



دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

# جزوه ی درس کامپوزیت ها آقای دکتر اخلاقی



دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

# جزوه‌ی درس کامپوزیت‌ها آقای دکتر افلاقی

تهیه و تنظیم جزوه:

آذر غلامی

مسعود بهزادی نژاد

دانشکده فنی دانشگاه تهران

نمیسال اول ۹۵-۹۶

سورة الاحقاف

جزوه درس کامپوزیت‌ها

استاد مربوطه: جناب آقای دکتر اخلاقی

زمان تشکیل کلاس: ۱۶ - ۱۴:۳۰ / یکشنبه

مهندسی مواد و متالورژی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

نیمسال اول ۹۵-۹۶

ارزیابی کلاس کامپوزیت: سمینار + امتحان میان ترم + امتحان پایان ترم

"لازم بذکر است متن این جزوه از پیاده کردن صوت جناب آقای دکتر اخلاقی در هر جلسه توسط دانشجویان آذر غلامی و

مسعود بهزادی نژاد تهیه و تنظیم گردیده است."

## فهرست مطالب

موضوع	زمان تشکیل	جلسه
کامپوزیت - وظایف ماتریس - تقسیم بندی کامپوزیت‌ها	۴ مهرماه	جلسه اول
کامپوزیت‌ها- زمینه- تقویت کننده-الیاف پیوسته-گرافیت-شیشه	۱۱ مهرماه	جلسه دوم
کوارتز-کولار-بور-سیلیکون کاربید-الیاف اکسیدی	۲۵ مهرماه	جلسه سوم
الیاف گرافیت- راه‌های تولید الیاف کربن-نانولوله‌های کربن-الیاف فلزی-ویسکر سیلیکون کاربید- کامپوزیت‌های زمینه پلیمری-تقسیم بندی پلیمرها-	۲ آبان ماه	جلسه چهارم
ترموپلاستیک‌ها- ترموست‌ها- الاستومرها- کامپوزیت‌های زمینه پلیمری- روش ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری	۹ آبان ماه	جلسه پنجم
روش ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری-کاربردهای کامپوزیت‌های زمینه پلیمری-کامپوزیت‌های زمینه فلزی	۹ آبان ماه	جلسه ششم
روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی	۲۳ آبان ماه	جلسه هفتم
التراسونیک، مغناطیسی، Compcasting، روش درجا و ...	۷ آذر ماه	جلسه هشتم
روش اسپری	۱۴ آذرماه	جلسه نهم
روش‌های درجا، متالورژی پودر، مخلوط سازی و ...	۲۸ آذر ماه	جلسه دهم
خواص مکانیکی	۵ دی ماه	جلسه یازدهم
کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی	۵ دی ماه	جلسه دوازدهم

## جلسه اول

مورخ: ۹۵/۰۷/۰۴

## کامپوزیت:

کامپوزیت یک ماده‌ای است که در دو یا چند سازنده تشکیل شده است که خواص برتری نسبت به مواد سازنده‌اش دارد. یک کامپوزیت معمولاً یک فاز پیوسته دارد که آن را ماتریس یا زمینه می‌نامند و فاز دیگری که در آن توزیع شده است و به آن فاز دوم یا تقویت کننده گفته می‌شود.

تقویت کننده این مفهوم را می‌دهد که فقط بحث مکانیکی را بهبود می‌دهد اما کامپوزیت همواره باعث بهبود خواص مکانیکی نمی‌شود بلکه این امکان را دارد که باعث بهبود استحکام، سبکی و... شود و بهتر است از عبارت فاز دوم استفاده شود.

کامپوزیت که بیش از یک فاز تقویت کننده دارد را کامپوزیت هیبریدی می‌گویند.

اگر این تعریف را در نظر بگیریم در این صورت تمام مواد اطراف ما، همگی کامپوزیت هستند. مثل چوب که یک کامپوزیت است چرا که داخل چوب یک الیافی است که نرم‌تر است و در چوب توزیع شده است. یک‌سری الیاف توزیع شده است، بنابراین یک کامپوزیت است. (الیاف سلولزی در ماتریس نرمی به لیگنین پخش شده است.)

استخوان - ماهیچه یک کامپوزیت است. در گوشت یک‌سری الیاف به نام کلاژن دارند و الیاف در جهتی تنظیم شده‌اند که نیرو را تحمل می‌کنند.

تخته سه لایه - تخته چندلایه خودش یک کامپوزیت است. لایه‌های چوب را روی هم قرار می‌دهند به‌صورتی که این لایه‌ها تاب بردارند و خواص بهتری نسبت به لایه‌های آن‌ها به تنهایی از خود داشته باشند.

بتن نیز یک کامپوزیت است. شن و ماسه داخل سیمان توزیع شده است که شن و ماسه فاز دوم هستند که باعث استحکام می‌شوند و سیمان که ماتریس (زمینه) است.

بتن مسلح را اگر در نظر بگیریم، میلگردهای فولادی را در بتن قرار می‌دهند که این یک کامپوزیت هیبریدی است، چون تقویت‌کننده هم فولاد و هم شن و ماسه است. این کامپوزیت‌های هیبریدی یک‌سری برتری دارند. سرامیک‌ها از جمله بتن، در برابر فشار مقاوم هستند اما در برابر کشش ضعیف. فولاد برعکس است در برابر کشش خوب است و در برابر فشار ضعیف است. بنابراین اگر بتنی درست کنید که فولاد در بتن قرار داده شود، یک سازه‌ای می‌شود که هم در برابر کشش و هم در برابر فشار از خود خواص خوبی را نشان می‌دهد و باعث بهبود خواص شده است.

کاه‌گل یک کامپوزیت است که ذرات کاه فاز دوم است و خاصیت برترش این است که ترک نمی‌خورد، مقاومت در برابر ترک دارد و ذرات کاه جلوی رشد ترک را می‌گیرد.

تمام آلیاژهایی که ساخته شده است کامپوزیت هستند حتی فولاد ساده کربنی نیز کامپوزیت است، چون در این فولاد ذرات سخت سمیتیت در زمینه‌ی نرم به نام فریت پخش شده است. هر آلیاژ دیگری نیز کامپوزیت محسوب می‌شود. فولاد گالوانیزه نیز یک کامپوزیت است، به خاطر این که فلز روی را روی فولاد قرار می‌دهند. Zn (روی) مقاومت به خوردگی خوبی دارد و فولاد خواص مکانیکی خوبی دارد. بنابراین این فولاد گالوانیزه هم خواص مکانیکی خوبی دارد و هم خاصیت مقاومت به خوردگی خوبی دارد (خواص برتری پیدا می‌کند).

ابزارآلات برش، معمولاً کاربرد تنگستن در داخل کبالت توزیع شده است که یک کامپوزیت است. در این کامپوزیت فاز دوم بیش‌تر از زمینه است. خیلی اوقات این اشتباه به وجود می‌آید که آن فازی که درصد بیش‌تری دارد زمینه است و آن فازی که درصدش کم‌تر است، فاز دوم است. این مثال این را نشان می‌دهد که همواره این‌گونه نیست، فاز ماتریس فازی است که یکنواخت است و پخش شده است. فاز دوم، فازی است که توزیع شده است. در این مثال ۷۰-۸۰٪ کاربرد تنگستن است و ۲۰-۳۰٪ کبالت است. ماتریس در این حالت کامپوزیت، کبالت Co است.

کامپوزیتی که خیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد Al-Sic است، ذرات Sic در داخل AL توزیع شده است و یک کامپوزیت را تشکیل داده است.

اکنون می‌خواهیم بررسی کنیم ماتریس که در کامپوزیت مطرح می‌شود، چه کاری را انجام می‌دهند.

## وظایف ماتریس:

۱- نیرو را بین الیاف‌های فاز دوم توزیع می‌کند به عبارتی بهتر ماتریس باعث انتقال نیرو می‌شود.

۲- جلوی رشد ترک‌ها را می‌گیرد.

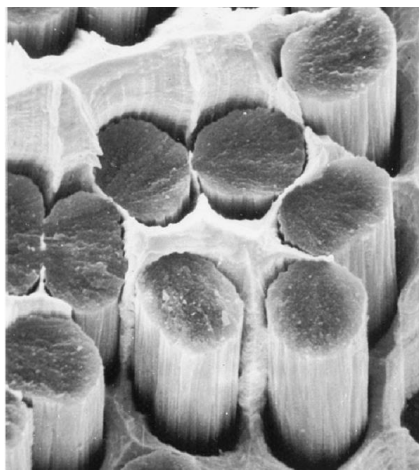
۳- الیاف را در جای خود نگه می‌دارد و الیاف را از خسارت‌های سطحی محفوظ می‌دارد. (نیروهای مکانیکی ممکن است باعث ایجاد ترک شود و وارد کامپوزیت شود.)

چه انتظاراتی از ماتریس داریم:

انتظار داریم که استحکام برشی خوبی را داشته باشد، چقرمگی داشته باشد، در مقابل عوامل محیطی مانند رطوبت مقاومت داشته باشد. خواص حرارتی خوبی داشته باشد و قیمت مناسب هم داشته باشد.

فایبرگلاس: به اشتباه جا افتاده است الیاف شیشه که این درست نیست. به کامپوزیت ایجاد شده از الیاف شیشه و پلیمر فایبرگلاس می‌گویند. الیاف شیشه است که در داخل پلیمر توزیع شده است. که در این صورت الیاف شیشه در پلیمر تشکیل یک کامپوزیت داده است. الیاف شیشه داخل پلیمر توزیع شده است و یک کامپوزیت به وجود آورده است.

در شکل ذیل الیاف کربن در ماتریس نقره - مس را مشاهده می‌کنیم. پیوند خوبی بین ماتریس و الیاف ایجاد نشده است. فصل مشترک خوبی بین الیاف و ماتریس برقرار نیست، بنابراین یکی از مواردی که در کامپوزیت‌ها حائز اهمیت است interface (فصل مشترک) است. به عبارتی بایستی پیوند خوبی بین اجزای کامپوزیت برقرار باشد.

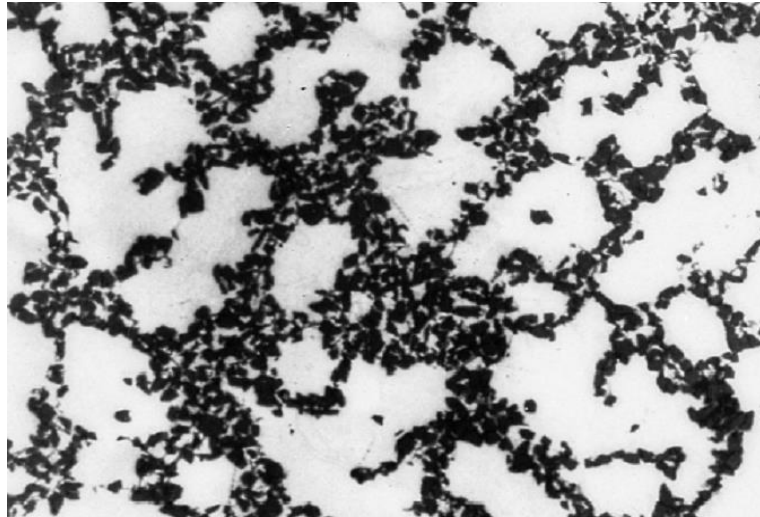




قوی‌ترین ماده‌ای که بشر شناخته است الیاف کربن است. (سختی‌اش ۵ برابر فولاد است).  
در کامپوزیت‌ها سه مورد حائز اهمیت است:

۱- زیرساختار - توزیع      ۲- پیوند      ۳- پیوستگی - تخلخل

در شکل ذیل کامپوزیت Al-Sic مشاهده می‌شود که در این کامپوزیت Sic در AL توزیع شده است. اگر ذرات Sic در مرز دانه AL قرار گیرند در این حالت اصلاً خوب نیست. چرا این حالت مطلوب نیست: برای این که سرامیک با سرامیک پیوند ندارد و به عبارتی اتصال برقرار نیست. بنابراین این ذرات که در مرز دانه تجمع پیدا کرده‌اند، نقطه‌ی ضعف برای این کامپوزیت است و از این ضعف ترک ایجاد می‌شود و شروع ترک از این‌جا خواهد بود و رشد پیدا می‌کند. بنابراین باید توزیع در کامپوزیت خوبی باشد و نباید به‌گونه‌ای باشد که خوشه داشته باشیم (cluster) یا به عبارتی تجمع فاز تقویت‌کننده داشته باشیم، این حالت مطلوبی نیست.



**Figure 16.7 Microstructure of an aluminum casting alloy reinforced with silicon carbide particles. In this case, the reinforcing particles have segregated to interdendritic regions of the casting ( $\times 125$ ). (Courtesy of David Kennedy, Lester B. Knight Cost Metals Inc.)**

در Al-Si وقتی انجماد رخ می‌دهد، در انجماد فاز دوم یوتکتیک‌ها در مرز دانه جمع می‌شوند و Si یوتکتیک در مرز دانه قرار می‌گیرد. توزیع یکی از موارد مهم در کامپوزیت است.

با توضیحاتی که در بالا ارائه شد، تمام مواد اطراف کامپوزیت است. حال این سوال مطرح می‌شود چه موادی کامپوزیت نیستند؟

در ادامه به بررسی و تعریف کامپوزیت مهندسی می‌پردازیم:

به‌طور کلی به دسته‌ای مواد ساخته دست باشد، کامپوزیت‌های مهندسی اطلاق می‌گردد که:

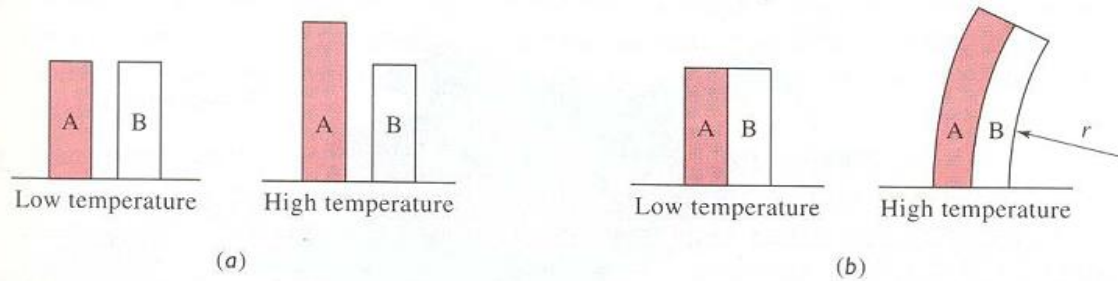
۱- این مواد در اثر اختلاط دو یا چند ماده جامد که از لحاظ ترکیب شیمیایی با هم متفاوت هستند، تولید می‌شوند. البته می‌بایست سازنده‌ها در اثر تشکیل کامپوزیت ماهیت فیزیکی خود را حفظ کرده و به عبارتی در یکدیگر حل نشده و یک فاز در فاز دیگر محو نشود، به طوری که یک فصل مشترک بین فاز دوم و فاز زمینه قابل تشخیص باشد به این تعریف چوب، ماهیچه، استخوان و هرگونه ماده‌ای که به‌طور طبیعی در طبیعت وجود دارد را نمی‌توان به‌عنوان یک کامپوزیت مهندسی در نظر گرفت.

۲- کامپوزیت‌های مهندسی در اثر اختلاط و یا درهم‌آمیزی یک فاز در فاز دیگری به دست می‌آید و باید توزیع یک فاز در دیگری قابل کنترل بوده و خواص بهینه‌ای را ایجاد کند. طبق این تعریف آلیاژهای فلزی که در آن‌ها فازهای بین فلزی است که در حین انجماد شکل می‌گیرند را نمی‌توان به‌عنوان کامپوزیت مهندسی در نظر گرفت.

۳- خواص کامپوزیت می‌بایست از سازنده‌هایش برتر بوده و در بعضی از موارد منحصر به فرد باشد. به‌طور مثال بی‌مثال‌ها کامپوزیت‌هایی هستند که خواص منحصر به فردی را نسبت به سازنده‌هایشان ارائه می‌کند.

به‌عنوان مثال وقتی دو فلز A و B داشته باشیم که این دو فلز ضریب انبساط حرارتی‌شان با هم متفاوت است، وقتی این دو فلز در کنار هم قرار می‌گیرند و به یکدیگر متصل می‌شوند، در اثر کم کردن آن‌ها خم شدن اتفاق می‌افتد. با توجه به این که یک کامپوزیت ایجاد کردیم، این خاصیت را دارد. (خواص خم شدن یک خاصیت منحصر به فرد است.)

ضریب انبساط حرارتی فلز A بیش‌تر از فلز B است، لذا اگر این دو فلز به هم متصل شوند، در اثر حرارت‌دهی و اختلاف در ضریب انبساط حرارتی خمیده می‌شوند.



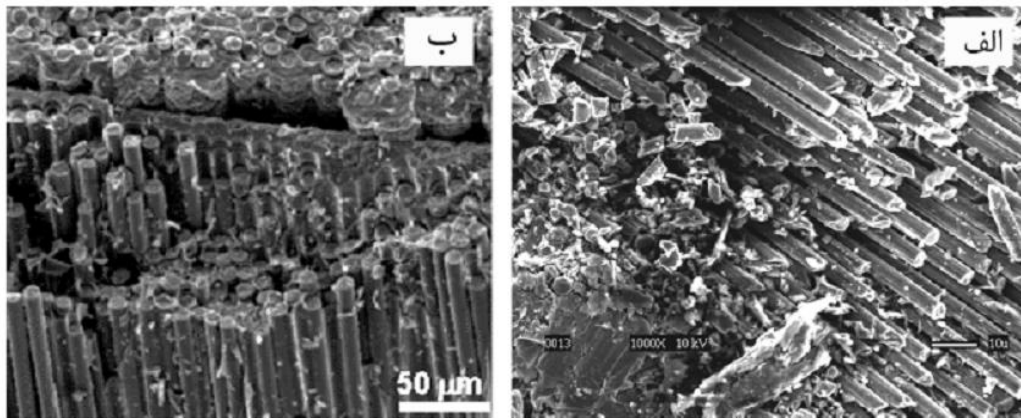
**FIGURE 16-36** The effects of the thermal expansion coefficient on the behavior of bimetallics: (a) increasing the temperature increases the length of one metal more than the other. (b) If the two metals are joined, the difference in expansion causes a radius of curvature to be produced.

بی‌متال‌ها: دو فلز غیرمتجانس به هم متصل می‌کنند و خم می‌شود. در برخی از سوئیچ‌های اجاق گازهای خانگی و... از این مواد استفاده می‌کنند. وقتی گرم می‌شوند اجازه می‌دهند که جریان گاز عبور کند و...

تعاریفی که در بالا ارائه شد مربوط به کامپوزیت مهندسی است، اما در این تعریف ۲ استثنا وجود دارد:

۱- کامپوزیت‌های like-like: کامپوزیت‌هایی هستند که ماتریس و فاز دوم دارای ترکیب شیمیایی یکسان است. مثل کامپوزیت‌های کربن - کربن که در این کامپوزیت الیاف کربن در ماتریس کربن قرار گرفته است و کامپوزیت را تشکیل داده است.

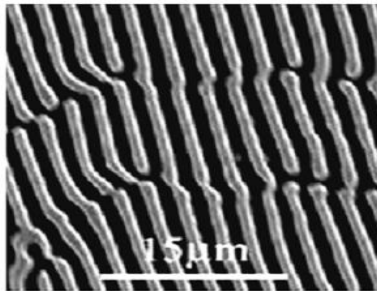
مثل کامپوزیت‌های Sic-Sic که در این حالت الیاف Sic در ماتریس Sic قرار گرفته است که ماتریس و فاز دوم یکی است.



شکل ۵-۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از (الف) کامپوزیت کربن-کربن و (ب) کامپوزیت SiC-SiC

۲- کامپوزیت‌های درجا: در این نوع کامپوزیت‌ها فاز دوم در اثر یک واکنش شیمیایی و یا در حین انجماد به صورت درجا در زمینه تشکیل می‌شود، در انجماد آلیاژهای یوتکتیکی که به صورت جهت‌دار انجام می‌شود، فازهای یوتکتیکی به صورت میله‌ای و یا لایه‌ای تشکیل می‌شود و جزء کامپوزیت‌های درجا قرار می‌گیرند.

Al<sub>2</sub>Cu در داخل AL به این صورت تشکیل می‌شود و لایه لایه‌ای به وجود می‌آید و یک کامپوزیت را به وجود می‌آورد. (درجا) کامپوزیت‌ها از جهات مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند، اکنون به تقسیم‌بندی کامپوزیت‌ها می‌پردازیم.



شکل ۶-۱: ریزساختار انجماد جهت‌دار در آلیاژ یوتکتیک آلومینیوم-مس.

## تقسیم‌بندی کامپوزیت‌ها:

### ۱- براساس طبیعت کامپوزیت‌ها:

براساس طبیعت کامپوزیت طبقه‌بندی می‌شوند:

الف) طبیعی: چوب، ماهیچه، استخوان و... (به صورت طبیعی هستند)

ب) مصنوعی: بتن مسلح، فایبرگلاس و... (ساخت دست بشر هستند).

### ۲- براساس جنس زمینه:

اگر زمینه پلیمر باشد در این صورت به آن کامپوزیت، کامپوزیت زمینه‌ی پلیمری می‌گویند. (PMC) مثل: فایبرگلاس.

اگر زمینه فلز باشد در این صورت به آن کامپوزیت، کامپوزیت زمینه‌ی فلزی می‌گویند. (MMC) مثل: Al-Sic

اگر زمینه سرامیک باشد در این صورت به آن کامپوزیت، کامپوزیت زمینه سرامیکی می‌گویند. (CMC) مثل: کربن - کربن

اگر زمینه شیشه‌ای باشد به آن کامپوزیت شیشه‌ای گفته می‌شود. (GMC)

اگر زمینه Intermetallic باشد در این صورت به این کامپوزیت‌ها IMC می‌گویند که اکثر کامپوزیت‌های IMC، درجا هستند.

خیلی از مراجع تقسیم‌بندی برحسب زمینه را بر سه دسته تقسیم‌بندی می‌کنند و شیشه و Intermetallicها را جزء سرامیک‌ها قرار می‌دهند و کامپوزیت‌ها را براساس جنس زمینه به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

کامپوزیت‌های زمینه فلزی

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری

کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی

۳- براساس هندسه فاز دوم:

نوع دیگر تقسیم‌بندی براساس هندسه فاز دوم کامپوزیت است که به صورت ذیل تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف) فاز دوم به صورت پیوسته است. که این فاز دوم پیوسته نیز به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شود:

۱- لایه‌ای

۲- الیاف پیوسته  $\Leftarrow$  این حالت نیز به دو صورت تقسیم‌بندی می‌گردد: رندم - غیررندم (در یک جهت قرار گیرند.)

ب) فاز دوم به صورت غیرپیوسته است که این فاز دوم غیرپیوسته نیز به سه دسته تقسیم می‌شود:

۱- ذرات (ذره‌ای)

۲- الیاف کوتاه

۳- ویسکر

فرق ویسکر با الیاف کوتاه: ویسکر تک کریستال است. خواص بهتری نسبت به الیاف کوتاه دارند چون تک کریستال هستند. اما خود این الیاف کوتاه‌ها و ویسکرها می‌توانند رندم‌ها در یک جهت قرار گیرند. کدام بهتر است حالت رندم یا در یک جهت: در یک جهت باشند قطعاً بهتر از حالت رندم است. خواص در آن جهت بهتر است.

اگر به صورت رندم قرار بگیرند: خواص ایزوتروپ دارند.

اگر در یک جهت قرار گیرند: خواص آن ایزوتروپ دارند.

۴- یک تقسیم‌بندی جدید که اکنون در کتاب‌ها ارائه شده است این است که کامپوزیت‌ها را به سه دسته تقسیم‌بندی می‌کنند:

الف) ساختاری Structure:

۱- لایه‌ای

۲- پنل‌های ساندویچی

پنل‌های ساندویچی: معمولاً دو لایه فلزی است و در وسط آن‌ها می‌تواند پلیمری باشد. / الیاف کولار در ماتریس اپوکسی نیز نوعی کامپوزیت‌های پنل‌های ساندویچی است.

ب) الیافی Fiber:

۱- پیوسته

۲- غیر پیوسته: مرتب / رندم (random)

ج) ذره‌ای particle:

۱- ذرات بزرگ

۲- ذرات خیلی ریز

۵- طبقه‌بندی براساس سائز مواد کامپوزیت:

طبقه‌بندی دیگری که در کامپوزیت‌ها صورت می‌گیرد براساس سایز مواد کامپوزیت است:

الف) ماکروکامپوزیت‌ها: مثل فولاد گالوانیزه یا بتن مسلح که ماکروکامپوزیت‌ها هستند. در این کامپوزیت‌ها با چشم غیرمسلح فاز دوم قابل مشاهده است.

ب) میکروکامپوزیت‌ها: فاز دوم در این نوع کامپوزیت‌ها فقط زیر میکروسکوپ دیده می‌شود. مثل Al-Sic ریزمیکروسکوپ Sic مشاهده می‌کنیم.

ج) نانو کامپوزیت‌ها: کامپوزیتی است که حداقل یکی از فازهایش در مقیاس نانو می‌باشد. نانو کامپوزیت‌ها، بحث روز مهندسی مواد است.

اگر فاز دوم در مقیاس نانو باشد خیلی واضح است مثل نانوالومینه، نانو Sic و... اما آیا می‌شود ماتریس در مقیاس نانو باشد؟ بله - اگر ماتریس نانو کریستال باشد، باز هم این کامپوزیت یک نانو کامپوزیت است.

این موضوع برداشت نشود که اگر فاز دوم نانو باشد و ماتریس اش نانو نباشد، نانو کامپوزیت نیست، طبق تعریف نانو کامپوزیت‌ها دارای حداقل یک فاز در مقیاس نانو می‌باشند.

اگر فاز دوم نانو بود و ماتریس در مقیاس نانو نبود در این حالت نیز این کامپوزیت نیز نانو کامپوزیت است.

## تاریخچه‌ی کامپوزیت:

خداوند متعال در قرآن هم از کامپوزیت‌ها صحبت کرده است در سوره‌ی کهف، آهن که مس گداخته روی آن ریخته بودند یک نوع کامپوزیت است.

سابقه کامپوزیت‌ها به سال‌های خیلی قبل برمی‌گردد. زمانی که چینی‌ها از کاه‌گل استفاده می‌کردند در ساختمان‌سازی. چوب بامبو یک کامپوزیت است.

پل‌ها و ساختمان‌هایی که از بتن مسلح ساخته می‌شوند، همگی کامپوزیت هستند.

در صنعت هوافضا و هواپیمایی، اولین استفاده از کامپوزیت در این صنعت، مربوط به کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری به نام رادوم Radom بودند که به شکل مخروط از آن استفاده می‌کردند.



آنتن هواپیما باید محافظت شود در برابر عوامل جوی و... و در عین حال باید امواج الکترومغناطیسی را به خوبی از خود عبور دهد، قبلاً از تخته سه‌لایه برای پوشش محافظ آنتن هواپیما استفاده می‌کردند ولی در حدود سال ۱۹۴۰ برای ساخت Radom از کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری استفاده کردند که هم در مقابل عوامل جوی خوب است و هم امواج الکترومغناطیسی را به خوبی از خود عبور می‌دهد و بعد از این کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری برای پوشش آنتن تمام هواپیماها استفاده کردند.

در سال ۱۹۴۲، اولین قایق فایبرگلاس ساخته شد و به دنبال آن برای ساختن سازه‌های سبک، ملخ هواپیما و هلی‌کوپترها، از کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری استفاده کردند.

در صنعت هوافضا برای پوشش‌های دماغه‌ی موشک و... از سال ۱۹۵۶ از کامپوزیت‌ها استفاده کردند، که از کامپوزیت‌های کربن - کربن استفاده می‌کنند که بتوانند دمای بالا را تحمل کنند.

در صنعت هواپیماسازی از سال ۱۹۶۰ بوئینگ ۷۲۷، ادعا کرد که از پلاستیک تقویت شده (PMCها) در هواپیما استفاده کرده است و ۳۳ درصد کاهش وزن داشته است.

در هواپیماها سعی بر این است که کاهش وزن داشته باشیم، کامپوزیت‌ها بیش‌ترین کاربرد در صنعت هوافضا دارند به‌خاطر دو ویژگی سبکی و استحکام توأم با هم.



از سال ۱۹۵۰ اتومبیل‌ها (صنعت اتومبیل‌سازی) شروع به استفاده از کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری کردند.

با توجه به بحران سوخت و آلودگی محیط‌زیست در حال حاضر کمپانی‌های اتومبیل‌سازی وادار شدند که سبک‌سازی اتومبیل‌ها را پیاده‌سازی کنند.

از سال ۱۹۵۶ صنعت الکترونیک در مدارهای چاپی از کامپوزیت‌های PMC استفاده کردند.

به‌طور کلی PMC‌ها تا سال ۱۹۶۰ استفاده می‌شدند و از سال ۱۹۶۰، کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی برای کاربردهای مختلف استفاده شدند.

چرا کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی دیرتر از سایر کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفتند:

(الف) فاز دومی که بتواند دما را تحمل کند، در آن زمان وجود نداشت و یا از لحاظ اقتصادی فراهم نبود.

وقتی الیاف گرافیت، آلومینا، بور، ویسکرها، Sic و... با قیمت مناسب فراهم شدند باعث شدند که کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی پیشرفتشان آغاز شوند.

(ب) دلیل دوم این است که فلزات به خودی خود، مواد برتر مهندسی هستند. فلزات استحکام را به روش‌های مختلف از جمله آلیاژسازی، پیرسختی، کارسختی و... می‌توانند افزایش دهند. ولی پلیمر خیلی ضعیف است و مجبور بودند با فاز دوم پلیمرها را تقویت کنند.

(ج) دلیل سوم این است که متالورژیست‌ها تنبل‌تر از پلیمریست‌ها بودند.

(سه دلیل که در بالا ذکر شد، سه دلیلی است که کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی دیرتر از کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری شروع به استفاده کردند.)

انسان ۱۹۶۰، کامپوزیت‌های MMC مورد استفاده قرار گرفتند.

از سال ۱۹۸۰، CMC از سال ۱۹۸۰ کامپوزیت‌های زمینه‌ی سرامیکی شروع به استفاده کردند، برای جاهایی که دمای بالا مطرح است. (مثل: توربین‌ها و...)

از سال ۲۰۰۰: نانو کامپوزیت‌ها تکاملشان شروع شد و خیلی سریع پیشرفت کردند.

در بالا تاریخچه‌ای از کامپوزیت‌ها توضیح داده شد.

اما چرا از کامپوزیت‌ها با توجه به ویژگی‌هایی که دارند، از آن‌ها زیاد در مهندسی استفاده نمی‌شود:

۱- قیمت کامپوزیت بالا است.

۲- روش‌های تولید کامپوزیت پیچیده و هم روش‌های تولید آن‌ها محدود است.

۳- ترمیم کامپوزیت‌ها سخت است.

۴- ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها سخت است.

۵- اتصالشان مشکل است و جوشکاری‌شان نیز سخت است.

اما با وجود این همه معایب برای کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌ها دو برتری بسیار مهم دارند نسبت به سایر مواد:

الف) مجموعه‌ای از خواص را می‌دهند و یا به عبارتی مجموعه‌ای از خواص را دارا می‌باشند که در مواد سنتی چنین خواصی را نمی‌توان یافت. مثلاً: پلیمرها سبک‌اند - ارزان هستند - مقاومت شیمیایی‌شان خوب است.

اشکال پلیمرها: دمای بالا را نمی‌توانند تحمل کنند. / در مقابل اشعه و نور آفتاب مقاوم نیستند و...

فلزات: استحکامشان خوب است - خواص مکانیکی خوبی دارند - قابلیت جوشکاری، پرچ‌کاری، برشکاری و... دارند - روش تولید مشخص دارند.

عیب فلزات: عیب مهم فلزات سنگین بودن آن‌ها می‌باشد یا به عبارتی فلزات دانسیته‌شان (چگالی) بالا است.

سرامیک: مواد دیرگذاراند - دمای بالا را به خوبی تحمل می‌کنند - سبک هستند - سختی خوبی دارند و...

عیب سرامیک‌ها: ترد و شکننده می‌باشند.

کامپوزیت‌ها می‌توانند باعث بهبود خواص شوند.

به عنوان مثال اگر بخواهیم از لحاظ دانسیته بررسی کنیم: فلزات دانسیته بالایی دارند و سنگین هستند (اغلب فلزات سنگین می‌باشند).

پلیمرها و سرامیک‌ها سبک هستند. بنابراین می‌توان با ایجاد کامپوزیت به یک ماده سبک دست پیدا کرد و آن عیب سنگین بودن فلزات را دیگر نخواهند داشت.

از نظر سفتی: فلزات سفتی خوبی دارند (تنگستن، Ti و...). سرامیک‌ها نیز سختی خوبی دارند. پلیمرها مدول یانگشان پایین است و سفتی کمی دارند. کامپوزیت‌ها سفتی خوبی دارند.

از نظر استحکام: فلزات استحکام خوبی دارند. سرامیک‌ها استحکام نسبتاً خوبی دارند. استحکام پلیمرها کم است. (پلیمرها ضعیف هستند). کامپوزیت‌ها می‌توانند استحکام خوبی داشته باشند.

از نظر چقرمگی شکست: فلزات خیلی خوب هستند. سرامیک‌ها و پلیمرها شکست خوبی ندارند. اما کامپوزیت‌ها می‌توانند از نظر چقرمگی شکست خوب باشند.

بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که:

۱- کامپوزیت‌ها باعث بهبود خواص می‌شوند و خواص را بهبود می‌دهند. می‌توان با تلفیق این سه ماده (فلزات، سرامیک، پلیمر) به نحوی باعث بهبود خواص شویم با ساخت کامپوزیت.

۲. می‌توان طراحی کرد: می‌توان کامپوزیت را طراحی کرد. (با توجه به خواصی که مدنظر است برای آن ماده، می‌توان کامپوزیت را طراحی کرد.) فاز دوم که در کامپوزیت قرار می‌دهیم، می‌توان از لحاظ Construction تغییر کند. درصد فاز دوم، سایر فاز دوم، جهت فاز دوم، ساختار فاز دوم، جنس فاز دوم عواملی است که در فاز دوم می‌توان انتخاب کرد.

قابلیت طراحی زیادی در کامپوزیت‌ها مطرح است، اما در مواد فلزی قابلیت طراحی به آن شکل وجود ندارد. به عنوان مثال اگر Sic را به AL بنزیم، هرچه قدر که درصد Sic بیش تر شود در این صورت ضریب انبساط حرارتی کاهش می‌یابد. چون Sic سرامیک است. ضریب انبساط حرارتی آن  $\frac{1}{7}$  آلومینیوم است.

AL ضریب انبساط حرارتی‌اش ۲۴ است، اگر ۵۰ درصد Sic به آن (AL) بیافزاییم در این صورت ضریب انبساط حرارتی حدوداً ۱۰ می‌شود.

دانسیته برخی از مواد:

برنز: دانسیته‌اش حدوداً ۸ است.

چدن: دانسیته‌اش حدوداً ۷/۸ است. استحکام خوبی دارد.

فولاد: استحکام بهتری نسبت به چدن دارد.

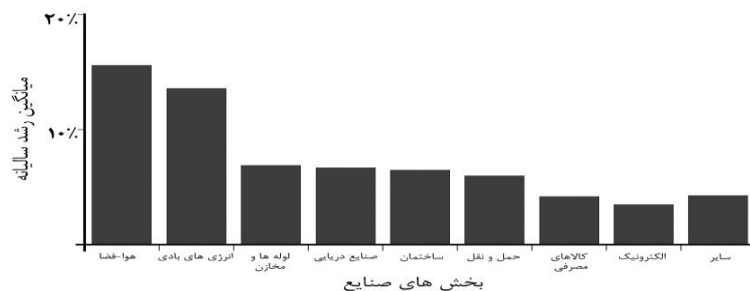
در سال ۱۹۰۰: AL

در سال ۲۰۰۰: کامپوزیت‌ها وارد شدند، با ورود کامپوزیت‌ها، استحکام بالا را به ارمغان آوردند که این عامل باعث یک تحول گردید. کامپوزیت‌ها علاوه بر استحکام، سبک نیز هستند.

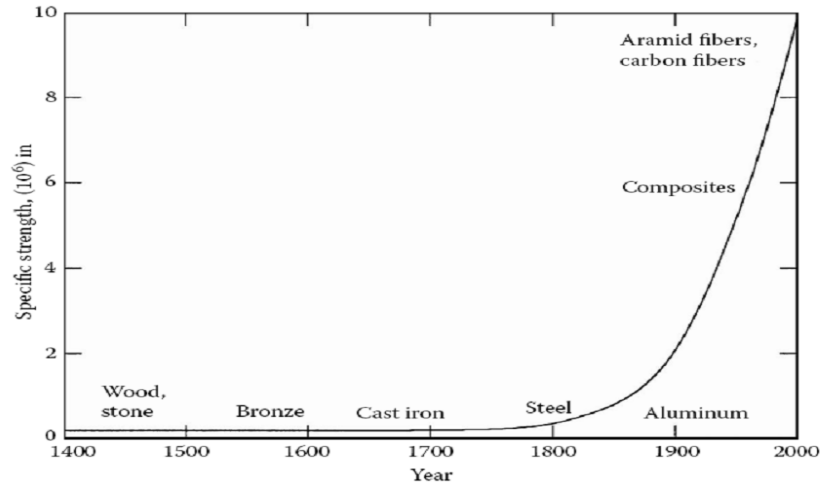
بشر قرون را براساس مواد تقسیم‌بندی کرده است. در حال حاضر سال ۲۰۰۰ به بعد را عصر کامپوزیت می‌گویند.

هر ماده‌ای که وارد صنعت می‌شود باید منحنی پیشرفت را طی کند. موادی مانند AL، فولاد و... تمام موارد مرتبط بهشان را بررسی کردند اما کامپوزیت یک موضوع جدید است و در حال رشد است.

اغلب مؤسسات تحقیقاتی در حال حاضر روی کامپوزیت‌ها کار می‌کنند. چون یک موضوع جدید است و بروز. بیش‌ترین تحقیقات در دنیا در حال حاضر در مهندسی مواد، کامپوزیت است.



پیش‌بینی رشد متوسط سالانه مواد کامپوزیتی در صنایع مختلف، طی سال‌های 2009 تا 2014 میلادی.



**FIGURE 1.1** Specific strength as a function of time of use of materials. (Source: Eager, T.W., Whither advanced materials? *Adv. Mater. Processes*, ASM International, June 1991, 25–29.)

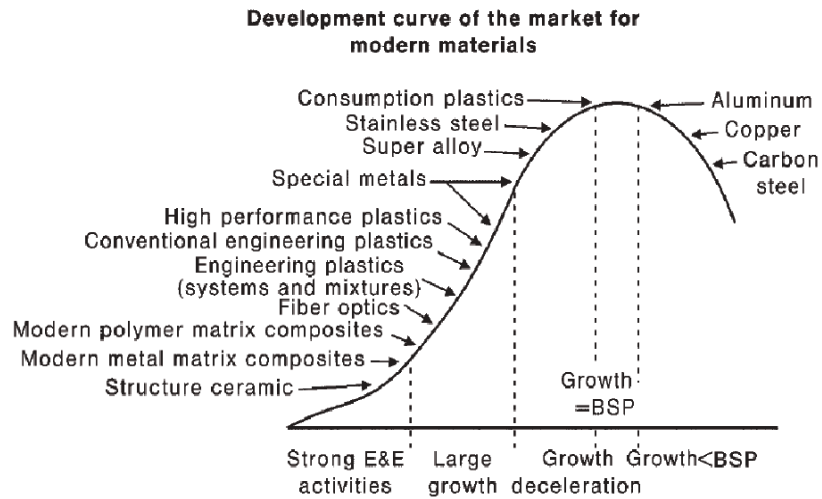


Fig. 1.2 Development curve of the market for modern materials [2].

جلسه دوم

مورخ: ۹۵/۰۷/۱۱

**کامپوزیت:**

کامپوزیت‌ها از دو قسمت تشکیل شده است:

زمینه (ماتریس)

فاز دوم (تقویت کننده)  $\Leftarrow$  فاز دوم یا تقویت کننده حائز اهمیت است که از آن‌ها اطلاعاتی داشته باشیم. یکی از اجزای کامپوزیت فاز تقویت کننده است بنابراین در این فصل با انواع فازهای تقویت کننده در کامپوزیت‌ها، روش‌های تولید آن‌ها و خواص آن‌ها بررسی می‌کنیم.

فاز تقویت کننده به شکل‌های مختلفی می‌توانند وجود داشته باشند:

۱- الیاف کوتاه

۲- ویسکر  $\Leftarrow$  تک کریستال است.

۳- ذرات

فاز تقویت کننده در بین ماتریس توزیع می‌شود و خواص را می‌دهند. درصد طولی شوندگی یا aspect ratio در این فاز مهم

است. نسبت طول به ضخامت (قطر)  $\frac{L}{D}$  را درصد طولی شوندگی می‌گویند.

$$\frac{L}{D} = \text{درصد طولی شوندگی (درصد رعنائی)}$$

هرچه قدر درصد طولی شوندگی بیش تر شود، مناسب ترست و مطلوب تر است.

$\frac{L}{D}$  برای ویسکوها ممکن است ۱۰۰۰ یا ۱۰/۰۰۰ یا ۱۰۰/۰۰۰ باشد و برای ذرات هم‌محور این نسبت برابر با یک است.

آن چیزی که در فاز تقویت‌کننده مهم است مخصوصاً فاز تقویت‌کننده سرامیکی که در فلزات و سرامیک‌ها قرار می‌گیرند، این است که باید استحکام بالایی داشته باشد، مدول الاستیسیته بالایی داشته باشد، قابلیت تحمل دمایی بالایی را داشته باشد و البته آن‌هایی که فاز دومشان پیوسته است مثل الیاف گران‌تر هستند نسبت به آن‌هایی که فاز دومشان ناپیوسته است. در جدول زیر نمونه‌ای از انواع تقویت‌کننده‌ها را نمایش داده است.

Table 3.1 Some important ceramic reinforcements

Particle	SiC, TiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Discontinuous Fibers</b>	
(a) Whiskers	SiC, TiB <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
(b) Short fibers	Glass, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiC, (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiO <sub>2</sub> ), vapor-grown carbon fibers
<b>Continuous fibers</b>	
Oxide	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiO <sub>2</sub> ), ZrO <sub>2</sub> , silica-based glasses
Nonoxide	B, C, SiC, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , BN

یک‌سری از تعاریف که در فاز دوم مطرح است از صنعت پارچه‌سازی قرض گرفته شده است. (فاز دوم خیلی شبیه صنعت نساجی است.)

### لیف / فایبر:

یک ماده‌ی طویل شده است که قطرش کم و بیش منظم و یکنواخت است. ضخامتش از ۲۵۰ میکرومتر کم‌تر است و نسبت ابعادی  $\frac{L}{D}$  بیش از ۱۰۰ است. (Fiber)

### رشته پیوسته / فیلامان:

یک لیف پیوسته است و نسبت  $\frac{L}{D}$  آن بی‌نهایت است. (Filament)

## مونوفیلان / تک‌رشته:

یک لیفی است که اندازه قطر آن بیش از ۱۰۰ میکرومتر است. (monofilament)

## روبان:

لیفی است که سطح مقطع آن مستطیل است و نسبت طول به عرض آن بیش از ۴ است، (عرض به ضخامت آن بیش از ۴ است.) (Ribbon)

## ذره:

شکل آن کم و بیش هم‌محور است و نسبت طول به قطر آن یک است. (particle)

## پولک:

ذره‌ای است که صفحه‌ای شکل است.

## الیاف کوتاه:

الیاف بریده شده هستند که در حقیقت طول آنها تنها ۱۰۰ میلی‌متر متغیر است. (Short Fibers)

## طناب:

هسته‌ای از الیاف پیوسته را طناب می‌گویند. (Tow)

## سیم:

فیلامانی است که جنس آن از فلز است. (wire)

## ویسکر:



لیف ظریف و کوچکی است که ضخامت آن چند میلی‌متر است و طول آن چند میکرومتر است که مهم‌ترین خاصیت ویسکرها این است که تک کریستال‌اند و خواص مکانیکی خوبی دارند. (whisker)

## نخ تابیده‌شده:

دسته‌ای از الیاف هستند که تابیده شده‌اند و این الیاف در جهت پاد ساعتگرد یا ساعتگرد هستند. اگر خلاف جهت عقربه‌های ساعت باشند به آن‌ها  $Z_{Twiss}$  می‌گویند و اگر در جهت عقربه‌های ساعت باشند به آن‌ها  $S_{Twiss}$  می‌گویند. (yarn)

به‌طور کلی از فاز دوم در کامپوزیت‌ها چه انتظاری داریم: (از الیاف چه انتظاری داریم)

۱- دانسیته کم باشد، به‌خاطر این که هدف این است کامپوزیت سبک باشد. مهم‌ترین هدف ما از کامپوزیت سبکی است. بنابراین هدف ما این است که فاز دوم دانسیته‌ی کمی داشته باشد.

۲- تطابق مکانیکی یا سازگاری مکانیکی داشته باشند.

تطابق مکانیکی: اگر ضریب انبساط حرارتی فاز دوم و ماتریس در کامپوزیت برابر باشد، خوب نیست و مطلوب نمی‌باشد. بنابراین اگر ضریب انبساط حرارتی فاز دوم و ماتریس به هم نزدیک باشند و عین هم باشند، مناسب نیست.

اگر فرض شود که  $AL$  و  $Sic$  داشته باشیم:

ضریب انبساط حرارتی  $AL$ ،  $\gamma$  برابر ضریب انبساط حرارتی  $Sic$  است.

بنابراین وقتی از دمای فرآیند (هر نوع فرآیندی مثل ریخته‌گری، سینتر و...) به دمای محیط برویم، آلومینیوم  $\gamma$  برابر نسبت به  $Sic$  جمع می‌شود.

بنابراین در فصل مشترک آن‌ها تنش پسماند جمع می‌شود و این تنش‌های پسماند باعث افزایش چگالی جابه‌جایی می‌شود و خواص مکانیکی را تغییر می‌دهد.

بنابراین یکی از مکانیزم‌های مقاوم شدن کامپوزیت‌ها، همین افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها است که به‌خاطر اختلاف ضریب انبساط حرارتی است.

اگر تطابق هم خیلی زیاد باشد، سبب ایجاد ترک می‌شود در فصل مشترک، که این مطلوب نیست.

منظور از تطابق مکانیکی این است که ضریب انبساط حرارتی فاز دوم و ماتریس تفاوت داشته باشد، اما تفاوت آن‌ها معقول و کنترل شده باشد. (درصد کنترل شده باشد) عامل بعدی که خیلی مهم است تطابق شیمیایی است.

۳- تطابق شیمیایی یا سازگاری شیمیایی:

اگر فاز دوم با ماتریس اصلاً واکنش شیمیایی ندهند، مطلوب نیست. اتصال فاز دوم به ماتریس دو نوع است:

الف) شیمیایی ب) مکانیکی

پیوند باید بین فاز دوم و ماتریس برقرار باشد تا کامپوزیت خواص مکانیکی خوبی داشته باشد و اتصال بین آن‌ها برقرار باشد. همان‌طور که گفته شد اتصال بین فاز دوم و ماتریس دو نوع می‌باشد: مکانیکی و شیمیایی.

پیوند مکانیکی یک پیوند ضعیف است که دو نوع است:

الف) اصطکاکی

ب) قفل‌شوندگی

- پیوند اصطکاکی: فرض کنید وقتی لیف در ماتریس قرار می‌گیرد، این لیف یک ریزی دارد و ناصافی دارد. (برجستگی دارد).  
 $\Leftarrow$  این ماتریس در بین این فرورفتگی‌های لیف قرار می‌گیرد و یک مقدار اتصال برقرار می‌شود.

- پیوند قفل‌شوندگی: ضریب انبساط حرارتی این دو (ماتریس و تقویت‌کننده) متفاوت است، وقتی ماتریس زیاد جمع می‌شود، در واقع فشار می‌آورد و قفل می‌کند.

ولی در هر صورت پیوند مکانیکی از هر نوعی که باشد چه اصطکاکی و چه قفل‌شوندگی، پیوند ضعیفی است.

پیوند باید پیوند شیمیایی باشد که پیوند محکمی باشد و از طریق اندرکنش بین ماتریس و فاز دوم رخ دهد. فرق اندرکنش با واکنش:

لزوماً محصول واکنش نیست.  $\Rightarrow$  اندرکنش interaction

محصول واکنش داریم و واکنش جزیی از اندرکنش است.  $\Rightarrow$  واکنش reaction

واکنش چیزی است که از واکنش شیمیایی در ذهن به دست می‌آید، در واکنش، محصول واکنش داریم.

محصول واکنش  $A+B \rightarrow C$

در اندرکنش interaction لزوماً محصول واکنش نداریم، مثل نفوذ.  $\Leftarrow$  اتم‌های A در جسم B نفوذ می‌کنند یا کشش سطحی

...

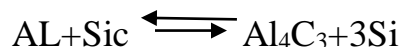
مفهوم اندرکنش یک مفهوم وسیع‌تری از واکنش است.

واکنش یک نوع اندرکنش است.

هر نوع ارتباطی وابستگی بین دو ماده را اندرکنش می‌گویند.

پیوند شیمیایی این دو اثر اندرکنش شیمیایی رخ می‌دهد.

یک مثال: فرض کنید SiC و Al داشته باشیم:



$Al_4C_3$ : کاربید آلومینیوم / ترد و شکننده

وقتی ذرات SiC داخل مذاب Al قرار بگیرد، واکنش بالا رخ می‌دهد که این واکنش یک واکنش رفت و برگشتی است. در

این حالت یک قشر  $Al_4C_3$  داخل آن می‌نشیند.

کاربید آلومینیوم، ترد و شکننده است.

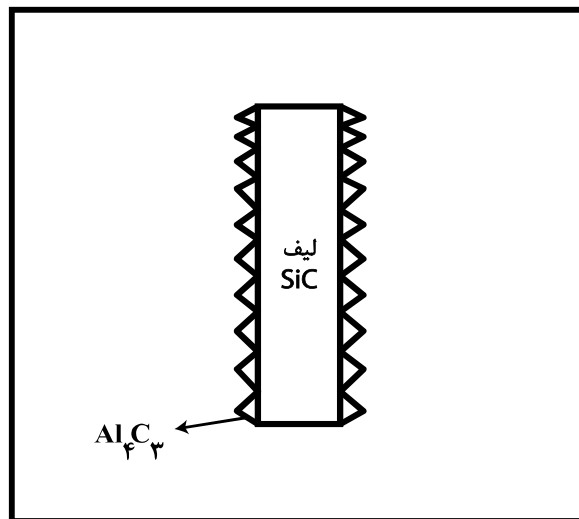
این باعث می‌شود که اتصال شیمیایی برقرار شود و این خوب است. اما اگر این واکنش بیش‌تر پیشرفت کند،  $Al_4C_3$  قشرش

بیش‌تر می‌شود (ناحیه‌ی RZ)، به عبارتی ضخامتش بیش‌تر خواهد شد.

## ناحیه‌ی RZ: Reaction Zone

$Al_4C_3$  یک کاربید AL است که ترد و شکننده است. اگر این ناحیه‌ی RZ ضخامتش زیاد شود، در همین جا ترک ایجاد می‌شود و خواص مکانیکی را به شدت ضعیف می‌کند.

در حقیقت به دنبال این هستیم که این لایه‌ی RZ تشکیل شود اما خیلی ضخیم نشود، که به این تطابق شیمیایی می‌گویند.



کامپوزیت Al-SiC

چگونه به این تطابق شیمیایی برسیم:

طبق اصل لوشاتلیه اگر از اول Si در AL داشته باشیم، اجازه نمی‌دهد که واکنش خیلی به سمت راست برود و متوقف می‌شود و زود به تعادل می‌رسد. در صورتی که اگر AL خالص داشته باشیم واکنش به سمت راست می‌رود و اجازه‌ی تشکیل  $Al_4C_3$  می‌دهد و میزان زیادی  $Al_4C_3$  تشکیل می‌شود.

با افزودن Si به AL می‌توان به این تطابق شیمیایی رسید.

در کامپوزیت Al-SiC، اغلب AL که مورد استفاده قرار می‌گیرد A356 است، که این آلیاژ حدوداً ۶-۷ درصد Si دارد و برای کامپوزیت‌سازی خیلی مناسب است. چون خودش Si دارد و اجازه نمی‌دهد واکنش خیلی به سمت راست برود. بنابراین می‌توان به تطابق شیمیایی برسیم یا اصلاح ترکیب آلیاژ.

۴- باید از لحاظ پایداری حرارتی نیز فاز دوم خوب باشد و در دمای بالا خواصش را از دست ندهد.

۵- مدول یانگ بالایی داشته باشند.

۶- استحکام فشاری و کشش خوبی داشته باشد. (بالا)

۷- بتوان با فاز دوم کار کرد به عبارتی کارپذیر باشند.

۸- و بالاخره فاز دوم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد و نباید خیلی گران قیمت باشد.

### الیاف پیوسته:

#### Continous Fibers

الیاف پیوسته مواد خیلی مناسبی برای کامپوزیت‌سازی هستند که استحکام و مدول یانگ بالایی دارند.

قابلیت تحمل دمایی بالا دارند. تحت تأثیر عوامل محیطی صدمه نمی‌بینند.

الیاف پیوسته به‌عنوان فاز دوم کامپوزیت بسیار مناسب هستند.

الیاف پیوسته دو خاصیت عمده دارند: انعطاف‌پذیری زیادی دارند و استحکام آن‌ها نیز زیاد است.

#### انعطاف‌پذیری Flexibility

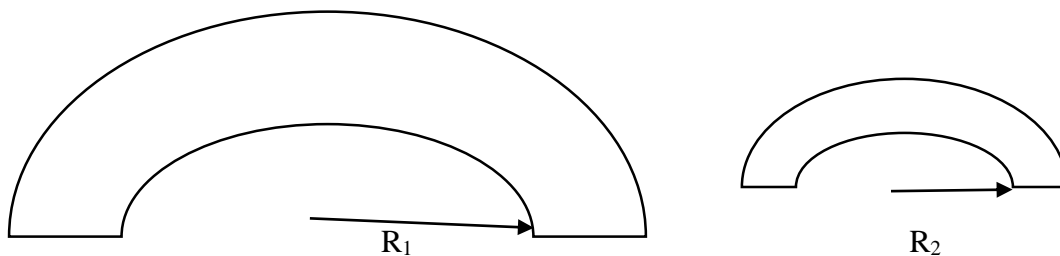
یکی خاصیت مهم الیاف پیوسته انعطاف‌پذیری آن‌ها است که از فرمول  $\frac{1}{MR} = \frac{64}{Ed^4}$  برای به‌دست آوردن انعطاف‌پذیری

استفاده می‌کنند.

در این رابطه M ممان پیچش است.

R شعاع خمش است.

فرض کنید یک لیف داریم یک ممان پیچش به آن وارد کردیم:



$R_2$  انعطاف‌پذیری‌اش بیشتر است.

هرچه  $R$  کم‌تر شود، انعطاف‌پذیری بیشتر می‌شود.



کم  $M$



زیاد  $M$

لیفی که  $M$  کم‌تری دارد، انعطاف‌پذیری بیشتری دارد.

هرچه قدر که  $M$  (ممان) کم‌تر شود، در این صورت انعطاف‌پذیری بیشتر می‌شود.

$E$ : مدول یانگ

هرچه قدر مدول یانگ کم‌تر باشد در این صورت انعطاف‌پذیری بیشتر می‌شود، اما چون ما دوست نداریم مدول یانگ کم شود بلکه ما تمایل داریم که مدول یانگ بالا باشد، بنابراین اگر بخواهیم انعطاف‌پذیری زیاد شود سعی می‌کنیم که به  $E$  کاری نداشته باشیم و روی  $d$  کار کنیم.

قطر لیف هرچه کم‌تر باشد به توان چهارم، انعطاف‌پذیری بیشتر می‌شود.

یعنی اگر یک لیف داشته باشیم که قطرش ۱۰۰ میکرون باشد و یک لیف دیگر داشته باشیم که قطرش ۱۰ میکرون باشد، انعطاف‌پذیری حالت دوم ۱۰/۰۰۰ برابر حالت اول است.

با کاهش  $d$ ، انعطاف‌پذیری افزایش می‌یابد. (کاهش قطر لیف)

## گرافیت:

الیاف همواره از بالک استحکامشان بیش تر است. مثلاً الیاف گرانیست استحکامش از بانک گرانیست بیش تر است. چرا:

(۱) یکی به خاطر نظم مولکولی اتم‌ها است. در الیاف، از این جهت الیاف استحکام بهتری و بیش تری نسبت به توده یا بالکشان دارند.

(۲) ترک‌ها و نواقص در الیاف‌ها کم تر می شود. به عنوان مثال الیاف شیشه از خود شیشه نواقصشان کم تر است.

به عنوان مثال در فلزات، برای تهیه ی فلزات از فرآیند سیم کشی استفاده می کنیم.  $\Leftarrow$  کار سختی رخ می دهد.  $\Leftarrow$  در این صورت Strain hardening رخ می دهد.

### strain hardening (۳)

سرامیک‌ها قابلیت آزادسازی تمرکز تنش را ندارند. یعنی اگر یک ترک در سرامیک ایجاد شود، تمرکز تنش در ترک وجود دارد و نمی تواند این تمرکز تنش را آزاد کند، بنابراین سریعاً این ترک رشد می کند و قطعه دو نصف می شود.

اگر فلز باشد، وقتی ترک داخل فلز ایجاد می شود، در نوک ترک تغییر شکل پلاستیک می دهد.  $\Leftarrow$  انرژی جذب می شود و تنش از بین می رود.  $\Leftarrow$  بنابراین ترک دیگر رشد نخواهد کرد. فلزات تر نیستند.

فلزات حساس به ترک نیستند.

اما سرامیک‌ها به ترک حساس هستند چون قابلیت آزادسازی تمرکز تنش را ندارند.

پس چرا الیاف شیشه این مشکل را ندارند:

(توده شیشه یا سرامیک)

هرچه قدر که قطر لیف بیش تر شود: استحکام کم تر می شود.

هرچه قدر که قطر لیف کم تر شود: استحکام افزایش می یابد.

بنابراین هرچه قدر قطر لیف کم‌تر باشد، هم استحکام بیش‌تر است و هم انعطاف‌پذیری بالاتر است.

یکی از معایب الیاف پیوسته، آن ایزوتروپ هستند یعنی وقتی در کامپوزیت قرار می‌گیرند، وقتی کامپوزیت را در جهت الیاف بکشیم، استحکامش خیلی زیاد است.

اما اگر یک زاویه‌ی ۳۰ درجه بدهیم بین الیاف و آن نیرویی که الیاف را می‌خواهیم بکشیم و حتی اگر ۴۵° یا ۶۰° یا در زاویه‌ی ۹۰° بکشیم: استحکام خیلی ضعیف می‌شود و در حالت عمود ضعیف‌ترین استحکام را دارد.

عیب اول آن ایزوتروپ بودن الیاف پیوسته است.

چگونه می‌توان این عیب را برطرف کرد: دو راه برای برطرف کردن عیب وجود دارد:

(۱) کامپوزیت سه‌بعدی بسازیم: الیاف را در سه جهت در فضا مرتب می‌کنیم.

نیرو در هر جهتی وارد شود  $(x,y,z)$  ← یک‌سری الیاف داریم که در جهت آن نیرو است. ← بنابراین کامپوزیت از نظر استحکام ضعیف نخواهد شد.

(۲) الیاف را در جهت‌های مختلفی قرار می‌دهیم:

بنابراین در هر جهتی نیرو وارد شود، کامپوزیت تحمل می‌کند، در این حالت خواص شبه‌ایزوتروپ خواهند داشت.

در بحث کامپوزیت‌ها، الیاف بسیار مهم است.

اگر ۴/۱۶ گرم از الیاف نازک داشته باشیم در این صورت می‌توان فاصله‌ی بین کره‌ی زمین و ماده را به هم وصل کنیم. ← طول الیاف خیلی زیاد است.

تولید و مصرف الیاف‌ها زیاد است. به‌خاطر ویژگی‌هایی که دارند، رشد مصرف دارند. بیش‌تر در صنایع ترافیک و حمل و نقل، صنایع خانگی، مهندسی ساختمان، مکانیک، صنایع دارویی، محیط‌زیست و... کاربرد دارند.

بیش‌ترین مصرف الیاف در صنایع ترافیک، متریال (مهندسی مواد) و مصارف داخلی خانه است.



در صنعت هوا و فضا؛ برای کامپوزیت‌های پیشرفته از این الیاف‌ها استفاده می‌کنند.  
در صنعت پزشکی؛ در قسمت اعضای مصنوعی مثل استخوان مصنوعی و... کاربرد دارند.  
در صنعت ورزش و صنعت الکترونیک نیز کاربرد دارند.

## Types of fibers:

الیاف به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف) مصنوعی: اکریلیک، پلی‌استر، Rayon، Nylon، Acetate و... .

ب) طبیعی: سلول‌های گیاهان / حیوانات / ابریشم / پنبه / پشم و... .

کامپوزیت‌های سبز green composite یکی از الیاف طبیعی هستند که برای ساخت کامپوزیت‌های سبز از الیاف طبیعی استفاده می‌کنند.

الیاف طبیعی می‌توانند از سلول‌های گیاهان باشند، یا از حیوانات باشند و یا معدنی باشند.

بنابراین الیاف طبیعی سه منشأ دارند:

الف) گیاهی

ب) جانوری

ج) معدنی

الیاف سلونو ← گیاهی ← بسیار قوی و انعطاف‌پذیر است و جاذب رطوبت هستند.

الیاف پروتئین ← منشأ حیوانی دارند ← معمولاً از پشم حیوانات هستند. از پشم گوسفند، بز، خرگوش، شتر و... .

ابریشم ← الیاف طبیعی است. بسیار سبک است.

آزبست ← الیاف طبیعی است که به‌عنوان مواد ضدآتش از آن‌ها استفاده می‌شد که البته الآن از آزبست دیگر استفاده نمی‌کنند، چون جذب بدن انسان می‌شوند و برای سلامتی ضرر دارند.

الیاف پشم سنگ ← طبیعی هستند و منشأ معدنی دارند.

الیاف شیشه یا ← Fiber glass طبیعی هستند و منشأ معدنی دارند.

الیاف مصنوعی از نفت، زغال، گاز طبیعی و معمولاً در صنایع پتروشیمی الیاف مصنوعی تولید می‌شوند، مثل: نایلون، پلی‌استر، اکریلیک و ... .

و حتی از هسته‌ی گیاهان مانند پنبه و نیز نارگیل الیاف طبیعی درست می‌کنند.

الیاف پنبه نسبت به الیاف شیشه خیلی قوی نیستند، اما وقتی  $\frac{E}{P}$  را حساب می‌کنیم در این حالت الیاف شیشه  $\frac{E}{P}$  کم‌تری از الیاف پنبه خواهند داشت.

اولین الیافی که در رابطه آن توضیح می‌دهیم مربوط به الیاف شیشه است.

### شیشه:

شیشه ماده‌ای است که در اوایل قرن ۱۷ وارد بازار شده است و کشف شده است. اما در قرن ۲۰ به شدت استفاده از الیاف شیشه توسعه یافته است.

کامپوزیت‌هایی که با الیاف شیشه تقویت شده بودند به شدت جایگزین کامپوزیت‌هایی بودند که با الیاف فلزات تقویت شده بودند.

برای مصارف صنعتی، نظامی و... کاربرد داشتند.

شیشه تنوع زیادی دارد.

شیشه‌ای که برای صنعت ساختمانی، درب و پنجره، بطری و... استفاده می‌شود دارای  $50\% \text{SiO}_2$ ،  $14\% \text{Na}_2\text{O}$  و  $2/5\% \text{MgO}$ ،  $10\% \text{CaO}$  و  $0/6\% \text{Al}_2\text{O}_3$  می‌باشد.

ضریب انبساط حرارتی بسیار بالایی دارند و Thermal Conductivity آن کم است.

شیشه پیرکس را روی گاز قرار می‌دهیم نمی‌شکند اما یک بطری معمولی یا یک شیشه‌ی معمولی روی گاز، فوراً می‌شکند، دلیلش این است که ضریب انبساط حرارتی آن بالاست و ضریب انتقال حرارت آن کم است  $\Leftarrow$  بنابراین سریع شیشه‌ی معمولی هنگامی که روی گاز قرار می‌گیرد، می‌شکند.

مقاومت به شوک حرارتی آن کم است. بنابراین شیشه بسیار ترد است، معمولاً در حدود  $700^\circ\text{C}$  شیشه‌ی معمولی نرم می‌شود و می‌توان شکل‌دهی آن را انجام داد.  $\Leftarrow$  کاربرد صنعتی ندارند.

روی پیرکس  $\Leftarrow$  شیشه‌ی آمورف دیگر نیست و کریستال است.  $\Leftarrow$  بنابراین مقاومت به حرارت دارد.

یکی دیگر از انواع شیشه‌ها: شیشه بورسیلیکاتی است. که اکسید بور  $15/9\%$  در دو ترکیباتی مانند  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{Na}_2\text{O}$  و... دارد.

از شیشه‌ی معمولی خیلی قوی‌تر است.

اما نمی‌توان به راحتی از طریق کشش مذاب آن را تولید کرد.

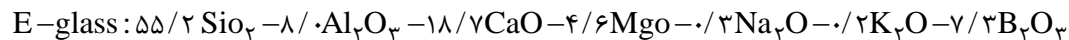
شیشه‌هایی که در کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند به شرح ذیل است:

## ●E-glass

### Electrical

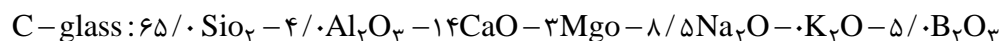
شیشه‌ی E-glass حاوی  $50-60\% \text{SiO}_2$  است و از نظر عایق الکتریکی بودن خیلی خوب است.

۹۰ درصد شیشه‌هایی که برای کامپوزیت‌سازی از آن‌ها استفاده می‌شوند از نوع E-glass هستند، چون تولید E-glass بیش‌تر است.



### ●C-glass

شیشه‌ی C-glass مقاومت به خوردگی خوبی دارند.



### ●S-glass

شیشه‌ی S-glass استحکام بالایی دارند.

S-glass: Strengh-glass

در زیر ترکیبات E-glass، C-glass و S-glass را در جدول مشاهده می‌کنیم:

**Table 3.4** Approximate chemical compositions of some glass fibers (wt%)

Compound	E glass	C glass	S glass
SiO <sub>2</sub>	55.2	65.0	65.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.0	4.0	25.0
CaO	18.7	14.0	—
MgO	4.6	3.0	10.0
Na <sub>2</sub> O	0.3	8.5	0.3
K <sub>2</sub> O	0.2	—	—
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.3	5.0	—

برای کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری اغلب از E-glass استفاده می‌کنند.

تولید الیاف شیشه به صورت ذیل است:

شیشه خاصیت ویسکوالاستیسیته دارد، یعنی این که کرنش وابسته به زمان دارد.

اگر شیشه را بالای دمای Tg ببریم، هرچه قدر که دما را بالا ببریم و از دمای Tg بالاتر شد در این دما، شیشه نرم می‌شود و

خاصیت ویسکونیوتونی از خود نشان می‌دهد یعنی تنش اعمال شده متناسب با نرخ کرنش. (ویسکوزیته‌ی نیوتونی)

$$F/A = \sigma = \eta \varepsilon^{\circ} \quad (1)$$

خواصی که ویسکونیوتون‌ها دارند این است که وقتی تنش به آن اعمال می‌کنیم، متناسب است با نرخ کرنش.

اگر حجمی از شیشه را داشته باشیم و آن را بکشیم در این صورت طول آن افزایش می‌یابد و سطح مقطع آن کاهش می‌یابد که به صورت زیر خواهیم داشت: (توده‌ای از شیشه داریم)

$$dL/L = d\varepsilon = -dA/A \quad (2)$$

فرمول ۲ را بر  $dt$  تقسیم می‌کنیم:

$$\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt = -(dA/A)(1/dt) = -(dA/dt)(1/A) = \dot{A}^{\circ}/A \quad (3)$$

به جای  $\dot{\varepsilon}$  در ذیل رابطه‌ی ۳ را قرار می‌دهیم:

$$F/A = \eta \dot{A}^{\circ}/A \text{ or } F = \eta \dot{A}^{\circ} \quad (4)$$

$\dot{A}^{\circ}$ : نرخ کاهش سطح مقطع (به نیرو وابسته است، اما به تنش وابسته نیست).

اکنون به ویسکوزیته می‌رسیم:

$$\eta = (hN/V_m) \exp(Q/RT) = A \exp(Q/RT) \quad (5)$$

طبق رابطه‌ی ۵، هرچه قدر که دما ( $T$ ) افزایش یابد، در این صورت ویسکوزیته کاهش می‌یابد. این خیلی واضح است که وقتی

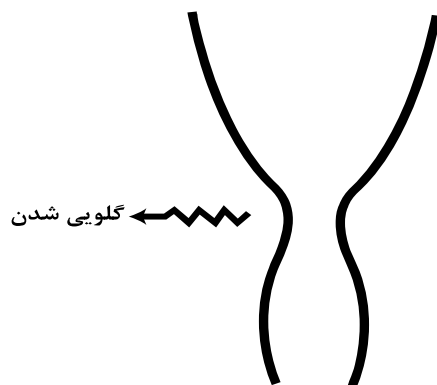
دما افزایش یابد، در آن صورت آن ماده روان‌تر می‌شود.

با افزایش  $T$ ،  $\eta$  کاهش می‌یابد. (ویسکوزیته کاهش می‌یابد).

فرض کنید که یک توده‌ی شیشه داریم و آن را می‌کشیم، اتفاقاً اگر گلوبی ایجاد شد و آن کشیدن را ادامه دهیم در آن سخت

گلوبی پاره شدن اتفاق رخ می‌دهد. (شیشه پاره می‌شود).

اما وقتی گلوبی رخ داد در آن قسمت گلوبی سطح کاهش می‌یابد و آن قسمت سرد می‌شود. وقتی  $T$  پایین آمد، طبق رابطه ۵، ویسکوزیته  $\eta$  بالا می‌رود و هنگامی که ویسکوزیته بالا می‌رود چون  $F$  ثابت است، نرخ کاهش سطح مقطع  $A$  کاهش می‌یابد و دیگر بیش‌تر از آن نازک نمی‌شود. به عبارتی دیگر وقتی گلوبی ایجاد شد طبق رابطه‌ی ۵ چون خاصیت ویسکوالاستیسیته دارد وقتی نازک شد دیگر بیش از آن نازک نمی‌شود. خودش با خودش مقابله می‌کند و نرخ نازک شدن آن کم می‌شود و بقیه به آن می‌رسند و گلوبی از بین می‌رود.



در جایی که گلوبی شدن رخ داده است:

$$T \downarrow \Rightarrow \eta \uparrow \Rightarrow A \downarrow$$

با توجه به مواردی که در بالا به آن اشاره شد نگرانی بابت کشیدن شیشه وجود ندارد. وقتی شیشه را ذوب کنیم و آن را بکشیم، می‌توانیم از آن لیف تولید کنیم.

شیشه در کوره قرار می‌گیرد و ذوب می‌شود و این مذاب روی یک صفحه‌ی سوراخ‌دار ریخته می‌شود که این صفحه ۱۰۰ الی ۱۰۰۰ها سوراخ دارد و جنس این صفحه‌ی سوراخ‌دار از جنس Platinum-rhodium است.

مذاب شیشه روی این صفحه جاری می‌شود و از سوراخ‌ها عبور می‌کنند و به شکل الیاف درمی‌آیند. بعد از آن کشیده می‌شوند و یک ماده‌ای به نام Size به آن‌ها اضافه می‌شود. (سرعتی که آن را می‌کشند ۱-۲ km/min است.)

Size به ماده‌ای گفته می‌شود که روی الیاف داده می‌شود که یک ماده‌ی پلیمری است و در حقیقت مقاومت به سایش را افزایش می‌دهد. نواقص سطحی آن را کاهش می‌دهد.  $\Leftarrow$  این Size را روی الیاف قرار می‌دهند و این Size در کامپوزیت‌سازی مشکلی را ایجاد نمی‌کند.

به این ترتیب الیاف تولید می‌شوند.

شیشه‌ی مذاب در دمای بالا، از حدود ۱۰۰ الی ۱۰۰۰ تا سوراخ عبور می‌کند و الیاف تولید می‌شوند. سرعت سرد شدن را بالا می‌بریم که کریستال تولید نشود چون سبب تمرکز تنش می‌شود و سبب ضعف در خواص شیشه خواهد شد.

بیش از ۱۵۰km می‌توان از یک شمش ۱۶mm قطر، الیاف تولید کرد.

قطر آن  $\frac{1}{4}$  موی انسان است، به این دلیل است که انعطاف‌پذیر است چون قطرش خیلی کم است.

الیاف شیشه که از صفحه عبور می‌کنند، خیلی سریع سرد می‌شوند و به راحتی می‌توان به آن دست زد.

وقتی گلوبی ایجاد شد، از پاره شدن جلوگیری می‌کند و به همین دلیل خاصیت رشتن دارد  $\Leftarrow$  به دلیل ویسکوزیته‌ای که شیشه دارد.

یکی دیگر از روش‌هایی که شیشه را تولید می‌کنند، روش Sol-gel است که این روش یک روش آزمایشگاهی است.

یک ماده‌ای به نام Sol این خاصیت را دارد که این Sol را از صفحه‌ی سوراخ‌دار عبور می‌دهند و به صورت لیف درمی‌آید و Sol تبدیل به Gel می‌شود که به مرور زمان و تحت یک دمایی، Sol تبدیل به gel می‌شود، و بعد آن را در کوره قرار می‌دهند و به سرامیک تبدیل می‌شود که به عبارتی مواد اضافی آن می‌سوزد و تبدیل به سرامیک می‌شود.

ترکیب اصلی شیشه می‌ماند و آن مواد اضافی که قرار است، خارج می‌شود که این روش یک روش آزمایشگاهی است.

- شیشه یک ماده‌ی آمورف هستند و کریستال نیست.

مدول یانگ خیلی بالا نیست.

خواص ایزوتروپیک دارند چون آمورف هستند (الیاف شیشه آمورف هستند).

الیاف شیشه برای تقویت پلیمرها به کار می‌روند.

قیمت الیاف خیلی ارزان است.

الیاف شیشه به صورت مختلف وجود دارد.

عیب الیاف شیشه این است که الیاف شیشه رطوبت بگیرند، سبب افزایش رشد ترک خواهد شد به عبارتی رطوبت برای الیاف شیشه مضر است. رطوبت را جذب می‌کند و باعث افزایش ترک خواهد شد.

یک اشکال دیگر در الیاف شیشه این است که اگر شیشه تحت باز قرار گیرد، خسته می‌شود. (خستگی استاتیکی)

دانسیته شیشه در حدود  $2/55$  است که چگالی خوبی دارد و استحکام کشش آن  $1750 \text{ Mpa}$  است که خیلی بالا است و به عبارتی استحکام بالایی دارد. (حتی نسبت به AL و فولاد نیز استحکام آن بالاست).

مدول یانگ آن  $70$  است که مدول یانگ آن پایین است و یک ضعف آن است.

ضریب انبساط حرارتی آن  $4/7 \times 10^{-6}$  است که تقریباً بالا است.

یک ضعف الیاف شیشه این است که مدول یانگ آن پایین است. الیاف شیشه به طور گسترده در تقویت پلاستیک‌های مورد استفاده قرار می‌گیرند، به عنوان تقویت کننده اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

خواص الیاف E-glass در جدول زیر مشاهده می‌شود:

خواص الیاف E-glass

چگالی ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	استحکام کشش (Mpa)	مدول یانگ (Gpa)	ضریب انبساط حرارتی ( $\text{k}^{-1}$ )
2/55	1750	70	$4/7 \times 10^{-6}$

یکی از عیب‌های الیاف شیشه این است که به نواقص سطحی بسیار حساس هستند، مثل مالش و رطوبت.



جلسه سوم

مورخ: ۹۵/۰۷/۲۵

## کوارتز:

### Quartz

کوارتز در حقیقت Si خالص است که درصد Si آن خیلی بالا است و خواص بهتری نسبت به الیاف شیشه دارد و به صورت

الیاف پیوسته با ۱۲۰ تا ۲۴۰ فیلامان تولید می‌شود که قطر آن‌ها ۹ میکرون است.

خواص مکانیکی کوارتز از شیشه بهتر است. به کوارتز، شیشه‌ی Q نیز گفته می‌شود.

به صورت الیاف بریده شده وجود دارد.

استحکام آن ۵۹۰۰ Mpa است.

در دمای بالاتر از شیشه می‌تواند کاربرد داشته باشند (تا دمای  $۱۰۵۰^{\circ}\text{C}$  نیز می‌توانند سرویس‌دهی داشته باشند) و تا دمای

$۱۶۵۰^{\circ}\text{C}$  نیز ذوب نمی‌شوند.

از لحاظ شیمیایی پایداری دارند چون ترکیبش ثابت است.

از لحاظ مغناطیسی، میدان مغناطیسی ایجاد نمی‌کنند.

قیمت آن بالاتر از الیاف شیشه E و S است.

در جدول زیر خواص فیزیکی کوارتز را نشان می‌دهد:

Table 2.4.1.7(a) Properties of quartz fiber.

Specific gravity	2.20
Density, lb/in <sup>3</sup>	0.0795
g/cm <sup>3</sup>	2.20
Tensile strength	
Monofilament, ksi	870
GPa	6.0
Roving, ASTM D2343 Impregnated	
Strand Test -	
Astroquartz II 9779, ksi	530.5
GPa	3.6
Modulus, Msi	10.0
GPa	72.0
Elongation, percent	
<u>Monofilament Tensile Strength x 100</u>	8.7
Modulus	
Thermal	
Coefficient of expansion	
10 <sup>-6</sup> in/in/°F	0.3
10 <sup>-6</sup> cm/cm/°C	0.54
Thermal conductivity	
Cal/sec/cm/°C	0.0033
Btu/hr/ft/°F	0.80
Btu/hr/sq ft/in/°F	9.5
Specific heat	
Joules/Kg/°C	7500
Btu/lb/°F	1.80
Electrical	
Dielectric constant, 10 GHz, 75°F (24°C)	3.78
Loss tangent, 10 GHz, 75°F (24°C)	0.0001

از لحاظ شیمیایی نیز پایدار است، فقط HF و H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> در دمای بالا روی آن اثر دارد، بنابراین خواص شیمیایی خوبی دارند.

اما الیاف شیشه به نواقص سطحی بسیار حساس هستند و اگر ترک روی سطحشان باشد، مشکل ساز است.

در جدول زیر، کوارتز با E-glass و S-glass مقایسه شده است که از نظر چگالی، استحکام، مدول یانگ، ضخامت و دما مورد

بررسی قرار گرفته است.

Material	Density (Mg m <sup>-3</sup> )	Strength (GPa)	Young's Modulus (GPa)	Diameter (μm)	Temperature (°C)
Chrysotile asbestos	2.5	5.5	160	10	500
E-glass	2.54	3.4	72	5-25	550
S-glass	2.48	4.8	85	5-15	650
Silica (Astroquartz)	2.2	3.45	69	9	1070

### بازالت:

بازالت (Basalt) یک شکل آتش‌نشانی است که این سنگ را ذوب می‌کنند و از آن شیشه می‌سازند که ترکیب بازالت بسیار شبیه الیاف شیشه است.

برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ به صورت تجاری الیاف بازالت تولید شده است که در ابتدا برای مباحث نظامی و هوا و فضا مورد استفاده قرار گرفتند.

و از سال ۱۹۹۵ به صورت گسترده‌ای برای مصارف غیرنظامی به کار برده شدند.

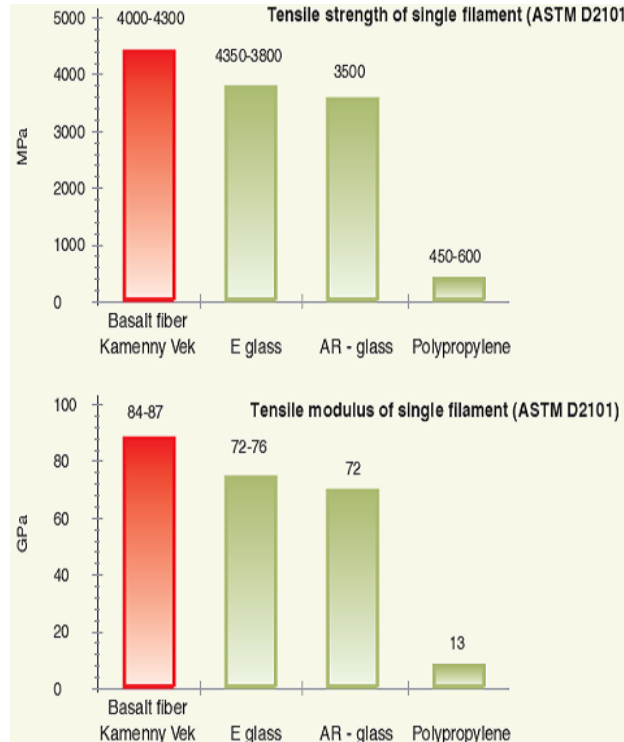
ترکیب شیمیایی الیاف بازالت:

Cr2O3	MnO	P2O5	K2O	TiO2	Na2O	CaO	MgO	Fe2O3	Al2O3	SiO2	Composition
0.06	0.16	0.28	0.82	1.16	3.34	8.04	3.82	10.3	17.2	58.7	Wt. %

بازالت مانند الیاف شیشه تولید می‌شود، به این صورت که ذوب می‌کنند و از یک صفحه‌ی سوراخ‌دار عبور می‌دهند. خواص بازالت از شیشه برنز است. ← خواص بهتر نسبت به شیشه.

خواص بازالت از شیشه بهتر است.

در شکل زیر شیشه با بازالت و با یکدیگر تقویت کننده‌ها مقایسه شده‌اند، همان‌طور که مشاهده می‌شود از لحاظ استحکام کشش و مدول‌یانگ، بازالت از شیشه خواص بهتری دارد.



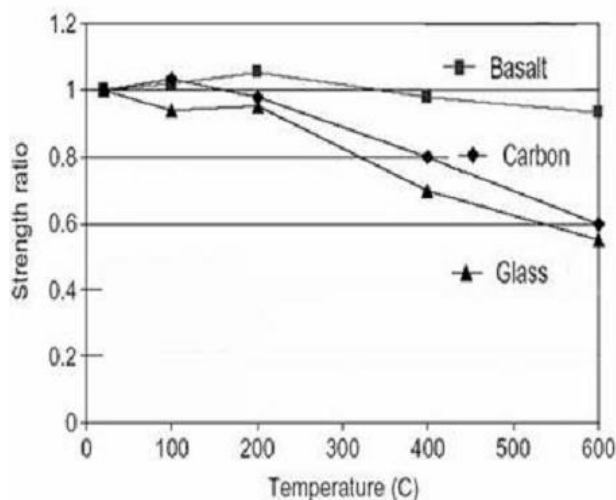
در جدول زیر خواص شیمیایی بازالت با E-glass و S-glass مقایسه شده است که مشاهده می‌شود که بازالت از E-glass و S-glass به لحاظ ساختاری بهتر است.

S-Glass	E-Glass	Basalt	Property
4710	3450	4840	UTS -Mpa
89	77	89	Elastic Modulus-GPa
5.6	4.7	3.15	Elongation %

از نظر فیزیکی نیز دانسیته بازالت (Basalt) بالاتر است از E-glass و S-glass و دمای کاری بازالت در حدود ۲۶۰- الی ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد است و max T نیز ۷۰۰°C است که در جدول زیر خواص فیزیکی بازالت با الیاف E-glass و کربن (C) مقایسه شده است.

Carbon	E Glass	Basalt	Property
1.8 g/cm <sup>3</sup>	2.5-2.6 g/cm <sup>3</sup>	2.8 g/cm <sup>3</sup>	Density
up to +400	-60 up to +460	-260 up to +560	Working Temperature
450°C	550°C	700 °C	Maximum Temperature

در شکل زیر استحکام برحسب دمای، برای بازالت، کربن و E-glass قابل مشاهده است که همان‌طور که مشاهده می‌شود بازالت تا دمای ۶۰۰°C نیز مقاوم است.



کاربرد الیاف Basalt:

سیلندرهای اکسیژن

سیلندرهای سایر گازها

کابل‌هایی که برای انتقال برق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کپسول‌های CNG

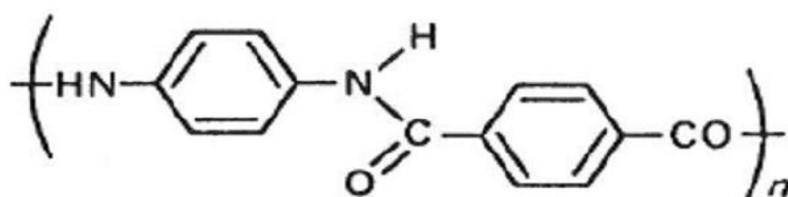
## کامپوزیت‌های PMC'S

برای تقویت بتن نیز از الیاف بازالت استفاده می‌کنند.

**Kevlar and its applications:**

الیاف کولار (الیاف آرامید): Aramid اسم علمی این الیاف است و اسم تجاری آن کولار است.

الیاف کولار: الیاف پلیمری است که فرمول آن به شکل زیر است:



**Poly para-phenyleneterephthalamide**

الیاف کولار کاربردهای زیادی دارند: برای تقویت پلاستیک‌ها، باستیک‌ها، برای مباحث نظامی کاربرد دارد، طناب، کابل،

جایگزین آزیست (درحال حاضر استفاده از آزیست ممنوع شده است و...)

Stephanic kwolek و همکارانش در سال ۱۹۶۴ این الیاف را فرموله کردند.

در سال ۱۹۶۵ روش تولید و تهیه‌ی این زنجیره‌های پلیمری مشخص شد.

در سال ۱۹۷۱ الیاف کولار تولید شدند.

ساختار الیاف کولار  $\Leftarrow$  ساختار مولکولی

نظمی که در کولار وجود دارد  $\Leftarrow$  نظم اتم‌ها در کولار کاملاً مشخص است و همین دلیل باعث شده است که به راحتی در

کامپوزیت‌ها استفاده شوند.

روش تهیه ی آن: یک محلولی را تهیه می کنیم از آن پلیمر، از صفحات سوراخدار عبور می دهند (رشته رشته می کنند) و الیاف کولار را تولید می کنند. (به صورت yard، الیاف بریده شده و...)

خواص کولار:

مدول الاستیسیته آن بالا است.

استحکام کشش بالا

دانسیته پایین

دانسیته ی الکتریسیته آن کم است  $\Leftarrow$  عایق الکتریکی و حرارتی است.

مقاومت شیمیایی آن خوب است.

Shrinkage آن کم است.

تافنس آن خیلی بالا است.

در مقابل برش خوردن مقاومت خوبی دارد.

خود آتش گیر نیست.

در مقابل شعله مقاوم است.

خواص کششی آن خوب است.

عیب الیاف کولار این است که خواص فشاری آن ضعیف است اما لازم به ذکر است که خواص کششی آن خوب است.

در جدول زیر الیاف کولار، با سیم فولادی و پلی استر در جدول مقایسه شده است: انعطاف پذیری بالا است، در مقابل ضربه خیلی خوب است.

Material	Break Elongation, %	Specific Tensile Strength, in.	Modulus, psi	Decomposition Temperature, °C
Kevlar	2.4-3.6	(8.15-8.37)E6	(10.2-16.3)E6	472-482
Steel Wire	2	1E6	29E6	1500
Polyester	14.5	3.36E6	2E6	256

در جدول ذیل انواع کولار مشخص شده است و با یکدیگر مقایسه شده است.

TABLE 2.4.1.2(b) Nominal properties of aramid fiber.

Tensile Property	Units	Type of Kevlar™		
		29	49	149
Modulus	Msi (GPa)	12 (83)	18 (124)	25 (173)
Strength	ksi (GPa)	525 (3.6)	525-600 (3.6-4.1)	500 (3.4)

خواص مهم الیاف آرامید به شرح ذیل است:

Low density

High tensile strength

High tensile stiffness

Low compressive properties (non linear)

Exceptional toughness characteristics

آرمید ذوب نمی‌شود اما در دمای ۵۰۰°C تجزیه می‌شود.

استحکام کشش آن وقتی الیاف تاب خورده باشد، بین ۳/۴ تا ۴/۱ گیگاپاسکال است.



کامپوزیت‌هایی که با کولار تقویت شده‌اند، خواص damping خوبی دارند.

در مقابل خرد شدن مقاومت می‌کنند، مقاومت به ضربه‌ی آن‌ها خیلی خوب است که به این جهت برای وسایل دفاعی مانند کلاه‌های سربازها، زره‌ها و... از آن‌ها استفاده می‌کنند چون مقاومت به ضربه و تافنس آن‌ها خیلی خوب است. کولار با اپوکس، رزین‌های ترموست و یا ترموپلاست می‌توانند کامپوزیت تشکیل دهند ← کامپوزیت تشکیل شده، داکتیل هستند.

اگر ۶۰ درصد الیاف کولار را در یک کامپوزیت به کار ببریم:  $3/000/000$  (سه میلیون) سیکل را می‌تواند در ۵۰٪ UTS تحمل کند.

مقاومت به خستگی آن خیلی خوب است.

کاربرد الیاف کولار: در قطعات هواپیما، صنعت هوا و فضا، صنایع نظامی، برای ساخت زره و... کاربرد دارد.

در مقابل UV مقاوم است. ← اگر اکسیژن نیز باشد سبب می‌شود که کولار در برابر کشیدن، decompose شود. اما در برابر رطوبت مشکلی ندارد.

که راه‌حل آن این است که کولار با یک ماده‌ای پوشش دهند که مقاوم باشد و یا اکسیژن وارد واکنش نشود.

در صنایع نظامی، برای محافظ‌های تانک، کلاه، زره و... کاربرد دارد.

برای جلیقه‌ی ضدگلوله کاربرد دارد.

برای کابل‌ها، کامپوزیت‌ها، Tiers، صنایع دریایی، صنایع هوافضا (فضایمایی که به فضا فرستادند، بالشتک آن از جنس کولار است)، Air craft، Maritime vessel و... کاربرد دارند.

ضدآتش نیز هستند و برای صنایع الکترونیک و صنایع ورزش نیز کاربرد دارند.

برای ساخت دستکش‌های آشپزخانه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

کولار مهم‌ترین الیاف پلیمری است.

## Composite fibers

### B and Sic:

#### Born با بور:

در جدول تناوبی عناصر وقتی می‌خواهیم فاز دوم را تعیین کنیم، به دنبال عناصری هستیم که دانسیته‌ی آن پایین است و سبک باشد، بور دانسیته‌ی پایین دارد.  $\Leftarrow$  اما کاملاً شکننده است.  $\Leftarrow$  اما مثل شیشه نیست که مثل شیشه ذوبش کنیم و از طریق رشتن، آن را تولید کنیم.

بنابراین برای تهیه‌ی الیاف بور از روش CVD استفاده می‌کنیم.

دانسیته‌ی بور پایین است.

خواص مکانیکی خوبی دارد.

Thermal Conductivity آن کم است.

ضریب انتقال حرارت و ضریب انبساط حرارتی آن کم است. (هدف ما این است که این دو عامل ضریب انتقال حرارت و ضریب انبساط حرارتی کم باشد) / این دو خاصیت در هر ماده‌ای کم باشد، خوب است.

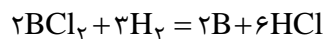
-چرا وقتی شیشه معمولی را می‌گذاریم روی اجاق گاز، می‌شکند:

ضریب انبساط حرارتی آن بالا است. در نتیجه‌ی لایه‌ی اول منبسط می‌شود و لایه‌ی زیر آن منبسط نمی‌شود. بنابراین ترک ایجاد می‌شود. مقاومت به شوک حرارتی آن پایین خواهد بود.

در الیاف بور مقاومت به شوک حرارتی آن بالا است، به دلیل این که ضریب انبساط حرارتی آن کم است و همچنین ضریب انتقال حرارت آن نیز کم است.

- الیاف بور به چه صورت تولید می‌شود:

یک سیم تنگستن با قطر خیلی کم وارد رکتور می‌شود، البته سیم از جنس الیاف کربن نیز می‌تواند باشد.  $\text{BCl}_3$  با  $\text{H}_2$  وارد رکتور می‌شود، بنابراین تجزیه می‌شود:



بور روی سیم تنگستن می‌نشیند، که این کار در دمای بالا، انجام می‌شود.

دو طرف سیم تنگستن را با جیوه آب‌بندی می‌کنند.

گاز  $\text{HCl}$  یک گاز گرانی است. گازهای خروجی از یک طرف وارد رکتور می‌شود و دوباره بعد از انجام واکنش از یک طرف راکتور خارج می‌شود، دوباره تصفیه می‌شوند و وارد رکتور می‌شوند.

از نظر قیمت این روش، روش خیلی گرانی است.

در شکل ذیل، شمای یک لیف بور نشان داده شده است که سطح آن شبیه دانه‌های بالا است.



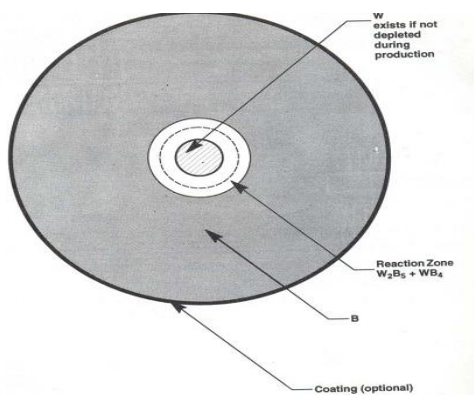
**Fig. 3.9** Surface of boron fiber on tungsten substrate showing a *corn-cob structure* consisting of nodules (courtesy of Philips Co.).

محصولات CVD (روش رسوب‌گذاری تبخیری شیمیایی)، اشکالش این است که: به خاطر که سیم تنگستن ورود آن می‌شود.

⇐ روی آن خراش‌هایی دارد. ⇐ همین خراش‌ها در این صورت مراکز جوانه‌زنی برای بور خواهد شد.

هم‌چنین روغن‌هایی که برای حدیده‌کاری سیم تنگستن به کار می‌رود، مقداری از آن روغن روی سیم تنگستن باقی می‌ماند و وقتی وارد رکتور می‌شود، آن روغن می‌سوزد. گرافیتی که در این جا تولید می‌شود ← محلی برای جوانه‌زنی خواهد شد. ← در این صورت به صورت دانه‌های بلال ایجاد می‌شود. معمولاً در این روش از سیم تنگستن استفاده می‌کنند.

اگر یک لیف بور از مقطع برش دهیم، مرکز آن سیم تنگستن است و دور آن بور است.



اما این الیاف بور، تنش‌های پسماند زیادی دارند که به ۵ دلیل، الیاف بور دارای تنش‌های پسماند زیادی است که آن ۵ دلیل به شرح ذیل است:

دلیل اول: تنش‌هایی که از رشد آن‌ها به وجود می‌آید.

دلیل دوم: یک سری محصولات به وجود می‌آید که با تنگستن واکنش می‌دهد و حجم این محصولات واکنش از حجم مواد اولیه‌شان بیش‌تر است. بنابراین وقتی این محصولات جانبی تشکیل می‌شوند، فشار می‌آورند. ← یک نوع تنش ایجاد می‌کنند.

دلیل سوم: به خاطر نفوذ بور به داخل تنگستن است. بور اتم‌هایش کوچک است و به داخل تنگستن نفوذ می‌کند.

دلیل چهارم: به خاطر تفاوت CTE آن‌ها است.

ضریب انبساط حرارتی تنگستن از بور، خیلی بیش تر است. وقتی از رکتور بیرون می‌آید، تنگستن می‌خواهد جمع شود و بور نمی‌خواهد جمع شود، در نتیجه تنش ایجاد می‌شود.

دلیل پنجم: به خاطر روش‌های فشاری است که در هنگام کوئنچ اتفاق می‌افتد.

وقتی سیم از داخل رکتور بیرون می‌آید، سطحش سرد می‌شود و انقباض ایجاد می‌کند چون سطح سرد است و مغزش هنوز سرد نشده است، بنابراین تنش ایجاد می‌شود.

به این ۵ دلیل است که اگر مقطع بور را نگاه کنیم، تنش‌های فشاری - کششی - فشاری را مشاهده می‌کنیم.

البته اگر از سیم گرافیتی استفاده کنیم در این صورت دیگر این مشکلات را نداریم. چون گرانیت و بور هردو غیرفلز هستند این مشکلات کم می‌شود اما بنابر دلایلی از آن استفاده نمی‌کنند و از سیم تنگستن در تولید الیاف بور استفاده می‌نمایند.

اگر یک لیف بور را مقطع بزنیم در این صورت این لیف به صورت شکل ذیل مشاهده می‌شود.

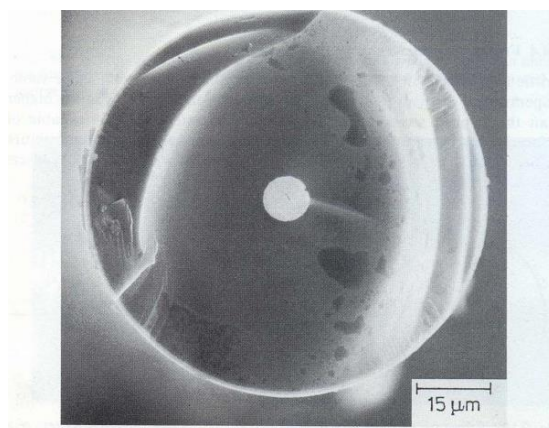


Fig. 3.11 Characteristic brittle fracture of a boron fiber and the radial crack.

مونوفیلیمان ← تک‌رشته ← الیاف بور تک‌رشته هستند و به عبارتی مونوفیلیمان می‌باشند.

گرافیت، شیشه مونوفیلیمان نیستند.

خواص بور در جدول زیر مشاهده می‌شود:

استحکام کشش آن ۳ تا ۴ گیگاپاسکال است.

الیاف بور استحکام کششی بالایی دارد.

مدول یانگ آن ۳۸۰-۴۰۰ گیگاپاسکال است.

مدول یانگ لیف بور، بالا است. (مدول یانگ شیشه ۷۰ است که ضعف شیشه همین پایین بودن مدول یانگ آن است).

در کامپوزیت‌ها بیش‌تر به مدول یانگ اهمیت می‌دهیم تا استحکام کشش، در کامپوزیت‌سازی تأکید داریم روی الیافی که مدول یانگ آن‌ها بالا باشد.

بعد در دمای متوسط کاربرد دارد.

می‌توان از آن کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی بسازیم.

در آلومینیوم و Mg، بور را می‌زنند و کامپوزیت می‌سازند.

**Table 3.6** Properties of some boron fibers [14]

Diameter Fracture ( $\mu\text{m}$ )	Treatment	Strength (average*) (GPa)	COV <sup>+</sup> (%)	Relative fracture energy
142	As-produced	3.8	10	1.0
406	As-produced	2.1	14	0.3
382	Chemical polish	4.6	4	1.4
382	Heat treatment plus polish	5.7	4	2.2

\*Gage length = 25 mm.

<sup>+</sup>Coefficient of variation = standard deviation/average value.

معایب بور:

یکی از معایب آن تنش‌های پسماند است.

ایجاد تخلخل بین فصل مشترک بور و تنگستن یکی دیگری از عیوب است که در اثر سرعت نفوذ مختلف B تنگستن این عیب به وجود می‌آید.

اثر کرکندال  $\Leftarrow$  بور به داخل تنگستن نفوذ می‌کند و تنگستن نمی‌تواند نفوذ کند بنابراین در فصل مشترک بور - تنگستن، یک تخلخل ایجاد می‌شود که یک عیب است.

عیب دیگر آن این است که قطر الیاف بور، یکنواخت نیست.

یک عیب دیگر آن این است که دانسیته‌ی تنگستن، بالا است حدوداً  $19/5$  است و دانسیته‌ی بور  $2/34$  است.

مغزه‌ی خیلی سنگین را وسط بور با دانسیته‌ی پایین قرار می‌دهیم که این مسئله خود باعث بروز عیب خواهد شد.

یک عیب دیگر آن این است که بور با اغلب فلزات وارد واکنش می‌شود. واکنش شیمیایی خوب است اما باید واکنش شیمیایی در هر کنترل شده باشد.

متأسفانه بور خیلی واکنش می‌دهد حتی با خودش نیز واکنش می‌دهد. اگر بعد داخل AL قرار دهیم، B با AL وارد واکنش شدید می‌شود که دوست نداریم به سرعت واکنش صورت گیرد. برای این که این عیب را برطرف کنیم: روی بور یک لایه‌ی Sic قرار می‌دهند که این Sic با فلزات و... در تماس خواهد بود و این Sic با فلزات و... کم‌تر وارد واکنش می‌شود، بنابراین تاحدی این عیب کاهش می‌یابد. که به این حالت که Sic بر روی B می‌نشیند، بورسیک می‌گویند.

یک عیب دیگر آن این است که سرعت تولید آن بسیار کم است  $(1-2 \frac{m}{min})$  و بسیار گران قیمت است. در صورتی که سرعت تولید شیشه  $1-2 \frac{km}{min}$  است.  $\Leftarrow$  سرعت تولید الیاف بور بسیار کم است.

خواص کامپوزیت بور نشان داده است که وقتی ۵۰ درصد الیاف بور به کامپوزیت اضافه می‌شود در این صورت مشاهده می‌شود که استحکام کششی آن  $207 \text{mpa}$ ، استحکام کشش آن  $1323$  خواهد شد.

## Silicon Carbide Fibers:

الیاف Sic مانند الیاف بور است.

Sic را نیز نمی‌توان از طریق رشتن تولید کرد، اما از ۱- روش CVD می‌توان Sic را تولید کرد و همچنین با ۲- روش پیرولیز کنترل شده‌ی پلیمر نیز Sic را می‌توان تولید کرد.

در چند قرن گذشته الیاف Sic تحولی را ایجاد کردند و در ساخت کامپوزیت‌ها به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. دمای بالا را می‌توانند تحمل کنند.

خواص مکانیکی خوبی دارند.

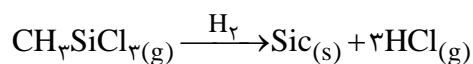
قطرش ۱۴۰ میکرون است.

استحکامشان بالا است.

دانسیتته‌شان بالا است که این دانسیته بالا مشکل‌ساز است.

روش تولید آن دقیقاً مثل الیاف B است که مغزه‌ی تنگستن وارد رکتور می‌شود اما به جای این که این را گرم کنند در این حالت سیم را به جریان برق وصل می‌کنند و داغ می‌شود و بعد گاز  $\text{CH}_3\text{SiCl}_3$  را وارد رکتور می‌کنند و این گاز در مجاورت H تجزیه می‌شود و به Sic و HCl تبدیل می‌شود.

خروجی گاز دوباره تصفیه می‌شود و دوباره از ورودی گاز وارد رکتور می‌شود.



به صورت یکنواخت الیاف به وجود آمده از روش CVD تولید نخواهد شد.  $\Leftarrow$  عیب روش CVD همین غیریکنواختی الیاف حاصل از آن است.

از جیوه برای آب‌بندی استفاده می‌کنند.

برای این که به مونوفیلامان بر سیم باید ۲۰ ثانیه در راکتور باقی بماند که بنابراین زمان زیادی لازم نیست.

در شکل ذیل تصویر SEM، مقطع Sic را مشاهده می‌کنیم: دانه‌دانه است و مثل دانه‌های بلال.



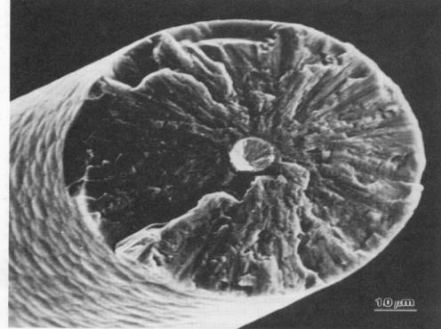


Fig. 3.36 Fracture surface of *sigma* CVD SiC fiber showing brittle fracture (courtesy of BP).

مغزه‌ی تنگستن تا آخر در این الیاف باقی می‌ماند.

-خواص الیاف SiC به روش CVD به صورت زیر است:

قطر آن ۱۴۰ میکرون است.

دانسیته  $3/3 \text{ g/cm}^{-3}$  است.

استحکام کشش  $3500 \text{ Mpa}$  است.

مدول یانگ  $430 \text{ Gpa}$  است که مدول یانگ SiC بالا است.

- خواص مکانیکی SiC در جدول زیر نشان داده شده است:

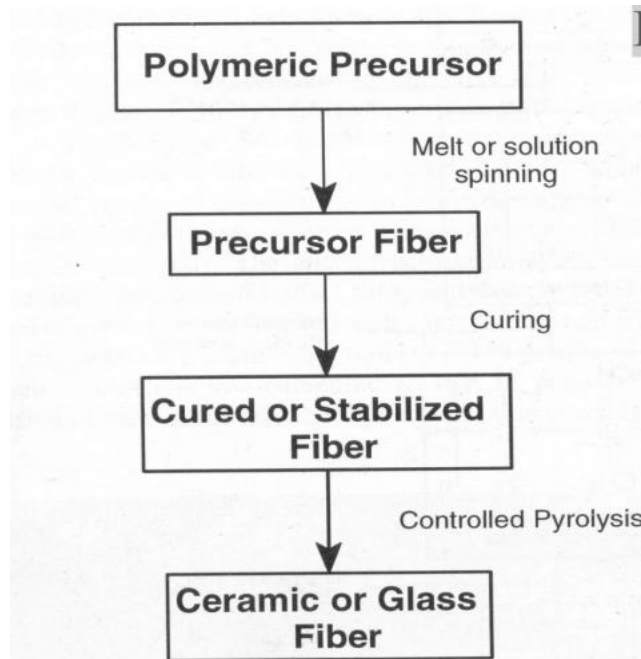
TABLE 2.4.1.6(a) Material properties of silicon carbide materials.

Property	Reported Values		Reference Information
	(ksi)	(MPa)	
FLEXURAL STRENGTH	100-1000	700-7000	single crystal, 99+% purity (1)
	10-60	70-400	polycrystalline materials, 78-99% purity, with < 12+% free silicon, sintered (1)
	5-8	30-60	sintered SiC - graphite composites - epoxy, imide, polyimide matrix. (2)
COMPRESSIVE STRENGTH	500-1000	3000-7000	single crystal, 99+% purity (1)
	10-25	70-170	polycrystalline materials, 78-99% purity, with < 12+% free silicon, sintered.(2)
	14-60	97-400	Sintered SiC - graphite composites - epoxy, imide, polyimide matrix. (2)
TENSILE STRENGTH	~20	~140	single crystal, 99+% purity (1)
	5-20	30-140	polycrystalline materials, 78-99% purity, with < 12+% free silicon, sintered.(2)
	2.5-25	17-170	sintered SiC - graphite composites - epoxy, imide, polyimide matrix. (2)
MODULUS OF ELASTICITY	~9.5	~66	single crystal, 99+% purity (1)
	~7.0	~48	Polycrystalline materials, 78-99% purity, with < 12+% free silicon, sintered.(2)

الیاف‌هایی که مونوفیلان هستند، چون ضخیم هستند.  $\Leftarrow$  انعطاف‌پذیری ندارند. بنابراین باید لیف نازک تولید کنیم. که برای تولید لیف نازک از روش پیرولیز پلیمری استفاده می‌کنیم.

این روش به این صورت است که از یک ماده‌ی پلیمری استفاده می‌کنند که این پلیمر ترکیب شیمیایی‌اش شامل C، Sic و... است.

از یک پلیمر به نام Nicalon استفاده می‌کنند که این پلیمر Nicalon را ذوب می‌کنند و از صفحات سوراخ‌دار عبور می‌دهند.  $\Leftarrow$  بعد Cure می‌کنند.  $\Leftarrow$  بعد پیرولیز می‌کنند (پیرولیز کنترل شده)  $\Leftarrow$  وقتی پیرولیز کنترل شده می‌کنند، مواد اضافی آن از بین می‌رود و Sic باقی می‌ماند.  $\Leftarrow$  بنابراین از یک پلیمر به Sic می‌رسیم.



اختراع sic مربوط به ژاپنی‌ها است.  $\Leftarrow$  دانسیته‌ی آن پایین است، استحکام این روش کمتر می‌شود و... که در این حالت خواص Sic در جدول زیر نشان داده شده است.

Table 18.1. Properties and compositions of silicon carbide-based fibres.

Fibre type	Manufacturer	Trade mark	Composition	Diameter (µm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Strength (GPa)	Strain to failure (%)	Young's modulus (GPa)
Si-C based fibres	Nippon Carbide	Nicalon NL-200	56.6 wt% Si 31.7 wt% C 11.7 wt% O	14	2.55	2.0	1.05	190
	Nippon Carbide	Hi-Nicalon	62.4 wt% Si 37.1 wt% C 0.5 wt% O	14	2.74	2.6	1.0	263
	Ube Industries	Tyranno LOX-M	54.0 wt% Si 31.6 wt% C 12.4 wt% O 2.0 wt% Ti	8.5	2.37	2.5	1.4	180
	Ube Industries	Tyranno LOX-E	54.8 wt% Si 37.5 wt% C 5.8 wt% O 1.9 wt% Ti	11	2.39	2.9	1.45	199
Near-stoichiometric SiC fibres	Nippon Carbon	Hi-Nicalon S	SiC + O + C	13	3.0	2.5	0.65	375
	Ube Industries	Tyranno SA	SiC + C + O + Al	10	3.0	2.5	0.75	330
	Dow Corning	Sylramic	SiC + TiB <sub>2</sub> + C + O	10	3.1	3.0	0.75	390

الیاف SiC در این حالت ضعیف‌تر از حالتی است که از روش CVD تولید کردیم. چرا الیاف SiC در این حالت از روش CVD ضعیف‌تر است:

در روش CVD به SiC خالص می‌رسیم.

Nicalon پلیمری است که ناخالصی دارد و همراه آن نیز مک است.  $\Leftarrow$  از یک پلیمر در این حالت به SiC می‌رسیم.

الیاف Nicalon، همان SiC پلیمر است یعنی SiC که از پلیمر به‌دست آمده است که خواص آن در جدول ذیل نشان داده شده است.

Table 3.15 Typical properties of Nicalon SiC fiber

	Ceramic grade	HVR* grade	LVR† grade
Density (g cm <sup>-3</sup> )	2.55	2.32	2.45–2.55
Tensile strength (MPa)	2960	2930	2960
Young's modulus (GPa)	192	186	192
Strain to failure	1.5	1.6	1.5
Coefficient of thermal expansion (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	4	—	—
Volume resistivity (Ω cm)	10 <sup>3</sup>	> 10 <sup>6</sup>	0.5–5.0

\*Low dielectric fiber (high volume resistivity).

†Higher conductivity fiber (low volume resistivity).

در ذیل چند نوع Sic نشان داده است، درصد O، تنش و ... .

Sic Fiber	C/Si Atomic Ratio	Oxygen Content (wt%)	Tensile Strength (GPa)	Tensile Modulus (GPa)	Elongation (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Diameter (μm)
Tyranno SA Gr.3	1.07	<0.5	2.6	400	0.6	3	7
Hi-Nicalon Type-S	1.05	0.2	2.6	420	0.6	3.1	11
Hi-Nicalon	1.39	0.5	2.8	270	1.0	2.74	14

به‌عنوان مثال: مثالی از خواص مکانیکی: اگر بخواهیم کرنش خزش (Creep Strain) را اندازه‌گیری کنیم، یک تنش اعمال می‌کنیم، در یک دمای بالا مثلاً ۱۳۰۰°C، ۲۰ ساعت نیز زمان می‌دهیم و مقدار کرنش آن را اندازه‌گیری می‌کنیم. ← هرچه قدر که این Creep Strain کم باشد در این صورت مقاومت خزش بالاتر است.

فرض کنید ۲۰۰Mpa نیرو داریم، در دمای ۱۳۰۰°C و مدت‌زمان ۲۰ ساعت، این لیف CVD ۵٪ کرنش کرده است و این لیف Nicalon، حدوداً ۱۵٪ کرنش کرده است. ← بنابراین چون درصد کرنش‌ها با هم تفاوت دارد، لیف CVD مقاومت خزش‌اش از لیف Nicalon بیش‌تر است.

یک‌سری دیگر از دسته الیاف‌ها، الیاف‌های اکسیدی هستند.

### الیاف اکسیدی:

عمدتاً در رابطه با آلومینا صحبت می‌کنیم. به شکل لیف و از روش‌های مختلفی این لیف آلومینا تشکیل می‌شود.

الیافی که بالاتر از ۹۹/۹ درصد  $Al_2O_3$  داشته باشند، خواص شیمیایی‌شان خیلی خوب است، مدول الاستیسیته‌ی خوبی دارند. مدول الاستیسیته‌ی آن‌ها ۳۸۰ گیگاپاسکال می‌تواند برسد، و استحکام آن‌ها ۴Gpa را نیز می‌تواند برسد.

آلومینا به‌خاطر این‌که نازک است، قطرش کم است به‌راحتی می‌توان با آن کار کرد.

آن را می‌توان در طراحی منظم قرار داد.

به‌عنوان یک عایق الکتریسیته عمل می‌کند.

مدول الاستیسیته‌ی آن بالا است.

در کامپوزیت‌های مختلفی مثل اپوکسی، فلز و... می‌توانند به کار روند.

نقطه‌ی ذوب آلومینه  $2500^{\circ}\text{C}$  و مدول الاستیسیته‌ی آن  $380\text{Gpa}$  است و قطر آن  $20\text{M}$  است و دانسیته‌ی آن  $4/7$  است.

آلومینا قطر خوبی دارد و انعطاف‌پذیری آن خوب است.

آلومینا را چگونه می‌توان تولید کرد، چندین روش برای تولید آلومینا وجود دارد:

یک روش برای الیاف آلومینا این است که یک دوغاب می‌سازند (دوغاب آلی) که این دوغاب قابلیت رشتن دارد.

این دوغاب را از صفحه‌ی سوراخ‌دار عبور می‌دهند و بعد عملیات پخت را انجام می‌دهند.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  باقی

می‌ماند.  $\Leftarrow$  لیف آلومینه می‌سازند.

در شکل ذیل سطح مقطع آلومینه را در تصویر TEM نشان داده است. دانه‌های آن بسیار ریز است. قطر آن حدوداً  $0.5\text{Mm}$

است.

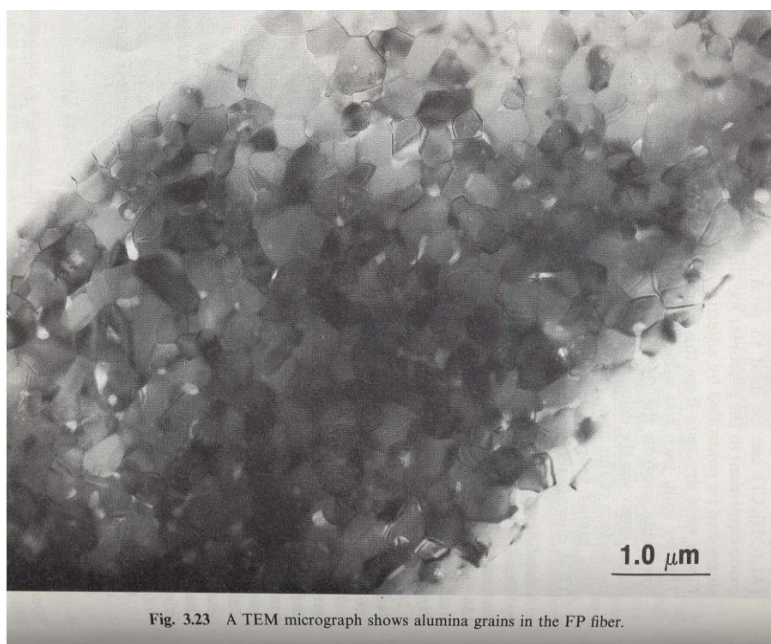


Fig. 3.23 A TEM micrograph shows alumina grains in the FP fiber.

الیاف Fp: نام تجاری الیاف آلومینه است که این الیاف Fp از طریق دوغاب ایجاد می‌شود.

روش دیگر برای تولید آلومینه این است که ۱۵-۲۰٪ yttria می‌زنند که دانه‌ها درشت نشود.  $\Leftarrow$  الیاف آلومینه را تولید می‌کنند.

۱۵-۲۰٪ yttria-stabilized zirconia particles

روش دیگر برای تولید لیف آلومینا این است که یک نمک آلومینا را از یک صفحه‌ی سوراخ‌دار عبور می‌دهند که روش سل -

ژل است.  $\Leftarrow$  تبدیل به ژل می‌کنند.  $\Leftarrow$  پیرولیز می‌کنند.  $\Leftarrow T=1300^{\circ}\text{C}$  لیف تولید می‌شود.

این روش‌ها، روش‌های دوغابی است.

روش‌های دیگری نیز هستند به غیر از روش‌های دوغابی، که یکی از روش‌ها استفاده از مذاب آلومینا است.  $\Leftarrow$  ذوب کردن

آلومینا کار سختی است.  $\Leftarrow$  آلومینا را ذوب می‌کنند.  $\Leftarrow$  یک قالب دارند که وسط آن قالب سوراخ است که به‌خاطر خاصیت

موئینگی، آلومینای مذاب به پایین می‌رود.  $\Leftarrow$  کریستال هسته می‌گذارند.  $\Leftarrow$  به طرف بالا می‌کشند.  $\Leftarrow$  تک کریستال آلومینا

تولید می‌شود.  $\Leftarrow$  یک روش خوبی است که برای الیاف تک کریستال آلومینا است.

ذوب آلومینا به این ترتیب مشکل است که یک روش دیگر که برای تولید آلومینا استفاده می‌کنند این است که:

به‌صورت موضعی ذوب می‌کنند، یک میله‌ی آلومینا را در نظر بگیرید که با لیزر نوک آن میله را ذوب می‌کنند.  $\Leftarrow$  کریستال

هسته را به آن نزدیک می‌کنند.  $\Leftarrow$  لیف آلومینا را تولید می‌کنند.

روش دیگر این است که آلومینا را ذوب می‌کنند در منبع بالایی  $\Leftarrow$  در بوته‌ی کفریز می‌ریزند که این بوته سوراخ است.  $\Leftarrow$

فشار منبع بالایی از فشار منبع پایینی بیش‌تر است.  $\Leftarrow$  مذاب عادی می‌شود و وارد منبع پایینی می‌شود.  $\Leftarrow$  در منبع پایینی به

آن پروپان می‌زنند.  $\Leftarrow$  که نسبت به نواقص سطحی مقاوم شود.

## پایلهی چهارم

۹۵/۰۸/۱۲

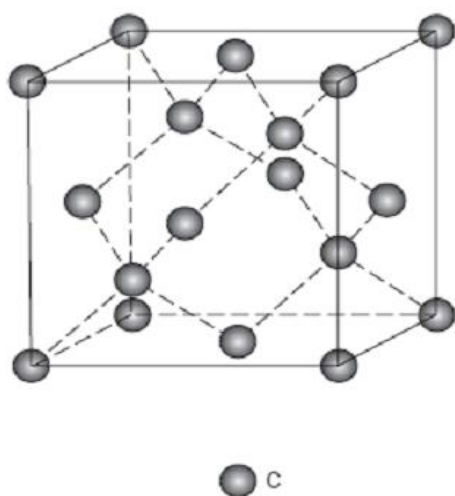
### الیاف گرافیت:

گرافیت در حقیقت یک ماده‌ی جالبی است، به خاطر این که سخت‌ترین ماده الماس است که از کربن تشکیل شده است و هم

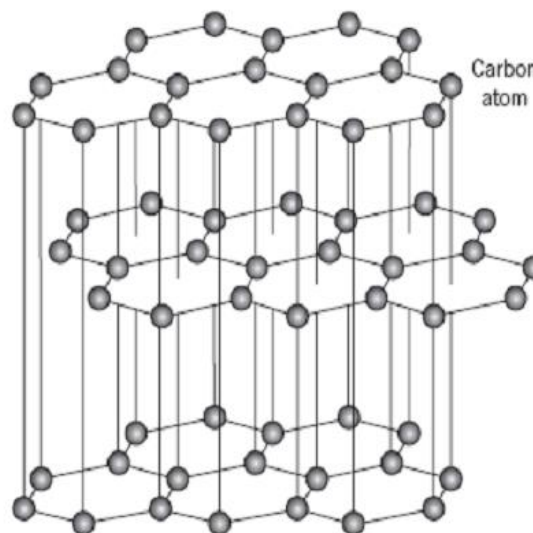
گرافیت که از کربن تشکیل شده است و نرم‌ترین ماده است.

شبکه‌ی هگزagonal گرافیت و شبکه‌ی مکعبی الماس در شکل ذیل مشاهده می‌شود، الماس سخت‌ترین ماده‌ای است که

تاکنون شناخته شده است.



A unit cell for the diamond cubic crystal

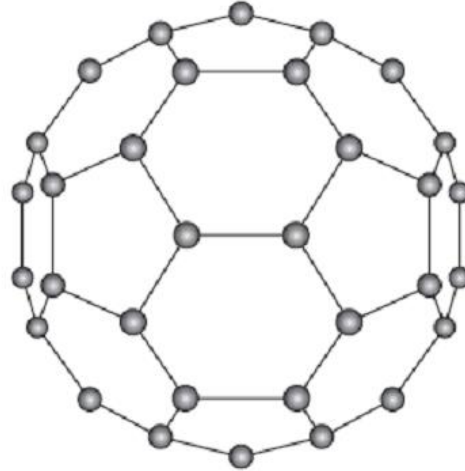


The structure of graphite.

Buckyball در شکل زیر نشان داده شده است که به صورت  $C_{60}$  نشان داده می‌شود که شامل ۲۰ هگزagonal و ۱۲ پنتagonal

است. پنج‌ضلعی‌ها و شش‌ضلعی‌ها در کنار هم قرار می‌گیرند و  $C_{60}$  را تشکیل می‌دهند که به آن Buckyball می‌گویند.

$C_{60}$  ⇒ ۲۰ تا hexagons + ۱۲ تا pentagons



گرافیت سخت‌ترین ماده‌ای است که بشر تاکنون شناخته است.

مدول یانگ گرافیت حدوداً ۱۱۰۰-۱۰۰۰ Gpa می‌تواند باشد مشروط بر این که آن را در جهت  $a$  بکشیم، اگر در جهت محور دیگری آن را بکشیم، بسیار ضعیف است.

اگر در جهت  $a$  بکشیم بسیار قوی است (سفتی آن‌ها بالا است) و اگر در جهت  $c$  بکشیم، ضعیف است، ورقه‌ورقه می‌شوند و از هم جدا می‌شوند. جهت اعمال نیرو بسیار حائز اهمیت است. که اگر جهت نیرو به  $60^\circ$  برسد بسیار ضعیف می‌شوند.

در شکل زیر این نکته نشان داده شده است که جهت اعمال نیرو حائز اهمیت است. (زاویه‌ی اعمال نیرو)

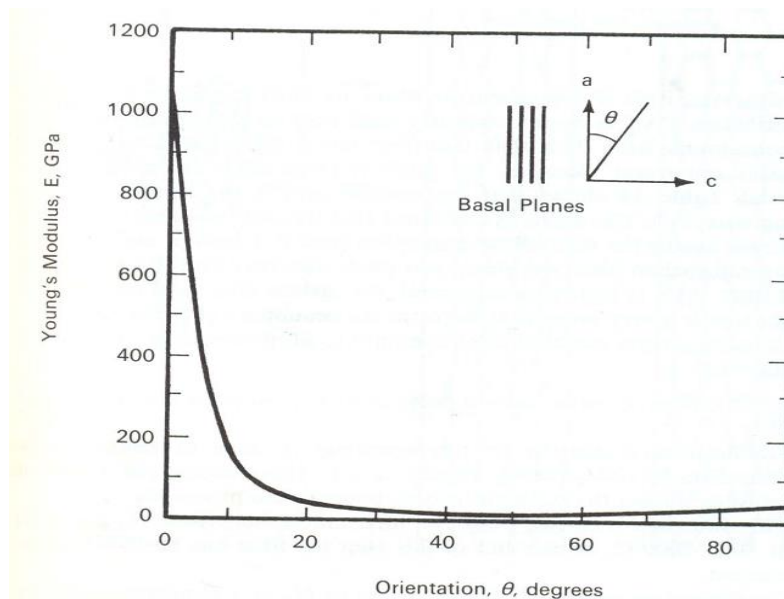


Fig. 3.13 Calculated tensile Young's modulus  $E$  as a function of  $\theta$  (angular displacement from the  $a$  axis) for a single crystal of graphite.



پیوند کووالانسی بین گرافیت برقرار است که این پیوند بسیار قوی است اما اتصال لایه‌های گرافیت به هم بسیار ضعیف است.

کربن و گرافیت اصطلاحاتی هستند که متأسفانه حتی در متون علمی نیز به جای هم قرار می‌گیرند، که این اشتباه است.

کربن  $\Leftarrow$  الیاف کربن وجود دارند اما ضعیف هستند و خیلی قوی نیستند.

الیاف گرافیت قوی هستند و به درجه‌ی گرافیت شدن بستگی دارد.

یک ماده‌ای است که خواص بسیار مناسبی دارد و به‌عنوان فاز تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها کاربرد دارد.

در دماهای بالا هم می‌توانند کاربرد داشته باشند و هرچه قدر که دما بالاتر می‌رود، خواص مکانیکی آن بیش‌تر می‌شود.

بسیار خواص آن ایزوتروپیک دارد و بستگی دارد که نیرو در چه جهت به آن اعمال می‌شود.

#### • راه‌های تولید الیاف کربن:

یکی از راه‌های تولید الیاف کربن استفاده از مواد پلیمری است (استفاده از پیش‌سازهای پلیمری) که این مواد پلیمری می‌توانند

به‌صورت زیر باشند:

### 1- Rayon ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>

### 2- Polyacrylonitrile (PAN) ( $CH_2-CH$ )<sub>n</sub>

### 3- Mesophase pitch (CN)

هرکدام از این‌ها یک‌سری معایب و یک‌سری مزایا دارند به‌عنوان مثال PAN از Rayon گران‌تر است، اما بازیابی PAN از

Rayon بیش‌تر است.

بازیابی PAN ۴۰ تا ۵۰ درصد است که دو برابر Rayon است که دارای بازیابی ۲۰ تا ۲۵ درصد است. از هرکدام از این

پیش‌سازهای پلیمری که استفاده کنیم، روش تولید الیاف کربن در چهار مرحله صورت می‌گیرد که به‌صورت ذیل است (روش

تولید الیاف کربن در چهار مرحله):

مرحله‌ی اول:

مرحله‌ی اول، مرحله‌ی رشتن است که این پلیمر مذاب یا مخلوط پلیمر را از یک صفحه‌ی سوراخ‌دار عبور می‌دهند و به شکل الیاف درمی‌آیند.

مرحله‌ی دوم:

مرحله‌ی دوم، مرحله‌ی پایدارسازی است یا oxidation یا به آن thermosetting نیز می‌گویند. (عملیات پایدارسازی است). در محیط اکسیژن انجام می‌شود و معمولاً در هوا انجام می‌شود.

در دمای  $200-450^{\circ}\text{C}$  این عملیات صورت می‌گیرد.

در ابتدا الیاف / سیم پلیمری را تولید می‌کنند و تا دمای  $200-450^{\circ}\text{C}$  حرارت می‌دهند که این سبب می‌شود که این الیاف به الیاف نسوز تبدیل شود و پایدارسازی در آنها انجام شود.

در شکل ۱-۱۱ پایدارسازی الیاف PAN را نشان می‌دهد. در شکل ۱۴-۳ الیاف PAN را مشاهده می‌کنیم که در a الیاف PAN نمایش داده شده است، اگر این پلیمر را بکشیم به حالت شکل b درمی‌آید و زنجیره‌های آن منظم می‌شود.

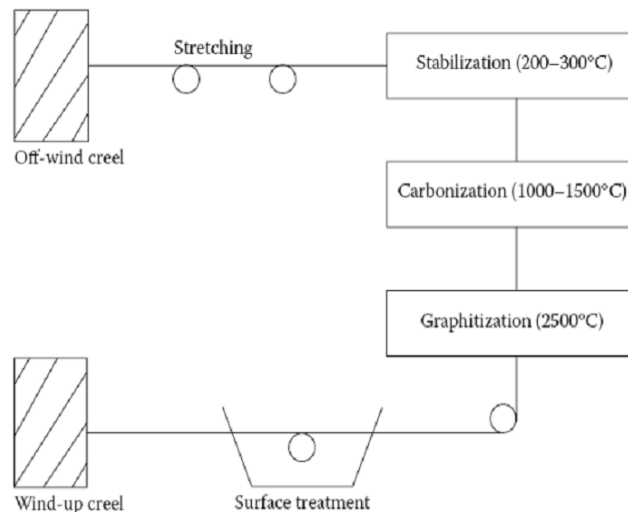
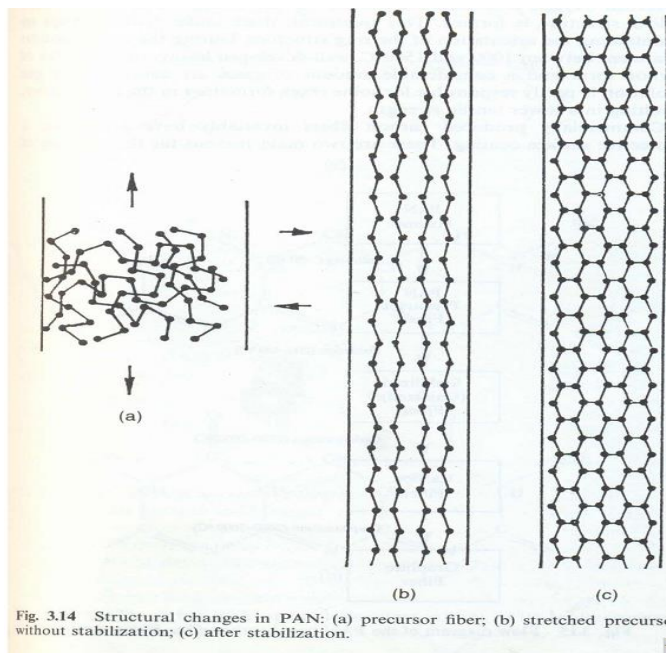


FIGURE 1.11 Stages of manufacturing a carbon fiber from PAN-based precursors.



اگر این نیرو را رها کنیم، در این صورت به حالت قبل خود (شکل a) برمی‌گردد. (البته قبل از عملیات پایدارسازی است). اما وقتی عملیات پایدارسازی صورت می‌گیرد، اکسیژن بین این زنجیره‌های پلیمری قرار می‌گیرد و در این حالت پایدار می‌شود و به شکل C که در پاورپوینت نمایش داده شده است، تبدیل می‌شوند. (پیوندهایی بین آن‌ها برقرار است و به هم متصل می‌شوند).

زمانی که عملیات پایدارسازی اتفاق می‌افتد، باعث می‌شود اکسیژن با زنجیره‌ی پلیمری وارد واکنش شود.

بعد از عملیات پایدارسازی به مرحله‌ی سوم می‌رسیم.

مرحله‌ی سوم:

مرحله‌ی سوم مرحله‌ی کربوره کردن است (Carboonization). این عملیات کربوره کردن در دمای  $2000^{\circ}\text{C}$  -  $1000^{\circ}\text{C}$  انجام می‌شود و در محیط خنثی. (pure  $\text{N}_2$  generally) که در حقیقت در این حالت الیاف کربن شکل می‌گیرد که این لیف در حدود ۹۹-۸۵٪ کربن دارد.

اکسیژن، ازت و هیدروژن و... از بین می‌رود و فقط کربن باقی می‌ماند که در حدود ۹۹-۸۵٪ کربن باقی می‌ماند. تا این جا لیف، لیف کربن است و هنوز لیف گرافیت نیست.

تا پایان مرحله‌ی دوم لیف کربن تولید می‌شود.

اگر بخواهیم به لیف گرافیت برسیم مرحله‌ی چهارم، graphitization را انجام می‌دهیم.

مرحله‌ی چهارم:

مرحله‌ی اختیاری است و در صورتی که بخواهیم لیف گرافیت ایجاد کنیم این مرحله را انجام می‌دهیم.

در این مرحله در محیط Ar یا N<sub>2</sub>، لیف کربن را حرارت می‌دهیم تا دمای ۲۵۰۰°C و با بیش‌تر از دمای ۲۵۰۰°C این لیف را حرارت می‌دهیم که میزان کربن افزایش می‌یابد و کربن آن به ۹۹٪ می‌رسد. (ساختار کریستالی کربن آمورف به ساختار گرافیت تبدیل می‌شود).

مرحله‌ی آخری که توضیح داده شد مرحله‌ی گرافیت‌دهی کردن است که اگر الیاف کربن را حرارت دهیم با دمای بیش از ۲۵۰۰°C در حقیقت ساختار کریستالی هگزاگونال شکل می‌گیرد و درصد کربن به ۹۹٪ می‌رسد.

در شکل ذیل مراحل تولید الیاف کربن را مشاهده می‌کنیم:

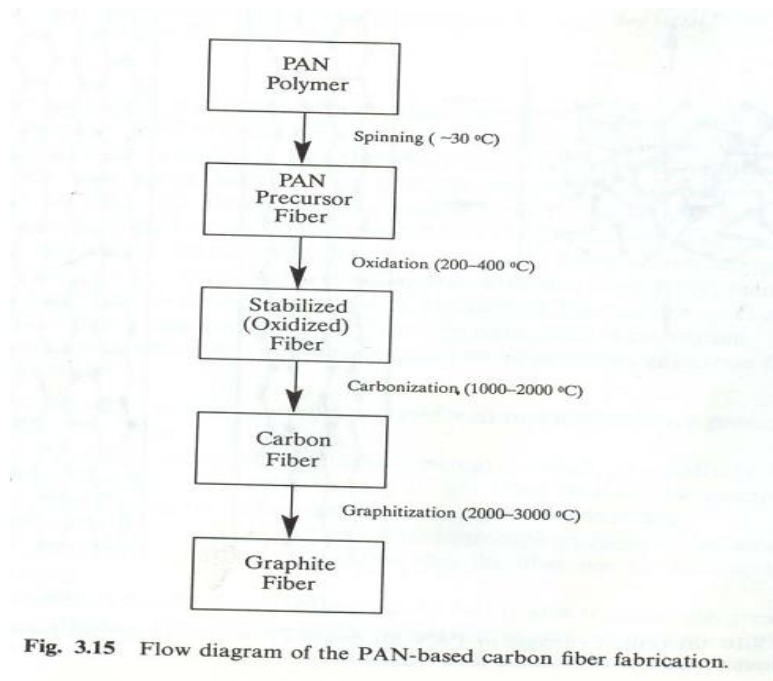
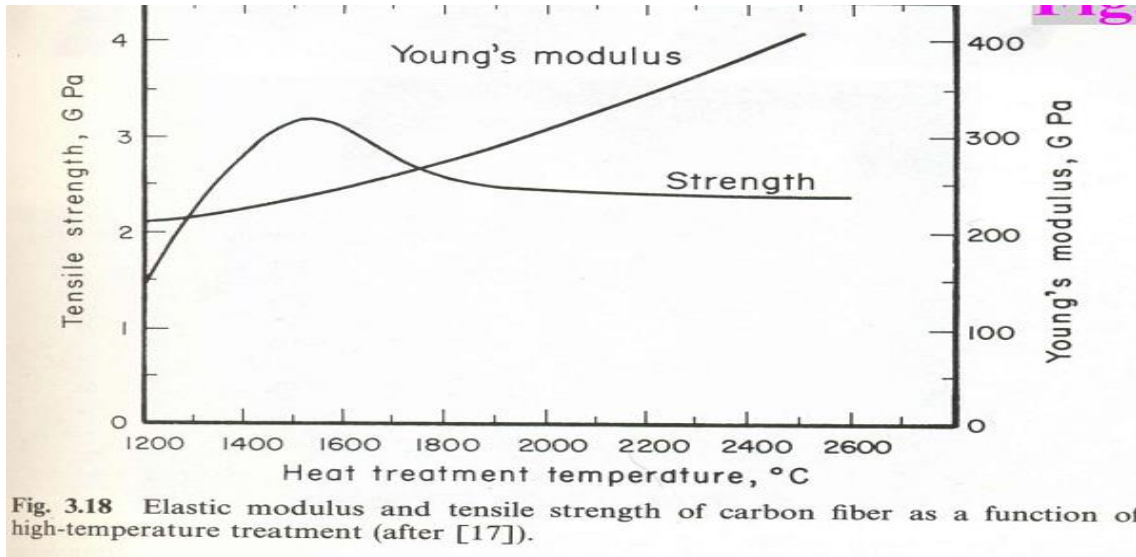


Fig. 3.15 Flow diagram of the PAN-based carbon fiber fabrication.

دلیل این که Size می‌زینم این است که می‌خواهیم راحت‌تر حمل و نقل را انجام دهیم و چسبندگی آن به ماتریس پلیمری نیز بیش‌تر شود.

وقتی که عملیات گرافیته کردن را انجام می‌دهیم، نمودار زیر را مشاهده می‌کنیم که نمودار استحکام و مدول یانگ مشخص شده است.



سؤال پیش می‌آید که هرچه دمای گرافیته شدن بیش‌تر شود، مدول یانگ افزایش می‌یابد، اما استحکام آن تا حدی بالا می‌رود و بعد کاهش می‌یابد. دلیل چیست:

دلیل این که استحکام بالا می‌رود این است که در حقیقت زنجیره‌ها مرتب می‌شوند، و ساختار کریستالی شکل می‌گیرد. گرافیت تشکیل می‌شود بنابراین استحکام بالا می‌رود.

چرا بعد از دمای  $1600^{\circ}\text{C}$  استحکام پایین می‌آید: به خاطر ترک‌های morzowski است که این ترک‌های morzowski به دو دلیل است:

۱- این الیاف منشأشان پلیمر است و یک مقدار ناخالصی امکان دارد در آن‌ها وجود داشته باشد. مثل: گوگرد، ازت و... وقتی دما بالا می‌رود، این گازها تمایل دارند که خارج شوند و ایجاد ترک می‌کنند، بنابراین استحکام پایین می‌آید.

۲- یک علت دیگر تنش‌هایی است که وقتی این لیف از سوی کوره بیرون می‌آید، سطح آن سرد می‌شود و مغز آن هنوز گرم است. این تنش‌هایی که در این حالت ایجاد می‌شود باعث ایجاد ترک خواهد شد.

هرچه دما بالاتر رود، امکان ایجاد ترک‌ها بیش‌تر می‌شود.

در مجموع به این ترک‌ها، ترک‌های morzowski می‌گویند.

اما چرا مدول‌یانگ این اتفاق برایش نمی‌افتد:

دلیل این است که در حقیقت وقتی می‌خواهیم مدول‌یانگ را اندازه‌گیری کنیم، آن قدر کرنش زیادی اعمال نمی‌کنیم و چون کرنش زیادی اعمال نمی‌شود، ترک‌ها خود را نشان نمی‌دهند.

وقتی بخواهیم مدول‌یانگ یک لیف را اندازه‌گیری کنیم،  $\tan$  زاویه‌ی تنش برحسب کرنش در منطقه‌ی پلاستیک، مدول‌یانگ را می‌دهد.

در کرنش‌های خیلی کم است که مدول‌یانگ اندازه‌گیری می‌شود.

چون کرنش حاکم است، ترک‌ها خود را نشان نمی‌دهند.

اما اگر بخواهیم استحکام (UTS) را اندازه‌گیری کنیم، کرنش را بالا می‌بریم تا لیف بشکند، چون کرنش‌ها بالاست، باعث می‌شود که ترک‌ها ایجاد شوند.

بعضی از کتاب‌ها بیان می‌کنند که مدول‌یانگ جزء خواص ذاتی مواد است و به ترک بستگی ندارد.

اما به هر حال مدول‌یانگ در حال افزایش است به خاطر ساختار کریستالی که دارد.

از این نمودار استفاده می‌کنیم:

یک زمانی نیاز داریم لیف استحکام کشش خیلی بالایی داشته باشد و یک زمان برای ما مدول‌یانگ مهم است و استحکام

کشش حائز اهمیت نیست، یک زمانی هر دو عامل (استحکام و مدول‌یانگ) برای ما مهم است، با توجه به شرایطی که ما نیاز

داریم اسامی مختلفی برای الیاف گرافیت قرار داده‌اند:

HT

HS / HM

IM

بر اساس خواصی که از آن‌ها نیاز داریم، نامگذاری شده است.

الیاف گرافیت انواع و اقسام مختلفی دارند.

در جدول زیر خاصیت PAN – based carbon fiber مشخص شده است.

• T-300 در جدول: یعنی مدول یانگ آن 300 است.

• T-600 در جدول: یعنی مدول یانگ آن 600 است.

**Table 3.9** Properties of PAN-based carbon fiber (strand data) [29]

Characteristic	High strength <sup>a</sup>	Super high strength <sup>b</sup>	High modulus <sup>c</sup>
Filament diameter (μm)	5.5–8.0	5.4–7.0	8.4
Density (g cm <sup>-3</sup> )	1.75–1.80	1.78–1.81	1.96
Carbon content (wt%)	92–95	99–99 +	99 +
Tensile strength (MPa)	3100–4500	2400–2550	1865
Tensile modulus (GPa)	225–260	360–395	520
Strain at fracture (%)	1.3–1.8	0.6–0.7	0.38
Electrical resistivity (μΩm)	15–18	9–10	6.5
Thermal conductivity (W(mK) <sup>-1</sup> )	8.1–9.3	64–70	– 120

<sup>a</sup>Thornel T-300, T-500, T-600, T-700 (Union Carbide Corporation); Celion 3000, 6000, 120 (Celanese Corporation); AS2, AS4, AS6, IM6 (Hercules Corporation).

<sup>b</sup>Thornel T-50, Celion G-50, HMS.

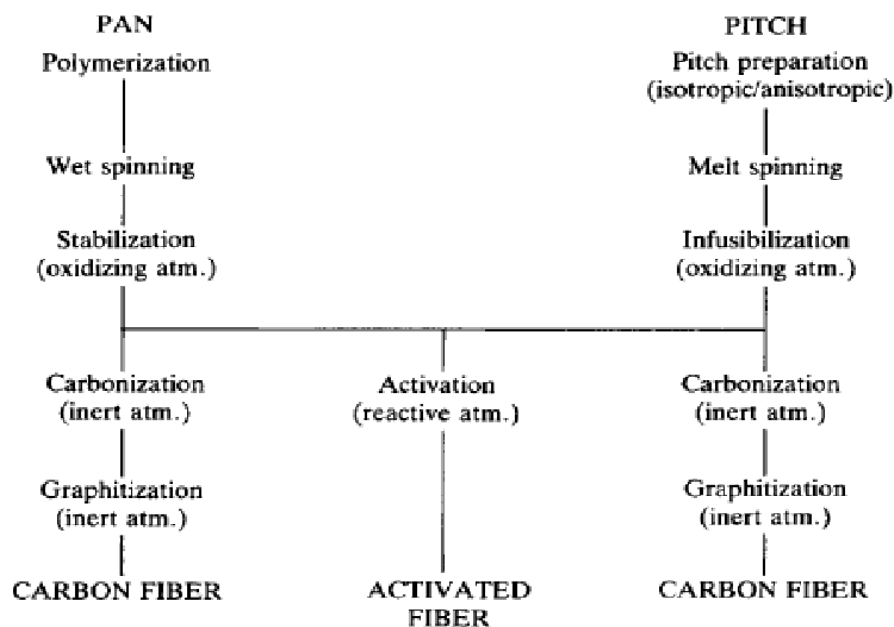
<sup>c</sup>Celion GY-70.

در جدول زیر خاصیت الیاف کربن pitch-based نشان داده شده است، که خاصیت آن نسبت به حالت جدول قبل ضعیف‌تر است.

**Table 3.10** Properties of mesophase pitch-based carbon fiber [30]

Property	Thornel P555	Thornel P755	Thornel P200
Filament diameter (μm)	10	10	10
Density (g cm <sup>-3</sup> )	2.02	2.06	2.15
Carbon content (wt%)	99	99	99 +
Tensile strength (MPa)	1895	2070	2240
Tensile modulus (GPa)	380	517	690
Strain at fracture (%)	0.5	0.4	0.3
Electrical resistivity (μΩm)	7.5	4.6	2.5
Thermal conductivity (W(mK) <sup>-1</sup> )	110	185	515

در شکل زیر شماتیک فرآیند تشکیل الیاف کربن از PAN و pitch مشخص شده است.



**Scheme 1.1** The processes for making carbon fibers from PAN and pitch precursors.

-مزایای الیاف کربن / یا الیاف گرافیت چیست:

(این الیاف به‌عنوان فاز تضعیف‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد.)

دانسیته آن کم است.

سبک است.

مدول یانگ آن بالا است.

استحکام آن بالا است.

ضریب انبساط حرارتی آن کم است. (ضریب انبساط حرارتی پایین، خوب است چون مقاومت به شوک را زیاد می‌کند.)

پایداری حرارتی دارند و در غیاب اکسیژن تا دمای  $3000^{\circ}\text{C}$  را می‌توانند تحمل کنند.

مقاومت خزش آن خیلی خوب است.



از لحاظ شیمیایی پایدار است مخصوصاً در اسیدها.

با بیولوژی بدن انسان و جانوران سازگاری دارد.

مقاومت الکتریکی آن بالا است.

ضریب حرارتی آن بالا است.

به شکل الیاف پیوسته هستند.

دراثر گذشت زمان نیز قیمت آن‌ها در حال کاهش است.

● الیاف کربن مزایایی دارد که مزایای آن در بالا اشاره شد، اما همین الیاف یک‌سری معایب نیز دارند که معایب الیاف کربن به شرح ذیل است:

آن ایزوتروپ (anisotropy) هستند، همان‌طور که گفته شد در محور عمودی و در محور افقی، خواصشان کاملاً متفاوت است. کرنش منجر به شکست آن پایین است.

استحکام فشاری آن پایین است در مقابل استحکام کششی.

تمایل به اکسید شدن دارد و تبدیل به CO می‌شود. (مثلاً اگر در هوا بالای  $400^{\circ}\text{C}$  حرارت ببیند، در حقیقت به گاز تبدیل می‌شود.)

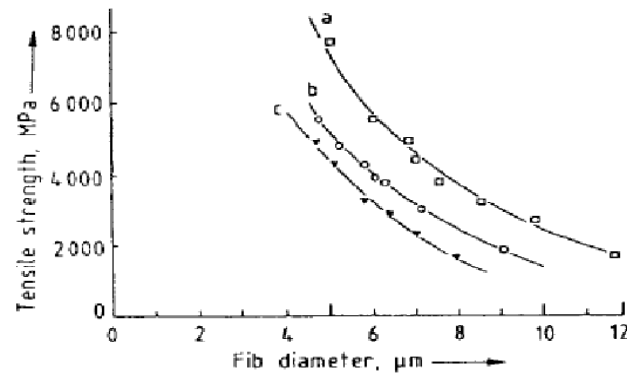
اکسیداسیون کربن در محیط‌های قلیایی تشدید می‌شود به عبارتی محیط‌های قلیایی به‌عنوان کاتالیزور عمل می‌کنند برای اکسیداسیون الیاف کربن.

در شکل زیر رابطه‌ی قطر الیاف و استحکام کششی را نشان داده است. هرچه قدر که قطر الیاف کمتر می‌شود، استحکام بالا می‌رود.

هرچه قدر که قطر الیاف افزایش یابد، Tensile Strength کاهش می‌یابد.

که در این شکل برای سه نوع الیاف کربن مشخص شده است.

- HT: High Tensile Strength
- HM: High modulus



**Figure 4.2** Relation between the tensile strength and fiber diameter: (a) Hercules AS-4 (Type HT), (b) Torayca T-300 (Type HT), and (c) Torayca M40 (Type HM). From Ref. 5.

در جدول زیر خواص مکانیکی دو نوع الیاف گرافیت PAN و Pitch ارائه شده است.

**TABLE 1.8**  
Mechanical Properties of Two Typical Graphite Fibers

Property	Units	PITCH	PAN
<i>System of units: USCS</i>			
Specific gravity	—	1.99	1.78
Young's modulus	Msi	55	35
Ultimate tensile strength	ksi	250	500
Axial coefficient of thermal expansion	$\mu\text{in}/\text{in}/^\circ\text{F}$	-0.3	-0.7
<i>System of units: SI</i>			
Specific gravity	—	1.99	1.78
Young's modulus	GPa	379.2	241.3
Ultimate tensile strength	MPa	1723	3447
Axial coefficient of thermal expansion	$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	-0.54	-1.26

به صورت خلاصه می توان بیان کرد که:

الیاف کربن می تواند از PAN، Pitch یا Polyacrylonitrile تولید شود.

به شکل فیلامان بافته شده است.

۱-۳۲۰ فیلامان به کار برده می‌شود.

الیاف کوتاه آن‌ها ریز وجود دارد که ۳ تا ۶ میلی‌متر طول آن‌ها است. (Short fiber – 3-6 mm long)

باید مسائل ایمنی را رعایت کنیم در هنگام استفاده از این الیاف:

خروج گازها باید مناسب باشند تا اکسید شوند.

گرد و خاک مخصوصاً باید بررسی شود و حذف شود.

امکان دارد باعث مشکلات پوستی نیز شوند.

## الیاف کربن:

- 1) Increased strength
- 2) Increased modulus (stiffness)
- 3) Increased extension at break
- 4) Electrical conductivity
- 5) Reduced coefficient of thermal expansion
- 6) Reduced weight

یک روش دیگر برای تولید الیاف کربن وجود دارد و آن روش VGCF است که به توضیح این روش می‌پردازیم.

### Vapor grown carbon fibers (VGCF)

از فاز بخار تهیه می‌شوند.

این روش به این ترتیب است که یکی از فلزات واسطه، پودر فلزات واسطه (آهن (Fe) - کبالت (Co) - نیکل (Ni)) روی یک لایه‌ی نسوز قرار می‌دهند که این لایه‌ی نسوز می‌تواند Si باشد، کوارتز باشد یا آلومینا باشد.

بعد حرارت را بالا می‌برند تا پودر و فلز، ذوب شود.

پودر به قطر، تبدیل می‌شود.

بعد گاز استیلن  $C_2H_2$  را وارد می‌کنند و این  $C_2H_2$  در مجاورت فلز به‌عنوان کاتالیزور عمل می‌کند و تجزیه می‌شود به C و H. (کربن و هیدروژن)

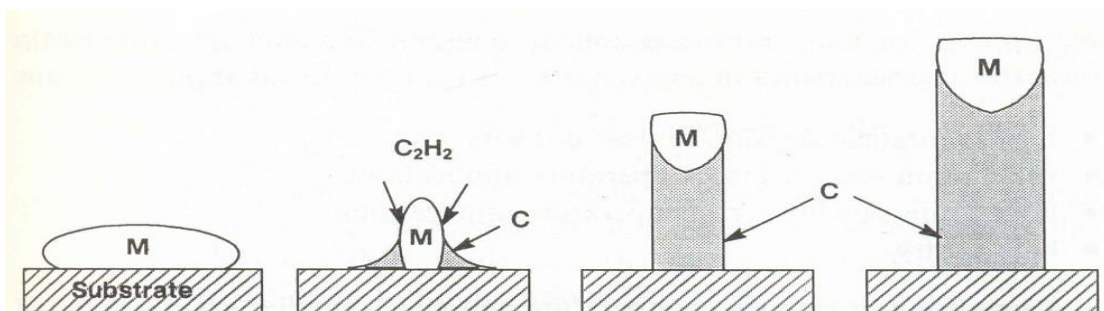


Fig. 3.22 Catalyzed decomposition of acetylene to produce vapor-grown carbon fibers. M = catalyzed metal; C = carbon fiber.

همان‌طور که در شکل بالا نشان داده شده است، کربن می‌نشیند. با ادامه‌ی این عمل: لیف کربن ایجاد می‌شود.

$C_2H_2$  در مجاورت مذاب تجزیه می‌شود، C و H آزاد می‌شود و روی کربن قرار می‌گیرد.

الیافی که به این صورت تولید می‌شوند در حقیقت استحکام آن‌ها امکان دارد تا ۲۰Gpa نیز برسد.

استحکام الیاف کربن در حدود ۲-۳Gpa بود نه ۲۰Gpa، اما در این حالت تولید الیاف کربن استحکام آن ۲۰Gpa است، دلیل آن این است که این‌ها کربن خالص هستند. (پلیمر نیستند که به الیاف کربن تولید شده باشند).

پودر فلزات در این حالت روی ریزلایه می‌باشند، رشد می‌کنند و بالا می‌آیند، الیاف کربن در این روش به این ترتیب تولید می‌شود. (به قطره‌ی مذاب گاز  $C_2H_2$  را می‌دهند،  $C_2H_2$  به‌عنوان کاتالیزور عمل می‌کند و کربن آزاد می‌شود).

### نانولوله‌های کربنی:

#### Carbon nanotubes

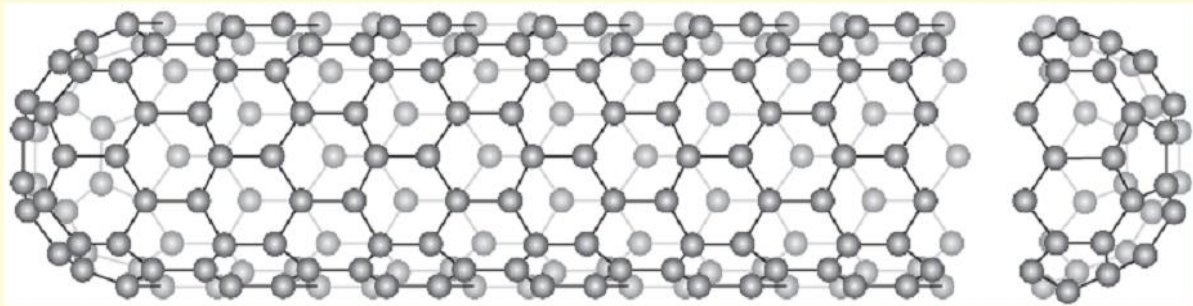
نانولوله‌های کربنی به‌صورت CNTS یا buckytubes می‌نامند.

در ۱۰ تا ۱۵ سال اخیر نانولوله‌های کربنی تکامل پیدا کرده‌اند.

نسبت طول به قطر آن‌ها (aspect ratio)  $۱۳۳/۰۰۰/۰۰۰$  است که یک عدد بسیار بالایی است، که هرچه قدر این نسبت بالاتر باشد، خواص مکانیکی بهتر و بیش‌تر می‌شود. (طول آن‌ها میلی‌متر است و قطر آن‌ها نانومتر است که وقتی طول را بر قطر تقسیم می‌کنیم، عدد بزرگی به دست می‌آید.)

خواص بسیار جالبی دارند و کاربردهای بسیاری در صنعت کشاورزی، مهندسی مواد، نانتوتکنولوژی، الکترونیک، اپتیک و... دارند. در حقیقت نانولوله‌های کربنی یک صفحه‌ی گرافیت هستند که لوله شده است و به شکل یک لوله درآمده است که طول آن چند میلی‌متر و قطر آن  $۱۰\text{nm}$  یا کم‌تر است.

در شکل زیر یک ساختار نانولوله‌های کربنی نمایش داده شده است.



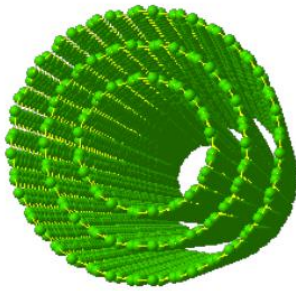
**Figure 12.19** The structure of a carbon nanotube. (Reprinted by permission from *American Scientist*, magazine of Sigma Xi, The Scientific Research Society. Illustration by Aaron Cox/*American Scientist*.)

نانولوله‌های کربنی به سه شکل وجود دارند. تقسیم بندی نانولوله‌های کربنی:

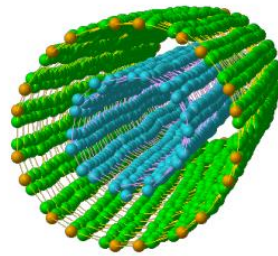
الف) تک دیواره

ب) دو دیواره

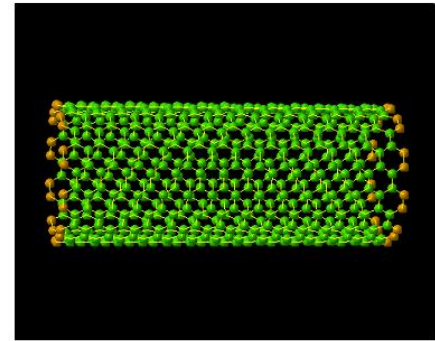
ج) چند لایه



Multi-Walled



Double-Walled



Single-Walled

### خواص نانولوله‌های کربنی:

در الیاف شیشه بیان شد که استحکام آن  $1750 \text{ mpa}$  است و در الیاف  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{SiC}$  و  $\text{B}$  در حدود  $3-4 \text{ Gpa}$  است.

در حالت نانولوله‌های کربنی استحکام آن‌ها  $50-200 \text{ Gpa}$  است که استحکام بالایی دارند.

مدول یانگ نانولوله‌های کربنی  $1 \text{ Tpa}$  یا  $10^2 \text{ Gpa}$  است.

هنگامی که مدول یانگ و استحکام بالا می‌رود، داکتیلیته کم می‌شود.

کرنش منجر به شکست کم می‌شود. اما در این جا با وجود استحکام بالا و مدول یانگ بالا،  $5$  تا  $20$  درصد کرنش دارد، یعنی

این جزء عجايب مهندسی مواد است که با وجود مدول و استحکام بالا، تا  $20$  درصد کرنش منجر به شکست دارد.

به این دلیل است که به نانولوله‌های کربنی، *ultimated fiber* می‌گویند.

در بالا خواص و ویژگی نانولوله‌های کربنی توضیح داده شد. این نانولوله‌های کربنی کاربردهای بسیار زیادی نیز دارند:

در مانیتورهای کامپیوتر و تلویزیون استفاده می‌شود.

در ترانسستورها کاربرد دارد.

مقاومت الکتریکی آن کم است، به همین دلیل به عنوان هادی الکتریک به کار گرفته می‌شوند.

*Thermal conductivity* آن بالا است، بنابراین به عنوان هادی حرارتی به کار گرفته می‌شود.

استحکام و مدول یانگ نانولوله‌های کربنی بالا است، در نتیجه خواص مکانیکی آن‌ها عالی است.

در کامپوزیت‌های ساختاری کاربرد دارند.

معادن ذخیره انرژی، مواد حرارتی

پارچه‌بافی و کاربردهای پزشکی.

## الیاف فلزی:

از الیاف فلزی که در کامپوزیت مورد استفاده قرار می‌گیرند، الیاف بریلیوم، فولاد، مولیدن و تنکستن می‌توانند باشند.

خواص مکانیکی خیلی خوبی دارند. معایت آن‌ها این است که آن‌ها سبک‌تر است بریلیوم است، دانسیته‌اش پایین است که

دانسیته آن  $P = 1/8$  است، اما سمی است. ( $p = 1/8$  بریلیوم، فلز سبکی است و خواص خوبی دارد).

فلزاتی که سمی نیستند مثل تنکستن سنگین هستند. دانسیته تنکستن  $19.3 \text{ g/cm}^3$  است و نقطه ذوب آن بالا است که نقطه

ذوب تنکستن  $3400^\circ\text{C}$  و مدول یانگ آن  $1300 \text{ Gpa}$  است.

تنکستن خیلی شدید اکسید می‌شود.

تنکستن به سرعت اکسید می‌شود.

ساخت این سیم فلزهایی به وسیله‌ی کشش سیم است.

تا یک حدی می‌توانیم سیم را اکسید و آن سیم را نازک کرد، از یک طول به بعد نمی‌توانیم سیم را نازک‌تر کنیم، برای این که

بتوان سیم را خیلی نازک کرد در حدود  $10$  میکرون از روش تیلور استفاده می‌کنند.

فرآیند تیلور در شکل زیر نشان داده شده است.

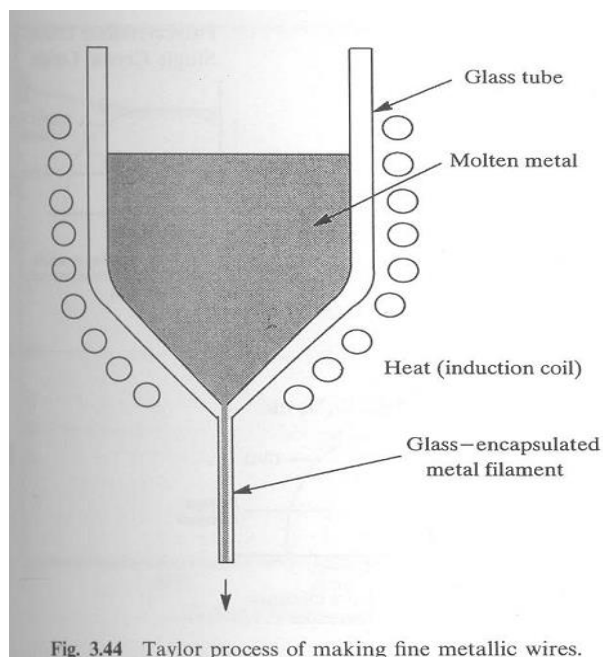


Fig. 3.44 Taylor process of making fine metallic wires.

روش تیلور به این ترتیب است که فلز را در یک شیشه ذوب می‌کنند، مذاب فلز در یک شیشه ایجاد می‌شود، اما شیشه نرم شده است.

این فلز را همراه با شیشه می‌کشند (شیشه خاصیت ویسکوالاستیک دارد)، شیشه را می‌کشند وسط آن مذاب فلز است. بعد آن را حکاکی می‌کنند به وسیله‌ی اسیدشویی، که در این صورت شیشه را می‌شویند و از بین می‌برند و تنها سیم فلز باقی می‌ماند.

به این ترتیب می‌توان سیم‌های خیلی نازک را هم می‌توان تولید کرد.

در جدول ذیل خواص انواع سیم‌ها مشخص شده است.

Material	Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Density ( $\text{g/cm}^3$ )	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Melting point ( $^{\circ}\text{C}$ )
Steel (0.9% C)	100	7.8	4250	210	1300
Stainless Steel (18-8)	50-250	8.00	700-1000	198	
Mo	<25	10.2	2450	310	2600
W	<25	19.3	3850	360	3400



در فولاد (steel)، تمام خصوصیات آن از جمله قطر، استحکام و نقطه ذوبی و مدول یانگ آن جذب است. فقط مشکل آن دانسیته آن است که سنگین است.

مشکل دیگر فولاد این است که موضوع واکنش پذیری در کامپوزیت‌های فلزی است. زمانی که فولاد را به آلومینیوم (AL) بزنی، بین فولاد و AL یک فصل مشترک ایجاد می‌شود که این حالت زیاد جالب نیست.

## ویسکرها:

ویسکرها در حقیقت الیاف کوتاهی هستند که تک کریستال هستند که قطر آن‌ها چند میکرون است و طول آن‌ها چند میلی‌متر است.

درصد طولی شویندگی در آن‌ها ۵۰ تا ۱۰/۰۰۰ است.

ویسکرها قطر یکسانی ندارند.

به کارگیری و منظم کردن ویسکرها در ساترین مشکل ساز است.

از میان ویسکرها، ویسکر Sic را توضیح می‌دهیم.

## ویسکر Sic:

برای تولید ویسکر Sic از روش VLS استفاده می‌کنیم.

با استفاده از سه فاز بخار، مایع و جامد، ویسکرهای Sic تولید می‌شوند. ابتدا یک ژنراتوری با فرستادن  $\text{SiO}_2$  و C، گاز  $\text{SiO}$  تولید می‌شود در ژنراتور.

با واکنش دادن  $\text{SiO}_2$  و C، گاز  $\text{SiO}$  تولید می‌شود.

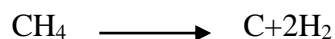
پودر فلزات واسطه مثل آهن، Ni، Co، ... را داخل رکتور قرار می‌دهند.

این پودر جذب می‌شود.

گاز  $\text{SiO}$  را که می‌دهند در سطح قطره‌ی مذاب قرار می‌گیرد، گاز  $\text{CH}_4$  ریز می‌دهند، و گاز متان روی سطح قطره قرار می‌گیرد.

گاز متان تجزیه می‌شود و کربن آزاد می‌شود.

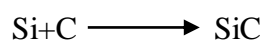
دو واکنش ذیل رخ می‌دهد:



پس این کربنی که آزاد شد، وارد قطره‌ی مذاب می‌شود و  $\text{Si}$  که آزاد شد نیز وارد قطره می‌شود.

قطره فوق اشباع می‌شود از  $\text{Si}$  و  $\text{C}$ .

وقتی که از  $\text{Si}$  و  $\text{C}$  این قطره فوق اشباع شد، از آن  $\text{SiC}$  آزاد می‌شود.  $\text{SiC}$  که آزاد می‌شود، رسوب می‌کند.



این قطره به‌عنوان یک عامل واسطه عمل می‌کند.

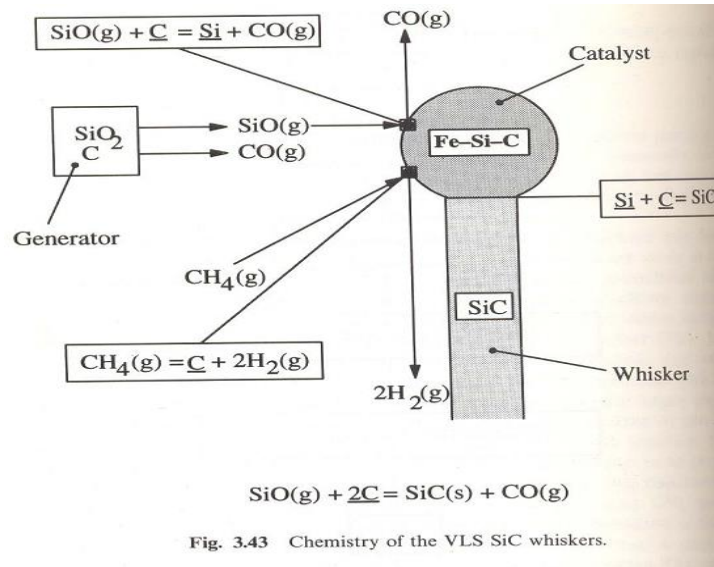
و به این ترتیب ویسکر  $\text{SiC}$  تولید می‌شود.

تک کریستال  $\text{SiC}$  تولید می‌شود که طول آن در حدود ۱۰ میلی‌متر است و قطر آن ۵/۹ میکرومتر است.

استحکام آن ۸/۴ گیگا پاسکال است و مدول آن ۵۸۱ گیگ پاسکال است.

این روش یک روش بسیار آهسته‌ای است و ویسکری که از این روش ایجاد می‌گردد، گران‌قیمت است.

در شکل زیر روش VLS برای تولید ویسکر  $\text{SiC}$  مشخص شده است.



اما روش دیگری نیز برای تولید ویسکر SiC وجود دارد، روش استفاده از سبوس برنج است.

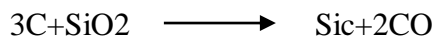
از هر ۱۰۰ کیلوگرم برنج که در روش شالی کوبیده می‌شود، ۲۰ کیلوگرم سبوس ایجاد می‌شود.

این سبوس برنج، قسمت خارجی اش  $\text{SiO}_2$  و قسمت داخلی آن سلولز است.

بنابراین  $\text{SiO}_2$  را از قسمت خارجی وارد و  $\text{C}$  را نیز از قسمت داخلی که سلولز است، را دارا می‌باشد بنابراین می‌تواند ویسکر SiC تولید کند.

بنابراین برای تولید ویسکر SiC از سبوس برنج، ابتدا در غیاب اکسیژن این سبوس را تا دمای  $700^\circ\text{C}$  حرارت می‌دهند که مواد مذاب آن خارج می‌شود، بنابراین الان  $\text{SiO}_2$  دارد و  $\text{C}$ .

کربن با  $\text{SiO}_2$  وارد واکنش می‌شود و SiC تولید می‌شود و  $\text{CO}$ .



در این جا SiC که تولید می‌شود، محلولی از SiC ویسکر است و SiC ذره‌ای.



الان باید این دو را از هم جدا کنیم.

$SiC_p$  بسیار ارزان است و  $SiC_w$  کربن است.

در این مرحله باید  $SiC_p$  و  $SiC_w$  از هم جدا شود.

وقتی  $SiC_p$  و  $SiC_w$  تولید می‌شود یک مقدار در کربن اضافی دارد، یعنی  $SiC$  دارد اما کربن اضافی نیز دارد. در این واکنش

زیر:



تمام کربن مصرف نمی‌شود. بنابراین حرارت می‌دهند تا کربن آن بسوزد.

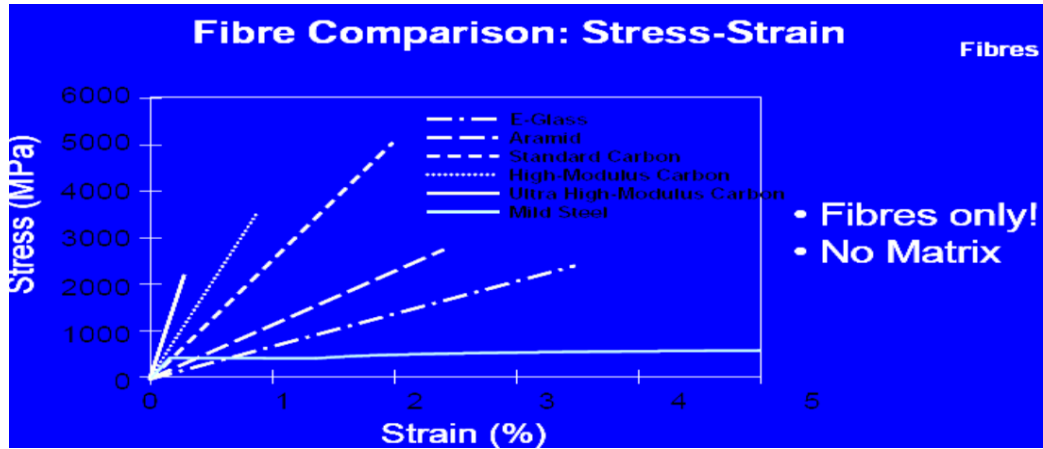
در نهایت  $SiC_p$  و  $SiC_w$  داریم که این دو تا را از هم جدا می‌کنیم.

در جدول ۱-۱ خاصیت الیاف و یسکرها باهم مقایسه شده است.

**Table 1.1** Properties of various fibers and whiskers.

Material	Density <sup>a</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile strength <sup>a</sup> (GPa)	Modulus of elasticity <sup>a</sup> (GPa)	Ductility (%)	Melting temp. <sup>a</sup> (°C)	Specific modulus <sup>a</sup> (10 <sup>6</sup> m)	Specific strength <sup>a</sup> (10 <sup>4</sup> m)
E-glass	2.55	3.4	72.4	4.7	<1 725	2.90	14
S-glass	2.50	4.5	86.9	5.2	<1 725	3.56	18
SiO <sub>2</sub>	2.19	5.9	72.4	8.1	1 728	3.38	27.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.95	2.1	380	0.55	2 015	9.86	5.3
ZrO <sub>2</sub>	4.84	2.1	340	0.62	2 677	7.26	4.3
Carbon (high-strength)	1.50	5.7	280	2.0	3 700	18.8	19
Carbon (high-modulus)	1.50	1.9	530	0.36	3 700	36.3	13
BN	1.90	1.4	90	1.6	2 730	4.78	7.4
Boron	2.36	3.4	380	0.89	2 030	16.4	12
B <sub>4</sub> C	2.36	2.3	480	0.48	2 450	20.9	9.9
SiC	4.09	2.1	480	0.44	2 700	12.0	5.1
TiB <sub>2</sub>	4.48	0.10	510	0.02	2 980	11.6	0.3
Be	1.83	1.28	300	0.4	1 277	19.7	7.1
W	19.4	4.0	410	0.98	3 410	2.2	2
Polyethylene	0.97	2.59	120	2.2	147	12.4	27.4
Kevlar	1.44	4.5	120	3.8	500	8.81	25.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> whiskers	3.96	21	430	4.9	1 982	11.0	53.3
BeO whiskers	2.85	13	340	3.8	2 550	12.3	47.0
B <sub>4</sub> C whiskers	2.52	14	480	2.9	2 450	19.5	56.1
SiC whiskers	3.18	21	480	4.4	2 700	15.4	66.5
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> whiskers	3.18	14	380	3.7	—	12.1	44.5
Graphite whiskers	1.66	21	703	3.0	3 700	43	128
Cr whiskers	7.2	8.90	240	3.7	1 890	3.40	12

منحنی تنش - کرنش در زیر نشان داده شده است.



از نظر کیفی نیز در جدول زیر با یکدیگر مقایسه شده است. از نظر خاصیت مکانیکی، مدول یانگ و استحکام نیز مقایسه شده است.

Criterion	Fibre Type		
	Carbon	Aramid	Glass
Tensile Strength	Very Good	Very Good	Very Good
Modulus of Elasticity	Very Good	Good	Adequate
Long Term Behaviour	Very Good	Good	Adequate
Fatigue Behaviour	Excellent	Good	Adequate
Bulk Density	Good	Excellent	Adequate
Alkaline Resistance	Very Good	Good	Adequate
Price	Adequate	Adequate	Very Good

Fiber	Fiber diameter (μm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	E-Modulus (N/mm <sup>2</sup> )
Polyamid	10...40	1.14	840	2'800
E-Glas	7...10	2.55	1'800...3'000	73'000
S-Glas	7...10	2.50	3'900	87'000
C/G	7...8	1.7...1.9	1'700...7'000	50'000...800'000
Aramid	12	1.44	2'500...3'600	70'000...130'000
Bor	100	2.60	3'000...4'000	420'000
Steel	5...250	7.80	1'800...4'200	210'000

## Single fiber tensile strength

- Carbon fiber            **3.5 GPa**
- Kevlar fiber            **3.6 GPa**
- E-glass fiber            **3.4 GPa**
- Steel                      **1.3 GPa**

## Specific strength

- Carbon fiber            **2.00 GPa**
- Kevlar fiber            **2.50 GPa**
- E-glass fiber            **1.31 GPa**
- Steel                      **0.17 GPa**

## Single fiber tensile modulus

- Carbon fiber            **230 GPa**
- Kevlar fiber            **60 GPa**
- E-glass fiber            **22 GPa**
- Steel                      **210 GPa**

در carbon fiber: یک لیف ۸ میکرونی را اگر بکشیم، ۳/۵ گیگا پاسکال استحکام کششی دارد.

به یک دسته الیاف ← وقتی یک دسته الیاف داشته باشیم، ضعیف‌تر می‌شوند و استحکام کششی کاهش می‌یابد.

در جدول زیر خواص مکانیکی و در شکل زیر استحکام برحسب دما نشان داده شده است. (اغلب الیاف تا دمای ۸۰۰°C مقاومت

می‌کنند).

<i>Sample name</i>	<i>Tensile strength (GPa)</i>	<i>Tensile modulus (GPa)</i>	<i>Elongation (%)</i>
Thornel P-100	2.2	690	0.3
P-120	2.4	830	0.3
Carbonic HM50	2.8	490	0.6
HM60	3.0	590	0.5
HM80	3.5	790	0.4
Torayca M46	2.4	450	0.5

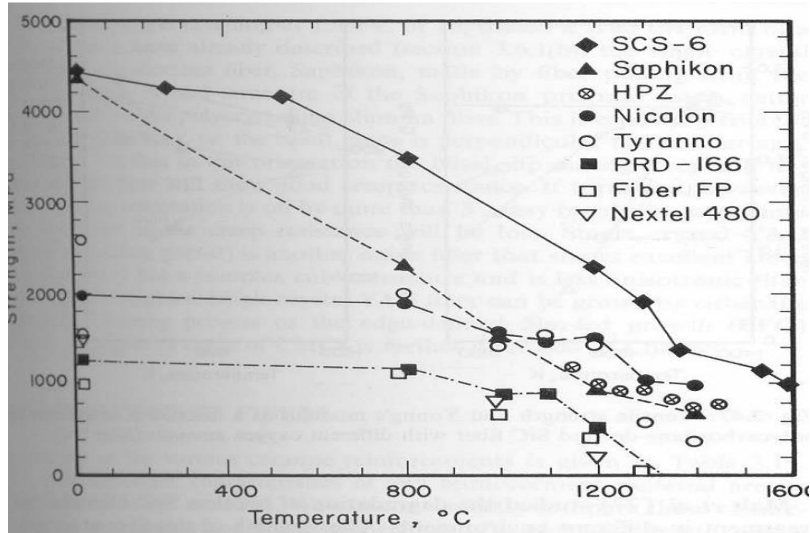


Fig. 3.46 Strength vs. temperature for some fiber reinforcements (after [71]).

در نمودار زیر tensile strength را برحسب young modulus نشان داده شده است.

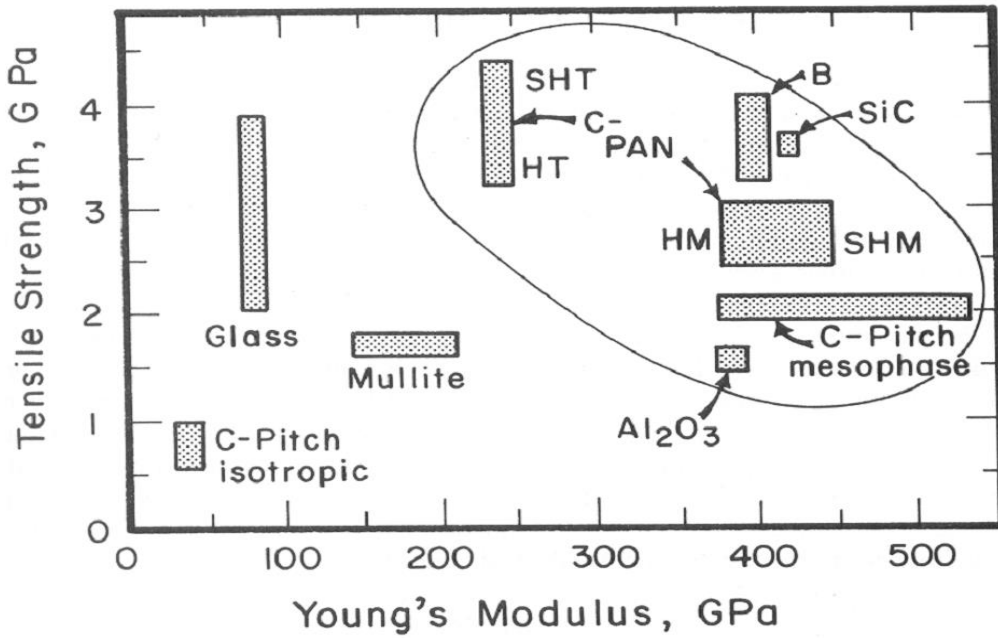


Fig. 3.48 Strength vs. modulus for some fibers.

در سوپرآلیاژها مشاهده می‌شود که در اثر حرارت نمودار specific strength برحسب دما، مشاهده می‌شود که خواص آن‌ها ضعیف می‌شود.

اما الیاف کربن - کربن قوی است.

کامپوزیت‌هایی که از کربن هستند، در دمای بالا مشکلی ندارند.

CTE یا ضریب انبساط حرارتی: هرچه قدر که ضریب انبساط حرارتی پایین باشد، مناسب‌تر است.

ضریب انبساط حرارتی کولار با آرامید ۲- است.

وقتی کولار حرارت می‌بیند به‌جای این که انبساط کند، انقباض پیدا می‌کند.

ضریب انبساط حرارتی کربن ۰/۵ است.

ضریب انبساط حرارتی S-glass، ۲/۹ است.

ضریب انبساط حرارتی E-glass، ۵ است.

ضریب انبساط حرارتی steel یا فولاد، ۶/۵ است که خوب نیست.

حسن الیاف کربن:

زمانی که تلسکوپ فضایی در فضا قرار می‌گیرد، اختلاف دمایی مثل زمین نیست. اختلاف دمایی بالا است. (در حدود  $200^{\circ}\text{C}$ ).

تلسکوپ می‌خواهد اطلاعات را به زمین مخابره کند، اگر انبساط و انقباض داشته باشد این تلسکوپ تمام تنظیماتش به هم می‌خورد.

باید یک جنسی برای دیش این تلسکوپ انتخاب کنند که ضریب انبساط حرارتی آن‌ها صفر باشد. (CTE آن صفر باشد)، برای این که این کار را بکنند از الیاف کربن استفاده می‌کنند.

از الیاف کربن کامپوزیت می‌سازند.

که یک جزء کامپوزیت ضریب انبساط حرارتی اش منفی است و دیگری مثبت است، در این صورت ضریب انبساط حرارتی آن کامپوزیت صفر خواهد شد.



با ورود الیاف کربن در کامپوزیت، CTE آن‌ها صفر خواهند شد.

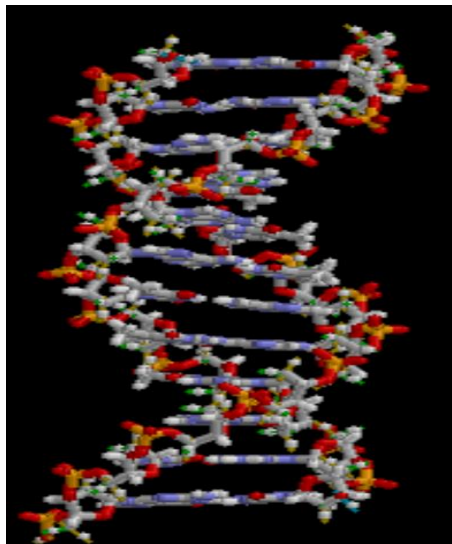
بنابراین در اثر گرما و سرما، اصلاً تغییر نخواهد کرد.

این یکی از مزایای استفاده از الیاف کربن است.

### کامپوزیت‌های زمینه پلیمری:

شکل زیر یک پلیمر است که DNA نام دارد. در این شکل ریزساختار DNA مشخص است که یک بایوپلیمر است که در

بدن تمام انسان‌ها وجود دارد.



پلیمر چیست:

پلیمر به صورت کلی از دو قسمت تشکیل شده است: پلی + مر

پلی: بسیار

مر: جزئی

پلی به معنای بسیار است و مر به معنی جزء است در نتیجه پلیمر یعنی ماده‌ای که از جزء بسیاری زیادی تشکیل شده است.

پلیمرها می‌توانند طبیعی باشند، مثلاً گیاهان و جانوران، یعنی ریشه‌ی آن پلیمر گیاهی یا جانوری باشد. مثل پشم، چرم، پنبه، ابریشم و... که همگی پلیمر هستند.

پلیمرهای گیاهی مثل آنزیم‌ها، سلولز، نشاسته و پروتئین‌ها.

پلیمرهایی که مورد نظر ما هستند، پلیمرهایی مثل پلاستیک‌ها، چرم‌ها، لاستیک‌ها و... هستند که در اثر عمل پلیمراسیون در کارخانه‌های پتروشیمی تولید شده‌اند.

به‌هرحال پلیمرها، جایگزین بسیاری از قطعات فلزی و چوبی شده‌اند در سال‌های اخیر و خواص بسیار خوبی دارند و قیمت آن‌ها نیز بسیار مناسب است.

پلیمرها، مولکول‌های عظیم‌الجثه‌ای هستند، در حقیقت ماکرومولکول هستند.

از تعداد بسیار زیادی اتم‌های کربن، نیتروژن و... تشکیل شده است.

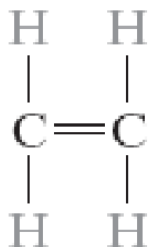
هر پلیمر یک زنجیره‌ی اصلی دارد که در آن‌ها یک تعداد پیوند آزاد (رادیکال آزاد) وجود دارد که می‌توانند به شاخه‌های جانبی متصل شوند.

هر پلیمر یک واحد تکرارشونده یا repeat unit دارد.

و هر پلیمر از یک مونومر تشکیل شده است.

فرق بین واحد تکرارشونده یا مونومر چیست:

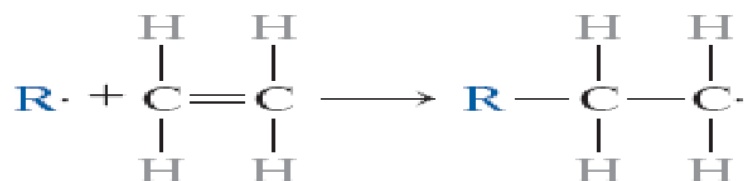
اگر اتیلن را در نظر بگیریم در این صورت  $C_2H_4$  یک مونومر است.



اتیلن یک گاز است که مونومر است.

این گاز می‌تواند بشکند یعنی پیوندهای دوگانه آن بشکند و ساده شود و یک عنصر مثلاً R با C واکنش دهد.

این مونومر در واحدهای پتروشیمی با کاتالیزورها تبدیل می‌شود به:



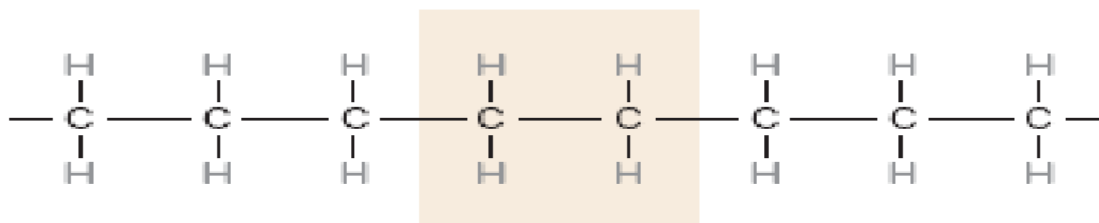
این واحد تکرارشونده یا repeat unit است.

ترکیب شیمیایی مونومر واحد تکرارشونده، یکسان است، هر دوی آن‌ها در این جا  $\text{C}_2\text{H}_4$  است.

ولی ساختار اتمی آن‌ها متفاوت است.

اتیلن در مونومر یک واحد متصل است.

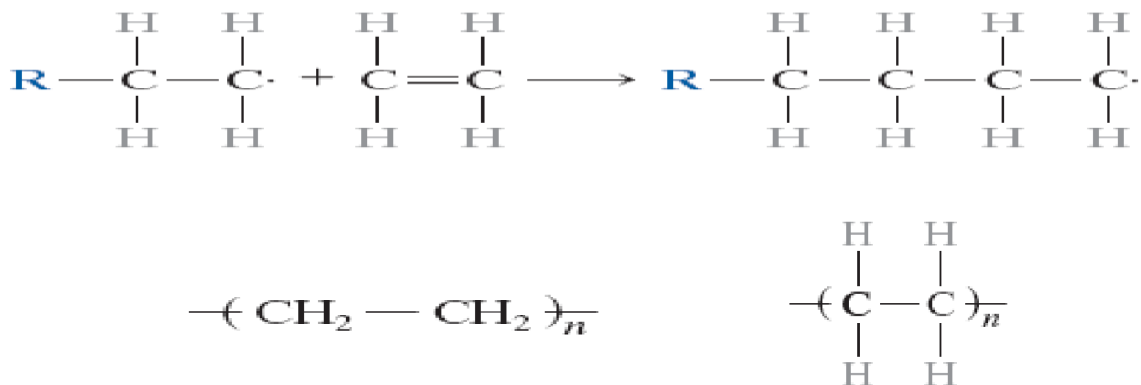
اما در repeat unit جزئی از پلیمر است.



Repeat unit

$\text{R}-\text{C}_2\text{H}_4$  با یک اتیلن دیگر وارد واکنش می‌شود و آن قدر ادامه پیدا می‌کند تا مولکول عظیم‌الجثه‌ای بوجود آید که به

$(\text{C}_2\text{H}_4)_n$  می‌گویند.

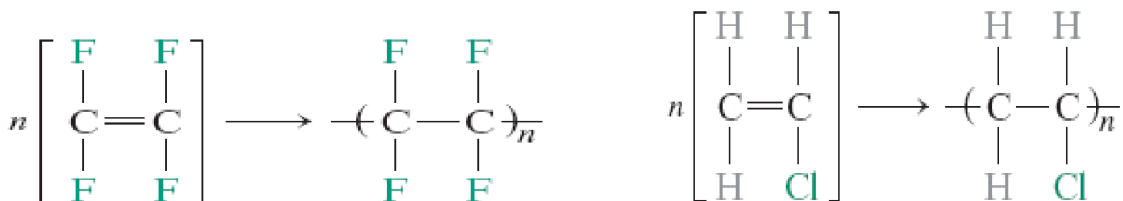


پلیمرها یک خاصیت جالب دارند و آن این است که با عوض شدن دو یا چند عنصر آن‌ها، خاصیت آن‌ها کاملاً عوض می‌شود.

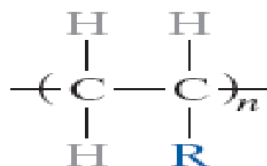
مثلاً:

اگر در پلی اتیلین، تمام Hها عوض شود و به جای آن F قرار گیرد در آن صورت تفلون بوجود می‌آید.

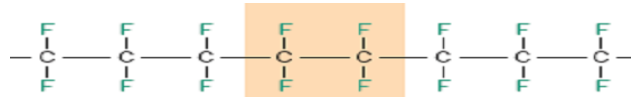
و یا اگر یکی از Hها در اتیلین، به جای آن Cl قرار گیرد در این صورت PVC بوجود می‌آید.



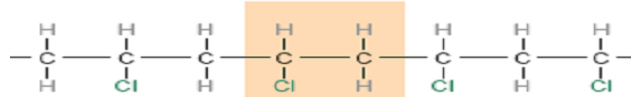
و یا می‌توان به جای R هر عنصر یا مولکول دیگر قرار گیرد.



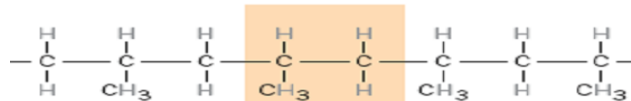
در شکل‌های ذیل انواعی از واحدهای تکرارشونده را مشاهده می‌کنیم.





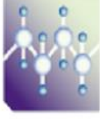

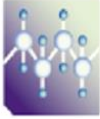
Repeat unit  
(a)





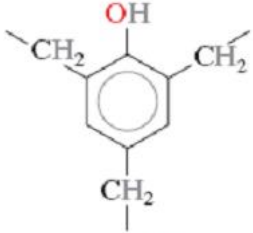



Repeat unit  
(b)




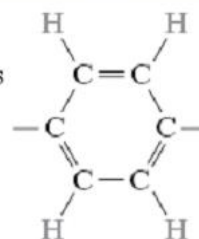
Repeat unit

Polymer	Repeat Unit
 Polyethylene (PE)	$\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$
 Poly(vinyl chloride) (PVC)	$\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array}$
 Polytetrafluoroethylene (PTFE)	$\begin{array}{cc} \text{F} & \text{F} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{F} & \text{F} \end{array}$
 Polypropylene (PP)	$\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array}$
 Polystyrene (PS)	$\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$

(Continued)

Polymer	Repeat Unit
 Poly(methyl methacrylate) (PMMA)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \\   \quad   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{C}-\text{O}-\text{CH}_3 \\    \\ \text{O} \end{array}$
 Phenol-formaldehyde (Bakelite)	
 Poly(hexamethylene adipamide) (nylon 6,6)	$-\text{N}-\left[ \begin{array}{c} \text{H} \\   \\ -\text{C}- \\   \\ \text{H} \end{array} \right]_6-\text{N}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\left[ \begin{array}{c} \text{H} \\   \\ -\text{C}- \\   \\ \text{H} \end{array} \right]_4-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-$
 Poly(ethylene terephthalate) (PET, a polyester)	$-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\overset{b}{\text{C}_6\text{H}_4}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}-\text{O}-$
 Polycarbonate (PC)	$-\text{O}-\overset{b}{\text{C}_6\text{H}_4}-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-$

<sup>b</sup> The  symbol in the backbone chain denotes an aromatic ring as



### تقسیم‌بندی پلیمرها:

پلیمرها می‌توانند به چند دسته تقسیم‌بندی شوند:

هموپلیمر

کوپلیمر

اگر واحد تکراری شونده در پلیمر یکی باشد به آن پلیمر هموپلیمر می‌گویند. (تمام واحدهای تکرارشونده پلیمر از یک جنس است).

اما اگر بیش از یک واحد تکرارشونده داشته باشند به آن پلیمر، کوپلیمر گفته می‌شود.

functionality: گفته شد که یک پلیمر به عنوان مثال اتیلن، رادیکال آزاد دارد، آن رادیکال آزاد می‌تواند به واحدهای دیگر بچسبد که آن را functionality می‌نامند. (تعداد باندهایی که می‌توانند با اطراف بدهد را functionality می‌گویند).

functionality: تعداد باندهایی که مونومر می‌تواند به اطراف بدهد.

گاهی آن را با دست نام می‌برند، یک دست یعنی functionality یک است و سه دست یعنی functionality ۳ است.

تعداد باندها در یک پلیمر می‌تواند متفاوت باشد.

از یک راه دیگر کوپلیمر را تقسیم‌بندی می‌کنند، واحدهای تکرارشونده می‌توانند در چند مدل در کنار هم قرار گیرند. تقسیم‌بندی کوپلیمرها به شرح ذیل است:

رندم

یکی درمیان

توده‌ای

شاخه‌ای

دسته‌بندی دیگر پلیمرها در شکل زیر مشاهده می‌کنیم که به شرح ذیل است.

الف) خطی

ب) شاخه‌ای

ج) cross link

(د) شبکه‌ای ← در این حالت  $3$  functionality است و شبکه تشکیل شده است. وقتی در یک پلیمر  $3$  functionality باشد حتماً شبکه ایجاد می‌شود.

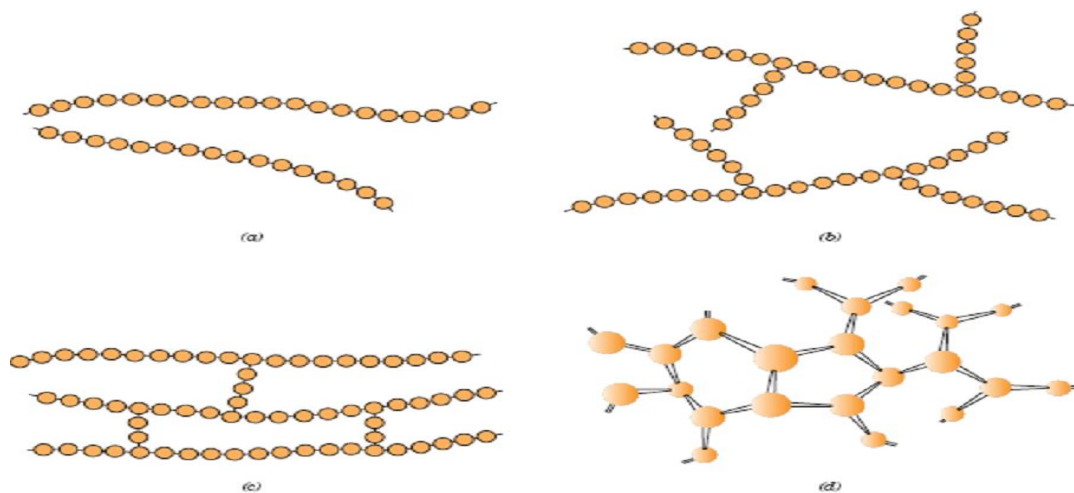


Figure 14.7 Schematic representations of (a) linear, (b) branched, (c) crosslinked, and (d) network (three-dimensional) molecular structures. Circles designate individual repeat units.

دلایل استفاده از پلیمرها در کامپوزیت‌ها: اولاً ساختار پلیمرها از نظر خواص مکانیکی ضعیف است. بنابراین حتماً لازم است پلیمرها تضعیف شوند (PMC نسبت به MMC، سریع‌تر و زودتر پیشرفت کردند چون همان‌طور که در ابتدای درس توضیح داده شد فلزات فی‌المنه مواد برتر مهندسی هستند. اما پلیمرها ضعیف هستند و نیاز به تقویت‌کننده دارند).

ساخت PMC ساده است و خیلی سخت نیست. نیاز به دما و فشار بالای نیست.

عیب کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری: دمای کاری آن‌ها پایین است و در دمای بالا کاربرد ندارند. ضریب انبساط حرارتی آن‌ها بالاست. (ناپایداری ابعادی دارند). نسبت به اشعه و رطوبت حساس هستند.

یک نوع دیگر تقسیم‌بندی پلیمرها به شرح ذیل است که در جلسه‌ی آینده خصوصیات آن‌ها بررسی می‌شود:

(۱) ترموست

(۲) ترموپلاستیک

(۳) الاستومرها



## جلسه پنجم

۹۵/۰۱/۰۹

### ترموپلاستیک‌ها:

ترموپلاستیک‌ها زنجیره‌ای دارند که این زنجیره‌ها هیچ‌گونه ارتباط شیمیایی باهم ندارند. توسط نیروهای ضعیف واندروالسی به هم متصل هستند و نیروهای درهم‌پیچیدگی (دوتا نیرو است: نیروی واندروالسی و نیروی درهم‌پیچیدگی).

این زنجیره‌ها خودبه‌خود خیلی قوی هستند، در زنجیره‌ها پیوند کووالان است مثل پیوندهای C-C، در نتیجه زنجیره‌ها به‌خودی‌خود، به تنهایی قوی هستند.

اما نیروی بین دوتا زنجیره‌ها ضعیف است، بنابراین به راحتی می‌توانند به روی هم سر بخورند و بلغزند.

خواص ترموپلاستیک‌ها:

از نظر مکانیکی، خواص آن‌ها ضعیف است. برای کاربردهایی مانند ظروف آشپزخانه و اسباب‌بازی استفاده می‌کنند، برای کاربردهای صنعتی از ترموپلاستیک‌ها کم‌تر استفاده می‌شود، چون استحکام، خواص مکانیکی و صنعتی آن خیلی پایین است. به همین دلیل است که کامپوزیت‌شان می‌کنند، زمانی که کامپوزیت می‌کنند در حقیقت این ذرات یا الیاف بین این زنجیره‌ها می‌نشینند و لغزش آن‌ها را مشکل می‌کنند.

در این صورت نقش آن‌ها را با مشکل روبه‌رو می‌کنند و به دنبال آن مدول یانگ و استحکام آن‌ها بالا می‌رود.

این پلیمرها ذوب می‌شوند مانند فلزات، وقتی این پلیمرها حرارت می‌بینند، ذوب می‌شوند و وقتی سرد می‌شوند، منجمد می‌شوند. بنابراین این پلیمرها، فرآیند ذوب و انجماد دارند.

حتی بعضی از زنجیره‌های آن‌ها کریستال می‌شوند (یعنی زنجیره‌ها مرتب می‌شود) و حتی بعضی از آن‌ها semi کریستال می‌شود یعنی یک قسمت آن کریستال و قسمت دیگر Semi کریستال می‌شود.

همین که می‌توانیم ذوب کنیم و انجماد صورت می‌گیرد، باعث شده است که خاصیت بازیافت داشته باشند. بنابراین پلیمرهای ترموپلاستیک قابلیت بازیافت دارند.

نمونه‌ای از ترموپلاستیک‌ها:

Acetal

Acrylonitrile Butadiene styrene

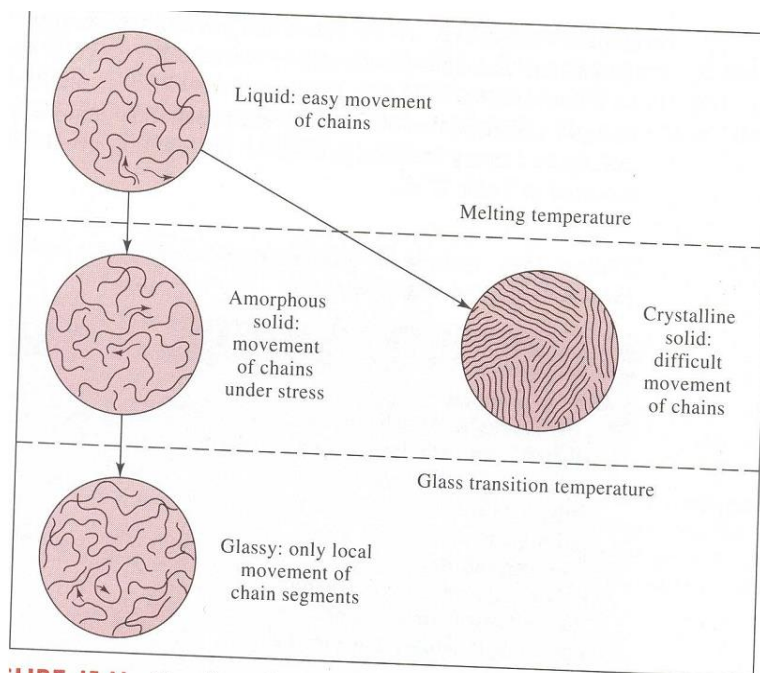
Naylon

PE

PP

PET

تأثیر دما در ساختار ترموپلاستیک در شکل زیر نشان داده شده است (در دمای پایین)، سرعت حرکت زنجیره‌ها به صورت منطقه‌ای انجام می‌شود.



**FIGURE 15-11** The effect of temperature on the structure and behavior of thermoplastic polymers.

وقتی حرارت می‌دهیم (ترموپلاستیک‌ها یک دما به نام دمای شیشه‌ای شدن دارند که با  $T_g$  نمایش می‌دهند)، از این دمای  $T_g$  بالاتر، نرم می‌شوند.

وقتی نرم می‌شوند، حرکت زنجیره‌ها راحت انجام می‌شود و راحت‌تر به دلیل این که پلیمر نرم می‌شود، اگر بالاتر از دمای  $T_g$  برویم و دما افزایش یابد، ذوب می‌شوند و در این حالت زنجیره‌ها آزادانه حرکت می‌کنند. اگر سرد کنیم تحت شرایطی امکان دارد کریستالی شوند و زنجیره‌ها در این حالت به صورت مرتب و منظم قرار می‌گیرد که در این حالت به این پلیمر، پلیمر کریستالی می‌گویند.

بعضی از پلیمرها Semi کریستال است که در این حالت قسمتی از پلیمر کریستالی است و قسمت دیگر آن کریستالی نیست.

Properties	thermoset	thermoplastic
Young's Modulus (GPa)	1.3-6.0	1.0-4.8
Tensile strength(MPa)	20-180	40-100
Max service temp.(°C)	50-450	25-230
Fracture toughness, $K_{Ic}$ (MPa <sup>1/2</sup> )	0.5-1.0	1.5-6.0

ترموپلاستیک‌ها مزایایی نیز دارند:

- (۱) فرآیندشان ساده است، به راحتی می‌توان آن‌ها را ذوب کرد و منجمد کنیم و ریخته‌گری کنیم و...
  - (۲) قابلیت بازیافت دارند.
  - (۳) برای ذخیره و انبارداری آن‌ها روش خاصی نیاز نیست. (انبارداری آن‌ها با مشکل مواجه نیست اما در ترموست‌ها در ذخیره‌سازی و انبارداری با مشکل مواجه خواهیم شد).
  - (۴) داکتیلیته و چقرمگی شکست آن‌ها بالاست، اما سختی آن‌ها و مدول یانگ و استحکام آن پایین است. (سختی بالا نیست).
- مثال‌هایی از ترموپلاستیک‌ها:

Polyenthulene, polystyrenem; poly (ethylene terephthalate) and poly (viny chloride).

## ترموست‌ها:

اکنون به بررسی ترموست‌ها می‌پردازیم، پلیمرهایی هستند که زنجیره‌های آن‌ها به وسیله پیوند جانبی به هم متصل است.

پیوند جانبی در حقیقت یک پیوند شیمیایی است که به وسیله یک پلیمر دیگر انجام می‌شود و زنجیره‌های این پلیمر را به هم متصل می‌کند، که به این عمل، عمل پخت یا کیورینگ می‌گویند. (cure)

در پخت پیوندهای جانبی تشکیل می‌شود، به این پیوندهای جانبی cross link می‌گویند. در حقیقت cross link ها مشخصه‌ی پلیمرهای ترموست هستند. وقتی این cross link تشکیل می‌شوند، مولکول‌های عظیم‌الجثه‌ی سه‌بعدی تشکیل می‌شود و این زنجیره‌ها را به هم متصل می‌کند.

یک مثال از ترموست:

چسب دوقلو، دو تا تیوب است که یکی از آن تیوب‌ها چسب است و دیگری هاردنر است. وقتی این دو تا از هم جدا هستند مشکلی ندارند و هردو به صورت خمیر است، وقتی این دو را باهم مخلوط می‌کنیم سبب می‌شود که هاردنر بین زنجیره‌های چسب اصلی (پلیمر اصلی) می‌نشیند. هاردنر خودش یک پلیمر است و بین زنجیره‌ی چسب اصلی می‌نشیند و آن‌ها را به هم متصل می‌کند و محکم می‌کند. وقتی محکم شد، این واکنش برگشت‌پذیر نیست.

این واکنش یک واکنش برگشت‌پذیر نیست. بنابراین پلیمرهای ترموست دیگر قابلیت بازیافت ندارد. وقتی کیور شد، دیگر به هیچ‌عنوان قابلیت بازگشت ندارند.

این واکنش cure معمولاً یک واکنش گرمازا است، یک مثل دیگری مانت سرد است که وقتی مانت را سرد می‌کنیم این را در قالب می‌ریزیم، چند قطره هاردنر می‌ریزیم و صبر می‌کنیم که خودش را بگیرد. در حقیقت یک پلیمر ترموست است که آن هاردنر می‌آید و آن‌ها را به هم متصل می‌کند و واکنش گرمازا است.

بنابراین به همین دلیل است که گفته می‌شود اگر ماده به دما حساس است، بهتر است مانت سرد نکنیم.

## خواص ترموست:

خواص مکانیکی ترموست‌ها از خواص ترموپلاستیک‌ها بهتر است.

نقطه‌ی ذوب آن بالاتر از ترموپلاستیک‌ها است.

استحکام و مدول یانگ آن از ترموپلاستیک‌ها، بالاتر است.

سختی آن بالاتر از ترموپلاستیک‌ها است.

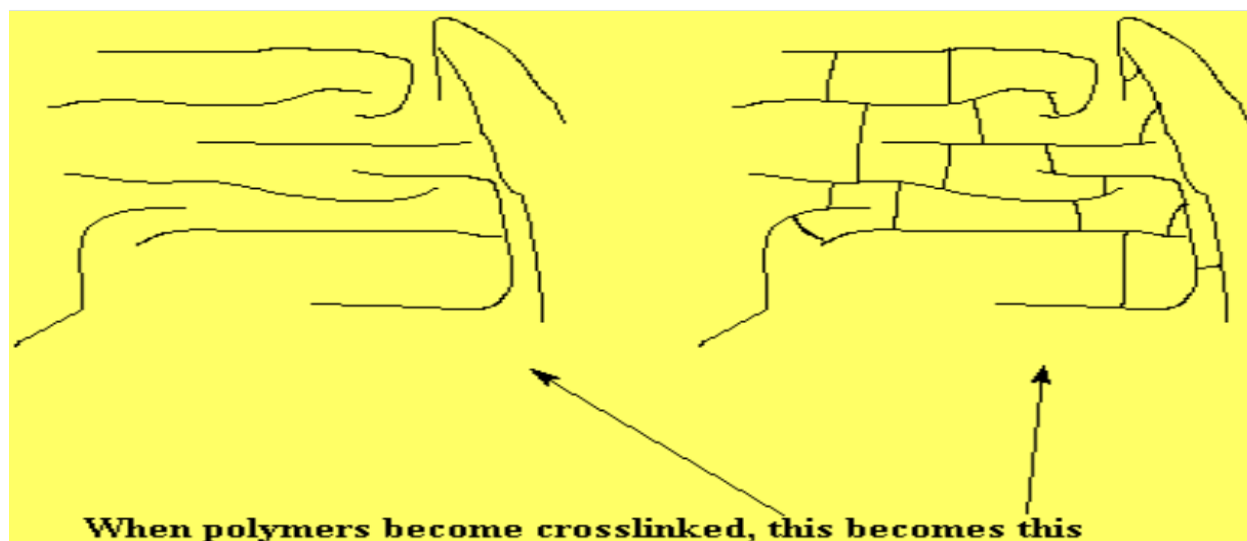
داکتیلیته‌ی آن از ترموپلاستیک‌ها، کم‌تر است.

از نظر ساختار نیز مشخص است که cross link ایجاد می‌شود و پیوندهای جانبی تشکیل می‌شود.

واکنش cross link و یا واکنش cure و پخت هم برگشت‌پذیر نیست. بنابراین این پلیمرهای ترموست‌ها، قابلیت بازیافت ندارند. (پلیمرهای ترموست قابلیت بازیافت ندارند).

ترموست‌ها قابلیت ذوب شدن ندارند. (ذوب نمی‌شوند، فقط تجزیه می‌شوند).

عمل cure را در شکل ذیل مشاهده می‌کنیم.



در شکل سمت چپ قبل از عمل cross link را مشاهده می‌کنیم و در شکل سمت راست بعد از cross link هست که بعد از این عمل، پیوندهای جانبی تشکیل می‌شوند.

این پلیمرها به شدت cross link می‌شوند: بنابراین این زنجیره‌ها به راحتی می‌توانند روی هم بلغزند. استحکام و سختی خوبی دارند (بالاست) اما داکتیلیته‌ی آن‌ها کم است.

خواص ضربه‌ی آن‌ها نیز زیاد خوب نیست.

دمای شیشه‌ای شدن آن بالا است و در حقیقت رفتار مادتری را تا حدودی از خود نشان می‌دهند.

مثال‌هایی از ترموست‌ها:

Polyester

Vinyl ester

Epoxy

Phenolic

Polyimides

polyurethane

### الاستومرها:

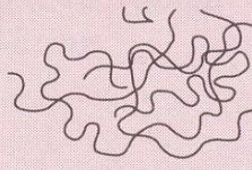
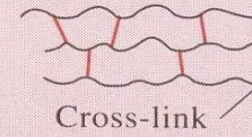
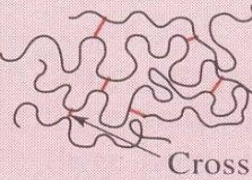
الاستومرها پیوند جانبی دارند، در حقیقت cross link دارند اما تعداد cross link آن کم است.

مثلاً ترموست ۴۰ تا ۵۰ درصد cross link دارد یعنی زنجیره‌ها ۴۰ تا ۵۰ درصد به هم متصل است، اما در الاستومرها خیلی کم است و فقط بعضی نقاط به هم متصل است.

چون بعضی از نقاط به هم cross link کرده است، قابلیت کشسان زیادی دارند. الاستومرها تا ۲ برابر یا ۳ برابر مواد اولیه‌اش می‌تواند کش بیاید و افزایش طول داشته باشد.

الاستومرها پیوند جانبی آن‌ها خیلی کم است و تنها در بعضی از نقاط است. گاهی اوقات به آن‌ها لاستیک نیز گفته می‌شود. به عبارت دیگر اصطلاح دیگر برای الاستومرها، لاستیک است.

در تصویر زیر به خوبی به صورت شماتیک سه دسته‌ی پلیمرها باهم مقایسه شده است.

Behavior	General Structure	Diagram
Thermoplastic	Flexible linear chains	
Thermosetting	Rigid three-dimensional network	 Cross-link
Elastomers	Linear cross-linked chains	 Cross

همان طور که در تصاویر بالا مشاهده می‌شود در ترموپلاستیک، زنجیره‌ها درهم فرو رفته‌اند و زنجیره‌های قابل انعطاف و خطی مشاهده می‌شود.

ترموست: یک شبکه‌ی سه‌بعدی مستحکم است.

الاستومرها: یک‌جایی فقط cross link وجود دارد، نقاط محدودی cross link وجود دارد و به هم متصل است.

اما چرا لازم است که خواص پلیمرها را از لحاظ ساختاری بدانیم: خواص آن‌ها شامل درجه‌ی کریستال شدن آن‌ها است، در دانسیته و استحکام و غیره مؤثر است. درجه‌ی cross link است که چه مقدار cross link شده‌اند. آیا مثلاً لاستیکی هستند به حالت ترموست دارند. نقطه‌ی ذوب، نقطه‌ی  $T_g$  و...

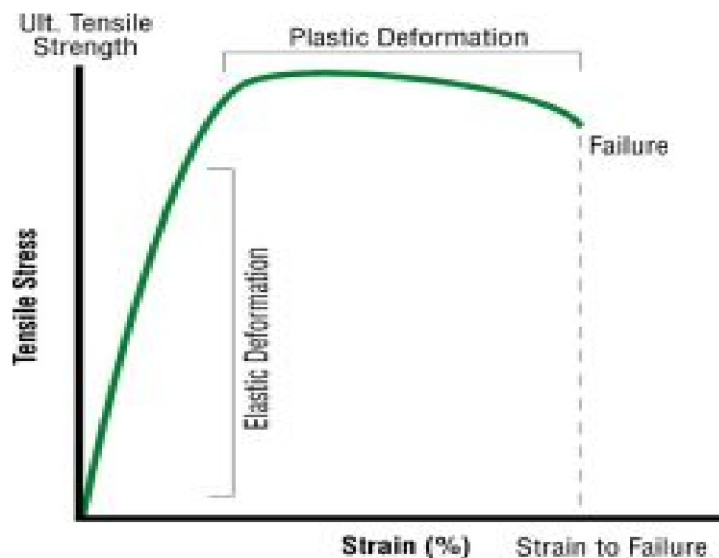
اما ضرورت دارد که اطلاعات خاص مکانیکی پلیمرها را مطلع باشیم.

پلیمرها خاصیتی دارند که به آن‌ها خاصیت ویسکوالاستیسیته می‌گویند که به توضیح این خاصیت می‌پردازیم.

اگر به پیوندهای کووالان نیرو یا تنش وارد شود، سبب افزایش طول عمر می‌شود با یک ضریب ثابت.

$$\sigma = k\varepsilon$$

که به این قانون هوک می‌گویند.



وقتی نمودار تنش- کرنش را رسم می‌کنیم (به صورت بالا)، قسمت ابتدایی یا اول آن منحنی خطی است که قسمت الاستیک آن است (قانون هوک)، بنابراین پلیمرها می‌توانند خاصیت الاستیک داشته باشند و برگشت پذیر است. یعنی وقتی به پلیمر تنش وارد می‌کنیم، افزایش طول پیدا می‌کند و وقتی نیرو را برمی‌داریم و رها می‌کنیم، به حالت اولیه خود برمی‌گردد. (برای تمام پلیمرها صادق است اما الان بیش تر بحث مربوط به پلیمرهای ترمولاستیک است).

یک خاصیت دیگری که دارند خاصیت ویسکوز است، یعنی اگر نیرو را وارد کنیم، این نیرو هم چنین سبب حرکت زنجیره‌های روی هم خواهد شد و باعث سر خوردن زنجیره‌ها روی هم خواهد شد. وقتی زنجیره‌ها روی هم سر می‌خورند، یک حالت

ویسکوز می‌دهد و از قانون نیوتون پیروی می‌کند یعنی  $\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta \dot{\varepsilon}$  یعنی تنش متناسب است با نرخ کرنش که این در

حقیقت تعریف ویسکوزیته است.

تنشی که ما وارد می‌کنیم سبب ایجاد یک کرنش می‌شود که نرخ کرنش ضریب معادله‌ی ویسکوزیته است ( $\eta$ ) که به رابطه‌ی

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta \dot{\varepsilon} \text{ (ویسکوزیته‌ی نیوتونی).}$$

وقتی زنجیره‌ها کش می‌آیند، قانون هوک برقرار است و وقتی زنجیره‌ها روی هم سر می‌خورند قانون ویسکوزیته‌ی نیوتونی

است.



پلیمرها هر دو تا دارند و چون هر دو را دارند به آن‌ها ویسکوالاستیک می‌گویند. (ویسکوزی: از قانون ویسکوز نیوتونی تبعیت می‌کند. الاستیک: از قانون هوک تبعیت می‌کند).

حالا باید ببینیم این رفتارش الاستیک است یا رفتار ویسکوز است:

به دو تا عامل بستگی دارد: یکی دما است و دیگری سرعت اعمال نیرو است.

اگر دما بالا باشد، حالت ویسکوز نشان می‌دهد. زنجیره‌ها روی هم می‌لغزند و ویسکوز است.

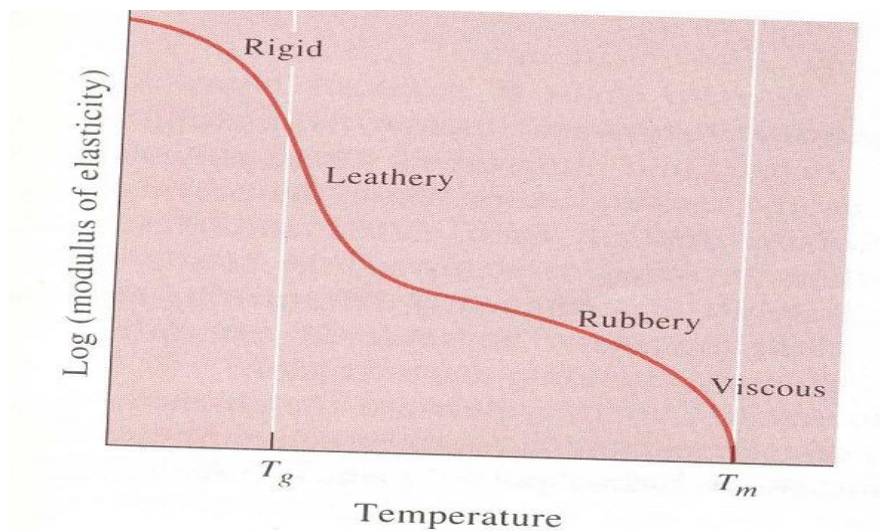
اگر دما پایین باشد، حالت الاستیک را نشان می‌دهند.

اگر سرعت اعمال نیرو زیاد باشد، حالت الاستیک را نشان می‌دهد.

اگر سرعت اعمال نیرو کم باشد، حالت ویسکوز را نشان می‌دهد.

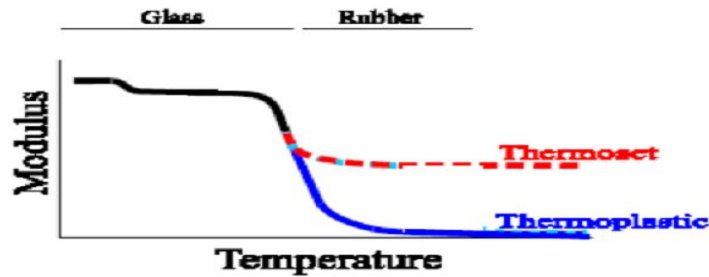
یک پلیمر را چکش بزنیم، چون سرعت اعمال نیرو زیاد است می‌شکند. اما اگر نیرو کم کم به آن وارد کنیم، کش می‌آید. در دمای بالا پلیمر کش می‌آید.

اگر یک پلیمر را از نقطه نظر تأثیر دما روی مدول الاستیسیته‌اش بررسی کنیم: تا قبل از دمای  $T_g$  (دمای شیشه‌ای شدن) محکم است و بین  $T_m$  و  $T_g$  حالت چربی و لاستیکی دارد و بعد از  $T_m$  ذوب می‌شود.



در شکل زیر ویسکوالاستیسیته‌ی پلیمر ترموست و ترموپلاستیک نشان داده شده است و در حقیقت نمایش داده شده است که دما و مدول الاستیسیته به چه ترتیب عمل می‌کنند.

## Viscoelastic Polymer Behavior

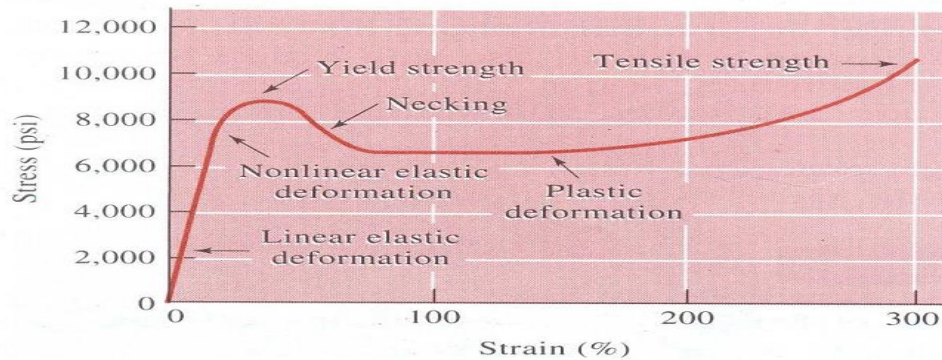


پلیمرها یک خاصیت دیگر نیز دارند و آن این است که در نمودار تنش - کرنش پلیمرها یک سری تفاوت با منحنی تنش کرنش فلزات دارد.

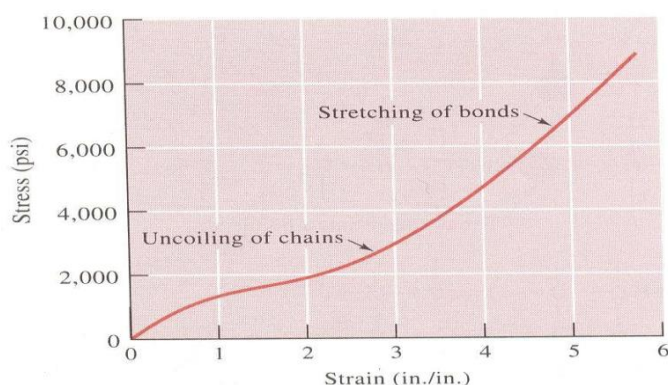
فولاد کم کرنش: اگر منحنی تنش - کرنش آن را مشاهده کنیم، در ابتدا حالت الاستیک دارد و بعد وارد منطقه‌ی پلاستیک می‌شود. گلوپی می‌شود و می‌شکند.

اما برای پلیمرها برعکس است به این صورت که بعد از؟؟؟ شدن شروع به قوی شدن می‌کنند و می‌شکنند. تغییر طول می‌دهد و تنش بیش تری را تحمل می‌کند. پلیمر شروع به قوی شدن می‌کند و تغییر طول می‌دهد و تنش بیش تری را تحمل می‌کند.

منحنی تنش - کنش برای نایلون ۶-۶ در زیر مشاهده می‌شود.



در نمودار ذیل تنش - کرنش برای پلیمرها را نشان داده است.



**FIGURE 15-34** The stress-strain curve for an elastomer. Virtually all of the deformation is elastic; therefore, the modulus of elasticity varies as the strain changes.

چه تفاوتی بین منحنی تنش - کرنش یک فلز و یک پلیمر وجود دارد:

پلیمر به محض این که تحت کشش قرار می‌گیرد، به محض این که گلوبی می‌شود، می‌خواهد پاره و گسیخته شود و زنجیره‌ها مرتب می‌شوند.

در منطقه‌ی گلوبی، زنجیره‌ها مرتب شده‌اند ← زنجیره‌ها مرتب شده‌اند و در راستای نیرو قرار می‌گیرند، در این صورت نیروی بیشتری را می‌توانند تحمل کنند، (زنجیره‌ها در راستای نیرو قرار می‌گیرند و نیروی بیشتری را تحمل می‌کنند) و به همین دلیل است که پلیمر قوی می‌شود.

البته یک نکته دیگر این است که نیروهای واندروالس نیز بین آن‌ها بیشتر می‌شود چون به هم نزدیک می‌شوند، اما عامل اصلی آن این است که نیرو در جهت زنجیره‌ها وارد می‌شود.

تفاوت دیگر منحنی تنش - کرنش پلیمر و فلز، این است که در ناحیه‌ی الاستیک باهم تفاوت دارد. در ناحیه‌ی الاستیک فلز فقط یک خط وجود دارد که ضریب زاویه‌اش مدول یانگ است. اما در پلیمرهای یک تغییر شیب می‌دهد که وقتی نیرو را وارد می‌کنیم یک تغییر شیب می‌دهد (که البته برای الاستومر است)، دلیلش این است که زنجیره‌ها اول از هم باز می‌شوند، بعد زنجیره‌ها کش می‌آیند. زنجیره‌ها درهم پیچیده‌اند، در مرحله‌ی اول ابتدا از زنجیره‌ها از هم باز می‌شود و بعد کش می‌آیند (پیوندهای کووالان تحت تأثیر قرار می‌گیرند) به همین دلیل است که تغییر شیب می‌دهند.

به صورت خلاصه:

ترموپلاستیک‌ها موادی نیستند که خیلی ایده‌آل باشند و برای کاربردهای صنعتی خیلی قوی نیستند و پایداری ابعادی نیز ندارند، بنابراین از مواد پرکننده و یا فیلرها استفاده می‌کنند یا الیاف یا ذرات، در این صورت حرکت زنجیره‌ها را نسبت به هم مشکل می‌کنیم و پلیمر را تقویت می‌کنیم.

### کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری:

کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری خیلی مورد توجه هستند، به خاطر این که روش ساخت آن‌ها ارزان و خیلی ساده است و نسبت به مواد تقویت نشده، خواص مکانیکی‌شان خیلی بهتر می‌شود. مخصوصاً استحکام کنش آن‌ها.

به عنوان مثال استحکام کشش یکی از قوی‌ترین رزین‌ها اپوکسی است (اپوکسی قوی‌ترین پلیمر است. ترموست است و یکی از بهترین پلیمرهای ترموست، رزین اپوکسی است). برابر با ۱۴۰ مگا پاسکال است (نسبت به فلزات استحکام آن‌ها خیلی بالا نیست). خواص مکانیکی اپوکسی ضعیف است که با کامپوزیت‌سازی قوی می‌شوند. خواص ضربه‌ی آن‌ها پایین است یا به عبارتی مقاومت به ضربه پایین است.

اما وقتی کامپوزیت‌سازی صورت می‌گیرد و PMC می‌سازیم، سختی آن‌ها بالا می‌رود، مقاومت به سایش آن‌ها بالا می‌رود، مقاومت به خوردگی آن‌ها بالا می‌رود، مقاومت به پارگی بالا می‌رود و پیوندشان نیز محکم می‌شود.

پلیمرها ضعیف هستند و با کامپوزیت‌سازی، قوی می‌شوند و باعث بهبود خواص می‌شوند.

به عنوان مثال صندلی از جنس فایبرگلاس اگر الیاف داخل آن وجود نداشت، در این صورت قوی نبودند اصلاً خود پلیمر به تنهایی قابلیت ساخت ندارد و داخل آن‌ها در این صندلی الیاف شیشه قرار می‌گیرند.

در بعضی از موارد اگر در AL، الیاف Sic بزنیم، ضرر ایجاد می‌شود و استحکام پایین می‌آید به دلیل این که خود AL قوی است. اما در پلیمرها با کامپوزیت‌سازی، خواص بهبود می‌یابد و قوی می‌شود.

- معایب کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری چیست؟

خواص حرارتی آن‌ها ضعیف است. چون تقویت‌کننده‌هایی که می‌زنیم مثل الیاف کولار، الیاف شیشه، کربن و... خواص حرارتی بهبود نمی‌آید بلکه خواص مکانیکی آن بهبود می‌یابد.

CTE آن بالا است.

پلیمرها در برابر گرما و سرما، تغییرات ابعادی‌اش بالاست.

- ترموست‌ها بیش‌ترین کاربرد را دارند. (اپوکسی و فنولیک) البته از ترموالاستیک‌ها نیز به‌خاطر دانسیته‌ی بالایی که دارند، استفاده می‌شوند. مثل نایلون، آکرلیک و پلی‌پروپیلین که ترموالاستیک هستند.
- الیاف کربن - کولار - بازالت - شیشه برای تقویت پلیمرها استفاده می‌شوند.

### روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری:

برای ساخت کامپوزیت‌ها چه زمینه‌ی پلیمری، چه سرامیکی و چه فلزی، هنر است توأم با علم.

چگونه فاز دوم را به زمینه ادغام کنیم تا به آن خواص مدنظر برسیم. (هدف از کامپوزیت‌سازی)

در انتخاب روش تولید به بسیاری از مواد باید دقت کنیم مثل: نوع الیاف، ابعاد الیاف، نوع ماتریس، کاربرد آن، قیمت آن و...

کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری می‌توانند تحت تأثیر عوامل مختلف تولید قرار بگیرند مثل: خواص الیاف، جهت‌گیری الیاف، درصد الیاف، خواص ماتریس و...

می‌توان خواص کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری را از قانون مخلوط‌ها بدست آوریم که در فصل چهارم بیش‌تر توضیح داده می‌شود.

قایق، قطار، اتومبیل، قطعات ماهواره، کتشی‌های ضدگلوله و... مواردی هستند که از کامپوزیت‌های پلیمری استفاده می‌شود.

برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری دو روش کلی وجود دارد:

الف) روش‌های قالب باز

ب) روش‌های قالب بسته

عوامل مرتبط به انتخاب روش ساخت: خواص مکانیکی - مقاومت حرارتی - قیمت - سرعت تولید - فاز دوم.

در روش قالب باز: قالب به صورت باز است و مواد پلیمری و الیاف مراحل آن قرار می‌گیرد و بعد قطعه ساخته می‌شود. این روش‌ها برای قطعات ساده و بزرگ کاربرد دارد. مثل: استخرها، قطعات قایق و...

۵ روش برای قالب باز وجود دارد که به شرح ذیل است:

روش لایه گذاری دستی hand lay-up

روش اسپری Spray-up method

قالب گیری کیسه‌ای Bag moulding

Filament winding

Prepreg moulding

### ۱- روش لایه‌گذاری دستی:

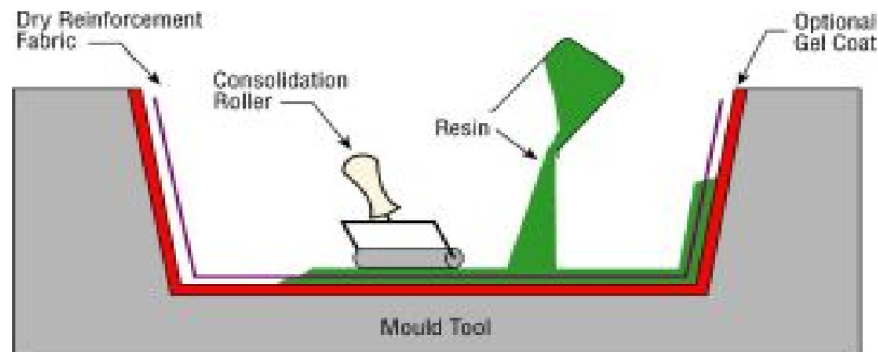
ابتدا روش لایه‌گذاری دستی یا hand lay-up را توضیح می‌دهیم، روش لایه‌گذاری دستی به این ترتیب است که در ابتدا یک ماده‌ای به نام gel coat روی قالب قرار می‌دهیم که در انتهای این روش که کامپوزیت ساخته می‌شود، به راحتی از قالب جدا می‌شود.

بعد از آن الیاف را در داخل قالب مواد می‌دهیم و رزین روی آن می‌ریزیم. در ادامه با یک غلطک روی آن‌ها می‌کشیم. زمانی که با غلطک می‌کشیم، این رزین به داخل الیاف می‌رود و خلل و فرج الیاف را پر می‌کند.

بعد دوباره می‌توان یک مایه الیاف ریخت و دوباره رزین ریخت و عملیات توضیح داده شه را تکرار کرد تا به ضخامت مورد نظرمان برسیم.

بعد از آن اجازه می‌دهیم که cure شوند (که معمولاً در هوا cure می‌شوند) زمانی که cure شد از قالب آن را خارج می‌کنیم. در شکل زیر روش لایه‌گذاری دستی نشان داده شده است.

## Wet lay-up/Hand Lay-up



\*یک نکته:

در ترموپلاستیک گفته شد که انبارداری مشکل وجود ندارد، اما در ترموست انبارداری با مشکل روبه‌رو است، به دلیل این که اگر هاردنر را مخلوط کنیم در این حالت دیگر نمی‌توانیم آن را نگه داریم و امکان دارد در برابر هوا cure شود. در بعضی از مواقع کارخانه هاردنر را مخلوط کرده است و اعلام کرده است که حتماً در یخچال نگهداری شود چون در هوای معمولی، cure می‌شود، به همین دلیل در یخچال نگهداری می‌کنند. بنابراین انبارداری ترموست سخت است.

روش لایه‌گذاری دستی یک روش بسیار ساده است و تجهیزات به کار رفته در این روش بسیار ساده است. ارزان است. اما این روش یک عیب دارد و آن عیب این است که رزینش بایستی ویسکوزیته‌اش پایین باشد.

اگر ویسکوزیته پایین باشد، مشکل این است که خواص مکانیکی آن ضعیف می‌شود، و میزان بخاراتش و یا میزان مواد آلوده‌کننده آن نیز زیاد می‌شود.

مولکول‌هایش کوچک است و خواص مکانیکی آن ضعیف است و میزان آلوده‌کننده آن نیز بالا است، به همین دلیل بایستی سیستم‌های تهویه قوی وجود داشته باشد چون مواد آلوده‌کننده وجود دارد.

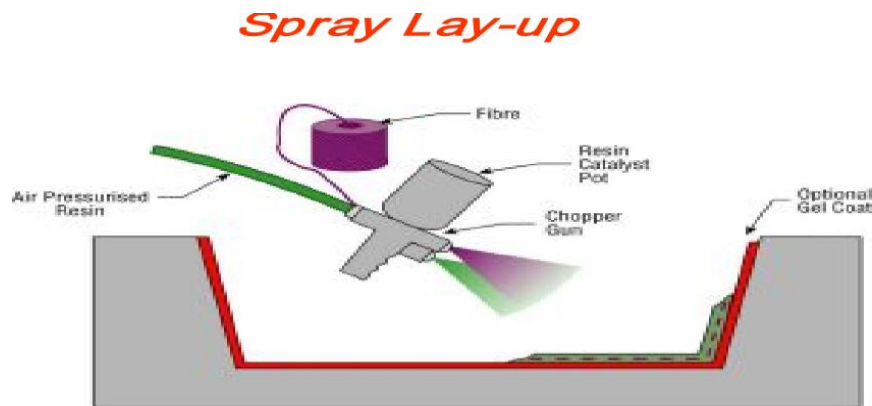
(به دلیل این که باید رقیق باشد و خلل و فرج‌ها را پر کند بایستی ویسکوزیته پایین باشد).

۲- روش Spray - up:

روش دیگر روش Spray - up است که در این روش قالب باز است، اما الیاف در تفنگ (اسپری) قرار می‌گیرد. (الیاف کوتاه) و رزین نیز به قالب پاشیده می‌شود. هم‌زمان رزین و الیاف به داخل قالب پاشیده می‌شود و در این حالت دیگر نیازی به غلطک نمی‌باشد.

چون با فشار پاشش صورت می‌گیرد به درون قالب، لذا بعد از آن اجازه می‌دهند که cure شوند و بعد از آن از قالب خارج می‌شوند.

Gel coat نیز در این روش روی قالب می‌ریزند که در انتهای کار، کامپوزیت به راحتی از قالب خارج می‌شود.



حسن این روش این است که فرآیند آن ساده است و تجهیزات پیچیده‌ای ندارد.

معایب این روش:

۱- ویسکوزیته باید پایین باشد که در این حالت نتیجه می‌دهد خواص مکانیکی آن ضعیف است و میزان آلوده‌کننده نیز بالا است.

۲- الیاف پیوسته را نمی‌توان استفاده کرد چون در نهایت الیاف کوتاه و بریده می‌شود.



در شکل زیر مخلوط الیاف بریده شده و رزین به داخل قالب پاشیده می‌شود که در این تصاویر این روش نشان داده شده است.



FIGURE 6.28 Robotic spray-up process for making a bathtub. The robot is applying chopped fiberglass with gel. (Courtesy of Fanuc Robotics.)

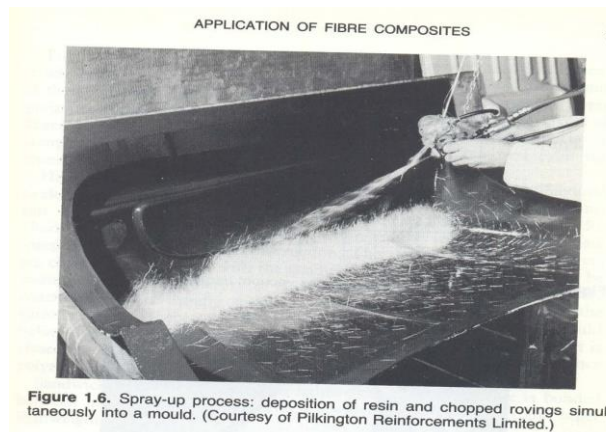


Figure 1.6. Spray-up process: deposition of resin and chopped rovings simultaneously into a mould. (Courtesy of Pilkington Reinforcements Limited.)

برای این مشکل آلودگی راحل کنند، از ربات استفاده می‌کنند و عملیات پاشش توسط ربات صورت می‌گیرد.

از جمله مزایای آن این است که سال‌ها از این روش استفاده می‌کنند و قیمت آن نیز پایین است. سرعت آن بالا است. عیب دیگر این روش این است که مجبوریم مقدار رزین را زیاد کنیم و مقدار الیاف را کم کنیم، به دلیل این که اگر مقدار رزین کم باشد، تخلخل خیلی زیاد می‌شود و بایستی میزان رزین بالا و الیاف کم باشد.

از این روش فقط الیاف کوتاه استفاده می‌شود که این یک مشکل دیگر است. لذا خواص مکانیکی ضعیف‌تر است.

رزین باید ویسکوزیته‌اش پایین باشد و باتوجه به پایین بودن ویسکوزیته، خواص مکانیکی آن ضعیف می‌شود و مواد آلوده‌کننده بالا می‌رود که باعث ضرر در سلامتی است.

به صورت کلی مزایا و معایب این روش به شرح ذیل است:

- مزایای این روش:

۱- سال‌هاست که از این روش استفاده می‌شود.

۲- ارزان است و بدست آوردن کامپوزیت از این روش بسیار سریع است.

- معایب این روش:

۱- مقدار رزین در این روش از حالت قبلی هم بالاتر است. چون تخلخل آن زیاد است، به دلیل این که غلطک در این روش وجود ندارد بنابراین میزان رزین را زیاد می‌کنیم. درصد الیاف را کم می‌کنیم. چون در این روش میزان رزین بالا است، از نظر وزنی از روش دستی سنگین‌تر است.

۲- الیاف کوتاه را می‌توان به کار برد، در این صورت خواص مکانیکی ضعیف‌تر است.

۳- رزین باید ویسکوزیته‌اش پایین باشد تا جذب اسپری شود که روی خواص مکانیکی تأثیر دارد.

۴- آلوده‌کنندگی این روش زیاد است و برای سلامتی ضرر دارد.

### ۳- روش قالب‌گیری کیسه‌ای:

در روش قالب‌گیری کیسه‌ای، قالب باز است و مانند دو روش قبل است، تنها تفاوت آن این است که از یک کیسه استفاده می‌شود و روی کامپوزیت قرار می‌دهند.

این روش به وسیله‌ی فشار اعمال کنند یا خلا اعمال کنند، بستگی دارد.

اگر فشار را اعمال کنند: کیسه را روی کامپوزیت قرار می‌دهند و فشار می‌آورند (فشار هوای گاز ازت...)

اگر به خلا متصل باشد: کیسه فشار می‌آورد روی کامپوزیت و به جای استفاده از غلطک، از ??? استفاده می‌کنند.

در این روش رزین را با الیاف مخلوط می‌کنیم و به جای کشیدن غلطک، کیسه روی آن قرار می‌گیرد. بنابراین فشار وارد شده باعث فشرده شدن است در صورتی که کیسه را از هوا خلا کنیم. یا این که روی کیسه را فشار گاز می‌گیریم.

## Bag Moulding

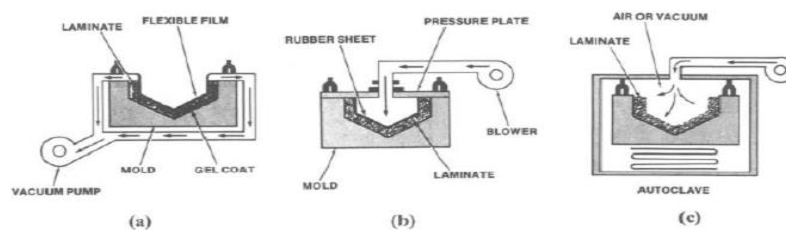


Fig. 9.10 Bag moulding methods. (a) vacuum, (b) pressure, (c) autoclave. (Courtesy of Fibreglas Canada, now Owens Corning.)

روش دیگر این است که در اتوکلاو قرار می‌دهند که در حقیقت اتوکلاو کوره‌ای است که اتمسفر، فشار و دما را کنترل می‌کند. کیسه روی آن کامپوزیت قرار می‌گیرد و بعد از آن، مجموعاً در اتوکلاو قرار می‌دهند. اتوکلاو فشار می‌آورد و دما هم بالا می‌رود. در ادامه cure می‌شود و تخلخل‌ها کم می‌شود. و در انتها قطعه‌ی مورد نظر ساخته می‌شود.

یکی از مزیت‌های این روش این است که می‌توانیم مقدار لایه‌ها و به‌صورت کلی درصد الیاف را بالا ببریم. در روش قبل به‌صورت مثال اگر ۲۰ - ۳۰ درصد الیاف و ۸۰ - ۷۰ درصد رزین وجود داشت در این روش می‌توان ۵۰ درصد الیاف و ۵۰ درصد رزین استفاده کرد.

چون کیسه فشارقوی زیادی اعمال می‌کند، بنابراین می‌توان درصد الیاف را بالا برد. نگرانی این وجود ندارد که تخلخل ایجاد کند، رزین در بین الیاف قرار می‌گیرد و کاملاً پرمی‌کنند. در نتیجه می‌توان درصد الیاف را بالا ببریم و در این صورت خواص مکانیکی بالا می‌رود.

تخلخل کم‌تر می‌شود، چون از فشار استفاده می‌شود در این روش تخلخل کم‌تر می‌شود.

ترشوندگی بهتر می‌شود، در کامپوزیت‌های ترشوندگی عامل مهمی است (الیاف با ماتریس باید ترشوندگی داشته باشد).

افزایش ترشوندگی داریم و خواص مکانیکی افزایش می‌یابد.

از نقطه‌نظر سلامتی و بهداشت بهتر است، چون در این روش از کیسه استفاده می‌شود. گازهای تخلیه‌شده به بیرون در کارگاه هدایت می‌شود و مواد آلوده‌کننده در فضای کارگاه نمی‌آید.

از جمله عیب این روش این است که یک کیسه روی کامپوزیت قرار می‌گیرد و یک فرآیند اضافی محسوب می‌شود. این فرآیند اضافی باعث می‌شود که قیمت بالاتر رود.

این کیسه‌ها نیز یک‌بار مصرف هستند که هزینه‌ها را بالا می‌برد.

مهارت حائز اهمیت است به‌عبارت دیگر و این روش قرار دادن کیسه بر روی کامپوزیت نیاز به مهارت دارد.

مخلوط‌سازی و کنترل رزین نیز نیازمند مهارت اپراتور است.

## ۴- روش رشته‌پیچی:

### Filament winding

روش دیگر، روش رشته‌پیچی است که این روش در آمریکا بیش‌تر تکامل پیدا کرده است و برای ساخت لوله‌ها و... از این روش استفاده می‌شود.

در این روش به این ترتیب است که الیاف از بین حمام رزین عبور می‌کند، بعد الیاف آغشته به رزین می‌شود. سپس از بین دو تا غلطک عبور می‌کند (دوتا گیره). در این صورت رزین اضافه‌اش می‌ریزد و بعد دور این استوانه می‌پیچد و الیاف را دور خود می‌پیچاند. به این ترتیب یک لوله تشکیل می‌شود.

Cure می‌شود و بعد از cure شدن آن را از دور آن استوانه خارج می‌کنند.

جهت الیاف می‌توانند شعاعی باشند یا قطری باشند، باتوجه به خواص مکانیکی که مدنظر است می‌توان جهت الیاف را مشخص کرد.

در نهایت با کمک ربات‌ها این کار صورت می‌گیرد و در تمام جهات الیاف قرار می‌گیرند و خواص مکانیکی خیلی خوبی بدست می‌آید.

در شکل زیر روش رشته‌پیچی را نشان داده است که به‌صورت رباتیک این روش انجام می‌شود و در این جا (در این شکل) الیاف در جت طول قرار دارند. در تصویر نشان داده است که یک لوله‌ی ۱۲ متری از روش رشته‌پیچی تولید شده است.

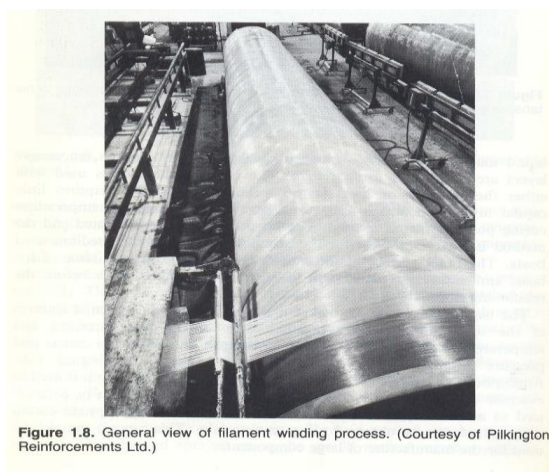


Figure 1.8. General view of filament winding process. (Courtesy of Pilkington Reinforcements Ltd.)

لوله‌های نفت، لوله‌های آب و فاضلاب و... از این روش تولید می‌شوند.

کپسول‌های CNG و مخازن تحت فشار از این روش برای تولیدشان استفاده می‌کنند.

فشارهای بالا را تحمل می‌کنند.

کپسول غواص‌ها، اگر از جنس فلز باشند در این صورت سنگین هستند و اگر این کپسول‌ها از جنس پلیمر استفاده شود، وزن

آن کپسول‌ها  $\frac{1}{3}$  کاهش می‌یابد و سبک‌تر می‌شود.

- مزایای روش رشته‌پیچی:

روش خیلی سریع است.

باتوجه به این روش خیلی سریعی است، روش اقتصادی است.

درصد رزین می‌تواند کنترل شود. (توسط دوتا گیره‌ای که در توضیح داده شد می‌توان درصد رزین را کنترل کرد. اگر این دوتا

گیره به هم نزدیک شود، در این صورت درصد رزین کم می‌شود و اگر این دوتا گیره باز شوند در این حالت درصد رزین بیش‌تر

می‌شود).

قیمت الیاف حداقل است.

باتوجه به این که فرآیندهای ثانویه برای بافت الیاف نیاز نیست بنابراین قیمت الیاف حداقل است.

هیچ فرآیند جانبی بر روی الیاف انجام نمی‌شود، بنابراین قیمت الیاف حداقل است.

خواص ساختمان آن‌ها می‌تواند خیلی خوب باشد، چون از الیاف پیوسته استفاده می‌شود.

در الگوهای پیچیده می‌توان قرارداد در این صورت خواص مکانیکی خوب می‌شود. باتوجه به نیروهایی که به آن وارد می

شود، می‌توان جهت الیاف را مشخص کرد.

- معایب روش رشته‌پیچی:

این فرآیند محدود است به قطعات محدب (لوله، مخزن و...).

اگر معقر باشد در این صورت به این روش نمی‌توان قطعه را تولید کرد.

الیاف را به راحتی نمی‌توان در طول قرار داد.

قیمت ماده‌ای که استفاده می‌شود بالا است.

سطح خارجی آن با قالب در تماس نیست، به همین دلیل از نظر زیبایی مشکل ساز است. (سطح آن زیبا است).

چون از رزین با ویسکوزیته‌ی پایین استفاده می‌شود، این عیب را دارد که از نظر سلامتی و خواص مکانیکی نیز مشکل ساز می‌باشد.

کاربرد این روش برای مخازن ذخیره مواد شیمیایی، خطوط لوله، سیلندرهای گاز، کپسول آتش نشانی، کپسول اکسیژن، کپسول‌های تنفس و انواع کپسول‌های گاز.

جلسه ششم

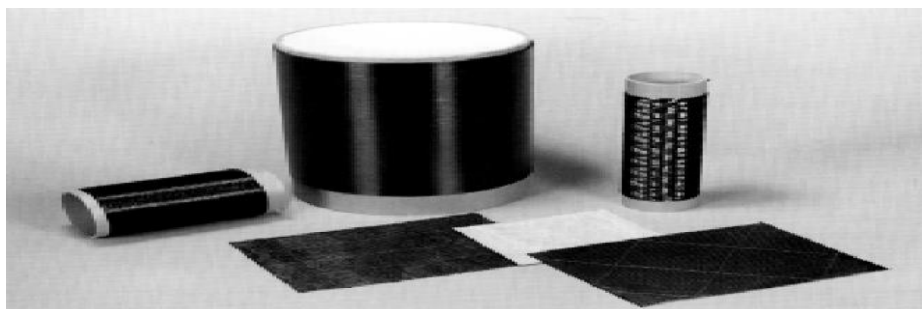
۹۵/۰۸/۱۶

**۵- روش prepreg moulding:**

prepreg: به معنی پیش‌سازه یا پیش‌آغشته است.

در حقیقت یک پلیمری است که این پلیمر در شرایط نیمه‌پخت است، پخت آن کامل نیست و پلیمر نرم است و قابلیت تغییر شکل دارد.

prepreg توسط کارخانه‌ی سازنده تولید می‌شود و انواع و اقسام مختلفی دارد که در شکل زیر انواع و اقسام prepreg را مشاهده می‌کنیم. (استوانه‌ای، ورقه‌ای، لوله‌ای و... اما این اشکال، شکل محصول نهایی نیست).



این prepreg خریداری می‌شود و بعد در یک قالب قرار می‌گیرند و شکل می‌گیرند.

وقتی وارد قالب می‌شود، cure کامل می‌شود و سفت می‌شود و شکل می‌گیرد.

این روش prepreg moulding است.

- مزایای روش:

میزان رزین و کاتالیست به دقت توسط شرکت کارخانه‌ی سازنده تنظیم می‌شود.

درصد الیاف می‌تواند خیلی به سختی و کم‌ترین میزان آلودگی محیط‌زیست بدست آید.

از لحاظ سلامتی و بهداشت خیلی خوب است.

قیمت الیاف حداقل است. (از الیاف پیوسته استفاده می‌شود).

شیوه‌ی رزین بهینه‌سازی شده است و همچنین با ویسکوزیته‌ی بالای رزین می‌توان استفاده کرد، که خواص مکانیکی خوبی دارد.

prepreg را می‌توان تا چندین ماه در دمای محیط نگه داشت و این بدان معناست که در دمای محیط cure نمی‌شود.

برای cure شدن بایستی در کوره قرار گیرد و یا در اتوکلاو.

- معایب روش:

قیمت مواد حاصل از این روش به‌هرحال بالاتر است چون یک فرآیند اضافی ساخت prepreg روی آن انجام می‌شود.

معمولاً اتوکلاو برای شکل‌دهی آن نیاز است، به‌خاطر این‌که اگر قرار بود در دمای محیط cure شود که prepreg نبود و prepreg در دمای محیط cure نمی‌شود. همین سبب می‌شود که روش گرانی باشد و فرآیند تولید آن کند می‌شود و سائز آن نیز محدود می‌شود.

همچنین ابزاری که استفاده می‌شود باید تحمل دمایی بالایی را داشته باشد، چون دمای cure در این فرآیند تولید بالا است. مواد cure (هسته) باید بتواند دمای بالا را تحمل کند.

Core چیست: در pmc اگر بخواهند قطعه‌ای بسازند که آن قطعه  $3m^3$  حجم آن است، همه یا این قطعه را پلیمر یا اپوکسی قرار نمی‌دهند. وسط آن چوب می‌گذارند و یا با گچ وسط آن را پر می‌کند که به این حالت می‌گویند هسته و بعد دور آن پلیمر یا pmc قرار می‌گیرد. بنابراین این هسته را در این قطعات استفاده می‌کنند چون نیاز نمی‌باشد تمام قطعه پلیمر باشد، چون گران می‌شود بنابراین از هسته استفاده می‌کنند از یک ماده‌ی ارزان قیمت و حجیم به‌عنوان هسته استفاده می‌شود و دور آن پلیمر قرار می‌گیرد.



هسته در این روش باید دمای بالا را تحمل کند.

- تاکنون به بررسی روش‌های قالب بار پرداخته شد، در ادامه به بررسی روش‌های تولید قالب بسته می‌پردازیم که شامل چهار روش است:

1-Compression molding

2-Injection molding

3-Transfer molding

4-Pultrusion

در این روش‌ها معمولاً از الیاف شیشه، کربن، کولار و... برای تقویت پلیمرها استفاده می‌شود.

## ۱- روش قالب‌گیری فشاری:

روش قالب‌گیری فشاری: Compression molding

در این روش لقمه یا charge از پلیمر به اضافه‌ی الیاف کوتاه با ذرات تهیه می‌شود.

این پلیمر می‌تواند ترموست باشد و یا ترموپلاستیک باشد.

قالب دوتکه است، قالب بسته می‌شود، شکل می‌گیرد و بعد اجازه می‌دهند که cure شود و قطعه تولید شود.

قالب با سیستم گرم کننده همراه است که برای ماتریس مسئله‌ی cure کردن و cross link را فراهم می‌کند.

در قالب فشار می‌دهند تا شکل بگیرد و در قالب و بعد گرم می‌کنند تا cure می‌شود.

برای ترموپلاستیک‌هایی کاربرد دارند، ترموپلاستیک‌ها را در حالت خمیری قرار می‌دهند و اجازه می‌دهند که منجمد شود.

این روش برای ترموست‌ها و ترموپلاستیک‌ها کاربرد دارد اما بیش‌تر برای ترموست‌ها کاربرد دارد.

دوره‌ی تولید آن ۶ - ۱ دقیقه است.

در این روش همان‌طور که بیان شد حجمی را در قالب می‌گذارند و مناسب بسته می‌شود و پلیمر شکل می‌گیرد.

الیاف به‌صورت بریده شده در charge وجود دارد.

موارد بالا، موارد مرتبط با روش قالب‌گیری فشاری بود.

## ۲- روش قالب‌گیری تزریقی:

روش قالب‌گیری تزریقی: Injection molding

در روش قالب‌گیری تزریقی charge را در یک قیف می‌ریزند که می‌تواند این charge ترموپلاستیک باشد که به‌صورت خمیری یا مذاب است و بعد توسط سیستم تغذیه وارد قالب می‌شود، در این حالت وارد قالب می‌شود و داخل قالب انجماد انجام می‌شود و قالب باز می‌شود و شکل خود را می‌گیرد.

بیش‌تر برای ترموپلاستیک‌ها کاربرد دارد اما برای ترموست‌ها نیز می‌توان از این روش به‌کار برد. درحالتی که ترموست است باید قالب گرم شود تا ترموست خود را cure کند.

از یک سیستم تزریق در این حالت استفاده می‌شود.

## ۳- روش Transfer molding:

فرق این روش با روش قالب‌گیری تزریقی این است که الیاف یا فاز تقویت‌کننده را از قبل، داخل قالب می‌گذارند و بعد رزین را داخل یک مخزن دیگر قرار می‌دهند، و بعد این رزین را در داخل قالب تزریق می‌ریزند.

در داخل قالب رزین و تقویت‌کننده ممزوج می‌شوند.

برای ترموست‌ها و ترموپلاستیک‌ها کاربرد دارد.

اگر ترموپلاستیک باشند صبر می‌کنیم منجمد شود و آن را از قالب خارج می‌کنیم.

این روش تغذیه دارد.

دورریز این روش زیاد است.

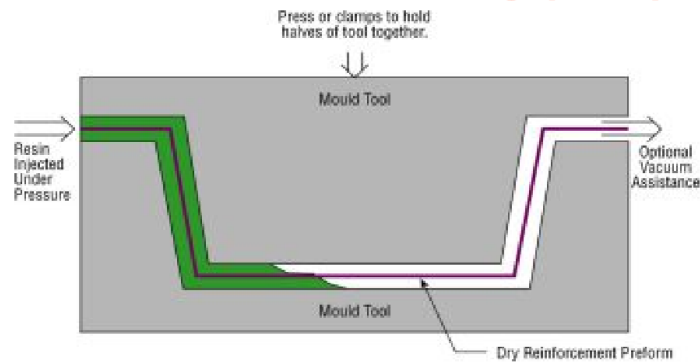
زمان تولید آن از روش Compression molding کوتاه‌تر است و از روش Injection molding طولانی‌تر است.

الیاف از قبل داخل قالب قرار می‌گیرد، رزین را تزریق می‌کنند به داخل قالب و گاهی اوقات برای این که قطعه سالم‌تر تولید شود به خلاء متصل می‌کنند.

داخل قالب الیاف است و رزین تزریق می‌شود.

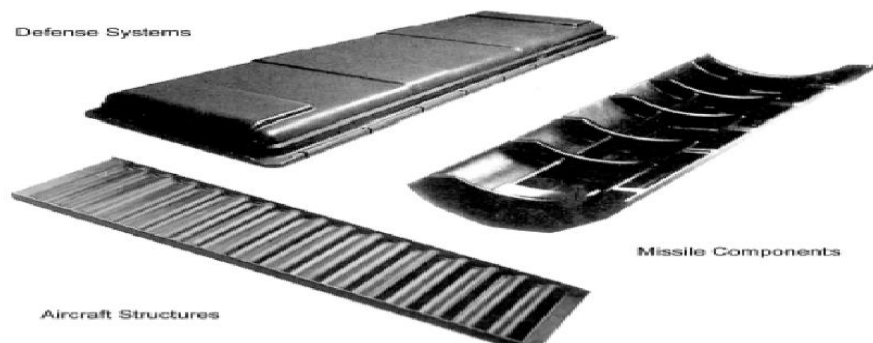
### Resin Transfer molding (RTM)

### *Resin Transfer Moulding (RTM)*



در شکل زیر قطعاتی مشاهده می‌شود که از این روش تولید شده است که قطعات پیچیده‌تری هستند برای سیستم‌های دفاعی،

برای قطعات هواپیما، قطعات موشک و... این روش کاربرد دارد.



**- مزایای روش RTM:**

درصد الیاف را می‌توان خیلی بالا برد، چون از فشار استفاده می‌شود. بنابراین می‌توان درصد الیاف را بالا برد و رزین را کم کنیم.

در این صورت تخلخل آن کم‌تر می‌شود، چون از فشار استفاده می‌شود.

از لحاظ سلامت نیز این روش خوبی است چون رزین در قالب بسته تزریق می‌وش.

هزینه‌ی کارگری کم‌تر است.

هر دو طرف قطع با قالب در تماس است و این مطلوب است و هر دو طرف صاف و زیبا است. مثل روش رشته‌پیچی نیست که سطح بالایی آن ناصاف و نامطلوب است.

**- عیب روش RTM:**

قالب‌هایی که دو تکه هستند گران هستند. می‌بایستی دو قسمت قالب، دقیقاً روی هم قرار گیرد).

قالب باید سنگین باشد تا فشار بالا را تحمل کند.

به قطعات کوچک محدود می‌شود و قطعات خیلی بزرگ را نمی‌توان با این روش تولید کرد.

در این روش امکان دارد که در بعضی از قسمت‌ها رزین تزریق شود و به همین جهت قطعات معیوب و قطعات دوریز زیاد می‌شود.

برای قطعات کوچک هواپیما، اتومبیل، صندلی قطار و... می‌توان از این روش استفاده کرد.

**۴- روش پاتروژن:**

این روش، شبیه به اکستروژن ریخته‌گری است.

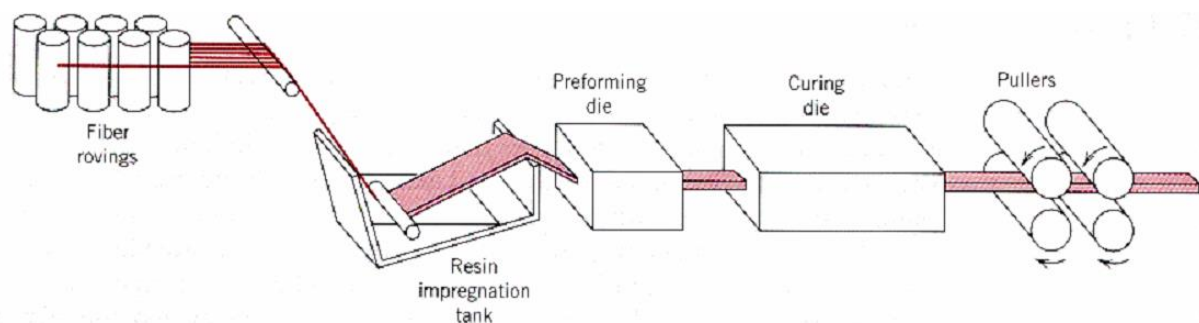
الیاف از قرقه باز می‌شود و وارد مخزن می‌شود منظور مخزن رزین است. در این صورت الیاف آغشته به رزین می‌شوند و وارد قالب می‌شوند که هم در قالب شکل می‌گیرند و هم در قالب cure می‌شوند.

بنابراین قالب یک قالب گرمی است که هم آن را شکل می‌دهد و هم cure می‌کنند.

و بعد توسط دستگاه کشنده از قالب کشیده می‌شود.

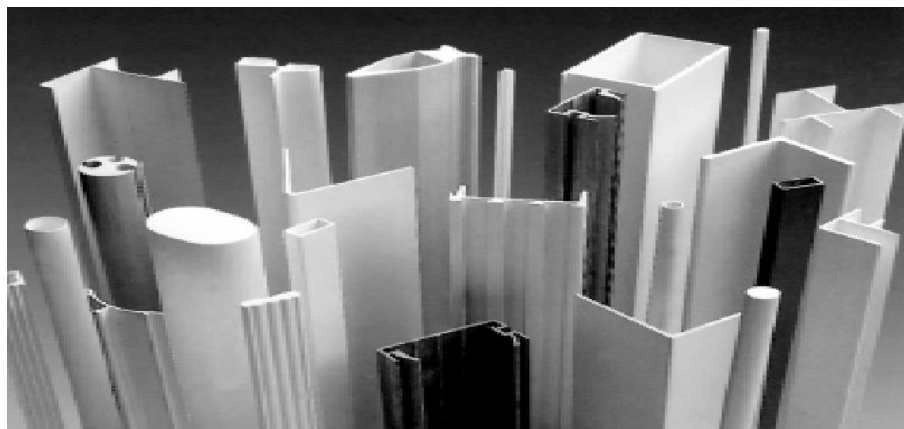
معمولاً از رزین‌های ترموست استفاده می‌شود.

در این روش وقتی الیاف آغشته به رزین شد، ابتدا وارد قالب می‌شود که شکل می‌گیرد و بعد در قالب دیگر وارد می‌شود که cure شود، (قالب مجزاست) که می‌توان از این حالت نیز برای این روش استفاده کرد. و بعد توسط دستگاه کشنده، کشیده می‌شود.



شکل نهایی فرآیند پاتروژن در شکل زیر مشخص است.

انواع و اقسام نبش‌ها، قوطی‌ها، میله و... که از جنس پلیمر است از روش پاتروژن تولید شده است.



در شکل زیر شبکه‌های پلیمری است که در کنار اسکله‌ها که هوا رطوبت دارد و خوردگی بالاست تعداد می‌گیرد. شبکه‌های پلیمری جایگزین قطعات فلزی شده است.



- مزایای روش پاتروژن:

روش سریعی است.

روش اقتصادی است.

درصد رزین به دقت می‌تواند کنترل شود.

الیاف از قرقره باز می‌شود و هیچ کار اضافی روی آن انجام نمی‌شود.

خواص خوبی دارند، چون الیاف مستقیماً در جهت طول قطعه قرار می‌گیرند، که در این صورت استحکام بالا می‌رود و خواص

مکانیکی خوبی دارند.

محیط رزین بسته است و مشکلات زیست محیطی کم‌تر می‌شود.

- معایب روش پاتروژن:

به قطعات با مقاطع یکسان محدود می‌شود.

قطعات پیچیده را نمی‌توان از این روش تولید کرد و حتماً باید مقطع آن یکسان و مشخص باشد. مثل تیرآهن، قوطی و ...

قیمت قالب این روش بالا است.

کاربرد روش پاتروژن: برای انواع شبکه‌ها، پشت بام، نردبان، پل و کلاً برای انواع کارهای شبکه‌ای کاربرد دارد.

### کاربرد کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری:

- پوشش موتور هواپیما از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری است که قطعه سایزش بزرگ است و در این حالت از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تولید شده است.

- دیش ماهواره که در ایستگاه فضایی استفاده می‌شود از کامپوزیت زمینه پلیمری است.

- در هلی کوپتر OSPREY، پروانه‌ها از جنس کامپوزیت زمینه پلیمری است.

رزین اپوکسی و الیاف شیشه یا از الیاف گرافیت

عمر آنها وقتی جایگزین فلز شده است، افزایش یافته است.

سرعت هلی کوپتر زیادتر شده است.

سبکی را به ارمغان آورده است.

- در هواپیماهای مسافری، قطعات مختلف از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری استفاده شده است.

- در چنگنده‌ها از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری استفاده می‌کنند.

- در قسمت موتور هواپیما نیز می‌توان از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری استفاده کرد. (از الیاف کربن)

- آنتن ماهواره

- برای ساخت Radomes نیز از کامپوزیت‌های پلیمری استفاده می‌شود.

- درب ورودی هواپیما

- قایق مسابقه‌ای نیز از کامپوزیت زمینه پلیمری استفاده شده است که زمانی که از کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلیمری در ساخت قایق‌ها استفاده شد، کاهش وزن را به همراه داشت.
- بدنه‌ی دوچرخه از الیاف گرافیت استفاده می‌شود و باعث کاهش وزن می‌شود.
- داشبورد ماشین
- برج مراقبت فرودگاه از GRP (با شیشه تقویت شده است) که یک نوع کامپوزیت زمینه‌ی پلیمری است. که برای STRUCTURE برج مراقبت فرودگاه از این نوع کامپوزیت استفاده شده است.
- برای گنبد مساجد از FRP استفاده می‌شود. (پلیمر تقویت شده با الیاف)
- Radomes از FRP در ایستگاه فضایی استفاده می‌شود.
- در پوشش پل‌ها می‌توان از FRP استفاده کرد.

### کامپوزیت‌های زمینه‌های فلزی:

#### کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی MMC

سیرمت (سر: سرامیک و مت: متان)، قبل از این که MMC مطرح شوند، به کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی سیرمت می‌گویند که سر از سرامیک گرفته شده است و مت از متال گرفته شده است.

کبالت را با کاربرد تنگستن از روش متالورژی پودر، کامپوزیت درمی‌آوردند که برای ابزارات برش مثل رنده، تیغچه و... قبل از سال ۱۹۴۰ استفاده می‌شد.

بعد از آن سال ۱۹۶۰، کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی کار بر روی آن‌ها آغاز شد و شروع به تکامل کردند.

استفاده از فلز دوم غیرپیوسته از همان ۱۹۸۰ تکامل‌شان آغاز گردید.

اولین شمشیر کامپوزیتی را از مورج ورقه‌های فولاد در سال ۱۹۴۰ درست کردند.

موادی مانند چدن و فولادها با کاربرد زیاد جدی کامپوزیت‌ها به حساب می‌آیند.



کامپوزیت‌های زمینه فلزی پیشرفته ۱۹۶۰ تکامل‌شان شروع شد که از الیاف B، کربن و گرافیت برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی استفاده شد.

کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی با ذرات غیرمستقیم از سال ۱۹۸۰ آغاز نشده است. (آلومینیوم‌ها، سلیکون، کاربید و...). فلزات مواد پیشرفته‌ی مهندسی هستند و برای مقاوم‌سازی آن‌ها روش‌های متنوع وجود دارد مثل کارسختی، پیرسختی، آلیاژسازی و انواع عملیات حرارتی که بر روی فلزات انجام می‌شود می‌توان به خواص مورد نظر دست یافت. و در آن زمان برای کاربردهای متداول مهندسی نیاز به کامپوزیت‌سازی نبود.

اما با پیشرفت علم و تکنولوژی، فلزات و آلیاژهای مهندسی جوابگو نبودند و مجبور بودند که کامپوزیت بسازند.

مثل: هواپیماها، موشک‌ها، تحقیقات فضا، مهندسی هسته‌ای، برای صنعت الکترونیک و...

وقتی علم پیشرفت کرد، باید مواد نیز پیشرفت کند و مواد سنتی دیگر جوابگو نخواهند بود.

به همین کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی خود را نشان دادند و مجبور شدند که از MMCها استفاده کنند.

### کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی:

برای کاربردهای دمای بالا کاربرد دارند.

نیاز داریم که استحکام بالا باشد.

سختی بالا باشد، وزن آن‌ها پایین باشد، ضریب انبساط حرارتی پایین باشد.

بتوانند دمای بالا را تحمل کنند.

مسائل قیمت و طراحی را نیز باید در نظر گرفت.

هدف ما از کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی این است که کاهش وزن ایجاد کنیم، استحکام نماییم و کشش آن بالا باشد.

حداقل داکتیلیته را داشته باشد.

مقاومت به خودش و خستگی داشته باشد.

مقاومت به شوک حرارتی داشته باشد.

مقاومت به خوردگی داشته باشند.

مدول یاگ بالا باشد.

پایداری ابعادی داشته باشند.

با پیشرفت علم و تکنولوژی، پیشرفت مواد نیز ضروری است. بنابراین مواد سنتی جوابگو نبودند و مجبور شدند که از کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده کنند.

در کاربردهای الکتریکی، کلید روشن و خاموش کردن برق (سوئیچ‌ها)، برای قطعات الکترونیک، ابررساناها، مواد مغناطیسی و... از کامپوزیت‌ها استفاده می‌کردند.

- کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبت به کامپوزیت‌های زمینه پلیمری چه مزایایی دارند:

خواص الاستیک آن‌ها بالاتر است.

دمای سرویس‌دهی آن‌ها بالاتر است.

دمای بالا را می‌توانند تحمل کنند.

به رطوبت، اشعه، نور آفتاب و... حساس نیستند و در برابر این عوامل مقاوم می‌باشند.

هدایت حرارتی و گرمایی آن‌ها بالاتر است.

خواص سایش و خستگی آن‌ها بهتر است.

- معایب و محدودیت‌های کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبت به کامپوزیت‌های زمینه پلیمری:

دمای فرآوری آن‌ها بالاتر است.

سنگین تر هستند.

دانسیتته آنها بالاتر است.

قیمت بالا

\* چه انتظاراتی از کامپوزیت‌های زمینه‌ای داریم یا به عبارتی اهداف تولید کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی: وقتی می‌خواهیم ماتریس فلزی را انتخاب کنیم مهم‌ترین عامل این است که فلز دانسیته‌اش پایین باشد.

۱- ماتریس دارای دانسیته پایین باشد.

۲- فلز ماتریس خواص مکانیکی خوبی داشته باشد و استحکام بالایی داشته باشد.

۳- ترکیب شیمیایی‌اش خوب باشد.

۴- خواص حرارتی خوبی داشته باشد.

۵- روش تولید آن ساده باشد.

۶- ماشین‌کاری آن ساده باشد.

۷- ترشوندگی خوبی باید ماتریس با فاز زمینه داشته باشد.

۸- سیالیت داشته باشد.

۹- تطابق شیمیایی و تطابق فیزیکی داشته باشد.

۱۰- ارزان باشد.

۱۱- انتخاب این فلز به‌عنوان ماتریس کاربرد آن کامپوزیت بستگی دارد که باتوجه به کاربرد کامپوزیت، فلز به‌عنوان فاز زمینه انتخاب می‌شود.

(از فلزات سبک معمولاً برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی استفاده می‌کنند).

۱۲- از نظر جدایش مشکلی نداشته باشد.

\* فلزاتی که به عنوان زمینه برای کامپوزیت‌های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند:

### آلومینیوم:

اولین فلزی که به عنوان ماتریس در کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی، آلومینیوم (AL) بود.

۹۰ - ۸۰ درصد کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی، ماتریس‌شان AL است.

آلومینیوم سختی بالایی دارد.

مدول یانگ آن بالا است.

خواص خستگی خوبی دارد.

قیمت آن نیز نسبتاً ارزان است.

هم‌چنین می‌توان با استفاده از انواع عملیات حرارتی، خواص آن را بهبود داد.

هنگامی که از آلومینیوم به عنوان فاز زمینه استفاده می‌شود، به آن کامپوزیت AMC می‌گویند.

برای کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی در زمینه‌ی آلومینیوم، از آلیاژهای ریختگی آلومینیوم و هم از آلیاژهای کارشده‌ی آلومینیوم

می‌توان استفاده کرد.

زمینه‌ی AL با ذرات آلومینیوم‌ها، Sic و گرافیت و... کامپوزیت تشکیل می‌دهد.

چه خواصی از کامپوزیت‌های AMC داریم:

استحکام بالایی دارند.

دانسپته پایین است.

Thermal conductivity آن‌ها بالا است.

مقاومت به سایش آن‌ها خوب است.

برای ساخت قطعات اتومبیل مثل پیستون، قطعات ترمز در ماشین، قطعات دوچرخه، کابل‌های با ولتاژ بالا و... از AMC استفاده می‌نمایند و این نوع کامپوزیت‌ها کاربرد دارد.

در کامپوزیت‌های زمینه‌فلزی با زمینه آلومینیومی می‌توان:

از آلیاژهای ریختگی آلومینیوم استفاده کرد.

از آلیاژهای کار شده آلومینیوم استفاده کرد.

از آلیاژهای ویژه آلومینیوم مانند ۳۶۱۸ و ۸۰۹۰ استفاده کرد.

### منیزیم:

به تازگی استفاده از منیزیم برای کامپوزیت‌های زمینه‌فلزی به‌عنوان ماتریس، پرطرفدار است.

سبک است.

خواص خوبی برای کامپوزیت‌سازی دارد.

Mg را می‌توان با ذرات Sic تقویت کرد.

خواص کامپوزیت‌های زمینه‌فلزی که زمینه‌شان منیزیم است:

دانشیه‌شان پایین است.

سختی بالا است.

خواص سایش خوبی دارند.

استحکام خوبی حتی در دمای بالا دارند.

مقاومت به سایش دارند.

خواص خزشی خوبی دارند.

کاربرد: برای قطعات اتومبیل مسابقه، ترمزهای اتومبیل، قطعات هواپیما، برای انتقال نیرو در کمپرسور و...

### تیتانیوم:

Ti (زمینه) می‌توان به Sic و Tic و  $TiB_2$  به‌عنوان فاز دوم، کامپوزیت ایجاد کرد.

از روش متالوژی پودر برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه‌ی تیتانیوم استفاده می‌شود.

استحکام بالایی دارند.

Stiffness بالایی دارند.

مقاومت به خزشی بالایی دارند.

در دمای بالا مقاوم هستند.

خواص سایش خوبی دارند.

کاربرد: برای قسمت چرخ هواپیما F16، تیغه توربین، پره، فن، پیستون و قطعات اتومبیل.

برای قسمت‌های مختلف لوکوموتیو قطار.

به‌طور کلی برای قطعات ماشین‌کاری شده و صنعتی کاربرد دارد.

### مس:

زمینه مس را با الیاف پیوسته کربن، Sic، تنگستن، فولاد زنگ‌نزن  $304$  و ذرات Sic می‌توان کامپوزیت زمینه‌ی فلزی تولید

کرد.

از روش متالوژی پودر و Filtration می‌توان کامپوزیت زمینه‌ی مس را تولید کرد.

خواصی که از کامپوزیت‌های فلزی زمینه‌ی مس انتظار داریم:

ضریب انبساط حرارتی پایین

مدول الاستیسیته بالا

سختی بالا

هدایت حرارتی بالا

خواص سایشی خوب

بیش‌ترین کاربرد این کامپوزیت‌ها برای قطعات الکترونیک است.

Cu و آلومینیوم AL دوتا فلزی هستند که هدایت حرارتی آن‌ها خیلی بالا است. برای ساخت سیم / کابل از آن‌ها استفاده می‌شود. می‌توان Cu و AL را آلیاژ کنیم (Cu و AL خالص را به آلیاژ تبدیل کنیم)، در این صورت استحکام بالا می‌رود اما هدایت الکتریکی آن‌ها به شدت پایین می‌آید.

بنابراین از کامپوزیت‌ها استفاده می‌کنیم که زمینه AL خالص و یا Cu خالص است که هم استحکام بالا دارند و هم دیگر آلومینیوم و Cu را آلیاژ نکردیم و به‌صورت خالص از آن‌ها استفاده کردیم.

در این صورت با ساخت کامپوزیت، درعین حال استحکام دارد، خواص الکتریکی را نیز از دست نداده است و از AL و Cu خالص استفاده شده است.

$P_{Cu} = 8/9$  است به‌عبارتی سنگین است اما برای کاربردهای الکتریکی خوب است.

از الیاف SiC و C و... برای کامپوزیت‌های زمینه‌ی مس استفاده می‌شود.

انتظاراتی که از کامپوزیت‌های زمینه‌ی مس داریم: ضریب انبساط حرارتی پایین - سختی بالا و...

بیش‌ترین کاربرد این کامپوزیت‌ها در کاربردهای الکتریکی است.

فاز دوم در کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی می‌تواند غیرپیوسته، پیوسته و ذرات نیز باشد.

نوع کامپوزیت، کاربرد کامپوزیت، نوع مواد، قیمت، تعداد تولیدی، درصد افزودن ذرات، نوع ذرات، چگونگی توزیع ذرات، نوع ماتریس، و... برای انتخاب روش تولید کامپوزیت مهم است.

- برای ساخت کامپوزیت زمینه‌ی فلزی: زمینه (فلز) + فاز دوم داریم که می‌خواهیم به کامپوزیت برسیم، هنر است توأم با علم:

۱- از روش حالت جامد استفاده کنیم: ماتریس را ذوب نکنیم و ماتریس در فاز دوم باهم ادغام گردد.

مثل: نورد - متالوژی پودر - اکسیژن

۲- روش حالت مایع: ماتریس را ذوب می‌کنند.

۳- روش حالت بخار: مثل CVD

۴- روش‌های درجا: فاز دوم در ماتریس فلزی بوجود می‌آید.



جلسه هفتم

مورخ: ۹۵/۰۸/۲۳

## کامپوزیت‌های زمینه فلزی:

زمینه کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌تواند آلیاژهای ذیل باشد:

آلومینیوم - منیزیم - تیتانیوم - مس

## روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی:

(۱) روش‌های حالت مایع

(۲) روش‌های حالت جامد

(۳) روش‌های حالت گاز

(۴) روش‌های درجا

● روش‌های حالت مایع:

۱- روش Infiltration

۲- روش spray

۳- روش Dispersion

۴- روش In-situ

● روش‌های حالت جامد:

۱- روش متالورژی پودر

## ۲- Diffusion bounding روش

## ۳- In-situ روش

## ● روش‌های حالت گاز:

## ۱- CVD

## ۲- PVD

**روش‌های حالت مایع:**

## - روش‌های DISPERSION یا روش توزیع شوندگی:

به این ترتیب است که پودر سرامیک و یک شمش فلزی را ذوب می‌کنیم (پودر سرامیکی را به فلز اضافه می‌کنیم) و هم می‌زنیم. با هم اقدام می‌کنیم و بعد ریخته‌گری می‌کنیم. این ریخته‌گری می‌تواند شامل یونیت‌های اکستروژن باشد یا شمش‌های ریخته‌گری باشد یا تختال‌های نورد یا شمش‌های نورد باشد. به هر حال می‌تواند به شکل محصول ساخته یا نیمه ساخته ریخته‌گری شود. همان‌طور که گفته شد پودر سرامیک که به شکل ذره، ویسکر یا الیاف می‌تواند باشد اضافه می‌شود به مذابی که در حال همزدن است و دوغاب درست می‌شود. دوغاب ریخته‌گری می‌شود و کامپوزیت بدست می‌آید. منتهی ظاهر قضیه خیلی ساده است اما وقتی به آن می‌پردازیم به این سادگی نیست و عوامل مختلفی در این روش دخالت دارند.

این روش را WORTEX یا گردابی نیز می‌نامند. دلیل این است که وقتی همزن کار می‌کند یک گرداب ایجاد می‌شود، ذرات سرامیکی که در مذاب ریخته می‌شود به وسیله‌ی این گرداب مکش ایجاد می‌شود و ذرات سرامیکی در داخل مذاب قرار می‌گیرد و اگر این مکش نباشد ذرات داخل مذاب قرار نمی‌گیرد.

بنابراین فاکتورهای مختلفی در این روش دخالت دارند، شکل همزن، اندازه‌ی همزن، زاویه همزن و محل قرار گیری همزن مهم است. (عمودی در مذاب قرار گیرد یا به صورت افقی و ...)

در این روش یک همزن کار می‌کند.

اگر از نظر اندازه همزن مورد بررسی قرار دهیم،  $d$  قطر همزن است و  $D$  قطر بوتنه است که نسبت  $\frac{d}{D}$  باید بین  $0/3$  تا  $0/7$  باشد، اگر این نسبت بیش‌تر یا کم‌تر از این محدوده باشد، نمی‌تواند به شکل موثر عمل همزدن را انجام دهد.

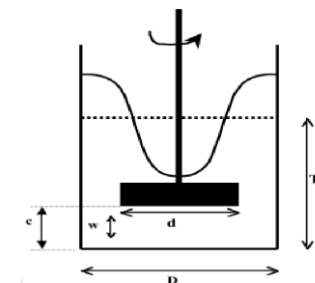


Fig. 2. Dimensions of vessel and impeller.  
Impeller shape, size, angle and location.

شکل همزن می‌تواند به این ترتیب باشد که وقتی کار می‌کند یک جریان شعاعی ایجاد کند، یعنی ذرات به صورت شعاعی حرکت می‌دهد.

اگر همزن زاویه دار باشد، ذرات را به صورت محوری حرکت می‌دهد.

چرا لازم است ذرات در جهت بالا به پایین حرکت کنند: اگر ذرات سنگین‌تر از مذاب باشد مثل ذرات Sic که دانسیته‌ی آن از آلومینیوم بیش‌تر است می‌خواهد ته بوتنه بنشیند، باید جریانی محوری از بالا به پایین ایجاد کنیم و نگذاریم که ذرات کف بوتنه قرار گیرند.

یا اگر گرافیت در آلومینیوم بریزیم، گرافیت چون دانسیته‌اش از آلومینیوم کم‌تر است تمایل دارد به بالا بیاید. بنابراین باید یک جریان محوری از بالا به پایین ایجاد کنیم. جریان شعاعی نیز نیاز است.

حالت U شکل، حالت حلزونی، سه پره، چهار پره و ... اشکال مختلفی از همزن‌ها هستند که مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در پروژه‌ایی که استاد داشتند از گرافیت همزن را تراشکاری کردند یکی به شکل مارپیچ و یکی به شکل تیغه‌ای و یکی نیز به شکل شیاردار، دیده شد که حالت شیار دار از همه حالت‌های دیگر بهتر است.

چون در حالت شیاردار، هم شعاعی حرکت می‌کند و هم به صورت محوری ذرات را حرکت می‌دهد.

مارپیچ صرفاً محوری حرکت می‌دهد.

تیغه‌ایی حالت شعاعی ایجاد می‌کند.

بهترین همزن حالت شیاردار بود که هم شعاعی و هم محوری ایجاد می‌کند.

به طور کلی وقتی یک ذره‌ایی در سطح مذاب قرار می‌گیرد و یک مقدار از آن ذره در سطح مذاب فرو می‌رود، تمایل دارد به

سمت بالا بیاید (نیروهایی که آن وارد می‌شود شامل پنج نیرو است:

$$\Sigma F = F_B + F_P + F_H + F_S + F_E$$

**FB:** نیروی بویانسی یا ارشمیدسی، نیرویی که از پایین به بالا اعمال می‌شود. (هر جسمی که فرو می‌رود، حجم و وزن آن

کاسته می‌شود بنابراین سبک می‌شود و تمایل دارد به سمت بالا بیاید.)

**FP:** به خاطر انرژی پتانسیلی که ذره نسبت به کف بوته دارد. (ذره که در سطح مذاب است و می‌خواهد به سمت پایین و کف

بوته بیاید و پایین بیاید، یک انرژی پتانسیل است که می‌خواهد آن را به سمت پایین (کف بوته) هدایت کند.)

**FH:** به خاطر نیروهای هیدرواستاتیک است، به خاطر فشارهای هیدرواستاتیکی است که در مایع وجود دارد. (مایع فشارهای

هیدرواستاتیک دارد.)

**FS:** مولفه‌ی قائم کشش سطحی است. (کشش سطحی با ورود آن ذره مقابله می‌کند/ حالت قائم آن با ورود ذره مقابله

می‌کند.)

**FE:** به خاطر انرژی سینتیکی است که مذاب دارد. وقتی مذاب را هم می‌زنیم با یک همزن، مذاب ساکن نیست و انرژی

سینتیکی زیادی وجود دارد.

اگر  $\Sigma F$  در مجموع برآیندش به طرف پایین بوته باشد و مثبت باشد: ذره وارد می‌شود.

اگر خیر، ذره وارد نمی‌شود.

بنابراین باید به این نکته توجه کرد که  $\sum F$  مثبت باشد و برآیند آن به طرف پایین بوته است.

در این روش ذرات با نرخ مشخص وارد مذاب می‌شود.

راجع به شکل و سایز همزن صحبت کردیم. اکنون راجع به LOCATION یا محل قرارگیری همزن بررسی را انجام می‌دهیم:

W: فاصله همزن تا کف بوته است.

T: فاصله کف بوته تا سطح بوته است.

به هر حال محل قرارگیری همزن کجا باشد؟

آیا نزدیک به سطح مذاب باشد یا نزدیک به سطح بوته باشد؟

پاسخ این است که در ابتدا که ذرات را وارد مذاب می‌کنیم، همزن باید نزدیک سطح مذاب باشد تا جریان گردابی را ایجاد کند، در غیر این صورت نمی‌تواند ذرات را بکشد. حتماً باید WORTEX یا جریان گردابی ایجاد شود. وقتی WORTEX ایجاد شد، ذرات کشیده می‌شود. بعد از آن نیاز به ترشوندگی داریم، نیاز داریم که ذرات به وسیله‌ی مذاب تر شوند که این ترشوندگی فرآیندی است که وابسته به زمان است و به صورت خود به خودی و یا درجا، ترشوندگی ایجاد نمی‌شود و باید زمان بدهیم که ترشوندگی ایجاد گردد. معمولاً بیست دقیقه زمان می‌دهیم. به عنوان مثال ذرات Sic باید با آلومینیوم در یک مدت زمانی مشخص، در تماس باشد تا ترشوندگی ایجاد گردد. برای این که این تر شدن اتفاق بیفتد، باید WORTEX را از بین ببریم. WORTEX در این حالت دیگر خوب نیست، هوا را می‌کشد و نمونه پر از تخلخل می‌شود. بنابراین در این حالت همزن را پایین می‌آوریم و نزدیک کف بوته قرار می‌دهیم و فقط به آرامی همزدن انجام می‌گردد تا ذرات ته نشین نشوند. زمان لازم را ایجاد می‌کنیم که ترشوندگی فراهم گردد.

مدت زمان همزدن، سرعت همزدن و اتمسفری که در آن همزدن صورت می‌گیرد، موردهای بعدی است که حائز اهمیت است.

مدت زمان همزدن به ترشوندگی وابسته است، یعنی آن قدر باید عمل همزدن انجام شود که ترشوندگی حاصل شود.

سرعت هم زدن به خیلی از موارد بستگی دارد. سرعت باید در حدی باشد که WORTEX تشکیل شود. اگر سرعت همزدن کم باشد، WORTEX تشکیل نمی‌شود و اگر خیلی هم سرعت زیاد باشد، WORTEX شدیدی ایجاد می‌شود و نمونه پر از تخلخل می‌شود. بنابراین سرعت همزدن یک حد بهینه دارد. مثلاً ۴۰۰ دور بر دقیقه یا ۳۰۰ دور بر دقیقه. سرعت همزدن باید نرمال باشد. البته در مقالات بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نیز گزارش کردند اما متداول سرعت همزدن ۳۰۰ تا ۴۰۰ دور بر دقیقه است.

اتمسفر همزدن نیز حائز اهمیت است که بهتر است اتمسفر همزدن خنثی باشد یا خلا. به هر حال وقتی همزدن صورت می‌گیرد اکسیژن داخل باشد، اکسید تولید می‌کند و بهتر است اتمسفر همزدن خنثی باشد یا خلا. البته در هوا نیز انجام می‌شود.

نکته‌ی بعدی: دمای مذاب است که مهم است. دمای مذاب، وقتی فوق گداز بریزیم چند درجه فوق گداز بریزیم؟ ۱۰۰ درجه -۲۰۰ درجه - ۳۰۰ درجه و ... چند درجه؟ چطور می‌توان در دمایی ذره را وارد مذاب کرد. یا اصلاً بیاییم در semi solid کاری انجام دهیم و در لیکوئیدوس و سالییدوس ذرات را وارد مذاب کرد.

زمان نگهدای دوغاب مهم است. زمان نگهدای دوغابی که فراهم کردیم چه قدر باشد؟ اگر زمان نگهداری زیاد باشد سبب می‌شود که ذرات ته نشین شوند.

یک قانونی وجود دارد به نام "قانون استوکس" برای سرعت ذره که این قانونی است که در مهندسی معدن، مواد و شیمی برای مواد یا عبارتی ذرات جامدی که به صورت معلق در مایع قرار می‌گیرد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. (سرعت ته نشینی یا شناوری از قانون استوکس تبعیت می‌کند).

Stock's Law:

$$V_p = \frac{2R^2(\rho_s - \rho_l) g}{9 \eta}$$

در این رابطه R شعاع ذره است. (منظور ذره تقویت کننده است که وارد مذاب می‌شود).

Ps: دانسیته ذره (دانسیته ذره جامد)

PL: دانسیته مایع

g: شتاب ثقل

$\eta$ : ویسکوزیته‌ی مایع

اگر  $P_s > P_L$  باشد، علامت مثبت است که در این حالت ذرات تمایل دارند ته نشین شوند.

اگر  $P_s < P_L$  باشد، علامت منفی است که در این حالت ذرات تمایل به شناوری دارند.

در هر دو صورت از رابطه‌ی استوکس استفاده می‌شود.

اگر بخواهیم ذرات با سرعت کم‌تر ته نشین شود، باید  $V_p$  کم باشد و اگر بخواهیم  $V_p$  کم شود باید  $R$  کم شود یعنی ذرات خیلی درشت نباشند و تفاوت دانسیته‌ی مذاب و ذره هم خیلی نباشد.

(نباید ذره با دانسیته ۷ یا ۸ را در یک مذاب با دانسیته ۲ وارد کنیم، در این صورت سریع ته نشین می‌شود. بنابراین باید تفاوت دانسیته ذره و مذاب کم باشد.)

شتاب ثقل: در هواپیما کامپوزیت را منجمد کردند. هواپیما می‌تواند صعود و فرود داشته باشد و به عبارتی می‌تواند با شتاب زیاد سقوط کند و یا پرواز کند. در این صورت شتاب ثقل تغییر می‌کند. اگر دوغابی را در ستونی از مایع را به شکل استوانه در نظر بگیرند. باندهایی بین آن‌ها ایجاد می‌شود. باند ضعیف و قوی ایجاد می‌شود. چون شتاب ثقل تغییر می‌کند به همین دلیل سرعت کم و یا زیاد می‌شود.

(انجماد ثقل پایین: در انجماد ثقل پایین خواص بهتری دارد. جدایش آن کم‌تر می‌شود و ساختار خیلی خوبی می‌دهد.)

قانون استوکس برای ذره شناور در داخل مذاب صادق است.

بحث ترشوندگی مهم است که در حقیقت باید به آن توجه شود که قبل از آن pre-processing را بررسی می‌کنیم.

گاز زدایی، آخال زدایی و ... که انجام می‌شود به آن‌ها pre-processing می‌گویند، فرآیندهایی است که قبل از ریخته‌گری انجام می‌شود. این فرآیندها را نمی‌توان برای دوغاب‌های کامپوزیتی به راحتی انجام داد. چرا؟ به دلیل این که اگر گاز را داخل مذاب بدمیم که توسط قرص‌هایی که در داخل مذاب قرار می‌گیرد این گاز وقتی بالا می‌آید، ناخالصی‌ها و آخال‌ها را که داخل مذاب است را با خود بالا می‌آورد و در سطح مذاب قرار می‌گیرد. اما اگر در داخل کامپوزیت این کار را انجام بدهیم، خوب نیست چون ذرات سرامیکی داخل مذاب را هم بالا می‌آورد و این مطلوب نیست. بنابراین گاززدایی و آخال زدایی را به صورت متداولی که در ریخته‌گری انجام می‌شود را نمی‌توانیم در دوغاب کامپوزیتی انجام دارد.

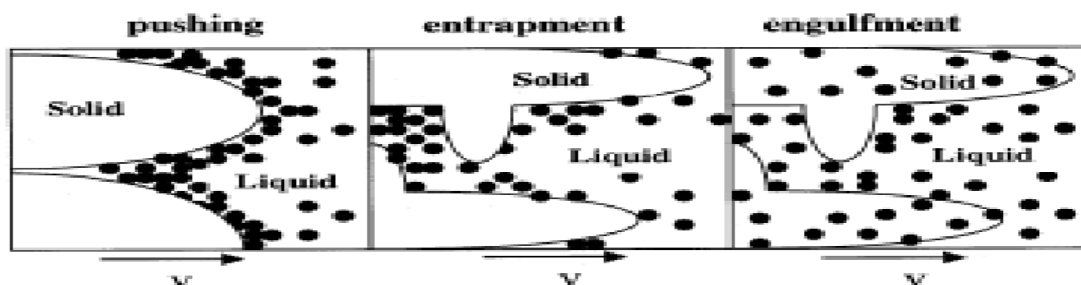
روش ریخته‌گری مهم است که در کامپوزیت به چه روشی ریخته‌گری کنیم. ریخته‌گری در ماسه باشد، ریخته‌گری در قالب فلزی باشد یا ریخته‌گری گریز از مرکز باشد یا ریخته‌گری دقیق باشد و یا squeeze casting باشد. این‌ها انواع و اقسام مختلف روش‌های ریخته‌گری است که باید بدانیم که کدام برای کامپوزیت مناسب است و ابعاد قالب چگونه باشد. دمای قالب چه قدر باشد. قالب را پیش گرم کنیم یا آب‌گرد باشد و قالب را سرد کنیم. ماده‌ی قالب چه باشد (گچی، سرامیکی، فلزی یا ماسه‌ای باشد). تمام این موارد سرعت انجماد را تعیین می‌کند.

سرعت انجماد مهم است.

زمان نگهداری نمی‌تواند خیلی طولانی باشد.

سرعت انجماد مهم است. اگر سرعت انجماد کم و زیاد باشد مطلوب نیست. بنابراین باید روشی را انتخاب کرد که توزیع بهتری داشته باشد.

نکته‌ی دیگر در مورد توزیع این است که غیر از این که در حالت مذاب، ذرات به طرف بالا یا پایین حرکت می‌کنند. در حین انجماد نیز ذرات سه حالت نسبت به جبهه‌ی انجماد می‌توانند داشته باشند:





۱- رانش است یا **pushing**: ذرات رانده می‌شوند به طرف آخرین مایعی که منجمد می‌شود.

ذرات در مرزدانه قرار می‌گیرد و محل بسیار ضعیفی است چون کحل تجمع عناصر غیرفلزی و فازهای یوتکتیکی است بنابراین خود ذره که ماهیت غیرفلزی دارد و عناصر موجود نیز در مرزدانه غیرفلزی است، غیرفلز با غیرفلز جوش نمی‌خورد، بنابراین این مکان مستعد برای شروع و اشاعه‌ی ترک است و در نهایت قطعه را تخریب می‌کند.

بنابراین اصلاً این نوع رانش خوب نیست و متأسفانه اغلب این نوع رانش را خواهیم داشت.

۲- به تله افتادن: ذرات سرامیکی می‌توانند لا به لای بازوهای دندریتی به تله بیفتند. این از رانش بهتر است و توزیع بهتری دارد اما باز داخل فاز آلفا، فاز تقویت کننده ندارد.

۳- Engulfment یا محبوس شدن: بهترین حالت Engulfment یا محبوس شدن است، محبوس شدن زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات محل جوانه زنی باشند. یعنی فاز آلفا (مثل آلومینیوم، مس، منیزیم و ...) روی ذره جوانه زنی کنند. البته این به ندرت اتفاق می‌افتد.

چرا فازهای سرامیکی نمی‌توانند محل خوبی برای جوانه‌زنی فازهای فلزی باشند: چون wet نمی‌شوند. زاویه‌ی ترشوندگی عناصر فلزی بالای ۱۲۰ درجه است و اگر زاویه ترشوندگی ۹۰ شود برای فلزات مناسب نیست لذا محل خوبی برای جوانه زنی نمی‌باشند.

یک سری استثنا وجود دارد مثل Tic (کاربید تیتانیوم) که داخل فاز آلومینیوم قرار می‌گیرد و محبوس شدن اتفاق می‌افتد. کاربید تیتانیوم خودش جوانه‌زا است و به عنوان جوانه‌زا نیز عمل می‌کند.

(ذرات سرامیکی چون ترشوندگی خوبی ندارند، نمی‌توانند محل خوبی برای جوانه‌زنی فاز جامد فلزی باشند.)

بحث ترشوندگی نیز مهم است. اگر فاز تقویت کننده تر نشود به هیچ عنوان نمی‌توان کامپوزیت خوبی داشت.

بستگی به جبهه‌ی انجماد هم دارد، جبهه انجماد می‌تواند به صورت مسطح باشد (صفحه‌ایی)، سلولی باشد و دندریتی.

اگر جبهه انجماد صفحه‌ای باشد رانش رخ می‌دهد و یا محبوس شدن.

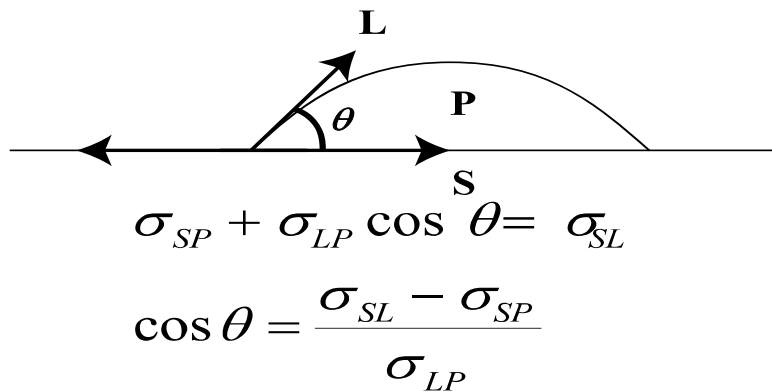
اگر سلولی باشد هم رانش اتفاق می‌افتد، هم به تله افتادن و هم محبوس شدن. (هر سه حالت امکان دارد رخ بدهد.)

اگر دندریتی باشد باز سه حالت رخ می‌دهد. رانش اتفاق می‌افتد، هم به تله افتادن و هم محبوس شدن.

در نتیجه بستگی به جبهه‌ی انجماد دارد.

زاویه‌ی ترشوندگی:

اگر یک قطره مذاب روی سطح جامد قرار گیرد، زاویه‌ی ترشوندگی را  $\theta$  می‌نامند که در این حالت سه تا نیرو اعمال می‌شود:



اگر  $\theta \leq 90^\circ$  باشد، ترشوندگی نسبی است.

اگر  $\theta > 90^\circ$  باشد، عدم ترشوندگی خواهد بود.

ترشوندگی کامل زمانی است که زاویه ترشوندگی برابر با صفر باشد.

عدم ترشوندگی کامل زمانی است که زاویه ترشوندگی برابر با  $180^\circ$  درجه است.

به هر حال این ترشوندگی مهم است، وقتی دو تا فاز می‌خواهند با هم کامپوزیت تشکیل دهد باید زاویه‌ی ترشوندگی به حداقل

برسد. آن موضوع که بیان گردید بیست دقیقه زمان می‌دهیم به خاطر این قضیه است که ترشوندگی ایجاد گردد.

فرآیندهای ثانویه: منظور از فرآیندهای ثانویه اکستروژن، نورد، فورج، آهنگری و ... است. ما نمی‌توانیم به راحتی هر نوع کامپوزیتی تحت عملیات ثانویه قرار بدهیم. چرا؟ مثلاً اگر الیافی باشد، در جهت خاصی باید اکستروژن انجام شود.

اگر ذره‌ایی باشد، باعث می‌شود بعد از اکستروژن ذرات در جهت اکستروژن تغییر جهت دهند و یک مقدار خواص را عوض می‌کنند بنابراین باید به انجام این فرآیندهای ثانویه روی کامپوزیت‌ها دقت کرد.

مزایا و معایب:

مزایا:

۱- سرعت تولید حداکثر است. چرا سرعت تولید زیاد است: وقتی در ریخته‌گری یک قطعه را تولید می‌کنیم، مذاب را داخل قالب می‌ریزیم و شکل می‌گیرد و قطعه ایجاد می‌گردد. نیرویی برای شکل دهی قطعه نیاز نمی‌باشد.

در نورد و اکستروژن و فورج باید نیروی برشی اعمال کنیم که هم زمان می‌برد و هم انرژی.

بنابراین در این روش سرعت تولید خیلی بالا است و در قالب ریخته‌گری قطعه تولید می‌شود.

۲- هیچ محدودیتی در مورد اندازه و شکل قطعات نداریم. مثلاً از دهم گرم قطعات ریخته‌گری می‌شوند تا چند ده تن. محدودیتی از نظر اندازه و شکل قطعه وجود ندارد.

۳- از روش‌های سنتی ریخته‌گری برای تولید کامپوزیت می‌توان استفاده کرد. یعنی در یک کارخانه‌ایی که قطعات را تولید

می‌کنند و ریخته‌گری انجام می‌دهند می‌توان قطعات کامپوزیتی را نیز تولید کرد. هیچ فرقی با ریخته‌گری قطعات معمولی

ندارد. در پاتیل مذاب، ذرات را وارد می‌کنند و هم زدن صورت می‌گیرد و بعد ریخته‌گری قطعه صورت می‌گیرد. تمام تجهیزات

ریخته‌گری سایر مواد برای ریخته‌گری کامپوزیت نیز به کار می‌رود، فقط نیاز به همزن دارد. که به سادگی می‌توان از همان

تجهیزات سنتی روش ریخته‌گری استفاده کرد برای ساخت کامپوزیت. روش اقتصادی است.

در کنار این سه حسن، این روش معایبی نیز دارد که معایب این روش به شرح ذیل می‌باشد:

۱- عدم ترشوندگی سرامیک‌ها با فلزات

برای افزایش ترشوندگی و یا به عبارتی برای ایجاد ترشوندگی سه راه وجود دارد:

الف) عملیات حرارتی

ب) افزودن مواد افزودنی به عبارتی اصلاح متالورژی ماتریس

ج) پوشش

پوشش: با الکترولس پوشش می‌دهیم. روی سیلیکون کاربید و یا آلومینا و ... یک لایه‌ی مس قرار می‌دهند. در این حالت لایه‌ی مسی با زمینه‌ی فلزی ترشوندگی دارد و دیگر مشکل ترشوندگی نخواهد داشت. اما در این روش: الف) به صورت ناخواسته مس را روی ذرات اضافه می‌کنیم و ب) ذره سنگین می‌شود. هدف این است که با کامپوزیت سازی به سبک شدن منجر شود، اما برای افزایش ترشوندگی لایه‌ی مسی روی ذره قرار می‌گیرد و ذره سنگین می‌شود.

اصلاح متالورژی ماتریس: برای این حالت می‌توان منیزیم یا استرانسیوم را اضافه کرد که منیزیم متداول‌ترین عنصر است که برای آلومینیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کامپوزیت سازی معمولاً از A356 استفاده می‌کنند چون ۰/۲ درصد منیزیم دارد که این منیزیم ترشوندگی را افزایش می‌دهد و اصلاح متالورژی ماتریس را به دنبال خواهد داشت.

عملیات حرارتی نیز راه دیگر برای افزایش ترشوندگی است. اگر ذرات سیلیکون کاربید به مدت یک ساعت در دمای ۱۱۰۰ یا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گیرد، در این صورت روی سطح Sic یک لایه‌ی  $\text{SiO}_2$  می‌نشیند که در این صورت ترشوندگی ایجاد می‌شود و ذره ترشوندگی دارد.

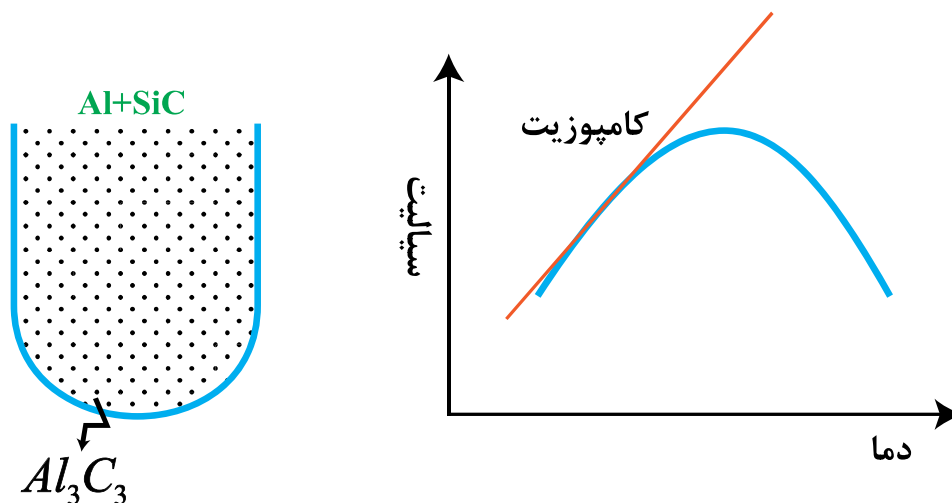
۲- کاهش سیالیت

وقتی ذرات سرامیکی را داخل مذاب می‌ریزیم، سیالیت کم می‌شود و هنگامی که سیالیت کم شود نمی‌توان آن را به راحتی ریخته‌گری کرد. (ماکزیمم تا ۲۰ درصد می‌توان ذرات را به مذاب اضافه کرد).

سیالیت به سه عامل بستگی دارد که یکی از عوامل مهم آن دما است. اگر دمای مذاب را زیاد کنیم، سیالیت بیش‌تر می‌شود. با این افزایش زیاد نمی‌توانیم کاری کنیم و سیالیت را افزایش دهیم. چون یک دوغاب داریم مثلاً آلومینیوم + سیلیکون کاربید که اگر دما را خیلی بالا ببریم این دو (ماتریس و ذرات تقویت کننده) با هم واکنش می‌دهند که  $\text{Al}_4\text{C}_3$  تشکیل می‌شود. در

این صورت ذرات  $Al_4C_3$  نیز به مذاب اضافه می‌شود. می‌توانیم با افزایش دما، سیالیت را افزایش دهیم اما ذرات جدید را نیز به مذاب اضافه کردیم.

این است که افزایش دمای بیش از حد مناسب نیست. ایجاد  $Al_4C_3$  به عبارتی ایجاد ذرات سرامیکی جدید محسوب می‌شوند و سیالیت را کاهش می‌دهند.



برای ماتریس به تنهایی این گونه نیست، همان‌طور که دما افزایش می‌یابد سیالیت نیز افزایش می‌یابد اما در کامپوزیت‌ها افزایش بیش از حد باعث بوجود آمدن فازهای جدید سرامیکی در مذاب می‌شود. بنابراین دما را تا حدی می‌توان افزایش داد.

۳- قانون استوکس: به خاطر این قانون ذرات شناور می‌شوند یا ته نشین می‌شوند.

۴- واکنش‌های شیمیایی شدید بین ذرات سرامیک و ماتریس است.

( $Al_4C_3$  که در اثر واکنش بین فاز تقویت کننده و زمینه تشکیل می‌شود).

۵- رانش ذرات، رانش ذرات باعث توزیع نامناسب می‌شود.

رانش، به تله افتادن و محبوس شدن به عنوان مشکل محسوب می‌شود.

۶- تخلخل زیاد

چرا تخلخل در کامپوزیت از تخلخل ماتریس بیش‌تر است:

(ذرات را از روش WORTEX وارد ماتریس می‌کنیم و تخلخل بیش‌تر می‌شود.)

هشت دلیل وجود دارد که برخی از آن اشاره می‌کنیم:

تخلخل‌ها دو نوع هستند: تخلخل گازی و تخلخل انقباضی

\* جوانه زنی مسئله‌ی مهمی است که آقای کمبل در کتاب ریخته‌گری‌اش بیان می‌نماید که اگر قطعه بخواهد سالم باشد و گاز نداشته باشد، بهتر است در ابتدا آخال زدایی کنید، چون خود آخال‌ها نیز محل جوانه زنی گازها خواهند شد. گازها مثلاً گاز هیدروژن و ... وقتی می‌خواهد تخلخل ایجاد کند، باید در یک جایی جوانه زنی کند. این ذرات سرامیکی بهترین محل برای جوانه زنی هستند.

\* زوایه‌ی ترشوندگی گاز با ذره مکمل زاویه‌ی ترشوندگی مذاب با ذره است. یعنی داریم:

$$180^\circ = \theta_{\text{مذاب-ذره}} + \theta_{\text{گاز-ذره}}$$

زاویه ترشوندگی ذره با مذاب بیان شد که ۱۲۰ یا ۱۳۰ یا ۱۴۰ است و ذرات در این حالت ترشوندگی خوبی ندارند. همان‌طور که این زاویه برای مذاب خوب نیست، برای گاز عالی است. بنابراین به راحتی گاز روی ذرات سرامیکی جوانه زنی می‌کند.

\* وقتی هم زدن انجام می‌شود و WORTEX ایجاد می‌شود، ذرات را می‌کشد به داخل و هوا را نیز به داخل می‌کشد.

\* مذاب یا دوغاب سفت است، قبل از این که انجماد حاصل شود گاز به راحتی نمی‌تواند خارج شود. (عدم خروج موثر گاز را داریم.) گاز به راحتی نمی‌تواند خارج شود.

\* ذراتی را که وارد می‌کنیم، این ذرات به صورت منفرد نیستند و به صورت کلوخه هستند. کلوخه‌هایی که وارد مذاب می‌شوند داخلشان هوا است در نتیجه هوا را با خود وارد مذاب می‌کنند.

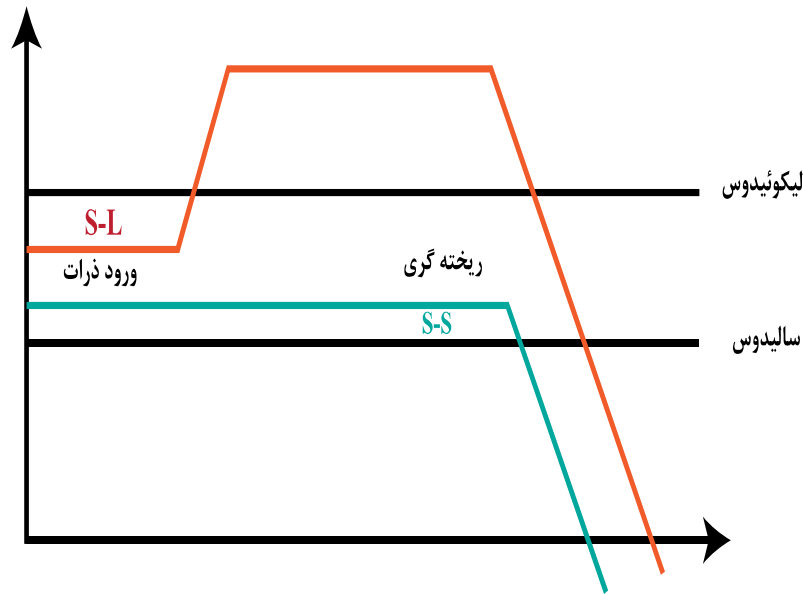
\* روی ذرات سرامیکی حتی اگر منفرد هم وارد شوند، یک فیلم هوا (لایه هوا) روی آن وجود دارد.

\* عدم ترشوندگی باعث می‌شود یک لایه هوا روی ذرات بماند.

\* مشکل دیگر این است که ذرات کمتر از ۱۰ میکرون را به سختی می‌توان وارد مذاب کرد به عبارتی دیگر ورود ذرات زیر ۱۰ میکرون خیلی سخت است.

## Compcasting

دمای مذاب وقتی ذرات را اضافه می‌کنیم، می‌تواند بالای لیکوئیدوس باشد و می‌تواند بین لیکوئیدوس و سالییدوس نیز باشد. در حالتی که بالای Liquidus باشیم، به این حالت LL می‌گویند. LL یعنی Liquidus- Liquidus یعنی ورود ذرات در حالت مایع است و هم هم زدن در حالت مایع است که این روش را LL می‌نامند.



در کنار روش LL، روش Compcasting نیز داریم. Compcasting به معنی این است که هنگامی که ذرات وارد می‌شوند، مذاب در حالت Semi-solid است پس بنابراین Compo casting به این ترتیب است که مذاب در حالت-Semi solid است.

SL: Semi-Solid Liquid

S-S: ورود ذرات و روش ریخته‌گری Semi-solid و Semi-solid است.

به این حالت SS و SL: Compcasting می‌گویند.

پس Compcasting به این معنا است که همزدن در حالت Semi-solid است و برای ریخته‌گری دو ورژن وجود دارد:

یا ریخته‌گری در دمای بالا است. (مایع است.) که S-L نامیده می‌شود.

یا ریخته‌گری در دمای Semi-solid است که به آن S-S می‌گویند.

بین حالت لیکوئیدوس و سالیدوس، Compcasting رخ می‌دهد. (نیمه جامد)

این بحث توسط آقای فلمینگز در دانشگاه ام آی تی در دهه‌ی ۷۰ میلادی مطرح شد که یک روش به نام رنو کستینگ را درحقیقت ابداع کردند، که ایشان یک دانشجو انگلیسی داشت به نام اسپنسر، روی ویسکوزیته‌ی آلیاژهای قلع و سرب کار می‌کردند. دستگاهی که برای سنجش ویسکوزیته ساخته بودند و استفاده می‌کردند، دو تا استوانه‌ی هم محور بودند که وسط آن استوانه‌ها را دوغاب ریخته بودند که استوانه‌ی خارجی را می‌چرخاندند که بدنبال آن استوانه‌ی داخلی نیز می‌چرخید. هرچه ویسکوزیته بیشتر باشد انتقال سرعت نیز بیشتر می‌شود.

اگر استوانه‌ی خارجی را ۱۰۰ تا می‌چرخاندند و استوانه داخلی ۸۰ می‌چرخید، می‌گفتند ویسکوزیته بالا است.

اگر استوانه‌ی خارجی را ۱۰۰ تا می‌چرخاندند و استوانه داخلی ۲۰ می‌چرخید، می‌گفتند ویسکوزیته پایین است.

از این حالت یک معیاری گذاشته بودند که ویسکوزیته را تعیین کنند. یک چیز جالب متوجه شدند که وقتی چرخیدن استوانه صورت می‌گیرد، ویسکوزیته کاهش می‌یابد و خود عمل چرخش نیز باعث کاهش ویسکوزیته می‌شود و سیالیت بالا می‌رود. وقتی سرعت چرخش زیاد شود، ویسکوزیته کاهش می‌یابد. هرچه قدر هم که کسر جامد بیشتر شود در این صورت ویسکوزیته پایین می‌آید. چرا؟ وقتی Semi-solid باشد، دندریته‌ها در حال تشکیل هستند، وقتی می‌چرخانیم، دندریته‌ها به شکل گل رز در می‌آیند و در نهایت شکل گلبول در می‌آیند. دندریته‌ها تغییر شکل می‌دهند و به شکل گلبولی می‌شوند. و وقتی به شکل گلبول در بیایند، لغزندگی آن‌ها روی هم زیاد می‌شود و به راحتی روی همدیگر حرکت می‌کنند. در نتیجه سیالیت زیاد می‌شود و ویسکوزیته پایین می‌آید. (دلیل کاهش ویسکوزیته این بود.)



سرعت چرخش افزایش یابد، دندریته‌ها شکل می‌گیرد و کاهش ویسکوزیته را خواهیم داشت. وقتی دندریته‌ها به شکل گلبولی در آمدند، مثل بلبرینگ روی هم می‌چرخند، مقاومت در برابر حرکت مایع ایجاد نمی‌کند و سیالیت افزایش می‌یابد و ویسکوزیته کاهش می‌یابد. اما اگر همزدن را انجام ندهند و به حال به خود بگذارند، دوباره به حالت قبل برمی‌گردند.

جلسه هشتم

مورخ: ۹۵/۰۹/۰۷

## روش Compocasting

فرق روش Compocasting با ریخته‌گری هم‌زدنی این است که در Compocasting عمل هم‌زدن در حالت نیمه جامد انجام می‌شود. در بین فاصله‌ی لیکوئیدوس و سالییدوس هم‌زدن انجام می‌شود. دو حالت وجود دارد:

۱- روش S-S: در حالت نیمه جامد هم ریخته‌گری انجام می‌شود.

۲- روش S-L: دما را بالا می‌آورند و در حالت مذاب ریخته‌گری را انجام می‌دهند. دلیل این که دما را بالا می‌برند به خاطر این که سیالیت ایجاد شود.

Semi solid – semi solid :S-S

Semi solid – Liquid :S-L

L-L: روش Liquid-Liquid است و wortex است.

دلیل این که در روش S-L دما را بالای لیکوئیدوس می‌برند و ریخته‌گری را انجام می‌دهند این است که سیالیت داشته باشد. از نظر کامپوزیت کدامش بهتر است و مزایا و معایبش نسبت به هم چیست.

وقتی هم‌زدن در حالت Semi-Solid انجام می‌شود ترشوندگی بهبود می‌یابد.

مزایای S-S نسبت به S-L:

۱- ترشوندگی بهتر / به‌خاطر این‌که وقتی هم می‌زنیم، دو تا فاز جامد داریم یکی ذرات سرامیکی داریم و یکی ذرات جامد فلزی داریم که همگی‌شان در مایع هستند. بنابراین ذرات سرامیکی به‌وسیله‌ی ذرات جامد فلزی، انرژی بیشتری به‌شان وارد می‌شود و ترشوندگی بهتر می‌شود.

۲- ساختار گلبولی دارد / وقتی منجمد هم می‌شود فاز آلفا (فلز) به صورت گلبول‌هایی قرار گرفته است که در وسط و بین آن‌ها سرامیک نیز توزیع شده است. این ساختار گلبولی مزایایی نیز دارد نسبت به ساختار دندریتی:

ساختار دندریتی به این ترتیب است که در بین دندریته‌ها، فازهای سرامیکی یا فازهای ثانویه قرار می‌گیرد.

ساختار دندریتی وقتی کار گرم روی آن می‌خواهیم انجام دهیم و گرمش کنیم مثلاً نورد، اکستروژن و فورج کنیم امکان ترک خوردن آن است بنابراین باید دما را افزایش دهیم ولی در ساختار گلبولی، فضایی که بین گلبول‌ها وجود دارد فازهای یوتکتیک یا زود ذوب هستند، وقتی آن را گرم می‌کنیم فاز زود ذوب آن اولاً ذوب می‌شود و بعد فاز آلفا به راحتی مثل بلبرینگ می‌چرخد. بنابراین کار گرم آن دمای کمتری لازم دارد، انرژی کمتری می‌برد و امکان ترک خوردن آن کم‌تر است.

این مزایای ساختار گلبولی است البته مزایای دیگری نیز دارد، خواص مکانیکی آن بیشتر و بهتر است.

به غیر از کامپوزیت‌ها، تمایل به ساختار گلبولی به خاطر مزایایی که دارد، زیاد است.

در مجموع مزایای S-S نسبت به S-L ترشوندگی و ساختار گلبولی است.

اما مزایای S-L نسبت به S-S چیست:

۱- سیالیت بیشتر

۲- ریخته‌گری راحت‌تر

دما را که بالا می‌بریم، سیالیت بیشتر می‌شود و ریخته‌گری راحت‌تر صورت می‌گیرد.

(در پروژه‌ها عمدتاً از روش S-L استفاده می‌شود.)

البته بهتر است بیان شود و اصلاح گردد که ترشوندگی بهتر فقط S-S نسبت به S-L نیست و بهتر است بنویسیم مزیت Compocasting نسبت به L-L است. کلاً در Compocasting ترشوندگی بهتری نسبت به L-L دارد. هم S-S و هم L-S ترشوندگی بهتری نسبت به L-L دارد. چون در Semi-Solid هم‌زدن انجام می‌شود و اگر در Semi-Solid ریخته‌گری کنیم، ساختار گلبولی داریم.

و اگر دما را بالا ببریم و بعد ریخته‌گری، سیالیت بیش‌تر می‌شود.

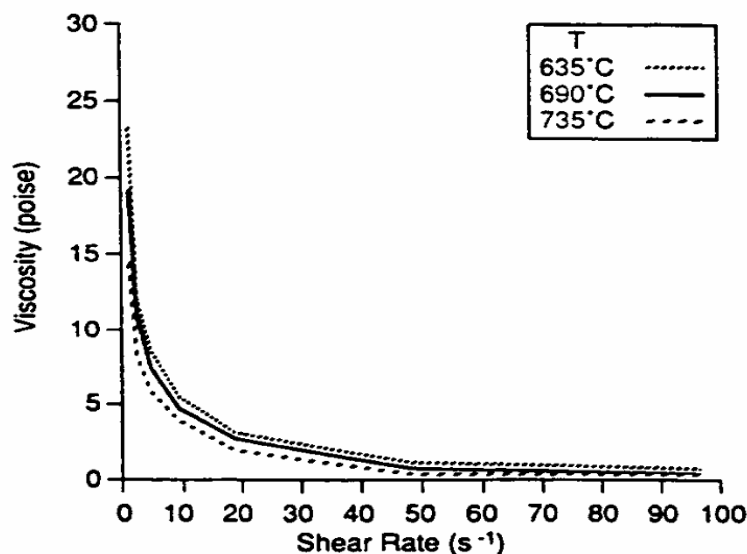
هم‌زدن در حالت Semi-Solid برای هر دو روش است.

یک نکته‌ی جالبی وجود دارد این است که لازم نیست حتماً باید آلیاژ در فاصله‌ی بین لیکوئیدوس و سالیدوس باشد، حتی بالای دمای ذوب هم اگر یک دوغابی از آلومینیوم + سیلیکون کاربرد داشته باشیم و آن را هم بزنییم، ویسکوزیته کاهش می‌یابد. لازم نیست حتماً آلیاژ بین دمای لیکوئیدوس و سالیدوس باشد. چون دوغاب بالای دمای لیکوئیدوس است ولی ذرات سرامیکی سیلیکون کاربرد در آن وجود دارد و وقتی آن را هم بزنییم، ویسکوزیته کاهش می‌یابد.

در آلیاژ AL 356، ۱۵ درصد Sic وجود دارد و در دماهای مختلف ۶۳۵، ۶۹۰ و ۷۳۵ درجه سانتی‌گراد که بالای دمای لیکوئیدوس است (دمای لیکوئیدوس آن ۶۱۰ الی ۶۱۵ درجه سانتی‌گراد است.) و همه فوق‌گداز دارند، و وقتی هم می‌زنییم ویسکوزیته کاهش می‌یابد.

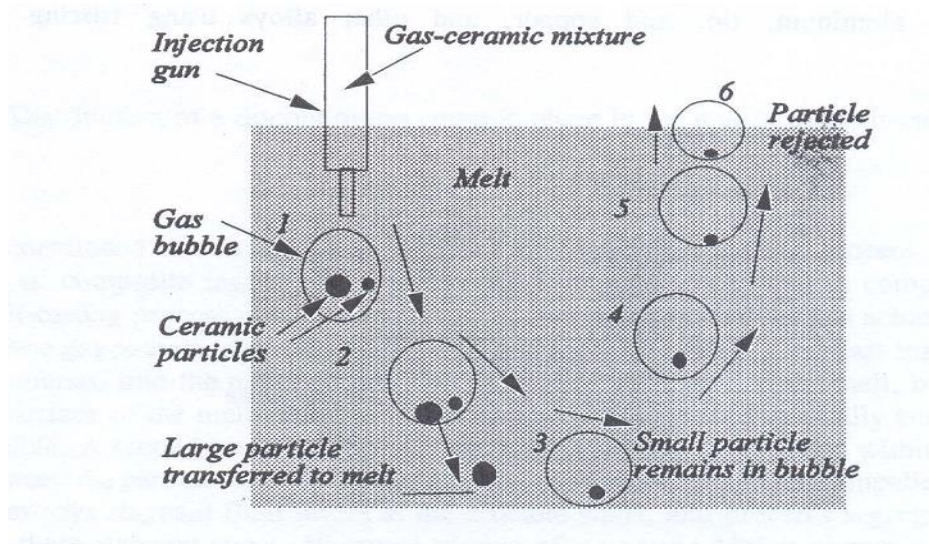
چرا ویسکوزیته کاهش می‌یابد:

دلیل این که وقتی دوغاب کامپوزیتی را هم می‌زنییم ویسکوزیته‌اش پایین می‌آید این است که خوشه‌ها یا Clusterها شکسته می‌شوند و خوشه‌های Sic در اثر هم‌زدن، می‌شکنند و پراکنده می‌شوند و ویسکوزیته کاهش می‌یابد. خوشه‌ها از هم باز می‌شوند و ویسکوزیته کاهش می‌یابد.



**Figure 1.6.** Influence of shear rate on the viscosity of A-356-15vol% SiC. (Reprinted by permission from D. J. Lloyd, 1991.)

غیر از روش هم‌زدن معمولی، روش‌های دیگری نیز هست که بتوانیم ذرات سرامیکی را وارد مذاب کنیم. یکی از روش‌ها برای ورود ذرات به مذاب، تفنگ تزریق یا Injection gun است که به جای این که ذرات را به داخل مذاب بریزیم و با هم‌زن مکانیکی هم بزیم از یک تفنگ تزریق استفاده می‌کنیم، سرامیک به اضافه‌ی یک گاز مثل گاز ازت یا آرگون و حتی هوا اما بهتر است گاز خنثی باشد، این‌ها را می‌دمیم داخل مذاب. بنابراین یک حباب‌هایی تشکیل می‌شود و ذرات سرامیکی در داخل حباب قرار می‌گیرند و حباب‌ها حرکت می‌کنند و بالا می‌آیند و حباب‌ها می‌ترکند و ذرات سرامیکی آزاد می‌شوند، به این ترتیب ذرات وارد مذاب می‌شوند. این روش یک سری پارامترهای فرآیند دارد. پارامترهای فرآیند: طبیعت گاز (گاز چه نوعی باشد، ازت باشد یا آرگون باشد)، فشار گاز چه قدر باشد، نرخ تزریق پودر مثلاً چند گرم بر دقیقه یا ثانیه پودر وارد شود، دمای مذاب، عمق فروبری (تفنگ تزریق را تا چند سانتی‌متر داخل مذاب فرو ببریم) که این‌ها بعضی از پارامترهای هستند. این روش خوبی نیست چون توزیع به خوبی انجام نمی‌شود. اما برای شمش که شمش را بریزیم و بعداً شمش را هم بزیم و اصلاح کنیم از این روش استفاده می‌شود.

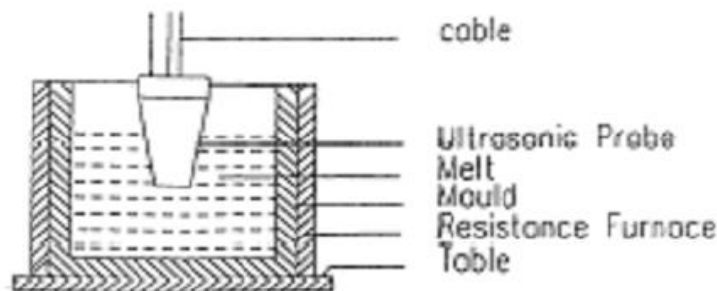


روش دیگر روش آلتراسونیک است، اگر یک پمپ آلتراسونیک را بالای مذاب قرار بدهیم، انرژی زیادی را به داخل مذاب می‌فرستد که آن انرژی باعث می‌شود که بین هزار تا صد هزار g در حقیقت شتاب ایجاد می‌شود و این شتاب زیادی که ایجاد می‌شود در اثر امواج آلتراسونیک، سبب می‌شود که خوشه‌ها از هم جدا شوند و توزیع شوند. باعث توزیع خوبی از ذرات می‌شود اما این روش یکی - دو تا عیب هم دارد:

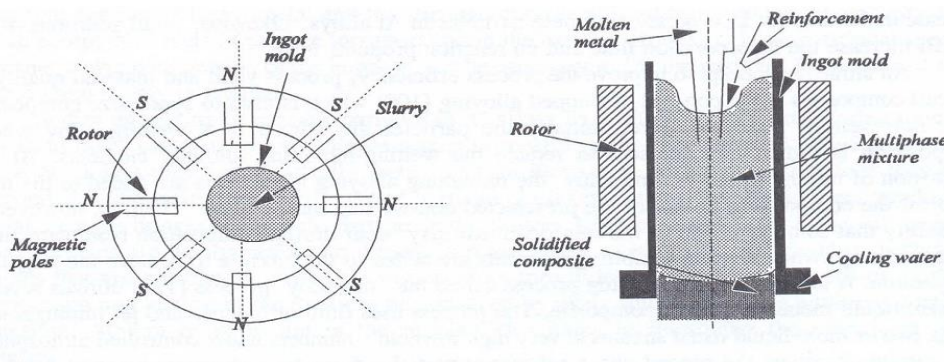
هزینه این روش بالا است.

برای حجم‌های کوچک کاربرد دارد. مقداری که می‌تواند موثر باشد، محدود است. مثلاً اگر حجم زیاد باشد، باید ۲ الی ۳ پمپ آلتراسونیک به کار برد.

این انرژی زیادی که وارد می‌کند به خود غلاف آلتراسونیک و دیواره‌ی بوتله صدمه می‌زند.



روش دیگر، روش MHD است. روش مغناطیسی است. در کوره‌های القایی فرکانس متوسط، وقتی مذاب داخل آن قرار می‌گیرد شروع می‌کند به چرخش و مذاب می‌چرخد به خاطر القای امواج الکترومغناطیسی است که وارد مذاب می‌شود. از همین خاصیت استفاده می‌کنیم و قطب‌های S و N (شمال و جنوب) را دور بوتله قرار می‌دهیم و باعث می‌شود که مذاب داخل بوتله بچرخد. بنابراین ذرات را که وارد می‌کنیم بدون این که از هم‌زن خارجی استفاده می‌کنیم، مذاب شروع به چرخش می‌کند.



این روش نیز یک سری مزایا و معایب دارد. مزایا:

از هم‌زن خارجی استفاده نمی‌شود.

هم‌زن خارجی باعث می‌شود که آلودگی وارد مذاب شود.

(در دانشکده مهندسی مواد دانشگاه تهران از هم‌زن گرافیتی استفاده می‌شود که بعد از یک مدت که از این هم‌زن‌ها استفاده می‌شود ملاحظه کردند که گرافیت وارد مذاب می‌شود. در دانشگاه علم و صنعت از هم‌زن فولادی با پوشش سرامیکی استفاده می‌کنند، از یک جهاتی خوب است اما باز آن پوشش سرامیکی نیز اگر نیرو زیاد باشد، کنده می‌شود. / اما این روش هیچ کدام از این معایب را ندارد و نیاز به هم‌زن خارجی ندارد.)

عیب این روش:

هزینه بالا است و دستگاه‌های این روش گران است.

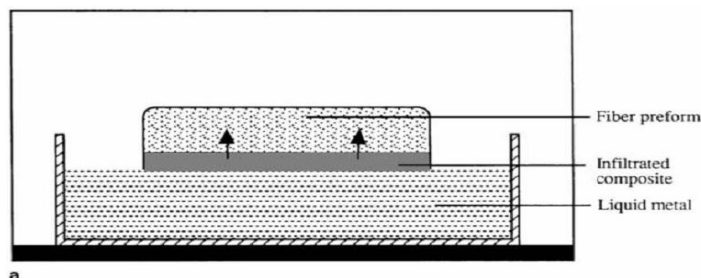
بستگی به خواص الکترومغناطیسی مواد دارد. (چون باید القا شود، هر ماده‌ای تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار نمی‌گیرد.) جنس ماده موثر است اما در همزن مکانیکی هر ماده‌ای باشد می‌توان هم‌زدن را انجام داد. اما در این روش مواد مورد استفاده باید مطلع باشیم که خاصیت الکترومغناطیسی ماده چگونه است تا بتواند تحت تأثیر القا قرار گیرد.

## روش Infiltration:

یک preform می‌سازیم (توده‌ای است از سرامیک) که این یک preform توده‌ی متخلخل است که استحکام کافی دارد و تحت تأثیر مذاب از بین نمی‌رود، مچاله نمی‌شود و می‌تواند خواص مکانیکی‌اش را تا حدودی حفظ کند. اما تخلخل زیادی دارد که البته تخلخل حساب شده است و مذاب را تزریق می‌کنند داخل این preform، به جای این که ذرات را داخل مذاب بریزیم و هم بزنییم. از الیاف کوتاه، الیاف بلند، ویسکر و حتی پودر و ذرات سرامیکی یک preform درست می‌کنیم و مذاب را به داخل این preform تزریق می‌کنند. (مثلاً سیم ظرفشویی یک preform است که مذاب را تزریق می‌کنند به داخلش و کامپوزیت می‌سازند در حقیقت فاز تقویت کننده سیم‌های فولادی است.) پس بنابراین در این روش به preform نیاز است. شرکت تویوتا برای تولید رینگ پیستون از آلومینا استفاده کرده است که از سال ۱۹۸۰ موتور خودروهای دیزل‌شان را از کامپوزیت‌های آلومینیوم و  $Al_2O_3$  برای رینگ پیستون استفاده کردند که preform تهیه می‌شد و مذاب به داخل این preform تزریق می‌شود. مذاب به‌وسیله‌های مختلف با یک نیروی خارجی مثل نیروی هیدرولیکی یا به‌وسیله‌ی گاز یا خلا یا نیروی گریز از مرکز یا تلقیح خود به خودی به preform تزریق می‌شود.

در تلقیح خود به خودی (spontaneous infiltration): اگر ماده‌ای داشته باشیم که ترشوندگی خوبی داشته باشد، بگذاریم preform اش را داخل مذاب تحت تأثیر نیروهای موئینگی، مذاب خودش بالا می‌رود. داخل preform تلقیح می‌شود. (بدون

استفاده از فشار خارجی).



شماتیک روش تلقیح خود به خودی

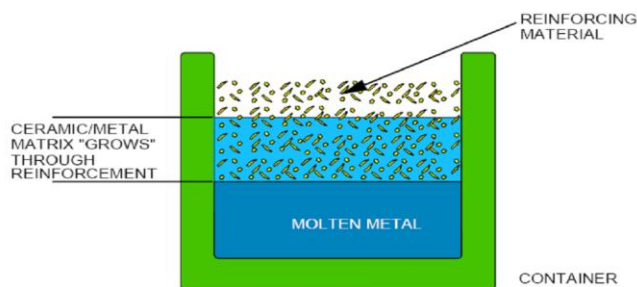


از تلقیح خود به خودی شرکت lanxide استفاده کرد و بدون استفاده از فشار خارجی مذاب به داخل preform می‌رود که این روش را روش Primex نامیدند که برای آلیاژ آلومینیوم- منیزیم در دمای ۷۵۰ الی ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد در داخل preform تزریق کردند تحت تأثیر گاز ازت.

محدودیتی که در این روش وجود دارد این است که باید در این روش ترشوندگی خوبی وجود داشته باشد.

روش In situ: کاری که می‌کنند این است که مذاب آلومینیوم بالا می‌آید داخل preform و یک گاز واکنش دهنده می‌فرستند از بالا، که این مذاب را تبدیل به سرامیک می‌کنند.

مثلاً می‌خواهند کامپوزیت  $Al_2O_3$ - Sic بسازند، آلومینا نقطه‌ی ذوبش بالا است و مشکل است که با تزریق آن را انجام دهیم. اما آلومینیوم را به راحتی می‌توان تزریق کرد. بنابراین آلومینیوم را در داخل preform می‌ریزند و گاز اکسیژن از بالا می‌دمند، و تبدیل به  $Al_2O_3$  می‌شود. در نهایت  $Al_2O_3$ - Sic خواهیم داشت. (آلومینیوم اکسید می‌شود و تبدیل به  $Al_2O_3$  می‌شود. preform نیز از Sic بود، در نتیجه کامپوزیت  $Al_2O_3$ - Sic را خواهیم داشت.) و اگر ازت بدمند به داخل مذاب در این صورت تبدیل به نیتريد می‌کنند. به عبارتی دیگر یک گاز واکنش دهنده می‌دمند و مذاب را تبدیل به سرامیک می‌کنند.



### Principle of the in Situ Lanxide Process

روش دیگر استفاده از فشار هیدرولیکی است، که می‌توان یک preform قرار داد و مذاب بالایی سر ریخت. پیستون هیدرولیکی فشار می‌آورد و مذاب تحت فشار وارد preform می‌شود.

البته مذاب نباید دچار انجماد زودرس شود و جدایش صورت گیرد، باید پیش گرم صورت گیرد. دمای قالب، دمای فلز، دمای preform سه عامل مهم هستند که تعیین کننده هستند و اجازه نمی‌دهند که مذاب دچار انجماد زودرس شود. البته نباید

خیلی دمای قالب، فلز و preform را بالا برد، چون باعث ایجاد واکنش‌های مخرب می‌شود و مطلوب نیست. این روش خوبی است که محدودیتی در برابر فشار وجود ندارد تا ۲۰۰ الی ۳۰۰ مگاپاسگال می‌توان در این روش فشار اعمال کرد.

روش دیگر استفاده از فشار گاز است به این ترتیب که preform را می‌گذاریم و مذاب داخل preform می‌ریزیم. گاز با فشار به داخل می‌فرستیم، وقتی گاز با فشار وارد می‌شود، گاز روی سطح مذاب فشار می‌آورد. این روش عیبش این است که نمی‌توان فشار را خیلی بالا برد تا ۱۷ مگاپاسگال فقط می‌توان فشار را اعمال کرد. از نظر ایمنی خطرناک است چون مذاب داریم و فشار گاز نیز هست، بنابراین نمی‌توان فشار گاز را بالا برد. عیب این روش این است که فشار بالا را نمی‌توان استفاده کرد و فشار ۱۵ الی ۱۷ مگاپاسگال است به خاطر مسائل ایمنی.

روش دیگر استفاده از خلا است که در این روش preform را می‌گذاریم داخل لوله و یک سر لوله داخل مذاب است و یک سر دیگر لوله متصل به خلا است و مذاب را می‌کشد و می‌برد داخل preform و کامپوزیت تشکیل می‌شود.

عیب این روش است که مقدار فشاری که اعمال می‌شود حداقل یک اتمسفر است. حداکثر خلایی که اعمال می‌کنیم خلا کامل است و فشار هوا است که نیرو وارد می‌کند و فشار هوا یک اتمسفر است بنابراین فشار زیادی ایجاد نمی‌شود و فشار زیادی را نمی‌توان استفاده کرد.

روش دیگر، روش گریز از مرکز است: که در این روش preform را داخل قالب گریز از مرکز می‌گذارند و مذاب را می‌ریزند، تحت نیروی گریز از مرکز، مذاب داخل preform می‌رود و اما این روش چه پارمترهایی دارد: میزان فشاری که اعمال می‌کنیم مهم است. با چه سرعتی مذاب را اعمال کنیم نیز مهم است. سرعت چه تأثیری دارد: هر چه آرام‌تر مذاب را به داخل بریزیم، امکان این وجود دارد که کانال‌ها را پر کند بیش‌تر است. البته اگر خیلی هم آهسته بریزیم، امکان دارد انجماد صورت گیرد بنابراین باید سرعت ورود مذاب بهینه باشد.

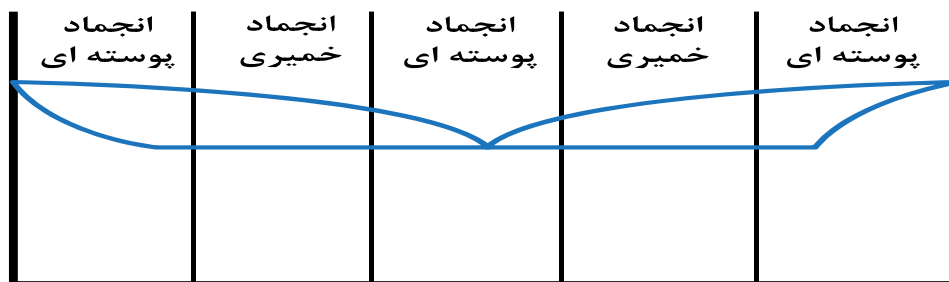
دمای قالب نیز مهم است. دمای قالب نباید خیلی بالا و خیلی پایین باشد. دمای قالب خیلی بالا نباشد، اگر باشد واکنش مخرب رخ می‌دهد. دمای قالب خیلی پایین باشد، دچار انجماد زود رس می‌شود.

ترکیب شیمیایی مذاب و فوق‌گداز آن نیز مهم است.

ترکیب preform و کسر حجمی آن چه قدر باشد و دمای preform نیز مهم است. سه تا عامل با هم وارد عمل می‌شوند: (۱) دمای پیش گرم قالب، (۲) میزان فوق گداز و (۳) دمای پیش گرم preform. این سه تا اگر خیلی یاد باشند باعث می‌شوند که واکنش مخرب رخ دهد و اگر خیلی کم باشند انجماد زودرس رخ می‌دهد.

ترکیب شیمیایی مذاب و انجماد نیز مهم است. اگر یک دیاگرام فازی را در نظر بگیریم که این دیاگرام فاز: در سه جا انجماد پوسته‌ایی داریم. به طور خلاصه فلزات خالص، فلزات کم آلیاژ و آلیاژهای نزدیک به یوتکتیک دارای انجماد پوسته‌ای هستند و بقیه‌ی حالت‌ها انجماد، انجماد خمیری است.

اگر دامنه‌ی انجماد کم باشد، انجماد پوسته‌ایی است و اگر دامنه‌ی انجماد زیاد باشد، انجماد خمیری است.



دیاگرام فازی

در انجماد پوسته‌ایی وقتی انجماد انجام می‌شود، به صورت یک پوسته است. یک پوسته اطراف قالب شروع می‌کند به رشد تا به مرکز برسد، تا انجماد کامل صورت گیرد. بین مذاب و جامد همیشه یک فصل مشترک کاملاً مشخص وجود دارد که یک طرف آن مذاب است و طرف دیگر آن جامد.

در انجماد خمیری مثل سفت شدن بتن است. جاهایی شروع می‌کنند به منجمد شدن و کم کم بزرگ می‌شوند، فصل مشترک بین مایع و جامد مشخص نیست. جبهه‌ی انجماد مشخص در انجماد خمیری مشخص نیست.

برای این روش Infiltration، حتماً باید انجماد پوسته‌ایی باشد. کانال است که مذاب می‌خواهد وارد شود، اگر انجماد خمیری باشد شروع می‌کند به داخل شدن و در کانال سفت می‌شود و راه را می‌بندد. بنابراین انجماد خمیری مناسب نیست. اما اگر انجماد پوسته‌ایی باشد داخل کانال که مذاب جریان پیدا می‌کند، اگر مذاب هم بخواهد منجمد شود، در دیواره می‌بندد و

همواره وسط کانال راه است که مذاب از وسط کانال وارد شود و کانال را پر کند. چون از جداری کانال انجماد آغاز می‌شود و پوسته‌ایی است. بنابراین انجماد پوسته‌ایی بهتر است.

ترکیب شیمیایی مذاب، solidification mode یا mode انجمادی را مشخص می‌کند. باید انجماد پوسته‌ایی باشد. در روش Infiltration باید انجماد پوسته‌ایی باشد.

و اما مزایا و معایب روش infiltration:

مزایای این روش:

۱- می‌توان کامپوزیت‌هایی با فاز دوم پیوسته تولید کرد. مثلاً الیاف طویل مثل گرافیت یا سیلیکون کاربید یا آلومینا را از آن‌ها بسازیم و داخل قالب قرار دهیم و مذاب را ریخته و یک کامپوزیت الیافی بسازیم در صورتی که در روش هم‌زدن حتماً باید ذره باشد یا الیاف کوتاه یا ویسکر باشد و کامپوزیت الیافی نمی‌توان تولید کرد.

۲- تخلخل کم است و ترشوندگی بهتر است. برای این که اغلب از فشار استفاده می‌شود بنابراین تخلخل کم است و به خاطر این در این روش از فشار استفاده می‌شود، ترشوندگی بهتر است.

۳- توزیع فاز دوم یکنواخت است.

۴- محدودیتی در حداکثر حجمی فاز دوم نداریم.

قبلاً گفته شد که از ۲۰ درصد بیش‌تر نمی‌توان از فاز دوم استفاده کرد چون سیالیت کم می‌شود و نمی‌توان ریخته‌گری کرد اما در این روش هیچ محدودیتی وجود ندارد و preform می‌تواند ۷۰ درصد باشد و مذاب ۳۰ درصد.

۵- امکان تولید کامپوزیت‌های selective وجود دارد. مثلاً می‌خواهیم قطعه‌ایی درست کنیم که یک قسمت‌هایی از آن کامپوزیت باشد و یک قسمت‌هایی از آن کامپوزیت نباشد، از این روش می‌توان این نوع قطعه را تولید کرد.

اگر از squeeze casting استفاده کنیم تمام مزایایی که برای آن وجود دارد نیز وجود دارد. این روشی است که بین آهنگری و ریخته‌گری است. مذاب داخل قالب می‌ریزند و تحت فشار منجمد فشار می‌شود. انجماد و پر شدن قالب تحت فشار است. حال می‌توان این روش را نیز برای کامپوزیت سازی استفاده کنیم یعنی preform را بگذاریم و تحت فشار منجمد کنیم.

معایب این روش:

۱- ساخت preform سخت است.

۲- امکان تلقیح ناقص و انجماد زود رس وجود دارد. (امکان دارد گوشه‌ایی از preform مذاب نرفته باشد و ...)

۳- امکان دفرمه شدن preform وجود دارد.

۴- این روش فقط برای آلیاژهایی با نقطه ذوب پایین کاربرد دارد.

۵- قیمت تجهیزات آن ممکن است گران باشد. چون سیل بندی و اعمال فشار در دمای بالا سخت است و هزینه بر است.

جلسه نهم

مورخ: ۹۵/۰۹/۱۴

**روش SPRAY:**

به صورت کلی مذاب به صورت قطراتی در می‌آیند و این قطرات بعداً به هم می‌پیوندند و می‌تواند یک جسم متراکم تولید کنند. سه روش اسپری وجود دارد:

Thermal Spray

Plasma Spray

Spray Forming

در روش Thermal Spray: یک سیم فلزی می‌آید وارد دستگاه می‌شود و این سیم نوکش ذوب می‌شود و به قطرات تبدیل می‌شود و پاشیده می‌شود روی سطح قطعه‌ی کار.

در روش Plasma Spray: به همین ترتیب است منتها پودر فلز می‌آید وارد دستگاه می‌شود و بعد ذوب می‌شود و به صورت قطرات در می‌آید در محیط پلاسما و روی سطح کار پاشیده می‌شود.

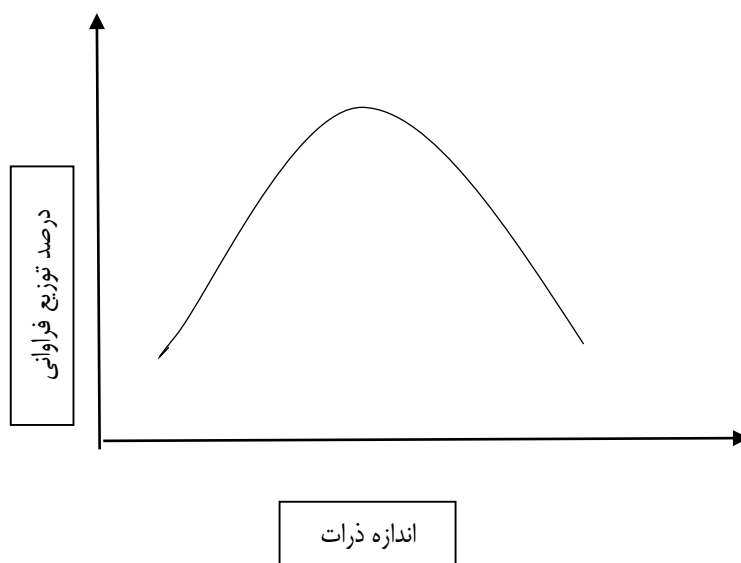
Thermal Spray یا اسپری حرارتی و روش Plasma Spray، روش تولید قطعه نیستند و برای تعمیر به کار می‌روند. مثلاً اگر سطحی از قطعه‌ی بزرگ که خراب شده است روی آن Thermal Spray انجام می‌دهند و بعد سنگ می‌زنند و به این صورت آن قطعه را تعمیر می‌کنند. (به صورت کلی یک روش coating است و برای پوشش سطحی و تعمیر سطحی به کار می‌رود.)

بحث اصلی روی روش Spray Forming است و بعد از آن به تولید کامپوزیت‌ها از این روش می‌پردازیم.

در روش Spray Forming به این ترتیب است که باریکه‌ای از فلز مذاب ایجاد می‌شود. یک بوته‌ی کف ریز را در نظر بگیرید که مذاب از کف این بوته به صورت یک باریکه خارج می‌شود و بعد یک گاز پر انرژی مثلاً گاز ازت، آرگون با فشار

نسبتاً زیاد از طریق یک اتمایزر به باریکه‌ی مذاب می‌خورد و این را به قطراتی تبدیل می‌کند. این قطرات اگر که اجازه داده شود تا انجمادشان در داخل این محفظه بمانند، پودر می‌شوند. که یکی از راه‌های تهیه‌ی پودر فلزات همین روش است. بنابراین تولید پودر از روش اتمیزه کردن، به این ترتیب است که باریکه‌ای از مذاب آشفته می‌شود جریانش و از هم پاشیده می‌شود و به قطراتی تبدیل می‌شود و این قطرات یک مسافت نسبتاً زیادی را طی می‌کنند تا این که منجمد شوند مثلاً ۶ متر و بعد در پایین این محفظه پودر تبدیل می‌شود و در آن جا پودر ایجاد می‌شود.

در روش Spray Forming تفاوتش با تهیه‌ی پودر فلزات این است که یک زیرلایه یا substrate در مسیر حرکت این قطرات قرار می‌گیرد. بنابراین این قطرات قبل از این که انجمادشان کامل شود روی سطح جمع می‌شوند و این قطرات سه حالت دارند: ۱- یا این که کاملاً مذاب هستند. (اگر بزرگ باشند کاملاً مذاب هستند). ۲- یا این که semi-solid هستند. (قطر متوسط داشته باشند semi-solid هستند). / انجمادشان شروع شده است ولی خاتمه پیدا نکرده است. ۳- یا این که کاملاً پودر هستند یعنی آن قدر ریز بودند که کاملاً پودر بودند. می‌دانیم که وقتی یک جریانی از باریکه‌ی مذاب، اتمیزه می‌شود این یک size distribution می‌دهد یعنی اگر توزیع فراوانی برحسب درصد بگیریم و اندازه ذرات، نمودار زیر بدست می‌آید:



یعنی ذرات ریز یک مقدار کم‌اند و بعد ذرات متوسط و بعد ذرات درشت وجود دارند.

ذرات ریز کاملاً پودر هستند.

ذرات متوسط، semi-solid هستند.

ذرات درشت و بزرگ، کاملاً مایع یا مذاب هستند.

بنابراین ذرات ریز، متوسط و درشت وجود دارند.

وقتی این ذرات روی زیرلایه می‌افتند، در هم قاتی می‌شوند، آن پودرهای ذوب مجدد می‌شود، آن نیمه جامدهایش آشفته می‌شود، مایع پخش می‌شود بین بقیه و بالاخره یک توده‌ایی را تشکیل می‌دهد که این توده به سرعت منجمد می‌شود و به این ترتیب یک رسوب شکل می‌گیرد، این فرآیند Spray Forming است. حال اگر ذرات سرامیکی را همزمان با این قطرات مایع بپاشیم در این جریان، می‌شود پاشش همزمان و کامپوزیت می‌سازد. مثلاً ذرات سیلیکون کاربید، آلومینا یا هر ذره‌ی سرامیکی را به صورت همزمان بپاشیم داخل این قطرات، روی زیرلایه می‌افتد و می‌شود کامپوزیت. روش Spray Forming یک سری پارامترهایی دارد مثل:

۱- اولین پارامتر سیستم آلیاژی است یعنی چه آلیاژی را استفاده کنیم.

۲- دمای بارریزی چه مقدار باشد.

۳- باریکه‌ی مذاب با چه نرخ‌ی جاری شود. (flow rate مذاب)

۴- نسبت flow rate گاز به فلز، یعنی چه میزان گاز به اندازه‌ی یک گرم فلز وارد می‌شود.

۵- نوع و هندسه اتمایزر. (اتمایزرها انواع و اقسام مختلفی دارند.)

۶- نوع گاز اتمیزه کننده چه باشد. (ازت، هلیوم، آرگون و یا گازهای دیگر)

۷- با چه فشاری و به عبارتی با چه دبی گاز وارد شود.

۸- فاصله‌ی پرواز / این پارامتر خیلی مهم است. از نقطه‌ایی که اتمیزه می‌شود تا محل زیرلایه را فاصله‌ی پرواز می‌گویند.

اگر فاصله‌ی پرواز خیلی زیاد باشد، همش منجمد می‌شود. اگر فاصله‌ی پرواز خیلی کم باشد، نیمه جامدها هم به صورت مایع



در می‌آید. بنابراین فاصله‌ی پرواز مهم است و با تنظیم فاصله‌ی پرواز می‌توان کسر جامد را تعیین کرد. یعنی چه مقدار از آن جامد است و چه مقدار آن مایع است که مهم است. بنابراین فاصله‌ی پرواز مهم است.

۹- دمای زیرلایه / دمای زیرلایه چه قدر باشد. آیا گرم باشد یا پیش گرم کنیم یا آبگرد کنیم.

۱۰- سیستم خنک کننده دارد.

۱۱- حرکت زیرلایه چگونه باشد.

۱۲- فضای اتمایزر چگونه باشد. (خلا باشد، گاز خنثی باشد و یا هوا.)

در شکل موجود در پاورپوینت یک اتمایزر را نشان می‌دهد که زیرلایه حرکت افقی دارد، وقتی حرکت افقی کند ورق تولید می‌شود. قطرات می‌پاشد و زیر لایه هم در حال حرکت است، بنابراین ورق تولید می‌شود.

اگر بخواهیم ورق ضخامتش زیاد باشد، سرعت حرکت زیرلایه را کم می‌کنیم و اگر بخواهیم ورق ضخامتش کم باشد، سرعت حرکت زیرلایه را زیاد می‌کنیم.

پس بنابراین می‌توان در یک مرحله ورق تولید کرد. برای روش سنتی تولید ورق، یک شمش‌هایی با قطر ۴۰ سانتی‌متری یا ضخامت ۴۰ سانتی‌متری ریخته‌گری می‌شود، چندین مرحله گرم می‌شود و می‌رود زیر غلطک نورد و تکرار می‌شود این مراحل تا ورق ۳ میلی‌متری تولید شود.

اما در این جا در یک مرحله از مذاب می‌رسیم به ورق.

ورق قبل از ماشین‌کاری و بعد از ماشین‌کاری که از این روش تولید شده بودند را در پاورپوینت مشاهده می‌کنیم که ورق‌هایی به طول ۳ متر و عرض ۱ متر و ضخامت ۸ الی ۴۰ میلی‌متر به صورت موفقیت آمیز به روش Spray Forming تولید شده است. می‌توانیم لوله نیز تولید کرد. اگر زیرلایه حرکت چرخشی داشته باشد، در عین حال که حرکت افقی دارد، لوله تولید می‌شود. یک مغزه وجود دارد و روی آن پاشش صورت می‌گیرد. بنابراین هم حرکت افقی و هم حرکت دورانی داریم و تولید لوله داریم. به عنوان مثال با  $80 \text{ Kg/min}$  فولاد پاشیده می‌شود روی زیرلایه و قبل از این که انجماد آن کامل شود، مغزه را از وسط آن خارج می‌کنند. به این ترتیب لوله تولید می‌شود. لوله‌ی بدون درز است و خواص مکانیکی بسیار خوبی دارد.

لوله قبل از ماشین کاری و بعد از ماشین کاری را در پاورپوینت مشاهده می‌کنیم که لوله‌هایی به طول ۴۰ سانتی‌متر و ضخامت ۲۵ الی ۴۰ میلی‌متر از فولاد زنگ‌نزن و سوپرآلیاژها از این روش تولید شده است.

بنابراین وقتی خواستیم از ورق به لوله برسیم، یک حرکت دورانی به آن زیرلایه دادیم و لوله تولید می‌شود. (به خاطر ضریب انبساط حرارتی متفاوت نمی‌چسبد و زیرلایه سرامیکی است و راحت مغزه بیرون می‌آید.) و اگر بخواهیم میله تولید کنیم، حرکت عمودی به آن می‌دهیم.

اگر بخواهیم یک قالب ساده بگذاریم مثل دسته شاتون، یک قالب ساده زیر Spray قرار می‌دهیم و حتی قطعات را با این روش Spray Forming می‌توان تولید کرد.

در سال ۱۹۸۶ یک کمپانی در ژاپن، غلطک نوردش را از این روش تولید کرد و گزارش کرد که عمر این غلطک‌ها سه برابر غلطک‌های متداول است.

از سال ۱۹۹۱ تولید صنعتی آن آغاز شد و از فولادهای تندبر، فولاد پر کروم و پر کربن از این روش تولید کردند.

وقتی فولاد HSS داریم که کربن آن بالا است و کروم آن بالا است، کاربیدهای زیادی دارد و وقتی کاربید کروم به مقدار زیاد تشکیل شود، درشت می‌شوند، بنابراین در ریزساختار آن کاربیدهای درشت می‌بینیم که محل تمرکز تنش می‌شوند و قطعه به شدت شکننده است و خواص مکانیکی آن بسیار ضعیف است چرا که کاربیدهای درشت دارند. ما می‌خواهیم همین مقدار کروم را بزنیم و همین مقدار کربن را هم داشته باشیم ولی کاربیدهای ریز باشد. با روش Spray Forming می‌توان به این دست پیدا کرد. چون هر کدام از این قطرات، مقدار مشخصی کروم و کربن دارند و وقتی روی زیرلایه می‌افتند به سرعت منجمد می‌شوند و آن کاربیدها تشکیل می‌شوند و فرصت نفوذ و به هم پیوستن و درشت شدن نیست. بنابراین ریز ساختار دارای کاربیدهای بسیار ریزی است. همان درصد کاربید را دارد ولی ریز است و خواص مکانیکی آن به این دلیل است که می‌گویند سه برابر مواد متداول صنعتی است.

هزینه‌ی این روش بالا است.

ما می‌توانیم پوشش ایجاد کنیم. اگر یک لوله داشته باشیم که بخواهیم روی آن یک لایه‌ی پوشش دهیم، همان لوله را گرم می‌کنیم و بعد ماده‌ی پوشش را روی آن اسپری می‌کنیم و به این ترتیب پوشش بر روی قطعه موردنظر ایجاد می‌شود. الان در شکل پاپوپورینت فولاد است که مس روی آن روی آن قرار گرفت است و هیچ فصل مشترکی تیزی بین آن‌ها نیست. وقتی پوشش می‌دهیم مثلاً گالوانیزه می‌کنیم، وقتی ورق را در مذاب روی فرو می‌بریم، لایه‌ایی از روی بر روی آن ورق می‌نشیند و امکان جدایش وجود دارد چون دو ماده‌ی متفاوت هستند. اما با استفاده از این روش پوشش دهی باعث می‌شود که اصلاً این اتفاق نیفتد، برای این که مثلاً می‌شود دو تا اسپری به کار برد و اسپری اول خود لوله را ایجاد کند و اسپری دوم پوشش ایجاد کند. این‌گونه خود لوله ایجاد می‌شود و قبل از این که منجمد شود، پوشش نیز روی آن ایجاد می‌شود و این دو با هم ممزوج می‌شوند و فصل مشترکی تیزی بین آن‌ها وجود ندارد.

به هر حال این روش برای پوشش دهی نیز استفاده می‌شود.

دانه‌هایی که ایجاد می‌شود بسیار ریز و هم محور هستند از لحاظ ریزساختاری نیز دانه‌هایی که در روش Spray Forming ایجاد می‌شود، هم محور و ریز هستند.

مزایای روش Spray Forming:

روش نسبتاً جدیدی است که سبب تشکیل دانه‌های هم محور و دانه‌های ریز و حداقل جدایش و جلوگیری از درشت شدن فازهای ثانویه را خواهد داشت. خلاصه از نظر متالورژی ریز ساختار بسیار مطلوبی دارد و منتهی اغلب آن تخلخل دارد به این ترتیب که پاشیده می‌شود یک مقدار تخلخل دارد و گاهی لازم است عملیاتی برای بستن تخلخل‌ها انجام گیرد مثل نورد یا اکستروژن. خواص آن از ریخته‌گری سنتی بهتر است و قابل رقابت با متالورژی پودر است.

اما معایب روش Spray Forming:

۱- هزینه‌ی آن بالا است. قیمت گاز خنثی گران است. اگر بخواهیم گاز ازت، آرگون و هلیوم استفاده کنیم گران است. (بعضی از کارخانه‌ها گاز را بازیافت می‌کنند و دوباره استفاده می‌کنند.)

۲- مقدار زیادی over spray داریم. وقتی که این قطرات روی زیرلایه می‌خورد، حدود ۳۰ درصد آن به اطراف می‌افتد و ۳۰ درصد آن از زیرلایه جدا می‌شود که به آن over spray می‌گویند و پودر می‌شوند و جزء قطعه نیست. این یک عیب است.

۳- ماشین کاری آن‌ها نیز هزینه‌بر است.

۴- یک عیب دیگر آن تکرار پذیری بد آن است. بنابراین کنترل شدیدی باید روی این فرآیند صورت گیرد.

فرض کنید بخواهیم فاصله را ثابت نگه داریم، مثلاً میله در حال رشد است و فاصله کم می‌شود پس باید سیستمی داشته باشیم که آن را پایین بیاورد. اگر فاصله پرواز را بخواهیم ثابت باشد باید دائم پایین بیاید. اول که پاتیل را پر می‌کنیم، فشارش زیاد است، کم کم که مذاب را مصرف می‌کند فشار آن کم می‌شود و metal flow rate کم می‌شود. پس باید gas flow rate را هم کم کرد. اگر بخواهیم نسبت گاز به فلز ثابت بماند.

تمام سیستم‌های Spray Forming، رباتی و کامپیوتری است که فرمان می‌گیرند و تمام موارد فشار، سرعت و دبی گاز و ... را تنظیم می‌کنند.

تمام آلیاژها را با این روش Spray Forming می‌توان تولید کرد.

دمای این فرآیند نیز مهم است. اگر دما خیلی زیاد باشد قطرات ریز می‌شود، چون سیالیت زیاد می‌شود. اگر دما خیلی کم باشد قطرات آن درشت می‌شود. ریز و درشت قطرات، روی کسر مایعی که روی زیرلایه می‌آید موثر است.

خواص مکانیکی این روش از روش ریخته‌گری سنتی بهتر است و قابل مقایسه و رقابت با متالورژی پودر است.

لوله، ورق و ... را می‌توان با این روش تولید کرد.

حسن دیگر این روش این است که از گرمای محسوس آن برای نورد استفاده می‌کنیم. ورق که می‌آید هنوز که سرد نشده است، نورد می‌شود تا تخلخل‌هایش بسته شود و دور قرقره پیچیده می‌شود. مخترع اصلی این روش پروفیسور singer در دانشگاه انگلستان در دهه ۷۰ میلادی این روش را ابداع کرد و سه دانشجوی دکتری داشته است که این سه دانشجو رفتند و یک شرکتی را تأسیس کردند به نام شرکت OSPRY که در حال حاضر ۸۰ تا لایسنس در دنیا دارد.

اتم‌سفر نیز در این روش مهم است، معمولاً هوا است اگر کار خیلی حساس نباشد. وقتی اسپری می‌شود چون همراه با یک گاز خنثی است آن گاز خنثی آن را احاطه می‌کند و در حقیقت در جریان گاز می‌آید و همان‌جا خنک می‌شود و مدت زیادی با اکسیژن در تماس نخواهد بود. در این روش فاصله‌ی پرواز ۳۰ الی ۴۰ سانتی‌متر است. در ایران روش Spray Forming به صورت صنعتی وجود ندارد. یک دستگاه آن در حد آزمایشگاهی در دانشکده فنی دانشگاه تهران وجود دارد.

وقتی اتمایزر کار می‌کند، وسط آن زیاد می‌باشد و دور آن کم می‌باشد. وسط دبی زیاد است و دور آن دبی کم است. در اتمایزر، اسکن کردن نیز وجود دارد.

به طور خلاصه:

روش نسبتاً جدیدی است که دامنه‌ی وسیعی از آلیاژها را پوشش می‌دهد و می‌توان قطعات مختلف را تولید کرد. خواص دانه‌های هم محور دارد.

خواص آن با متالورژی پودر برابری می‌کند.

قیمت این روش بالا است.

دور ریز این روش زیاد است و تکرار پذیری آن کم است.

## روش پاشش همزمان

اگر داخل اسپری به طور همزمان ذرات سرامیکی را بپاشیم (الیاف کوتاه، ویسکر، ذرات و ... را بپاشیم داخل اسپری)، کامپوزیت تولید می‌شود.

برای پوشش‌های کامپوزیتی نیز این روش به کار می‌رود.

سیلیکون کاربید و یا ذرات دیگر را می‌پاشیم و کامپوزیت ایجاد می‌شود. (در این روش ذرات سرامیکی با مذاب قاتی نمی‌شود).

مزایا:

کامپوزیت‌هایی را می‌توان تولید کرد که انواع مختلف فازهای دوم را داشته باشند. (کامپوزیت‌های هیبریدی)

گرافیت داشته باشد، سیلیکون کاربرد داشته باشد و ...

به صورت همزمان این فازها را می‌توان اسپری کرد و قطرات که در حال آمدن است یک نازل سیلیکون کاربرد را می‌پاشد،

یک نازل دیگر گرافیت را می‌پاشد و یک نازل دیگر پودر آهن را می‌پاشد و ...

به صورت همزمان صورت می‌گیرد و کامپوزیت هیبریدی ساخته می‌شود.

تصور کنید می‌خواهید این کامپوزیت را به روش هم‌زدن یا WORTEX ایجاد کنید، اگر سیلیکون کاربرد را بریزیم چون

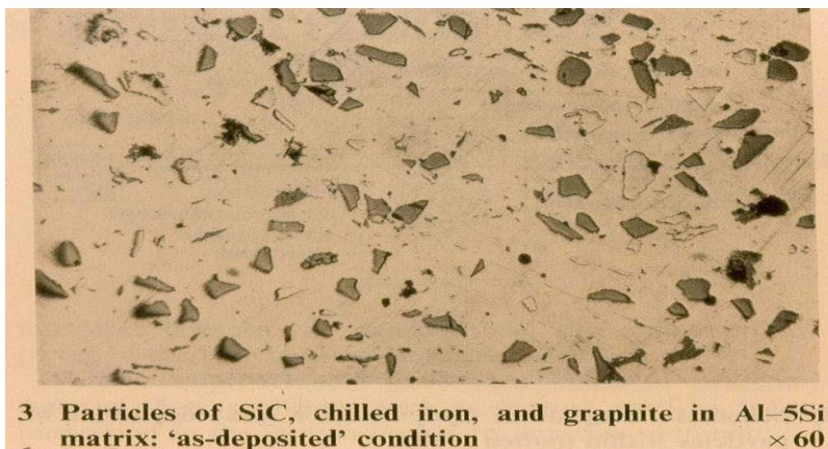
سنگین تر از آلومینیوم است مجبور هستیم جهت هم‌زدن از پایین به بالا باشد تا سیلیکون کاربرد نشکند. اگر گرافیت بریزیم،

کاری می‌کنیم که حرکت بالا به پایین ایجاد کنیم چون گرافیت سبک است. اگر بخواهیم هر دوتای آن‌ها را داخل مذاب

بریزیم، بالاخره چگونه باید هم‌زدن را انجام دهیم؟ اصلاً نمی‌شود به صورت هم‌زمان ذرات را وارد کرد.

بنابراین با این روش می‌توان کامپوزیت هیبریدی را تولید کرد.

در شکل زیر یک کامپوزیت هیبریدی را مشاهده می‌کنیم.



1- MMCs with different types of second phase (i.e. Graphite + SiC + Chilled iron) which is called hybrid composite can be produced.

مشکل عدم ترشوندگی فاز سرامیکی در این روش وجود ندارد. ذرات روی زیرلایه سریع قرار می‌گیرند و ممزوج می‌شوند و عدم ترشوندگی نداریم.

مشکل ته نشینی، شناوری، جدایش، رانش و به تله افتادن وجود ندارد چون سریع منجمد می‌شود. وقتی فیلم روی زیرلایه تشکیل می‌شود، سریع منجمد می‌شود.

می‌توان کامپوزیتی را تولید کرد که فاز دوشم داخلش حل می‌شود، اگر تیتانیوم را مذاب کنیم و سیلیکون کاربید را داخل آن بریزیم، داخل آن حل می‌شود. مثل شکر که در آب می‌ریزیم و حل می‌شود. در این حالت نیز سیلیکون کاربید حل می‌شود. با این روش می‌توان قبل از این که حل شود، تیتانیوم با سیلیکون کاربید ممزوج می‌شود و کامپوزیت ایجاد می‌شود که این حسن این روش است.

محدودیتی کم‌تر در حداکثر کسر حجمی فاز تقویت کننده دارد.

(در روش ریخته‌گری مشکل سیالیت داریم اگر حجم فاز تقویت کننده خیلی زیاد شود اما در این روش ۴۰ الی ۶۰ درصد پودر پاشیم و ۴۰ درصد فلز باشد، سیالیت مشکلی ندارد و کامپوزیت تولید می‌شود.)

امکان تولید کامپوزیت‌های Selective وجود دارد.

(نازلی که ذرات سرامیکی را می‌پاشد را می‌توان خاموش کرد و روشن کرد، برای تولید ورق می‌توان یک لایه کامپوزیت داشت و یک لایه کامپوزیت نداشت و ...)

واکنش‌های مرزی بین فاز دوم و ماتریس بسیار خوب است. (چون واکنش‌های مخرب ندارد.)

اگر واکنش شدید ایجاد شود، فاز ترد ایجاد می‌شود بین فاز تقویت کننده و ماتریس و به آن‌ها واکنش‌های مخرب می‌گویند اما در این روش واکنش‌های مخرب خیلی کم است چون ذره به محض این که روی زیرلایه می‌افتد، سریع منجمد می‌شود. در نتیجه واکنش مخرب نداریم و یا خیلی کم است.

فصل مشترک در این روش قوی است.

این روش مزایای روش spray forming را نیز دارد.

روش انعطاف پذیری است.

ریز ساختار خوبی دارد.

قرار دادن گرافیت در آلومینیوم با این روش امکان پذیر است، در صورتی که قراردادن گرافیت در آلومینیوم سخت است اما با این روش امکان پذیر است.

کامپوزیت‌های هیبریدی می‌توان در این روش تولید کرد. گرافیت + سیلیکون کاربید + آلومینیوم را کامپوزیت می‌کنند که از این روش می‌توان این کامپوزیت هیبریدی را تولید کرد

سیلیکون کاربید را وقتی اسپری می‌کنند، سیلیکون کاربید پاشیده می‌شود، کجا ملحق می‌شود: (سیلیکون کاربید در فضای پرواز ملحق می‌شود یا در زیر لایه ملحق می‌شوند).

ذرات سیلیکون کاربید در سطح قطره می‌چسبند، و حتی ذرات سیلیکون کاربید داخل قطره مذاب نیز وارد می‌شود. (انرژی سینتیکی کافی وجود داشته باشد، سیلیکون کاربید وارد قطره مذاب می‌شود). بنابراین در سه مرحله می‌توان گفت که این ذرات وارد می‌شوند:

۱- به سطح قطره مذاب می‌چسبند.

۲- داخل قطره مذاب می‌شوند.

۳- مستقیماً روی زیر لایه می‌افتند و قطره مذاب نیز می‌افتد و به هم ملحق می‌شوند.

معایب این روش:

توزیع یکنواخت فاز دوم مشکل است. دلیلش این است که اگر دو تا نازل داشته باشیم، وسط نازل زیاد می‌پاشد و دور نازل‌ها کم می‌پاشد پس بنابراین آن نازلی که قطرات مذاب را می‌پاشد وسطش زیاد است و دور (اطراف آن منظور است) آن کم. و نازلی که سرامیک را نیز می‌پاشد همین حالت را دارد. بنابراین توزیع یکنواخت از ذرات امکان پذیر نیست چون نازل‌ها یکنواخت



نمی‌باشند و وسط آن‌ها دبی زیاد است و به عبارتی دانسیته‌ی اسپری در وسط زیاد است و دور اسپری (اطراف اسپری) کم است. Scanning را در اتمایزینگ به کار می‌برند تا این مشکل را حل کنند.

تمام معایبی که برای روش spray forming بیان شد برای این روش نیز وجود دارد. (گاز گران است، کنترل فرآیند سخت است و ...)

جلسه دهم

مورخ: ۹۵/۰۹/۲۸

**روش In-situ:**

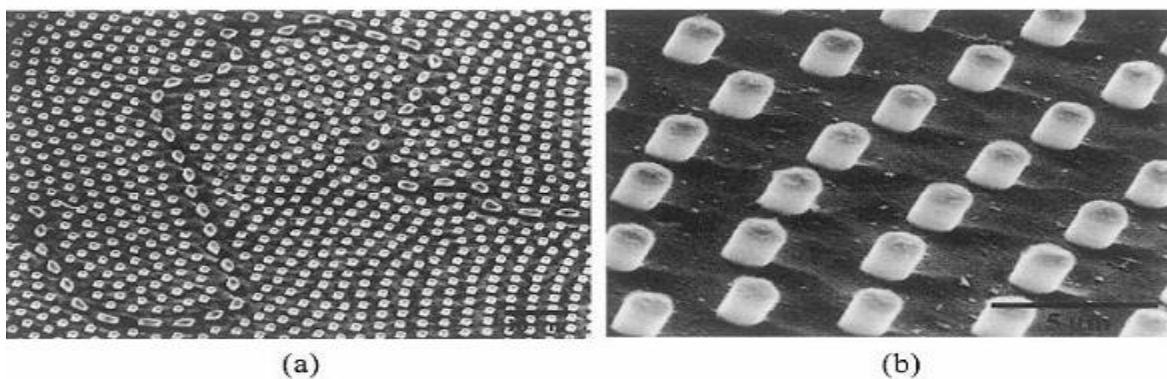
در روش‌های درجا تقویت کننده در داخل ماتریس ایجاد می‌شود و نیازی نیست که قبلاً تهیه شود و به نحوی مخلوط‌سازی شود بلکه در داخل ماتریس، فاز تقویت کننده یا فاز دوم ایجاد می‌شود: دو دسته کلی وجود دارد: ۱- از طریق انجماد جهت‌دار است یعنی رشد کنترل شده انجماد صفحه‌ای، در انجماد می‌توان ساختار را به شکل کامپوزیتی در آورد. ۲- به وسیله‌ی واکنش‌های شیمیایی که می‌توان از طریق واکنش‌های شیمیایی کامپوزیت‌های درجا تولید کنیم.

ابتدا در مورد کامپوزیت‌هایی که از طریق انجماد جهت‌دار تولید می‌شود را توضیح می‌دهیم و کلاً این لفظ In-situ یا درجا اولین بار برای این نوع کامپوزیت‌ها از سال ۱۹۶۰ به کار گرفته شد.

اگر یک ساختاری داشته باشیم که یوتکتیک باشد یعنی ترکیب یوتکتیک داشته باشیم، اگر این ترکیب منجمد شود دو تا فاز جامد از این مایع تشکیل می‌شود. یعنی مایع تبدیل می‌شود به دو تا فاز آلفا + بتا می‌شود. منتهی وقتی به صورت معمول منجمد شوند به صورت اثر انگشت هستند یعنی فاز یوتکتیکی به شکل اثر انگشت است و به این کامپوزیت نمی‌گویند. (فقط ساختار یوتکتیک است.) مثلاً اگر پرمیت را در نظر بگیریم، سماتیت و فریت آن در زیر میکروسکوپ، لایه‌های سماتیت دیده می‌شود. یا اگر یوتکتیک آلومینیوم و سیلیسیم را در نظر بگیریم، به شکل سوزن‌های خیلی ظریف سیلیسیم می‌بینیم که در داخل فاز آلفا که آلومینیوم است، قرار گرفته است. به این کامپوزیت نمی‌گویند اما اگر این را با انجماد جهت‌دار منجمد کنیم، یعنی کاری کنیم که جبهه‌ی انجماد به صورت صفحه‌ای باشد آن وقت ساختار ممکن است به شکل لایه‌ای یا میله‌ای در بیاید، مثلاً مذاب را در نظر بگیرید که از کوره در حال خارج شدن است و یک شیب حرارتی یا گرادیان حرارتی زیادی را ایجاد می‌کنند، با سرعت خیلی پایین هم این رشد را ادامه می‌دهند و در نهایت ساختار به شکل کامپوزیتی در می‌آید یعنی به شکل لایه لایه در می‌آید. فاز آلفا و فاز بتا. فاز آلفا به صورت لایه در بین فاز بتا قرار می‌گیرد. یک کامپوزیت لایه‌ای ایجاد می‌شود. (آلفا و بتا به صورت لایه‌ای روی هم قرار می‌گیرند) یا به شکل میله در می‌آیند. نمی‌آییم لایه لایه قرار دهیم و پرس کنیم

یا سینتر کنیم، بلکه یا الیاف را تهیه می‌کنیم و مذاب را مثلاً مثل روش قبلی که روش قایقی یا عمودی می‌گویند، بوت‌هایی به شکل قایق داریم که طول آن زیاد است و عرض و ارتفاع آن کم است. مذاب را داخل کوره بوجود می‌آورند و بعد خیلی آهسته از کوره می‌کشند بیرون. با انجماد صفحه‌ای می‌شود و به شکل لایه‌ای یا میله‌ای در می‌آید. به شکل میله‌ای یا لایه‌ای در می‌آید. در روش Brijman عمودی و روش قایقی انجماد خاصی داریم.

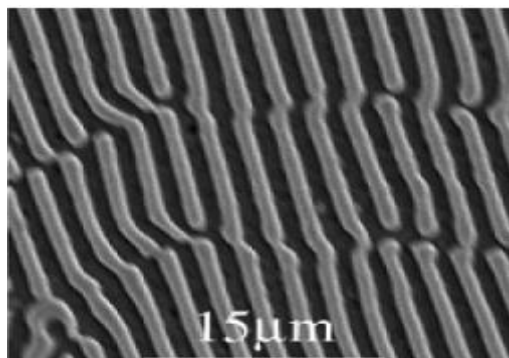
یک ساختار را در شکل ذیل مشاهده می‌کنیم که به شکل درجا بوجود آمده است، میله‌هایی را مشاهده می‌کنیم که در حقیقت فاز تقویت کننده هستند. (روش قایقی: برای رسیدن به انجماد جهت‌دار این روش را انجام می‌دهند و خواص آن از حالتی که به شکل یوتکتیکی معمولی منجمد می‌شود خیلی بهتر است. به صورت لایه‌ای یا میله‌ای فاز تقویت کننده تشکیل می‌شود تا کامپوزیت تشکیل شود و خواص مدنظر بدست آید.)



Scale در شکل پنج میکرومتر است، غیرممکن است که بتوانیم چنین preform بسازیم که این قدر منظم و دقیق الیاف را بسازیم و مذاب را تزریق کنیم و چنین کامپوزیتی را بسازیم. ولی در این روش به صورت خود به خود تقویت شده کننده در مذاب ایجاد می‌شود. تصویر دیگری که در زیر مشاهده می‌شود مربوط به یوتکتیک‌های لایه‌ای است که آلومینیوم و  $Al_2Cu$ ، لایه لایه‌ای است. لایه‌های  $Al_2Cu$  که یک اینترمتالیک است بین آلومینیوم قرار گرفته است. به صورت لایه لایه قرار گرفته است و یک کامپوزیت لایه‌ای را ایجاد کرده است و به صورت درجا ایجاد می‌شوند. تحت چه شرایطی این کامپوزیت ایجاد می‌شود: شرایطی را ایجاد می‌شود: اول این که گرما به صورت یک جهته خارج می‌شود. (دما از یک جهت خارج می‌شود) و انجماد جهت‌دار باشد. دوم باید یک شیب حرارتی مثبت خیلی زیاد باید در جلوی جبهه‌ی انجماد ایجاد شود و همچنین سرعت رشد باید کم باشد. (یعنی شیب حرارتی یا  $G$  باید خیلی بالا باشد و  $R$  باید کم باشد.)

شیب حرارتی در حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بر سانتی‌متر باشد و جلوی جبهه‌ی انجماد، یک سانتی‌متر که جلو می‌رویم باید ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد دما بالا برود.

R باید خیلی کم باشد و در حدود ۳-۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه باشد. سرعت بیرون کشیدن قایق یا به عبارتی سرعت رشد ۱۰۰ هزار ثانیه که می‌گذرد، یک سانتی‌متر فقط بیرون می‌آید. باید نسبت G به R خیلی بالا باشد، زیاد و کم باشد.



شرط بعدی این است که جوانه‌زنی و رشد مزدوج رخ دهد. یعنی آلفا روی بتا و بتا روی آلفا جوانه‌زنی کند که به این جوانه‌زنی مزدوج گفته می‌شود و رشد هم باید مزدوج باشد. یعنی باید ناخالصی نداشته باشند. اگر ناخالصی داشته باشد، آلفا به جای این که روی بتا جوانه‌زنی کند، ممکن است روی ناخالصی‌ها جوانه‌زنی کند و دیگر رشد مزدوج نخواهد شد. بنابراین فلز اصلاً نباید ناخالصی داشته باشد و انجماد باید مسطح و یک جهته باشد. دما یک جهته خارج بشود. G زیاد باشد و R کم باشد و جوانه‌زنی و رشد مزدوج داشته باشیم که این‌ها می‌شود در این رابطه خلاصه کرد:

$$G/R \geq -M_1 (C_E - C_0) / D_L$$

G: شیب حرارتی

R: سرعت رشد

$M_1$ : شیب خط لیکوئیدوس

$C_E$ : ترکیب یوتکتیک

$C_0$ : ترکیب آلیاژ

$D_L$ : جریان نفوذ مایع

اگر این رابطه برقرار باشد، جوانه زنی و رشد مزدوج رخ می‌دهد. مثال‌هایی مختلفی هست مثل pb-sn که آلیاژی است که به شکل لایه‌ای منجمد می‌شود. (آلیاژ قلع - سرب) اما این کاربرد صنعتی ندارد. چرا: چون سرب و قلع هر دو خاصیت فلزی دارند و کامپوزیت خوبی نیست.

$Al-Al_3Ni_3$  که نیرتید آلومینیوم اینترمتالیک است، سفتی دارد، سختی دارد، استحکام دارد و آلومینیوم آن داکتیلیته دارد بنابراین کامپوزیتی می‌شود که چه لایه‌ای باشد و چه میله‌ای، ماتریس‌اش داکتیل است و فاز تقویت کننده‌اش سفتی و استحکام دارد و سختی دارد و خلاصه کامپوزیتی است.

یا  $Al-Al_2Cu$  که  $Al_2Cu$  فاز سخت است و آلومینیوم فاز نرم است که این دو با هم کامپوزیت ایجاد کرده است.

مزایای این روش:

۱- روشی است که تک مرحله‌ای است بنابراین نیازی به ساخت preform نداریم، ساخت الیاف نداریم. تلقیح نیازی نیست. بنابراین از نظر قیمت می‌تواند مقرون به صرفه باشد. در حقیقت این کامپوزیت را با کامپوزیت الیافی مقایسه می‌کنند که اگر کامپوزیتی را بخواهیم بسازیم اول باید الیاف را تهیه می‌کردیم که در فصل دوم مشاهده کردیم که تهیه الیاف چه مشقتی دارد. الیاف بور، آلومینا، گرافیت و ... تولیدشان سخت است و مشقت دارد که در این روش نیاز به تهیه الیاف نیست. در preform باید الیاف را به شکل متخلخل در بیاوریم و بعد مذاب را داخل آن تزریق کنیم که در این روش به این کار نیاز نمی‌باشد. عمل تلقیح نیاز نیست. بنابراین مقرون به صرفه است و در یک مرحله کامپوزیت ساخته می‌شود.

۲- فصل مشترک بین فازها از نظر ترمودینامیکی پایدار است. بنابراین واکنش‌های شیمیایی مخرب بین آن‌ها رخ نمی‌دهد و اتصال آن‌ها خیلی خوب است. اگر یک فازی مثلاً الیاف را تهیه کنیم، آلودگی روی آن وجود دارد و این آلودگی می‌تواند با مذاب واکنش بدهد. و یا وامنس مخرب رخ دهد. که در این روش این مسائل وجود ندارد و در داخل مذاب تقویت کننده بوجود می‌آید و هیچ کدام از مشکلات واکنش‌های مخرب را ندارد.

۳- مشکل عدم ترشوندگی را ندارند.

۴- مشکل تلقیح ناقص را ندارد و مشکل تخلخل را ندارند.

۵- خواص مکانیکی این کامپوزیت بسیار خوب است مخصوصاً در دماهای بالا.

کامپوزیت AL-AL<sub>3</sub>Ni را در نظر بگیرید که از روش درجا تهیه می‌شود، ۲۵ درصد اتمی نیکل دارد و UTS این اگر معمولی منجمد شود ۷۵/۸ مگاپاسکال است اما اگر همین آلیاژ را با ۲۵ درصد اتمی نیکل، به شکل کامپوزیتی منجمد کنیم ۳۳۱ مگاپاسکال استحکام کششی آن در دمای اتاق است که چند برابر استحکام افزایش یافته است.

آلیاژ ۷۰۷۵ در داخل آن روی، منیزیم و ... دارد و این آلیاژ در حال حاضر در صنعت هواپیماسازی خیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر روی این آلیاژ عملیات T6 را انجام دهیم، UTS آن ۵۵۸ مگاپاسکال است. بنابراین یک نفر می‌تواند به ما بگوید خسته نباشید شما آمدید و انجماد جهت دار ایجاد کردید و کامپوزیت را درست کردید، چرا این قدر زحمت کشیدید ۳۳۱ مگاپاسکال در دمای اتاق داردی. ما یک آلیاژ معمولی آلومینیوم را وقتی عملیات حرارتی T6 می‌کنیم، ۵۵۸ مگاپاسکال است. آلیاژ ۷۰۷۵ اگر در دمای ۳۷۱ درجه سانتی‌گراد ببریم، UTS آن ۴۸/۳ می‌شود یعنی در دمای بالا به شدت ضعیف می‌شود و از ۵۵۸ مگاپاسکال به ۴۸/۳ استحکام آن می‌رسد. و اما اگر کامپوزیت را تا دمای ۴۸۲ درجه سانتی‌گراد گرم کنیم، هنوز استحکام ۱۶۵ مگاپاسکال می‌شود. بنابراین درست است که بیش‌تر کامپوزیت را بیش‌تر گرم کردیم اما هنوز ۱۶۵ مگاپاسکال استحکام دارد.

هنر کامپوزیت در دمای بالا معین می‌شود.

در دمای بالا کامپوزیت‌ها خواص خوبی دارند. خواص دمای بالا کامپوزیت‌ها خیلی بهتر از خواص آن‌ها در دمای محیط است. مثال دیگر آلومینیوم - AL<sub>2</sub>CU، UTS آن ۲۶۲ مگاپاسکال است و در دمای اتاق و در دمای بالا نیز استحکامش را حفظ می‌کند.

Ta-Ta<sub>2</sub>O در دمای اتاق ۱۰۳۰ مگاپاسکال UTS آن است که از آلیاژ Ta خواص آن بهتر است.

Ni-NiMo، ساختار لایه‌ای دارد و UTS آن ۱۱۰۰ مگاپاسکال است و از سوپرآلیاژهای پایه‌ی نیکل خواص آن خیلی بتر است.

بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها در دمای بالا بسیار خوب است.

معایب:

۱- آلیاژ اصلاً نباید ناخالصی داشته باشد، به دلیل این که اگر ناخالصی داشته باشد جوانه‌زنی و رشد مزدوج رخ نمی‌دهد.

۲- به دست آوردن G زیاد و R کم، بسیار سخت است.

۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بر سانتی‌متر بخواهیم شیب حرارتی ایجاد کنیم، به سادگی نیست و از آن مشکل‌تر R کم است که این R کم نیز سخت است.

G زیاد و R کم کار ساده‌ای نیست و کار سختی است.

۳- فقط کامپوزیت‌هایی می‌توان ساخت که هندسه‌ی ساده‌ای داشته باشند مثل صفحه، میله و ... اگر شکل پیچیده‌ای داشته باشند از این روش نمی‌توان تولید کرد.

۴- سرعت تولید خیلی پایین است. همین که گفته شد R آن کم است، فرض کنید یک میله‌ای که طول آن ۱۰ سانتی‌متر است، ۳ ساعت طول می‌کشد که از داخل کوره بیرون بیاید. بنابراین سرعت تولید خیلی پایین است و تنها برای شرایط خاص و قطعات خاص این مدت زمان را انجام می‌دهند. مثل قطعاتی که در صنعت هواپیما یا هوافضا به کار می‌روند که ارزش این را داشته باشد این مدت زمان را صرف کرد. از این جهت چون سرعت تولید خیلی پایین است، قیمت هم بالا می‌رود.

اکنون به دسته‌ی دوم این کامپوزیت‌ها می‌پردازیم. کامپوزیت‌های دسته‌ی دوم آن دسته از کامپوزیت‌ها هستند که از طریق واکنش شیمیایی بوجود می‌آیند که به پنج دسته می‌توان آن‌ها را تقسیم بندی کرد. واکنش‌های شیمیایی از پنج طریق انجام می‌شوند:

۱- یا بین گاز و مایع است.

۲- یا بین جامد و مایع است.

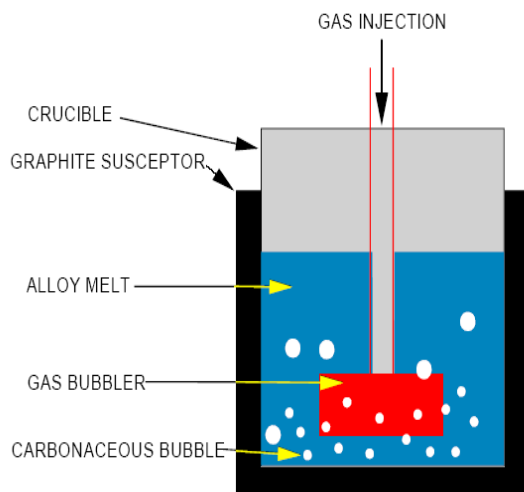
۳- یا بین مایع و مایع است.

۴- یا بین گاز و جامد است.

۵- یا بین جامد و جامد است.

الف) واکنش‌های بین گاز - مایع:

در ابتدا واکنش‌هایی که بین گاز- مایع است را می‌پردازیم. چگونه بین گاز- مایع می‌توانیم یک کامپوزیت درست کنیم. اگر یک گاز فعال را داخل یک مذاب بدمیم که داخل مذاب نیز عناصر فعال داشته باشیم. این گاز با مذاب واکنش می‌دهد و فاز تقویت کننده را می‌سازد. مثال: کامپوزیت AL-TiC که اگر گاز متان را داخل مذاب AL-Ti بزنیم، کربن از متان با تیتانیوم داخل آلومینیوم واکنش می‌دهد و TiC می‌شود. این کاربید تیتانیوم به صورت خود به خودی در مذاب ایجاد می‌شود به صورت درجا. اندازه‌ی آن ۱/۰ تا ۳ میکرون است و ۲۰ دقیقه تا ۲ ساعت لازم است در دمای ۱۲۰۰ - ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد که این فاز تقویت کننده ایجاد شود. (ذره وارد نمی‌کنیم و فقط در این روش گاز را از بیرون وارد کنیم و کاربید تیتانیوم به صورت درجا تشکیل شده است.) ذرات کاربید تیتانیوم تشکیل شده خیلی ریز است.



ب) واکنش بین جامد و مایع:

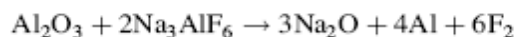
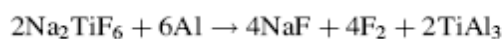
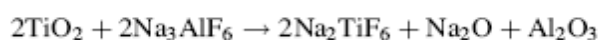


در این حالت واکنش بین جامد و مایع است که روش XD است.

سه تا پودر داریم، پودر X و پودر Y و پودر ماتریس. که این سه پودر با هم مخلوط می‌کنیم و حرارت می‌دهیم. ماتریس ذوب می‌شود و X و Y نیز با هم واکنش می‌دهند و می‌شوند فاز تقویت کننده. بعد آن دوغاب را ریخته‌گری می‌کنیم. در این جا تقویت کننده را وارد نکردیم بلکه سه تا پودر وارد کردیم. مثال: پودر بور، پودر تیتانیوم و پودر آلومینیوم به عنوان ماتریس. پودر آلومینیوم ۹۰ درصد و پودر تیتانیوم و پودر بور ۱۰ درصد، گرم می‌کنیم تا آلومینیوم ذوب شود، آلومینیوم که ذوب شد، تیتانیوم با بور واکنش می‌دهد و  $TiB_2$  می‌شود و حال یک دوغاب آلومینیوم + داریم، در قالب می‌ریزیم و ریخته‌گری می‌کنیم. که این نیز یک روش درجا است.

روش دیگر روش FAS است. یک نمک فرموله می‌کنیم و این نمک را می‌ریزیم روی سطح مذاب، این نمک با مذاب واکنش می‌دهد و فاز تقویت کننده در فصل مشترک تشکیل می‌شود. سرباره‌ی نمک را از روی آن بر می‌داریم و ریخته‌گری انجام می‌شود. نمک روی سطح مذاب ریخته می‌شود، در سطح مشترک واکنش می‌دهد و فاز تقویت کننده به صورت درجا تشکیل شده و حال این را ریخته‌گری می‌کنیم.

مثال: نمک  $TiO_2$  با نمک  $Na_3AlF_6$  را روی مذاب آلومینیوم می‌ریزند و واکنش‌های ذیل انجام می‌شود:



بنابراین  $TiAl_3$  می‌ماند. داخل مذاب ایجاد می‌شود و ریخته‌گری می‌شود. این روش را روش سرباره نمکی یا FAS می‌گویند.

FAS یعنی سنتز به کمک سرباره.

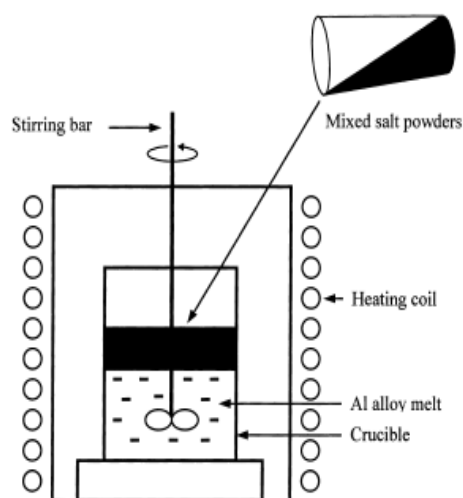


Fig. 3. Schematic diagram of an apparatus for fabricating in situ MMCs by means of FAS.

اما یک مثال دیگر نمک  $KB_4$  و  $K_2TiF_6$  است که با هم مخلوط می‌کنند و آلومینیوم را ذوب می‌کنند و روی مذاب ریختند ۱۰ الی ۴۰ دقیقه و مذاب را ریخته‌گری می‌کنند.

در این جا شرایط این است که از نظر ترمودینامیکی انجام این واکنش‌ها امکان پذیر باشد. باید  $\Delta G^\circ$  منفی باشد تا این واکنش‌ها امکان پذیر باشد و انجام شوند.

(ج) واکنش بین مایع - مایع:

روش بعدی مایع - مایع است که دو تا مایع با هم واکنش می‌دهند و کامپوزیت ایجاد می‌شود. مثلاً یک مذاب داریم مثل مس و تیتانیوم و دیگری مذاب دیگر مس و بور است. این دو مذاب را با هم مخلوط می‌کنیم و وقتی این مذاب را با هم مخلوط می‌کنیم در جا  $TiB_2$  تشکیل می‌شود (ریخته‌گری می‌کنیم) که اندازه‌ی آن ۵۰ نانومتر است و در مس این ذرات تشکیل می‌شوند. (به صورت در جا تشکیل می‌شوند).

(زمینه مس و عنصر آلیاژی بور است و در دیگر زمینه مس است و تیتانیوم عنصر آلیاژی است).

(د) روش گاز - جامد:

مثال: پودر آلومینیوم داشته باشیم و روی آن اکسیژن می‌دمیم، اکسید می‌شود و در سطح پودر  $Al_2O_3$  ایجاد می‌شود. پودرهایی که روی آن  $Al_2O_3$  است را سینتر می‌کنیم یا پرس می‌کنیم و کامپوزیت می‌سازیم که کامپوزیت می‌شود  $Al_2O_3$  -AL که در این کامپوزیت به صورت درجا تشکیل می‌شود.

مثال بعدی گاز متان را روی پودر تیتانیوم می‌دمیم و تیتانیوم با گاز متان می‌دهد، کاربید تیتانیوم + هیدروژن و بعد دوباره هیدروژن با تیتانیوم واکنش می‌دهد و  $TiH_2$  می‌شود. حال پودری داریم که مخلوط تیتانیوم، کاربید تیتانیوم و  $TiH_2$  است. بعد پرس می‌کنیم و سینتر می‌کنیم. کامپوزیت ایجاد می‌شود. که در شکل ذیل مشاهده می‌کنیم و تقویت کننده‌ها را به صورت درجا ایجاد کرده است. این روش گاز- جامد زمان بر است. البته اغلب روش‌ها زمان بر است در این روش‌ها.

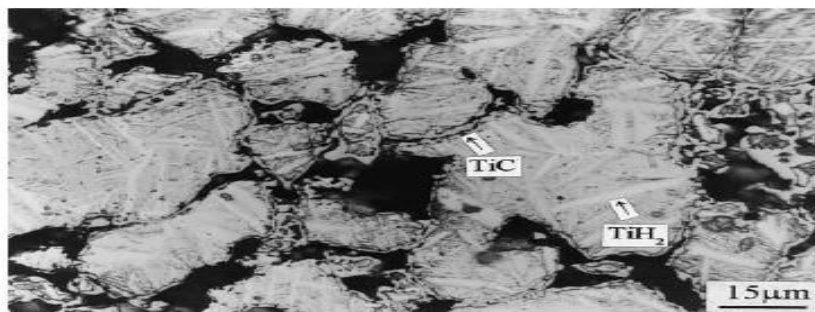
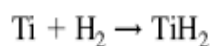
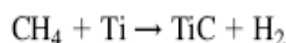


Fig. 3. Optical micrograph of titanium powder compact after reaction with methane at 800°C for 30 min.

در نمودار ذیل پودر ماتریس تیتانیوم است که یکی ۳۳ میکرون بوده است و دیگری ۱۱۰ میکرون است و در دماهای مختلف پودر را گرم می‌کنیم و از روی آن گاز متان را عبور می‌دهیم که از ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد آن را گرم می‌کنیم. زمان نیز از ۰ تا ۱۶۰۰ دقیقه است.

در این جا باید به سه نکته دقت کرد:

۱- هرچه قدر که زمان بیشتر می‌شود، درصد کاربید تیتانیوم بیشتر می‌شود. یعنی با افزایش زمان، کاربید تیتانیوم بیشتر تشکیل می‌شود.

۲- هرچه دما بالاتر رود، کاربید تیتانیوم بیش‌تری تشکیل می‌شود.

۳- در ۶۰۰ دقیقه و دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد وقتی ذرات ۱۱۰ میکرومتر است، ۲۰ درصد کاربید تیتانیوم ایجاد شده

است و در همین حالت و وقتی که ذرات ۳۳ میکرومتر است، ۳۰ الی ۴۰ درصد کاربید تیتانیوم ایجاد شده است.

سایز ذرات در این‌جا مطرح است که وقتی ذرات ریز هستند، درصد تشکیل کاربید تیتانیوم بیش‌تر است چون سطح‌شان

بیش‌تر است. پودر ۳۳ میکرونی سطحش بیش‌تر خواهد شد و واکنش هم روی آن سطح می‌خواهد انجام شود، بنابراین

هرچه سطح بیش‌تر باشد، درصد تشکیل فاز تقویت‌کننده افزایش می‌یابد.

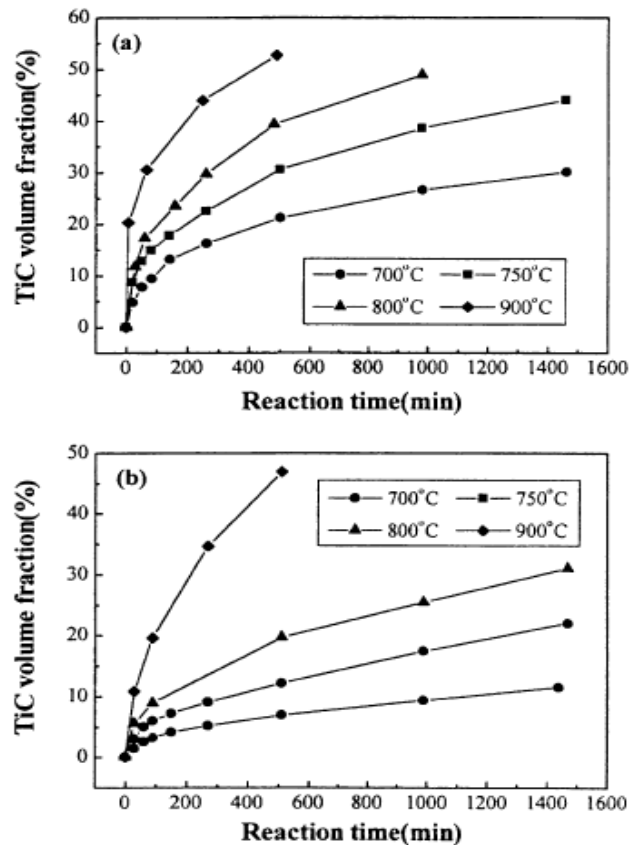


Fig. 5. Increase in titanium carbide volume fraction with reaction temperature and time. Powder size: (a) 33 and (b) 110 μm.

یک نکته‌ی دیگر این است که چرا هرچه زمان می‌گذرد، سرعت انجام واکنش کم می‌شود:

نفوذ - وقتی یک لایه‌ی کاربید تیتانیوم تشکیل شد حالا باید این گاز متان از لایه عبور کند تا خود را به تیتانیوم برساند، بنابراین هرچه این قشر ضخیم‌تر می‌شود، نفوذ سخت‌تر است. این واکنش‌ها به وسیله‌ی نفوذ کنترل می‌شوند و چون به وسیله‌ی نفوذ کنترل می‌شوند،  $X^2=Dt$ . شیب آن‌ها کم می‌شود و سرعت واکنش کم می‌شود.

۵) روش جامد - جامد:

در روش جامد - جامد دو تا جامد را با هم واکنش می‌دهیم و به صورت درجا کامپوزیت را می‌سازیم. اگر پودر آلومینیوم و پودر کربن را بریزیم داخل آسیای ماهواره‌ای و این را یک مقداری گرم کنیم، ۸۷۳ درجه کلویین یا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد آن را گرم کنیم  $AL_4C_3$  تشکیل می‌شود.  $AL_4C_3$  فاز تقویت کننده است و به صورت درجا در فصل مشترک دو تا جامد به وجود می‌آید. اندازه‌ی ذرات  $AL_4C_3$ ، ۰/۱ الی ۰/۳ میکرون است و قطر ۰/۰۲ تا ۰/۰۳ میکرون است. این ذرات نانومتری شدند. ۱۰۰ نانومتر به پایین، نانو کامپوزیت می‌شود.

مزایای این روش:

مزایای انجماد جهتدار را با کامپوزیت‌های لایه‌ای و میله‌ای مقایسه کردیم، در این جا کامپوزیت‌های ذره‌ای را مقایسه می‌کنیم چون محصول ذره است:

۱- کامپوزیت‌های درجا نیاز به این نیست که ذرات را تهیه کنیم. ذرات به صورت درجا تولید می‌شوند.

۲- اصلاً ورود ذرات به داخل مذاب نیاز نیست.

۳- هم‌زدن طولانی نیاز نیست.

۴- ساخت Preform نیاز نیست. بنابراین مقرون به صرفه است.

۵- فصل مشترک‌ها بین فازها از نظر ترمودینامیکی پایدار است.

۶- فاقد ناخالصی است.

چون ذرات به صورت درجا تشکیل می‌شود به همین علت واکنش‌های مخرب ندارد و اتصال ماتریس و فاز دوم (تقویت کننده) خیلی خوب است.

۷- مشکل عدم ترشوندگی نداریم.

۸- اندازه‌ی ذرات خیلی کوچک و نانومتری است، بنابراین خواص مکانیکی آن‌ها خیلی خوب است مخصوصاً در دماهای بالا.

معایب:

- ۱- این روش به سیستم‌هایی محدود است که سریع واکنش بدهند در غیر این صورت، سرعت تولید خیلی کم می‌شود.
- ۲- بدست آوردن درصد‌های بالا: زمان و دما دو تا محدودیت دارد. یا دمایی که ترمودینامیک پیش بینی می‌کند که واکنش بین آن‌ها انجام می‌شود، ولی دما باید ۳۷۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد. این امکان پذیر نیست و کوره‌ایی که بتواند دمای ۳۷۰۰ درجه سانتی‌گراد را ایجاد کند اصلاً نداریم. بنابراین فراهم نیست یا مجاز نیستیم. ترمودینامیک می‌گوید ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد یک آلیاژ را گرم می‌کنیم که وقتی نقطه ذوبش ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد باشد و الان دما سه برابر دمای نقطه‌ی ذوب است، این کار را انجام نمی‌دهند. خلاصه این که روی زمان و دما محدودیت داریم.
- ۳- در بعضی از روش‌ها مثل FAS در حقیقت ناخالصی‌ها ممکن است باقی بمانند و روی ماتریس وقتی سرباره را جمع می‌کنیم، معلوم نیست که بتوان به طور کامل سطح مذاب را تمیز کرد، امکان دارد یک مقدار از سرباره باقی بماند و داخل مذاب برود و وارد کامپوزیت شوند و مشکل ساز شوند. بنابراین سرباره‌ها ممکن است به صورت کامل از سطح مذاب جمع‌آوری نشوند.

## روش متالورژی پودر

کامپوزیت را می‌توان از روش متالورژی ساخت که پودرها را با هم مخلوط کنیم و بعد کامپوزیت را بسازیم.

حسن متالورژی پودر: دانه‌های پودر خیلی ریز است. در متالورژی پودر، داخل پودر دانه داریم و دانه‌ها خیلی ریز است، با سرعت تمیزه می‌شود دانه‌ها خیلی ریز است و خواص مکانیکی آن خیلی خوب است. جدایش ریز ندارد و جدایش درشت آن کم است.

بیش از ۹۷ درصد ماده‌ی اولیه را در متالورژی پودر استفاده می‌کنیم.

در روش ریخته‌گری، دور ریز زیاد است اما در روش متالورژی پودر، قالبی که ساخته می‌شود پودر را داخل آن می‌ریزیم و پرس می‌کنیم. ماشین کاری معمولاً نیاز ندارد یا خیلی کم به ماشین کاری نیاز دارد. ۹۷ درصد از ماده‌ی اولیه استفاده می‌شود و بازدهی آن خیلی خوب است.

ماشین کاری نیاز نیست یا ماشین کاری حداقل است.

تولرانس ابعادی آن خیلی خوب است و با دقت زیاد می‌توان قطعه را تولید کرد. در روش ریخته‌گری Shrinkage داریم و خیلی نمی‌توان قطعات را به صورت دقیق تولید کرد اما در این روش متالورژی پودر تولرانس ابعادی خوب است. آلیاژهای وسیعی را می‌توان در متالورژی پودر استفاده کنیم.

برای تولید انبوه به کار می‌رود.

از نظر انرژی نیز مناسب است و راندمان بالایی دارد.

معایب روش متالورژی پودر:

۱- فرآیندش مراحل زیادی دارد و این مراحل سبب می‌شود که گران شود.

۲- بدست آوردن دانسیته‌ی کامل مشکل است و ممکن است داخل آن تخلخل ایجاد شود. در متالورژی پودر اغلب تخلخل داریم ۱۰ درصد یا کم‌تر یا بیش‌تر تخلخل وجود دارد و این تخلخل می‌تواند مشکل ساز باشد.

۳- روی سایز و پیچیدگی شکل مشکل داریم.

یک قطعه‌ی سه کیلویی را هیچ وقت از طریق متالورژی پودر تولید نمی‌کنیم، چون پرس آن باید حدوداً ۳۰۰۰ تن باشد که بتواند این قطعه را پرس کند. معمولاً قطعات کوچک را از طریق متالورژی پودر تولید می‌کنند. (مثل چرخ دنده‌های ساعت که از متالورژی پودر تولید می‌شود).

بنابراین در سایز مشکل داریم.

۴- جامد از داخل قالب باید در بیاید، بنابراین شکل‌ها در متالورژی پودر باید شکل‌های ساده‌ایی باشند.

۵- بالاخره سینتر می‌کنیم این سینتر کردن باعث می‌شود که خواص خوب پودر از بین برود.

وقتی پودر را اتمیزه می‌کنیم، انجماد سریع دارد و دانه‌ها داخل آن خیلی ریز است یا اصلاً دانه نداریم. بعضی وقت‌ها شیشه‌ای است و دوباره گرم می‌کنیم در سینتر، بنابراین خواص پودر را از بین می‌برد.

۶- بحث سلامتی، مشکل دیگر آن است. به صورت کلی اگر پودر کم‌تر از سه میکرون باشد، خطرناک است برای ریه و سلامتی. نانو ذرات وارد جریان خون می‌شود در بدن انسان.

۷- اشکال دیگر آن آتش‌گیری است.

برای سوخت موشک‌ها از پودر آلومینیوم استفاده می‌کنند که این پودر آلومینیوم است که موشک را بالا می‌برد. پودر با اکسیژن آتش می‌گیرد وقتی دما بالا باشد.

انبار داری پودر آلومینیوم و منیزیم نیز مهم است. اگر خوب سیل نشوند و اکسیژن به آن برسد و با اکسیژن وارد واکنش شود، دما بالا می‌رود و گرم می‌شوند و آتش می‌گیرند. (پودر آلومینیوم و منیزیم، محترقه هستند و ماده‌ی سوختنی است). توضیحات ارائه شده در رابطه با متالورژی پودر است.

در کامپوزیت نیز به همین صورت است و پودر تقویت کننده را با پودر ماتریس مخلوط می‌کنیم و از یکی از این دو مسیر می‌رویم:

یا قوطی می‌کنیم و باید بریزیم در قوطی و سر این قوطی را به پمپ خلا وصل می‌کنیم و داخل آن، هوایش را خالی کنیم. اکسیژن وجود نداشته باشد و اکسید تشکیل نشود.

بعد آن را HIP می‌کنیم. قوطی را داخل روغن می‌گذاریم و بعد آن را داغ می‌کنیم و بعد فشار را اعمال می‌کنیم. این سبب می‌شود که فشار همه جانبه به آن وارد شود. از همه جهت به آن فشار وارد می‌شود و dense می‌شود و فرق HIP با کاری که در آزمایشگاه انجام می‌دهیم این است که در آزمایشگاه پرس یک طرفه می‌کنیم، یعنی می‌ریزیم پودر را داخل یک قالب و با یک سنبه فشار می‌دهیم و پرس می‌کنیم. یک جاهایی دانسیته بالا است و یک جاهایی دانسیته پایین است. مرکز آن خوب dense نمی‌شود، چون پرس یک طرفه است. بعضی‌ها از پرس دو طرفه استفاده می‌کنند، توزیع دانسیته بهتر می‌شود.



اما HIP این عیب را ندارد و طبق قانون پاسکال فشار وارده بر هر نقطه، عیناً به تمام نقاط اعمال می‌شود بنابراین وقتی به روغن فشار اعمال می‌کنیم. در همه جهات فشار اعمال می‌شود و مشکل تفاوت دانسیته را نداریم.

HIP روش بسیار گرانی است. می‌تواند به جای روغن، گاز نیز باشد که گاز را داغ می‌کنند و آن گاز فشار می‌آورد. یک سیال است. HIP روش گران قیمت و پیشرفته‌ای است.

اما بعد از آن که HIP انجام شد می‌توانند اکستروژن گرم کنند تا تخلخل‌های باقیمانده گرفته شود و اگر لازم بود، ماشین‌کاری نیز انجام می‌دهند.

و مسیر بعدی این است که وقتی مخلوط کردیم آن را CIP کنیم. در حالت سرد پرس می‌کنیم. و بعد آن را مجبور هستند که سینتر کنند. ببرند در دمای بالا تا درهم جوشی و سینترینگ انجام شود. اکستروژن و ماشین‌کاری در ادامه انجام می‌دهند. جنس قوطی یک فلز نرم است.

بحث مخلوط‌سازی خیلی مهم است. به عنوان مثال: گرده‌ی ذغال + نمک را نمی‌توان به صورت کامل مخلوط کرد و هرچه مخلوط کنیم یک طرف آن سفید است و طرف دیگر آن سیاه است. اگر این بخواهد کامپوزیت بشود، مناسب نیست.

مثلاً اگر گرافیت و آلومینا باشد، توزیع باید خوب باشد تا کامپوزیت را ایجاد کنیم.

مخلوط‌سازی کار سختی است.

اگر در روش خشک بخواهیم استفاده کنیم، یک مخلوط‌کن‌هایی است که در آزمایشگاه متالورژی پودر دانشکده فنی دانشگاه تهران نیز وجود دارد یک دستگاهی است که پودرها را وارد شیشه می‌کنند (پودرها را در شیشه می‌ریزند) و بعد در گیره دستگاه می‌گذارند و در خلا به مدت زمان مشخص مثلاً ده ساعت می‌چرخد و حرکت می‌کند. تا توده‌ها یا پودرها به خوبی با هم مخلوط شوند. بنابراین مخلوط‌کن‌های مخصوصی نیاز است و گاهی اوقات مخلوط‌سازی تا ۱۲ ساعت باید انجام شود تا مخلوط یکنواخت شود. یک راه دیگر مخلوط‌سازی تر است. پودر را در الکل بریزیم. پودر آلومینیوم و سیلیکون کاربید را در داخل الکل بریزیم. بعد تحت تأثیر میدان مغناطیسی با هم‌زن مکانیکی آن‌ها را مخلوط کنیم. این گونه بهتر است چون نیروهای کششی سطحی که بین آگومره‌های سیلیکون کاربید و آلومینیوم، در مایع که می‌آید باز می‌شود و جدا می‌شوند و

به خوبی مخلوط می‌شوند و بعد مایع را می‌گذارند که تبخیر شود و پودر را پرس می‌کنیم، عیبش این است که امکان دارد آن مایع (الکل و ...) ناخالصی ایجاد می‌کند.

راه سوم این است که پودر تقویت کننده و ماتریس را در آسیای گلوله‌ای وارد کنیم. پودر تقویت کننده و ماتریس یک مقدار آسیا کنیم، تا با هم به خوبی مخلوط شوند.

مخلوط سازی را در بالا مورد بررسی قرار دادیم.

مرفولورژی پودر:

پودرها می‌توانند انواع مرفولورژی را داشته باشند:

کروی، سوزنی، ذره‌ای و ...

انجماد پودر مهم است. بعد به سینتر می‌رسیم که در سینترینگ باید جوش خوردن صورت گیرد و شرطش آن این است که تنش سطحی بین دو جامد کم‌تر باشد. تنش سطحی بین جامد و بخار، که این‌ها با هم جوش بخورند.

امکان دارد حین سینتر کردن که به هم جوش می‌خورند، بین‌شان تخلخل بوجود آید.

متالورژی پودر را با روش SPRAY FORMING مقایسه کرده است:

متالورژی پودر یک فرآیند طولانی است. مثلاً باید اول اتمیزه کنیم و بعد پودر را مخلوط کنیم. بعد قوطی کنیم و گاز زدایی

کنیم. یکپارچه سازی و منسجم سازی کنیم با HIP و CIP. بعد اکستروژن و ...

اما در روش SPRAY FORMING از مذاب یک دفعه به کامپوزیت می‌رسیم.

متالورژی پودر، مراحل خیلی طولانی است. زمان بر است و خیلی طولانی است.

در متالورژی پودر ریز ساختار: ذرات پودر جهت‌دار می‌شود مخصوصاً اگر اکستروژن شوند ذرات پودر جهت‌دار می‌شوند.

یک روش، روش Mechanical alloying و یا Mechanical milling است. اگر در آسیا کاری پراثری بریزیم پوردها را، پودر آلومینیوم داکتیل است، وقتی در آسیای پراثری ریخته می‌شود، flat می‌شود و به عبارتی پهن می‌شود. پودر سیلیکون کاربرد ترد و شکننده است وقتی در آسیا قرار می‌گیرد، خرد می‌شود و چون این دو تا پودر با هم آسیا می‌شوند، این‌ها لایه لایه می‌شوند و این‌ها به هم جوش سرد می‌شوند یا به آن‌ها Cold welding هم می‌گویند. به هم جوش می‌خورند و بعد می‌شکنند. باز مجدداً به هم جوش می‌خورند و باز می‌شکنند و این فرایند جوش-شکست تکرار می‌شود تا این که ذرات تقویت کننده داخل پودر می‌روند و این دیگر حالت stady state است. این حسن Mechanical milling است.

روش Mechanical alloying با Mechanical milling فرق دارد.

در Mechanical alloying مثلاً پودر مس و آلومینیوم را بریزیم در آسیای پراثری، و آسیا می‌کنیم. آلیاژ مس - آلومینیوم بدست می‌آید. که به این آلیاژسازی مکانیکی گفته می‌شود.

اما برای کامپوزت سازی از Mechanical milling استفاده می‌کنیم. یعنی آسیا کاری مکانیکی است.

این فرقی با آسیای گلوله‌ای معمولی (ماهوره‌ای) این است که سرعت زیاد است و اثری زیاد است.

در متالورژی پودر معمولی در آخر، پودر فلز + ذرات تقویت کننده (آلومینیوم + سیلیکون کاربرد) خیلی خوب با هم مخلوط می‌کنیم. پرس می‌کنیم. سینتر می‌کنیم. نهایتاً سیلیکون کاربرد داخل آلومینیوم نرفته است. توزیع سیلیکون کاربرد یکنواخت نیست. از نظر میکروسکوپی توزیع خوب یندرایم و توزیع یکنواخت نیست. داخل پودر آلومینیوم، فاز تقویت کننده نرفته است. اما اگر milling انجام دهیم، قبل از این که پرس کنیم ذرات تقویت کننده داخل آلومینیوم می‌روند و وقتی پرس می‌شود، در نتیجه توزیع بهتر می‌شود.

تجربه نشان داده است اگر خوب پودر را مخلوط نکرده باشیم، موقعی که پرس می‌کنیم شروع می‌کنند ذرات به جابه جا شدن و درست مثل مایع و قانون استوکس در جامد نیز وقتی سنبه پایین می‌آید و فشار می‌آورد، سیلیکون کاربرد سر می‌خورد و پایین می‌آید و در نمونه توزیع ذرات تقویت کننده خوب نیست.

روش دیگر، روش Explosive shock consolidation است که جزو روش‌های متالورژی پودر است.

بنابراین متالورژی پودر، یک روش معمولی دارد، یک روش دیگر Mechanical milling است و یک روش دیگر Explosive shock consolidation است که در این روش پودر زمینه و پودر تقویت کننده را مخلوط می‌کنیم، یک صفحه روی سر قالب می‌گذاریم، یک دینامیت یا یک ماده‌ی منفجره می‌گذاریم روی آن و آن را منفجر می‌کنیم و وقتی منفجر کنیم، کامپوزیت می‌شود. حسن این روش این است که وقتی قطعه را سینتر می‌کنیم و داخل کوره قرار می‌دهیم از دمای محیط تا دمای ۲۰۰ الی ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و آن را گرم می‌کنیم و دوباره سرد می‌کنیم. اما در این روش، در حد دهم ثانیه، دما از محیط به دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و یک دفعه و در زمان خیلی کوتاه، دما بالا می‌رود. بعد پرس که می‌کنیم یک دفعه که ضربه می‌زند، نیرو سریع اعمال می‌شود و دما نیز سریع بالا می‌رود.

واکنش مخرب نیز نداریم چون زمان خیلی کوتاه است.

چون زمان اعمال نیرو و رسیدن به دما، پایین است. در نتیجه خواص مکانیکی آن خوب می‌شود البته این روش Explosive را بیش‌تر برای کامپوزیت‌های زمینه‌سرامیکی استفاده می‌کنیم.

مزایای این روش متالورژی پودر:

محدودیتی در کسر حجمی فاز دوم جامد نداریم. اما در روش ریخته‌گری گفته شد که بیش از ۲۰ درصد نمی‌توان فاز تقویت کننده را ریخت، چون سیالیت کم می‌شود. اما در این روش می‌توان ۸۰ درصد تقویت کننده ریخت و ۲۰ درصد ماتریس ریخت. یک مثال واضح برای این نوع کامپوزیت‌ها که برای ابزار برشی به کار می‌رود، کبالت و کاربید تنگستن است که ۷۰ درصد کاربید تنگستن است و ۳۰ درصد کبالت است و از روش متالورژی پودر این ابزارهای برشی تولید می‌شود. متالورژی پودر این حسن را دارد که هیچ محدودیتی ندارد که کسر حجمی فاز تقویت کننده چند درصد باشد. دوم این که توزیع فاز دوم، اغلب خوب است و اگر mechanical milling را انجام دهیم که خیلی خوب است اما در سایر روش‌ها اگر خوب مخلوط پودرها صورت گیرد، توزیع خوب است چرا توزیع خوب است، با ریخته‌گری مقایسه می‌شود: توزیع متالورژی پودر از ریخته‌گری بهتر است. در ریخته‌گری بحث جدایش، ته نشینی و رانش داشتیم. در ریخته‌گری ذرات تقویت کننده به وسیله‌ی جبهه‌ی انجماد رانده می‌شود یا ته نشین می‌شود و یا شناور می‌شود طبق قانون استوکس. اما در متالورژی پودر این موارد را نداریم و توزیع خوب است.

ماتریس خواص خوبی دارد. دانه‌ها خیلی ریز است و جدایش درشت نداریم. جدایش ریز آن حداقل است و خواص مکانیکی آن خوب است. کلاً متالورژی پودر، خواص مکانیکی اش خوب است. پودرها دانه‌های ریز است. اما در دانه‌ها درشت است و در متالورژی پودر، دانه‌ها ریز است.

در ریخته‌گری جدایش درشت داریم. مثلاً اگر یک شمش داشته باشیم، سمت راست و چپ شمش عناصر آلیاژی با هم تفاوت تفاوت دارد. اما در متالورژی پودر، پودر یک جا جمع است و جدای شدنیم و ترکیب شیمیایی آن یکنواخت است و خواص مکانیکی خوب است.

در متالورژی پودر نیازی به ذوب نداریم بنابراین نیاز به تجهیزات ذوب و ریخته‌گری نداریم. فرآیند متالورژی پودر، روش تمیزی است و خیلی ساده با متالورژی پودر می‌توان قطعه را تولید کرد.

مشکل عدم ترشوندگی یک فاز با فاز دیگر وجود ندارد. مشکل شناوری، ته نشینی و جدایش ندارد.

کامپوزیتی را می‌توان تولید کرد که فاز دوم، در ماتریس حل شود. اگر سیلیکون کاربرد در تیتانیوم مذاب بریزیم، سیلیکون کاربرد حل می‌شود. اگر پودر سیلیکون کاربرد و پودر تیتانیوم را با هم مخلوط کنیم مشکل ندارد و بعد سینتر می‌کنیم، می‌توانیم یک قطعه را بدست آوریم.

واکنش‌های مخرب مرزی بین آن‌ها حداقل است.

اگر به روش ریخته‌گری کار کنیم، فلز را باید ذوب کنیم و بعد ۲۰ الی ۳۰ دقیقه نیز هم می‌زنیم و این واکنش مخرب می‌دهد.

اما در روش متالورژی پودر دمای سینترینگ معمولاً ۰/۶ تا ۰/۷ دمای ذوب کلون است.

مثلاً برای آلومینیوم دمای سینترینگ برابر است:

دمای ذوب آلومینیوم ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد است.

$$\text{دمای سینترینگ: } ۰/۶ \times ۹۳۰ = ۵۵۸ \text{ کلون}$$

دمای سینترینگ خیلی از دمای ذوب پایین‌تر است. بنابراین واکنش‌های مخرب کم‌تر داریم.

می‌توان برای موادی که نقطه ذوب بالایی دارند، استفاده کنیم. منظور چیست: کوره‌ایی را بخریم، کوره ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را می‌خواهیم بخریم ۵ میلیون تومان است و برای دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد ۱۵ میلیون تومان و برای دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ۱۰۰ میلیون تومان است (در این حالت کوره القایی است یا کوره قوس الکتریکی است.)، نوع اتمسفرها فرق دارد بنابراین قیمت‌ها فرق دارد. مثلاً تیتانیوم را نمی‌توان ذوب کرد چون کوره‌ایی نداریم که آن را ذوب کند اما می‌توان آن را سینتر کرد و برای سینتر مشکلی ندارد، اما برای ذوب در کوره مشکل داریم. چون کوره‌ایی نداریم که برای آن نقطه ذوب به کار ببریم.

برای موادی که نقطه ذوب بالایی دارند، متالورژی پودر استفاده می‌شود.

از لحاظ ابعادی، دقت ابعادی خوب است. قطعه به قالب چسبیده است و وقتی بیرون می‌آید همان شکل قالب را می‌دهد. Shrinkage و کشیدگی نداریم. در حالی که ممکن است تخلخل در آن ایجاد شود که این تخلخل جز مزایا است. چرا تخلخل مزایا است: تخلخل هم جزء مزیت است و هم جزء معایب روش متالورژی پودر. به چه دلیل تخلخل جزء مزایا است: وقتی می‌خواهیم روغن کاری کنیم، باید تخلخل باز وجود داشته باشد که روغن نفوذ کند. این تخلخل باز را فقط متالورژی پودر می‌دهد و با ریخته‌گری نمی‌توان تخلخل باز را ایجاد کنیم. (در یاتاقان‌ها، تخلخل باز نیاز دارند که با متالورژی پودر این قطعه را تولید می‌کنند.)

به خاطر تخلخل یک مقدار وزن آن قطعه از متالورژی پودر، کم می‌شود.

معایب متالورژی پودر:

۱- یکی این که مراحل تولید آن طولانی است و می‌تواند گران قیمت باشد.

۲- به خاطر محدودیت در ظرفیت دستگاه‌های پرس، سایز قطعات تولید شده در این روش محدود می‌باشد و قطعات کوچک را از این طریق تولید می‌کنند.

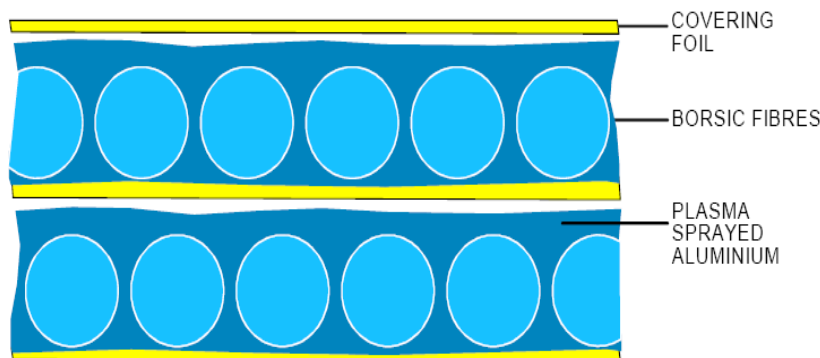
۳- فاز تقویت کننده اگر ویسکر و یا الیاف کوتاه باشد، می‌شکند. وقتی مخلوط سازی به خصوص مخلوط سازی خشک کنیم، لیف می‌شکند و نسبت  $L/D$  آن کم می‌شود و این نسبت  $Aspect\ ratio = L/D$  هر چه بیشتر باشد، بهتر است. وقتی ویسکر را در داخل مخلوط کن بریزیم و آن را هم بزنییم در حالت خشک، می‌شکنند و خواص مکانیکی آن ضعیف می‌شود.

۴- عیب بعدی این است که انبارداری و کار کردن با پودرهای فعال مانند آلومینیوم خطرناک است.

۵- سینتر کردن در دماهای بالا، خواص پودرهای فلزی را ضایع می‌کند و خواص آن را از بین می‌برد. دانه‌های آن درشت می‌شود یا به هر حال خواص مکانیکی ضعیف می‌شود.

۶- به دست آوردن دانسیته‌ی کامل مشکل است و از بین بردن تخلخل به صورت کامل امکان پذیر نیست. ( به هر حال تخلخل داریم، بنابراین حتماً باید اکستروود کنیم تا تخلخل از بین برود).

غیر از متالورژی پودر روش‌های حالت جامد دیگری نیز داریم: از روش اتصال نفوذی یا Diffusion bounding استفاده کنیم. روش اتصال نفوذی به چه صورت است:



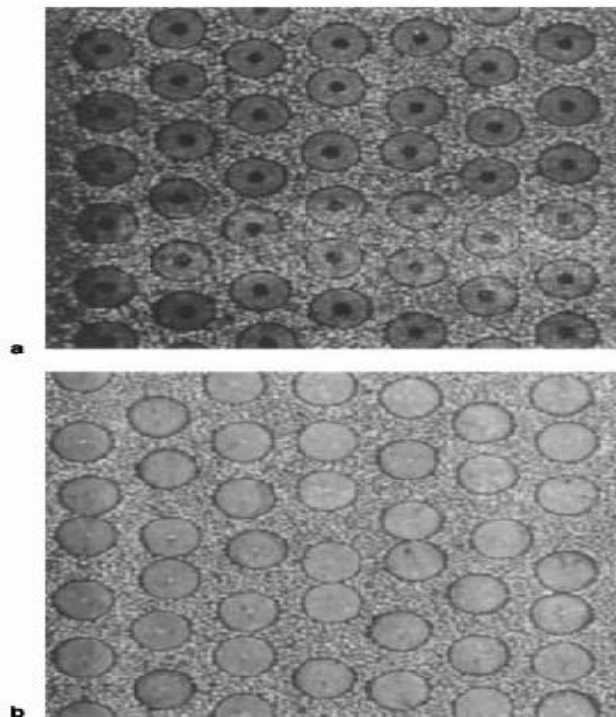
اگر الیاف را بین ورق‌های فلز قرار بدهیم، و بعد آن را پرس کنیم. در دمای ۶۳۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴ تا ۱۰ مگاپاسکال و برای زمان ۳۰ دقیقه پرس می‌کنیم و کامپوزیت بوجود می‌آید. اصلاً ذوب نداریم و نه فرآیند دیگری صورتی گرفته است. فقط برای این که الیاف تکان نخورند، که در این جا به عنوان مثال الیاف بوریسک است که الیاف بور است که سیلیکون کاربید روی آن قرار گرفته است. برای این که الیاف بوریسک تکان نخورند، یک مقدار متال اسپری کردند و آلومینیوم را روی آن

اسپری کردند که بورسیک تکان نخورد. فویل آلومینیوم مثل ساندویچ دور آن قرار گرفته و پرس می‌کنند، که می‌شود کامپوزیت. که به این اتصال نفوذی یا Diffusion bonding می‌گویند.

در حالت جامد است و ماتریس را ذوب نمی‌کنیم.

از این روش کامپوزیت‌های مختلفی را تهیه می‌کنند مثل AL-Ti، AL-Sic، AL6061-B و آلومینیوم - گرافیت.

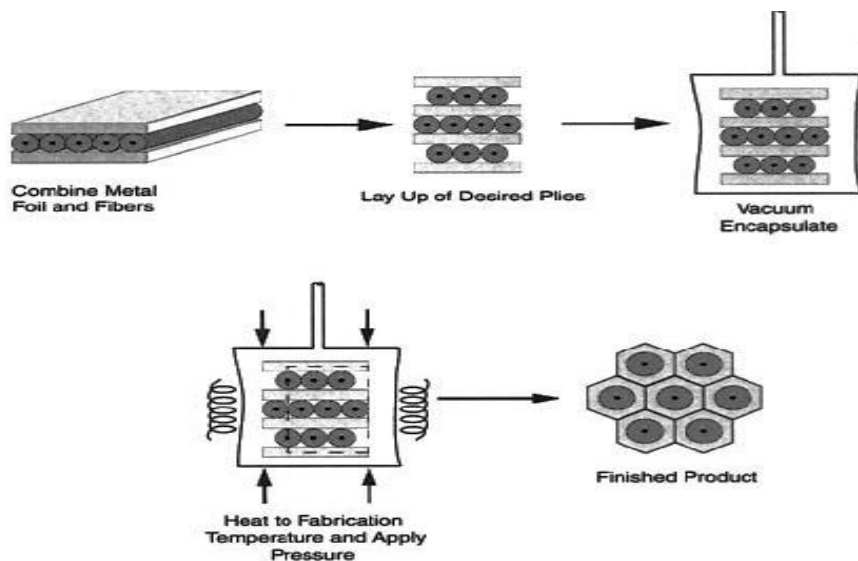
در شکل ذیل سطح مقطع کامپوزیتی را مشاهده می‌کنید که سوپر آلیاژ پایه‌ی تیتانیوم است و از روش اتصال نفوذی کامپوزیت را ایجاد کردند.



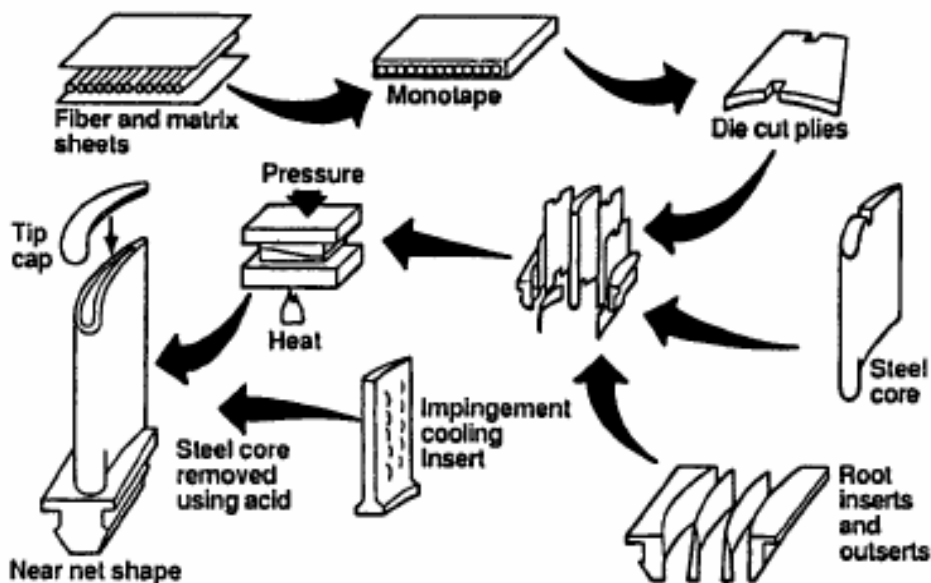
**Figure 2.2.** Cross-sectional micrographs of multi-ply, unidirectional composites of (a) SCS-6 SiC fiber reinforced Ti-6Al-4V alloy and (b) Borsic fiber reinforced Ti-6Al-4V alloy produced by diffusion bonding of fiber-foil. Notice the cracks present within Borsic fibers from the consolidation process (fiber diameter equal to approximately 140  $\mu\text{m}$ ).

مثال دیگر الیاف را در بین فویل گذاشته است و بعد آن را Vacuum کرده است و تحت خلا قرار داده است و HIP کرده است یا گرم کردند و کامپوزیت تولید کرده است.

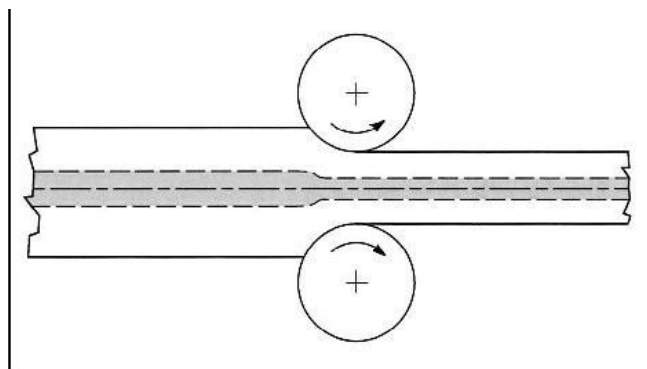




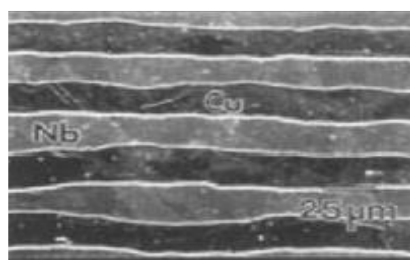
مثال دیگر از اتصال نفوذی برای پره‌های توربین است. پره توربین توخالی را از یان روش تولید کردند. الیاف را داخل فویل فلزی قرار داده و بعد پرس کردند.



روش دیگر roll bounding است که اگر یک ورق فلزی را بین دو تا ورق دیگر قرار دهیم و آن نورد کنیم، چه اتفاقی می‌افتد: این‌ها با هم جوش می‌خورند و یکپارچه می‌شوند و می‌شوند کامپوزیت لایه‌ای. به این روش، روش roll bounding می‌گویند یا اتصال نوردی.

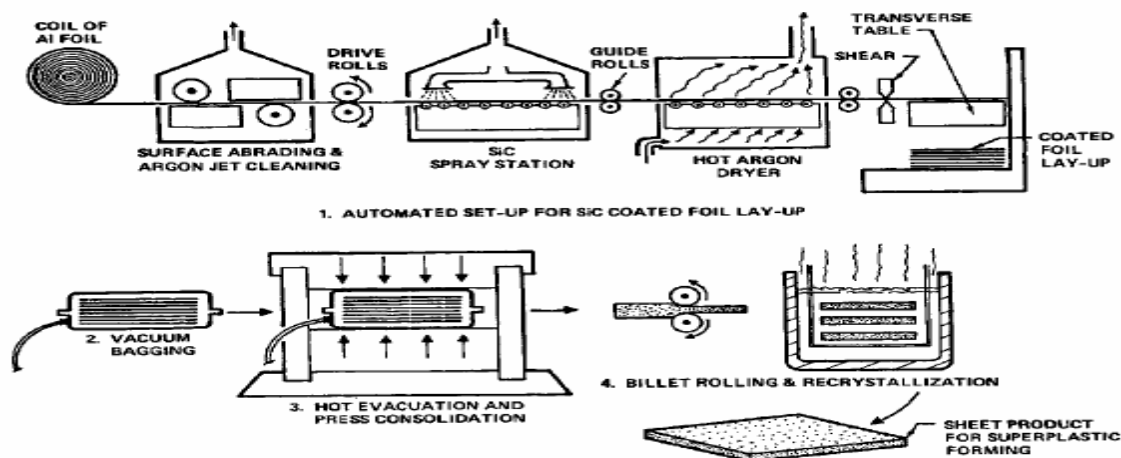


مثالی از Nb-Cu را در شکل زیر مشاهده می‌کنیم که لایه لایه روی هم قرار می‌گیرند. نورد می‌کنند و به هم جوش می‌خورند و کامپوزیت می‌شوند.



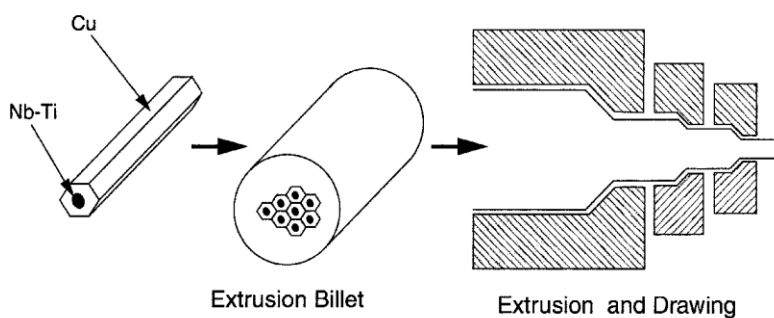
می‌توان در حقیقت از ذرات هم استفاده کرد تا حالا هرچه که صحبت شد، هیچ کدام ذرات نبودند. لایه بود که نورد کردیم یا الیاف گذاشتیم و اتصال نفوذی انجام دادیم. اما می‌توانیم کامپوزیتی را که ذره‌ای هم هست را از روش جامد تهیه کنیم. به چه ترتیب: یک فویل فلز است، مثلاً فویل آلومینیوم است که سطح آن با آلومینا تمیز می‌شود. بعد سیلیکون کاربید روی آن اسپری می‌شود که سیلیکون کاربید را با چسب مخلوط کردند و بعد اسپری می‌کنند. در محیط آرگون، خشک می‌شود. و این بریده می‌شود. بنابراین ورق‌های آلومینیوم را داریم که سیلیکون کاربید روی آن چسبانندیم. (با چسب) این‌ها را در حقیقت در بوته می‌گذاریم تحت خلا و حرارت می‌دهیم و فشار اعمال می‌کنیم، هم حرارت و هم فشار. یک نورد در ادامه می‌کنند و بعد روی آن عملیات حرارتی صورت می‌گیرد و در انتها کامپوزیت می‌شود. یک ورق داریم که داخل آن ذرات سیلیکون کاربید است.

روش جامد است، در عین حال متالورژی پودر نیز نیست و در ابتدا از پودر فلزی استفاده نکردیم و از فویل فلز استفاده کردیم. روش فویل - ذره می‌نامند.

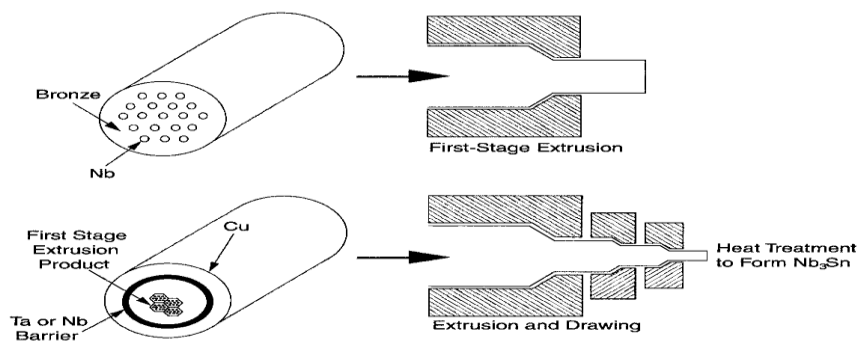


روش دیگر اکستروژن همزمان است که اگر یک میله‌ی مسی داشته باشیم و داخل آن را سوراخ کنیم، در داخل آن سوراخ یک رشته لیف Nb-Ti را قرار دهیم و بعد آن را اکستروژن کنیم. وقتی اکستروژن می‌کنیم یک میله است که وسط آن Nb-Ti است. برای ساخت ابررسانه‌ها و سیم‌های ابررسانا از این روش استفاده می‌شود.

از این روش برای ماتریس مس استفاده کردند.



برنز: یک میله‌ی برنز را چندین سوراخ کردند و Ta یا Nb را داخل آن سوراخ قرار می‌دهند و بعد اکستروژن می‌کنند. به این ترتیب یک سوپرکانداکتور تولید شده است.

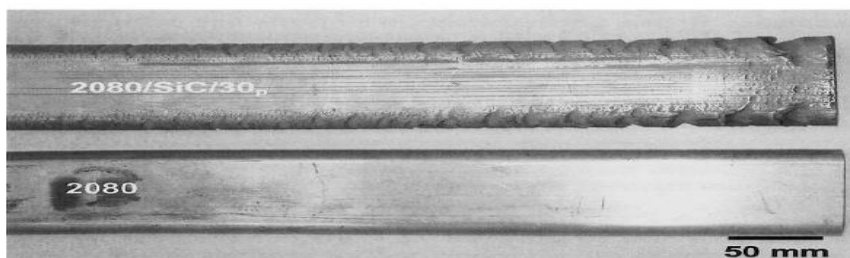


فرآیندهای ثانویه:

وقتی کامپوزیت را ساختیم بحث secondary processing یا فرآیندهای ثانویه مطرح می‌شود.

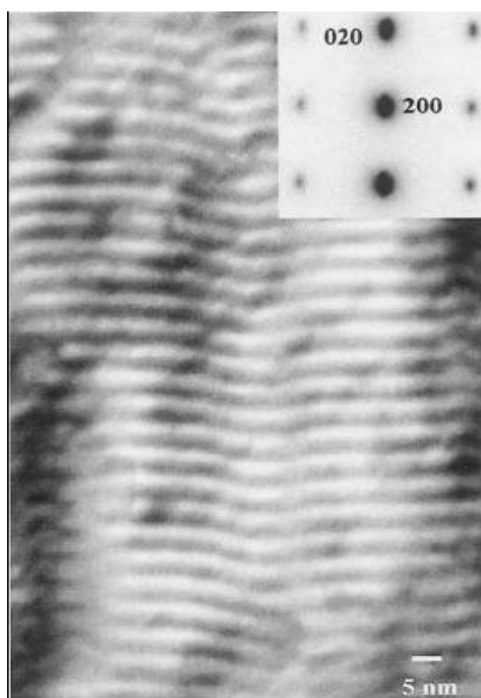
اکستروژن: آلومینیوم ۲۰۸۰ + ۳۰ درصد سیلیکون کاربید (به صورت ذره‌ای) را اکستروژن کردیم، ترک‌هایی درخت کریسمسی یا ترک‌های دم سوسماری بوجود می‌آید. چرا وقتی کامپوزیت را اکستروژن می‌کنیم، ترک ایجاد می‌شود: (چه نورد و چه اکستروژن ترک ایجاد می‌شود) فرض کنید آلومینیوم و سیلیکون کاربید داریم، ضریب اصطکام آلومینیوم با غلطک نورد با ضریب اصطکاک سیلیکون کاربید با غلطک فرق دارد. بنابراین وقتی از داخل غلطک نورد رد می‌شوند یکی می‌خواهد با سرعت رد شود و یکی با سرعت کم. بنابراین ترک می‌خورد به خاطر این که ضریب اصطکاک آن‌ها با هم فرق دارد و این مشکل را بوجود می‌آورد.

اما در اکستروژن خواص ایزوتروپیک عوض می‌شود و خواص آن ایزوتروپ می‌شود. اول این که ذرات می‌چرخند در جهت اکستروژن و در جهت اکستروژن قرار می‌گیرد. ( فکر نکنید که در اکستروژن فقط تخلخل‌ها بسته می‌شود بلکه خواص آن نیز تغییر می‌کند.) ذرات می‌چرخند، بنابراین وقتی اکستروژن می‌کنیم و دانه‌ها طویل می‌شود، ذرات در جهت اکستروژن قرار می‌گیرند.



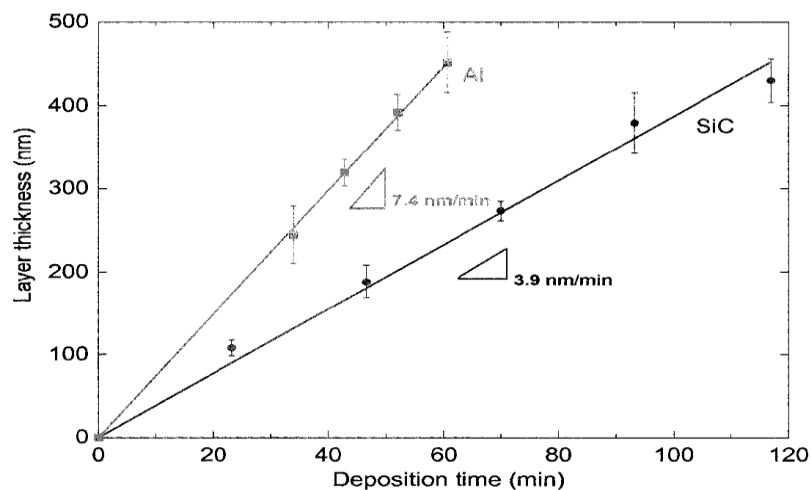
آخرین روش، روش حالت گاز است که معمولاً روش PVD است.

در تصویر TEM ذیل مس - نیکل را مشاهده می‌کنیم که از روش PVD تولید شده است. یک لایه مس و یک لایه نیکل مشاهده می‌شود و نانو کامپوزیت است که فقط از PVD روش می‌توان آن را تولید کرد. یک منبعی است که مس را بخار می‌کند و یک منبع دیگر نیز وجود دارد که نیکل را بخار می‌کند. این‌ها را یکی در میان به زیرلایه هدایت می‌کنند، بخار نیکل می‌شینند و یک لایه رسوب می‌کند و بعد آن را قطع می‌کنیم. بخار مس می‌نشانیم، باز بخار نیکل و بعد بخار مس و ... یکی در میان این کار را انجام می‌دهیم و یک لایه مس - نیکل - مس - نیکل و ... داریم. لایه‌ها به هم چسبیدند و اتصال کامل با هم دارند. به شکل کامپوزیتی لایه لایه آن‌ها را ایجاد می‌کنیم. (به صورت همزمان انجام نمی‌شود چون با هم قاتی می‌شود).



در نمودار ذیل کامپوزیت آلومینیوم - سیلیکون کاربرد را مشاهده می‌کنیم که زمان رسوب‌گذاری بر حسب ضخامت لایه‌ها نشان داده شده است. شیب آلومینیوم ۷/۴ میلی‌متر بر دقیقه و شیب سیلیکون کاربرد ۳/۹ میلی‌متر است که با افزایش زمان ضخامت افزایش می‌یابد.

آلومینیوم نقطه ذوبش پایین است و فشار بخارش بیش‌تر است. آلومینیوم ضخیم است و سیلیکون کاربید نازک است. چون سرعت تشکیل آلومینیوم از سیلیکون کاربید بیش‌تر است و کامپوزیت آلومینیوم-سیلیکون کاربید از این روش تولید شده است. (کامپوزیت‌های لایه‌ای، نانومتری هستند).



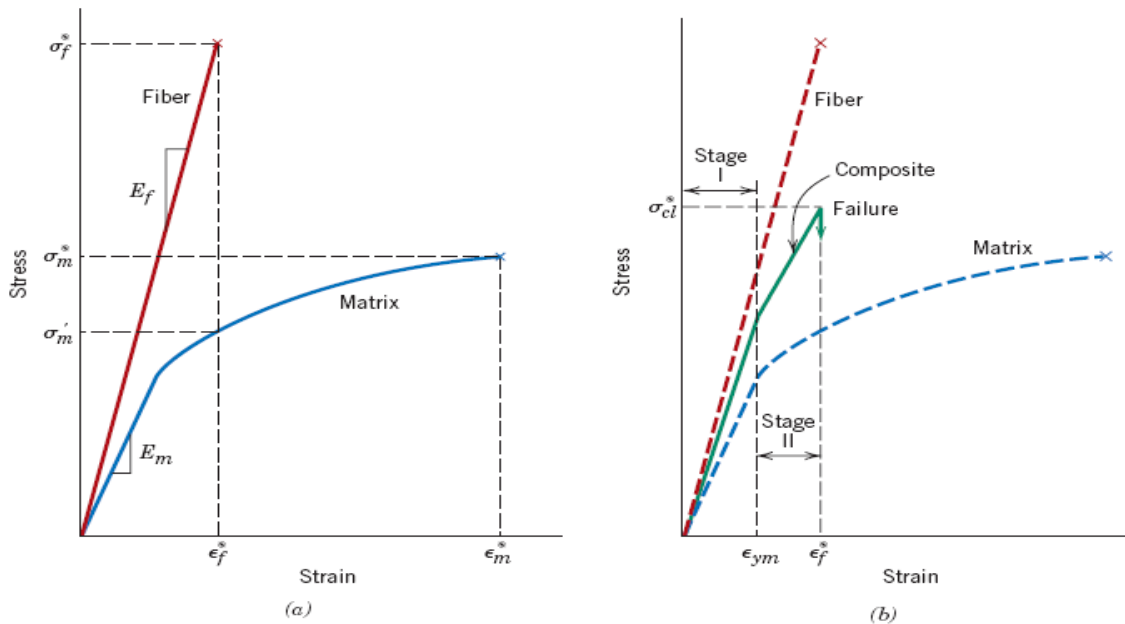
پایله یازدهم

۹۵/۱۰/۰۵

خواص مکانیکی:

فلزات و آلیاژهای فلزی خواص مکانیکی خوبی دارند، سنگین هستند (آهن، فولاد و چدن) و فلزاتی که سبک هستند مثل آلومینیوم و منیزیم خواص مکانیکی‌شان خوب نیست که با کامپوزیت‌سازی علاوه بر سبک‌سازی، خواص مکانیکی را نیز بهبود می‌دهیم. (مثل آلومینیوم و منیزیم که زیاد استفاده می‌شود و با کامپوزیت‌سازی، خواص آن‌ها بهبود می‌یابد).

بحث خواص مکانیکی که مطرح می‌شود باید تنش- کرنش را در نظر بگیریم که در نمودار تنش- کرنش را برای ماتریس و الیاف ملاحظه می‌کنیم. (در شکل ذیل)



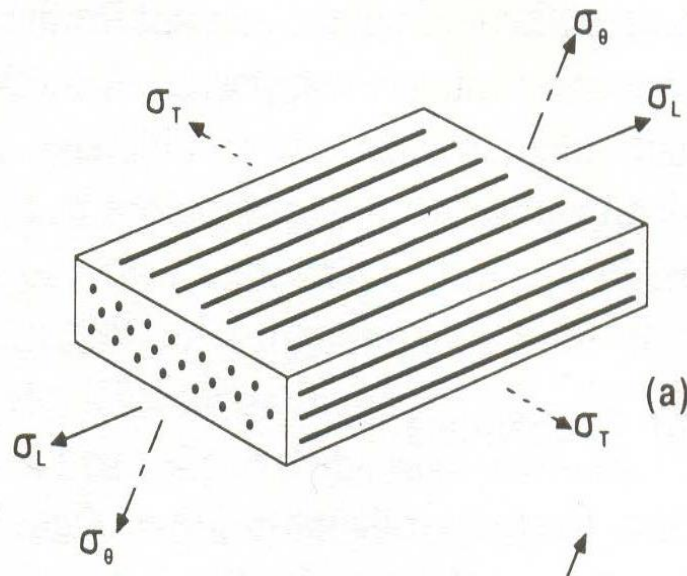
**Figure 16.9** (a) Schematic stress–strain curves for brittle fiber and ductile matrix materials. Fracture stresses and strains for both materials are noted. (b) Schematic stress–strain curve for an aligned fiber-reinforced composite that is exposed to a uniaxial stress applied in the direction of alignment; curves for the fiber and matrix materials shown in part (a) are also superimposed.

برای الیاف که معمولاً الیافی که استفاده می‌کنیم که الیاف ترد و شکننده‌ای هستند بنابراین فقط منطقه‌ی الاستیک دارند و وارد منطقه‌ی پلاستیک نمی‌شوند قبل از این که وارد منطقه‌ی پلاستیک شوند، شکست رخ می‌دهد. اما در مورد ماتریس معمولاً از ماتریس داکتیل استفاده می‌کنند که یک مرحله تغییر شکل الاستیک دارد و بعد وارد مرحله‌ی تغییر شکل پلاستیک می‌شود. اگر کامپوزیت را در نظر بگیریم که نمودار سبز رنگ مربوط به کامپوزیت است که بین نمودار الیاف و ماتریس قرار می‌گیرد. کامپوزیت شامل دو مرحله است:

مرحله‌ی اول: هم الیاف و هم ماتریس هر دو منطقه‌ی الاستیک هستند.

وقتی وارد مرحله دوم می‌شویم مرحله‌ای است که الیاف هنوز در منطقه‌ی الاستیک است و ماتریس وارد منطقه‌ی پلاستیک شده است.

اما وقتی بحث خواص مکانیکی پیش می‌آید ساده‌ترین حالت این است که کامپوزیت را به صورت الیاف پیوسته و منظم در نظر بگیریم. وقتی کامپوزیت را به صورت ذیل در نظر بگیریم:





سه جهت می‌توان کامپوزیت را تحت بارگذاری قرار دهیم:

۱- در جهت طول الیاف بارگذاری کنیم،  $\sigma_L$  خواهیم داشت.

۲- در جهت عمود بر الیاف بارگذاری کنیم،  $\sigma_T$  خواهیم داشت.

۳- با زاویه الیاف را بارگذاری کنیم،  $\sigma_\theta$  خواهیم داشت.

سه حالت می‌توان خواص مکانیکی کامپوزیت را با توجه به نحوه‌ی بارگذاری آن بررسی کرد. اگر مدول الاستیته را در نظر بگیریم بر اساس کسر حجمی الیاف سیم‌های تنگستن در داخل ماتریس مس قرار گرفته است.

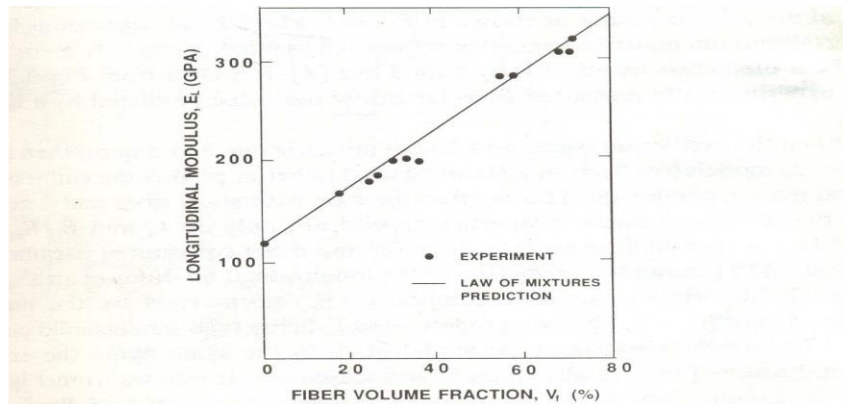


FIG. 3.2 Dynamic modulus of elasticity of a continuous tungsten fiber/copper composite where the experimental results are shown by filled circles and the prediction based on eq. (3.1) by solid line [1].

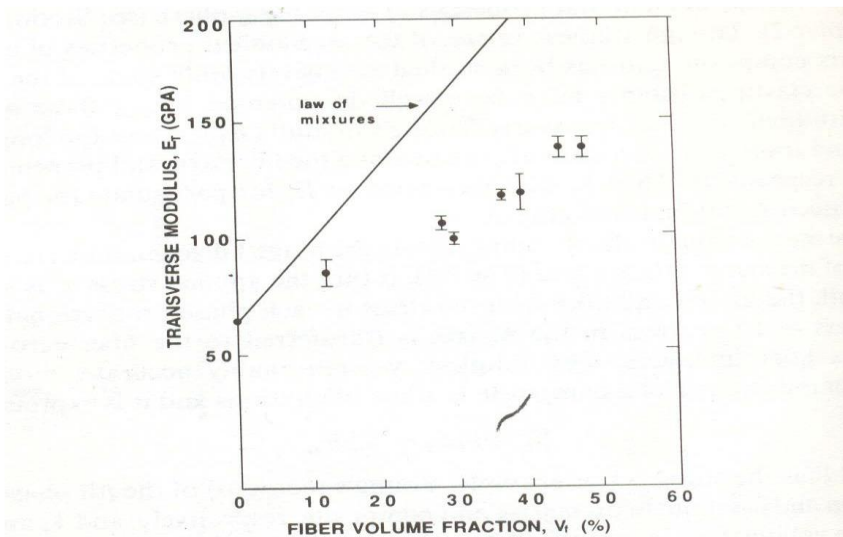


FIG. 3.3 Transverse modulus (E<sub>T</sub>) of a BORSIC fiber/6061 Al composite as a function of fiber volume fraction (V<sub>f</sub>) [4].

می‌دانیم که از قانون مخلوط‌ها پیروی می‌کند. قانون مخلوط، قانونی است که اشکال مختلفی دارد که یکی از اشکال قانون مخلوط به این ترتیب است که:

$$E_C = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

$$1 - V_f = V_m$$

با دانستن مدول الاستیسیته‌ی الیاف کسر حجمی الیاف و مدول الاستیسیته ماتریس می‌توان مدول الاستیسیته کامپوزیت را بدست آورد که از قانون مخلوط‌ها بدست می‌آید.

نقاط تجربی با قانون مخلوط‌ها کاملاً مطابقت دارد و صادق است. برای کامپوزیتی که به شکل طولی کشیده می‌شود. اما اگر مدول الاستیسیته عرضی را در نظر بگیریم، این قانون مخلوط‌ها اصلاً سازگاری ندارد و کمتر از چیزی است که قانون مخلوط‌ها پیش بینی می‌کند. دلیلش چیست: دلیل این است که وقتی به صورت عرضی کامپوزیت را می‌کشیم در حقیقت نیرو از طریق ماتریس به فصل مشترک وارد می‌شود و بعد از طریق فصل مشترک به الیاف یعنی اگر فصل مشترک ضعیف باشد، خواص مکانیکی، مدول الاستیسیته و استحکامش پایین می‌آید.

در جهت عرضی به فصل مشترک بستگی دارد.

اما وقتی طولی می‌کشیم کامپوزیت را، الیاف مستقیماً تحت بار است. فصل مشترک آن چنان کاری ندارد و الیاف خودشان مستقیماً تحمل بار می‌کنند و این است که از قانون مخلوط پیروی می‌کنند.

نمودار کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱- بورسیک را در ذیل مشاهده می‌کنیم که در بورسیک، روی بور پوشش سیلیکون کاربرد قرار گرفته است.

اما اگر UTS را در نظر بگیریم برای حالت عرضی:

اگر UTS را برحسب کسر حجمی الیاف در نظر بگیریم، می‌توان دید که یک حالت نزولی دارد یعنی وقتی در کامپوزیت بورسیک و آلومینیوم، وقتی کسر حجمی الیاف بیش‌تر می‌شود UTS پایین می‌آید. اگر کامپوزیت را بخواهیم در جهت عرضی

بکشیم، بهتر است که کامپوزیت نسازیم برای این که وقتی صفر درصد الیاف داشته باشیم استحکام حدوداً ۳۰۰ الی ۴۰۰ مگاپاسکال است و وقتی ۳۰ درصد الیاف زدیم، استحکام ۱۰۰ مگاپاسکال شده است. پس بنابراین کامپوزیت ضعیف شده است وقتی در جهت عرضی کامپوزیت را می‌کشیم. دلیلش همان فصل مشترک است.

T4 و T5، T6 عملیات حرارتی است که انجام می‌شود. چرا وقتی عملیات حرارتی صورت می‌گیرد، خواص مکانیکی کامپوزیت بهتر می‌شود؛ فصل مشترک قوی شده است و عملیات حرارتی باعث می‌شود فصل مشترک قوی شود. (عملیات حرارتی باعث تقویت فصل مشترک می‌شود.)

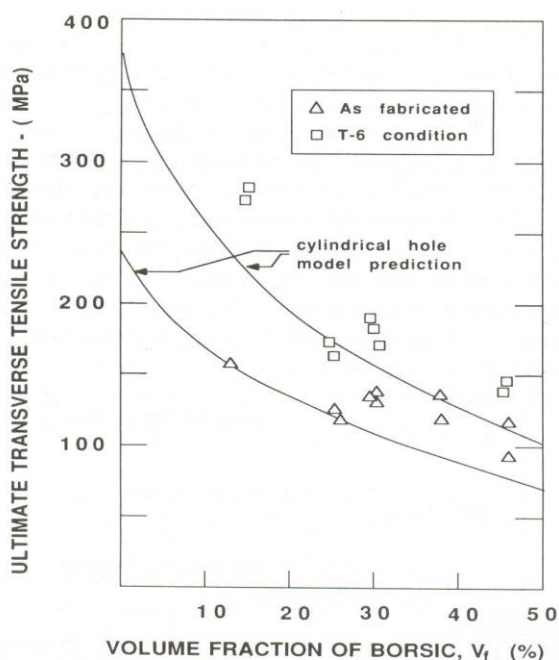


FIG. 3.24 Transverse tensile strength  $\sigma_T$  of a continuous BORSIC fiber/2 aluminum composite as a function of fiber volume fraction  $V_f$  [41]

مدل سوراخ‌های استوانه‌ای؛ وقتی کامپوزیت را در جهت عرضی می‌کشیم درست مثل این است که الیاف را به جایش سوراخ در نظر بگیریم. همان قدر که سوراخ‌ها خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد و ضعیف می‌کنند. الیاف نیز همان قدر خواص مکانیکی را کاهش می‌دهند. ناپیوستگی ایجاد می‌کنند. و هرچه تعداد سوراخ‌ها بیش‌تر شود، معلوم است که خواص مکانیکی ضعیف‌تر می‌شود چون نیرو تقسیم بر سطح است که وقتی سوراخ دار باشد، سطح مقطع کم می‌شود و فشار بالا می‌رود. (نیرو ثابت است.)

تنشی که اعمال می‌شود زیاد می‌شود و آن گسیخته می‌شود.

با مدل سوراخ‌های استوانه قابل پیش بینی است. وقتی تعداد سوراخ‌ها افزایش می‌یابد، خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. همان طور که مشاهده می‌شود حالت T6 را نشان داده است.

بحث این پیش می‌آید اگر به حالت زاویه‌دار بخواهیم کامپوزیت را بکشیم، سه تا مود دارد:

۱- مود طولی: از رابطه‌ی ذیل بدست می‌آید.

$$\frac{\sigma_L}{\cos^2 \theta}$$

$\sigma_L$ : تنش اعمال شده در جهت طول است. (تنش در جهت طولی اعمال می‌شود).

$\theta$ : زاویه‌ی اعمال نیرو است یعنی زاویه‌ی بین جهت اعمال نیرو و جهت الیاف است.

۲- مود برشی:

$$\frac{\tau}{\sin \theta \cdot \cos \theta}$$

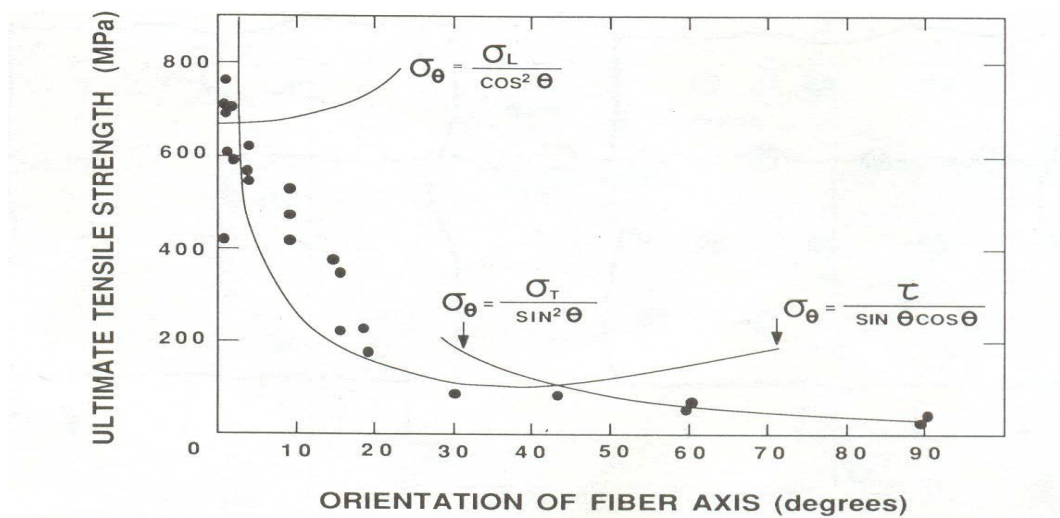
یعنی تنش برشی اعمال شده تقسیم بر  $\sin \theta \cos \theta$

۳- مود عرضی:

$$\frac{\sigma_T}{\sin^2 \theta}$$

$\sigma_T$ : تنش اعمال شده در جهت T

در مجموع چگونه خواهد شد: در شکل ذیل زاویه‌ی اعمال نیرو و UTS کامپوزیت را مشاهده می‌کنیم که UTS بر حسب  $\theta$  رسم شده است.



مود طولی: هرچه قدر که زاویه اعمال نیرو بیش تر شود،  $L\sigma$  بیش تر می‌شود. از صفر درجه که به یک درجه بکشیم، بهتر می‌شود. وقتی ، زیاد می‌شود  $\theta \cos$  کم می‌شود.

$$\text{در این صورت این مقدار زیاد می‌شود.} \quad \frac{\sigma_L}{\cos^2 \theta}$$

متاسفانه مود طولی خیلی دوامی ندارد و بلافاصله می‌افتد روی مود برشی. روی مد برشی که می‌افتد از رابطه‌ی ذیل بدست می‌آید.

$$\frac{\tau}{\sin \theta \cdot \cos \theta}$$

وقتی زاویه از ۳-۲ درجه بیش تر شود، می‌افتد روی مود برشی.

مود برشی کافی است که افزایش یابد و از یک جایی به مود عرضی تبدیل می‌شود.

موقعی که مود طولی به برشی تبدیل می‌شود، چه موقعی برشی به عرضی تبدیل می‌شود:

وقتی دو رابطه داریم، این دو رابطه را با هم قطع می‌کنیم، دو معادله را با هم حل می‌کنیم، زاویه‌ایی که بدست می‌آید ۳ درجه است. (فقط تا سه درجه)

چه وقت مود برشی به عرضی تبدیل می‌شود باز دو تا رابطه با هم قطع می‌دهیم و زاویه را بدست می‌آوریم که زاویه در حدود ۴۵ درجه بدست می‌آید.

بنابراین نشان می‌دهد که تا ۳ درجه در مود طولی هستیم و از ۳ درجه تا ۴۵ درجه مود برشی و از ۴۵ درجه تا ۹۰ درجه در مود عرضی هستیم.

نقاط تجربی که مشاهده می‌شود با فرمول سازگار است.

الیاف سیلیسیم در داخل ماتریس آلومینیوم قرار دارند و استحکام کششی بر حسب زاویه اعمال نیرو بدست آورده است که کامپوزیت ۵۰ درصد سیلیسیم داشته است و با زاویه‌های مختلف کشیده است که وقتی کامپوزیت ساخته است حدوداً ۸۰۰ مگاپاسکال استحکام آن است و ۸۰۰ مگاپاسکال برای آلومینیوم، عدد خیلی بالایی است. بهترین آلومینیوم در حدود ۳۰۰ الی ۴۰۰ مگاپاسکال است اما این ۸۰۰ مگاپاسکال در حالتی است که حداکثر تا سه درجه زاویه اعمال می‌شود. اگر زاویه ۲۰ درجه شود ۸۰۰ به ۱۸۰ تبدیل می‌شود. اگر زاویه به ۵۰ برسد، ۸۰۰ به ۲۰ یا ۳۰ مگاپاسکال می‌رسد و خیلی ضعیف می‌شود و حتی از خود آلومینیوم نیز ضعیف‌تر می‌شود. (در مود عرضی و برشی، الیاف مثل سوراخ عمل می‌کنند.)

اگر یک قطعه‌ی حساس داشته باشیم مثلاً قطعه‌ایی در هواپیما، که این قطعه از کامپوزیت ساخته شده است ۸۰۰ مگاپاسکال استحکام دارد اما اگر زاویه تغییر کند و بیش از ۳ درجه شود، خواص کاهش می‌یابد. بنابراین این کامپوزیت خوب است به شرطی که زاویه ۳ درجه باشد. برای این که این مشکل برطرف گردد از کامپوزیت‌های چند لایه استفاده می‌کنند. (سه بعدی) از زوایای مختلف روی هم قرار می‌دهند و پرس می‌کنند. در این صورت استحکام بر حسب زاویه به این صورت می‌شود که تا حدود ۳۰ درجه در بالا آن را نگه می‌دارد یعنی اگر تا ۳۰ درجه زاویه‌ی اعمال نیرو تغییر کند مشکلی پیش نمی‌آید بنابراین کامپوزیت چند لایه استفاده کردند و تا حدودی این مشکل را برطرف کردند.

در هر زاویه‌ای که اعمال شوند، لایه‌های کامپوزیت وجود دارند.

کامپوزیت‌های ذره‌ای و ویسکری: در شکل زیر مدول یانگ را برحسب کسر حجمی سیلیکون کاربید رسم کرده است یکی برای قانون مخلوط‌ها است و یکی برای سیلیکون کاربید ویسکری و سیلیکون کاربید ذره‌ای. اولاً چرا ویسکرها و ذرات از قانون مخلوط‌ها کم‌تر پیش بینی می‌کنند:

(در صورتی که در کامپوزیت‌های الیافی، وقتی در جهت الیاف می‌کشیدیم دقیقاً خواص مکانیکی را پیش بینی می‌کرد).

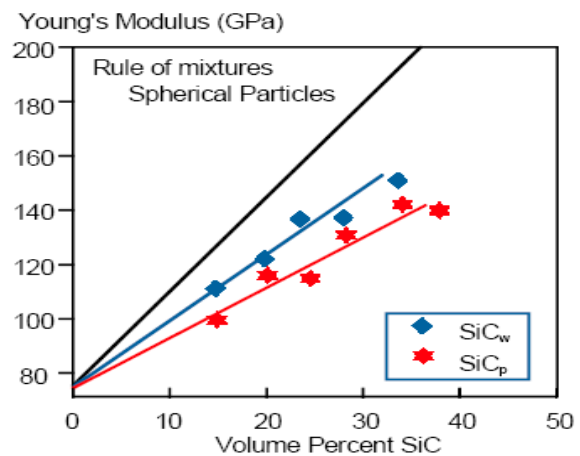
## Stiffness

UPPER AND LOWER BOUND MODEL

$$E_c = E_m \cdot V_m + E_r \cdot V_r$$

$$E_c = \frac{E_m \cdot V_m + E_r \cdot (V_r + 1)}{E_r \cdot V_m + E_m \cdot (V_r + 1)}$$

YOUNG'S MODULUS versus  
VOLUME PERCENT OF SiC<sub>whiskers</sub>  
AND SiC<sub>particles</sub> REINFORCEMENT



به خاطر این که مکانیزم مقاوم شدن آن‌ها فرق می‌کند. وقتی کامپوزیت الیافی را می‌کشیم، همان طور که بیان شد الیاف تحمل نیرو را می‌کنند، اما وقتی کامپوزیت ذره‌ای یا ویسکری را می‌کشیم تحمل نیرو به آن ترتیب نمی‌کنند. به صورت غیر مستقیم مستحکم کردند. از چه طریق: ۸ مکانیزم دارد که کامپوزیت‌های ذره‌ای یا الیافی سبب مقاوم شدن آن‌ها می‌شود. یکی از مکانیزم‌ها: افزایش دانسیته‌ی نابعایی‌ها است. یعنی ذرات را داخل کامپوزیت قرار دایم، دانسیته‌ی نابعایی اطراف آن ایجاد شده است و استحکام و مدول یانگ بالا رفته است. بنابراین مستقیماً تحمل نیرو نمی‌کنند که بتوان از قانون مخلوط‌ها استفاده کنیم.

چرا ویسکرها بهتر از ذرات عمل می‌کنند: دو دلیل وجود دارد:

۱- ویسکرها تک کریستال هستند.

(ویسکرها خودشان خواص مکانیکی‌شان بهتر از ذرات است.)

۲- طول آن‌ها

نسبت  $Aspect\ ratio=L/D$ ، هرچه این نسبت بیشتر باشد، بهتر است.

برای ذره  $L/D$  تقریباً برابر با یک است و برای ویسکر  $L/D$ ، بزرگ‌تر از یک است.

هرچه  $L/D$  بیشتر باشد، خواص مکانیکی بهتر است.

ویسکرها به دو دلیل بیان شده نسبت به ذرات بهتر عمل می‌کنند.

(کامپوزیتی که با ویسکر تقویت شده است نسبت به کامپوزیتی که با ذره تقویت شده است (درصد حجمی هر دو ۲۰ درصد)،

استحکام آن کامپوزیتی که با ویسکر تقویت شده است بیشتر است و خواص بیشتری دارد.)

\* کامپوزیت زمینه‌ی آلومینیوم را با آلومینیومی که کامپوزیت نشده است را مقایسه کرده است:

یک سری مزایا و یک سری معایب دارد:

۱- در دمای بالا خواص خزشی بهتری دارد.

۲- خواص سایشی بهتری دارد.

این مزایای بیان شده مزایای کامپوزیت آلومینیوم تقویت شده است نسبت به آلومینیوم که تقویت نشده است.

اما معایب:

۱- تافنس و داکتیلیته‌ی آن کم‌تر است.

در کامپوزیت سازی تافنس و داکتیلیته را فدای استحکام و سبکی کامپوزیت می‌کنیم.



۲- از نظر روش‌های تولید پیچیده‌تر است و گران‌تر نیز می‌باشد.

\* MMC را با PMC مقایسه کردیم:

استحکام عرضی کامپوزیت‌های زمینه فلزی از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری بالاتر است.

تافنس بهتر است.

در مقابل خسارت‌ها بهتر مقاومت می‌کنند.

در مقابل خسارت‌های جوی مثل رطوبت، نور آفتاب و ... کامپوزیت‌های زمینه فلزی از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری بهتر است.

از لحاظ هدایت حرارتی و الکتریسیته بالاتر است.

کامپوزیت‌های زمینه فلزی دما را از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، بیش‌تر تحمل می‌کنند.

اما عیب کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبت به کامپوزیت‌های زمینه پلیمری:

تکنولوژی کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبت به کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به خوبی پیشرفت نکرده است.

Data base کامپوزیت‌های زمینه فلزی کم‌تر است.

قیمت کامپوزیت‌های زمینه فلزی از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری بالاتر است.

\* اکنون کامپوزیت‌های زمینه فلزی را با کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی مقایسه می‌کنیم:

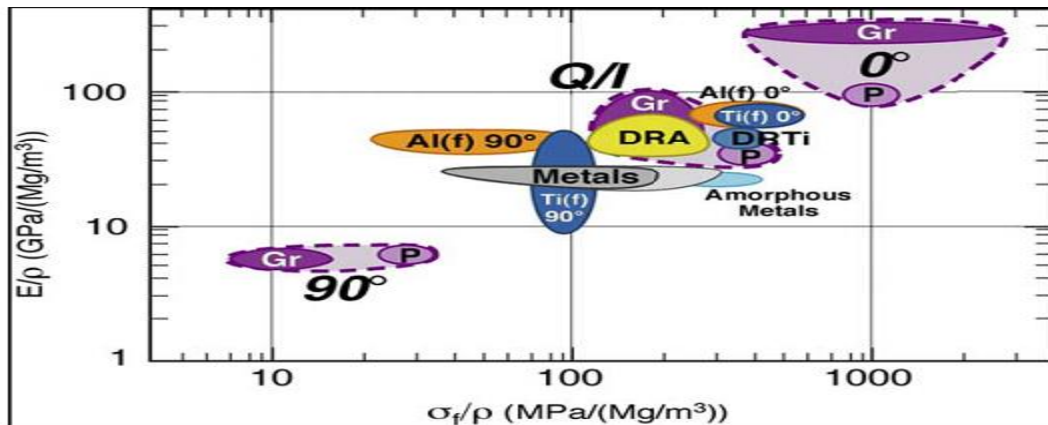
تافنس بالاتر است.

روش تولید آن ساده‌تر است.

قیمت آن کم‌تر است.

اما عیب کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبت به کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی:

از لحاظ خواص دمای بالا ضعیف‌تر است.



در تصویر بالا نمودار رسم شده است و خواص الیاف مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

الیافی استحکامش از ذره‌ای بیش‌تر است.

خواص دمای بالای کامپوزیت‌ها: هنر کامپوزیت‌ها در دمای بالا معین می‌شود.

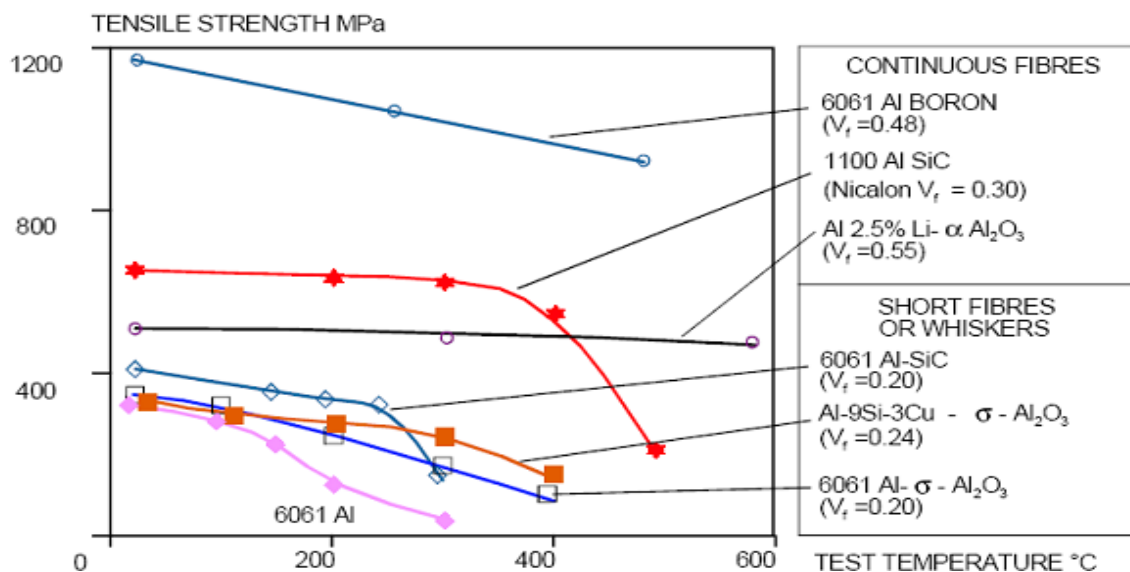
خواص خزشی که کامپوزیت‌های پایه‌ی نیکل و کبالت دارد باعث شده است برای پره‌های توربین مورد استفاده قرار گیرند و خواص مقاومت در برابر اکسیداسیون دارند. مقاومت به ضربه‌ی بالایی دارند و کامپوزیت‌های هستند که در دمای بالا استفاده می‌شوند.

در تصویر ذیل آن چیزی که قابل توجه است این است که: آلیاژ ۶۰۶۱ که بهترین آلیاژ آلومینیوم است و خیلی قوی است و استحکام آن ۳۸۰ مگاپاسکال است وقتی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شود، ۳۸۰ به ۱۰۰ مگاپاسکال تبدیل می‌شود. با افزایش دما، استحکام کاهش یافته است.

اگر آلومینیوم ۶۰۶۱ را با ۴۸ درصد الیاف بور کامپوزیت کنیم، استحکام در دمای محیط ۱۲۰۰ مگاپاسکال است و تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز که آن را گرم می‌کنند، استحکامش ۹۰۰ مگاپاسکال است.

آلیاژ ۱۱۰۰ که ضعیف‌ترین آلیاژ آلومینیوم است، آلومینیوم خالص است که خیلی ضعیف است. وقتی آن را سیلیکون کاربید تقویت کردند (۳۰ درصد سیلیکون کاربید اضافه کردند) مشاهده می‌شود که استحکام آن به ۷۰۰ مگاپاسکال رسیده است.

خواص دمای بالا کامپوزیت‌ها مهم است.



اگر موارد معمولی و روزمره نیاز باشد اصلاً نیاز به ساخت کامپوزیت نیست، همان فولاد و چدن به کار می‌رود. اما وقتی دمای بالا مطرح می‌شود وقتی مثلاً مطرح می‌شود که می‌خواهیم هواپیما بسازیم و بالا برود، باید سبک باشد و دمای بالا را نیز حفظ کند. در این صورت از کامپوزیت‌ها استفاده می‌کنند. چون در کامپوزیت‌ها، علاوه بر سبکی خواص سایشی نیز دارند و استحکام آن‌ها نیز بالا است. به همین مزیت‌ها در صنایع هوافضا و هواپیماسازی از کامپوزیت‌ها استفاده می‌کنند.

در بحث خواص دمای بالا در کامپوزیت‌ها، خواص خزشی مطرح می‌شود.

خزش: بار ثابتی را اعمال می‌کنیم در دمای نسبتاً بالا، بعد میزان کرنش را نسبت به زمان بدست می‌آوریم.

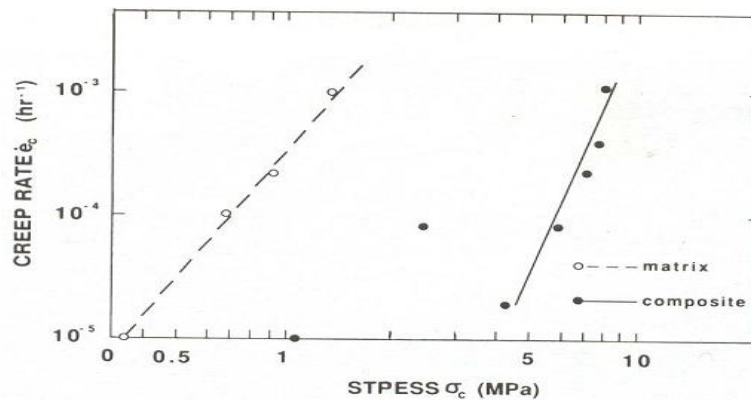
خزش سه مرحله است:

شیب مرحله‌ی اول را Creep rate می‌گویند.

مرحله‌ی دوم مرحله‌ی steady-state است.

Creep rate : هرچه قدر نرخ خزش کم‌تر باشد، بهتر است. در شکل کامپوزیتی را مشاهده می‌کنیم که الیاف تنگستن را در ماتریس داریم و steady-state creep را برحسب تنش اعمال شده رسم کرده است. مشاهده می‌شود که خواص خزشی کامپوزیت بهتر از ماتریس است.

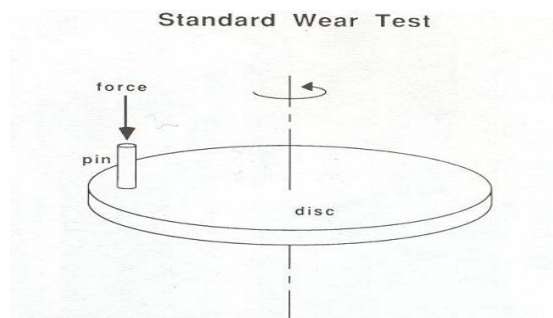
خواص خزشی و خواص دمای بالا در کامپوزیت بهتر از ماتریس است.



Creep rate (steady-state creep rate) vs. applied stress for a tungsten fiber/Ag matrix composite tested at temperature 600°C. [18].

خواص سایشی:

سایش: مکانیزم و روش‌های مختلفی برای سایش است که متداول‌ترین روش آن pin-on-disk است. یک پین است که روی دیسک چرخان قرار می‌گیرد.



فرض کنید کامپوزیت و یک فولاد سخت را به عنوان پین در نظر گرفته است، روی دیسک شروع به چرخش می‌کند و ساییدن صورت می‌گیرد که بعد از اتمام آزمایش، براده‌ها را جمع می‌کنند و از نظر وزن سائیده شده، سایش را اندازه‌گیری می‌کنند. هرچه وزن سائیده شده بیش‌تر باشد، مقاومت به سایش آن کم‌تر است. حجم سائیده شده از رابطه‌ی ذیل بدست می‌آید:

$$V = kNS/H$$

V: حجم سائیده شده

K: ضریب است که به اصطکاک بستگی دارد. (ضریب اصطکاک)

N: نیروی اعمال شده عمودی

S: فاصله‌ی لغزش است. (چه مقدار پین روی دیسک چرخیده است).

H: سختی نمونه است.

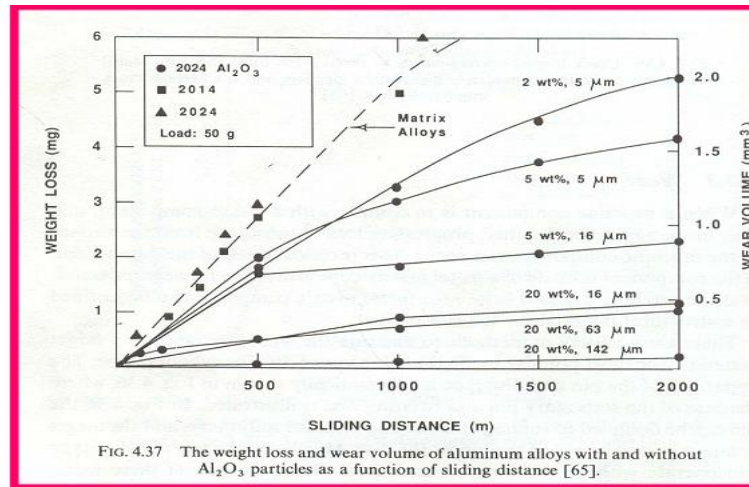
بنابراین K که یک ضریب است و نیز N شخص است مقدار نیرویی است که اعمال می‌شود. اندازه‌گیری S به چه صورت است: وقتی بخواهیم را اندازه‌گیری کنیم، این دستگاه سایش به یک کنتور متصل است. وقتی می‌چرخد دستگاه، تعداد چرخش را مشخص می‌کند. (تعداد دور) بعد محیط این دورها را حساب می‌کنیم. محیط را بدست می‌آوریم و در تعداد دور ضرب می‌کنیم، فاصله‌ی لغزش بدست می‌آید. بنابراین فاصله‌ی لغزش نیز بدست آمد. در نهایت حجم سائیده شده بدست می‌آید.

پین و دیسک را با استون کاملاً قبل از انجام تست می‌شویند و وقتی تست سایش را انجام دادند پین و دیسک را دوباره وزن می‌کنند و مشخص می‌کنند چه قدر از پین و چه قدر از دیسک سائیده شده است. دانسیته را دارند، حجم را بدست می‌آورند.

محیط × تعداد دور = فاصله‌ی لغزش

فاصله‌ی لغزش تا ۲ کیلومتر نیز انجام می‌دهند، هرچه قدر که فاصله‌ی لغزش بیش‌تر باشد، نتایج حاصل از آن تست دقیق‌تر است.

با توجه به نمودار ذیل در وزن سائیده شده چند نکته وجود دارد:



This Figure shows that the wear resistance of the composites are better than the matrix alloy. The wear resistance of composites is improved by (1) using coarser particles and (2) increasing the volume percent of the reinforcing particles.

۱- آلیاژ ماتریس از بقیه کامپوزیت‌ها نرخ سایشش بیش‌تر است.

۲- در کامپوزیتی که ۲درصد ۵- میکرون و ۵درصد- ۵ میکرون: کامپوزیتی که ۵درصد است از ۲درصد بهتر است. هرچه قدر که درصد حجمی ذرات تقویت کننده بیش‌تر شود، مقاومت به سایشی بیش‌تر می‌شود.

۳- در کامپوزیت‌های ۱۶ میکرون-۲۰درصد، ۳۶ میکرون-۲۰درصد و ۱۴۲ میکرون-۲۰درصد: سایز هرچه بیش‌تر شده است، خواص سایشی بهتر شده است.

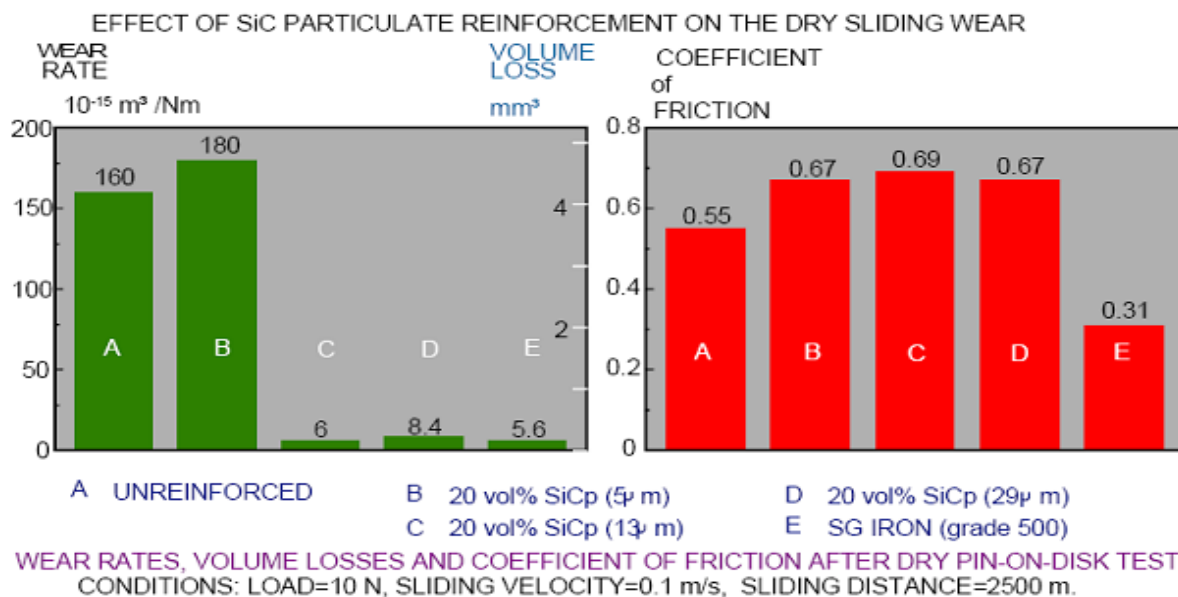
چرا فاز دوم بزرگ‌تر شود، خواص سایشی بهتر است: اگر ذره کوچک و بزرگ را در نظر بگیریم، ذره بزرگ کنده نمی‌شود وقتی که بین کار می‌کند اما وقتی بین کار می‌کند، ذره کوچک کنده می‌شود و ذره بزرگ کنده نمی‌شود و در ماتریس مدفون شده است.

هرچه قدر که ذره بزرگ‌تر باشد، بهتر است.

وقتی که ذره کنده می‌شود، بحث سایش سه جسمه مطرح می‌شود. ذراتی که کنده می‌شوند خودش بین پین و دیسک مثل ماده‌ی ساینده عمل می‌کند و از بین نمی‌رود. ذرات بزرگ برای سایش خوب هستند، اما برای خواص مکانیکی خوب نیستند.

وقتی در رابطه با خواص مکانیکی بحث می‌کنیم، هرچه ذرات ریزتر شود خواص مکانیکی بهتر می‌شود. اما برای سایش برعکس است، هرچه ذره بزرگ‌تر باشد سایش بهتر می‌شود.

نمودار ذیل را مشاهده بفرمائید:



A: آلومینیوم است که تقویت نشده است و میزان سایش آن ۱۶۰ است.

B: آلومینیوم + ۲۰ درصد سیلیکون کاربید ۵ میکرونی دارد، میزان سایش ۱۸۰ است و از ماتریس هم بدتر شده است.

C: آلومینیوم + ۲۰ درصد سیلیکون کاربید ۱۳ میکرونی دارد، میزان سایش ۶ است و مشاهده می‌شود که از ۱۸۰ به ۶ رسیده است یعنی ۳۰ برابر بهتر شده است. وقتی ذره از ۵ میکرون به ۱۳ میکرون برسد با همان درصد سیلیکون کاربید، خواص بهتر می‌شود.

D: اندازه ۲۹ میکرون است و خواص بدتر شده است. (امکان دارد خطای آزمایش باشد).

در چدن خاکستری با گرافیت کروی از همه بهتر است و ۵/۶ است. امکان دارد یک نفر به ما بگویند "خسته نباشید چرا کامپوزیت ساختید. چدن که ۲۵۰۰ سال است روی آن کار می‌کنند که بهتر است و نرخ سایش آن ۵/۶ است." پس چرا کامپوزیت: با کامپوزیت سازی به خیلی از موارد دیگر دست پیدا می‌کنیم. مانند وزن، استحکام، سبکی و ... ضریب اصطکام

ماتریس ۰/۵۵ است و ضریب اصطکاک B ۰/۶۷ و ضریب C ۰/۶۹ و چدن ضریب اصطکاکش ۰/۳۱ است، چدن ضریب اصطکاکش پایین است و این نیز یک مزیت دیگر چدن نسبت به کامپوزیت‌ها است.

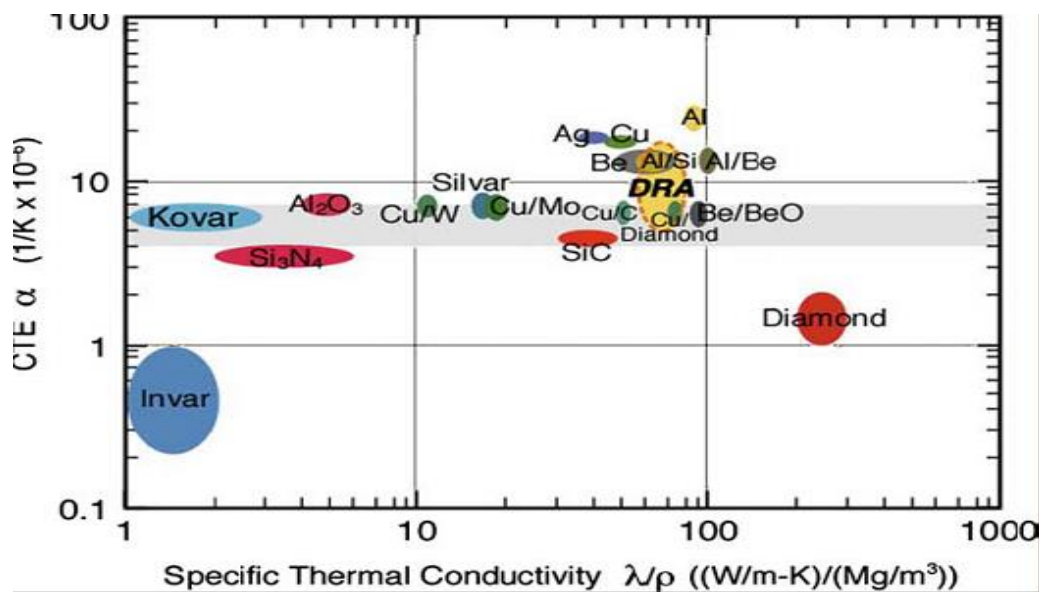
پاسخ برای این: اولاً چدن یک نوع کامپوزیت است چون با گرافیت تقویت شده است. فرض کنید کامپوزیت هم نباشد. خواص سایشی چدن بهتر است و ضریب اصطکاک آن کم‌تر است. اما متأسفانه ضریب اصطکاک کامپوزیت‌ها بالا است.

دوماً در جواب باید کامپوزیت‌های هیبریدی را طرح می‌کنیم، کامپوزیت‌هایی هستند که به عنوان مثال هم گرافیت دارند و هم سیلیکون کاربید به عنوان فاز تقویت کننده. وقتی هم سیلیکون کاربید و هم گرافیت دارد: گرافیت باعث می‌شود که K کم شود و گرافیت یک ماده‌ی خود روان کار است، گرافیت کنده می‌شود در تست سایش و روی سطح سایش قرار می‌گیرد و مثل یک ماده‌ی روان کار عمل می‌کند و به شدت ضریب اصطکاک را پایین می‌آید. سیلیکون کاربید، H را بالا می‌برد و به عبارتی سختی را بالا می‌برد. بنابراین با ساخت کامپوزیت هیبریدی، هم سختی را بردیم بالا و هم ضریب اصطکاک را کاهش دادیم. کامپوزیت هیبریدی هم سبک است در صورتی که دانسیته چدن بالا است و سه برابر کامپوزیت است. به عنوان مثال می‌خواهیم هواپیما بسازیم، درست است که چدن ضریب اصطکاکش پایین است و مقاومت به سایش خوبی دارد اما وزن آن سه برابر کامپوزیت آلومینیوم است. کامپوزیت آلومینیوم هیبریدی مشکل را حل می‌کند.

## خواص حرارتی

ضریب انبساط حرارتی را برحسب Specific Thermal Conductivity رسم کرده است: ضریب انبساط حرارتی پایین است و به عبارتی ضریب انبساط حرارتی کمی دارند.





## خوردگی

خوردگی کامپوزیت‌ها بد است. کامپوزیت‌ها نسبت به مواد خورنده، خوردگی‌اش بیش‌تر است. دو نوع خوردگی داریم:

۱- خوردگی در دمای اتاق

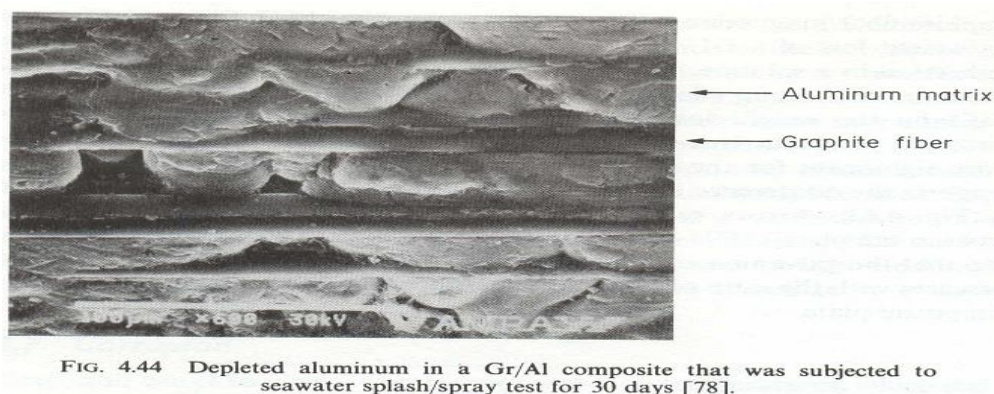
۲- خوردگی در دمای بالا

گازهای داغ، گازهای خورنده مثل CO<sub>2</sub> و ... خوردگی در دمای بالا دارد. خوردگی در دمای محیط را خوردگی تر می‌نامند. خوردگی تر تشکیل شده است از خوردگی گالوانیکی و حفره‌ای شدن.

خوردگی گالوانیک: مواد از لحاظ پتانسیل الکتروشیمیایی با هم متفاوت هستند. وقتی دو ماده‌ی غیرمتجانس داشته باشیم، یکی از آن‌ها پتانسیل الکتروشیمیایی‌اش از دیگری بیش‌تر است. آن‌که پتانسیل الکتروشیمیایی زیادتری دارد می‌شود آند و آن‌که پتانسیل الکتروشیمیایی‌اش کم‌تر است می‌شود کاتد. بنابراین یک پیل تشکیل می‌دهند که آند خورده می‌شود و کاتد محافظت می‌شود. جسم خودش، خودش را می‌خورد.

وقتی آلومینیوم + کاربید سیلیکون در محیط خورنده قرار می‌گیرد که الکترولیت آن می‌شود، آلومینیوم شروع می‌کند به خورده شدن و خورده می‌شود. در صورتی که اگر آلومینیوم را به صورت خالص داشته باشیم و در محیط خورنده می‌گذاشتیم هیچ

اتفاقی برایش نمی‌افتد. اگر بخواهد این بحث خوردگی پیش آید، اولاً باید pitting رخ بدهد یعنی سوراخ شود کامپوزیت، به عبارتی پوسته‌ی کامپوزیت سوراخ شود تا بتواند جسم خورنده وارد آن شود. در کامپوزیت ابتدا سوراخ ایجاد می‌شود و الکترولیت وارد می‌شود، در این صورت کاتد هست و آند هم هست پس شروع به خوردگی می‌کند. برای این که عیب خوردگی رفع شود باید به پوشش توجه کنیم. برای این که مقاومت به خوردگی کامپوزیت‌ها بالا رود، سطح کامپوزیت را با فلز خالص پوشش می‌دهند (یک فلز خالص روی سطح قرار می‌گیرد) تا مقاومت به خوردگی خوبی داشته باشد و سوراخ نشود و pitting رخ ندهد. در شکل زیر آلومینیوم + گرافیت را مشاهده می‌کنیم که در آب دریا به مدت سی روز قرار گرفته است در تست spray و آثار خوردگی pitting مشاهده می‌شود.



در نمودار زیر کاهش وزن را برحسب روز نشان داده است. مشاهده می‌شود که کامپوزیت خوردگی‌اش از آلیاژ بیش‌تر است. در محلول ۳/۵ درصد نمک طعام قرار گرفته و حالت دیگر در آب مقطر گذاشته است که مشاهده می‌شود کلاً خوردگی ماتریس از کامپوزیت بهتر است.

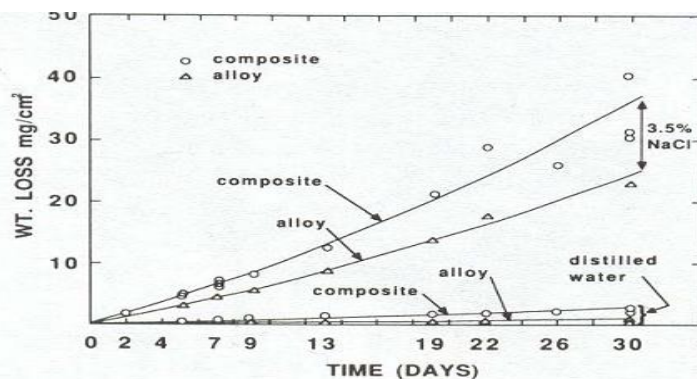


FIG. 4.42 The weight loss of the matrix (DU-0.75 Ti), fiber (W), and 50%  $V_f$  W/DU composite due to loose corrosion products in distilled water and 3.5% NaCl solutions [76].

## قیمت

قیمت کامپوزیت از سایر مواد بیش تر است. چرا با وجود قیمت بالا کمپانی‌های بزرگ دنیا به دنبال استفاده از کامپوزیت‌ها می‌روند:

بحث سبکی و استحکام است.

در اتومبیل: بحث بحران سوخت و آلودگی محیط زیست که پیش می‌آید که در حال حاضر ماشین‌ها را سبک می‌سازند و مصرف سوخت کاهش می‌یابد و مصرف کم می‌شود.

نکته‌ی بعدی کارخانه‌ایی دارید که هر سه ماه یک بار باید اورهال شود. باید کل دستگاه‌ها را خاموش کرد و کارگرها را به مرخصی فرستاد و دستگاه‌ها را تعمیر کرد. اگر از قطعات کامپوزیتی در دستگاه‌ها استفاده می‌شد به جای سه ماه یک بار، شش ماه یک بار اورهال انجام می‌شود. به تعداد روزهایی که کارخانه تعطیل شود کلی ضرر به همراه دارد. اگر یک روز توقف را کم کنیم و تعداد توقف تولید در کارخانه کاهش یابد، هزینه استفاده از کامپوزیت برمی‌گردد.

در بحث قیمت، در دراز مدت استفاده از کامپوزیت‌ها جبران می‌کند. با کاهش هزینه‌های جانبی، قیمت زیاد کامپوزیت جبران می‌شود.

اقتصاد هیچ گاه ریسک نمی‌کند، حاضر هستند که کامپوزیت استفاده کنند و در دراز مدت هزینه استفاده از کامپوزیت‌ها جبران می‌شود.

## کاربردها

در نمودار ذیل مقدار استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی را از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۴ نشان داده است. در صنایع حمل و نقل، هوافضا، مصارف حرارتی، ابزارهای صنعتی و ... از این کامپوزیت‌ها استفاده می‌کنند.



شکل ۱. مقدار استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی در کل دنیا در دو سال مختلف [۱۱].

صنایع حمل و نقل

صنایع هوافضا

دکل آنتن هدایت کننده امواج در تلسکوپ

شاتل‌های فضایی

صنعت اتومبیل: در پیستون اتومبیل از کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده کردند که خواص سایشی بهتر می‌شود، خواص دمای بالای خوبی دارند، عمر طولانی‌تر، کارایی بهتر و ... / شرکت‌های مثل تویوتا برای سیلندر از کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده کردند. / بلوک سیلندر را از کامپوزیت‌های زمینه فلزی ساختند، ماشین‌های قدیمی از چدن بود و در حال حاضر از آلومینیوم است اما آلومینیوم خواص مکانیکی خوبی ندارد و برای حل این مشکل از کامپوزیت‌ها استفاده کردند. / دیسک ترمز و کاسه چرخ ترمز را از کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم استفاده کردند که هم ضریب انتقال حرارت خوبی دارد و هم سبک است و در عین حال خواص سایشی خوبی هم دارد.

در صنعت انتقال نیرو: سیم‌های انتقال برق که از سیم‌هایی از جنس کامپوزیت مس استفاده کردند.

در صنعت حفاری: تجهیزات سرچاهی

در صنعت هواپیما سازی: سرعت بالا رفته و سبک می‌شود.

هنگامی که خواص سایشی مطرح باشد از کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده می‌کنند.

صنایع ورزشی

خرپاها که در مهندسی ساختمان استفاده می‌شود.

پلسه دوازدهم

مورخ: ۹۵/۱۰/۰۵

## کامپوزیت‌های زمینه‌سرامیکی

سرامیک‌ها شامل اکسیدهای تکی یا مخلوط می‌توانند باشند.

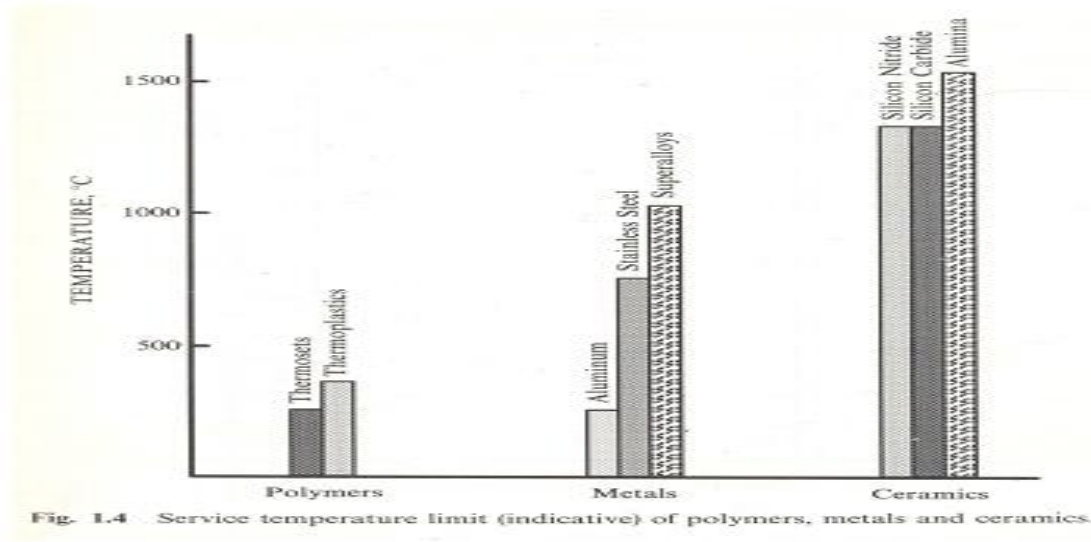
سرامیک‌های کاربیدی باشند یا نیتریدی و یا اینترمتالیک باشند و یا سرامیک‌های عنصری باشند. بنابراین این شش دسته سرامیک‌ها به صورت کلی تقسیم بندی می‌شوند.

سرامیک‌ها خواص مکانیکی خوبی دارند، خواص سایشی خوبی دارند و کلاً خواص دمای بالای خوبی دارند.

فرض کنید که بخواهیم به دمای سرویس دهی آن‌ها را مورد بررسی قرار دهیم همان طور که در شکل ذیل مشاهده می‌شود که پلیمرها بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، آلومینیوم که دمای سرویس دهی‌اش پایین است و فولاد زنگ نزن ۷۰۰ الی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد دمای سرویس دهی آن است و برای سوپر آلیاژها نیز تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

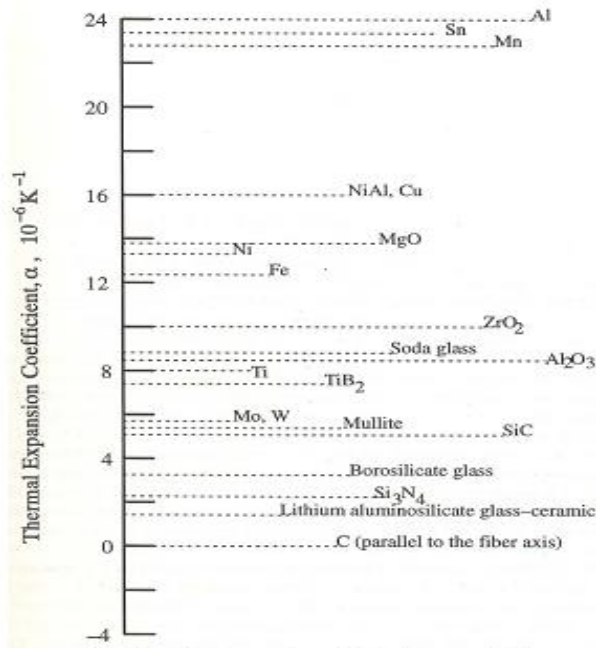
اما سرامیک‌ها از این جهت بهتر هستند و تا دمای ۱۳۰۰ الی ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌توانند سرویس دهی کنند که این یکی از مزیت‌های سرامیک‌ها است.

دانسیته‌ی سرامیک‌ها کم است و سبک هستند که مزیت‌های دیگر سرامیک‌ها محسوب می‌شوند. در مقایسه با آهن، مس و ... سرامیک‌ها سبک‌تر هستند.



خاصیت بعدی سرامیک‌ها این است که ضریب انبساط حرارتی آن‌ها کم است و ضریب انبساط حرارتی پایینی دارند. کربن ضریب انبساط حرارتی اش صفر و یا حتی منفی است. در صورتی که آلومینیوم، ۲۰ است و منگنر و قلع ضریب انبساط حرارتی‌شان بالا است و پایداری ابعادی ندارند.

اما سرامیک‌ها ضریب انبساط حرارتی‌شان پایین است.



اما مشکل سرامیک‌ها، ترد بودن و شکننده بودن آن‌ها است. اگر  $K_{IC}$  که معیاری از چقرمگی شکست است را در نظر بگیریم، سرامیک‌ها خواص بدی دارند. چقرمگی شکست آن‌ها بسیار پایین است بنابراین ترد و شکننده هستند.

**Table 1.2** Typical fracture toughness ( $K_{Ic}$ ) values for some materials

Material	$K_{Ic}, MPa m^{1/2}$
<b>Polymers</b>	
Polyethylene	1-2
Nylon	3
Epoxy, polyester	0.5
<b>Metals</b>	
Pure metals (copper, nickel, aluminum)	100-300
Aluminum alloys	20-50
Titanium alloys	50-100
Low carbon steel	50
Cast iron	4-10
<b>Ceramics</b>	
Sodalime glass	0.5-1
Magnesium oxide	3
Alumina	1-3
Silicon carbide	2-4
Silicon nitride	3-5

سرامیک‌ها توانایی آزاد کردن تمرکز تنش را در نوک ترک ندارند، وقتی ترک ایجاد می‌شود چون تغییر شکل پلاستیک نمی‌توانند بدهند در نوک ترک، تمرکز تنش حفظ می‌شود و ترک ادامه پیدا می‌کند تا قطعه از بین برود. در صورتی که در فلز تغییر شکل پلاستیک می‌دهد و تنش آزاد می‌شود.

عیب دیگر سرامیک‌ها این است که روش تولید آن‌ها پیچیده و گران قیمت است و نمی‌توان آن‌ها را تعمیر کرد. وقتی یک قطعه‌ی فلزی سوراخ شود، جوش می‌دهیم و سنگ می‌زنیم و دوباره از آن استفاده می‌کنند اما اگر سرامیک ترک بخورد و بشکند نمی‌توان کاری روی آن انجام داد و سرامیک را تعمیر کرد.

در جدول ذیل خواص فیزیکی و شیمیایی سرامیک‌ها نشان داده شده است و بایکدیگر مقایسه شده است.



**Table 2.2** Physical and mechanical characteristics of some ceramic materials

	Density, $\rho$ ( $g\ cm^{-3}$ )	Melting point ( $^{\circ}C$ )	Young's modulus $E$ (GPa)	Coefficient of thermal expansion, $\alpha$ ( $10^{-6}\ K^{-1}$ )	Fracture toughness $K_{Ic}$ ( $MPa\ m^{1/2}$ )
$Al_2O_3$	3.9	2050	380	7-8	1-3
SiC	3.2	-	420	4.5	2.2-3.4
$Si_3N_4$	3.1	-	310	3.1	2.5-3.5
MgO	3.6	2850	210	3.6	-
Mullite	3.2	1850	140	5.3	3.0-4.0
Borosilicate glass	2.3	-	60-70	3.5	0.5-2
Soda-lime glass	2.5	-	60-70	8.9	0.5-1

مزایای کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی در مقایسه با مواد مونوتکتیک:

به‌وسیله‌ی تقویت کننده می‌توان خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی به خصوص چقرمگی شکست آن‌ها را بهبود بخشیم که هدف ما از ساخت کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی همین است. مثال: اپوکسی چقرمگی شکست‌اش ۳ است و آلیاژ آلومینیوم ۳۵ است و سیلیکون کاربید ۳ است.

کامپوزیت آلومینا- سیلیکون کاربید چقرمگی شکست ۲۷ است و کامپوزیت سیلیکون کاربید - سیلیکون کاربید چقرمگی شکست ۳۰ می‌شود و مشاهده می‌شود که با کامپوزیت‌سازی به خوبی می‌توان چقرمگی شکست را افزایش داد.

**TABLE 1.12**  
Typical Fracture Toughness of Monolithic Materials and Ceramic Matrix Composites

Material	Fracture toughness	
	( $MPa\ \sqrt{m}$ )	( $ksi\ \sqrt{in.}$ )
Epoxy	3	2.73
Aluminum alloys	35	31.85
Silicon carbide	3	2.73
$SiC/Al_2O_3$	27	24.6
$SiC/SiC$	30	27.3

روش تولید کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی به دو دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند:

۱- روش‌های سنتی

۲- روش‌های جدید

روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه‌سرامیکی از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری و فلزی پیچیده‌تر است.

در تولید کامپوزیت‌های زمینه‌سرامیکی چه چیز می‌خواهیم:

۱- توزیع یکنواخت فاز تقویت‌کننده در ماتریس و از خوشه‌ای شدن باید جلوگیری کرد. باید توزیع یکنواخت باشد.

۲- مشکل فرم‌دهی دارد. فلز را ذوب می‌کنیم و پلیمر را نیز ذوب می‌کنیم اما سرامیک را نمی‌توان ذوب کرد بنابراین مشکل فرم‌دهی دارد.

۳- مشکل سینتر کردن داریم، وقتی دو ماده را با هم سینتر می‌کنیم، در ابتدا پودر می‌کنیم و با هم مخلوط می‌کنیم و سینتر می‌کنیم. سرامیک‌ها وقتی ضریب انبساط حرارتی‌شان با هم متفاوت باشد، یکی‌شان می‌خواهد جمع شود و دیگری نمی‌خواهد جمع شود، بنابراین ترک می‌خورد و سینتر کردن آن‌ها مشکل است.

روش‌های سنتی:

ساده‌ترین روش همان روشی است که در کوزه‌گری و آجر پزی استفاده می‌کنند. پودر سرامیک را می‌آورند و با تقویت‌کننده‌اش مخلوط می‌کنند و یک دوغاب می‌سازند و این دوغاب را در قالب می‌ریزند، خشک می‌کنند. دوغاب سرامیک: زمینه با تقویت‌کننده + آب را مثلاً ایجاد می‌کنند. خمیر است. شکل دهی می‌کنند و خشک می‌کنند (پخت) و در انتها قطعه ساخته می‌شود.

پرس سرد: روش دیگر پرس سرد است که در این روش مخلوط سرامیک و فاز تقویت‌کننده را پرس می‌کنند (به جای این که دوغاب درست کنند) و بعد سینتر می‌کنند.

پرس داغ: یک روش دیگر پرس داغ است که عین حال که فشار اعمال می‌کنیم، گرمش نیز می‌کنیم. پرس داغ انجام می‌شود و هم سینتر می‌شود.

همان‌طور که در ذیل نیز مشاهده می‌شود پرس داغ را داریم که ویسکرها‌های سیلیکون کاربید را با پودر  $Si_3N_4$  مخلوط کرده است و مخلوط سازی انجام شده است. در قالب تزریق کرده است. چسب آن را در دمای  $400^\circ C$  درجه سانتی‌گراد از بین برده است و پرس داغ کرده است. که بوسیله‌ی پرس داغ قطعه‌ی سرامیکی را تولید کرده است.

در این روش اگر از ویسکر استفاده کنیم، مشکل این است که امکان دارد خوشه ایجاد گردد و مشکل ساز شود. (در دوغاب مشکل ساز می‌شود.) با تنظیم PH دوغاب می‌توان این مورد را کنترل کرد و از خوشه‌ای شدن جلوگیری به عمل آید.

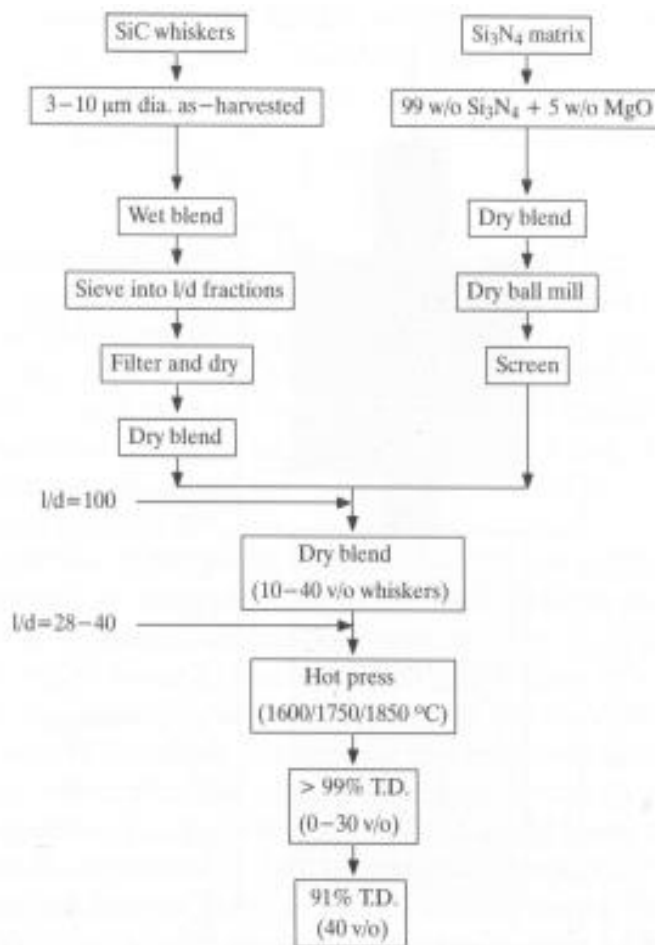
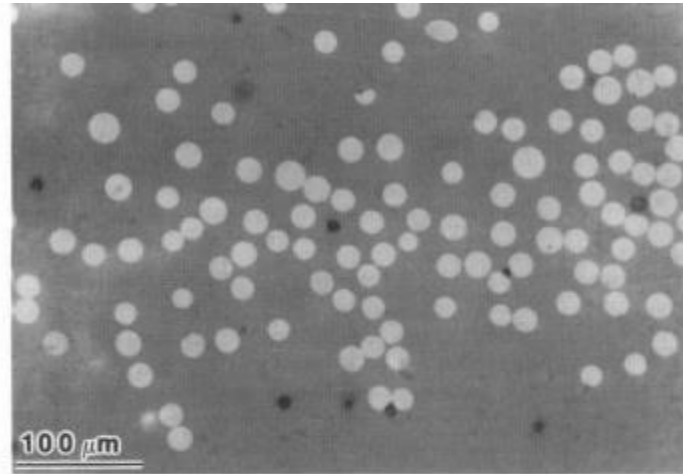


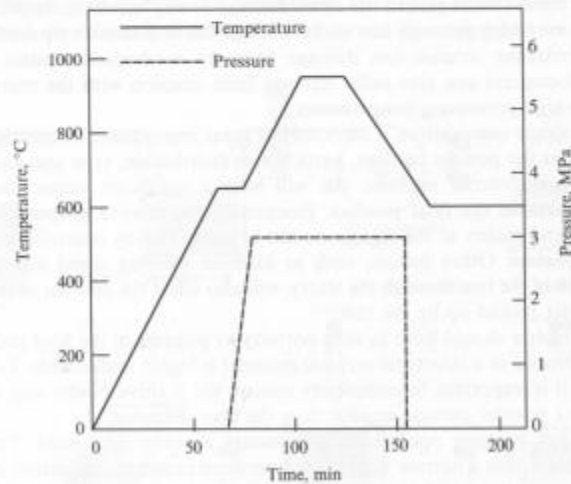
Fig. 4.5 Flow diagram of fabrication of  $\text{SiC}_w/\text{Si}_3\text{N}_4$  composite by hot pressing and dry processing (after [23]).

مثال دیگر از infiltration که الیاف از داخل یک تانکی عبور می‌کند. پودر شیشه و چسب است، الیاف به پودر شیشه و چسب آغشته می‌شود. در حقیقت به شکل ورق تولید می‌شود. دما ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است. فشار را اعمال می‌کنند و کامپوزیت ایجاد می‌کنند. الیاف از داخل دوغاب شیشه و چسب عبور کرده و کامپوزیت ایجاد کرده است.

مثال دیگر در شکل زیر کامپوزیت آلومینا را مشاهده می‌کنیم در زمینه‌ی شیشه‌ای که دو تا سیکل نشان داده شده است یک سیکل فشار و دیگری دما. دما را تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد برده است و بعد سرد کردند. فشار را زیاد کردند تا ۳ مگاپاسکال و بعد قطع کرده است. به این ترتیب کامپوزیت تولید شده است.



(a)



(b)

Fig. 4.2 (a) An optical micrograph of a cross-section of a unidirectional alumina fiber/glass matrix composite made by slurry infiltration; (b) the pressure and temperature schedule used during hot pressing of this composite.

روش reaction bounding (روش اتصال واکنشی) به این ترتیب است که در این روش ابتدا یک پارچه‌ای از الیاف و چسب می‌سازند و از طرف دیگر پارچه یا خمیری از پودر فلز درست می‌کنند مثلاً از سیلیسیم. این پارچه سیلیسیم به همراه چسب

است. حالا یک پارچه سیلیکون کاربید + چسب و یک پارچه سیلیسیم + چسب دارد. یکی یکی روی هم می‌چینند و بعد حرارت می‌دهند تا چسب بسوزد. بعد پرس داغ می‌کنند. هنوز سیلیسیم سرامیکی نشده‌اند. ازت را می‌دمیم که وقتی دمیده می‌شود، سیلیسیم به نیتريد سیلیسیم تبدیل می‌شود و حال کامپوزیت سیلیکون کاربید +  $Si_3N_4$  تشکیل می‌شود که یک کامپوزیت زمینه سرامیکی است.

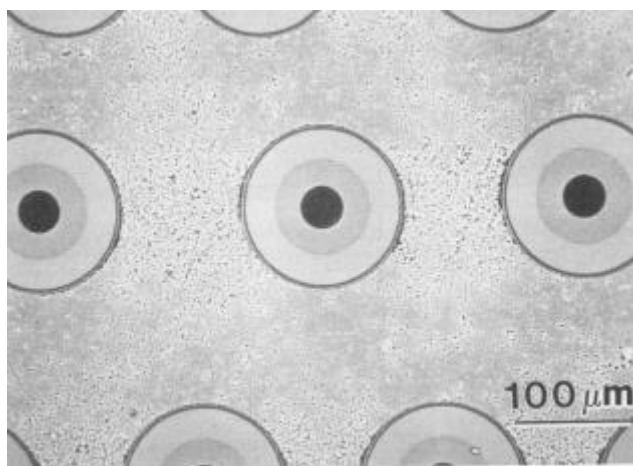
مزایای روش اتصال واکنشی:

۱- تخلخل آن خیلی کم است یا اصلاً ندارد. (چون پرس کردیم).

۲- کسر فاز دوم می‌تواند خیلی زیاد باشد.

۳- این روش دمایش خیلی کم‌تر از سینترینگ است، بنابراین الیاف صدمه نمی‌بینند. اگر از اول به جای پودر سیلیسیم، پودر  $Si_3N_4$  بگذاریم دمای سینترینگ بالا می‌رفت اما در این روش از پودر سیلیسیم استفاده کردیم و بعد پرس گرم کردیم و بعد ازت دمیدیم، بنابراین دما پایین می‌آید.

تنها عیب این روش این است که تخلخلش زیاد است. چرا: برای این که از ابتدا مجبور هستیم کمی تخلخل ایجاد کنیم تا گاز بتواند داخل آن وارد شود و بعد گاز بتواند خارج شود. بنابراین کامپوزیت تخلخل دارد. در شکل زیر تصویری را مشاهده می‌کنیم که از این روش تولید شده است.



روش‌های جدید:

- **Infiltration**
- **Directed oxidation or the Lanxide process**
- **In-situ chemical reaction techniques (CVD & CVI)**
- **Sol-Gel and polymer pyrolysis**

روش این infiltratin: عین روشی است که در رابطه‌اش در فصل چهارم (کامپوزیت‌های زمینه فلزی) توضیح داده شد، اما در این جا سرامیک رسوب می‌کند. سرامیک را ذوب می‌کنند، preform قرار می‌دهند که سرامیکی است. مذاب را به داخل preform تزریق می‌کنند و به این ترتیب کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی تولید می‌شود. مزایا و معایب این روش:

مزایا:

- ۱- ماتریس آن در یک مرحله ایجاد می‌شود.
- ۲- ماتریس یکنواخت ایجاد می‌شود.
- ۳- با دانسیته‌ی بالا و تخلخل می‌توان کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی را تولید کرد.
- ۴- از انواع هندسه‌ی فاز دوم می‌توان استفاده کرد.

معایب:

- ۱- به خاطر دمای بالای ذوب سرامیک‌ها، کار با دماهای بالا سخت است. واکنش‌های مخرب امکان دارد ایجاد شود. (آلومینا را بخوایم ذوب کنیم، خودش دیرگداز است. ویسکوزیته‌ی آن بالا است و وقتی ذوب می‌شود، خمیر است. دما را باید خیلی بالا ببریم تا سیالیت ایجاد گردد و روش infiltration را بتوان انجام داد. / کار ساده‌ایی نیست و کار عاقلانه‌ای هم نیست.)
- ۲- چون دما بالا است، واکنش مخرب هم داریم.
- ۳- چون دما بالا است، shrinkage و ترک ایجاد خواهد شد.

۴- ویسکوزیته بالا است.

۵- عدم ترشوندگی فازها.

می‌توانیم روش infiltration را اصلاح گردد و به جای این که سرامیک را infiltration کنیم، قیر را infiltration کنیم. Preform الیاف کربن را داخل محفظه می‌گذاریم، و روی آن قیر می‌ریزیم. قیر داخل آن می‌رود، تحت فشار قرار می‌دهیم تا فشرده شود، بعد تحت عملیات حرارتی قیر را تبدیل به کربن می‌کنیم. در نهایت می‌شود کامپوزیت کربن - کربن. قیر تبدیل می‌شود به کربن و الیاف کربن هم بود، می‌شود کامپوزیت کربن - کربن که این کار توسط روش انجام می‌شود. (به جای پرس، HIP انجام شده است.)

یک روش دیگر، روش اکسیداسیون مستقیم است. در این روش Preform را در سطح فلز مذاب قرار می‌دهیم. فلز تحت نیروهای موئینگی داخل Preform می‌رود و بالا می‌رود. وقتی فلز بالا رفت به آن گاز می‌دمند و گاز اکسید کننده می‌دمیم و فلز را اکسید می‌کنیم. Preform داشتیم که سرامیک بود و فلز را هم تبدیل به اکسید کردیم و سرامیک می‌شود، در نهایت کامپوزیت زمینه‌ی سرامیکی داریم.

الیاف Sic داریم و فلز آلومینیوم داریم، اکسیژن روی مذاب فلز می‌دمیم و  $AL_2O_3$  می‌دهد و در نهایت کامپوزیت Sic- $AL_2O_3$  ایجاد می‌گردد.

حسن این روش این است که به جای این که سرامیک را ذوب کنیم، فلز را ذوب می‌کنیم و وقتی فلز داخل Preform رفت آن موقع با دمیدن گاز آن را سرامیکی می‌کنیم.

مزایای روش اکسیداسیون مستقیم:

۱- قیمت کم است.

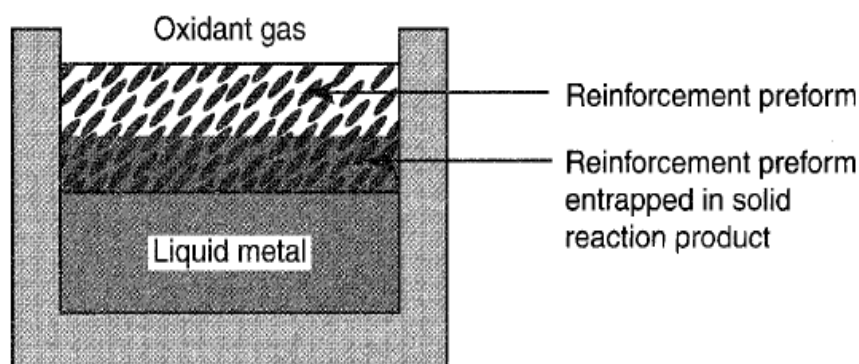
۲- قطعات نزدیک به شکل نهایی را می‌دهد.

۳- خواص مکانیکی خوب است مخصوصاً تافنس و استحکام. بدلیل این که فلز باقیمانده دارد، همه‌ی فلز تبدیل به سرامیک نمی‌شود و همین باعث می‌شود که خواص مکانیکی اش خوب باشد.

عیب روش اکسیداسیون مستقیم:

- ۱- کنترل روش برای این که فلز باقیمانده در حد مطلوب باشد، سخت است. (کنترل فلز باقیمانده به راحتی نمی‌باشد).
- ۲- این روش را برای قطعات بزرگ و پیچیده نمی‌توان به کار برد.
- ۳- خواص دمایی بالای آن خوب نیست. به خاطر این که فلز باقیمانده دارد، در دمایی بالا فلز ذوب می‌شود بنابراین خواص دمایی بالای آن خوب نیست.

در تصویر زیر این روش را مشاهده می‌کنیم که Preform را می‌سازیم و فلز وارد شده است و گاز را دمیده است و فلز تبدیل به اکسید شده است.



روش دیگر روش CVI:

برای الیاف بور از روش CVD به کار می‌رفت. این روش CVI هم مانند روش CVD است اما به جای Deposition، infiltration صورت می‌گیرد. یک Preform سرامیکی در نظر بگیرید و گاز واکنش دهنده را داخل Preform می‌دمیم. به عنوان مثال سیلیکون کاربید داخل خلل و فرج‌ها قرار می‌گیرد و کامپوزیت زمینه سرامیکی تشکیل می‌شود.



بنابراین به وسیله‌ی دمش گاز  $\text{CH}_3\text{Cl}_3\text{Si}$  داخل و واکنشی که در بالا داریم، تجزیه می‌شود و سیلیکون کاربید در داخل Preform می‌ماند و بقیه از آن خارج می‌گردد و کامپوزیت زمینه سرامیکی تشکیل می‌شود.



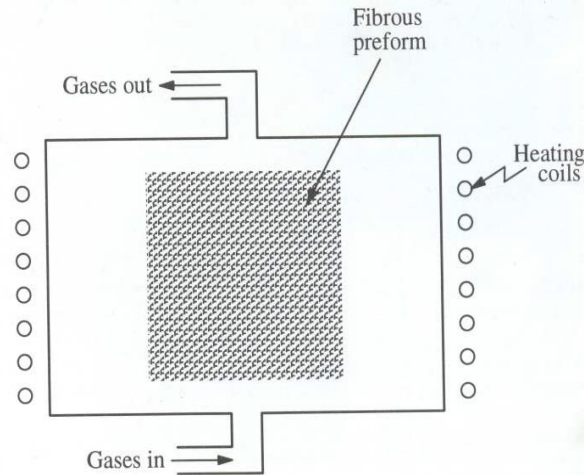


Fig. 4.13 An isothermal chemical vapor impregnation (ICVI) reactor in its simple form.

این روش را روش ایزوترم است، دمای در تمام رکتور یکسان است و گازی که تبدیل به SiC می‌شود، پوسته می‌بندد بنابراین باید یک بار ماشین کاری کنند تا سوراخ‌هایش باز شود.

روش دیگر هست به نام ICVI است که در حقیقت در این روش تحت گرادیان حرارتی قرار می‌گیرد یعنی یک طرف آن گرم است و یک طرف دیگر آن سرد است. گاز وقتی وارد می‌شود در منطقه‌ی سرد عمل نمی‌کند، بالا می‌رود و وقتی به منطقه‌ی گرم رسید عمل می‌کند بنابراین خلل و فرجش بسته نمی‌شود و مشکل بسته شدن سوراخ‌ها در این روش وجود ندارد.

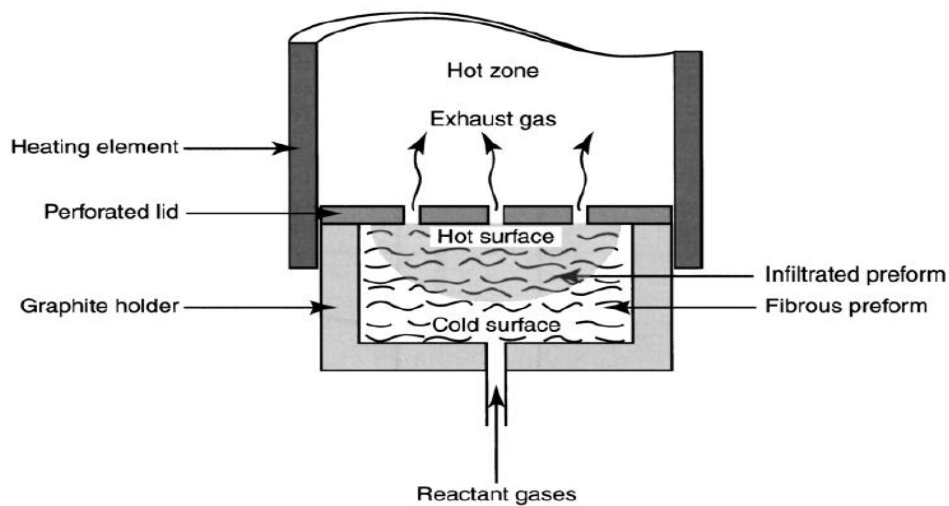
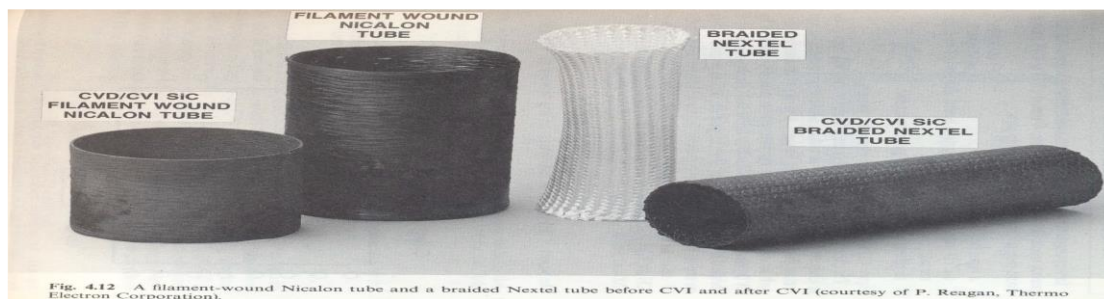


Fig. 14.8 Forced flow thermal gradient method for CVD processing<sup>20</sup>.

در شکل بالا cold surface و hot surface را مشاهده می‌کنیم که وقتی گاز بالا می‌رود، در منطقه‌ی سرد عمل نمی‌کند و در منطقه‌ی گرم شروع به واکنش می‌کند. دیگر نیازی به ماشین کاری نیست. قطعات ذیل قطعانی است که به روش CVI تولید شده است.



Nicalon: الیاف پلیمری است.

Nextel: الیاف آلومینا است.

در جدول ذیل ماتریس و انواع گازهایی که برای ماتریس وجود دارد و دمایی که واکنش می‌دهند مشخص است. گاز را به داخل preform می‌فرستند و کامپوزیت تشکیل می‌شود. (preform متخلخل و از جنس سرامیک است که گاز را به داخل آن می‌فرستند و واکنش انجام می‌شود و ماتریس تشکیل می‌شود و در نهایت کامپوزیت بوجود می‌آید).

**Table 14.7** Ceramic materials formed by CVI processes<sup>21</sup>

Matrix ceramic	Reactant gases	Reaction temperature (°C)
TiC	TiCl <sub>4</sub> -CH <sub>4</sub> -H <sub>2</sub>	900-1000
SiC	CH <sub>3</sub> SiCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub>	1000-1400
B <sub>4</sub> C	BCl <sub>3</sub> -CH <sub>4</sub> -H <sub>2</sub>	1200-1400
TiN	TiCl <sub>4</sub> -N <sub>2</sub> -H <sub>2</sub>	900-1000
Si <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	SiCl <sub>4</sub> -NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub>	1000-1400
BN	BCl <sub>3</sub> -NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub>	1000-1400
AlN	AlCl <sub>3</sub> -NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub>	800-1200
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub> -CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub>	900-1100
SiO <sub>2</sub>	SiH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub>	200-600
TiO <sub>2</sub>	TiCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	800-1000
ZrO <sub>2</sub>	ZrCl <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub>	900-1200
TiB <sub>2</sub>	TiCl <sub>4</sub> -BCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub>	800-1000
WB	WCl <sub>6</sub> -BBr <sub>3</sub> -H <sub>2</sub>	1400-1600

مزایای این روش:

یک روش دمای پایین است و مشکلات دمایی بالا را در این روش نداریم.

قطعات بزرگ را می‌توان تولید کرد.

Flexibility دارد و در انتخاب الیاف و ماتریس (اکسیدی و غیر اکسیدی) انعطاف پذیر است.

عیب این روش:

این روش، روش کندی است به دلیل این که گاز باید وارد شود و بعد ماتریس تشکیل شود واکنش انجام شود و محصول آن

خارج شود. (روش کندی است، امکان دارد حتی چندین روز هم طول بکشد تا واکنش انجام شود.)

روش گرانی است.

روش دیگر روش sol-gel:

یکی از روش‌های تولید کامپوزیت‌های سرامیکی است. یک ماده‌ای به نام sol فرموله می‌کنیم و این sol، عناصر اصلی

سرامیک را دارد. الیاف به این sol آغشته می‌شود و دور بایندر می‌پیچد و بعد تبدیل به gel می‌شود. حرارت می‌دهیم، سفت

می‌شود و تبدیل به gel می‌شود.

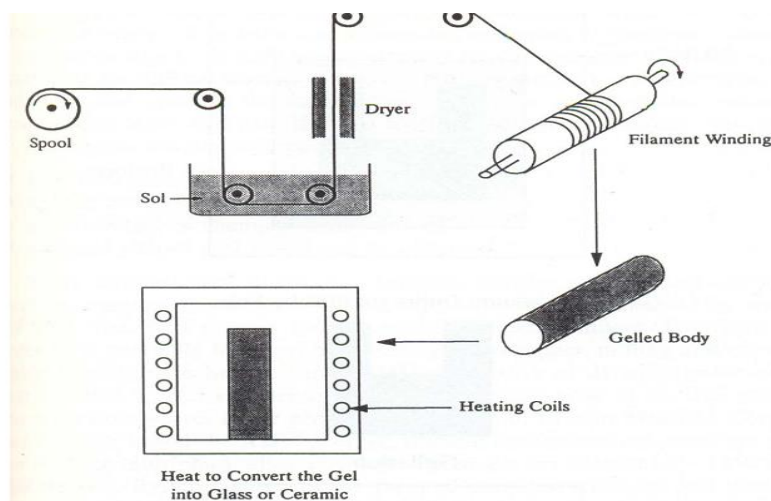
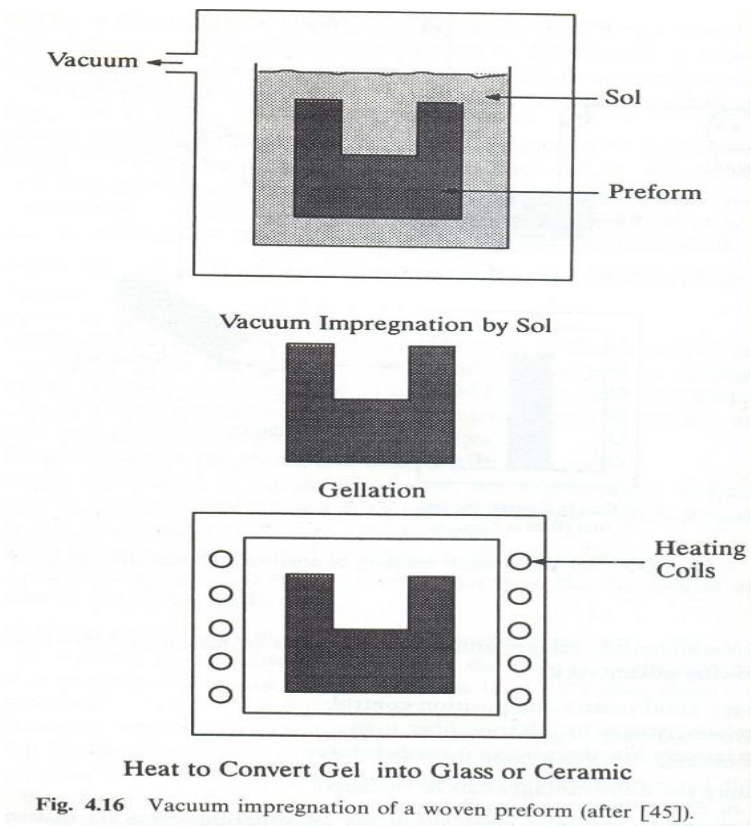


Fig. 4.15 Sol-gel filament winding of a woven preform (after [45]).

الیاف Sol-Gel را برای کامپوزیت کربن-کربن نشان داده است. ماده‌ی پلیمری که کربن دارد را به نام SOL، را تزریق می‌کنیم و SOL تبدیل به gel می‌شود. حرارت می‌دهیم تا به شیشه و سرامیک تبدیل شود. (ماده‌ی اولیه SOL است بعد به تبدیل به Gel می‌شود و در نهایت سرامیک می‌شود.)



مزایای روش sol-gel:

ترکیب شیمیایی

کنترل ماتریس ساده است.

Infiltration آن ساده است.

تبدیل gel به سرامیک دمای پایینی می‌خواهد.

معایب روش sol-gel:

بازیابی آن کم است.

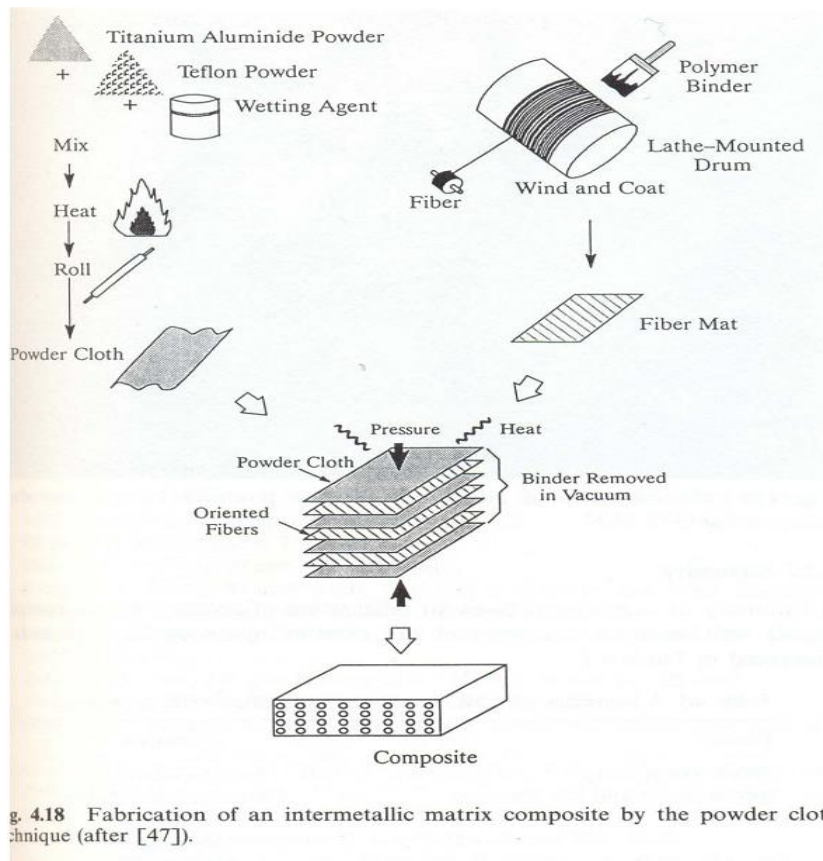
Shrinkage آن خیلی زیاد است و دور ریز زیاد است و ترک می‌خورد.

چندبار باید تبدیل gel به سرامیک انجام شود و infiltration انجام شود. چند بار باید تزریق انجام شود تا کاملاً پر شود.

روش پودر پارچه:

به این ترتیب است که پودر Titanium Aluminide را داریم که یک پودر سرامیکی است با پودر تفلون مخلوط می‌کنیم، حرارت می‌دهیم به شکل خمیر می‌آید. خمیر را وردنه، به شکل یک ورق در می‌آورند. ورقی داریم که از خمیر پودر سرامیکی است. الیاف را دور بایندر می‌پیچیم و با پلیمر مخلوط می‌کنیم. به شکل یک ورق پلیمری در می‌آید که داخلش الیاف است. حال ورق پلیمری و ورق پودری داریم و آن‌ها را یکی در میان روی هم می‌گذاریم. بعد پرس می‌شود و تحت حرارت قرار

به کامپوزیت



می‌گیرند و تبدیل

می‌شوند.

g. 4.18 Fabrication of an intermetallic matrix composite by the powder cloth technique (after [47]).

## روش explosive shock compaction

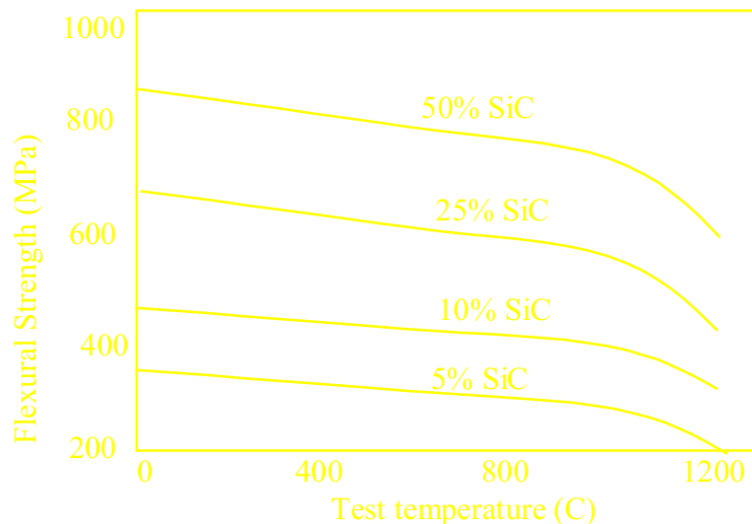
دو پودر سرامیکی را با هم مخلوط می‌کنیم، در معرض انجماد قرار می‌گیرد و کامپوزیت را تولید می‌کنند.

سیستم‌های خاص:

سیستم‌های خاصی داریم که در ذیل انواع آن‌ها را مشاهده می‌کنیم.

- **Glass - Ceramic**
  - SiC in Lithium alumino silicate (LAS) glass (<1200C)
  - C fibres in glass ceramic; oxidation above 400C, OK in inert atmosphere
- **Ceramic-ceramic**
  - SiC-SiC, Carbon-Carbon ( like-like composites)
  - C-SiC
  - Alumina-SiC

در تصویر ذیل کامپوزیتی داریم که آلومینا است و داخل آن ویسکرهاهای سیلیکون کاربرد دارند، اگر در دو حالت ۵ درصد و ۵۰ درصد سیلیکون کاربرد بررسی کنیم؛ هرچه قدر دما بالا برود، استحکام پایین می‌آید. حتی تا دمای ۱۲۰۰ درجه می‌توان آن‌ها را حفظ کرد. هرچه درصد سیلیکون کاربرد بالاتر می‌رود، تحمل دمایی و خواص مکانیکی‌اش بهتر می‌شود.



در جدول زیر کامپوزیت کربن-کربن با فولاد و آلومینیوم مقایسه شده است.

**TABLE 1.14**  
Typical Mechanical Properties of Carbon-Carbon Matrix Composites

Property	Units	C-C	Steel	Aluminum
Specific gravity	—	1.68	7.8	2.6
Young's modulus	GPa	13.5	206.8	68.95
Ultimate strength	MPa	35.7	648.1	234.4
Coefficient of thermal expansion	$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	2.0	11.7	23

کامپوزیت کربن - کربن یکی از معرف‌ترین کامپوزیت‌های زمینه‌ی سرامیکی است که خواص خوبی دارد. نسبت وزن به استحکام آن خوب است. مشکل آن اکسید شدن کربن است. کربن بالای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌سوزد و اکسید می‌شود. بنابراین راه حل آن این است که یک پوشش بدهیم روی آن که جلوی نفوذ اکسیژن را بگیریم با بور یا سیلیسیم یا Zr یا با شیشه آن کامپوزیت را پوشش می‌دهیم تا با اکسیژن در تماس نباشد و نسوزد. کاربرد آن در صنایع هوافضا و دیسک ترمز است.

راه‌های تولید: یکی از روش‌های تولید آن روش liquid phase impregnation است. درصد بازایی کمی دارد. به جای قیر از رزین فنولیک استفاده می‌کنند که اگر از قیر استفاده شود، درصد تخلخل آن زیاد می‌شود.

تولید الیاف کربن - کربن معمولاً الیاف بافته شده است و می‌توان از روش CVI/CVD نیز باشد که گاز متان را می‌دمند و گاز متان تجزیه می‌شود و کربن ماتریس را تولید می‌کند. مشکل Blocking دارد که اگر از روش FSDA استفاده شود این مشکل را ندارد.

### مکانیزم‌های مقاوم شدن

در مورد فلزات مکانیزم‌های مقاوم شدن، استحکام است.

در مورد کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی، مکانیزم چقرمه شدن را داریم. چگونه کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی را چقرمه کنیم: یکی از مکانیزم‌ها، مکانیزم Load Transfer است که مخصوص کامپوزیت‌های الیافی است. باید مدول یانگ الیاف بزرگ‌تر

از دو برابر مدول یانگ ماتریس باشد، که در این صورت مکانیزم Load Transfer عمل می‌کند. بنابراین هم کامپوزیت باید الیافی باشد و هم مدول یانگ الیاف بزرگ‌تر از دو برابر مدول یانگ ماتریس باشد. برای کامپوزیت‌های کربن-کربن و -SiC sic که کامپوزیت‌های like-like هستند این مکانیزم کاربرد دارد.

یکی دیگر از مکانیزم‌ها، مکانیزم Pre-stressing است که اگر در نظر بگیریم تفاوت بین ضریب انبساط حرارتی ماتریس و فاز دوم باعث ایجاد تنش می‌شود. این تنش یک تنش فشاری در ماتریس است. نوک ترک را می‌بندد. اگر یک کامپوزیت داشته باشیم که ضریب انبساط حرارتی الیاف با ماتریس فرق داشته باشد و ضریب انبساط حرارتی ماتریس بزرگ‌تر از ضریب انبساط حرارتی الیاف باشد (برعکس کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی است که معمولاً ضریب انبساط حرارتی الیاف زیاد است مثل کامپوزیت آلومینیوم + سیلیکون کاربید که ضریب انبساط حرارتی سیلیکون کاربید ۷ برابر آلومینیوم است. که در کامپوزیت‌های زمینه‌ی سرامیکی برعکس است و ضریب انبساط حرارتی ماتریس بزرگ‌تر از ضریب انبساط حرارتی الیاف است) و اگر بخواهیم مکانیزم pre-stressing عمل کند حتماً باید ضریب انبساط حرارتی ماتریس بزرگ‌تر از ضریب انبساط حرارتی الیاف باشد. وقتی از دمای فرآیند (بالا) می‌آید و به دمای پایین می‌رسد ماتریس می‌خواهد جمع شود و الیاف نمی‌خواهد جمع شود بنابراین یک تنش فشاری ایجاد می‌شود. فرض کنید ترک ایجاد شده است، نوک ترک در فشار است و جلوی رشد ترک را می‌گیرد.

یکی دیگر از مکانیزم‌های دیگر micro-cracking است (ترک‌های میکرونی)، که کاری می‌کنیم که عمداً در کامپوزیت ترک ایجاد شود (برعکس چیزهایی است که در کامپوزیت‌های فلزی که گفتیم کاری می‌کنیم که تخریب کم شود، اما در سرامیک‌ها برعکس است) و اگر عمده‌ی داخل آن سرامیک ترک ایجاد شود این ترک‌های جلوی رشد ترک را می‌گیرد. مثل شیشه اتومبیل که وقتی می‌شکست با دریل روی آن یک سوراخ ایجاد می‌کردند و جلوی رشد ترک را می‌گرفتند. کامپوزیت را پر ترک می‌کنیم که در حد میکرونی خودمان ایجاد کردیم، ترک اصلی که می‌خواهد رشد کند می‌خورد به این ترک‌های میکرونی و جلوی رشد آن گرفته می‌شود. بنابراین ترک‌ها را عمده‌ی ایجاد کردیم و جلوی رشد ترک اصلی را گرفتیم که این مکانیزم را micro-cracking می‌گویند.



مکانیزم بعدی مکانیزم phase transformation است: بعضی از فازها مثل Zr که وقتی استحاله می‌کنند و از یک فاز به فاز دیگر می‌روند، حجم‌شان زیاد می‌شود پس بنابراین وقتی فاز تقویت کننده حجمش زیاد شد، تنش ایجاد می‌کند و جلوی رشد ترک را می‌گیرد.

یکی دیگر از مکانیزم‌ها، مکانیزم تغییر مسیر ترک است: اگر فصل مشترک ضعیف باشد وقتی ترک می‌خواهد رشد کند، تمایل دارد روی دیواره رشد کند و پراکنده می‌شود و چند شاخه می‌شود و از بین می‌رود. هدف این است که در تمام مکانیزم‌ها جلوی رشد ترک را بگیریم. (توقف و تغییر مسیر ترک به وسیله فصل مشترک ضعیف بین ماتریس و تقویت کننده ایجاد می‌شود. و در حقیقت مسیر ترک را عوض می‌کند.)

مکانیزم بعدی مکانیزم Fiber Pull-Out است: اگر الیاف از سر جایشان کنده شوند و الیافی که داریم در ماتریس قوی نباشند، وقتی ضربه و نیرو به الیاف می‌رسد، الیاف از سرجایش کشیده می‌شود بیرون. وقتی لیف از سرجایش کشیده شود بیرون، انرژی را جذب می‌کند. (جلوی رشد ترک را می‌گیرد و دیگر قطعه نمی‌شکند.)

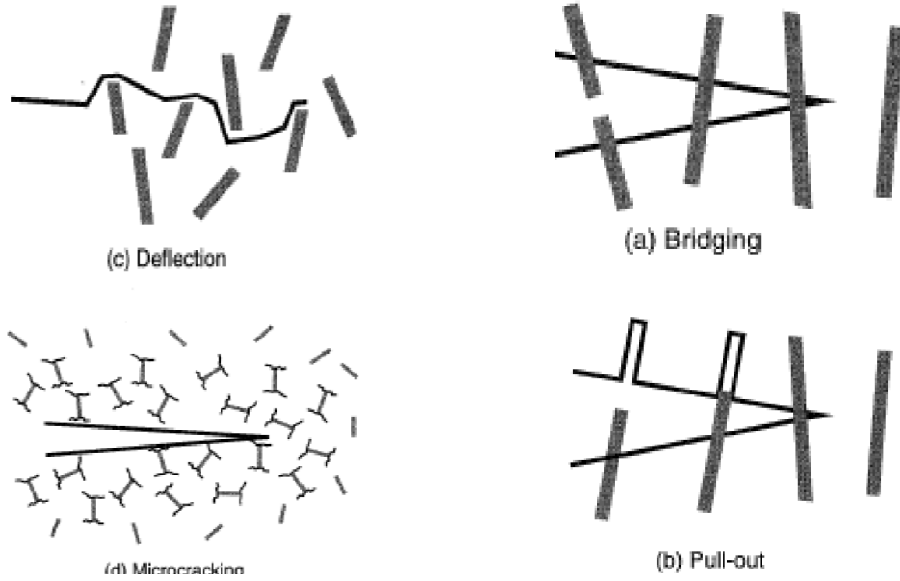
مثال: ماشین‌های قدیمی بنز بدنه‌ی خیلی محکمی داشتند و وقتی تصادف می‌شد بدنه ماشین هیچ اتفاقی برایش نمی‌افتاد چون جذب انرژی نداشتند.

اما در حال حاضر ماشین‌ها مکانیزم‌های جذب انرژی را دارند.

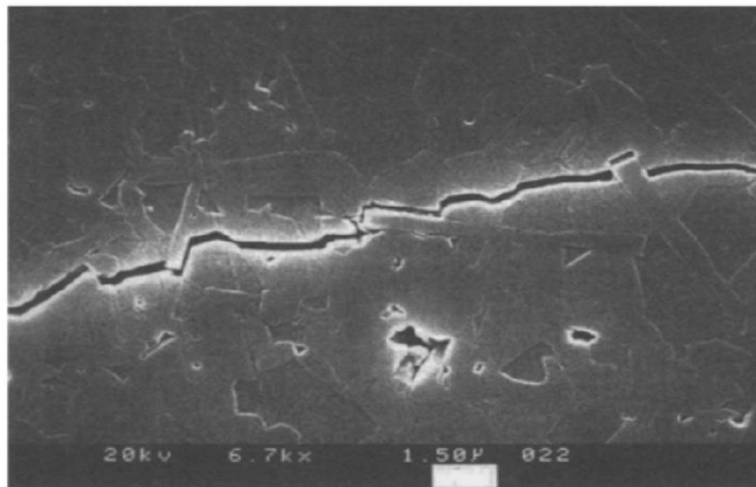
در کامپوزیت‌ها نیز به دنبال این هستیم که جذب انرژی را داشته باشیم که انرژی ترک به نحوی جذب شود. وقتی لیف بیرون کشیده می‌شود، فصل مشترک ضعیف است.

این مکانیزم نیز فصل مشترک ضعیف می‌خواهد.

مکانیزم دیگر، مکانیزم crack Bridging است که الیاف می‌توانند دو طرف ترک را به هم بدوزند. ترکی که می‌خواهد رشد کند لیف دو طرف ترک را بهم می‌دوزد و نمی‌گذارند نوک ترک باز شود و جلوی رشد ترک گرفته می‌شود. در شکل‌های ذیل انواع مکانیزم‌ها را مشاهده می‌کنیم.



در تصویر زیر ویسکر سیلیکون کاربید در ماتریس  $Al_2O_3$  قرار گرفته است، مکانیزم کدام است: تغییر مسیر حرکت ترک است و یکی هم مکانیزم PULL-OUT است چون سیلیکون کاربید از سرجایش بیرون آمده است.



**Fig. 14.15** SEM photograph of fracture path in SiC whisker- $Al_2O_3$  composite.

در جدول زیر مکانیزم‌های اصلی را با دایره‌ی تو پر نشان داده است و مکانیزم‌های فرعی را با دایره تو خالی نشان داده است.

TABLE 1  
Comparison of toughening mechanisms for different ceramic composites (●, probable major factors of toughening; ○, other expected important mechanisms)

Second phase	Long fibres		Particles		Whiskers	Particles and whiskers
Example of composites	C/C	Glass/C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZrO <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /TiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC <sub>w</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZrO <sub>2</sub> /SiC <sub>w</sub>
Expected toughening mechanism						
Load transfer	●	●			○	○
Prestressing		○		○	○	○
Phase transformation			●			●
Microcracking	○		●			●
Crack deflection or Crack impediment	○	○	○	●	●	●
Crack bridging	○	○			●	●

در نمودار زیر درصد ویسکرها را نشان می‌دهد در میزان چقرمگی شکست که برای کامپوزیت‌های مختلف بوده است. در حالتی که درصد سیلیکون کاربید زیاد شده است، چقرمگی شکست نیز زیاد شده است.

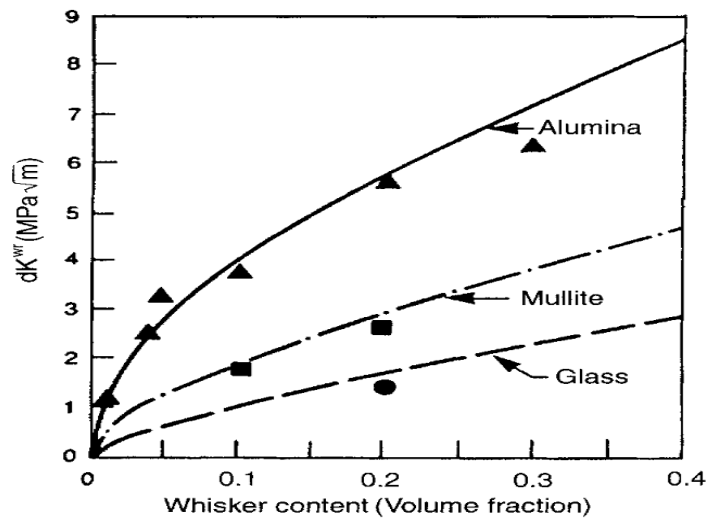


Fig. 14.16 Increment in fracture toughness of SiC whisker composites with various matrices<sup>35</sup>.

### کاربردهای کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی

بعضی از کاربردهای کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی به شرح ذیل است:

در ترمز هواپیمای بوئینگ ۷۶۷ که از کامپوزیت کربن - کربن استفاده کردند.

دهانه‌ی راکت از الیاف بور با کربن ساخته شده است.

ترمز ایرباس ۳۲۰ از کامپوزیت کربن - کربن ساخته می‌شود.

برای مشعل که باید دمای بالا را تحمل کند از کامپوزیت‌های کربن - کربن استفاده کردند.

میخ را در سرامیک می‌کوبند.

قالب برای ریخته‌گری را از کامپوزیت کربن - کربن ساختند که البته این قالب خیلی گران است.

پیستون اتومبیل / استفاده از کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی باعث می‌شود که دما بالا رود، سرعت بالا رود و راندمان خیلی خوب می‌شود.

پره‌های توربین که از روش SOL-GEL تولید می‌شوند.

مته‌هایی که برای برشکاری، تراشکاری و سوراخ‌کاری استفاده می‌شوند.

در فصل اول بیان شد که از کبالت و کاربید تنگستن استفاده می‌شود که عیب این کامپوزیت‌های زمینه فلزی این است که وقتی داغ می‌شود مجبور هستیم از آب صابون استفاده کنیم تا خنک شود. سرعت باردهی را نمی‌توان خیلی بالا برد اما استفاده از کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی این مشکل را برطرف می‌کند. اخیراً از کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی برای این مته‌ها استفاده می‌کنند که سرعت ماشین‌کاری نیز بالا می‌رود.

و ...

