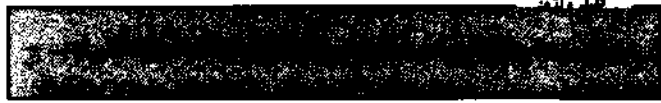
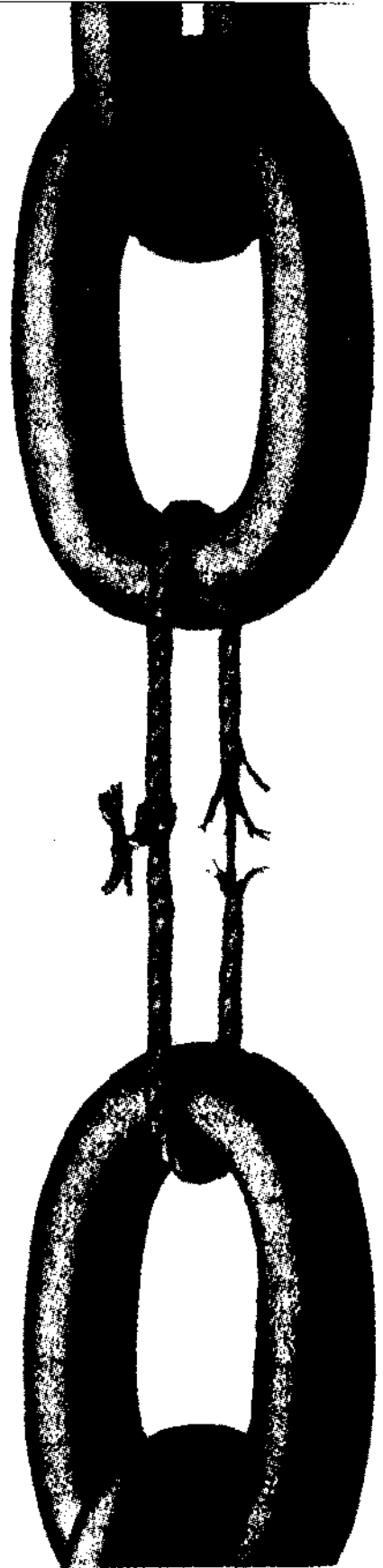


کامپوزیتها (۳)

Composites (3)

تألیف: مهندس ماسیس اکبریان

مهندس محمود محرابزاده



در مقاله‌های قبلی نکات تاریخی و اهمیت کامپوزیتها، انواع ماتریسهای فیبری، سرامیکی و پدویزه ماتریسهای پلی‌مری و تقویت‌کننده‌های پودری مورد بحث قرار گرفت.

در این شماره در ادامه بحث تقویت‌کننده‌ها به شرح تفصیلی تقویت‌کننده‌های فیبری که اهمیت بسیار زیادی در کامپوزیتها دارند پرداخته شده است. روش ساخت و شکل‌دهی، سطح مقطع که فلزها، خواص و کاربرد کامپوزیتهای فیبری و سرامیکی و پلی‌مری در شماره‌های بعد مورد بحث قرار خواهند گرفت.

تقویت‌کننده‌های فیبری

تقویت‌کننده‌ها الزاماً به شکل الیاف بلند نیستند و ممکن است به شکل ذره، پولک، موی (Whisker) و الیاف ناپیوسته، الیاف پیوسته و ورقه وجود داشته باشند. اکثر مواد در شکل فیبری خود محکمتر و سفت‌تر از دیگر اشکال خود هستند و به این دلیل تقویت‌کننده‌های فیبری مصرف بیشتری دارند. در این بخش، الیافی که الیاف پیشرفته نامیده می‌شوند بیشتر مورد توجه هستند که این الیاف دانسیته بسیار کم، استحکام بسیار بالا و سفتی بسیار زیادی را دارا می‌باشند. البته در این حالت مهمترین مزیت قیمت کم آنها است. در حقیقت، نباتات بزرگترین مسود اولیه الیاف هستند مثلاً الیاف سلولزی به شکل پنبه، کتان و کنف در صنعت نساجی به کار می‌روند و چوب و کاه در صنعت کاغذسازی مصرف می‌شوند. سایر الیاف طبیعی مانند مو، پشم و ابریشم شامل اشکالی مختلفی از پروتئین هستند.

الیاف شیشه، در اشکال مختلف خود، معمولی‌ترین تقویت‌کننده برای ماتریسهای پلی‌مری‌اند. الیاف کولار (Kevlar) (نوعی آرامید) که توسط شرکت دوپان (Dupont) در سال ۱۹۶۰ ساخته شد بسیار سفت‌تر و سبکتر از الیاف شیشه است. سایر الیاف که ترکیبی از استحکام بالا و

Key Words:

Composites; Reinforced Materials and Plastics; Fibres; Laminates; Reinforcements.

۳- درجه انعطاف پذیری بسیار بالا، که مشخصه مدول بالای ماده و قطر کوچک آن است. این انعطاف پذیری کاربرد روشهای مختلف برای ساخت کامپوزیتها با این الیاف را امکانپذیر می‌سازد.

در مقاله حاضر پس از بررسی مفهوم انعطاف پذیری به شرح الیاف مهم پرداخته شده است. انعطاف پذیری هر ماده تابعی از مدول کشسانی (E) و ممان اینرسی (I) سطح مقطع آن است. مدول کشسانی یک ماده کاملاً بستگی به شکل یا اندازه آن دارد و معمولاً برای یک ترکیب شیمیایی معین و دانسیته مشخص ثابت است. بنابراین، انعطاف پذیری برای یک ترکیب معین یا دانسیته مشخص توسط شکل، اندازه، سطح مقطع و شعاع انحنا که تابعی از استحکام است، تعیین می‌شود. عکس حاصلضرب ممان خمشی (M) در شعاع انحنا (R) را می‌توان برای اندازه گیری انعطاف پذیری به کار برد.

$$MR = EI = \frac{E\pi d^4}{64} \quad (1)$$

$$\frac{1}{MR} = \frac{64}{E\pi d^4}$$

در این رابطه d قطر معادل (Equivalent) است. معادله (۱) نشان می‌دهد که $\frac{1}{MR}$ اندازه انعطاف پذیری، تابع بسیار حساس نسبت به d است. شکل ۲، قطر مواد مختلف لینی شکل را که انعطاف پذیری ($\frac{1}{MR}$) آنها برابر الیاف نایلون با قطر ۲۵۰μm (نوعی الیاف انعطاف پذیر) است به عنوان تابعی از مدول کشسانی نشان می‌دهد. این نکته جالب توجه است که ایجاد قطر کوچک کافی برای یک فلز یا سرامیک، که از درجه انعطاف پذیری یکسانی با نایلون یا قطر ۲۵۰μm برخوردار باشد، امکانپذیر است.

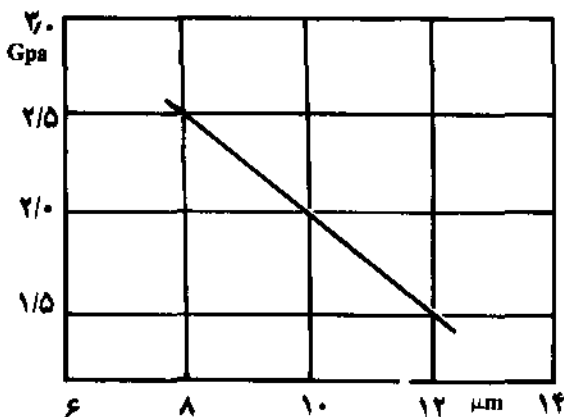
الیاف شیشه

الیاف شیشه نامی عمومی (Generic) مانند الیاف کربن یا فولاد است. ترکیبات شیمیایی مختلف و متنوعی به طور تجارتي در دسترس هستند. الیاف شیشه معمولی بر پایه سیلیس (۵۰ - ۶۰٪ SiO_۲) هستند که حاوی گروهی از اکسیدها، مثل اکسید کلسیم، بور، سدیم، آلومینیوم و آهن است. جدول ۱ ترکیب بعضی الیاف شیشه معمولی مورد مصرف را نشان می‌دهد. شیشه نوع E، علاوه بر داشتن استحکام خوب و مدول یانگ معقول، عایق الکتریکی بسیار خوبی نیز هست، شیشه نوع C مقاومت بهتری در مقابل مواد شیمیایی خورنده دارد و شیشه نوع S حاوی سیلیس بیشتری است و می‌تواند دماهای بالاتری را نسبت به انواع دیگر شیشه‌ها تحمل کند. باید توجه کرد که بیشتر از ۹۰٪ تمام الیاف شیشه پیوسته تولید شده، از نوع شیشه E است و مصرف الکتریکی الیاف نوع E فقط جزه کوچکی از کل بازار آن را داراست.

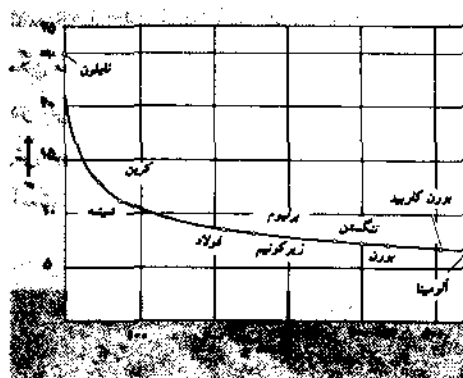
سفتی زیاد در آنها وجود دارد عبارتند از الیاف بورن، سیلیکون کاربید، کربن و آلومینا (Al₂O₃). تمام این الیاف در نیمه دوم قرن بیستم توسعه یافته‌اند. از طرفی تولید الیاف سرامیکی نیز بین سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ به روشهای جدید تکامل یافته است.

کاربرد الیاف به عنوان یک ماده مؤثر مهندسی مبتنی بر سه خصوصیت مهم است.

۱- قطر کوچک نسبت به اندازه دانه‌های آنها یا واحد ساختاری ریز (Microstructural). این امر باعث می‌شود که بخش بیشتری از استحکام نسبت به حالتی که به شکل توده‌ای است، به دست آید. این نتیجه مستقیم «اثر اندازه» است؛ بدین معنی که اندازه کوچکتر، عامل نقص کمتر در ماده می‌شود. شکل ۱ کاهش استحکام الیاف کربن در مقابل افزایش قطر را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - کاهش استحکام (σ) الیاف کربن در مقابل افزایش قطر



شکل ۲ - قطر الیاف مواد مختلف با انعطاف پذیری مشابه الیاف نایلون با قطر ۲۵۰μm

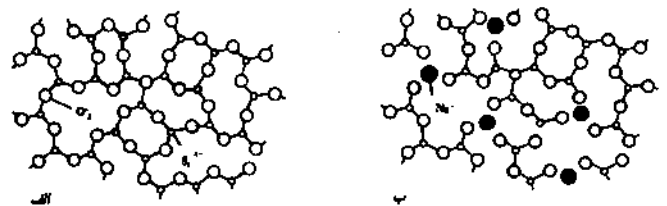
۲- نسبت طول به قطر ($\frac{L}{D}$) زیاد، که این امر سبب می‌شود که بخش بسیار زیادی از بار به کار رفته از طریق ماتریس به الیاف قوی و سفت منتقل گردد.

سول - زل را نشان می‌دهد. الیاف شیشه‌ای به سهولت در اثر نواقص سطحی معیوب می‌شود. به منظور به حداقل رساندن این امر از روش آهار زدن استفاده می‌شود. این آهار علاوه بر محافظت، مجموعه الیاف را به صورت رشته نگه‌ میدارد. در الیاف شیشه تقویت کننده، آهار پسرمنیای پلی‌وینیل استات است که از یک رزین اتصال دهنده نیز استفاده می‌شود. این رزین با پلی‌استر، اپوکسی و رزین ماتریسهای فنولی سازگار است. معرف اتصال دهنده به منظور پیوند الیاف شیشه‌ای آهاردار با رزین ماتریس به کار برده می‌شود.

ساختار

شیشه ساختاری آمورف دارد. شکل ۶ شبکه دوبعدی شیشه سیلیس را نشان می‌دهد. هر می چند وجهی شامل یک اتم اکسیژن است که با پیوندهای کووالانسی به یک اتم سیلیسیم متصل است. هنگامی که Na_2O ، همچنان که در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است، در ساختار دوبعدی شیشه وارد می‌شود، چه اتفاقی می‌افتد؟

پیوندهای سدیم با پیوند یونی به اکسیژن متصل می‌شوند ولی به شبکه مستقیماً متصل نمی‌گردند. مقدار بسیار زیاد Na_2O ، تمایل به تشکیل ساختار شیشه‌ای را تضعیف می‌کند. افزایش سایر انواع دیگر اکسیدهای فلزی (جدول ۱) ساختار شبکه و پیوندها و در نتیجه خواص را تغییر خواهد داد. برخلاف الیاف کریستالین، الیاف شیشه کاملاً ایزتروپ هستند. مدول یانگ و ضرایب انبساط گرمایی در طول محور لیف و عمود بر آن یکسان هستند. البته، این امر نتیجه ساختار شبکه سه بعدی است (شکل ۶).



شکل ۶ - ساختار آمورف شیشه

خواص و کاربرد

خواص مکانیکی الیاف شیشه از نوع E در جدول ۲ خلاصه شده است. توجه کنید که دانسیته این الیاف نسبتاً کم و استحکام آن بسیار زیاد است. این الیاف از مدول یانگ بسیار بالایی برخوردار نیستند. بنابراین، هنگامی که نسبت استحکام به وزن الیاف نسبتاً زیاد می‌شود، نسبت مدول به وزن کاهش می‌یابد.

این خصوصیت اخیر، صنایع هوا فضا را به طرف استفاده از یک سری الیاف دیگر که الیاف پیشرفته نامیده می‌شوند (مانند الیاف بور، کریستالین، Al_2O_3 ، SiC)، هدایت کرده است. الیاف شیشه پیوسته برای تقویت پلی‌استر، اپوکسی و رزینهای فنولی به‌کار می‌رود. این الیاف نسبتاً ارزان و به اشکال مختلف موجودند (شکل ۴) رشته‌های پیوسته (Continuous)

درد. رطوبت، استحکام الیاف شیشه را کاهش می‌دهد. الیاف شیشه نسبت به خستگی استاتیک نیز حساس اند، بدین معنی که نمی‌توانند باری را به مدت طولانی تحمل کنند.

جدول ۲ - برخی خواص الیاف شیشه E

دانسیته	استحکام کششی	مدول یانگ	ضریب انبساط گرمایی
(gcm^{-3})	(Mpa)	(Gpa)	(K^{-1})
۲/۵۵	۱۷۵۰	۷۰	$۴/۷ \times ۱۰^{-۶}$

رزینهای تقویت شده با الیاف شیشه به طور گسترده در ساختمان و صنعت بناسازی به کار می‌روند، و معمولاً پلاستیکهای تقویت شده با شیشه (Glass Reinforced Plastics) یا GRP نامیده می‌شوند. GRP به شکل پوششی برای سایر مواد ساختمانی یا به عنوان جزء مکمل یک ماده ساختمانی به کار می‌رود. از حدود سالهای ۱۹۶۰ به بعد، بدنه قایقها از GRP ساخته می‌شوند. در حال حاضر معرف مصرف GRP در صنایع شیمیایی (مثلاً، مخازن ذخیره، خط لوله‌ها و ظرف فرآیند) نسبتاً عادی شده است.

صنایع حمل و نقل جاده‌ای و راه آهن و همچنین صنایع فضایی از بزرگترین مصرف کننده‌های دیگر GRP هستند.

الیاف بور

بور (Boron) ماده‌ای ذاتاً شکننده (Brittle) است، و روش تجاری تهیه آن ته نشین کردن بخارات شیمیایی بور روی سطحی دیگر است. بدین ترتیب، الیاف بور تولید شده الیافی مرکب‌اند.

نظر به اینکه فرآیند ته نشین کردن به دماهای نسبتاً بالایی نیاز دارد، انتخاب ماده سوپسترا (Substrate) مناسب که مغزی الیاف بور را تشکیل می‌دهد، محدود است. معمولاً یک سیم تنگستن نازک برای این منظور به کار می‌رود. از سوپسترای کریبی نیز می‌توان استفاده کرد.

ساخت الیاف بور

الیاف بور با روش ته نشین کردن بخارات شیمیایی روی یک سوپسترا تهیه می‌شوند. برای این منظور دو فرآیند وجود دارد:

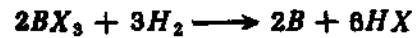
۱ - تجزیه گرمایی بوره‌الید

این روش در دمای پائین انجام می‌شود و بنابراین کریبن پوشش شده با الیاف شیشه را می‌توان به عنوان سوپسترا به کار برد. الیاف بوری که با

این روش تولید می‌شوند، ضعیف‌اند، زیرا پیوستگی بین بور و مغزی آن وجود ندارد. این الیاف به دلیل حبس شدن گازها در آن چگالی کمتری دارند.

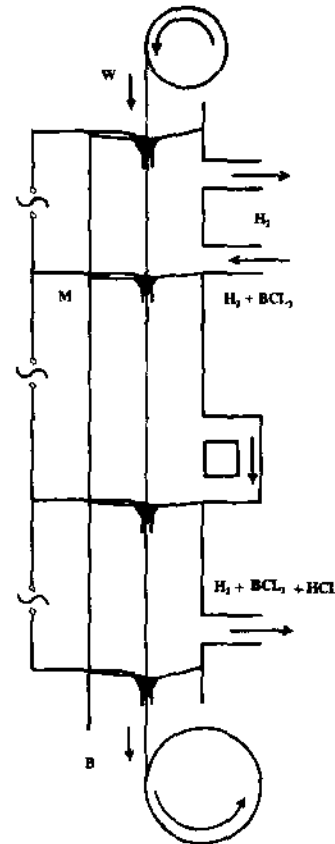
۲ - کاهش بور هالید

گاز هیدروژن برای کاهش بورتری هالید به کار می‌رود.



در این رابطه x یک هالوژن مانند Br, Cl یا I است.

در این فرآیند دما بسیار بالاست، بنابراین به ماده‌ای دیر گداز به عنوان سوپسترا نیاز دارد. این ماده ممکن است فلزی یا نقطه ذوب بالا چون تنگستن باشد. در هر حال، این فرآیند اساساً نسبت به فرآیند تجزیه گرمایی مزیت دارد، زیرا با این فرآیند الیاف بوری با کیفیت بسیار بالا و یکواخت به دست خواهد آمد. شرکت‌های بسیاری وجود دارند که به‌طور تجارتي الیاف بور را با این روش تولید می‌کنند. شکل ۷ - شمای تولید لیف بور را نشان می‌دهد.



شکل ۷ - شمای تولید الیاف بور (B) به روش تجزیه گرمایی هالید بوری سوپسترای تنگستن (W)

ساختار

ساختار الیاف بور بستگی به شرایط ته‌نشینی، دما، ترکیب گازها، دینامیک گازها و غیره دارد. از نظر تئوری خواص مکانیکی فقط به استحکام پیوندهای اتمی محدود می‌شود، در صورتیکه در عمل همیشه عیوب ساختاری موجود و بی‌نظمی‌های مورفولوژی، خواص مکانیکی را تضعیف می‌کند. شیب دما و مقادیر کم عناصر به صورت ناخالص غیر قابل اجتناب است و سبب بی‌نظمی فرآیند می‌شود.

بسته به شرایط ته‌نشینی، بور عنصری، به اشکال مختلف بلوری مشاهده می‌شود. شکلی که در اثر تبلور مذاب یا ته‌نشینی شیمیایی بخار در دمایی بالاتر از 1300°C به دست می‌آید، B - رمبوهدرال (B-Rhombohedral) است. در مای پائینتر از آن، در صورتی که بور بلوری تولید شود، معمولی‌ترین ساختاری که مشاهده می‌شود، α - رمبوهدرال است.

الیاف بوری که با روش اول تولید می‌شوند، ساختار میکروبلوری دارند که معمولاً آمورف نامیده می‌شود. بر مبنای مطالعات پراش (Diffraction) الکترونی و اشعه X، می‌توان نتیجه گرفت که بور واقعاً میکروبلوری، B - رمبوهدرال است. در عمل، وجود فازهای میکروبلوری (بلور یا گروه‌های بلوری در میکروسکوپ الکترونی مشاهده می‌شوند) نواقصی را در الیاف تشکیل می‌دهند که باید از آن پرهیز شود. نواقص جدی‌تر و بزرگتر معمولاً ناشی از بالاتر رفتن دما از دمای بحرانی ته‌نشینی و یا وجود ناخالصی در گازهاست.

سطح الیاف بور شبیه ساختار چسب ذرت (Cott-Cob) است و شامل غده‌هایی است که با مرزهایی از یکدیگر جدا می‌شوند (شکل ۱۰). اندازه غده‌ها در طی مساحت تغییر می‌کنند. به‌طور بسیار کلی می‌توان گفت که غده‌ها به صورت یک تکه‌سته از روی سوپسترا شروع می‌شود و سپس از خارج به شکل مخروطی رشد می‌کند تا قطر یک لیف به ۸۰ - ۹۰ میکرومتر برسد.

خواص و کاربرد الیاف بور

به علت ماهیت مرکب الیاف بور، تنشهای داخلی پیچیده و نواقصی در این الیاف وجود خواهد داشت. این نواقص عبارتند از فضاهای خالی و ناپیوستگی‌های ساختاری، ناشی از مغزی موجود و روش ته‌نشینی است. بنابراین نباید انتظار داشت که استحکام الیاف بور برابر استحکام ذاتی بور باشد. میانگین استحکام کششی الیاف بور $3 - 4 \text{ GPa}$ است در صورتی که مدول یانگ آن بین 300 GPa و 400 GPa است.

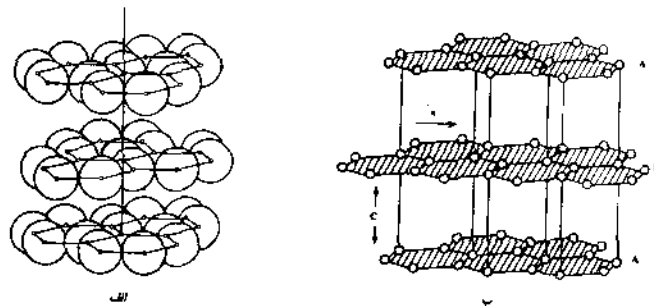
دانسیته بور $2/34 \text{ gr/cm}^3$ (حدود ۱۵٪ کمتر از دانسیته آلومینیوم) است. دانسیته الیاف بور با مغزی تنگستن و برای لیفی با قطر $100 \mu\text{m}$ حدود $2/6 \text{ gr/cm}^3$ است. نقطه ذوب آن 2040°C و ضریب انبساط گرمایی آن $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ تا $83 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ است.

کامپوزیت‌های الیاف بور به‌طور قابل ملاحظه‌ای در تعدادی از هواپیماهای نظامی مانند F-۱۴ و F-۱۵ مصرف دارد. از الیاف بور به

میزان زیاد در وسایل ورزشی و چارچوب دوچرخه‌ها استفاده می‌شود. یکی از بزرگترین موانع در برابر استفاده کاملاً گسترده از الیاف پور، قیمت بالای آن در مقایسه با سایر الیاف است. بخش اعظم این قیمت بالا مربوط به هزینه سوسترای تنگستن است.

الیاف کربن

کربن عنصری است با دانسیته $2/27 \text{ gr/cm}^3$ و شکل‌های مختلف بلوری. شکل بلوری مورد نظر ما در این بررسی ساختار گرافیتی کربن است که در آن اتم‌های کربن به صورت لایه‌های شش ضلعی قرار گرفته‌اند. شکل دیگر و معروف کربن ساختار کووالانسی الماس است که در آن اتم‌ها شبکه‌های سه‌بعدی سخت و انعطاف‌ناپذیر تشکیل می‌دهند. کربن با ساختار گرافیتی جسمی است بسیار نایزوتروپی، به‌طوریکه مدول کشسانی آن در صفحه لایه‌ها حدود 1000 GPa و در جهت عمود بر صفحات 25 GPa است. در ساختار گرافیتی، صفحات لایه‌ها بسته‌بندی متراکم و نزدیک بهم اتم‌ها تشکیل شده‌اند و شکل ۸ این ساختار را نشان می‌دهد.



شکل ۸. الف) ساختار گرافیتی با صفحات متراکم از اتم‌های کربن
ب) ساختار شبکه شش ضلعی گرافیت

چون قدرت پیوندهای شیمیایی تعیین‌کننده مدول اجسام اند، وجود پیوندهای محکم کووالانسی بین اتم‌های کربن در صفحات لایه‌ها مدول را در این صفحات بسیار بالا می‌برد. در صورتی که مدول در جهت عمود بر صفحه لایه‌ها به دلیل وجود پیوندهای ضعیف و اندروالس بین صفحات بسیار پایینتر است.

در نتیجه برای به دست آوردن مدول و قدرت کشسانی بالا در الیاف کربن، جهت‌یابی شدید صفحات شش ضلعی در امتداد محور الیاف ضروری است.

تهیه

الیاف پلی‌مری و آلی مواد اولیه برای تهیه الیاف کربن‌اند. پس از طی مراحل تقطیر تخریبی (Carbonization) و گرافیت کردن در دماهای بالا، این الیاف به الیاف کربن با مدول فوق‌العاده بالا تبدیل می‌شوند. الیاف اولیه با مدول از زنجیرهای مولکولی دراز $(1 \mu\text{m} - 0/1)$ در

حالت کشیده) با ترتیب اتفاقی و غیرمنظم تشکیل شده‌اند. این الیاف به علت فقدان نظم و ترتیب در زنجیرها، عموماً خواص مکانیکی ضعیفی دارند و افزایش طول و تغییر شکل آنها در تنش‌های پائین نسبتاً زیاد است.

الیاف پلی‌اکریلونیتریل و ریزو: مهم‌ترین مواد اولیه برای تهیه الیاف کربن هستند. سایر الیاف مورد استفاده را می‌توان از قیر، پلی‌وینیل الکل، پلی‌ایمیدها و فنولیکها به دست آورد. بنابراین نام الیاف کربن عمومی است و گروهی از الیاف را شامل می‌شود.

خواص الیاف کربن را می‌توان بسته به اندازه صفحات لایه‌ها و فاصله بین آنها و جهت‌یابی صفحات، در محدوده وسیعی تغییر داد. اکثر روش‌های تهیه الیاف کربن شامل مراحل زیر است:

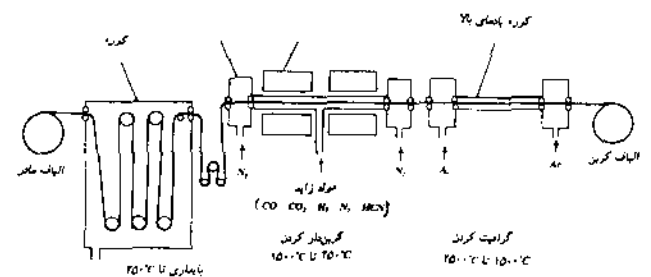
- ۱ - مرحله پایداری: این مرحله از ذوب شدن الیاف در مراحل بعدی که در دماهای بالاتری انجام می‌گیرد جلوگیری می‌کند. در این مرحله الیاف به رنگ سیاه درمی‌آیند.
- ۲ - مرحله تقطیر تخریبی: که در آن اکثر عناصر غیر کربن به صورت گاز حذف می‌شوند.
- ۳ - مرحله گرافیت کردن: که مرحله‌ای اختیاری است و موجب بهبود خواص الیاف حاصل از مرحله ۲ می‌شود.

مراحل فوق تحت کنترل شدید دما، محیط و سرعت و زمان گرما دادن و غیره انجام می‌گیرد. جهت‌یابی صفحات لایه‌ها در امتداد محور الیاف که موجب بهبود فوق‌العاده خواص مکانیکی می‌گردد از طریق کش دادن الیاف در یکی از مراحل فوق به دست می‌آید.

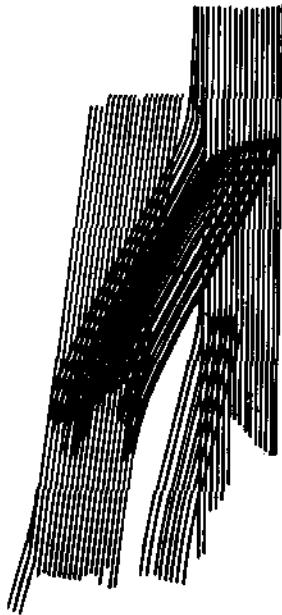
استفاده از الیاف پلی‌اکریلونیتریل

طرحی از فرآیند تبدیل الیاف پلی‌اکریلونیتریل به الیاف کربن در شکل ۹ نشان داده شده است.

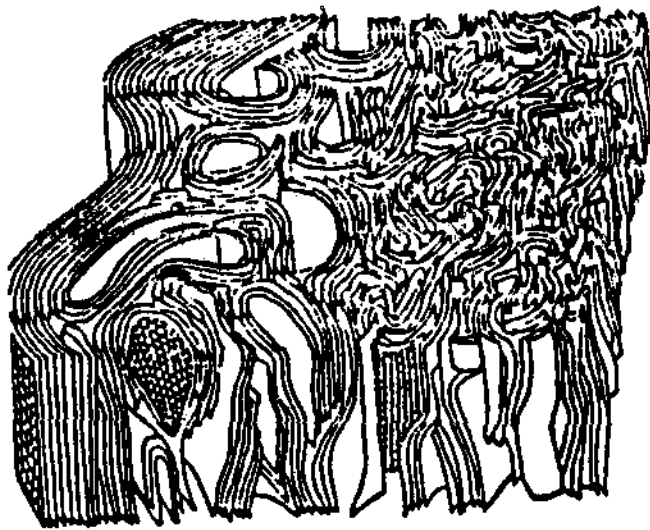
مرحله پایداری و اکسایش در هوا و در دمای 250°C برای چند ساعت صورت می‌گیرد. در این مرحله الیاف کشیده شده و از انقباض آنها جلوگیری می‌شود. مرحله تقطیر تخریبی در محیط خنثی و در دمای $1500^\circ\text{C} - 1000^\circ\text{C}$ با گرما دادن تدریجی و آهسته جهت حفظ نظم و ترتیب مولکولها انجام می‌گیرد. فرآیند تبدیل با گرما دادن الیاف برای مدتی کوتاه در دمای حدود 2500°C در محیط خنثی به پایان می‌رسد. بازده این فرآیند حدود ۵۰٪ وزن است. شکل ۱۰ تغییرات مدول و استحکام کششی الیاف کربن را با دمای مرحله آخر نشان می‌دهد.



شکل ۹ - فرآیند تبدیل الیاف پلی‌اکریلونیتریل به الیاف کربن



شکل ۱۱ - ساختار دوبعدی الیاف کربن بر پایه پلی‌اکریلونیتریل

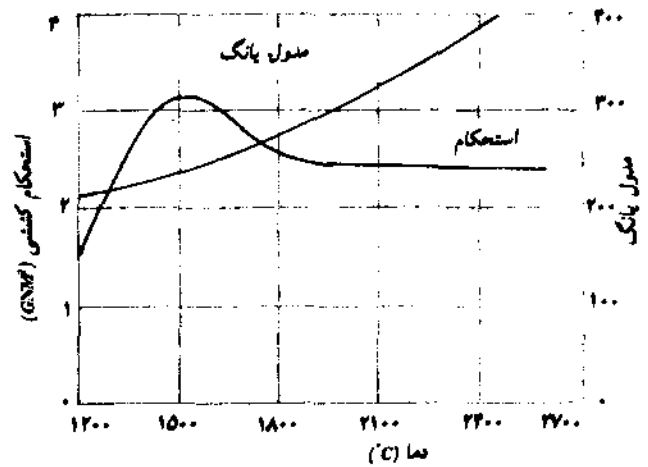


شکل ۱۲ - ساختار سه‌بعدی الیاف کربن بر پایه پلی‌اکریلونیتریل

منشاء اصلی انواع مختلف نواقص ساختاری در الیاف کربن ناخالصیهایی موجود در الیاف مادر و لایه‌هایی است که کاملاً در امتداد الیاف جهت‌یابی نشده‌اند. مکانیسم شکست کششی الیاف کربن توسط این نواقص تعیین می‌شود و در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

خواص و کاربرد

همان‌طور که بحث شد خواص کشسانی الیاف کربن تابع دمای اعمال شده در مرحله پایانی فرآیند تولید آن است. انواع الیاف کربن را می‌توان از الیاف پلی‌اکریلونیتریل به دست آورد. برای مثال، الیاف کربن نوع HT دارای استحکام کشسانی بالا و مدول کشسانی متوسط هستند



شکل ۱۰ - تغییرات مدول و استحکام کششی الیاف کربن حاصل از الیاف پلی‌اکریلونیتریل با دمای مرحله گرافیت کردن.

استفاده از الیاف سلولزی

الیاف ریون مهمترین الیاف سلولزی مورد استفاده در تهیه الیاف کربن‌اند و فرایند تبدیل آن شبیه فرایند تبدیل الیاف پلی‌اکریلونیتریل است ولی با این تفاوت که به علت کاهش جرم مولکولی در مرحله پایداری، عملیات کش دادن در مرحله پایانی انجام می‌گیرد. با این روش ۱۵ تا ۳٪ وزنی الیاف کربن به دست می‌آید.

الیاف کربن بر پایه قیر

پلی‌وینیل کلرید و آسفالت و قطران ذغال‌سنگ مهمترین منابع قیر برای این منظورند. به دلیل ارزان بودن قیمت مواد اولیه و بازده بالا، تولید الیاف کربن از این منابع بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این روش قیر با پلی‌وینیل کلرید در سرعتهای بالا رسیده شده و به سرعت سرد می‌گردد. پایداری الیاف از طریق تشکیل پیوندهای عرضی در محیط اکسنده حاصل می‌شود و سپس مراحل تقطیر تخریبی و گرافیت کردن طبق معمول صورت می‌گیرد.

ساختار الیاف کربن

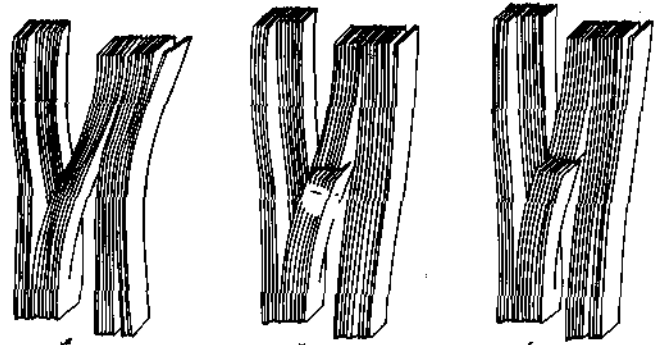
با وجود کنترل‌های شدیدی که در مراحل تولید انجام می‌گیرد، الیاف کربن از نظر میکروساختاری موادی ناهمگن‌اند. ساختار این الیاف شامل نوارهای صفحات گرافیتی است که تقریباً در امتداد محور جهت‌یابی شده‌اند و توسط پیوندهای طولی و عرضی پیچیده‌ای به یکدیگر متصل شده‌اند. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب ساختار دوبعدی و سه‌بعدی الیاف کربن را نشان می‌دهد.

الیاف کربن کاربرد های فراوانی در صنایع هوا فضایی و وسایل ورزشی پیدا کرده اند. از کامپوزیت های اپوکسی - الیاف کربن در ساخت درب کالا و بدنه راکت بالا برنده سفینه شاتل استفاده می شود. قسمت های مختلفی از بدنه هواپیما های مسافربری و نظامی جدید از کامپوزیت های تقویت شده با الیاف کربن ساخته می شوند. از سایر مصارف آن می توان ساخت توربین و کمپرسور هواپیما و اندام های مصنوعی بدن را نام برد. این مصارف را به تفصیل مورد بحث قرار خواهیم داد.

الیاف پلی مری

از آنجایی که پیوند کووالانس کربن - کربن دارای استحکام بسیار بالایی است الیاف پلی مری های خطی می توانند استحکام و مدول چشم گیری داشته باشند. برای نیل به این هدف انبساط و کشش کامل زنجیر های مولکولی ضروری است. درجه جهت یابی زنجیر های پلی مری نسبت به محور الیاف و رابطه بین زنجیر ها از نظر تبلور، توسط ماهیت شیمیایی پلی مری و روش فرایند تعیین می شود.

جهت دادن زنجیر ها می تواند با انبساط و کشش کامل زنجیر ها همراه باشد یا نباشد. شکل ۱۴ دو حالت فوق را نشان می دهد.



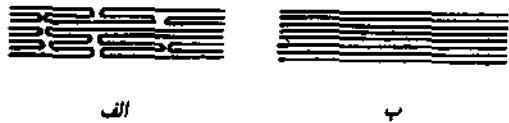
شکل ۱۴ - شکست کششی الیاف کربن

جدول ۳ مقایسه خواص انواع الیاف کربن را نشان می دهد. استحکام پائین تر دارد. انواع SHT بالاترین استحکام و SHM بالاترین مدول را نشان می دهند.

جدول ۳ مقایسه خواص انواع الیاف کربن را نشان می دهد.

جدول ۳ - خواص انواع الیاف کربن

الیاف ملد	دانسیته (gcm^{-3})	مدول کشسانی (GPa)	مقاومت الکتریکی ($10^{-2} \Omega cm$)
ریون	1/66	390	10
پلی اکریلونیتریل	1/73	230	18
فیر LT	1/6	41	100
فیر HT	1/6	41	50
وینیل LT	2/1	330	9
وینیل HT	2/2	690	1/8
گرافیت تک بلوری	2/25	1000	0/4



شکل ۱۴ - جهت یابی زنجیر های مولکولی در امتداد الیاف (الف) بدون انبساط و کشش کامل زنجیر ها (ب) با انبساط و کشش کامل زنجیر ها

واضح است که بهترین خواص مکانیکی و فیزیکی در الیاف پلی مری را فقط می توان با انبساط و کشش کامل زنجیر ها به دست آورد. ولی در حال حاضر حصول چنین ساختاری با استفاده از اکثر پلی مری ها غیر ممکن یا بسیار مشکل و پرهزینه است. الیاف پلی مری، به استثنای کولار، به علت مقاومت گرمایی پائین و انبساط گرمایی زیاد و کمبود های دیگر هنوز مصرف چندانی در کامپوزیت ها ندارند. در حال حاضر استفاده از آنها در دما های نسبتاً بالا امکان پذیر نیست.

در حال حاضر چند نوع الیاف پلی آمید آروماتیک (آرامید) تحت نام تجاری کولار و نوعی الیاف پلی اتیلن، مهمترین الیاف پلی مری مورد استفاده در کامپوزیت های پلی مری را تشکیل می دهند.

الیاف آرامید

ساختار شیمیایی الیاف آرامید بر پایه واحدهای آروماتیک جهت داده شده است که سختی و صلیبیت زیاد و شکل میله ای پلی مری را باعث می شود. اتصال پیوندها به واحدهای آروماتیک در مسووعیت های پارسا صورت می گیرد. به علت سختی زیاد زنجیر ها، دمای انتقال شیشه ای (T_g)

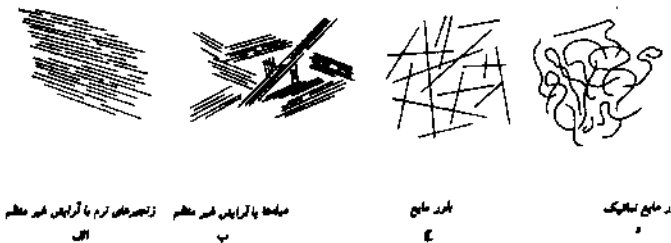
مقاومت الیاف کربن در برابر اکسایش در دما های بالا با مدول کشسانی آن رابطه مستقیم دارد و انواع HT تهیه شده از الیاف وینیلی از این نظر برترند. مقاومت الکتریکی نه چندان خوب، مصرف الیاف کربن را در کاربردهای الکتریکی محدود کرده است.

نابرابری ضرایب انبساط گرمایی الیاف کربن در امتداد محور اصلی و در جهت عرضی نشان دهنده ماهیت نایزوتروپی این الیاف است: ضریب انبساط گرمایی در امتداد الیاف: $1/3 \times 10^{-3} / K$ - تا $0/5$ ضریب انبساط گرمایی در جهت عرضی الیاف

در این پلی‌مرها بالا بوده و حلالیت آنها نیز بسیار پائین است. در نتیجه تبدیل این پلی‌مرها به الیاف با استفاده از روشهای مرسوم بسیار مشکل یا غیرممکن است. این پلی‌مرها را فقط با استفاده از روشهای ذوب ریس که در آن از محلول پلی‌مر در حالت بلور مایع استفاده می‌شود، می‌توان به شکل الیاف در آورد.

تهیه

با وجود اینکه در مورد تهیه الیاف آرامید هنوز اطلاعات کافی در دسترس نیست، اما احتمال می‌رود که این پلی‌مرها از پلی‌مر شدن تراکمی محلول از دی‌آمین‌ها و دی‌هالیدها در دماهای پائین به دست می‌آیند. مهمترین عامل جهت دستیابی به استحکام و مدول بالا استفاده از محلول پلی‌مر در حالت بلور مایع برای رسیدن است. شکل ۱۵ حالت‌های مختلف زنجیرهای پلی‌مری در محلول را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵ - حالت‌های مختلف زنجیرهای پلی‌مری در محلول

با افزایش غلظت زنجیرهای سفت میله‌ای شکل پلی‌مر در محلول، حالتی حاصل می‌شود که در آن میله‌ها در بخش‌های مختلف محلول به موازات یکدیگر قرار می‌گیرند (حالت بلور مایع). حالتی که در آن اکثر زنجیرهای میله‌ای موازی و هم جهت باشند ولی زنجیرهای مرکزی وضعیتی غیر منظم پیدا کنند به حالت بلور نماتیک (Nematic) معروف است. این حالت در الیاف آرامید دیده می‌شود.

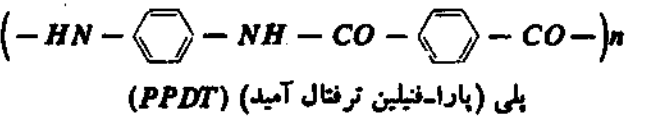
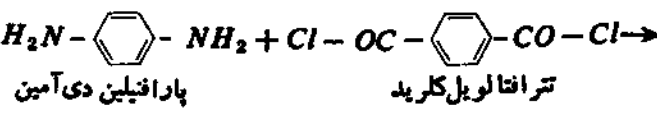
نظم و ترتیب زنجیرهای میله‌ای تحت تاثیر نیروهای برشی، مثلاً در اکستروژن از داخل تار ریس، بیشتر می‌شود. پلی‌آمیدهای آروماتیک از نوع پارا در شرایط خاصی از غلظت، دما، حلال و جرم مولکولی می‌توانند محلول‌های بلور مایع تشکیل دهند. جرم مولکولی پلی‌مر باید از حد مینیمم بیشتر باشد و میزان انحلال‌پذیری آن نیز در حد باشد که غلظت بحرانی لازم جهت تشکیل بلورهای مایع باشد. الیاف رسیده شده از این محلول‌ها استحکام نسبتاً بالایی دارند و به علت انبساط و جهت‌یابی زنجیرها لزومی به استفاده از روشهای مرسوم کشش وجود ندارد.

در مورد الیاف کولار از غلظت ۲۰ درصد وزنی در سولفوریک اسید غلیظ جهت تهیه الیاف با روش جت خشک - رسیدن تر استفاده می‌شود. محلول در دمای حدود ۱۰۰°C با فشار از بین رشته ساز عبور می‌کند و جهت رسوب دادن الیاف به داخل آب با دمای ۰°C هدایت

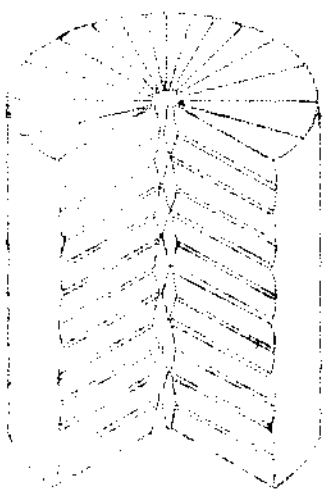
می‌شود. الیاف حاصل پس از پس شستشو در آب و خشک کردن جمع‌آوری می‌شود. بهبود خواص الیاف از طریق افزایش مواد به حلال و تغییر شرایط ریسیدن و با استفاده از عملیات گرمایی بر روی الیاف امکانپذیر است.

ساختار

کولار محصول پلی‌مر شدن تراکمی ترفتالویل کلرید و پارا فنیلن دی‌آمین است.



درجه تبلور در کولار بالاست و خطی بودن زنجیرها، بسته بندی نزدیک به هم را امکانپذیر می‌سازد. پیوندهای محکم کووالانسی در امتداد الیاف و پیوندهای ضعیف تر هیدروژنی در جهت عرضی الیاف خواص نایزوتروپی به الیاف کولار می‌دهد. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که در ساختار الیاف کولار صفحات بلوری به صوت شعاعی قرار گرفته و در طول الیاف پلیسه شده‌اند. چنین ساختاری مدول برشی الیاف را در جهت طول و استحکام الیاف در برابر نیروهای فشار را کاهش می‌دهد. به این دلیل استفاده از الیاف در برابر نیروهای فشار را کاهش می‌دهد. به این دلیل استفاده از الیاف کولار در مواردی که نیروهای فشاری بر کامپوزیت اعمال می‌شود، جایز نیست.



شکل ۱۶ - ساختار الیاف کولار

الیاف آرامید از نوع کولار خواص و کاربردهای مفیدی دارند. سه کاربرد عمده آن عبارتند از:

۱ - کولار - برای تقویت تایر و قطعات لاستیکی

۳ - کولار ۲۹ - برای تهیه طناب، کابل و پارچه‌های ویژه جهت مصرف در لباسهای مقاوم در برابر گرما و جلیقه‌های ضد گلوله و غیره.

۳ - کولار ۴۹ - برای تقویت رزینهای اپوکسی، پلی استر و سایر رزینها جهت مصرف در صنایع هوا فضایی و وسایل ورزشی.

کولار و کولار ۲۹ خواص تقریباً مشابهی دارند. در جدول زیر برخی از خواص آنها با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۴ - خواص انواع الیاف کولار

خواص	کولار ۲۹	کولار ۴۹
دانسیته (gcm^{-3})	۱/۴۴	۱/۴۴
قطر (μm)	۱۲	۱۲
استحکام کشسانی (Gpa)	۲/۸	۲/۸
کرنش در شکست (%)	۲/۳	۴/۰
مدول یانگ در کشش (Gpa)	۱۲۵	۶۵

الیاف ترکیبی از خواص مانند استحکام و مدول کشسان نسبتاً بالا به همراه ظرفیت گرمایی زیاد و مقاومت زیاد در برابر اثرات محیطی را دارند. این خصوصیات باعث می‌شود که این الیاف به عنوان تقویت کننده در ساختار مواد مقاوم در مقابل دما به کار روند.

برای ساخت الیاف سرامیکی سه روش وجود دارد: ته نشینی بخارات شیمیایی، تجزیه گرمایی پلی‌مر و روش سول-ژل. دو روش آخر نسبتاً جدیدند که برای تهیه الیاف سرامیکی از پلی‌مرهای آلی فلزی (Organometallic) از این روشها استفاده می‌شود. در روش تجزیه گرمایی برای تولید الیاف سرامیکی، از پلی‌مرهای دارای سیلیسیم، کربن، نیتروژن و بور استفاده می‌شود که محصولات نهایی SiC ، Si_3N_4 ، B_4C و BN به شکل لیف، اسفنج یا پوشش‌ها خواهد بود. اینک به بحث درباره بعضی از انواع مهم الیاف سرامیکی می‌پردازیم.

الیاف آلومینا

الیاف آلومینا انواع مختلف دارند و توسط چند شرکت ساخته می‌شوند. دوپونت (DuPont) الیاف بلند پلی‌بلور α - آلومینا تولید می‌کند. شرکت سومیتومو کیمیکال (Sumitomo Chemical Co) الیافی با ترکیب ۷۰ - Al_2O_3 و ۳۰ - SiO_2 تولید می‌کند. ICI الیاف کوتاه ۸ - آلومینا (با نام تجاری سافیل (saffil) تولید می‌نماید. در ادامه بحث مطالبی درباره یکی از روشهای مهم ساخت الیاف سرامیکی و خواص آنها خواهد آمد.

الیاف FP

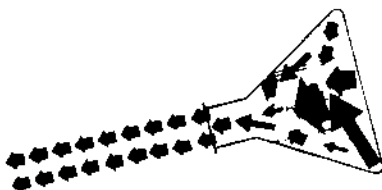
الیاف FP، نخ بلند α - آلومینا با دانسیته تئوری ۹۸٪ است در روش ساخت آن سه مرحله اصلی زیر وجود دارد.

۱ - یک مخلوط دوغاب (Slurry) بر پایه آب از ذرات آلومینای انتخابی و بعضی افزودنی‌ها به منظور سهولت رسیدگی تهیه می‌شود. ویسکوزیته این دوغاب با تنظیم مقدار آب موجود در آن کنترل می‌شود.

۲ - الیاف به صورت خشک از این دوغاب رسیده می‌شوند.

۳ - نخ رسیده شده در دو مرحله در معرض شعله قرار می‌گیرد. شعله کم به منظور کنترل میزان درهم رفتگی (Shrinkage) و شعله بالا برای بهبود دانسیته Al_2O_3 - α است. معمولاً از یک لایه نازک سیلیکا به عنوان پوشش استفاده می‌شود. این پوشش از ایجاد ترکهای سطحی ممانعت به عمل می‌آورد و استحکام کششی الیاف را به میزان بیش از ۵۰٪ نسبت به الیاف پوشش داده نشده، افزایش می‌دهد.

جدول ۵ خواص بعضی از انواع الیاف آلومینا را نشان می‌دهد.



سطح و خواص مکانیکی الیاف پلی‌مری از جمله کولار در برابر پرتوهای فرابنفش تأثیرپذیر هستند. پوشش‌دهی سطح کامپوزیت‌های کولاری توسط مواد جذب کننده نور این مشکل را برطرف می‌کند.

الیاف پلی‌اتیلن

اولین الیاف پلی‌اتیلن با مدول و استحکام نسبتاً بالا در دهه ۱۹۷۰ تهیه شده است. این الیاف با استفاده از پلی‌اتیلن با دانسیته زیاد و جرم مولکولی $10^2 - 10^5$ و فرایند باروشهای مرسوم کشیدن تنشی، کشیدن با اکستروژن و اکستروژن هیدرواستاتیکی به دست می‌آید. مدول الیاف حدود ۷۰ Gpa و ساختار آن از نوع زنجیرهای جهت داده شده بدون انبساط و کشش کامل بود.

در تحولات بعدی با استفاده از پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بسیار بالا (بیش از 10^6) و با بکارگیری روشهای جدید رسیدن محلول و زلی، انبساط و کشش کامل زنجیرها در امتداد الیاف میسر شده و الیافی به مراتب محکمتر (مدول حدود ۲۰۰ Gpa) به دست آمد.

مدول و استحکام الیاف پلی‌اتیلن از الیاف کولار پائین تر است ولی به علت دانسیته پائین تر (حدود $0.97gcm^{-3}$) خواص ویژه آن ۳۰ - ۴۰٪ از کولار بهتر است.

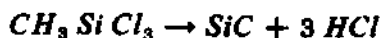
الیاف سرامیکی

الیاف سرامیکی بلند موجود خواص جالب توجهی دارند. این

نوع لیف	ترکیب	قطر (μm)	دانسیته (gcm^{-3})	استحکام کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)
سومیتومو* (Sumitomo)	$Al_2O_3 - \%85$ $SiO_2 - \%18$	۹	۳/۲	۲۶۰۰	۲۵۰
نکستل ۳۱۲ (Nexte 312) (3M Co)	$Al_2O_3 - \%62$ $B_2O_3 - \%14$ $SiO_2 - \%24$	۳/۵	۲/۷	۱۷۰۰	۱۵۲
سافیل (Saffil) (ICI)	$Al_2O_3 - \%96$ $SiO_2 - \%4$	۳	۲/۳	۲۰۰۰	۳۰۰

* تولید در مقیاس آزمایشگاهی

به طور استیوکیومتری SiC ته نشین شود. واکنش شیمیایی به صورت زیر است.



معمولاً کربن جامد و یا سیلیسیم جامد یا مایع با SiC مخلوط می شود. تک لیف نهایی (۱۰۰ - ۱۵۰ میکرومتر) شامل پوششی اساساً از SiC - B و مقداری SiC - α روی مغزی تنگستن است. سطح مقطع تک لیف SiC شباهت بسیار به الیاف بور دارد. خواص تک لیف SiC تهیه شده به روش CVD در جدول ۶ و خواص نوع دیگری از الیاف SiC به نام نیکالون (Nicalon) در جدول ۷ آمده است.

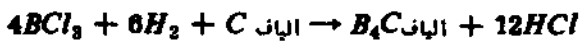
جدول ۶ - خواص تک لیف SiC تهیه شده به روش ته نشین کردن بخارات

شیمیایی (C.V.D.)

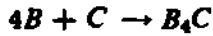
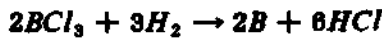
ترکیب	قطر (μm)	دانسیته (gcm^{-3})	استحکام کششی مدول یانگ (MPa)	مدول یانگ (Gpa)
β -SiC	۱۴۰	۲/۳	۲۵۰۰	۴۳۰

الیاف سیلیسیم کاربرد

برای ساخت SiC از دو روش مرسوم و غیر مرسوم استفاده می شود. روشهای مرسوم، فرآیندهای ته نشین کردن بخارات شیمیایی را در بر می گیرد. در صورتی که روشهای غیر مرسوم شامل روشهای کنترل تجزیه گرمایی مواد پلی مری است. نوع مهمی از SiC وجود دارد که برای تقویت کردن به کار می رود و SiC ویسکر (Whisker) یا تک بلوری نامیده می شود. ساخت این نوع SiC به طور خلاصه مورد بحث قرار می گیرد. بخارات SiC به طور شیمیایی روی سوبسترای تنگستن (گاهی کربن) در دمای حدود ۱۴۰۰°C می نشیند. مخلوط گازهای فعال شامل هیدروژن و الکیل سیلانها هستند. به طور نمونه مخلوطی گساز از ۷۰٪ هیدروژن و ۳۰٪ سیلان از بالای محفظه واکنش (شکل ۱۲) که محل ورود سوبسترای تنگستن (به قطر حدود ۱۳mm) نیز هست، وارد می شود. درزگیرهای جیوه ای در هر دو انتها به عنوان الکترودهای تماس به کار می روند. برای به دست آوردن تک لیف به قطر ۱۰۰ μm سوبسترا معمولاً باید حدود ۲۰ ثانیه در محفظه واکنش قرار داشته باشد. الیاف در ته محفظه واکنش روی قرقره ای پیچیده می شوند. بخارات خروجی (شامل ۹۵٪ مخلوط گاز اصلی + HCL) به منظور بازیابی سیلانهای مصرف نشده از طرف یک سرد کننده عبور داده می شود. بازیابی کامل سیلانهای مصرف نشده در کاهش هزینه فرآیند تولید، اهمیت زیادی دارد. البته هزینه چنین روشهایی بسیار بالا است. متیل کلروسیلان مطلوبترین ماده خام است زیرا شامل یک اتم سیلیسیم و یک اتم کربن است، و می توان انتظار داشت که



واکنش عملاً در دو مرحله، به صورت ذیل انجام می‌شود:



الیاف فلزی

بعضی فلزات به شکل سیم استحکام نسبتاً بالایی دارند. در بین سیمهای فلزی بریلیم (دانسیت کم و مدول بالا) فولاد (استحکام زیاد و قیمت کم)، و تنگستن (مدول بالا و نسوز)، بیشترین اهمیت را دارند. یکی از بزرگترین مزایای سیمهای فلزی، ثبات استحکام کششی آنها نسبت به بعضی الیاف سرامیکی است. به ویژه، بریلیم با مدول بالا (حدود ۳۰۰ GPa) و دانسیته کم ($1/8 \text{ gr/cm}^3$)، صرف نظر از سمیت و قیمت آن، یک تقویت کننده ایده آل است استحکام کششی آن نسبتاً کم است (حدود ۱۳۰۰ MPa).

سیمهای تنگستن عموماً برای ساخت لامپها توسعه یافته‌اند. تنگستن دانسیته بسیار زیادی ($19/3 \text{ gr/cm}^3$) دارد، اما به دلیل خصوصیت نسوز بودن آنها، به عنوان یک تقویت کننده نیز کار برد دارند. یکی از مشکلات تنگستن، احتمال اکسید شدن آن است. اکسید تنگستن در دماهای کار بالا، احتمالاً تبخیر می‌شود.

سیمهای فولادی از جمله مواد تقویت کننده تجارتي معمولی هستند که بیشتر برای تقویت بتون به کار می‌روند. سیمهای فولادی معمولاً به عنوان تقویت کننده در تایرها نیز به کار می‌روند. سیمهای فولادی بسیار نازک (با قطر ۰/۱ میلی‌متر) و در صدکرین زیاد (۹۹٪) می‌توانند استحکام کششی بسیار بالایی (حدود ۵ GPa) داشته باشند. تولید سیمهای فلزی نازک، به علت هزینه زیاد فرآیند کشیدن سیم، بسیار گران است. در جدول ۸ خواص مکانیکی بعضی سیمهای تجارتي فلزی به طور خلاصه آمده است.

مقایسه الیاف مختلف

مقایسه‌ای از مهمترین خصوصیات تقویت کننده‌های با کارائی بالا که در قسمتهای قبل شرح آنها آمد، در جدول ارائه شده و چگونگی تغییر استحکام کششی آنها با مدول یانگ در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در این قسمت برخی از خواص مهم ایسن الیاف را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم.

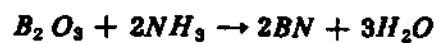
باید توجه داشت که تمام این الیاف به الیاف پیشرفته معروف‌اند. آنها دانسیته بسیار کمی دارند و عناصر تشکیل دهنده این الیاف مربوط به دو ردیف اول جدول تناوبی است. به علاوه این الیاف چه به شکل ترکیب

دانسیت	۲/۶ gr/cm
قطر	۱۰ - ۲۰ μm
مدول	۱۸۰ GPa (۲۲۰ GPa, β -SiC برای)
استحکام در ۲۰°C در هنگام تولید	۲ GPa
بعد از ۱۴۰۰°C (آرگون)	$۱ \text{ GPa} >$
استحکام در ۱۴۰۰°C (اکسیژن)	$۰/۵ \text{ GPa} >$
کرنش خزش در ۱۳۰۰°C , $۰/۶ \text{ GPa}$, ۲۰%	$۲/۱۵$

سایر الیاف سرامیکی

علاوه بر الیاف آلومینا و سیلیسم کاربرد، الیاف سرامیکی دیگری مانند سیلیسم نیتريد، بورکریید و بورنیتريد، نیز وجود دارند. الیاف سیلیسم نیتريد (Si_3N_4) به روش ته‌نشین کردن بخارات شیمیایی و با استفاده از ترکیبات فرار سیلیسم تهیه می‌شوند. واکنش دهنده‌ها معمولاً SiCl_4 و SiH_4 هستند. Si_3N_4 روی سوبسترای کربن یا تنگستن ته‌نشین می‌شود.

الیاف بورنیتريد شباهت بسیار با الیاف کربن دارند. ایسن الیاف همان چگالی ($۲/۲ \text{ gr/cm}^3$) الیاف کربن را دارند، ولی مقاومت زیادی در مقابل اکسایش دارند و خواص دی الکتریک آنها عالی است. الیاف بورنیتريد از ریسندگی مذاب بوریک اکسید با آمونیاک طبق واکنش زیر تهیه می‌شوند.



در این مرحله الیاف بورنیتريد را به منظور حذف مقادیر اندک اکسیدها و پایداژ شدن محصول، در دمای بالائی قرار می‌دهند. بورکریید نیز ماده‌ای بسیار سبک و محکم است. ایسن مساده را می‌توان از واکنش نخ کربن با BCl_3 و H_2 در دمای بالا، یا فرآیند ته‌نشین کردن بخارات شیمیایی تهیه کرد. واکنش شیمیایی به این ترتیب است.

با عنصری اکثر آداری پیوندهای کتوالانسی هستند که از قوی‌ترین پیوندها است و مهمتر از همه، چنین مواد سبک، محکم و سفتی در بیشتر کاربردها بسیار مطلوب‌اند. کاربرد ویژه آنها در صنایع هوا فضا، حمل و نقل زمینی، خانه سازی و ساختمان است.

بعضی الیاف خصوصیات نسبت نایزوتروپی دارند. به ویژه، کولار استحکام فشاری ضعیف در مقایسه با استحکام کششی دارد. که این امر به واسطه ساختار آن است. در کشش، پیوندهای کتوالانسی، بار را تحمل می‌کنند. در صورتیکه در فشار، پیوندهای ضعیف هیدروژنی نقش

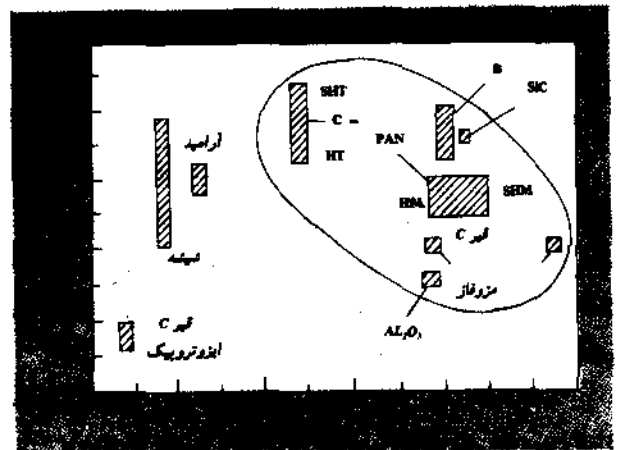
جدول ۸ - خواص برخی سیمهای فلزی تجاری

نقطه ذوب (°C)	ضریب انبساط گرمایی ($10^{-6} K^{-1}$)	مدول یانگ (Gpa)	استحکام کشش (MPa)	دانسیته (g/cm^3)	قطر (mm)	ماده
۱۳۰۰	۱۱/۸	۲۱۰	۴۲۵۰	۷/۸	۱۰۰	فولاد، ۰/۹٪ کربن
-	۱۸/۰	۱۹۸	۱۰۰۰-۷۰۰	۸/۰	۲۵۰-۵۰	فولاد ضد زنگ ۸-۱۸
۱۲۸۰	۱۱/۶	۳۰۰	۱۲۶۰	۱/۸۵	-	بریلیم
۳۴۰۰ ۳۹	۴/۵	۳۶۰	۳۸۵۰ ۳۱۵۰	۱۹/۳	۲۵ > ۱۲۵ ۲۵۰	تنگستن
۲۶۰۰	۶/۰	۳۱۰	۳۳۵۰	۱۰/۲	۲۵ >	مولیبدن

دارند. سایر الیاف در مقابل کشش و فشار خواص مشابهی دارند. الیاف از نظر خصوصیات گرمایی موقعیت‌های متفاوتی دارند. به ویژه ضریب انبساط گرمایی الیاف کربن و کولار در جهت طول و عرض کاملاً متفاوت است. در کنار این انبساط گرمایی نایزوتروپی، این سؤال مطرح است که خواص این مواد در دماهای بالا تا چه حدی حفظ می‌شود، واضح است که الیاف پلی‌مری مانند کولار و پلی اتیلن فقط می‌توانند همراه با سایر مواد پلی‌مری و فقط در دمای اتاق یا حدود آن به کار روند. با در نظر گرفتن این مساله فقط الیاف سرامیکی (Al_2O_3 ، کربن و پور سی) می‌توانند در مساله‌های کامپوزیت‌های دارای ماتریس سرامیکی را می‌توان حقیقتاً تا دماهای زیاد به کار برد. مشکلی که در دماهای بسیار بالا (بیشتر از $1500^{\circ}C$) به وجود می‌آید، اکسایش الیاف و ماتریس است مثلاً الیاف کربن مقاومت اکسایشی زیادی در این دمای بالا ندارد. الیاف سرامیکی Si_3N_4 یا SiC تنها الیاف تقویت کننده مناسب در دماهای بالا (بیشتر از $1200^{\circ}C$ - $1300^{\circ}C$) و در مجاورت هوا هستند.

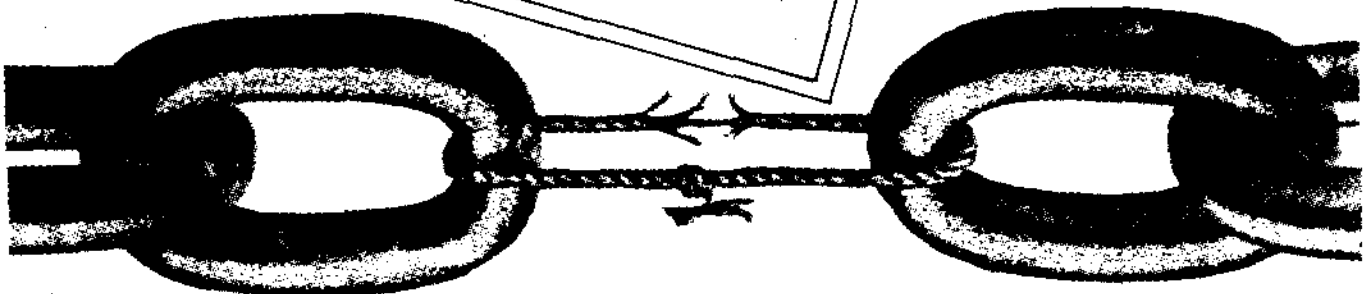
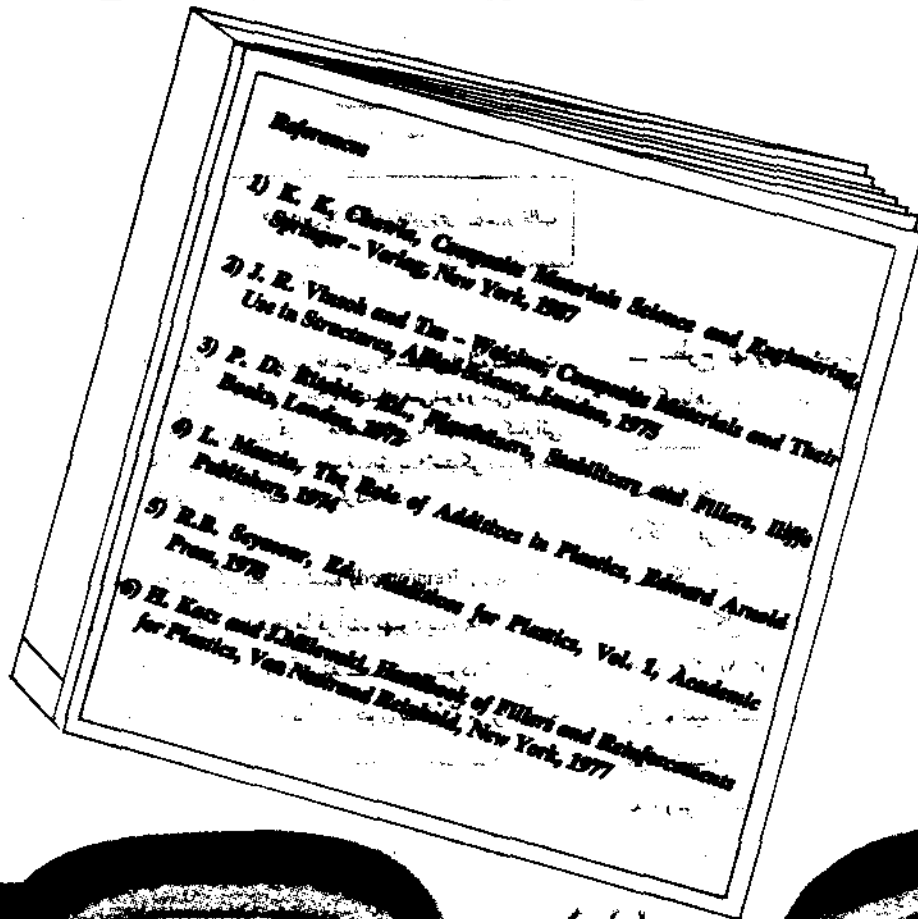
خصوصیت مهم دیگر این الیاف با کارایی بالا، داشتن مقدار کرنش نسبتاً کم در شکست است، یعنی میزان این کرنش معمولاً کمتر از ۲٪ است.

انعطاف پذیری الیاف بستگی به مدول یانگ و قطر آن دارد. به طور کلی در الیاف با مدول بالا، پارامتر قطر مهمتر است و انعطاف پذیری را کنترل می‌کند. انعطاف پذیری الیاف، باعث می‌شود که بتوان آنها را بافت، خم کرد و یا با اشکال پیچیده‌ای در آورد.



شکل ۱۷ - مقایسه الیاف مختلف

(پور) (w)	Al ₂ O ₃ (FP)	SiC		شیشه E	کولار	PAN - پر مینای کربن		خصوصیات
		Nicalon C.N.O				HS	HM	
۲۰۰-۱۰۰	۲۰	۲۰-۱۰	۲۰۰-۱۰۰	۱۴-۸	۱/۲	۸/۶-۷/۶	۱۰-۷	قطر (μm)
۲/۶	۳/۹۵	۲/۶	۳/۳	۲/۵۵	۱/۴۵	۱/۷۵	۱/۹۵	دانسیته (gcm ⁻³)
۳۸۵	۳۷۹	۱۸۰	۳۳۰	۷۰	۱۲۵	۲۵۰	۳۹۰	مدول یانگ (Gpa)
-	-	-	-	۷۰	-	۲۰	۱۲	موازی محور لیف
۳/۸	۱/۴	۲	۲/۵	۲/۵-۱/۵	۳/۵-۲/۸	۲/۷	۲/۲	عمود بر محور لیف
-	-	-	-	۳/۲-۱/۸	۲/۸-۲/۲	۱/۰	۰/۵	استحکام کنش (GPa)
۸/۲	۷/۵	-	۵/۷	۳/۷	- ۲۵-۵	۰/۱۶-۰/۱۵	۰/۱۶-۰/۱۵	گرنش در شکست (%)
-	-	-	-	۴/۷	۵۹	۱۲-۷	۱۲-۷	ضریب انبساط گرمایی (۱۰ ^{-۶} K ^{-۱})
-	-	-	-	۴/۷	۵۹	۱۲-۷	۱۲-۷	موازی محور لیف
-	-	-	-	۴/۷	۵۹	۱۲-۷	۱۲-۷	عمود بر محور لیف



ادامه دارد...