi(75\mu m)^2 - \pi(10\mu m)^2}{\pi(75\mu m)^2} \times 0.35 = 0.344$$

$$E_{comp} = f_W E_W + f_B E_B + f_{Al} E_{Al}$$

$$(6.22 \times 10^{-3})(410GPa) + (0.344)(379GPa) + (0.65)(68.9GPa) = 178GPa$$

لاحظ أن معامل يونغ (معامل المرونة) (الصلابة) للمادة المركبة هو حوالي 2.5 مرة من تلك لخليطة الألمنيوم غير المقواة.

مثال نمونجي (2) :

مادة مركبة ذات مادة حاضنة معدنية مصنوعة بـ 80% حجماً من خليطة الألمنيوم 2124-T6 و 20% حجماً من شعيرات SiC. كثافة خليطة 2124-T6 مساوية إلى 2.77g/cm³ و للشعيرات مساوية إلى 3.10 g/cm³. احسب الكثافة المتوسطة للمادة المركبة.

الحل:

القاعدة هي أن كل 1 m³ من المادة المركبة تحتوي 0.80 m³ من خليطة 2124 و 0.20 m³ من ألياف SiC.

كتلة خليطة 2124 في 1 m³ = (2.77 Mg/m³) . (0.80 m³) = 2.22 Mg

كتلة شعيرات SiC في 1 m³ = (3.10 Mg/m³) . (0.20 m³) = 0.62 Mg

الكتلة الإجمالية في 1 m³ من المادة المركبة = 2.84 Mg

الكثافة المتوسطة = الكتلة واحدة الحجم = 2.84 Mg/m³

D-13-المادة المركبة ذات المادة الحاضنة - السيراميكية

(CMCs)

لقد طورت المادة المركبة ذات المادة الحاضنة السيراميكية مؤخراً مع خواص ميكانيكية محسنة مثل المقاومة والمتانة الأعلى من المادة الحاضنة السيراميكية غير المقواة. إن الأنواع الرئيسية الثلاثة بحسب نوعية التقوية هي المقواة بألياف مستمرة، والمقواة بألياف مقطعة، و المقواة بالحبيبات .

1-D-13-CMCs المقواة بألياف مستمرة:

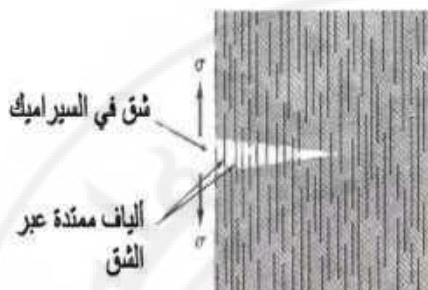
لقد تم استعمال نوعين من الألياف المستمرة لـ CMCs و هما كربيد السيلكون و أكسيد الألمنيوم. لتصنيع المادة المركبة ذات المادة الحاضنة السيراميكية فإنه تنسج في البدء ألياف SiC بشكل حصيرة ويستعمل بعد ذلك ترسيب البخار كيميائياً لتثريب SiC في الحصيرة الليفية. وفي عملية أخرى، فإن ألياف SiC تكون مغلفة من قبل مادة زجاجية سيراميكية. تتضمن تطبيقات هذه المواد أنابيب المبادل الحراري، ونظام الحماية الحراري، والمواد المستخدمة في بيئات التآكل - الاهتراء .

2-D-13-CMCs المقواة (بشعيرات) مقطعة و المقواة بالحبيبات:

تستطيع شعيرات السيراميك أن تزيد بشكل ملحوظ من متانة التحطم للسيراميكيات المونوليتية monolithic (ذات الوحدة المتراسة) الجدول (2). تزيد التقوية بمقدار 20% حجماً من شعيرات SiC لسيراميك الألومينا من متانة التحطم لسيراميك الألومينا من حوالي 4.5 إلى 8.5MPa. تملك المواد ذات المادة الحاضنة السيراميكية المقواة بألياف قصيرة و المقواة بالحبيبات فائدة بكونها قادرة على أن تكون مصنعة بعمليات السيراميك الشائعة مثل الضغط الإيزوستاتيكي على الساخن (Hipping). من المعتقد أنه تصبح المادة المركبة ذات المادة الحاضنة السيراميكية متينة بواسطة ثلاث آليات رئيسية، و جميعها تؤدي إلى ألياف تقوية متدخلة في توليد الشق في السيراميك. وهذه الآليات هي:

1. انحراف الشق Crack deflection. بناء على مواجهة مادة التقوية، فإن الشق يُحرف، ويصبح مساره أكثر تعرجاً. و يتطلب بذلك جهودات أعلى لتوليد الشق.

2. تجسير الشق **Crack bridging**. يمكن للألياف و الشعيرات أن تقوم بتجسير الشق و تساعدان بذلك على بقاء المادة متصلة بعضها مع بعض، مما يزيد من مستوى الإجهاد المحتاج له ليسبب تشققاً أبعد الشكل (C-1).



الشكل (C-1) مخطط تخطيطي يعرض كيف يمكن أن تمنع التقوية بالألياف توليد الشق في المواد ذات المادة الحاضنة السيراميكية و ذلك بتجسير الشق وامتصاص طاقة انسحاب الليف.

3. انسحاب الليف **fiber pullout**. يمتص الكسر المسبب بواسطة الألياف أو الشعيرات المسحوبة من المادة الحاضنة المتشقة طاقة، و بذلك يجب أن تطبق جهودات أعلى لإنتاج تشقق أبعد. لذلك تتطلب رابطة جيدة في السطح البيني بين الألياف والمادة الحاضنة لكي تتوفر مقاومات أكبر. و يجب أن يكون هناك تلاؤم جيد لمعامل التمدد بين المادة الحاضنة والألياف وبخاصة إذا كانت ستستعمل المادّة المركبة في درجات الحرارة العالية.

الجدول (2) الخواص الميكانيكية لمادة مركبة ذات مادة حاضنة سيراميكية مقواة بشعيرات SiC عند درجة حرارة الغرفة.

مئة الانكسار		مقاومة الانعطاف		محتوى شعيرات SiC (% حجباً)	الأرضية
$\sqrt{m}$ Ksi	$\sqrt{m}$ MPa	Ksi	MPa		
4.6-6.4	5-7	60-95	400-650	0	Si_3N_4
5.9-8.6	6.5-9.5	60-75	400-500	10	
6.8-9.1	7.5-10	50-65	350-450	30	
4.1	4.5	...	...	0	Al_2O_3
6.5	7.1	57-73	400-510	10	
6.8-8.2	7.5-9.0	75-115	520-790	20	

مثال نموذجي(3):

مادة مركبة ذات مادة حاضنة سيراميكية مصنوعة من ألياف SiC ضمن مادة حاضنة سيراميكية زجاجية الشكل (C-2). والمطلوب:

(أ) احسب معامل المرونة على الشد للمادة المركبة تحت شروط الإيزوانفعال.

(ب) احسب الاجهاد σ الذي يبدأ عنده الشق بالنمو. حيث لدينا:

المادة الحاضنة السيراميكية الزجاجية: ألياف SiC:

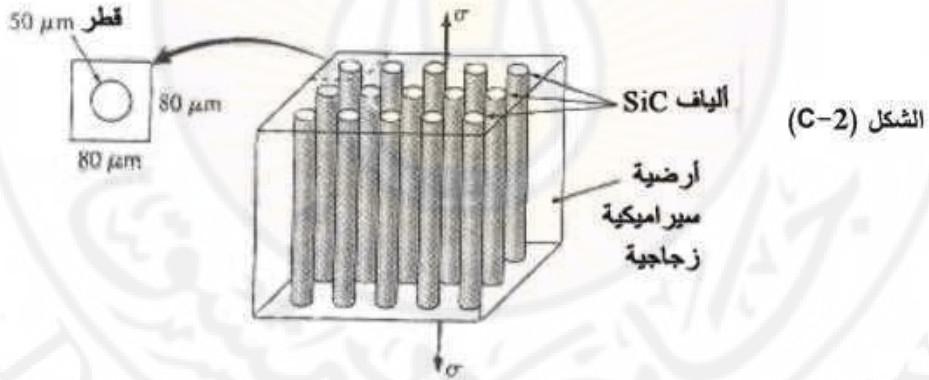
$$E = 350 \text{ GPa}$$

$$E = 94 \text{ GPa}$$

$$K_{IC} = 2.4 \text{ MPa} - \sqrt{m}$$

$$K_{IC} = 4.8 \text{ MPa} - \sqrt{m}$$

الصدع السابق الأكبر هو $10 \mu m$ في القطر الشقوق السطحية الأكبر هي بعمق $5 \mu m$



الحل:

(أ) حساب E للمادة المركبة. بافتراض أن قاعدة المزج تطبق لشروط الإيزوانفعال :

$$E_{comp} = f_{GC} E_{GC} + f_{SiC} E_{SiC}$$

حيث أن طول الألياف يكون نفسه، فيمكننا حساب النسبة الحجمية لألياف SiC بحساب نسبة المنطقة المحتلة بالسطح في نهايات الألياف. من الشكل، كل ليف بقطر $50 \mu m$ يكون محاطاً بمنطقة $80 \mu m \times 80 \mu m$. وبذلك:

$$f_{SiC} = \frac{\text{مساحة الليف}}{\text{المساحة الكلية المختارة}} = \frac{\pi(25\mu m)^2}{(80\mu m)(80\mu m)} = 0.307$$

$$f_{GC} = 1 - 0.307 = 0.693$$

$$E_{comp} = (0.693)(94GPa) + (0.307)(350GPa) = 172GPa$$

(ب) الإجهاد الذي تبدأ عنده الشقوق بالتكون في المادة المركبة. من أجل شروط الإيزوانفعال،

$$\epsilon = \sigma / E \text{ و } \sigma = E\epsilon \text{ حيث } \epsilon_{comp} = \epsilon_{GC} = \epsilon_{SiC}$$

$$\frac{\sigma_{comp}}{E_{comp}} = \frac{\sigma_{GC}}{E_{GC}} = \frac{\sigma_{SiC}}{E_{SiC}}$$

يبدأ التحطم في العينة المعطاة عندما $\sigma = K_{IC} / \sqrt{\pi a}$ (Eq.10.4)، بافتراض أن $Y=1$. يجب أن نحسب الإجهاد الأصغري المسبب لتكون الشق في كلا المادتين و من ثم نقارن نتائجنا، ستحدد المادة التي سوف تنتشق بالإجهاد الأقل قيمة الإجهاد الذي ستبدأ عنده المادة المركبة بالتشقق .

(i) السيراميك الزجاجي. الصدع السابق الأكبر لهذه المادة هو $10\mu m$ في القطر. هذه القيمة هي $2a$ و بذلك $a=10\mu m/2=5\mu m$.

$$\frac{\sigma_{comp}}{E_{comp}} = \frac{\sigma_{GC}}{E_{GC}} = \left(\frac{K_{IC,GC}}{\sqrt{\pi a}} \right) \left(\frac{1}{E_{GC}} \right)$$

$$\sigma_{comp} = \left(\frac{E_{comp}}{E_{GC}} \right) \left(\frac{K_{IC,GC}}{\sqrt{\pi a}} \right) = \left(\frac{172GPa}{94GPa} \right) \left[\frac{2.4MPa - \sqrt{m}}{\sqrt{\pi(5 \times 10^{-6} m)}} \right] = 1109MPa$$

(ii) ألياف SiC. من أجل هذه المادة، $a=5\mu m$ للشقوق السطحية .

$$\sigma_{comp} = \left(\frac{E_{comp}}{E_{SiC}} \right) \left(\frac{K_{IC,SiC}}{\sqrt{\pi a}} \right) = \left(\frac{172GPa}{350GPa} \right) \left[\frac{4.8MPa - \sqrt{m}}{\sqrt{\pi(5 \times 10^{-6} m)}} \right] = 596MPa$$

و هكذا، فإنه ستبدأ ألياف SiC في المادة المركبة السيراميكية بالتشقق أولاً عند الإجهاد المطبق بقيمة 596 MPa .

13-E-13- أنماط الانهيار للمواد المركبة.

13-E-1- مقدمة :

تعتبر المواد المركبة مواد غير متجانسة (Heterogeneous)، حيث تتميز بوجود أنواع متعددة من العيوب المتأصلة فيها والمسببة لنمو الشقوق وانتشارها حتى الانهيار، تكون هذه العيوب إما ألياف مكسورة وفراغات في المادة الراتنجية أو سوء توجيه الألياف أو سطوح تماس مفصولة بين المادة الرابطة والألياف....الخ.

تعتمد نسبة وجود كل نوع من هذه العيوب على عملية التصنيع المستخدمة، لذلك تبدي عادة المواد المركبة أنماط انهيار مختلفة تتضمن تشققات مجهرية في المادة الرابطة، أو انهيارات في الألياف، أو انفصال بين الألياف والمادة الرابطة، أو انفصال الطبقات في الصفيحة متعددة الطبقات، بالإضافة إلى ذلك يمكن أن يحدث العديد من هذه الأنماط في أي وقت دون سابق إنذار .

إحدى المزايا الهامة للمواد المركبة هي متانتها العالية الاستثنائية على الرغم من أنها مؤلفة من ألياف هشة ومواد رابطة ضعيفة وهشة، ويعود سبب ذلك إلى طبيعتها غير المتجانسة وأسلوب تصنيعها .

لا يوجد بشكل عام تعريف واضح للمتانة ولكن يمكن اعتبارها بaramتر تصميمي يعكس استجابة المادة (الحاوية على عيوب داخلية) للجهدات المطبقة والانفعالات الناتجة وذلك بدلالة خصائص التحطم.

لتعيين متانة مادة التي تعتبر مقياساً لمقاومة المادة لانتشار الشق يتم تجريبياً تحديد القيمة الدنيا لمقدار الطاقة اللازمة لإحداث تحطم واحدة المساحة من سطح التحطم. يؤدي ازدياد الطاقة السطحية لتحطم مادة إلى زيادة مقاومتها للتحطم تحت الحمولات الستاتيكية أو الديناميكية وتتم هذه الزيادة في الطاقة عن طريق إعاقة انتشار الشق .

لا تضم عملية التحطم لمادة مركبة تحطم الألياف المحملة والمادة الضعيفة فقط، وإنما أيضاً مجموعة معقدة من حوادث الانهيار المجهرية والمتشعبة التي يمكن أن تحدث على طول هذه السطوح الضعيفة.

سنقوم في هذا الفصل بشرح عملية تشقق المادة المركبة في مستويات بنيوية متعددة. نبدأ أولاً بدراسة كيف يمكن لسلوك شق في مادة رابطة أن يعدل بوجود الألياف الداعمة، وكيف يمكن أن تؤثر الخواص الميكانيكية للألياف نفسها على عملية التشقق للمادة المركبة. هذه التأثيرات مستقلة عن تلك المتعلقة بفعل المواد المركبة المتعددة الطبقات التي تتم فيها عملية التكسير والتشقق بسبب عدم الاستمرارية للسطوح الفاصلة بين الألياف والمادة الرابطة. أما على صعيد كامل البنية فتؤثر على نمو الشق نقاط أخرى، كالسطوح الفاصلة بين الطبقات أو المناطق الغنية بالمواد الرابطة حول حدود الليف.

2-E-13 - انتشار الشق في المواد المركبة :

crack extension in composites

1-E-2-13 - تأثيرات المادة الرابطة على انتشار الشق :

تتراوح النسبة الحجمية للألياف في المواد المركبة بين 10% وحتى 70% من أجل المواد المركبة ذات الأداء العالي، وتأثيرات مقاومة الشق التي يمكن نسبها مباشرة للمادة الرابطة قد لا تكون هامة إلا في المواد المركبة ذات النسبة الحجمية المنخفضة للألياف .

على كل حال هناك ثلاث تأثيرات فعالة وهي:

1- تناقص المتانة الفعالة للمواد الرابطة المطيلية كالمعادن أو المواد اللدنة حرارياً

مع وجود نسبة حجمية مرتفعة للألياف الهشة .

2- من الممكن أن تزداد المتانة الفعالة للمواد الرابطة المرنة ذات المتانة

المنخفضة مع وجود نسبة حجمية منخفضة للألياف لأنه نحتاج في هذه

الحالة إلى تطبيق اجهادات عالية على المادة المركبة لتوليد انتشار حدي

لفتح الشق في المادة الرابطة المدعمة بالألياف.

3- من الممكن أن تزداد المتانة الفعالة للمواد الرابطة ذات المتانة المنخفضة

بوجود الألياف كنتيجة لتباطؤ سرعة انتشار الشقوق في جوار الألياف

الداعمة.

2-2-E-13- تأثيرات الليف على انتشار الشق :

يمكن لبعض أنواع الألياف كالألياف الأراميد أن تصنف كألياف متينة (أي ذات متانة عالية) لأنها قادرة على تحمل تشوهات كبيرة غير مرنة بعد حدوث الخضوع. تبدي عادة مثل هذه الألياف درجة عالية من تسامح العيوب (damage tolerance) وبالتالي يمكن القول بأنه لحزمة من هذه الألياف طاقة تحطم عالية وأنه يمكن أن ينتقل جزء كبير من هذه الطاقة إلى المادة المركبة الحاوية على تلك الحزمة.

من ناحية ثانية تمتلك الألياف الزجاجية والكربونية وحتى ألياف البورون طاقات منخفضة على الرغم من مقاومة الشد والانحناء العاليتين هذه الطاقة من مرتبة (10 - 100 J/m^2)، لا تؤدي هذه الطاقات المنخفضة إلى أية مساهمة مفيدة لطاقة تحطم المادة المركبة حتى لو انكسر الليف عدة مرات. ولكن نتيجة لهذا التكسير المتعدد للألياف يصبح الضرر واسع الانتشار وتصبح ممرات الشق في المادة المركبة معقدة، وتؤدي هذه الممرات إلى أعمال تحطم عالية جدا وبالتالي متانة عالية للمواد المركبة.

3-2-E-13- تأثيرات السطح الفاصل بين الألياف والمادة الرابطة:

تؤثر الألياف على نمو الشق في المواد المركبة ويعتمد تأثيرها على جودة اللصق مع المادة الرابطة. فإذا كان الالتصاق بين الألياف والمادة الرابطة كاملا وقويا فإنه يمكن للشق أن يمر من خلال الألياف والمادة الرابطة دون أن ينتج عن تحطم الليف تحطم في المادة الرابطة وتكون متانة التحطم للمادة المركبة في هذه الحالة منخفضة وتساوي مجموع متانة المكونات المستقلة التي تحسب من قانون المزج التالي :

$$G = 2 [\gamma_f V_f + \gamma_m (1 - V_f)]$$

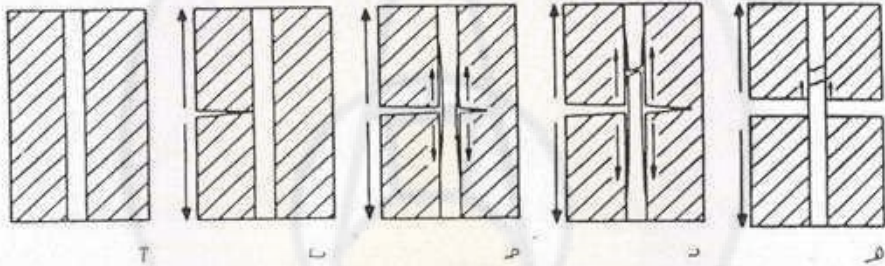
γ_f ، γ_m لا عوامل التحطم لكل من الليف والمادة الرابطة على التوالي .

من ناحية ثانية إذا كان الالتصاق ضعيفا يصبح مسار الشق معقدا وعندها تسهم جميع آليات الانهيار المنفصلة في عمل تحطم إجمالي، تصبح العلاقة السابقة في هذه الحالة غير قابلة للتطبيق.

3-2-E-13- اشتقاق المتانة من العمل الحقيقي للمادة المركبة :

1-3-E-13- حالة مادة مركبة تحتوي على ليف وحيد :

في التطبيقات العملية لإنشاءات المواد المركبة قلما يتم الحصول على جودة لصق عالية للمنطقة الفاصلة بين الألياف والمادة الرابطة وبالتالي نادرا ما يتم حدوث انهيار هش للألياف والمادة الرابطة وبالتالي الانهيار بمتانة منخفضة للمادة المركبة. وتكون عملية انتشار الشق معقدة بسبب حدوث عدد كبير من الآليات المجهرية المختلفة. لكي نميز بين الآليات المجهرية المنفصلة للمتانة والنتيجة عن العمل الحقيقي للمادة المركبة فإنه من المناسب فرض نموذج صناعي مؤلف من مادة رابطة مدعمة بليف وحيد ويحوي على شق ينتشر في المادة الرابطة ويقترّب من الليف المعزول كما في الشكل (E-1).



الشكل (E-1) نموذج اصطناعي مؤلف من مادة رابطة مدعمة بليف وحيد.

يبدأ الشق بالانتشار أولا في المادة الرابطة ويتوقف انتشاره عند وصله إلى الليف وذلك بسبب ما يلي :

- 1- تمنع الصلابة العالية للليف انفتاح الشق في المادة الرابطة .
 - 2- تمنع مقاومة الليف العالية جدا من تحطم الليف تحت تأثير الإجهاد المركز عند رأس الشق في المادة الرابطة .
- فيما يلي عرض لمختلف الآليات المجهرية التي تحدث في المواد المركبة وتسهم في زيادة المتانة .

1- انفصال الليف عن المادة الرابطة :

تميل كل من الألياف والمادة الرابطة عند رأس الشق إلى التشوه بشكل مختلف كلما ازدادت الحمولة على المادة المركبة، ويبدأ ذلك بنشوء إجهاد محلي كبير نسبيا في

الليف ويسبب هذا الإجهاد تقلص محلي لنسبة بواسون مؤدياً إلى انفصال الليف عن المادة الرابطة.

يسبب إجهاد القص في المنطقة الفاصلة الناتج عن تباين عامل يونغ لكل من الألياف والمادة الرابطة، امتداداً في طول الانفصال على طول الليف في الاتجاهين الطولي والعرضي وبعبء عن مستوي الشق. يسمح هذا الانفصال بانفتاح أكبر لطول الشق في المادة الرابطة وراء الليف وتكرر العملية عند الليف التالي وهكذا.

يمكن أن يقود الانفصال في بعض الحالات إلى انحراف كبير لرأس الشق وذلك في الاتجاه الموازي للألياف مؤدياً لفقدان حدة الشق من الممكن عندها أن يتقدم الشق في مستويات أخرى بعيداً عن مستوي الشق الأصلي مما يؤدي إلى زيادة في تعقيد مسار التحطم وبالتالي زيادة في متانة المادة المركبة .

2- العمل الاحتكاكي بعد الانفصال :

ينشأ بعد حدوث الانفصال حركة نسبية بين الليف والمادة الرابطة مع استمرار انفتاح الشق، ويجب انجاز عمل ما يقابل المقاومة الاحتكاكية، ومن الصعب تقدير هذا العمل بدقة لعدم معرفة مقدار القوة الاحتكاكية العاملة. تفترض إحدى التقديرات أن قوة الاحتكاك في المنطقة الفاصلة تعمل على مسافة تساوي امتداد طول الليف المنهار. يسهم هذا العمل بشكل كبير في زيادة متانة المواد المركبة المدعمة بالألياف الزجاجية.

3- انسحاب الليف :

يبقى الليف بعد الانفصال محملاً حتى تحطمه وذلك على طول فعال يساوي الطول المفصول ومن المحتمل أن ينكسر الليف عند أي نقطة داخل هذه المنطقة . تتمدد النهايات المكسورة للليف وتستعيد قطرها الأصلي وتلتصق بالمادة الرابطة من جديد ولكي يسمح للشق بالانفتاح بشكل أكبر وذلك عندما يستمر التحميل فلا بد لهذه النهايات المكسورة أن تتسحب خارج المادة الرابطة لذلك يكون لسطح التحطم الناتج مظهر فرشاة وهذا ما يتميز فيه سطح انهيار معظم المواد المركبة البوليمرية المقواة بالألياف .

من المفيد هنا توضيح تأثير كل من طول الليف واتجاهه على متانة المادة المركبة. يكون عمل الانسحاب للمواد المركبة المقواة بألياف قصيرة أعظميا عندما يكون طول الألياف التقوية مساويا لطول الحرج تماما. أما إذا كانت الألياف متوضعة بزاوية بالنسبة لمستوي الشق وتتهار عند ذلك الألياف بشكل مسبق قبل انسحابها. إذا كانت الألياف هشة فإنها ستخضع للقص عند انسحابها، أما إذا كانت مطيلية فإنها ستسهم بمتانة إضافية.

من الجدير بالملاحظة أنه يجب أن تزداد دائما متانة المواد المركبة بزيادة النسبة الحجمية للألياف أو بزيادة قطر الليف أو باستخدام ألياف أقوى . من ناحية أخرى وخلافا للتوقعات يخفض عادة تحسين جودة اللصق بين الألياف والمادة الرابطة من المتانة وذلك لأن اللصق الجيد يمنع من حدوث انفصال الليف عن المادة الرابطة.

في الخلاصة تشير معظم الدراسات إلى أنه تعزز عملية الانسحاب من المتانة بشكل رئيسي لأنها تمتص طاقة أكبر من تلك الممتصة من عملية الانفصال على الرغم من حدوث عملية الانفصال قبل عملية الانسحاب.

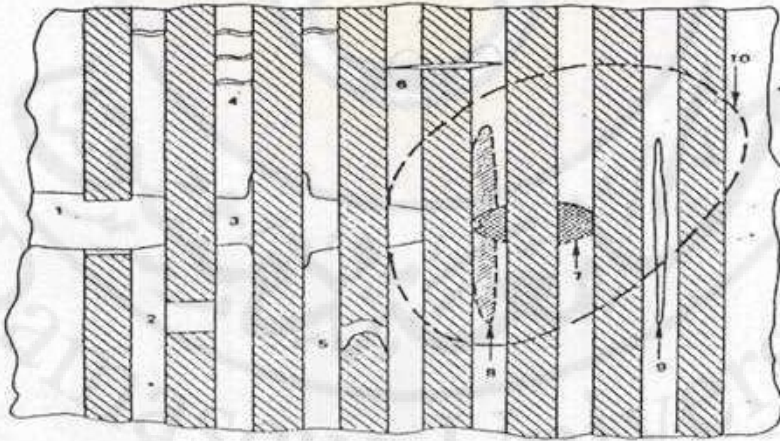
2-3-E-13- الانهيار في طبقة أحادية الاتجاه :

كما في المعادن يمكن افتراض أنه يبدأ الانهيار في المواد المركبة من عيوب صغيرة متأصلة في المادة. قد تكون هذه العيوب ألياف مكسورة أو عيوب في المادة الرابطة أو عبارة عن انفصال عند السطح الفاصل.

إن الاستخدامات الإنشائية الرئيسية للمواد المركبة في الغالب على شكل صفائح طبقية وانهيار مثل هذه الطبقات سيكون معقدا ويعتمد على تسلسل تكديس الطبقات، ويحدث الانهيار بشكل عام نتيجة لانتشار الشقوق في الاتجاهات الموازية والمتعامدة مع الألياف. ولسهولة توضيح المبادئ الرئيسية للانهيار سوف تقتصر الدراسة على المركبات الأحادية الاتجاه والتحطم على نمط الانفتاح تحت حمولة الشد الستاتيكي. يكون انتشار الشق في مثل هذه المركبات في الاتجاه الموازي للألياف أسهل منه في الاتجاه المتعامد عليه .

يبين الشكل (E-2) أنماط التحطم المختلفة الممكنة الحدوث في مادة مركبة نموذجية والمتمثلة بطبقة أحادية الاتجاه، وذلك تحت حمولات الشد حيث الانهيارات الحادثة هي التالية:

- 1- تحطم هش للألياف يليه تحطم المادة الرابطة الهشة .
- 2- انسحاب الليف عن المادة الرابطة نتيجة ضعف المنطقة الفاصلة .
- 3- تجسير الشق حيث يجتاز الشق الرئيسي الليف دون كسره .
- 4- تشققات مجهرية في المادة الرابطة من أجل المواد الرابطة الهشة .
- 5- الانهيار المطيلي لليف من أجل الألياف المطيلية .
- 6- تحطم الليف في منطقة العيب وتوزع الانفعال اللدن المترافق في المادة الرابطة
- 7- توزع الانفعال اللدن الناتج عن مركبة الإجهاد σ_y عند رأس الشق الرئيسي .
- 8- توزع انفعال القص اللدن الناتج عن مركبة الإجهاد τ_{xy} .
- 9- ظهور شق طولي في المادة الرابطة أو في المنطقة الفاصلة الناتج عن توزع مركبة الإجهاد σ_x .



الشكل (E-2) أنماط التحطم الممكنة الحدوث في مادة مركبة متمثلة بطبقة أحادية الاتجاه تحت حمولة الشد.



المراجع العلمية

- 1-Plastics Fabrication and Recycling, Manas Chanda, Salil K. Roy, CRC Press, 2009 by Taylor & Francis Group
- 2-Metal Matrix Composites. Nikhilesh Chawla, 2006 Springer Science + Business Media, Inc.
- 3-An Introduction To Composite Materials. D. Hull, Cambridge University Press, Second Edition, 1996.
- 4-Fibrous Materials. K. K. Chawla. Cambridge University Press, 2005.
- 5-Metals Handbook. Vol. 21, Composites, American Society Of Metals, 2001.
- 6-Manufacturing Processes And Materials: Exercises. Miltiads A. Boboulos & Ventus Publishing APS, 2010,

7- ميكانيك المواد المركبة، روبرت م. جونز، ترجمة رفيع جبرة، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة، المنظمة العربية للترجمة. 2010



المصطلحات العلمية

- A -

Adsorption and wetting	الامتزاز والتبلل
Aircraft brakes	مكابح الطائرات
Airplane Applications	الاستخدامات في الطائرات
Alumina	أكسيد الألمنيوم
aluminosilicates	سيليكات الألمنيوم
Analogy to plate Bukling	تشابه مع تحذب الصفحة
Analysis in Design	التحليل في التصميم
Analysis Procedure	إجراءات التحليل
Anisotropic material	المواد متباينة الاتجاهات
Angle-Ply	رقاقة مائلة
Angle-Ply Laminate	صفحة ذات رقاقة مائلة
Annealing	التلدين
Approximation	تقريب
Aramid fibres	ألياف الأراميد
Artificial Constaint	قيود صناعية
Aspect ratio	معامل أبعاد الليف
autoclave moulding	القولبة بالأوٹوكلاف (وعاء يتحكم ضمنه بالحرارة والضغط).
Axial creep of long-fibre	الزحف المحوري للمواد المركبة المقواة
composites	بألياف طويلة
Axial stiffness	الجساءة المحورية

Axial tensile failure

الانهيار نتيجة الشد المحوري

- B -

Background stress

الاجهادات المحيطة

Balanced Laminates

الصفائح المتوازنة

Basic concepts

مبادئ أساسية

Basics of matrix behavior

أساسيات سلوك المادة

الحاضنة

Basics of fiber behavior

أساسيات سلوك الألياف

Beam

جائز

Beam Boundary Condition

الشروط الحدودية للجائز

Beam Equilibrium Equation

معادلات التوازن للجائز

Bending

انحناء

Bending –Extension Coupling

تقارن استطالة-انحناء

Bend –Twist Coupling

تقارن قتل-انحناء

Biaxial Strength Criteria

معايير المتانة ثنائية المحور

Bimetallic Strip

شريطة ثنائية المعدن

Bimetals

ثنائي المعدن

Bonded

التصاق

Bonding mechanisms

آليات الترابط

Bond strength

متانة الترابط

Boron Fibers

الياف البورن

Boundary Conditions

شروط حدودية

Boundary Layer Effect

تأثير الطبقة الحدودية

Branched

متفرعة

Brittle	قصيف، هش
Buckling	تحذب
Buckling– Critical	تحذب حرج
Bulk Modulus	معامل حجمي

- C -

Carbon/Carbon Composites RCC	المواد المركبة كربون / كربون
Carbon Fibers	ألياف الكربون
Catastrophic Failure	انهيار كارثي
Ceramic Matrices	المادة الحاضنة السيراميكية
Ceramic Composites	المواد المركبة السيراميكية
Characterization Of Fiber Orientations	مميزات اتجاهات الليف في
In Plane	المستوي
Clad Materials	مواد الغلاف
Classification Of	تصنيف
Clustering Of Fibers and Particles	تكتل وتجمع الألياف والحبيبات
Coefficient Of Thermal Expansion	معامل التمدد الحراري
Coefficients Of Moisture Diffusion	معاملات انتشار الرطوبة
Coefficients Of Mutual Influence	معاملات التأثير المشترك
Combined Hoop And Axial Loading	التحميل المتحد المحوري والطوقي
Compariison Of Measured And Predicted	مقارنة بين المقاس والمتوقع
Compliance	مطاوعة
Composite Stiffness	جساءة المادة المركبة
Composite Materials Fabrication	تصنيع المواد المركبة

Compressive Strength	المتانة على الضغط
Conductivity Of Composites	الناقلية الحرارية للمواد المركبة
Constraints	قيود
Consolidation Of Resin Moulding	دمج مركبات قوالب الرين
Compounds	
Control Of Bond Strength	التحكم بمتانة الترابط
Contiguity	تجاور
Contributions To Work Of Fracture	الإسهامات إلى عمل التخطم
Coupling Stress And Symmetric	الإجهادات المقرونة والصفائح
Laminates	المتناظرة (متناهية الخواص)
Crack Bridging	تجسير الشق
Crack Deflection	انحراف الشق
Crack Extension In Composites	انتشار الشق في المواد المركبة
Creep	الزحف
Cross-Linked	متصالبة
Cross-Ply	رقاقة متصالبة
Cross-Ply Laminate	صفحة طبقية ذات رقائق متصالبة
Cross-Ply Ratio	نسبة سماكات الرقائق المتصالبة
Curing	معالجة
CVD	ترسيب الأبخرة كيميائياً

-D-

Damage	عطب، ضرر
--------	----------

damage tolerance	تسامح العيوب
Debonding	فك الترابط (الالتصاق)
Delamination	فصل الطبقات
Diesel engine piston	مكبس محرك ديزل
Diffusion barrier coating	طلاء إعاقة الانتشار
Diffusion bonding of foils	الترابط الانتشاري للرقاقات
Discontinuously reinforced composites	المواد المركبة المقواة (بشكل متقطع)
Displacements	انزياحات
DMC	مركب عجين مقولب
Ductile	مطاوع (لدن)
Dummy Index	دليل متكرر (وهمي)

- E -

EdgeEffects	تأثيرات الحافة
Effects Of Microstructure	تأثيرات البنية
Effects Of Symmetry	تأثيرات التناظر
Elastic Deformation Of Long-Fiber composites	التشوه المرن للمواد المركبة المقواة بالألياف الطويلة
Elastic Deformation Of Laminates	التشوه المرن للمواد المركبة الصفائحية
Electronic Applications	الاستخدامات في الإلكترونيات
Electrostatic Attraction	التجاذب بشحنة الكهرباء الساكنة
Engineering Constants	الثوابت الهندسية

Equivalent Homogeneous Ellipsoid	مكافئ الجسم البيضاوي
	المتجانس
Eshelby Method	طريقة إيشلبي
Euler Buckling Formula	معادلة إيلر للالتواء
Experimental Data For Single Laminate	معطيات تجريبية لطبقة
	صفائحية واحدة

-F-

Failure Of Tubes Under Internal Pressure	انهيار الأنابيب بتأثير الضغط الداخلي
Failure Modes Of Long-Fiber Composites	أنماط فشل المواد المركبة ذات الألياف الطويلة
Failure In Compression	الانهيار نتيجة الضغط
Failure Of Laminate Under Off-Axis Loads	انهيار الصفائح نتيجة تأثير
Fatigue	الحمولات اللامحورية
Fiber Architecture	التعب
Fiber Fracture And Flexibility	أسلوب بناء الألياف
Fiber Packing Arrangements	المرونة وتحطم الليف
Fiber Orientation Distributions In Three Dimensions	ترتيبات حزم (تجميع) الألياف
Fiber Length Distributions	توزع اتجاهات الليف في الأبعاد الثلاثة
Fiber Orientation During Processing	توزع أطول الألياف
Fiber Fracture	توجيه الألياف خلال التصنيع
	تحطم الليف

Fiber Pullout	انسحاب الليف
Fracture Mechanics	ميكانيك التحطم
Frictional Sliding And Fiber Pull-Out	الانزلاق الاحتكاكي ونزع
	(سحب) الليف
FP Fibre	اسم تجاري لألياف الألومينا

-G-

Gas Turbine Combustor Can	جسم حجرة احتراق توربين غازي
Glass Fibers	ألياف الزجاج
Glass Transition Temperature	درجة حرارة التحول الزجاجي
Golf Driving Club	مضرب الغولف
Governing Equations	المعادلات النازمة
Graphite Fibers	ألياف الغرافيت
Growth	نمو

-H-

Heat Transfer Mechanisms	آليات النقل الحراري
Helicopter Rotor Blade	شفرة مروحة الحوامة
Heterogeneous	غير متجانسة
Hipping	الضغط الإيزوستاتيكي على الساخن
Hook's Law	قانون هوك
Hot Press Moulding Of Thermoplastic	القولبة بالضغط على الساخن للبلاستيك الحراري
Hubble Space Telescope	مقرب هبل الفضائي
Hybrid	هجين

Hygroscopic

ماص للرطوبة

-I-

Industrial Applications

التطبيقات الصناعية

Injection Moulding Of Thermoplastic

القولبة بالحقن للبلاستيك

الحراري

Interface

للسطوح البينية

Interfacial Chemical Reaction

التفاعل الكيميائي على سطوح

التلامس

Inter-Phase Region

المنطقة داخل الطور البيني

Interface Region

منطقة سطح الارتباط (السطح

البيني)

Inter-Diffusion And Chemical Reaction

الانتشار الداخلي والتفاعل

الكيميائي

Inter-Laminar Stresses

الإجهادات داخل الصفيحة

Interfacial Fracture And Crack Deflection

تحطم السطح البيني وانحراف

الشق

Interfacial Debonding

فك ارتباط السطح البيني

Interfacial Thermal Resistance

المقاومة الحرارية لسطح

التلامس (السطح البيني)

Isotropic

متماثل المناحي

-J-

Joints

وصلات

-K-

KEVLAR

الاسم التجاري لألياف الأراميد

-L-

Laminates	الصفائح الرقيقة
Layered Ceramic Composites	المواد مركبة السيراميكية ذات الطبقات
Liquid Resin Impregnation Routes	طرائق التشرب بالريزين السائل
Loading Of a Stack Of Plies	تحميل أكداش من الرقائق أو الطبقات
Long Fibers	الألياف الطويلة

-M-

Marine Applications	الاستخدامات البحرية
Matrices	المادة الأساس (الحاضنة)
Matrix Deformation	تشوه المادة الحاضنة
Maximum Stress Criterion	معيار الإجهاد الأعظمي
Mechanical keying	الترابط الميكانيكي
Metal Matrices	المادة الحاضنة المعدنية
Metal Composites	المواد المركبة المعدنية
Microelectronics Housing	مقرات الإلكترونيات الدقيقة
Minesweeper Hull	السفينة كاسحة الألغام
Misfitting Ellipsoid	الشكل البيضوي غير المتطابق
Mixed Mode	ظروف مختلطة

-N-

Netting analysis	تحليل الشبكة
Nicalon™ SiC	اسم تجاري لألياف كربيد السيلكون

-O-

Off- Axis Elastic Constant Laminate	ثوابت المرونة اللا محورية للصفحة
Onset Of Inelastic Behaviour	بداية السلوك غير المرن
Organic Fibers	الألياف العضوية
Other Failure Criteria	معايير أخرى للانتهيار
Other Tests	اختبارات أخرى

-P-

Particulate	الحبيبات
PEEK	البولي إثير-إثير-كيتون
phase Angle	زاوية الطور
Pitch-Based	النواة الأساسية من القطران
Poisson Contraction Effects	تأثيرات انكماش بواسون
Polymer Composites	المواد المركبة البوليميرية
Polymer Matrices	المادة الحاضنة البوليميرية
Predicted Behaviour	السلوك المتوقع
Prediction Of Stiffness	تنبؤ الجساءة
Pressurized Consolidation Of Resin Pre-	الدمج تحت الضغط للريزن
Pregs	المسبق الإقحام
PULTRUSION	طريقة تصنيع المقاطع الإنشائية
Pure Hoop Loading	تحميل الطوق بشكل صاف
PVD	رسب الأبخرة فيزيائياً

-R-

Reactive Processing	الطريقة التفاعلية
Racing Bicycle	دراجة السباق
Random Arrangement	ترتيبات عشوائية
Reinforcements	مواد التقوية
Residual Stresses	الاجهادات المتبقية
RTM	طريقة قالب تحويل الريزين
Rule Of Mixtures	قاعدة المزج

-S-

Safe Filament	شعيرات آمنة
Saffil	اسم تجاري لألياف Al_2O_3
Shear Failure	الانهيار نتيجة القص
Shear Stiffness	جساءة القص
shear Lag Model	نموذج تأخر القص
Sheet Processing Rolls	درافيل معالجة الصفائح
Short Fibers	الألياف القصيرة
Silicon Carbide	ألياف كربيد السيلكون
Single-Fiber Pull-Out Test	اختبار سحب الليف مفرد
Single-Fiber Push-Out And Push- Down Tests	ختبارات الضغط خارجاً والضغط سفلياً للليف مفرد
SMC	مركب صفائح مقولبة
Solute Atoms	الذرات المنحلة

Space Applications	الاستخدامات في الفضاء
Sport Applications	الاستخدامات في الرياضة
Spray deposition	طريقة الترسيب بالرذاذ
Squeeze Casting	الصب تحت الضغط المباشر السكب بالعصر
Squeeze Infiltration	طريقة التخلخل بالضغط
Statistical Treatment Of Fiber Strength	معالجة إحصائية لمثانة الليف
Stir casting	طريقة المصبوبات الممزوجة
Strength Of Reinforcements	مثانة مادة التقوية
Strength of composites	مثانة المواد المركبة
Strength of laminates	مثانة الصفائح
Stress In Individual Plies Of a Laminate	الإجهاد في الطبقات المفردة للصفائح
Stresses And Distortions	الإجهادات والتشوهات
Stress And Strain Distributions	توزع الإجهاد والانفعال
Stress Transfer Length	نقل الإجهاد الطولي
Stress Corrosion Cracking	تشقق التآكل الإجهادي
Sub-Critical Crack Growth	نمو الشق الحرج الفرعي

-T-

Tensile Cracking	التصدع الناتج عن الشد
Thermosets	تصلد حرارياً
Thermoplastics	تلدن حرارياً
Thermal Stability	الثبات الحراري
Thermal Cycling Of Laminates	الدورات الحرارية للمواد

الصفائية

Thermal Behavior Of Composites	السلوك الحراري للمواد المركبة
Thermal Expansion And Thermal Stresses	التمدد الحراري والإجهادات الحرارية
Thermal Stresses And Strains	الإجهادات والانفعالات الحرارية
Thermal Expansivities	عوامل التمدد الحرارية
Thermal Conduction	الناقلية الحرارية
Thermal Protection System (TPS)	نظام حماية حرارية
Toughness-Reducing Coatings	طلاءات تخفيض الجساءة
Toughness Of Composites	جساءة المواد المركبة
Transport Applications	الاستخدامات في وسائط النقل
Transverse Comprission	الضغط العرضي
Transfer Of Normal Stress Across Fiber Ends	نقل الإجهاد الناطمي عبر نهاية الليف
Transverse Creep	الزحف العرضاني ،
Transverse Stiffness	الجساءة العرضية
Transverse Tensile Failure	الانهيار نتيجة الإجهاد العرضي
Types of Composite Materials	أنواع المواد المركبة:

-U-

Ultimate Load

الحمل الأعظمي

Underdesign

تصميم ضعيف، أقل من المطلوب

Unequal In Tension And Compression

غير متساوٍ في الشد والضغط

Uniaxial Tension Test

اختبار الشد المحوري

Unidirectionally Reinforced

قوى محورياً، طولياً

-V-

Vibration

اهتزاز

Viscoelastic Behavior

سلوك مرن لزج

Voids

الفجوات

Volume fraction

النسبة الحجمية

-W-

weight fraction

النسبة الوزنية

Whiskers

الشعيرات

work-hardening .

التقسية بالتشغيل

Woven. braided and knitted

- ترتيبات الألياف المنسوجة المحاكاة و

fiber arrays

المضفورة

-Y-

Young's Moduli

معاملات يونغ

اللجنة العلمية:

الأستاذ الدكتور محمد علي سلامة

الأستاذ الدكتور غسان حداد

الأستاذ الدكتور عصام موسى

المدقق اللغوي:

الأستاذة الدكتورة سميرة سلامي

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة

لمديرية الكتب والمطبوعات

جامعة دمشق