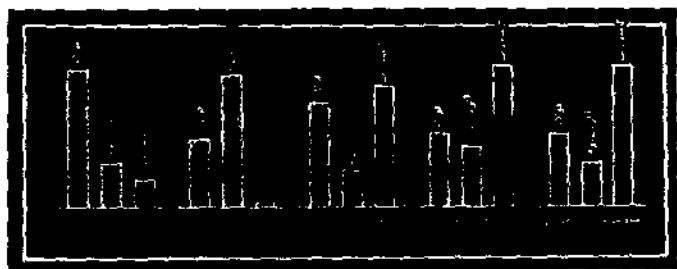


در شکل ۱ بعضی از خواص کامپوزیت‌های جدید با آلومینیوم و سوه - مقایسه شده است. علاوه بر این خواص، طراحی و شکل‌پذیری راحت‌تر و هزینه ساخت و نگهداری پایتیر نیز از دیگر امتیازهای بارز کامپوزیت‌های جدید به شمار می‌رود.



شکل ۱ - مقایسه خواص آلومینیوم، فولاد و مواد کامپوزیتی



تألیف: محمود محرابزاده
ماسیس اکبریان

کامپوزیت‌ها یا مواد مرکب، از جمله مواد مهندسی و ساختمانی جدیدی‌اند که در توسعه و کاربرد آنها متخصصین فراوانی از رشته‌های مختلف مانند: متالورژی، سرامیک، پلی‌مر، علوم و مهندسی مواد، شیمی، مهندسی شیمی، مکانیک جامدات، مکانیک شکست مواد، کامپیوتر و ریاضی، سهم به‌سزایی داشته‌اند. به دلیل گسترده بودن موضوع، بحث در مورد آن از کلیه جوانب فوق غیرممکن به نظر می‌رسد، لذا در این مقاله که هدف آن آشنایی اولیه با مواد کامپوزیتی است، سعی شده است که مهمترین جنبه‌های موضوع مورد بحث قرار گیرد، به عبارت دیگر مواد تشکیل‌دهنده و سطح مشترک بین آنها و روشهای ساخت و شکل دادن آنها و ارتباط بین ساختار، خواص و کاربردهای گوناگون این مواد به‌زبانی ساده بیان می‌شود. از آنجا که کامپوزیت‌های پلی‌مری مهمترند، در این مقاله بیشتر مورد توجه واقع شده‌اند.

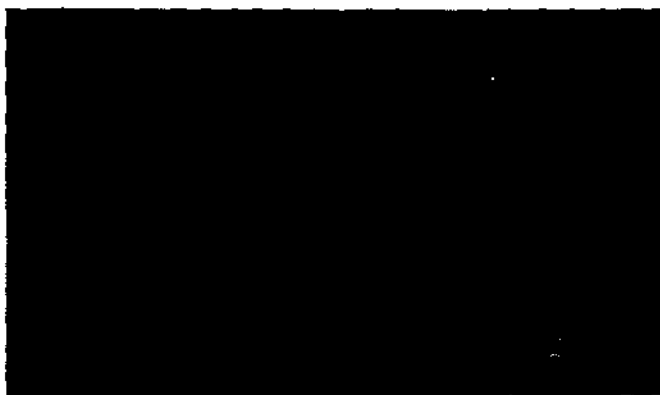
نکات تاریخی و اهمیت کامپوزیت‌ها:

استفاده از مواد کامپوزیتی ایده‌ای جدید نیست. بشر از دیرزمان به اهمیت ترکیب فیزیکی موادی که در دسترس وی بوده، پی برده است. چینی‌ها و مصریان قدیم از جمله تمدنهای باستانی بوده‌اند که برای اولین بار از مخلوط کاه و گل و شن برای بناسازی استفاده کرده‌اند. این روش سنتی هنوز هم در برخی از نقاط کشورمان رایج است. مصریان با چسباندن لایه‌های نازک چوب و پارچه به یکدیگر و با استفاده از قیر قایق‌های خود را در برابر متورم شدن در آب، تقویت می‌کردند.

کامپوزیت‌ها در طبیعت نیز به وفور یافت می‌شوند. چوب ساده‌ای است آلی و متشکل از الیاف سلولزی که لیگنین با بخش ضعیف آن را تقویت می‌کنند. فومها، یا اسفنج‌های طبیعی دریایی، معدنی و گیاهی (ساقه درخت آفتاب‌گردان) و استخوان‌های تشکیل‌دهنده اسکلت جانداران، مثال‌های دیگری از کامپوزیت‌های طبیعی‌اند. مواد غذایی و دارویی، مخلوط پلی‌مرها

کلیدواژه:

کامپوزیت‌ها، مواد و پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف، الیاف، چندلایه‌ها



مقدمه:

پیشرفت‌های تکنولوژیک عصر حاضر در واقع، بستگی به پیشرفت‌هایی دارد که در زمینه مواد حاصل شده است و توسعه آنی در گرو مواد موجود قابل استفاده است. در این میان، مواد کامپوزیتی معرف قدم‌های بزرگی است که در راه تکامل مواد مهندسی برداشته شده است. با ترکیب کردن فیزیکی دو یا چند ماده، علاوه بر اینکه موادی سبکتر و محکمتر از مصالح سنتی، از قبیل فلزات، سرامیکها، چوبها و پلی‌مرهای معمولی، به دست می‌آید، بلکه می‌توان برای هر کاربرد مشخصی، خواص مورد نظری را ایجاد کرد. انجام این کار حتی با طراحی دقیق مواد سنتی امکانپذیر نیست.

Key Words:

۱ - Composites ۲ - Fiber - Reinforced Materials and Plastics;
۳ - Fibers; ۴ - Laminates.

علوم و تکنولوژی پلیمر

با مواد افزودنی و الیاف، مخلوط پلی‌مرها، آلیاژ فلزات، چسبها، پوششها، روکشها، رنگها، فیلمهای پلی‌مری چندلایه‌ای، چندلایه‌های چوبی و فلزی و پلی‌مری، فوم و اسفنجهای پلی‌مری، سیمان، بتون، آسفالت و آجر نیز از دیگر مواد کامپوزیتی‌اند.

استفاده از کامپوزیت‌های مدرن در حقیقت از اوائل دهه ۱۹۴۰ شروع شد که برای اولین بار از الیاف شیشه جهت تقویت پلاستیکهای مصرفی در ساخت پوشش پلاستیکی آنتن رادار هواپیما استفاده شد. در پی آن اولین قایق فایبرگلاس - پلاستیک در سال ۱۹۴۲ ساخته شد و طی جنگ جهانی دوم و بلافاصله پس از کاربرد پلاستیکهای تقویت شده با الیاف در هواپیماسازی، کامپوزیتها مورد استفاده بیشتری یافتند و از سال ۱۹۵۶ صنایع فضایی نیز استفاده وسیع از آنها را آغاز کرد.

امروزه علاوه بر صنایع هوا فضایی، مواد کامپوزیتی در صنایع دیگر از قبیل صنایع شیمیایی، الکتریکی، اتومبیل‌سازی، اسلحه‌سازی، وسایل ورزشی و غیره نیز اهمیت پیدا کرده‌اند.

تعاریف:

واژه کامپوزیت، **Composite**، از کلمه انگلیسی «**to compose**» به معانی ترکیب کردن، ساختن و مخلوط کردن، مشتق شده است. کامپوزیت از ترکیب و اختلاط چند ماده حاصل می‌شود. در اینجا منظور ترکیب و اختلاط فیزیکی است نه شیمیایی، به طوری که اجزاء تشکیل دهنده ماهیت شیمیایی و طبیعی خود را کاملاً حفظ می‌کنند. گرچه بعداً خواهیم دید که در برخی از کامپوزیت‌های پیشرفته، برای بهبود خواص، انجام اصلاحات شیمیایی جزئی سطحی در مورد مواد تشکیل دهنده، الزامی است. با این تعریف، چون تقریباً اکثر مواد طبیعی و مصنوعی را می‌توان کامپوزیت به حساب آورد، بنابراین برای ادامه بحث و محدود کردن موضوع، در این مقاله تعریفی عملی‌تر و اختصاصی‌تر از کامپوزیتها ارائه می‌شود.

کامپوزیتها موادی هستند:

۱) جامد (ترکیبات مایع از نظر خواص مکانیکی فاقد ارزش‌اند).
 ۲) مصنوعی (کامپوزیت‌های طبیعی مانند چوب و استخوان حذف می‌شوند).

۳) متشکل از دو یا چند جزء (یا فاز) که از نظر شیمیایی یا فیزیکی کاملاً متفاوت‌اند و به صورت منظم یا پراکنده کنار هم قرار گرفته‌اند و لایه مشترکی بین آنها وجود دارد. خواص مکانیکی یکی از فازها نسبت به فاز یا فازهای دیگر خیلی بهتر است.

۴) دارای خواص و ویژگی‌هایی هستند که هیچ یک از فازهای تشکیل دهنده به تنهایی نمی‌توانند آنها را داشته باشند.

کامپوزیت‌هایی که در آنها فاز ضعیف یا ماتریس (**matrix**) توسط الیاف گوناگون تقویت شده باشند، مهمترین دسته کامپوزیتها را تشکیل می‌دهند، و به کامپوزیت‌های لیفی (**fiber composite**) معروف‌اند. چنانچه به جای الیاف از پودر (معمولاً معدنی) استفاده شود، این مواد را کامپوزیت‌های ذره‌ای یا پودری (**Particulate composite**) می‌نامند. الیاف و پودر

تقویت کننده را فاز تقویت کننده (**reinforcing Phase**) می‌گویند و گاهی ماتریس را فاز پیوسته (**Continuous Phase**) و فاز تقویت کننده را فاز غیرپیوسته (**Discontinuous Phase**) نیز می‌خوانند. ممکن است هر دو فاز الیاف و پودر، با هم در ماتریس وجود داشته باشند.

بهبود خواص ماتریس در کامپوزیت‌های لیفی معمولاً خیلی بیشتر از کامپوزیت‌های ذره‌ای صورت می‌گیرد و به این دلیل موضوع کامپوزیت‌های لیفی بیشتر مورد بحث قرار می‌گیرد.

ماتریسها:

همانطور که در مقدمه اشاره شد، پیشرفت نهایی در هر تکنولوژی به مواد موجود وابسته است. کلیه مواد از جمله فلزات، سرامیکها، پلی‌مرها و غیره بدون استثنا دارای ضعفها، عیوب و ناهمگنیهای اتمی درون مولکولی هستند. وجود این عوامل آنها را از نظر خواص مکانیکی و سایر خواص، در رده‌ای پائین‌تر از آنچه که تئوری پیش‌بینی می‌کند، قرار می‌دهد.

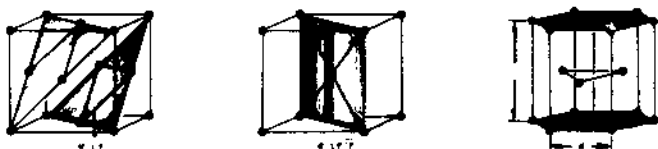
با بررسی ساختار و خواص مواد و مطالعه تاثیر عیوب و ضعفها بر آنها، می‌توان روشهایی برای اصلاح و بهبود این مواد پیدا کرد. صرف نظر از تقویت شدن ماتریسها توسط الیاف، ماتریسها خود نیز نقش چسبانند الیاف به یکدیگر جهت انتقال تنشهای وارده به فاز الیاف، محافظت الیاف در برابر عوامل مکانیکی و جوی همچنین رطوبت را نیز به عهده دارند. فلزات و سرامیکها و پلی‌مرها به ویژه پلاستیکها از جمله پرمصرف‌ترین مصالح موجودند و به این جهت مهمترین ماتریسهای مورد استفاده در کامپوزیتها را تشکیل می‌دهند. در اینجا ابتدا فلزات و سرامیکها و سپس پلاستیکها را مورد بحث قرار می‌دهیم.

ماتریسهای فلزی:

فلزات از مهمترین و متنوع‌ترین مواد مهندسی‌اند. این مواد فوق‌العاده محکم و مقاومت زیادی در برابر ضربه از خود نشان می‌دهند و به آسانی می‌توانند تغییر شکل پلاستیکی پیدا کنند. فلزات را می‌توان با استفاده از روشهای مختلف تقویت کرد و استحکام بخشید که اکثر این روشها موجب محدود شدن حرکت نواقص خطی موجود در ساختار بلوری آنها می‌شود.

ساختار فلزات:

فلزات موادی هستند بلوری و ساختار بلوری اکثر فلزات تابع یکی از سه شکل زیر است:



شکل ۲ - سه شکل بلوری فلزات

نقاط سیاه، اتمهای فلز را نشان می‌دهند. در واقع امر، اتمها با یکدیگر در تماس نزدیک‌اند به طوری که کلیه فضای موجود در شبکه بلور توسط اتمها اشغال می‌شود. جدول ۱ ساختار بلوری برخی از فلزات را نشان می‌دهد. در بعضی فلزات شکل بلوری با کاهش یا افزایش دما تغییر می‌کند.



در واقع، شبکه بلوری فلزات هرگز کامل نیست و بلورها بندرت تقارن کامل بلور ایده‌آل را پیدا می‌کنند. نواقص ساختاری بلورها بر خواص مکانیکی فلزات تاثیر شگرفی دارد. انواع نواقص بلوری عبارتند از:

- ۱) نواقص نقطه‌ای (بدون بعد)
- ۲) نواقص خطی (یک بعدی)
- ۳) نواقص صفحه‌ای (دو بعدی)
- ۴) نواقص حجمی (سه بعدی)

نواقص نقطه‌ای هنگامی به وجود می‌آیند که یکی از مکانهای اتمی در شبکه بلور خالی باشد یا توسط اتمی از عنصر دیگر اشغال شده باشد و همچنین هنگامی که اتمی از همان فلز یا عنصری دیگر در نقطه‌ای از فضای بین اتمهای شبکه قرار گرفته باشد. میزان اینگونه نواقص را می‌توان با سرد کردن سریع فلز داغ یا بمباران کردن آن با استفاده از ذرات پر انرژی مانند نوترون همچنین از طریق تغییر شکل پلاستیکی فلز، افزایش داد.

نواقص خطی یا نابجاییها، نیم صفحه‌ای متشکل از چند اتم فلز، در شبکه بلوری‌اند که تقارن بلور را در طول یک خط بر هم می‌زنند و با حرکت خود تحت تنش برشی باعث جابه‌جایی اتمها و در نتیجه لغزش قسمتهای مختلف فلز بر روی یکدیگر می‌شوند. در نتیجه این عمل، تغییر شکل پلاستیکی فلز رخ می‌دهد.

نواقص صفحه‌ای، سطوح شبکه بلوری را اشغال می‌کنند و به علت هم

جهت نبودن بلورها، در محل تماس آنها مرزهای دانسه‌ای (grain boundaries) به وجود می‌آیند. این نواقص را می‌توان با کاهش اندازه میانگین دانسه‌ها، تا حدودی حذف نمود.

نواقص حجمی شامل حفره‌ها و مواد خارجی و شکافهای ریز موجود در توده فلزند.

روشهای تقویت مرسوم:

روشهای تقویت و استحکام بخشیدن فلزات، بعضی از نواقص فوق را حذف و یا حرکت و جابه‌جایی آنها را محدود می‌کند. چون با انجام این عملیات، سختی فلز نیز افزایش پیدا می‌کند، روشهای افزایش استحکام را روشهای سخت گردانی یا سخت‌سازی (work-hardening) نیز می‌نامند.

سخت‌سازی پدیده‌ای است که در اکثر فلزات دیده می‌شود و طی آن فلز با افزایش تغییر شکل، مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل از خود نشان می‌دهد. مقدار این مقاومت با شدت و تراکم نواقص خطی رابطه مستقیم و با میانگین اندازه دانسه‌ها رابطه عکس دارد. گمان می‌رود که سخت‌سازی در فلزات از تداخل و تاثیرات متقابل نواقصی که در صفحات مختلف حرکت می‌کنند ناشی می‌شود. به این ترتیب که شبکه‌های درهم پیچیده نواقص خطی، حاصل از تغییر شکل پلاستیکی جزئی، از حرکت نواقص خطی دیگر جلوگیری می‌کنند و در نتیجه نیروی لازم برای تغییر شکل پلاستیکی، بیشتر افزایش می‌یابد. از این پدیده در چکش‌کاری و عملیات سرد کردن (cold-working) فلزات جهت افزایش استحکام، استفاده می‌شود.

سخت‌سازی محلولی (solution hardening) عبارت از سخت‌سازی از طریق تشکیل محلول جامدی از فلزات مختلف یا عناصر غیر فلز در فلز مورد نظر است. در این روش از عناصری مانند کربن، ازت، هیدروژن، منگنز و سلیکون استفاده می‌شود. اتمهای عناصر فوق با قرار گرفتن در داخل ساختار بلوری (یعنی تشکیل محلولهای جامد بین شبکه‌ای) و تغییر دادن شکل بلور، می‌توانند از حرکت نواقص خطی جلوگیری کنند.

سخت‌سازی رسوبی یا رسوب سختی (precipitation hardening) و سخت‌سازی زمانی یا پیر سختی (age hardening) عبارت از تشکیل محلولی جامد و فوق اشباع از دو فلز در دمای بالا و راسب کردن مقادیر اضافی یکی از دو فلز در اثر سرد کردن در دمای پایین یا مرور زمان است. با این عمل توزیع یکنواختی از ذرات ریز فلزی به دست می‌آید و حرکت نواقص خطی در اثر تغییر شکل بلوری متوقف می‌شود. آلیاژهای (Al-Ni) و (Al-Cu) و (Al-Zn-Mg) مثالهایی از این روش‌اند که در هواپیماسازی مصرف دارند.

روش سخت‌سازی از طریق توزیع پودر اکسید فلزات (dispersion-hardening) مقادیر کمی از اکسید سخت و خنثی (مثلاً Al_2O_3 و SiO_2 و TiO_2) در فلز توزیع می‌شود. این عمل به صورت شیمیایی (اکسایش یکی از فلزات تشکیل دهنده آلیاژ) یا به صورت مکانیکی امکانپذیر است. در این روش ذرات اکسید مانع از حرکت نواقص و ترکهای ریز در

بر مدول کشسان می گذارند، زیرا از مدول کشسانی بالای ذرات و فازهای تقویت کننده، استفاده مطلوب حاصل نمی شود. افزایش مدول فلزات را می توان با استفاده از الیاف با مدول بسیار بالا به دست آورد. اکثر الیاف مهم و جدید به طور اتفاقی سبکتر از فلزات اند به استثناء الیاف تنگستن که دارای مدول بسیار بالا ولی بسیار سنگین است. جدول ۳ جرم مخصوص تعدادی از فلزات را نشان می دهد. جرم مخصوص الیاف تقویت کننده برای مقایسه، در قسمت الیاف این مقاله خواهد آمد.



باید خاطر نشان کنیم که با وجود اینکه مدول کشسانی بالا از نقطه نظر کاربردهای ساختمانی یک ویژگی مفید و مطلوب تلقی می شود، لکن در کاربردهایی که وزن قطعه مهم باشد و نیروهای فشاری و خمشی در کار باشند (مانند استفاده از تیرهای ساختمانی در هواپیما، راکت و کامیون) مقدار E/ρ^2 (جرم مخصوص فلز و E مدول کشسان فلز) از اهمیت بیشتری برخوردار است و باید این مقدار را به حداکثر ممکن رساند. مثال زیر این مطلب را روشنتر خواهد کرد.

رابطه مقدار تغییر شکل عمودی (d) برای تیری از نوع یک سرده گیر **Cantilever** با سطح مقطع مربع، مدول کشسان E ، طول l ، ضخامت t و جرم مخصوص ρ تحت نیروی P در انتهای آزاد آن به صورت $d = \frac{4L^3\rho}{ET^4}$ است.

$$M = \rho l^2 = \rho M^2$$

و از این رابطه $t = \left(\frac{M}{\rho}\right)^{1/2}$ در رابطه d جایگزین می شود:

$$d = \left(\frac{4l^3\rho}{E}\right)\left(\frac{\rho}{M}\right)^2$$

$$M = \left[\left(\frac{4l^3\rho}{d}\right)\left(\frac{\rho^2}{E}\right)\right]^{1/2}$$

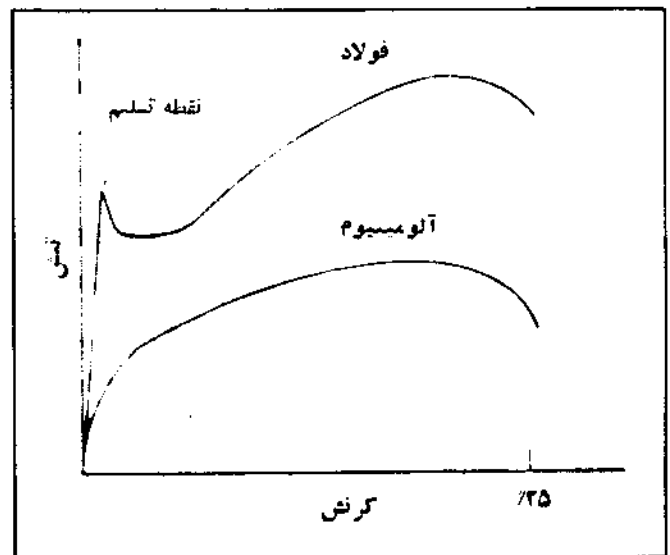
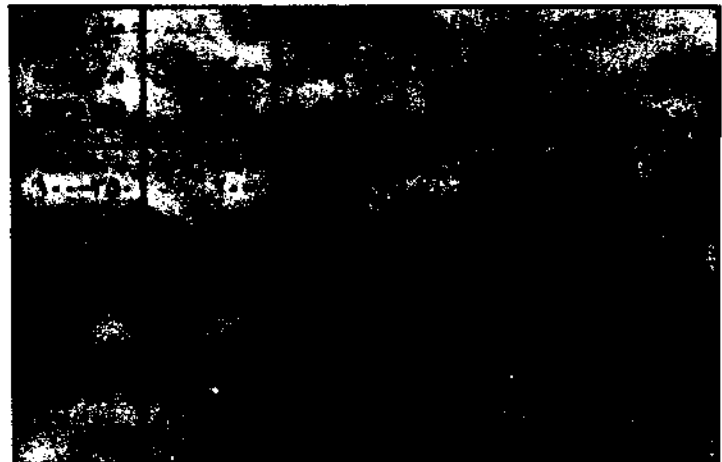
یعنی برای مقدار مشخصی از P/d هرچه E/ρ^2 بیشتر باشد جرم تیر کمتر خواهد بود.

این مثال ساده اهمیت استفاده از الیاف سبکتر ولی محکمتر فلزی را جهت تقویت فلزات برای کاربردهای ساختمانی به وضوح نشان می دهد. توضیحات بیشتر در مورد کامپوزیت های فلزی بعداً خواهد آمد.

توده فلز می شوند. به عنوان مثال: $Al_2O_3 + Al$. رفتار فلزات تقویت شده با این روش در دماهای بالا بسیار خوب است. آب دادن (**quenching**) از مهم ترین عملیات حرارتی فلزات است و برای افزایش استحکام فولاد، کاربرد فراوان دارد. فولاد آبدیده، همان آهن اشباع شده از کربن است و تغییر شکل بلورها در این مورد، سختی و استحکام بالای آهن را تضمین می کند. خواص فلزات:

مدول کشسانی، تنش در نقطه تسلیم، استحکام کششی نهایی و مقاومت در برابر ضربه تعدادی از فلزات مهم و آلیاژها در جدول ۲ نشان داده شده است. منحنی تنش - کرنش فولاد و آلومینیوم که گستره وسیع کرنش پلاستیکی آن دو را نشان می دهد در شکل ۳ دیده می شود.

جدول ۲ - خواص فیزیکی بعضی از فلزات معمولی و آلیاژها



شکل ۳ - منحنی تنش - کرنش دو فلز معمولی

روشهای جدید تقویت (بالا بردن استحکام به کمک الیاف):

روشهای مرسوم تقویت فلزات، موجب افزایش چشمگیر تنش در نقطه تسلیم، استحکام نهایی و سرعت سخت سازی می شوند، ولی تأثیر ناچیزی

ماتریسهای سرامیکی:

مواد سرامیکی بسیار سخت و شکننده اند و از ترکیب یک یا چند فلز با یک غیر فلز مانند اکسیژن، کربن، نیتروژن یا بور تشکیل می شوند. مواد سرامیکی دارای پیوندهای یونی قوی هستند، ولی در مقایسه با فلزات لغزشهای مولکولی کمتری دارند که در نتیجه کرنش در شکست و مقاومت در برابر ضربه آنها پائین است. علاوه بر شکنندگی و یکپارخت نمودن، سرامیکها مقاومت کمی در مقابل شوکهای حرارتی و مکانیکی دارند و استحکام کششی آنها نیز کم است از طرف دیگر مواد سرامیکی دارای مدول کشسانی بسیار بالا و دانسیته پائین هستند و دماهای بسیار بالایی را می توانند تحمل کنند. تحمل دمای بالا توسط سرامیکها از اهمیت زیادی برخوردار است و همین امر، نیروی محرکه واقعی جهت تولید سرامیکهای مقاوم شده است. این واقعیت قابل توجه است که آلیاژهای فلزی عالی، مورد مصرف در موتورهای جت، می توانند تا دمای حدود 800°C را به راحتی تحمل کنند و در اثر اکسایش روکش مقاوم این آلیاژها قدرت تحمل آنها را تا دمای حدود 1000°C می توان بالا برد، ولی در بالاتر از این دما باید به مواد سرامیکی متوسل شد.

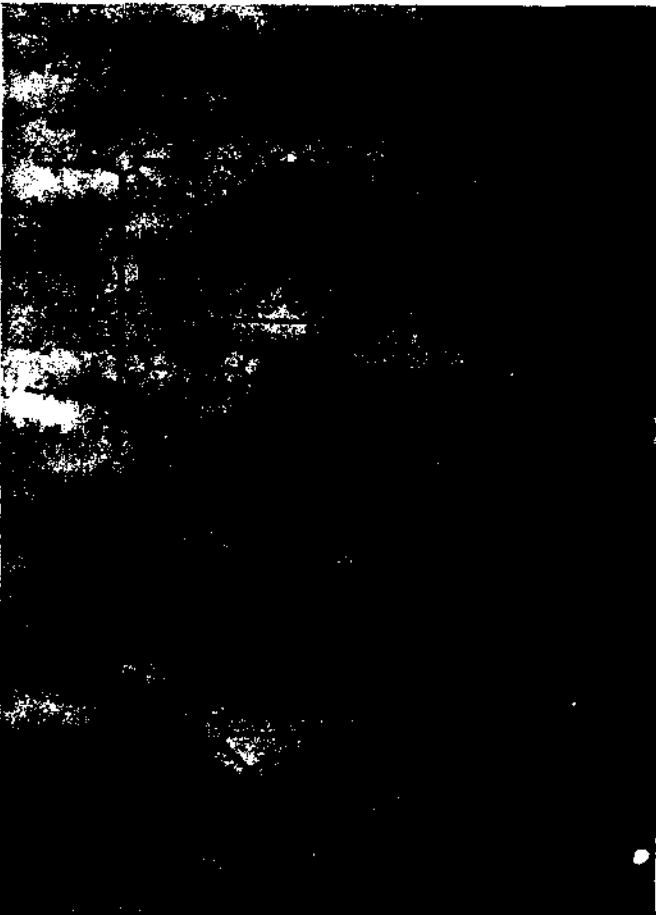
عیب اصلی سرامیکها، شکنندگی بالای آنهاست. حتی کوچکترین ترکهای سطحی (خراشها یا شکافها) یا ترکهای داخلی (منفذها یا ترکهای ریز) می توانند نتایج خطرناکی را به بار آورند. در سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ پژوهشهایی در سطح گسترده و بالایی انجام شد تا سرامیکهای مقاومتری ساخته شود. یکی از مهمترین نتایجی که از این پژوهشها به دست آمد تقویت کردن سرامیکهای شکننده به وسیله الیاف بود.

پیوند و ساختار:

مواد سرامیکی، بجز شیشهها، مانند فلزات، بلوری اند. اما برخلاف فلزات، بیشتر دارای پیوندهای یونی و تعدادی هم دارای پیوند کووالان اند. پیوندهای یونی شامل انتقال الکترونها بین گونه های اتمی ترکیب سرامیک است، بدین معنی که یک اتم یک یا چند الکترون از دست می دهد، در حالیکه اتم دیگر یک یا چند الکترون به دست می آورد. محیط از نظر الکتریکی خنثی است، بدین معنی که یونهای با بار مثبت (کاتیونها) با یونهای با بار منفی (آنیونها) توازن دارند. به طور کلی، ترکیبات سرامیکی استیوکیومتری اند. یعنی، نسبت ثابتی بین کاتیونها و آنیونها وجود دارد. به عنوان نمونه می توان از آلومین ($\text{alumina, Al}_2\text{O}_3$)، بریلیا (beryllia BeO)، اسپینل ($\text{spinel, MgAl}_2\text{O}_4$) سیلیکون کسارید ($\text{silicon carbide, SiC}$) و سیلیکون نیترید ($\text{silicon nitride, Si}_3\text{N}_4$) نام برد. در میان مواد سرامیکی وجود ترکیبات غیر استیوکیومتری، مثل $\text{Fe}_{0.96}\text{O}$ غیر عادی نیست. یون اکسیژن (آنیون) معمولاً در مقایسه با یون فلز (کاتیون) بسیار بزرگتر است. بنابراین، کاتیونها موقعیتهای درون شبکه ای و آنیونها مکانهای خارجی ساختار بلور را اشغال می کنند.

بلور سرامیکها معمولاً ساختار مکعبی ساده، ساختار مکعب فشرده و شش گوشه ای فشرده را دارند. ساختار مکعبی ساده، ساختار سزیم کلرید

نیز نامیده می شود، ولی متداول نیست. CaI و CaBr ، CaCl دارای چنین ساختاری هستند. این دو گونه یک شبکه مکعب درونی نفوذی ($\text{interpenetration cubic array}$) را تشکیل می دهند که در آنها آنیونها موقعیتهای گوشه مکعب را اشغال می کنند، در صورتیکه کاتیونها به طرف مکانهای بین شبکه ای نفوذ می کنند. ساختار مکعب فشرده در حقیقت نوعی ساختار FCC توصیفی در بخش فلزات است. یونهای اکسیژن (آنیونها) ساختار بیرونی FCC و یونهای فلز (کاتیونها) نمای داخلی آن را می سازند. تعدادی از مواد سرامیکی این ساختار را دارند. این نوع ساختار نوع NaCl یا نمک طعام نیز نامیده می شود. NiO ، FeO ، CuO ، MgO ، MnO و BaO نیز مثالهایی دیگری در این مورداند. ساختارهای مکعب با وجوه مرکز پر دیگری نیز وجود دارند، به عنوان مثال روی سولفید و پرفلوئوریت (fluorite, CaF_2) را می توان نام برد. همانطور که اشاره شد شش گوشه ای فشرده ای نیز در سرامیکها دیده شده است. مثلاً ZnS به شکل hcp نیز متبلور می شود. مثالهای دیگر نیکل آرسنید (Nickel arsenid)، NiAs و کوراندیم ($\text{corundum Al}_2\text{O}_3$) هستند. شکل ۴ ساختار سلول hcp، Al_2O_3 را نشان می دهد. لایه های A و B حاوی اتمهای اکسیژن اند، در حالیکه لایه های C_1 ، C_2 و C_3 اتمهای آلومینیوم را دربر دارند. فقط $\frac{2}{3}$ لایه های C اشغال شده اند.



شکل ۴ - ساختار شش گوشه ای فشرده α - آلومین. A و B لایه های حاوی اتمهای اکسیژن، C_1 ، C_2 و C_3 حاوی اتمهای آلومینیوم. فقط $\frac{2}{3}$ قشرهای C اشغال شده اند.

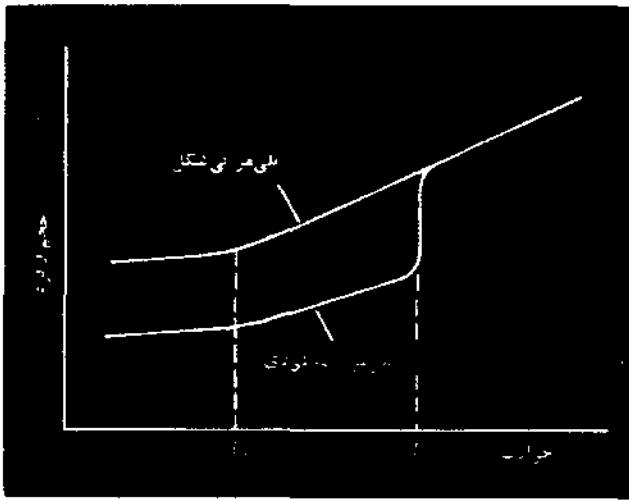
مواد سرامیک - شیشه هنوز هم دسته مهمی از سرامیکها را تشکیل می دهند. آنها به تنهایی نوعی مواد کامپوزیتی هستند. زیرا حاوی (۹۵-۹۸) حجمی فاز بلوری و باقیمانده فاز شیشه ای اند. فاز بلوری دارای بلورهای بسیار ریز است (قطر اندازه دانه آنها کمتر از $1 \mu m$ است). این چنین اندازه ریز دانه، با افزودن مواد هسته ساز (معمولاً TiO_2 و ZrO_2) در طی مرحله ذوب و با کنترل عمل تبلور به دست می آیند. مثالهای مهم سیستمهای سرامیک شیشه عبارتند از:

۱ - $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$. این سیستم انبساط گرمایی بسیار کمی دارد و بنابراین در مقابل شوک گرمایی بسیار مقاوم است. کورنینگ وار (Corningware) نام تجاری شناخته شده برای این دسته از سرامیک شیشهها است.

۲ - $MgO-Al_2O_3-SiO_2$. این سیستم مقاومت الکتریکی بالا و استحکام مکانیکی بالا را به طور همزمان نشان می دهد.

در مورد مواد سرامیکی، تشکیل محلولهای جامد نیز امکانپذیر است. در هر حال، برخلاف فلزات، محلولهای جامد درون شبکه ای برای سرامیکها کمتر محتمل است، زیرا مکانهای درون شبکه ای قبلاً پر شده اند. داخل سازی یونهای حل شده، خنثی بودن بار را از بین می برد. بار موازنه نشده در مکانهای خالی قرار می گیرد: مثلاً FeO ساختاری از نوع $NaCl$ ، با تعداد مساوی یونهای Fe^{2+} و O^{2-} را دارد. در هر حال، در صورتیکه دو یون Fe^{2+} جایگزین سه یون Fe^{3+} شود، مکان خالی خواهیم داشت که در آنجا یک یون آهن تشکیل خواهد شد.

شیشههای معمولی یا مواد سرامیک سیلیکاتی، موادی شبه جامد معدنی اند که به هنگام سرد شدن از حالت مایع، متبلور نمی شوند. ساختار آنها (شکل ۴) بلوری نیست. در این حالت، منحنی حجم ویژه بر حسب دما مشابه منحنی مذکور در مورد پلی مرها است (شکل ۵) و مشخصه دمایی انتقال شیشه ای (T_g) در آنها وجود دارد. تحت شرایط معینی، می توان شیشه را متبلور کرد. این عمل با قرار گرفتن آنها در موقعیتهای منظم و در نتیجه با کاهش ناگهانی حجم در نقطه ذوب همراه است.



شکل ۶ - حجم ویژه بر حسب دما برای یک پلی مر سرهم و یک پلی مر نیمه بلوری

اثر ترکها در استحکام:

وجود نواقص در ساختار بلوری سرامیکها، درست مانند فلزات، موجب کاهش استحکام می شود. از جمله عیوب مهم در مواد سرامیکی، ترکهای سطحی و مکانهای خالی (اشکال نشده) موجود در ساختار بلوری آنهاست. نا به جایبهایی نیز وجود دارد اما نسبتاً بی حرکت اند. مرزهای دانه ای و سطوح آزاد، مهمترین عیوب سطحی اند. مانند فلزات، اندازه کوچک دانهها خواص مکانیکی سرامیکها را بهبود می بخشد.

وجود ترکهای سطحی و خلل و فرج داخلی (ترکهای Griffith) استحکام سرامیکها را به مخاطره می اندازد. تنش شکستن برای یک ماده کشسان، که شکافهای داخلی به طول $2a$ دارد، مطابق با رابطه گرفت (Griffith) به صورت زیر است:

$$\sigma F = \left(\frac{2E\gamma}{a} \right)^{1/2}$$

در این رابطه E مدول کشسان و γ انرژی سطحی، سطح مشترک است. در مکانیک شکست کشسان خطی، مسئله این شکست را با پارامتری که عامل شدت تنش K نامیده می شود، مورد بحث قرار می دهند. مقدار تنش در نوک ترکها با رابطه زیر بیان می شود:

$$\sigma_t = \left(\frac{K}{(2\pi r)^{1/2}} \right) f_{ij} \theta$$

در این رابطه θ ، تابع زاویه θ است. هنگامی که K به مقدار بحرانی (K_{IC}) خود برسد، شکست روی خواهد داد. روش دیگر محاسبه از نقطه نظر انرژی است، که اساس ایده اصلاح شده گرفت را تشکیل می دهد. طبق این روش، هنگامی که نیروی کشش (G) به مقدار بحرانی (G_{IC}) خود برسد، شکست روی خواهد داد. برای مواد سرامیکی رابطه $G_{IC} = 2\gamma$ برقرار است. همچنین در مورد شکست از طریق opening failure و



شکل ۵ - الیاف شیشه دراز (بریده شده از قرقره) تهیه شده با روش سول زل -

plane stress می توان نشان داد که $K^2 = EG$ است، بدین معنی که دو روش فوق معادل یکدیگرند.

بهتری دارند. شیشه معمولی، شیشه اکسی نیتريد و سرامیکهای شیشه‌ای از دیگر مواد سرامیکی هستند. در مورد سرامیکهای شیشه‌ای می توان ماتریس را در حالت شیشه‌ای با الیاف مخلوط و متراکم کرد و سپس با مستبلور کردن ماتریس، پایداری گرمایی بالاتری به دست آورد.

مواد سرامیکی معمولی:

سیلیکون کاربرد از مواد سرامیکی معمولی است که مقاومت گرمایی بسیار عالی دارد. اما در تمام شرایط محیطی و دماهای مختلف کاملاً شکننده است که مشکل اصلی آن را تشکیل می دهد. دو ماده مهم دیگر سرامیکی غیر اکسیدی، تیتانیم دی یورید و سیلیکون نیتريد هستند. در بین سرامیکهای اکسیدی، آلومینا (alumina) و زیرکونیا (zirconia) آینه

سیلیکون کاربرد از مواد سرامیکی معمولی است که مقاومت گرمایی بسیار عالی دارد. اما در تمام شرایط محیطی و دماهای مختلف کاملاً شکننده است که مشکل اصلی آن را تشکیل می دهد. دو ماده مهم دیگر سرامیکی غیر اکسیدی، تیتانیم دی یورید و سیلیکون نیتريد هستند. در بین سرامیکهای اکسیدی، آلومینا (alumina) و زیرکونیا (zirconia) آینه

جدول ۴ - خواص بعضی از مواد ماتریس سرامیکی

ماتریس	مدول کشسانی (GPa)	استحکام کششی (MPa)	انبساط گرمایی (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	جرم مخصوص
شیشه بوروسیلیکات	۶۰	۱۰۰	۲/۵	۲/۳
شیشه سودا (شیشه معمولی)	۶۰	۱۰۰	۸/۹	۲/۵
شیشه لیتیم آلومینوسیلیکات	۱۰۰	۱۰۰-۱۵۰	۱/۵	۲/۰
شیشه منیزیم آلومینوسیلیکات	۱۲۰	۱۰۰-۱۷۰	۲/۵-۵/۵	۲/۶-۲/۸
مولیت (Mullite)	۱۳۳	۸۳	۵/۳	—
M ₂ O	۲۱۰-۳۰۰	۹۷-۱۳۰	۱۳/۸	۳/۶
Si ₃ N ₄	۳۱۰	۲۱۰	۲/۲۵-۲/۸۷	۳/۲
Al ₂ O ₃	۳۶۰-۴۰۰	۲۵۰-۳۰۰	۸/۵	۲/۹-۴
SiC	۴۰۰-۴۴۰	۳۱۰	۲/۸	۳/۲

واژه‌ها و اصطلاحات کامپوزیت‌های لیفی و پودری:

Composite Materials = Composites
 Plastics Composites
 Metal composites
 ceramic composites
 fiber-Reinforced composites = fiber composites
 fiber-Reinforced plastics (FRP)
 fiber-Reinforced Metals
 fiber-Reinforced ceramics
 glass-Reinforced plastics
 long-fiber-Reinforced composites
 short-fiber-Reinforced composites
 long-fiber Reinforced plastics
 short-fiber-Reinforced plastics
 Reinforced plastics
 Reinforced Metals
 Reinforced ceramics
 particulate-Reinforced composites = particulate composites
 particulate-Reinforced plastics
 laminates = laminated composites

مواد کامپوزیتی = کامپوزیتها
 کامپوزیت‌های پلاستیکی
 کامپوزیت‌های فلزی
 کامپوزیت‌های سرامیکی
 کامپوزیت‌های لیفی = کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف
 پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف
 فلزات تقویت شده با الیاف
 سرامیک‌های تقویت شده با الیاف
 پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف شیشه
 کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بلند
 کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کوتاه
 پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف بلند
 پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف کوتاه
 پلاستیک‌های تقویت شده
 فلزات تقویت شده
 سرامیک‌های تقویت شده
 کامپوزیت‌های تقویت شده با فلزات = کامپوزیت‌های فراهی
 پلاستیک‌های تقویت شده با فلزات
 چندلایه‌ها = کامپوزیت‌های چندلایه‌ای

References:

(1) K.K. Chawla, "Composite Materials Science and Engineering", Springer-Verlag, New York 1987.
 (2) J.R. Vinson and Tu-Wei Chen, "Composite Materials and their

Use in Structures". Allied Science, London 1975.

(3) L.Holliday, "Composite Materials", Elsevier, London 1966
 (4) N.J.Purvan, "Fiber-Reinforced Materials technology", Van Nostrand Reinhold, London 1972.