

فصل دوم

تقویت کننده‌ها

تقویت کننده‌های مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی را می‌توان به شکل رشته‌های^۱ پیوسته، رشته‌های کوتاه، ویسکرها یا ذرات تولید نمود. پارامتری که باعث تمیز دادن اشکال مختلف تقویت کننده‌ها از یکدیگر می‌شود، نسبت ابعادی نامیده می‌شود. نسبت ابعادی، نسبت طول به قطر (یا ضخامت) رشته، ذره یا ویسکر است. بنابراین رشته‌های پیوسته نسبت ابعادی تقریباً بی‌نهایت و ذرات کاملاً هم محور نسبت ابعادی حدود واحد خواهند داشت. در جدول ۱-۲ لیستی از برخی تقویت کننده‌های مهم در اشکال مختلف نشان داده شده است. تقویت کننده‌های سرامیکی، ویژگی‌های استحکام و مدول الاستیسیته بالا را با کارایی مناسب در دمای بالا ترکیب می‌نمایند. در ضمن رشته‌های سرامیکی پیوسته گران‌تر از تقویت کننده‌های سرامیکی ذره‌ای می‌باشند. در این فصل، ابتدا به تشریح مشخصات کلی تقویت کننده‌ها پرداخته و سپس با جزئیات بیشتری به توضیح مراحل فرآیندهای ساخت، ریزساختار و خواص برخی تقویت کننده‌های سرامیکی، به عنوان پر مصرف ترین تقویت کننده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی، خواهیم پرداخت.

^۱ مترجمین: در تمامی فصول این کتاب واژه‌های الیاف و رشته به یک معنا به کار برده خواهند شد، هر چند بیشتر از واژه رشته استفاده شده است.

۱-۲) مواد رشته‌ای

اصولاً همه مواد (پلیمرها، فلزات و یا سرامیک‌ها) را می‌توان به شکل الیاف یا رشته درآورد (Chawla, ۱۹۹۸). یک رشته را می‌توان به عنوان ماده‌ای طویل شده با قطر یا ضخامت کمتر از $250 \mu\text{m}$ و نسبت ابعادی بزرگتر از ۱۰۰، تعریف نمود. باید توجه داشت که این بیان، نه تنها یک تعریف کاربردی است بلکه یک تعریف کاملاً هندسی است که می‌توان آن را برای هر جمی به کار برد. رشته‌ها که غالباً دارای سطح مقطع کوچک و نسبت ابعادی بزرگ می‌باشند، خواص منحصر بفردی مطابق ذیل دارند:

- انعطاف پذیری بالا.
 - استحکام بالاتر از ماده حجیم با همان ترکیب.
- در مواردی که رشته‌ها طویل هستند، لازم است در یک محیط زمینه پیوسته به کار گرفته شوند، به این معنا که زمینه بتواند با تثبیت این رشته‌ها به مجموعه خاصیت کامپوزیتی دهد. باید تاکید نمود که به هیچ وجه این امر تنها نکته مثبت زمینه در کامپوزیت به شمار نمی‌آید.

جدول ۱-۲: برخی تقویت کننده‌های مهم مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی.

SiC , C , B , $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$, Al_2O_3 Nb_3Sn , Nb-Ti , Si_3N_4	رشته‌های پیوسته
Al_2O_3 , TiB_2 , SiC	رشته‌های ناپیوسته الف) ویسکرها
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$, SiC , Al_2O_3 , رشته‌های کربنی رشد داده شده از فاز بخار	ب) رشته‌های کوتاه
WC , B_4C , TiC , Al_2O_3 , SiC	ذرات

۲-۲) انعطاف پذیری رشته‌ها

انعطاف پذیری در رشته‌های نازک ویژگی مهمی محسوب می‌شود. انعطاف پذیری بالا یکی از مشخصات ذاتی جسم دارای قطر کوچک و مدول کم است (Dresher, 1979). انعطاف پذیری رشته‌ها این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان از تکنیک‌های زیادی برای ساخت کامپوزیت‌های تقویت شده با رشته بهره برد. یک رشته را به عنوان میله الاستیک طویل شده در نظر بگیرید؛ در این صورت انعطاف پذیری آن، تابع معکوسی از مدول الاستیک آن، E ، و ممان ثانویه سطح یا ممان اینرسی سطح مقطع آن، I ، خواهد بود. مدول الاستیک یک جسم عموماً مستقل از شکل و اندازه آن بوده و معمولاً برای یک ترکیب شیمیایی معین ثابت (با فرض کاملاً چگال بودن ماده) می‌باشد. بنابراین در مورد یک ترکیب و چگالی مشخص، انعطاف پذیری ماده توسط شکل آن یا دقیق‌تر، قطر آن تعیین می‌شود. ممان خمشی M در یک تیرک الاستیک که موجب انحنایی به شعاع R در آن می‌شود را در نظر بگیرید. حاصلضرب ممان خمشی (M) و شعاع انحنا (R)، صلبیت خمشی^۱ نامیده می‌شود. از معکوس صلبیت خمشی به عنوان شاخصی برای انعطاف پذیری بهره گرفته می‌شود. در یک میله خم شده به شعاع R ، می‌توان با استفاده از اصول مبحث مقاومت مصالح روابط زیر را بدست آورد (به منظور درک چگونگی بدست آوردن این روابط به بخش توضیحات مراجعه نمایید) :

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R}$$

که E مدول یانگ جسم بوده و سایر پارامترها در بالا تعریف شده‌اند. برای یک میله یا رشته با قطر d ، ممان اینرسی $I = \pi d^4 / 64$ می‌باشد. با قرار دادن این رابطه در عبارت بالا و مرتب نمودن آن خواهیم داشت :

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

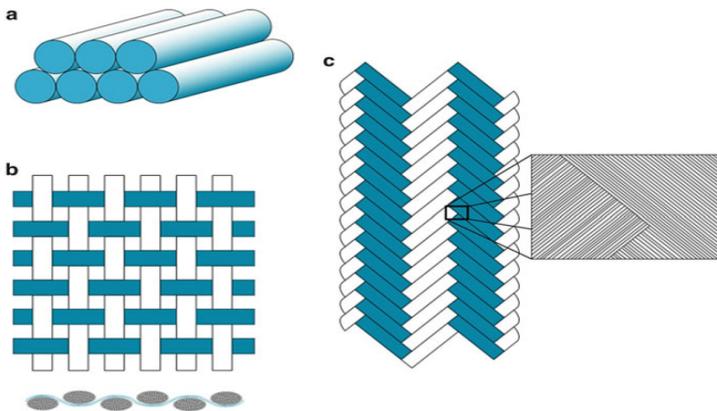
^۱ Bonding Rigidity

EI (یا MR) صلیت خمشی است و بنابراین انعطاف پذیری برابر $1/MR$

$$(1-2) \quad \frac{1}{MR} = \frac{64}{E\pi d^4}$$

در این رابطه d قطر معادل و I ممان اینرسی میله (رشته) است. معادله ۱-۲ بیانگر این نکته است که انعطاف پذیری تابع بسیار حساسی از d است. در عمل، ساخت یک رشته انعطاف پذیر با قطر به اندازه کافی کوچک (چه پلیمر باشد یا فلز و یا سرامیک)، امکان پذیر می‌باشد.

در شکل ۱-۲، اشکال مختلف استفاده از رشته‌ها نشان داده شده است. شکل ۱-۲ (الف) رشته‌های مستقیم و در یک سو جهت گیری شده را نشان می‌دهد. قسمت‌های (ب) و (ج) در این شکل، صور مختلفی از رشته‌های بافته شده را نشان می‌دهند. چنین ساختاری از رشته‌ها مخصوصاً در حالت (ب) و (ج)، فقط با استفاده از رشته‌های با قطر کوچکی که انعطاف پذیری خوبی را فراهم می‌کند، امکان پذیر است.



شکل ۱-۲

شکل ۱-۲: اشکال مختلف مواد رشته‌ای، (الف) رشته‌های تک جهته، (ب) و (ج) رشته‌های بافته شده.

۲-۳ رشته‌های کربن

کربن یکی از عناصر بسیار متنوع به شمار می‌رود. این عنصر بسیار سبک بوده و دارای چگالی نظری $2/27 \text{ g/cm}^3$ است و به اشکال گوناگونی وجود دارد. دو نوع از گونه‌های مهم کربن، الماس و گرافیت می‌باشند. در بین اشکال نسبتاً جدیدتر کربن، می‌توان به فولرن باکمینستر^۱، که باکیبال^۲ هم خوانده می‌شود، اشاره نمود که از روش‌های کشتی به شکل نانولوله‌ها یا نانوسیم‌ها تهیه می‌شوند. در بین رشته‌های کربن نوع گرافیتی آن حائز اهمیت است. ساختار هگزاگونال کربن در گرافیت را می‌توان در شکل ۲-۲ به خوبی مشاهده کرد.

بخش توضیحات

یک رشته را به شکل یک میله استوانه‌ای فرض کنید. این میله تحت ممان اعمالی M قرار دارد.

$$M = \int y \sigma dA = \int y \frac{\sigma}{y} y dA = \frac{\sigma}{y} \int y^2 dA = \frac{\sigma I}{y}$$

که σ تنش موجود در المان و y فاصله آن از محور ختنی میله است. $\int y^2 dA = I$ ممان ثانویه مساحت میله خوانده می‌شود. با مرتب کردن رابطه بالا خواهیم داشت :

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{(R + y)d\theta - R d\theta}{R d\theta}$$

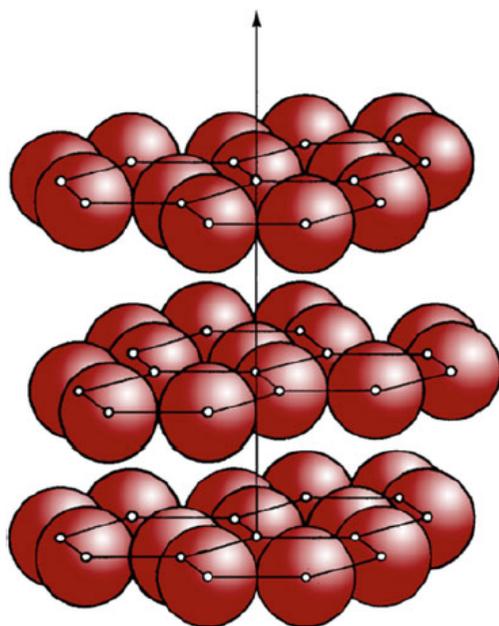
$$\varepsilon = \frac{y}{R}$$

از قانون هوک داریم :

^۱ Buckminster Fullerene

^۲ Buckyball

۱۹۶۹؛ Watt، ۱۹۷۰؛ Tokarsky و Diefendorf، ۱۹۷۵؛ Singer، ۱۹۷۹). در واقع، استفاده از یک پیش ماده آلی رشته‌ای و تبدیل آن به یک رشته غیر آلی، روشی متداول است، مشابه روشی که در مورد ساخت رشته‌های سرامیکی به کار برده می‌شود. بسته به نوع پیش ماده و روش فرآوری آن، می‌توان به رشته‌های گوناگونی از کربن با استحکام و مدول‌های متفاوتی دست یافت. برخی از انواع مهم رشته‌های کربن، استحکام بالا (HS)، مدول بالا (HM)، مدول متوسط (IM)، مدول بسیار بالا (SHM) و غیره می‌باشند.



شکل ۲-۲: ساختار هگزاگونال گرافیت.

پلی اکریلو نیتریل (PAN) معمول ترین پیش ماده مورد استفاده در ساخت رشته‌های کربن است. رشته‌های کربن با پایه قیر نیز از اهمیت خاصی برخوردار هستند. رشته‌های کربن بدست آمده از قیر می‌توانند خواص بسیار بهتری از رشته‌های بدست آمده از پیش ماده PAN داشته باشند.

مراحل کلی همه فرآیندهای ساخت رشته کربن بدین ترتیب می‌باشند :

الف) الیاف سازی، یعنی اکستروژن پلیمر مذاب یا محلول به شکل رشته‌ای از پیش ساخته شده.

ب) پایدارسازی (اکسیداسیون یا گرماسخت کردن)، در دماهای نسبتاً پایین ($^{\circ}\text{C}$ ۴۵۰-۲۰۰) و معمولاً در هوا انجام می‌شود. این مرحله پیش ماده را در حین فرآیند دما بالای بعدی، دیرگداز می‌نماید.

ج) کربن سازی، در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۲۰۰۰-۱۰۰۰ در اتمسفر خنثی (معمولاً N_2 خالص) انجام می‌شود. در پایان این مرحله، رشته حاوی حدود ۹۹-۸۵ درصد کربن خواهد بود.
 د) گرافیت سازی (اختیاری) که در اتمسفر آرگون یا N_2 در دمایی بالاتر از $^{\circ}\text{C}$ ۲۵۰۰ انجام می‌شود. این مرحله میزان کربن را به بیش از ۹۹ درصد افزایش می‌دهد و جهتگیری ترجیحی بسیار زیادی به رشته‌ها اعطا می‌کند.

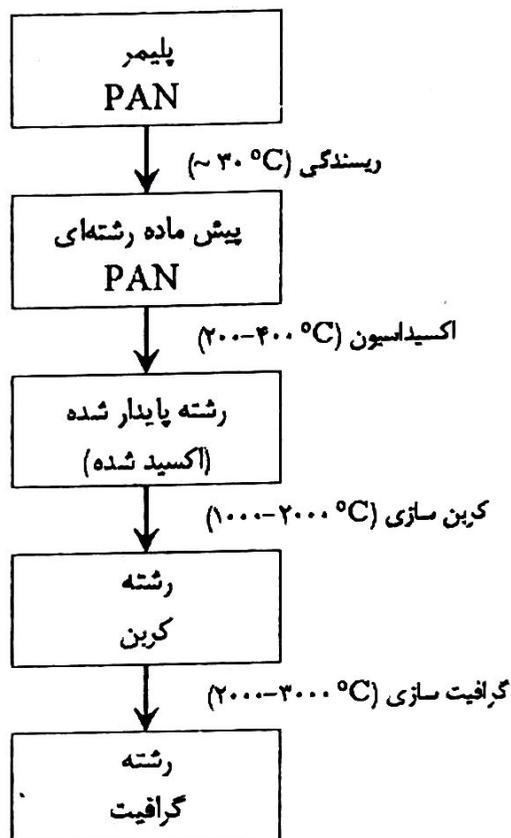
۲-۳-۲) رشته‌های کربن با پایه PAN^۱

رشته پیش ماده PAN، یک ساختار زنجیری پلیمری انعطاف پذیر دارد. در شکل ۲-۳ دیاگرامی ترسیم شده است که مراحل مختلف فرآوری رشته کربن با پایه PAN را نشان می‌دهد. PAN ساختار زنجیری شکلی از کربن‌ها به شکل ستون فقرات دارد که حاوی گروه‌های قطبی نیتریل است (شکل ۲-۴ الف)). در حین عملیات پایدارسازی، رشته پیش ماده PAN تحت کشش تا $^{\circ}\text{C}$ ۲۲۰ حرارت می‌بیند. در خلال این عملیات گروه‌های نیتریل واکنش داده و ساختار نردبان شکلی به خود می‌گیرند که هم صلب بوده و هم ساختاری مقاوم به حرارت است (شکل ۲-۴ ب)).

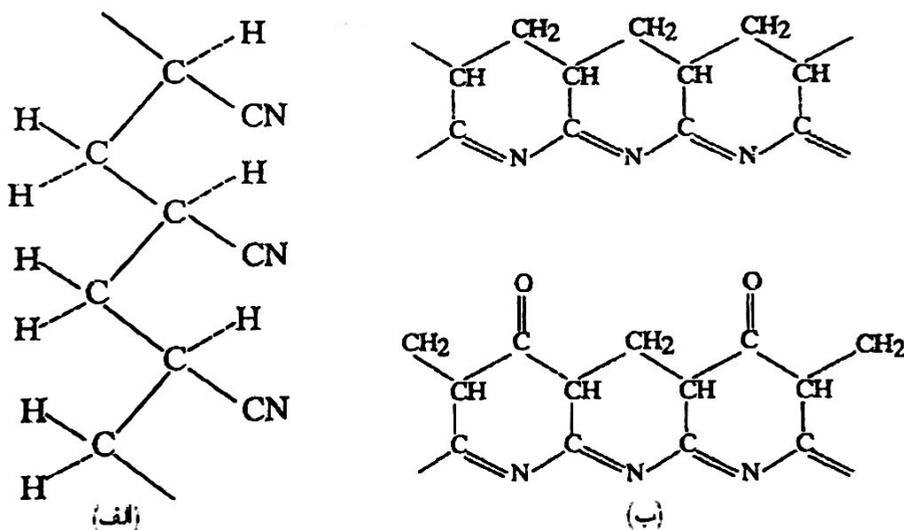
همچنین هنگامی که PAN تحت اتمسفر هوا در $^{\circ}\text{C}$ ۲۲۰ حرارت می‌بیند، اکسیژن جذب شده از گوشه‌ها به زنجیر متصل شده، رشته‌ها تیره می‌شوند، و یک ساختار پایدار نردبانی تشکیل می‌شود. در ضمن، انجام این عملیات تحت کشش به حفظ جهتگیری ساختار حلقه‌ها حتی پس از باربرداری کمک می‌نماید. در طی عملیات کربن سازی در حدود $^{\circ}\text{C}$ ۱۵۰۰ شبکه‌های هگزاگونال کربن، تشکیل شده و مقدار قابل

^۱ PAN-Based Carbon Fibers

توجهی گاز متصاعد می‌شود. این خروج گاز تا حدودی باعث تشکیل برخی ترک‌ها در رشته می‌شود که این امر کاهش استحکام کششی آن را موجب می‌گردد.



شکل ۲-۳: دیاگرام مربوط به ساخت رشته کربن با پایه PAN.



شکل ۲-۴: ساختار زنجیری کربن شبیه به ستون فقرات و (ب) ساختار نردبانی PAN بعد از پایدارسازی.

رشته‌های کربن تجاری دارای پوششی محافظ به نام سایز می‌باشند. سایز دو هدف را دنبال می‌نماید: الف) سهولت در کنترل عملیات انجام شده بر روی رشته‌ها و ب) افزایش چسبندگی با یک زمینه پلیمری. رشته‌های کربنی بدون پوشش هنگامی که با سطوحی همچون غلتک‌ها، قرقره‌های هادی و غیره در تماس قرار می‌گیرند، بارهای الکتریکی سطحی را به خود می‌گیرند. انجام عملیاتی مثل پیچیدن، بافتن، یا تابیدن رشته‌ها ممکن است باعث شکستن آنها شده و تکه‌های کوچک رشته‌های کربن می‌توانند به صورت ذرات هادی الکتریسیته در هوا پراکنده گردند.

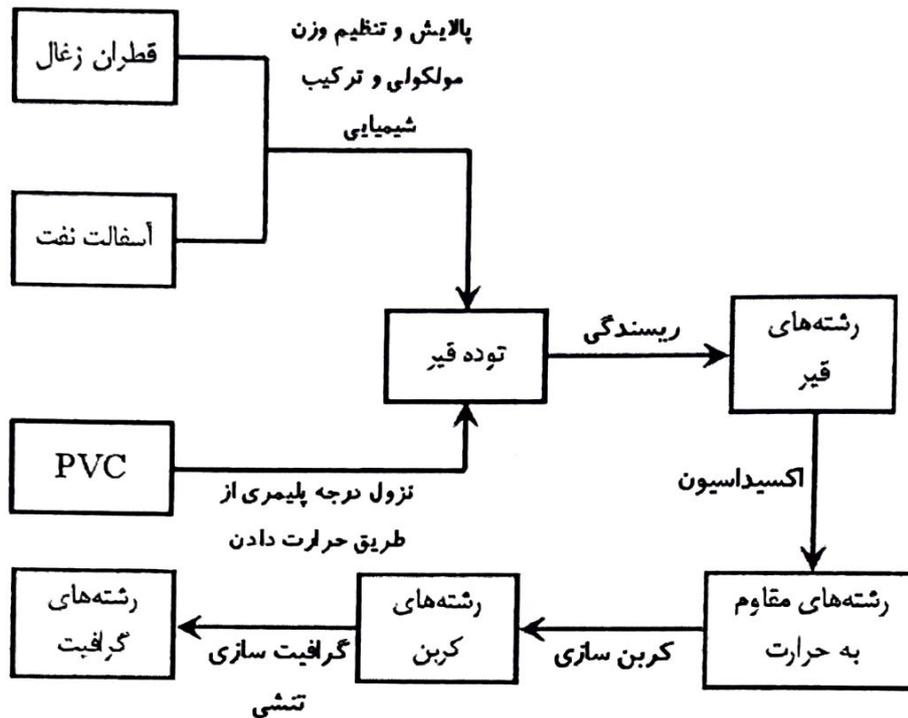
۲-۳) رشته‌های کربن با پایه قیر^۱

قیر یکی از مهمترین و ارزان ترین مواد اولیه به کار رفته در تولید رشته‌های کربن است. قیر به طور معمول از سه منبع قابل تهیه می‌باشد:

- آسفالت نفت
- قطران زغال
- پلی‌وینیل کلرید (PVC)

قیر، که ماهیتی ترموپلاستیک دارد، اگر عملیات پایدارسازی اولیه در مقابل ذوب شدن بر روی آن انجام نشود، به سختی در حین پیرولیز به کربن تبدیل می‌شود. طرح نمادین مراحل تبدیل قیر به الیاف کربن در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود. این فرآیند شامل مراحل زیر است:

- اکستروژن یا ریسنندگی مذاب به شکل الیاف
- پایدارسازی بین ۲۵۰ و ۴۰۰ °C
- کربن سازی
- گرافیت سازی



شکل ۲-۵: طرح نمادین فرآیند تهیه الیاف کربن از قیر.

قابلیت ریسندگی و تبدیل آن به وضعیت دیرگداز از مهمترین مراحل این روند به شمار می‌آیند (Diefendorf و Tokarsky، ۱۹۷۵). این خصوصیات به ترکیب شیمیایی و توزیع وزن مولکولی قیر بستگی دارد. وزن مولکولی قیر، ویسکوزیته و گستره ذوب شدن آن را کنترل می‌کند، بدین ترتیب وزن مولکولی، دما و سرعت ریسندگی را تعیین می‌نماید. ترکیب قیر به منبع اولیه تهیه آن مربوط می‌شود. در حقیقت تنوع بسیار زیادی در ترکیب قیر وجود دارد، زیرا قیر مخلوطی از صدها جزء متفاوت است که با تغییر منبع نفت خام اولیه و شرایط فرآوری آن در پالایشگاه تغییر خواهد کرد.

مناسب بودن قیر برای تبدیل به الیاف کربن به فاکتورهای متعددی بستگی دارد. در واقع قیر باید دارای مقدار کربن بالا ($> 90\%$) و میزان ترکیبات حلقوی بالایی (50%) بوده و ناخالصی‌ها، وزن مولکولی و توزیع وزن مولکولی کمی داشته و نیز ویسکوزیته و مشخصات ساختاری آن به نحوی باشد که ریسندگی به سهولت انجام پذیرد. همچنین باید به راحتی به حالت دیرگداز تبدیل گردد (Singer، ۱۹۷۹).

۲-۳-۴) ریسندگی و تغییر شکل قیر میان فازی^۱

ریسندگی مذاب قیر برای تولید تجاری رشته‌های پیش ماده، امری متداول محسوب می‌گردد و در آن می‌توان از روش‌های ریسندگی گریز از مرکز یا ریسندگی فواره‌ای^۲ استفاده کرد. قیر میان فازی (با ماهیت ترموپلاستیک) ساختار کریستال مایع دارد که در آن حوزه‌های منظمی از مولکول‌های میله‌ای شکل صلب در زمینه همسانگردی شناور می‌باشند. این قیر دو فازی قبل از ریسندگی به منظور تشکیل یک مخلوط همگن، هم زده می‌شود و سپس در محدوده دمایی که ویسکوزیته زمینه آن $1-20 \text{ Pa.s}$ باشد، به شکل الیاف ریسندگی در می‌آید. این الیاف را می‌توان با ترکیبی یکسان و قطری در حدود $10-20 \mu\text{m}$ ، از طریق ریسندگی با سرعت $100-3 \text{ m.min}^{-1}$ تولید نمود. رشته‌های میان فازی ریسندگی شده، به دلیل داشتن ساختار کریستال مایع، ناهمسانگرد می‌باشند. این رشته‌ها دارای حوزه‌های بزرگ، طویل و ناهمسانگردی (با قطر حدود $4 \mu\text{m}$) هستند که در راستای محور رشته قرار گرفته‌اند و ماهیت ترموپلاستیک دارند. رشته‌های کشیده شده از قیر همسانگرد و یا کشیده شده از پیش ماده PAN، حوزه‌های ناهمسانگرد فوق‌الذکر را از خود نشان نمی‌دهند.

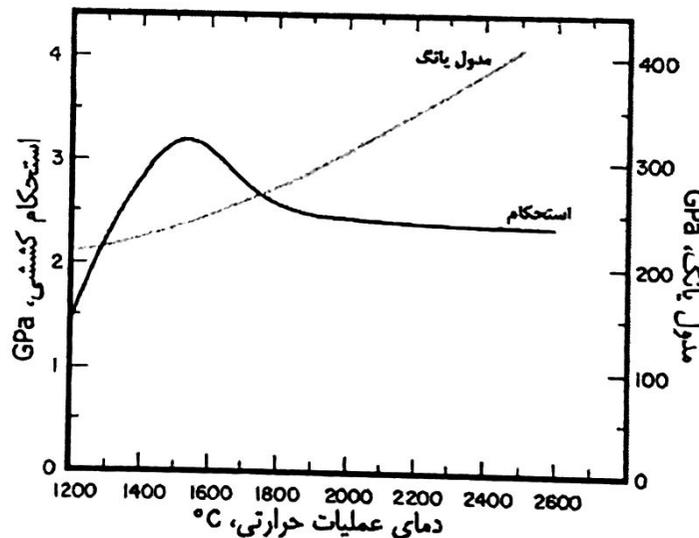
عملیات اکسیداسیون، بعد از پایدارسازی حرارتی رشته‌ها جهت تنش زدایی داخلی انجام می‌شود و آنها را برای مراحل بعدی تولید دیرگداز می‌کنند. در طی عملیات پایدارسازی، اکسیژن به رشته‌های پیش ماده وارد شده و بین مولکول‌های هیدروکربن‌های قیر اتصال عرضی برقرار می‌سازد. در این مرحله مقدار بسیار کمی به وزن رشته‌ها افزوده می‌شود. مابقی فرآیند مشابه با ساخت رشته‌های کربن با پایه PAN می‌باشد به جز آنکه در حین گرافیت سازی تنش اعمال می‌شود. مرحله کربن سازی به منظور حذف اتم‌های غیر کربن (عمدتاً اکسیژن و هیدروژن) انجام می‌شود و با یک افت وزن در رشته‌ها همراه خواهد بود.

¹ Mesophase Pitch
² Jet Spinning

۲-۳-۵) ساختار و خواص الیاف کربنی

جدول ۲-۲ خواص سه نوع از الیاف کربن با پایه PAN را ارائه کرده است و جدول ۲-۳ نیز خواص الیاف کربن با پایه قیر میان فازی را نشان می‌دهد (در این جداول، به چگالی و مدول بالای الیاف کربنی با پایه قیر نسبت به رشته‌های با پایه PAN توجه کنید). تنش اعمالی در دمای بسیار بالا در طی مرحله گرافیت سازی، میزان نظم در رشته‌های کربن را افزایش می‌دهد. این خصوصیت با افزایش قابل توجه مدول الاستیک رشته‌ها همراه است اما، استحکام کششی رشته‌های با پایه PAN، زمانی که در معرض عملیات دما بالا قرار می‌گیرند، کاهش می‌یابد (شکل ۲-۶). این امر به وجود ترک‌های مجزا بر روی سطح رشته‌ها و درون آنها نسبت داده می‌شود. اغلب عیوب حجمی در رشته‌های کربن شامل موارد زیر می‌باشد :

- آخال آلی
- آخال غیر آلی
- حفره‌های نامنظم ناشی از منعقد شدن سریع^۱
- حفره‌های استوانه‌ای رسوب یافته از گازهای حل شده



شکل ۲-۶: مدول الاستیک و استحکام کششی الیاف کربن به عنوان تابعی از دمای عملیات حرارتی.

^۱ Rapid Coagulation

جدول ۲-۲: خواص الیاف کربن با پایه PAN.

مدول بالا (°)	استحکام بسیار بالا (°°)	استحکام بالا (°°°)	خواص
۸/۴	۵/۴-۷/۰	۵/۵-۸/۰	قطر الیاف (μm)
۱/۹۶	۱/۷۸-۱/۸۱	۱/۷۵-۱/۸	چگالی (g/cm^3)
۹۹*	۹۹-۹۹*	۹۲-۹۵	درصد وزنی کربن
۱۸۶۵	۲۴۰۰-۲۵۵۰	۳۱۰۰-۴۵۰۰	استحکام کششی (MPa)
۵۲۰	۳۶۰-۳۹۵	۲۵-۲۶۰	مدول کششی (GPa)
۰/۳۸	۰/۶-۰/۷	۱/۳-۱/۸	کرنش تا شکست (%)
۶/۵	۹-۱۰	۱۵-۱۸	مقاومت الکتریکی مخصوص ($\mu\Omega\text{m}$)
۱۲۰	۶۴-۷۰	۸/۱-۹/۳	ضریب هدایت حرارتی (W(mK)^{-1})

(°°°) Thornel T-300, T-600, T-700; Celion 3000, 6000, 1200; AS2, IM6;

(°°) Thornel T-50, Celion G-50, HMS; (*) Celion GY-70

جدول ۳-۲: خواص الیاف کربن با پایه قیر.

تورنل	تورنل	تورنل	خواص
P200	P755	P555	قطر الیاف (μm)
۱۰	۱۰	۱۰	چگالی (g/cm^3)
۲/۱۵	۲/۰۶	۲/۰۲	درصد وزنی کربن
۹۹*	۹۹	۹۹	استحکام کششی (MPa)
۲۲۴۰	۲۰۷۰	۱۸۹۵	مدول کششی (GPa)
۶۹۰	۵۱۷	۳۸۰	کرنش تا شکست (%)
۰/۳	۰/۴	۰/۵	مقاومت الکتریکی مخصوص ($\mu\Omega\text{m}$)
۲/۵	۴/۶	۷/۵	ضریب هدایت حرارتی (W(mK)^{-1})
۵۱۵	۱۸۵	۱۱۰	

این عیوب در حین عملیات دما بالا به نقص‌های گوناگونی مبدل خواهند شد. ترک‌های موجود در صفحات قاعده، موسوم به ترک‌های مروزوسکی^۱، از جمله مهمترین انواع ترک هستند که استحکام کششی الیاف را محدود می‌سازند. در اثر سرمایش نمونه از دمای بالا (بیشتر از 1500°C)، انقباض‌های حرارتی ناهمسانگردی به وجود آمده و در نتیجه این ترک‌ها حاصل خواهند شد.

این ترک‌ها عموماً در راستای محور رشته جهتگیری می‌شوند. حضور این ترک‌ها، به دلیل فراهم نمودن مکان‌های مناسب جهت جوانه زنی ترک‌های بعدی، استحکام کششی را کاهش می‌دهد. اما مدول الاستیک رشته تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد، زیرا تعداد ترک‌ها نسبتاً کم بوده و در ضمن کرنش الاستیک موثر در اندازه‌گیری مدول، کوچک می‌باشد. ترک‌های سطحی می‌توانند استحکام کششی رشته‌های کربن سازی شده را نیز کاهش دهند. معمولاً انواع مختلفی از عملیات اکسیداسیون بر روی رشته‌های کربن انجام می‌پذیرد که باعث حذف عیوب سطحی و افزایش استحکام الیاف می‌شوند.

۲-۳-۶ ساختار رشته‌های کربنی

محققین زیادی بر روی ساختار رشته‌های کربنی پژوهش نموده‌اند (به عنوان مثال، Peebles، ۱۹۹۵). در اینجا قصد داریم برخی وجوه برجسته ساختار رشته‌های کربنی را به تصویر بکشیم. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از رشته‌های کربن با پایه قیر در شکل ۲-۷ دیده می‌شود. در این تصویر مورفولوژی گرافیتی ورقه‌ای شکل کربن به خوبی نمایان است (Kumar، ۱۹۹۳). در سطوح زیر میکرومتر که در میکروسکوپ الکترونی عبوری قابل دسترس است، ریزساختار رشته‌های کربن کاملاً غیر یکنواخت است. ضمناً به طور خاص، یک بی‌قاعدگی مشخصی در چیدمان لایه‌های گرافیتی از سطح رشته به سمت داخل وجود دارد. صفحات قاعده در مناطق نزدیک به سطح رشته، خیلی بهتر جهتگیری شده‌اند. در کلی‌ترین حالت، نوارهای گرافیتی کم و بیش با

^۱ Mrozowski Cracks

محور رشته موازی بوده در حالی که اتصالات بین لایه‌ها می‌توانند به صورت اتفاقی، طولی یا عرضی باشند. به عنوان نمونه، می‌توان ساختار لایه‌ای رشته‌های کربن با پایه PAN را در شکل ۲-۸ مشاهده نمود (Oberlin و Deurbergue، ۱۹۹۱). این شکل، تصویر الکترونی با وضوح بالا از مقطع عرضی یک الیاف کربنی شده در دمای 1330°C را نشان می‌دهد. این شکل لبه $\langle 002 \rangle$ شبکه را نشان می‌دهد که بیانگر صفحات گرافیتی شده رشته کربنی است. میزان هموسازی صفحات قاعده با دمای عملیات حرارتی نهایی افزایش می‌یابد.

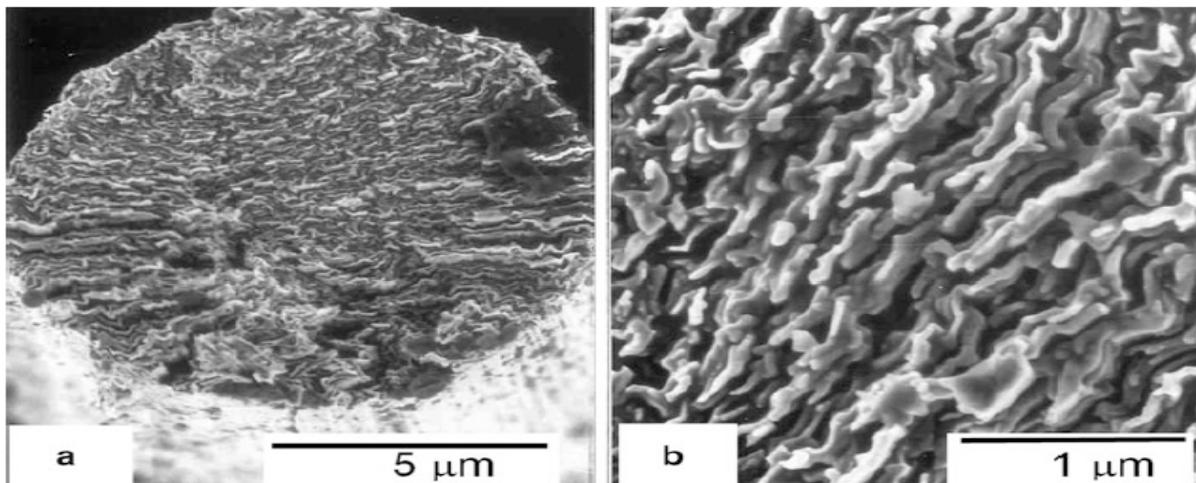
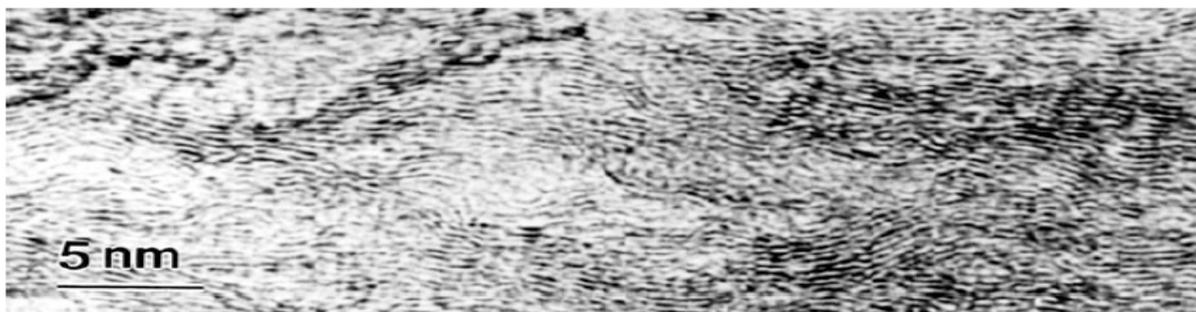


Fig. 2.7 Scanning electron micrograph of pitch-based P-100 fiber at low (a) and high (b) magnification showing graphitic sheet like morphology (Kumar et al. 1993; Courtesy of S. Kumar)

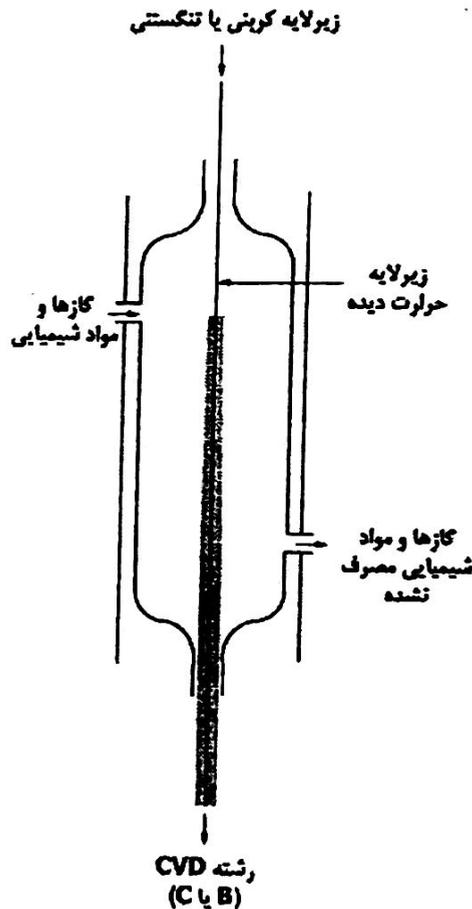


۲-۴) الیاف بور

بور همانند کربن، رشته عنصری دیگری است که سفتی و استحکام بالایی دارد. این الیاف معمولاً با روش رسوب شیمیایی بخار (CVD) بر روی یک زیرلایه تنگتی

یا کربنی تولید می‌شوند (شکل ۲-۹). برخی خصوصیات مهم الیاف تهیه شده از روش CVD عبارتند از :

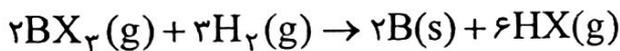
- اصولاً یک پوشش روی یک زیرلایه رشته‌ای رسوب داده می‌شود، در نتیجه غلافی با قطر زیاد به همراه هسته مرکزی آن به وجود می‌آید، یعنی خود رشته یک کامپوزیت است.
- بر خلاف فرآیندهای معمولی شکل دهی رشته‌ها، الیاف CVD را نمی‌توان با کشیدن شکل داد؛ یعنی طویل شدن در مورد آن اتفاق نمی‌افتد، بلکه به جای آن رشد جانبی به صورت ضخیم شدن رخ می‌دهد.
- قطر نهایی الیاف می‌تواند بیش از ۱۰ برابر قطر رشته زیرلایه اولیه باشد.



شکل ۲-۹: رسوب شیمیایی بخار (CVD) بور یا کاربید سیلیسیم روی زیرلایه تنگستن یا کربن.

بور بر روی زیرلایه تنگستنی (که به شکل B(W) نوشته می‌شود) و SiC بر روی زیرلایه کربنی (که به شکل SiC(C) نوشته می‌شود)، دو نمونه از الیاف کامپوزیتی هستند. همچنین در مواردی نیز بور بر روی زیرلایه کربن پوشش داده می‌شود. بیشتر کاربردهای B(W) در هوافضا و صنعت ساخت وسایل ورزشی می‌باشد. عمده ترین مشکل بیشتر رشته‌های تولید شده از CVD، قطر بزرگ (که باعث انعطاف پذیری کمتر آنها می‌گردد) و هزینه تولید زیاد آنهاست.

بور عنصری از طریق احیای هالید بور توسط هیدروژن بدست می‌آید:



جایی که X می‌تواند یکی از گازهای هالوژن مثل Cl، Br یا I باشد. بور روی یک زیرلایه تنگستنی یا کربنی نشانده می‌شود. الیاف بور تجاری نوعاً قطری در حدود ۷۵، ۱۰۰، ۱۴۰ یا ۲۰۰ μm دارند که نمونه ۱۰۰ μm متداول تر است. بعضی اوقات پوشش سطحی SiC یا B_۴C نیز توسط CVD روی رشته بور اعمال می‌شود. این نوع الیاف برای استفاده در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی یا تیتانیومی جهت جلوگیری از انجام واکنش شیمیایی بین بور و زمینه فلزی به کار می‌روند.

تولید الیاف بور از طریق رسوب بر روی زیرلایه تنگستن، می‌تواند سبب انجام واکنش‌های پیچیده‌ای در فصل مشترک غلاف/ هسته مرکزی شود. سطح مقطع یک الیاف بور (با قطر ۱۰۰ μm) در شکل ۲-۱۰ (الف) دیده می‌شود و در قسمت (ب) از این شکل می‌توان قسمت‌های مختلف سطح مقطع را به طور نمادین مشاهده نمود. بسته به شرایط دمایی در حین رسوب، هسته تنگستنی ممکن است شامل یک سری ترکیباتی مانند W، W_۲B، WB و WB_۴ باشد. این فازهای بوراید تنگستن با نفوذ بور در تنگستن حاصل خواهند شد. عموماً هسته الیاف فقط از WB_۴ و W_۲B_۵ تشکیل شده است. با طولانی کردن گرمایش، ممکن است هسته کاملاً به WB_۴ تبدیل شود. هنگامی که بور به داخل زیرلایه تنگستنی نفوذ می‌کند تا فاز بوراید تشکیل گردد، قطر

هسته مرکزی از مقدار اصلی خود یعنی $12/5 \mu\text{m}$ (قطر اصلی سیم تنگستنی) به $17/5 \mu\text{m}$ تغییر خواهد کرد. پوشش SiC نشان داده شده در شکل ۲-۱۰ (ب)، یک سد محافظ است که برای جلوگیری از انجام واکنش‌های گوناگون میان B و زمینه کامپوزیت (AL یا Ti) در دماهای بالا از آن استفاده می‌شود. لایه محافظ SiC با استفاده از مخلوط هیدروژن و متیل دی کلروسیلان، از فاز بخار بر روی بور رسوب داده می‌شود.

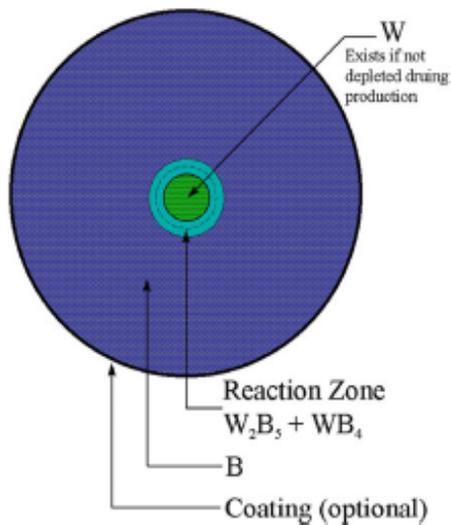
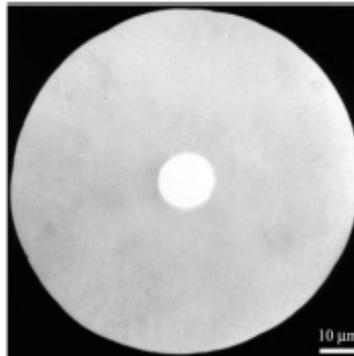
بور رسوب داده شده (با ساختار رومبوهدرال β) ساختاری نانوکریستال دارد. سطح الیاف بور ساختاری شبیه به چوب ذرت دارد. این امر از رشد برآمدگی‌های بور^۱ ناشی می‌شود که هر کدام به صورت انفرادی جوانه زده و مخروطی شکل به سمت خارج رشد می‌کنند. در ادامه، ذرات خارجی یا آخال‌ها نیز در بین برآمدگی‌ها گیر می‌افتند.

۲-۴-۱) تنش‌های باقیمانده

رشته‌های تولید شده از روش CVD، مثل الیاف بور، دارای تنش‌های باقیمانده‌ای ناشی از فرآیند رسوب شیمیایی بخار می‌باشند. تنش‌های ناشی از رشد برآمدگی‌های بور، تنش‌های پدید آمده از نفوذ بور به داخل هسته تنگستنی، و تنش‌های به وجود آمده از اختلاف ضریب انبساط بور رسوب کرده و هسته بوراید تنگستن، همگی در ایجاد تنش باقیمانده سهم هستند. این تنش‌ها به صورت جبری (ریاضی) به تنش‌های اعمالی افزوده شده و می‌توانند تاثیر زیادی بر خواص مکانیکی الیاف داشته باشند. از لحاظ مورفولوژی، برجسته‌ترین کارکرد این تنش‌های داخلی، تشکیل ترک‌های شعاعی^۲ در مقاطع عرضی رشته‌ها می‌باشد.

^۱ Nodules of Boron

^۲ Radial Cracks



شکل ۲-۱۰: (الف) سطح مقطع الیاف بور با قطر $100 \mu m$ ، (ب) طرح نمادین قسمت‌های مختلف سطح مقطع الیاف بور.

استحکام مواد تردی مثل بور، یک مقدار واحد نداشته و دارای مقادیر متعددی می‌باشد. عبویی همچون آخال یا مرز برآمدگی‌های روی سطح الیاف بور، منجر به تمرکز تنش می‌شوند. از آنجا که مواد ترد در برابر این تمرکز تنش قادر به تغییر شکل پلاستیکی نیستند، شکست آنها در بک یا چندین، موقعیت این چینی، دفعتاً رخ می‌دهد.

الیاف بور حقیقتاً یک ماده خیلی ترد محسوب می‌گردد و معمولاً ترک‌هایی در مواضع عیوب موجود در فصل مشترک هسته/بور و یا در سطح، ایجاد می‌شود. عیوب سطحی ناشی از سطح برآمدگی‌هایی است که در اثر رشد مخروطهای بور ایجاد شده‌اند. به ویژه هنگامی که یک برآمدگی در اثر رشد بیش از حد در اطراف یک ذره آلودگی، بزرگ می‌گردد، ترکی می‌تواند از این برآمدگی بزرگ ایجاد گردد و الیاف را تضعیف نماید.

۲-۵) رشته‌های اکسیدی

الیاف اکسیدهای سرامیکی، چه پیوسته و چه ناپیوسته، از حدود سال‌های ۱۹۷۰ به شکل تجاری قابل تولید بودند. در ادامه، برخی از جوانب مهم فرآیند تولید و ریزساختار این رشته‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲-۵-۱) رشته‌های اکسیدی نوع آلومینا

آلومینا دارای آلوتروپی‌های مختلفی همچون α ، γ ، δ و η می‌باشد. از لحاظ ترمودینامیکی آلومینای α پایدارترین آلوتروپی محسوب می‌شود. رشته‌های بسیار مختلفی وجود دارند که دارای پایه آلومینایی می‌باشند. کمپانی 3M رشته‌های اکسیدی متنوعی را با محدوده ترکیبی وسیعی، از آلومینای خالص تا مخلوطی از آلومینا و سیلیس یا آلومینا و مولایت، تولید می‌کند. کمپانی Sumitomo نیز رشته‌هایی با گستره ترکیبی همچون Al_2O_3 ۷۰-۱۰۰٪ و SiO_2 ۳۰-۰٪ تولید می‌کند. رشته‌های کوتاه آلومینای δ (۹۶٪) به صورت تجاری تولید شده و با نام تجاری سافیل^۱ شناخته می‌شود. رشته‌های پیوسته تک کریستال اکسید آلومینیوم را می‌توان از طریق کشیدن آلومینای مذاب بدست آورد. یکی از رشته‌های تولید شده با این روش، موسوم به سافیکن^۲، ساختاری هگزاگونال با محور c موازی با محور رشته دارد، یعنی صفحه قاعده آن

^۱ Saffil

^۲ Saphikon

(۵۵۵۱) عمود بر محور رشته است. قطر این الیاف بسیار زیاد و در حدود $250-750 \mu\text{m}$ است. در ادامه مشخصات بارز برخی از روش‌های ساخت این رشته‌ها و خواص آنها تشریح خواهند شد.

الیاف آلومینا + سیلیس و الیاف آلومینای α

یک سری از رشته‌های آلومینا + سیلیس به وسیله روش سل - ژل به شکل تجاری تولید می‌شوند. به طور خاص کمپانی 3M یک سری از این رشته‌ها را تحت عنوان الیاف نکستل^۱ به بازار عرضه کرده است. در این سری رشته‌ها، نکستل ۶۱۰ یک الیاف پلی کریستال از آلومینای α است. فرآیند سل - ژل به کار رفته در ساخت این رشته‌ها شامل مراحل زیر است:

(الف) فرمولاسیون سل

(ب) تغلیظ سل به منظور تشکیل ژل

(ج) ریسندگی الیاف پیش ماده

(د) تکلیس جهت دستیابی به الیاف اکسیدی

در مورد فرآیند تهیه الیاف Al_2O_3 در کمپانی 3M، مراحل زیر طی می‌شود:

- استفاده از یک محلول نمک قلبایی آلی به عنوان پیش ماده.
- خارج کردن (تجزیه و تبخیر کردن) مواد آلی بدون بروز ترک، تاول و یا هر عیب دیگری.
- حرارت دادن در 1400°C تحت شرایط کاملاً کنترل شده.
- انجام عملیات صاف کردن الیاف در دمای پایین.

الیاف $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ریز دانه را می‌توان از طریق هسته گذاری آلومینای α اولیه با اکسید آهن کلوئیدی آب دار خیلی ریز در دمای بالا تولید نمود (Visser و Wilson، ۲۰۰۱). استفاده از اکسید آهن ریزدانه، نرخ جوانه زنی $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ را افزایش داده و

الیافی با چگالی بالا، فوق ریز و همگن بدست خواهد آمد. دلیل اصلی استفاده از اکسید آهن در این فرآیند به شرح ذیل می باشد. نمک های قلیایی آلومینیوم در دمای بالاتر از 400°C به اسپینل های انتقالی اکسید آلومینیوم مثل $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ تجزیه می شوند. این اسپینل های مکعبی انتقالی حین گرمایش در $1000\text{--}1200^{\circ}\text{C}$ به $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ هگزاگونال تبدیل می شوند. مشکل اینجاست که نرخ جوانه زنی $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ خالص بسیار پایین بوده و در نتیجه دانه های درشتی حاصل خواهند شد. همچنین در حین استحاله به فاز α ، انقباض زیاد باعث پدید آمدن تخلخل های بزرگی می شود (Kumagai و Messing، ۱۹۸۵؛ Suwa و همکاران، ۱۹۸۵). به نظر می رسد هسته گذاری اولیه آلومینا به همراه ذرات ریز، راه حل مشکل مزبور باشد. $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ساختار مشابهی با $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ دارد و فقط ۵/۵٪ عدم انطباق شبکه بین آنها وجود دارد (Wilson، ۱۹۹۰). در نتیجه به نظر می رسد که محلول اکسید آهن کلونیدی آب دار، عامل مناسبی برای جوانه زنی باشد. بر اساس تحقیقات Wilson (۱۹۹۰)، بدون هسته اولیه اکسید آهن، استحاله آلومینای η به α در حدود 1100°C رخ می دهد، ولی با افزودن ۱٪ اکسید آهن، دمای استحاله به 1010°C کاهش یافته و با ۴٪ اکسید آهن، این دما به 977°C خواهد رسید. همراه این کاهش دمای استحاله، اندازه دانه نیز کاهش خواهد یافت. الیاف نکستل ۶۱۰ حدود ۷/۰-۴/۰ درصد اکسید آهن دارد. علاوه بر Fe_2O_3 ، تقریباً ۵/۰٪ SiO_2 نیز جهت کاهش اندازه دانه افزوده می شود. هر چند SiO_2 از انجام استحاله به فاز α جلوگیری می کند. به علاوه افزودن SiO_2 باعث کاهش رشد دانه ها در حین عملیات در دمای 1400°C می شود.

انواع بسیار زیاد دیگری از رشته های آلومینا یا آلومینا-سیلیس وجود دارند که بیشتر آنها با روش سل-ژل تهیه می شوند. کمپانی Sumitomo الیافی را تولید می کند که مخلوطی از آلومینا و سیلیس است. با استفاده از یک ترکیب آلی-آلومینیوم (پلی آلومینوآکسان یا مخلوطی از پلی آلومینوآکسان و یک یا چند ترکیب حاوی Si)، الیاف

پیش ماده را می‌توان با ریسندهی حالت خشک تهیه کرد. این الیاف پیش ماده به منظور تولید الیاف نهایی تکلیس می‌شود. ساختار الیاف شامل کریستالیت‌های ریزی از اسپینل می‌باشد. SiO_2 ساختار اسپینل را پایدار ساخته و از استحاله آن به $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ جلوگیری می‌کند (Chawla, 1998). همانطور که بیان شد، کمپانی 3M یک سری از الیاف نکستل را تولید می‌کند. این رشته‌ها عمدتاً شامل $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ و کمی B_2O_3 می‌باشد. ترکیب و خواص این رشته‌ها در جدول ۲-۴ لیست شده است. فرآیند سل-ژل به کار رفته در شرکت 3M، از آلکوکسیدهای فلزی به عنوان مواد اولیه استفاده می‌کند. آلکوکسید فلزی، ترکیبی به شکل M(OR)_n دارد که M یک فلز، n ظرفیت فلز و R یک ترکیب آلی است. انتخاب یک گروه آلی مناسب بسیار حائز اهمیت است. در حین انجام عملیات، پیوندهای M-OR شکسته شده و پیوندهای MO-R تشکیل می‌شوند و بدین ترتیب می‌توان اکسیدهای سرامیکی مورد نظر را تولید نمود. هیدرولیز آلکوکسیدهای فلزی باعث تشکیل سل‌هایی می‌شود که تحت عملیات ریسندهی قرار گرفته و تبدیل به ژل می‌شوند. سپس الیاف ژل شده در دمای پایین چگال می‌شوند. انرژی آزاد سطحی بالای موجود در خلل و فرج الیاف ژل شده، امکان چگال شدن در دمای پایین را خواهد داد. در فرآیند سل-ژل کنترل خوبی بر روی ترکیب محلول و قطر الیاف وجود دارد. عیب این روش آن است که تغییرات نسبتاً زیاد ابعاد باید با سالم (بی عیب) بودن رشته همراه باشد.

الیاف نکستل ۷۲۰ شامل مجموعه دانه‌های مولایت در داخل دانه‌های آلومینای α می‌باشد. دانه‌های هر فاز بسیار ریز بوده و مجموعه‌هایی از دانه‌ها با جهتگیری یکسان همانند تک دانه‌هایی با قطر حدود $0.5 \mu\text{m}$ عمل می‌کنند. این خصوصیت باعث می‌شود الیاف نکستل ۷۲۰ نرخ خزش بسیار کمی در دماهای بالاتر از 1000°C داشته باشد.

جدول ۲-۴: خواص برخی رشته‌های اکسیدی

مدول یانگ (GPa)	استحکام کششی (GPa)	چگالی g/cm ^۳	قطر (μm)	ترکیب (% Wt)	نوع الیاف
۱۵۰	۱/۷	۲/۷	۱۰-۱۲	Al _۲ O _۳ -۶۲/۵، SiO _۲ -۲۴/۵ B _۲ O _۳ -۱۳	نکستل ۳۱۲
۱۹۰	۲	۳/۰۵	۱۰-۱۲	Al _۲ O _۳ -۷۰، SiO _۲ -۲۸ B _۲ O _۳ -۲	نکستل ۴۴۰
۱۹۳	۲	۳/۰۳	۱۰-۱۲	Al _۲ O _۳ -۷۳، SiO _۲ -۲۷	نکستل ۵۵۰
۳۷۰	۳/۱	۳/۹	۱۰-۱۲	Al _۲ O _۳ -۹۹ ⁺	نکستل ۶۱۰
۳۵۸	۲/۵	۴/۱	۱۰-۱۲	Al _۲ O _۳ -۸۹، ZrO _۲ -۱۰ Y _۲ O _۳ -۱	نکستل ۶۵۰
۲۶۰	۲/۱	۳/۴	۱۰-۱۲	Al _۲ O _۳ -۸۵، SiO _۲ -۱۵	نکستل ۷۲۰
۱۰۰	۱	۲/۳	۳	Al _۲ O _۳ -۹۶، SiO _۲ -۴	سافیل
۳۸۰	۳/۱	۳/۸	۷۰-۲۵۰	تک کریستال Al _۲ O _۳	سافیکن
۲۵۰	۲/۶	۳/۲	۹	Al _۲ O _۳ -۸۵، SiO _۲ -۱۵	Sumitomo

همچنین روش سل-ژل برای تولید رشته‌های سیلیس پایدار شده با آلومینا (سافیل) و کلسیای پایدار شده با زیرکونیا استفاده می‌شود (Birehall و همکاران، ۱۹۸۵). الیاف سافیل، الیاف کوتاهی است از δ -Al_۲O_۳ که تقریباً دارای ۴ درصد

SiO_2 بوده و قطر بسیار کمی ($3 \mu\text{m}$) دارد. فاز آبی دارای یک سل اکسیدی و یک پلیمر آلی می‌باشد. سل به شکل الیاف به درون یک حمام منعقد کننده (یا رسوب دهنده) اکستروود می‌شود و به شکل ژل در می‌آید. سپس الیاف ژل شده خشک می‌گردد و به منظور تولید الیاف نهایی اکسیدی تکلیس می‌شود.

در مورد آلومینا، اکسی کلرید آلومینیوم، $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}]$ ، با یک پلیمر با وزن مولکولی متوسط، مثلاً ۲ درصد وزنی پلی وینیل الکل، مخلوط می‌شود. این محلول در یک تبخیرکننده چرخان به آرامی تبخیر می‌شود تا اینکه یک مایع با ویسکوزیته حدود $80 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ حاصل شود. سپس این سل، اکستروود شده و الیاف آن حول یک توبی پیچیده می‌شود و نهایتاً در 800°C پخته خواهد شد. ماده آلی آن سوخته و خارج شده و الیاف آلومینای ریزدانه با ۱۰-۵٪ تخلخل و قطر $3-5 \mu\text{m}$ بدست می‌آید. الیاف تولید شده در این مرحله به دلیل تخلخل زیاد آنها برای مصارف فیلتر بسیار مناسب هستند. با حرارت دادن آن تا $1500-1400^\circ\text{C}$ ، که باعث انقباض خطی ۴-۳ درصدی می‌شود، می‌توان الیاف آلومینای دیرگداز جهت مقاصد تقویت کنندگی تولید نمود.

الیاف آلومینای پیوسته و پلی کریستال دیگری تحت عنوان تجاری آلماکس^۱ وجود دارد که از طریق ریسندگی یک دوغاب ویسکوز حاوی نمک آلومینیوم، پودر ریز آلومینا و یک چسب آلی، تولید می‌شود. الیاف پیش ماده ایجاد شده و سپس این الیاف تحت عملیات پیش پخت (تکلیس) و پخت (تفجوشی) قرار گرفته و الیاف آلومینای نهایی تولید خواهد شد.

رشته‌های اکسیدی پلی کریستالی از جنس گارنت ایتیریم - آلومینیوم $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG) و یک رشته کامپوزیتی شامل $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ و YAG توسط روش سل-ژل تولید می‌شود (Towata و همکاران، ۲۰۰۱). در این فرآیند از ذرات آلومینا یا ذرات YAG به عنوان هسته اولیه استفاده می‌شود. ذرات هسته آلومینای α باعث تسریع

در استحاله فاز آلومینای θ به α شده و ذرات هسته YAG استحاله چند مرحله‌ای ایتیریم و اکسید آلومینیوم را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

تکنیکی موسوم به EFG^۱ به منظور ساخت الیاف تک کریستال و پیوسته Al_2O_3 (سافیکن) استفاده می‌شود (LaBelle و Mlavsky، ۱۹۶۷؛ Gasson و Cockyne، ۱۹۷۰؛ LaBelle، ۱۹۷۱؛ Pollack، ۱۹۷۲؛ Hurley و Pollack، ۱۹۷۲). LaBelle و Mlavsky (۱۹۶۷) اولین کسانی بودند که الیاف تک کریستال Al_2O_3 را با استفاده از حرارت دهی با فرکانس رادیویی رشد دادند. در سال ۱۹۷۱ این افراد روش جدیدی تحت عنوان EFG را معرفی نمودند. در این روش نرخ رشدی به بزرگی mm/min ۲۰۰ حاصل می‌شود. ماده‌ای که برای قالب استفاده می‌شود باید در نقطه ذوب آلومینا مقاوم و پایدار باشد که برای این کار معمولاً از قالبی با جنس مولیبدن بهره گرفته می‌شود. همچنین از دانه‌های کریستالی Al_2O_3 نیز استفاده خواهد شد. خاصیت موئینگی موجب ثابت ماندن سطح مذاب در فصل مشترک کریستال می‌شود. آلومینای مذاب، هم مولیبدن و هم دانه‌های آلومینای اضافه شده را تر (آغشته) می‌کند. کریستال از یک لایه مذاب بین کریستال در حال رشد و قالب، شروع به رشد کردن می‌نماید. شکل کریستال بیشتر از آنکه از شکل داخلی قالب تاثیر پذیرد، توسط شکل خارجی آن تعیین می‌شود. شاید مهمترین نکته در مورد الیاف سافیکن، تک کریستال بودن ماهیت آن است؛ یعنی هیچ گونه مرز دانه‌ای در آن وجود ندارد. بنابراین تحت شرایط خزشی، پدیده‌هایی همچون ایجاد حفره و یا لغزش مرز دانه‌ای که با مرز دانه مرتبط هستند، رخ نداده و می‌توان مقاومت به خزشی بسیار بالایی از آن انتظار داشت. با این وجود، تک کریستال آلومینا دچار خزش نابجایی در صفحه قاعده می‌شود. در نتیجه می‌توان انتظار داشت اگر صفحه قاعده بتواند به نحوی جهتگیری نماید که لغزش در آن اتفاق نیفتد، رشته بدست آمده دارای مقاومت به لغزش بالایی خواهد شد. این اتفاقی است که

^۱ Edge-Defined Film-Fed Growth

اصولاً در تک کریستال‌هایی که محور c آنها موازی رشته است، رخ می‌دهد. روش «ناحیه شناور گرم شده با لیزر»^۱ را نیز می‌توان برای تولید رشته‌های متنوع سرامیکی به کار برد. Gasson و Cockayne (۱۹۷۰) از یک سیستم گرمایش لیزری برای رشد کریستال Al_2O_3 ، Y_2O_3 ، $MgAl_2O_4$ و Na_2O_3 استفاده کردند. همچنین این روش برای رشد رشته‌های تک کریستال Al_2O_3 ، Y_2O_3 ، TiB_2 ، TiC ، Y_2O_3 ، Al_2O_3 مولایت و یونکتیک Al_2O_3/YAG مورد استفاده قرار گرفته است (Haggerty، ۱۹۷۲؛ Sayir و Farmer، ۱۹۹۵؛ Sayir و همکاران، ۱۹۹۵). یک لیزر CO_2 در منطقه مذاب تابانده و یک میله از ماده اولیه در کانون تابش لیزر قرار می‌گیرد. یک کریستال اولیه برای کنترل جهتگیری رشد کریستال در منطقه مذاب فرو برده می‌شود. رشد کریستال با حرکت دادن همزمان میله ماده اولیه و کریستال اولیه آغاز می‌شود. بر مبنای قانون بقاء جرم، قطر با ریشه دوم نسبت نرخ وارد کردن میله اولیه به نرخ کشیدن کریستال ایجاد شده، کاهش می‌یابد. باید توجه کرد که برای رشد رشته‌های پیوسته آلومینا و YAG به طور مستقیم از مذاب، از تکنیک ذوب بدون ظرف^۲ استفاده می‌شود. تکنیک ذوب بدون ظرف موجب حذف جوانه زنی غیر همگن توسط سطوح ظرف مذاب می‌شود. در این تکنیک برای گرمایش از پرتو لیزر با موج پیوسته استفاده می‌شود (Weber و همکاران، ۱۹۹۸). نمونه‌ها در یک فواره گازی شناور شده و توسط یک سیستم صوتی پایدار می‌شوند. نمونه‌های شناور توسط پرتو لیزر CO_2 حرارت دیده و ذوب می‌شوند.

۲-۶) رشته‌های غیر اکسیدی

چندین رشته غیر اکسیدی پیوسته نیز به شکل تجاری تولید می‌شوند. توسعه الیاف کاربید سیلیسیم را باید به عنوان مهمترین پیشرفت در زمینه تولید تقویت

^۱ Laser-Heated Floating Zone Method
^۲ Containerless Melting Technique

کننده‌های سرامیکی در ربع آخر قرن بیستم محسوب نمود. به ویژه، باید به فرآیند ارائه شده توسط پروفیسور Yajima در ژاپن اشاره کرد که مشتمل بر پیرولیز کنترل شده یک پیش ماده پلی کربوسیلان و تشکیل الیافی بسیار نازک و انعطاف پذیر است. این فرآیند در ساخت الیاف سرامیکی از پیش ماده‌های پلیمری، فرآیندی پیشرو محسوب می‌گردد. در این بخش تولید، ریزساختار و خواص رشته‌های کاربید سیلیسیم و دیگر رشته‌های غیر اکسیدی توضیح داده خواهد شد.

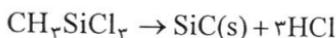
۱-۶-۲) رشته‌های کاربید سیلیسیم

کاربید سیلیسیم مهمترین الیاف سرامیکی غیر اکسیدی به شمار می‌آید. به صورت تجاری از این الیاف، دو نوع موجود می‌باشد: الیاف قطور تهیه شده از رسوب شیمیایی بخار و الیاف با قطر کم تولید شده از پیرولیز کنترل شده یک ماده پلیمری. گونه مهم دیگری از SiC که برای مقاصد تقویت کنندگی به کار می‌رود، ویسکرهاهای SiC می‌باشد.

الیاف کاربید سیلیسیم تهیه شده از روش CVD

الیاف کاربید سیلیسیم را می‌توان از طریق رسوب شیمیایی بخار روی یک زیرلایه پیش گرم شده تا 1300°C ، تولید نمود (DeBolt و همکاران، ۱۹۷۴). این زیرلایه می‌تواند تنگستنی و یا کربنی باشد. مخلوط گازی واکنش دهنده را هیدروژن و انواع آکلیل سیلان‌ها تشکیل می‌دهند. معمولاً این مخلوط گازی، که محتوی ۷۰٪ هیدروژن و ۳۰٪ سیلان است، از بالای مخزن واکنش وارد شده و زیرلایه تنگستنی (با قطر $13\ \mu\text{m}$) نیز به مخزن وارد می‌گردد. زیرلایه با اعمال همزمان جریان مستقیم (۲۵۰ mA) و فرکانس بسیار بالا ($60\ \text{MHz} \sim \text{VHF}$)، حرارت می‌بیند تا بهترین پروفیل دمایی در آن ایجاد گردد. جهت تولید تک رشته ۱۰۰ میکرونی SiC، تقریباً ۲۰ ثانیه زمان به طول خواهد انجامید. الیاف در انتهای مخزن به دور یک قرقره پیچیده می‌شود. گاز خروجی (۹۵٪ مخلوط اولیه + HCl) از یک تقطیر کننده عبور داده می‌شود تا سیلان‌های استفاده

نشده بازیابی شوند. بازیابی موثر سیلان‌های استفاده نشده از لحاظ اقتصادی بودن فرآیند تولید، بسیار حائز اهمیت است. این فرآیند CVD، باعث تولید تک رشته‌های کامپوزیتی با مقداری تنش باقیمانده می‌شود. در ضمن این فرآیند بسیار پر هزینه است. متیل تری کلروسیلان یکی از مواد اولیه مناسب برای این فرآیند است که یک اتم سیلیسیم و یک اتم کربن دارد؛ در نتیجه SiC به صورت استوکیومتری رسوب داده می‌شود. واکنش شیمیایی از این قرار است:



در این فرآیند مقدار بهینه‌ای از هیدروژن مورد نیاز است. اگر هیدروژن کمتر از این مقدار باشد، کلروسیلان‌ها به Si احیا نخواهند شد و کربن آزاد در مخلوط وجود خواهد داشت. اگر هیدروژن بیش از این مقدار باشد، در انتهای فرآیند، Si اضافی باقی خواهد ماند. تک رشته نهایی (۱۰۰-۱۵۰ μm) شامل یک غلاف عمدتاً β-SiC و کمی α-SiC روی هسته تنگستنی است. صفحات {۱۱۱} در SiC به صورت موازی با محور رشته رسوب می‌کنند.

یک سری از رشته‌های کاربرد سیلیسیم با سطح اصلاح شده موسوم به رشته‌های SCS، در برخی از انواع کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این رشته‌های مخصوص، ساختار پیچیده‌ای دارند. به عنوان مثال، SCS-6 یک الیف ضخیم (با قطر ۱۴۲ μm) است که با رسوب شیمیایی بخار ترکیبات حاوی کربن و سیلیسیم بر روی یک هسته کربنی پوشش داده شده با گرافیت حرارت دیده، تولید می‌شود. پوشش گرافیت حرارت دیده بر روی یک تک رشته کربن اعمال شده و ضخامت زیرلایه را به حدود ۳۷ μm می‌رساند. سپس با روش CVD لایه SiC روی آن می‌نشیند و تک رشته نهایی با ضخامت ۱۴۲ μm تشکیل می‌شود. لایه سطح خارجی رشته SCS-6 (با ضخامت ۱ μm) شامل کربن دارای Si می‌باشد. Mann و همکارانش (۱۹۹۹) تغییرات فاحشی در خواص مکانیکی الیف SCS-6 را ثبت نمودند. آنها مدول یانگ و سختی

الیاف را به عنوان تابعی از شعاع الیاف مورد استفاده بررسی کرده و به این نتایج دارای اختلاف دست یافتند. علاوه بر SCS-6، دو گونه تجاری دیگر نیز از رشته‌های CVD کاربرد سیلیسیم روی هسته کربنی وجود دارند. خواص الیاف کاربید سیلیسیم از نوع SCS در جدول ۲-۵ خلاصه شده است. نوع دیگری از الیاف SiC تهیه شده از CVD، الیاف سیگما نام دارد که هسته آن از جنس تنگستن است.

جدول ۲-۵: خواص رشته‌های نوع SCS.

SCS - Ultra	SCS - 9A	SCS - 6	خواص
۱۴۰	۷۸	۱۴۰	قطر الیاف (μm)
۳	۲/۸	۳	چگالی (g/cm^3)
۵/۸۶	۳/۴۵	۳/۴۵	استحکام کششی (GPa)
۴۱۵	۳۰۷	۳۸۰	مدول کششی (GPa)
۴/۱	۴/۳	۴/۱	ضریب انبساط حرارتی (10^{-6}K^{-1})

این رشته‌ها که از روش CVD بر روی زیرلایه حرارت دیده تهیه شده‌اند، خود موادی کامپوزیتی بوده و رفتار غیر معمولی از خود نشان می‌دهند. Lara-Currzio و Sternstein (۱۹۹۳) رفتار این رشته‌های کامپوزیتی را هنگامی که در معرض بارگذاری ترمومکانیکی قرار دارند، بررسی نمودند. مهمترین دستاورد تحقیقات آنها این بود که باید کرنش‌های به وجود آمده در زیرلایه را در حین انجام فرآیند CVD و ساخت رشته‌های کامپوزیتی در نظر گرفت. در نظر نگرفتن این کرنش‌ها می‌تواند منجر به تخمین کمتر از واقع تنش‌های باقیمانده در الیاف گردد. به ویژه در مورد الیاف SCS-6، آنها متوجه وجود تنش‌های باقیمانده شعاعی زیادی در فصل مشترک‌های مختلف (زیرلایه کربن/ پوشش گرافیتی، پوشش گرافیتی/ SiC) شدند. مطابق مطالعات

آنها، منشأ این تنش‌های شعاعی زیاد، دمای بالای فرآیند CVD و ناهمسانگردی زیاد پوشش گرافیتی می‌باشد.

رشته‌های غیر اکسیدی تولید شده از پیش ماده پلیمری

همانطور که پیش از این توضیح داده شد، رشته‌های SiC تولید شده با روش CVD دارای قطر بسیار زیادی بوده و در نتیجه انعطاف خوبی ندارند. Yajima (۱۹۷۶) و (۱۹۸۰) با استفاده از پیرولیز کنترل شده یک پیش ماده پلیمری، فرآیندی را جهت ساخت رشته‌های SiC ریز، پیوسته و انعطاف پذیر ابداع نمود. این روش با استفاده از پلیمرهای پایه سیلیسیم، پتانسیل زیادی در تولید رشته‌های سرامیکی با خواص مکانیکی مناسب، پایداری حرارتی خوب و مقاومت به اکسیداسیون قابل قبول دارد. شکل ۲-۱۱ دیگرام ساخت رشته‌های سرامیکی از پیش ماده پلیمری را نشان می‌دهد. این فرآیند شباهت زیادی به فرآیند ساخت الیاف کربنی از پیش ماده پلیمری دارد. مراحل مختلف این فرآیند به قرار زیر می‌باشد:

(الف) مشخصه یابی پلیمر (استحکام تسلیم، وزن مولکولی، خلوص و غیره).

(ب) ریسندگی پلیمر مذاب به شکل الیاف پیش ماده.

(ج) پخت الیاف پیش ماده جهت برقراری پیوند عرضی میان زنجیره مولکول‌ها و دیرگداز نمودن آن برای مراحل پیرولیز بعدی.

(د) پیرولیز الیاف پیش ماده تحت شرایط کنترل شده و بدست آوردن الیاف سرامیکی.

مراحل فرآیند Yajima که به طور خاص در ساخت الیاف SiC از پیش ماده

پلیمری به کار گرفته می‌شود، به طور شماتیک در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده‌اند. در

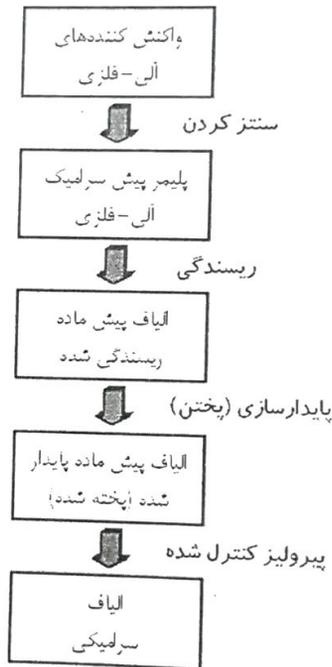
این فرآیند پلی کربوسیلان^۱ (PCS) که پلیمری با وزن مولکولی زیاد و حاوی کربن و

سیلیسیم می‌باشد، سنتز می‌شود. در این روش از ماده تجاری دی متیل کلروسیلان^۲

^۱ Polycarbosilane

^۲ Dimethylchlorosilane

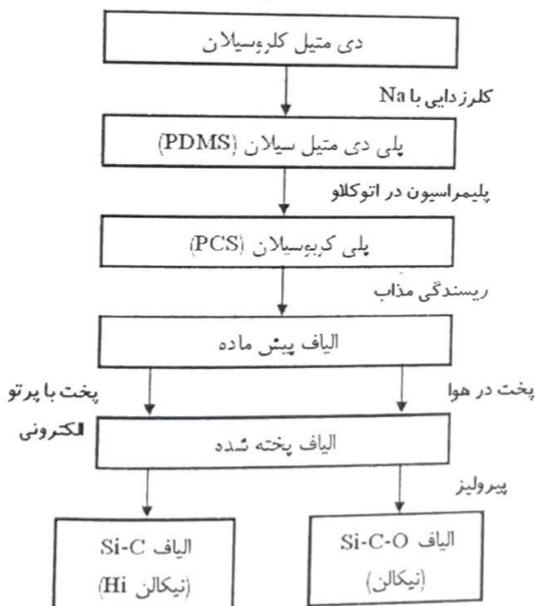
استفاده می‌شود. ماده جامد پلی دی متیل سیلان^۱ (PDMS) با کلرزدایی دی متیل کلروسیلان (واکنش آن با سدیم) بدست می‌آید. پلی کربوسیلان نیز به وسیله تجزیه حرارتی و پلیمراسیون پلی دی متیل سیلان تولید می‌شود. این عمل در یک اتوکلاو، تحت فشار بالا، در دمای 470°C ، تحت اتمسفر آرگون و در مدت ۸-۱۴ ساعت انجام می‌شود. سپس عملیات تقطیر در خلا در دمای 280°C انجام می‌شود. متوسط وزن مولکولی پلیمر حاصل، تقریباً ۱۵۰۰ است. در ادامه این پلیمر مذاب از نازلی با ۵۰۰ سوراخ در دمای 350°C تحت گاز N_2 عبور داده شده و در نهایت الیاف پیش ماده تهیه می‌گردد. این الیاف پیش ماده، الیافی کاملاً ضعیف است (استحکام کششی 10MPa). این الیاف پیش ماده در نهایت با انجام عملیات پخت در هوا، حرارت دهی



شکل ۲-۱۱: دیاگرام ساخت رشته‌های سرامیکی از پیش ماده پلیمری.

^۱ Polydimethylsilane

تا حدود 1000°C در گاز N_2 و سپس حرارت دهی تا 1300°C در گاز N_2 تحت کشش، به الیاف SiC تبدیل می‌شود. در حین پیرولیز، اولین مرحله تبدیل، در دمای 550°C ، زمانی رخ می‌دهد که پیوندهای عرضی زنجیره پلیمر برقرار گردد. بالاتر از این دما، آن طرفی از زنجیره که حاوی هیدروژن و گروه‌های متیل است، تجزیه می‌شود. در نهایت چگالی الیاف و خواص مکانیکی آن به شدت افزایش می‌یابد. مرحله تبدیل به SiC در بالاتر از 850°C رخ خواهد داد.



شکل ۲-۱۲: فرآیند Yajima برای ساخت رشته‌های نازک SiC از پلی کربوسیلان.

ساختار و خواص الیاف نیکالان^۱

الیاف چندرشته‌ای نیکالان (قطر تک رشته بین $20\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$) مخلوطی از $\beta\text{-SiC}$ ، کربن آزاد و SiO_2 است. بالاتر از 600°C به دلیل ناپایداری ترمودینامیکی ترکیب و

^۱ Nicalon Fiber

ریزساختار، خواص نیکالن شروع به تنزل می‌نماید. الیاف سرامیکی نیکالن مختلفی، با مقدار اکسیژن کمی، با علامات مشخصه HI، NLM و HI-S وجود دارند. ساختار الیاف نیکالن توسط محققین بسیاری، مورد بررسی قرار گرفته است. گونه‌های تجاری نیکالن دارای ساختار آمورف هستند، در حالی که نوع کم اکسیژن آن، ساختار میکروکریستالی (ریزبلوری) دارد (شعاع دانه‌های SiC تقریباً ۱/۷ nm است). آنالیز ریزساختاری نشان می‌دهد که هر دو نوع الیاف حاوی SiC، کربن آزاد و SiO_۲ می‌باشند. Laffon و همکارانش (۱۹۸۵) مدلی را برای رشته‌های نیکالن حاوی کریستال‌های β -SiC مخلوط شده با کربن آزاد ارائه نمودند. این مخلوط دارای ترکیب SiC_xO_y است که $x+y$ برابر ۴ خواهد بود. چگالی این الیاف تقریباً ۲/۶ g/cm^۳ است که در مقایسه با چگالی β -SiC کمتر است. بدیهی است که ترکیب شیمیایی مخلوط SiO_۲، SiC و C می‌باشد. خواص الیاف نیکالن در جدول ۲-۶ ارائه گشته است. مقایسه الیاف SiC نیکالن با الیاف SiC تهیه شده از روش CVD نشان می‌دهد که الیاف حاصل از CVD خواص بسیار بهتری دارد. به ویژه، باید متذکر این نکته باشیم که الیاف SiC تهیه شده از CVD، مقاومت به خزش بسیار بهتری نسبت به الیاف نیکالن از خود نشان می‌دهد (DiCarlo, ۱۹۸۵).

سایر رشته‌های از نوع SiC

رشته‌های زیادی از نوع کاربید سیلیسیم به شکل تجاری وجود دارند که ترکیبات عنصری برخی از آنها به شکل Si-C، Si-N-C-O، Si-B-N، Si-C-O و Si-Ti-C-O می‌باشند. تقریباً همه این رشته‌ها از پیش ماده‌های پلیمری ساخته می‌شوند. یک الیاف کاربید سیلیسیم چندرشته‌ای موسوم به *تیرانو*^۱ (Yamamura و همکاران، ۱۹۸۸) وجود دارد که از طریق پیرولز پلی تیتانو کربوسیلان تهیه می‌شود و حدود ۱/۵۴ درصد وزنی تیتانیم دارد. الیاف کاربید سیلیسیم بافته شده‌ای تحت عنوان *سیلرامیک*^۲، مخصوص

^۱ Tyranno

^۲ Sylramic

نساجی وجود دارد که دارای ساختار نانوکریستال (با اندازه کریستالیت $0.05 \mu\text{m}$)، چگالی 3 g/cm^3 ، استحکام کششی $3/15 \text{ GPa}$ و مدول یانگ 405 GPa می‌باشد.

۲-۷) ویسکرها

ویسکرها رشته‌های کوتاه تک کریستالی هستند که استحکام بسیار زیادی از خود نشان می‌دهند. این استحکام زیاد (نزدیک به استحکام تئوری)، به دلیل عدم عیوب کریستالی همچون نابجایی‌ها می‌باشد. تک کریستال بودن بدین معنی است که ویسکرها هیچ گونه مرز دانه‌ای ندارند. ویسکرها معمولاً دارای قطری در حدود چند میکرون و طولی در حدود چند میلیمتر می‌باشند و در نتیجه نسبت ابعادی آنها (طول به قطر) بین ۵۰ تا ۱۰۰۰ تغییر می‌کند. ویسکرها ابعاد و خواص یکنواختی ندارند و تغییرات خواص آنها زیاد است که این امر بزرگترین نقص آنها به شمار می‌رود. چگونگی به کار بردن و هم راستا نمودن (تنظیم کردن) ویسکرها در زمینه کامپوزیت از دیگر مشکلات آنها به شمار می‌آیند.

جدول ۲-۶: خواص الیاف SiC نیکالن.

نوع LVR ^۱	نوع HVR ^۲	نوع سرامیکی	خاصیت
۲/۴۵-۲/۵۵	۲/۳۲	۲/۵۵	چگالی (g/cm^3)
۲۹۶۰	۲۹۳۰	۲۹۶۰	استحکام کششی (MPa)
۱۹۲	۱۸۶	۱۹۲	مدول یانگ (GPa)
۱/۵	۱/۶	۱/۵	کرنش تا شکست
-	-	۴	ضریب انبساط حرارتی (10^{-6} K^{-1})
۰/۵-۰	> 1.6	۱.۲	مقاومت الکتریکی حجمی (Ωcm)

^۱ الیاف با خاصیت دی الکتریک کم (مقاومت حجمی بالا)

^۲ الیاف با هدایت بالاتر (مقاومت حجمی پایین)

ویسکرها معمولاً از طریق رشد فاز بخار تولید می‌شوند. بیشتر در دهه ۱۹۷۰ روشی ابداع شد که در آن با استفاده از پوسته (سبوس) برنج، ذرات و ویسکرهای SiC تولید می‌شد (Milewski و همکاران، ۱۹۷۴؛ Lee و Cutler، ۱۹۷۵). ابعاد ذرات SiC تولید شده از این روش بسیار ریز بود. پوسته برنج، پس مانده آسیا کاری برنج است. از هر kg ۱۰۰ kg برنج آسیا شده، حدود ۲۰ kg پوسته برنج بدست می‌آید. پوسته برنج حاوی سلولز، سیلیس و برخی مواد آلی و غیر آلی دیگر است. سیلیس بدست آمده از خاک حل شده و به شکل اسید مونوسیلیسیک به کارخانه منتقل می‌شود. این اسید به وسیله تبخیر مایع، در یک ساختار سلولزی رسوب می‌کند. این امر باعث می‌شود بیشتر سیلیس در پوسته برنج جمع شود. در نهایت مخلوطی از سیلیس و سلولز ایجاد می‌شود که مقادیر تقریباً ایده آلی از سیلیس و کربن جهت تولید کاربید سیلیسیم را دارا می‌باشد. پوسته برنج اولیه جهت خروج ترکیبات فرار، در غیاب اکسیژن تا 700°C حرارت می‌بیند. این عمل را کک سازی می‌نامند. پوسته برنج کک شده، حاوی مقادیر تقریباً برابری از SiO_2 و کربن آزاد است. این ماده را به منظور تشکیل کاربید سیلیسیم در اتمسفر خنثی یا احیایی (گاز N_2 یا NH_3) و دمایی بین 1500°C و 1600°C به مدت یک ساعت حرارت می‌دهند تا واکنش زیر به وقوع بپیوندد:



هنگامی که واکنش بالا تکمیل شد، پس مانده را به منظور حذف کربن آزاد تا 800°C حرارت می‌دهند. معمولاً ذرات و ویسکرها با استفاده از مقداری کربن آزاد اضافی با یکدیگر تولید می‌شوند. برای جداسازی ذرات و ویسکرها، از یک فرآیند آبی بهره گرفته می‌شود. میانگین نسبت ابعادی ویسکرهای تولید شده حدوداً ۷۵ است. فرآیند بخار-مایع-جامد (VLS)^۱ جهت رشد ویسکرها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Lindemanis، ۱۹۸۳؛ Milewski و همکاران، ۱۹۸۵؛ Petrovic و همکاران،

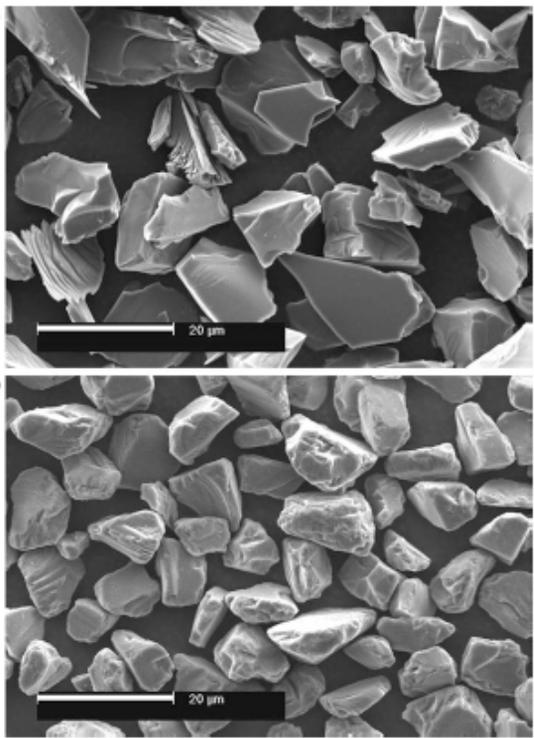
^۱ Vapor-Liquid-Solid

(۱۹۸۵). عبارت VLS بیانگر بخار: گازهای ورودی، مایع: کاتالیزور و جامد: ویسکرای کریستالی، می‌باشد. کاتالیزور، فصل مشترکی بین محلول مایع با فاز کریستالی در حال رشد می‌سازد که عناصر از فاز بخار به داخل فصل مشترک بخار- مایع تغذیه می‌شوند. رشد ویسکر از طریق رسوب از مایع فوق اشباع در فصل مشترک مایع- جامد انجام می‌شود. کاتالیزور باید محلول باشد تا اجزای اتمی ویسکر رشد نماید. در مورد ویسکرای SiC، فلزات واسطه و آلیاژهای آهن این نیاز را برآورده می‌سازند. سیلیسیم و کربن به ترتیب به شکل گازهای SiO و CH₄ تامین می‌شوند. گاز SiO به وسیله احیای حرارتی SiO₂ با کربن بدست می‌آید. معمولاً پس از پایان عملیات تولید، گستره‌ای از مورفولوژی‌های ویسکر پدید می‌آیند. استحکام کششی این ویسکرها از ۱/۷ تا ۲۳/۷ GPa گزارش شده است (Milewski و همکاران، ۱۹۸۵؛ Petrovic و همکاران، ۱۹۸۵). طول ویسکر حدود ۱۰ mm و قطر معادل آن تقریباً ۵/۹ μm است. متوسط استحکام کششی و مدول آن به ترتیب ۸/۴ و ۵۸۱ GPa می‌باشند. ذکر این نکته ضروری است که فرایند VLS بسیار کند است.

۲-۸) ذرات

۲-۸-۱) کاربرد سیلیسیم ذره‌ای

مدت مدیدی است که کاربرد سیلیسیم به صورت ذره‌ای تولید می‌شود. این ماده بسیار ارزان بوده و استفاده از آن برای کاربردهای سایشی، دیرگدازی و شیمیایی متداول است. SiC ذره‌ای از طریق انجام واکنش میان سیلیس به شکل ماسه و کربن به شکل کک در ۲۴۰۰°C در یک کوره الکتریکی، تولید می‌شود. در مراحل بعدی، SiC تولید شده به شکل گرانول‌های بزرگ، به اندازه دلخواه خرد می‌شوند. دو نوع تقویت کننده ذره‌ای SiC در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است که یکی با گوشه‌های تیز و دیگری با گوشه‌های گرد شده در شکل دیده می‌شوند.



شکل ۲-۱۳: تصویر SEM از تقویت کننده ذره‌ای SiC، (الف) مورفولوژی تیز و (ب) مورفولوژی گرد.

۲-۸-۲) کاربرد تنگستن ذره‌ای

کاربرد تنگستن را از کربن دهی کردن فلز تنگستن بدست می‌آورند و خود فلز تنگستن از احیای اکسید تنگستن توسط هیدروژن بدست می‌آید. در عمل کاربرد تنگستن را می‌توان مستقیماً از کانی یا اکسید آن استخراج نمود ولی معمولاً کربن دهی گازی ترجیح داده می‌شود. در ضمن به منظور کنترل اندازه ذره و نیز توزیع اندازه مناسب، کربن سیاه به مجموعه افزوده می‌شود. در واقع مخلوطی از پودر تنگستن و کربن سیاه، با اندازه ذره و توزیع مناسب، در معرض عمل آسیاب کاری قرار می‌گیرد. هدف فرآیند کربن دهی، تولید کاربرد تنگستن استوکیومتری به همراه مقدار کمی کربن آزاد است. کربن آزاد مانع از تشکیل فاز مضر اتا می‌شود. فرآیند کربن دهی در دمایی بین 1400°C و 2650°C در حضور هیدروژن انجام می‌شود. هیدروژن با کربن سیاه

واکنش داده و یک هیدروکربن گازی تولید می‌نماید. این هیدروکربن مطابق واکنش زیر باعث تولید کاربرد تنگستن می‌شود:



بعد از کربن دهی ذرات را معمولاً جهت از بین بردن اتصالات ایجاد شده، تحت آسیاب کاری قرار می‌دهند. اندازه ذرات بین ۰/۵ تا ۳۰ μm بدست می‌آید.

۲-۹) مقایسه رشته‌ها با هم

مهمترین خواص هر ماده تقویت کننده، استحکام و مدول یانگ می‌باشند. همه تقویت کننده‌های با کارایی بالا (رشته‌ها، ذرات و ویسکرها)، دارای چگالی پایینی هستند. با کمی دقت می‌توان به این مطلب پی برد که عناصر تشکیل دهنده این تقویت کننده‌ها مربوط به دو ردیف اول جدول تناوبی هستند. باید توجه داشت که صرف نظر از اینکه تقویت کننده‌ها به صورت عنصری یا ترکیب هستند، غالباً پیوندهای کوالانسی که مستحکم‌ترین نوع پیوند است، بین آنها حاکم است. معمولاً چنین مواد سبک، سفت و مستحکم در اغلب کاربردها عملکرد بسیار مطلوبی دارند، اما این مواد به طور خاص در صنایع هوافضا، حمل و نقل زمینی، انرژی و سازه‌های ساختمانی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. انعطاف پذیری الیاف به مدول یانگ و قطر آن مرتبط می‌باشد (بخش ۲-۱). به طور کلی در مورد رشته‌های با مدول بالا، قطر، پارامتر کنترل کننده انعطاف پذیری است. برای یک مدول مشخص، E، قطر کوچکتر، انعطاف پذیری بیشتر الیاف را به دنبال خواهد داشت. اگر نیاز به خم کردن، پیچیدن و یا بافتن یک الیاف باشد تا بتوان با آن اشکال پیچیده تولید نمود، خصیصه انعطاف پذیری اهمیت خود را آشکار می‌نماید.

برخی از این رشته‌ها، دارای خواصی کاملاً ناهمسانگرد هستند. استحکام، مدول و خواص حرارتی با تغییر جهت، تغییر می‌کنند و این تغییر در طول محور رشته و در جهت عرض آن، نمود بارزی دارد. به طور خاص، ضریب انبساط حرارتی کربن در

جهت شعاع و طول کاملاً متفاوت از یکدیگر می‌باشند. این موضوع در مورد تک کریستال‌ها یا ویسکرها نیز صادق است، مثلاً الیاف تک کریستال آلومینا که ساختار هگزاگونال دارد. در این ارتباط رشته‌های پلی کریستالینی همچون SiC و Al_2O_3 به طور قابل قبولی همسانگرد هستند. از خصوصیات مهم دیگر این رشته‌های با کارایی بالا، مقادیر بسیار کم کرنش شکست آنهاست (معمولاً کمتر از ۳-۲٪).

۲-۱) آنالیز آماری استحکام رشته‌ها

به طور کلی، شکست مواد ترد شامل برخی ملاحظات آماری خواهد بود. متداول ترین تقویت کننده‌های به کار رفته در کامپوزیت‌های زمینه فلزی، رشته‌های سرامیکی هستند. این رشته‌ها در حالت ترد دچار شکست می‌شوند. مواد سرامیکی، چه به شکل رشته‌ای و چه به اشکال دیگر، دارای عیوبی هستند که به طور اتفاقی در سطوح و یا درون آنها توزیع شده‌اند. حضور این عیوب باعث بروز پراکندگی زیاد در نتایج مربوط به استحکام مورد آزمایش، می‌شود. همچنین رشته‌های سرامیکی، در اثر توزیع عیوب ناشی از فرآیند تولید مثل تخلخل‌های ریز و شیارها، استحکام کششی بسیار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. نسبت بزرگ سطح به حجم رشته‌ها، این مواد را مستعد به عیوب (ترک‌های) سطحی می‌نماید.

یک الیاف با طول مشخص را می‌توان به صورت یک سری از پیوندهای زنجیره‌ای تصور نمود. هنگامی که این الیاف بارگذاری می‌شود، ابتدائاً آن پیوند یا بخشی که حاوی بزرگ‌ترین نقص می‌باشد، دچار تخریب گشته و در نهایت باعث شکست کل الیاف می‌گردد. با طولانی‌تر بودن الیاف، احتمال اینکه یک پیوند دارای ترکی با اندازه بحرانی برای شکست باشد، بیشتر خواهد بود. به عبارت دیگر، باید انتظار داشت که متوسط استحکام یک الیاف کوتاه از متوسط استحکام یک الیاف طویل بیشتر است. شکست الیاف هنگامی رخ می‌دهد که ضعیف‌ترین پیوند از هم گسسته شود. این پدیده، فرضیه ضعیف‌ترین پیوند نامیده می‌شود. این فرضیه، موادی با زنجیره‌های

ضعیف را در بر می‌گیرد و توسط یک توزیع آماری موسوم به توزیع ویبول تشریح خواهد شد (Wibull, ۱۹۵۹). فرض اصلی این نظریه آن است که یک الیاف دارای توزیعی از عیوب (روی سطح یا درون آن) می‌باشد. توزیع ویبول فرض می‌کند که همه بخش‌ها یا اتصالات زنجیره‌ای دارای انواع یکسانی از عیوب هستند، اما طول آنها متفاوت است. توزیع ویبول یک توزیع پارامتری است یعنی یک نوع توزیع تجربی بوده و خود را درگیر منشأ عیوب نمی‌کند. بر اساس توزیع ویبول، احتمال بقای یک عیب بدین شکل است :

$$P(\sigma) = \exp\left[-\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^m\right]$$

که σ_0 و m مقادیر ثابتی هستند. هر چه m بیشتر باشد، توزیع دارای محدوده کمتری خواهد بود. به طور کلی مواد ترد، مدول ویبول کمتری از مواد داکتیل دارند. با گرفتن دو لگاریتم از طرفین، خواهیم داشت :

$$\ln \ln [P(\sigma)] = m \ln \left[-\frac{\sigma_0}{\sigma}\right]$$

توزیع ویبول، احتمال شکست یک الیاف در تنش اعمالی را مطابق رابطه زیر بیان

می‌کند :

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^m\right]$$

که σ_0 و m پارامترهای آماری هستند. $F(\sigma)$ را تابع توزیع تجمعی^۱ می‌نامند. پارامتر m تحت عنوان مدول ویبول نامیده می‌شود. در واقع m مقیاسی از تغییر استحکام الیاف است. مقادیر بالاتر مدول ویبول، مقادیر یکنواخت‌تری از استحکام را در پی خواهند داشت. مدول ویبول را می‌توان به شکل گرافیکی بدست آورد. برای این کار باید رابطه دو بار لگاریتم گرفته شده را ترسیم نمود که در نتیجه خطی با شیب m حاصل می‌شود.

^۱ Cumulative Distribution Function

مدول ویبول، m ، مقیاسی از توزیع ترک در نمونه است. جدول ۲-۷ مدول ویبول را برای چندین الیاف نشان می‌دهد.

برای بدست آوردن پارامترهای ویبول، باید یک سری از نمونه‌های یکسان (حجم یکسان یا رشته‌های با قطر و طول یکسان) به صورت تجربی در معرض آزمایش قرار گرفته و دچار شکست شوند. از این آزمایشات، هنگامی که بارگذاری باعث یک تنش مشخص، σ ، می‌شود، می‌توان کسر نمونه‌های سالم باقیمانده، $P(\sigma)$ ، را بدست آورد. سپس مقادیر استحکام کششی تک‌رشته‌ها را به ترتیب صعودی مرتب کرده و احتمال شکست را بدین شکل بدست می‌آوریم:

$$F(\sigma_i) = \frac{i}{1+N}$$

جدول ۲-۷: مقادیر مدول ویبول برای برخی از رشته‌ها.

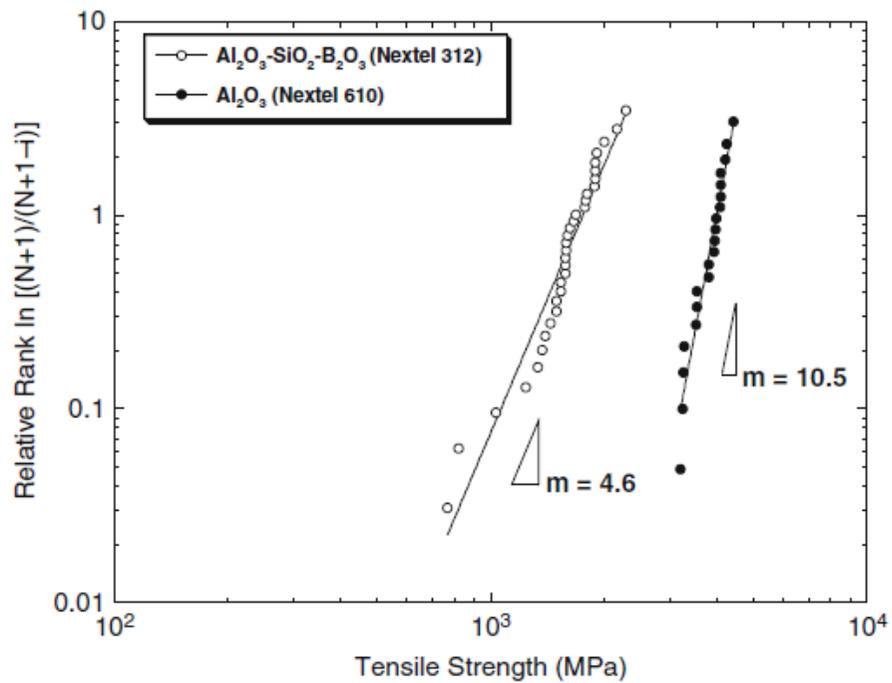
مدول ویبول، m	جنس الیاف
< 5	شیشه
۵-۱۰	B, C, Al_2O_3 , SiC
> 100	فولاد

که $F(\sigma_i)$ احتمال شکست مربوط به i امین مقدار استحکام و N تعداد کل رشته‌های آزمایش شده می‌باشند. با جایگزین کردن این رابطه در رابطه لگاریتمی داریم:

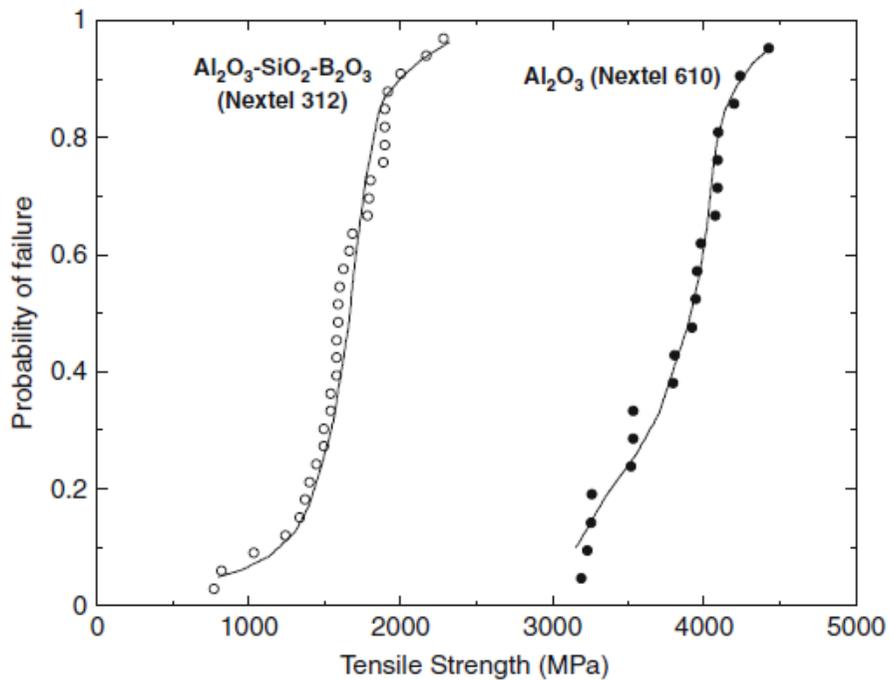
$$\ln \ln \left[\frac{N+1}{N+1-i} \right] = m \ln \sigma_i + \ln \sigma$$

اگر داده‌های مربوط به استحکام کششی از توزیع ویبول پیروی کنند، با ترسیم $\ln \ln [(N+1)/(N+1-i)]$ بر حسب σ_i روی یک نمودار log-log خط مستقیمی حاصل می‌شود. عرض از مبدا خط σ_0 و شیب آن m خواهد بود. شکل ۲-۱۴ یک چنین نموداری را برای الیاف نکستل ۳۱۲ نشان می‌دهد (Chawla و همکاران، ۲۰۰۵؛ Kerr و همکاران، ۲۰۰۵). مثالی از احتمال تجمعی شکست الیاف نکستل ۳۱۲ بر

حسب استحکام الیاف در شکل ۱۵-۲ نشان داده شده است (Chawla و همکاران، ۲۰۰۵).



شکل ۱۴-۲: توزیع ویبول در برخی از رشته‌های نکستل.



شکل ۱۵-۲: احتمال تجمعی شکست الیاف نکستل ۳۱۲.