

خواص مکانیکی

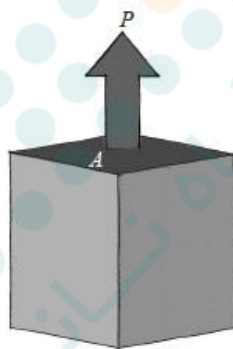
تولید فلزات و آلیاژهایی با اندازه کم تر از ۱۰۰ نانومتر باعث دستیابی به موادی با استحکام بسیار بالا شده است. در واقع کوچک کردن دانه‌ها در مواد، ابزار قدرتمندی است تا ساختارهایی با خواص مکانیکی عالی تولید گردد. برای درک بهتر خواص مکانیکی نانومواد ابتدا لازم است با برخی مفاهیم و تعریف‌های اولیه رفتار مکانیکی مواد همچون تنش، کرنش و تعاریف نشان دهنده خواص مکانیکی مواد همچون استحکام آشنا شوید. لذا ابتدا در این بخش با مفاهیم اولیه و مورد نیاز برای مطالعه خواص مکانیکی نانومواد آشنا شده و سپس در بخش آینده خواص مکانیکی مواد نانو ساختار را بررسی می‌کنیم.

۱- تنش

نیروی وارد بر واحد سطح، «تنش» نامیده می‌شود. به بیان دیگر، تنش عبارت است از نسبت برآیند نیروهای وارد بر سطحی از یک جسم به مساحت آن سطح. فرمول تنش برای یک سطح به این صورت است:

$$\sigma = P/A$$

که در رابطه‌ی فوق σ (خوانده می‌شود: زیگما) تنش، P نیروی وارد شونده بر سطح و A مساحت مقطع تحت تنش است (شکل ۱).



شکل ۱: تنش حاصل از اعمال نیرو بر سطح

هرچه سطح اعمال نیرو در یک جسم بیشتر باشد، تنش کم‌تری به آن وارد می‌شود، چرا که نیروی اعمال شده در این سطح بزرگ توزیع می‌شود. تنش را عموماً با یکی از واحدهای N/cm^2 ، N/mm^2 یا kg/cm^2 نشان می‌دهند.

۲- کرنش

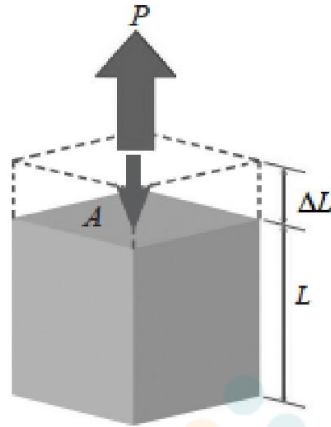
هنگامیکه یک جسم تحت تنش قرار می‌گیرد، تغییر شکلی در راستای نیروی وارد شده در آن به وجود می‌آید. نسبت تغییر شکل جسم نسبت به طول اولیه‌ی جسم را کرنش می‌گویند. به بیان دیگر، کرنش عبارت است از نسبت تغییر طول ناشی از تنش به طول اولیه پیش از اعمال تنش. معادله‌ی کرنش به صورت زیر است:

$$\epsilon = \Delta L / L$$

$$\Delta L = L' - L$$

در روابط فوق ϵ (خوانده می‌شود: اپسیلون) کرنش، L طول اولیه جسم، L' طول جسم پس از اعمال تنش، و ΔL تغییر طول ناشی از تنش در جسم است (شکل ۲). در واقع، کرنش درصد تغییر طول ماده به ازای تنش وارد شده است و ارتباطی مستقیم با طول

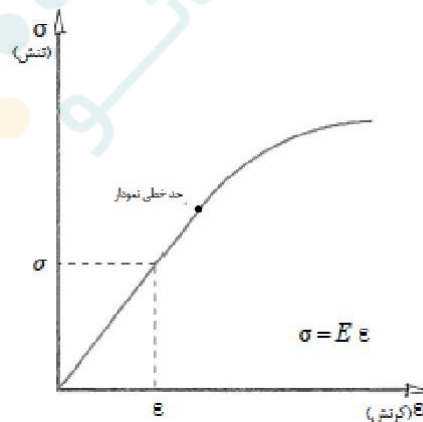
نهایی جسم ندارد. کرنش، عکس‌العمل مواد به تنش اعمال شده است. هر چه این کرنش کوچک‌تر باشد، آن ماده سختی بیشتری دارد و انعطاف‌پذیری کم‌تری از خود نشان می‌دهد. از آنجا که کرنش حاصل تقسیم دو عدد با واحد طول بر یکدیگر است، در عمل کرنش بدون واحد محسوب می‌شود.



شکل ۲: کرنش جسم حاصل از تنش اعمال شده

۳- قانون هوک

مقادیر تنش و کرنش وارد شده بر یک جسم همیشه رابطه‌ای مستقیم با یکدیگر دارند، یعنی به ازای افزایش تنش میزان کرنش نیز افزایش می‌یابد. تنش و کرنش برای هر نوع از مصالح، نموداری دو بعدی به وجود می‌آورند که به آن «نمودار تنش - کرنش» می‌گویند و تغییرات کرنش به ازای تغییرات تنش روی آن نمایش داده می‌شود (شکل ۳). در نمودار تنش - کرنش، همیشه تنش بر محور عمودی و کرنش روی محور افقی نمایش داده می‌شود. این نمودار ممکن است نموداری خطی، نموداری منحنی، یا ترکیبی از خط و منحنی باشد که به نوع جسم بستگی دارد.



شکل ۳: نمودار تنش - کرنش مواد. رابطه مستقیم تنش و کرنش در ناحیه خطی نشان داده شده است

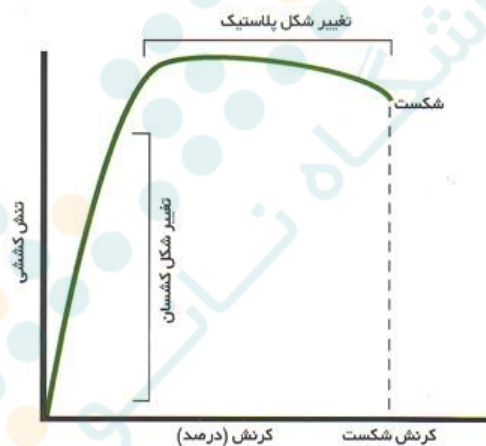
در نمودار تنش - کرنش، غالباً بخش اول منحنی ترسیم شده، نموداری خطی است. یعنی در این بخش نوع تغییرات کرنش به ازای تغییر تنش به صورت خطی عمل می‌کند. تغییر شکل در این ناحیه به صورت ارتجاعی (یا الاستیک یا کشسان) و برگشت پذیر است. این بدان معناست که اگر نیرو به مقدار محدود به یک جامد وارد شود، آن جامد بعد از باربرداری، ابعاد اولیه خود را باز

می‌یابد. حد نیرویی که در بیش از آن ماده رفتار کشسان ندارد، حد کشسان نامیده می‌شود. ضریب زاویه‌ی این ناحیه‌ی خطی از نمودار تنش - کرنش «ضریب ارتجاعی یا الاستیک» یا «مدول یانگ» نامیده می‌شود. این ضریب برابر تانژانت زاویه‌ی ایجاد شده بین نمودار خطی و محور افقی است. واحد پارامتر E یا ضریب ارتجاعی با واحد تنش، یعنی N/cm^2 ، N/mm^2 یا kg/cm^2 یکی است.

اگر با استفاده از ضریب ارتجاعی، معادله‌ی ناحیه‌ی خطی نمودار تنش - کرنش نوشته شود، ملاحظه می‌شود که ضریب ارتجاعی با تنش رابطه‌ی مستقیم و با کرنش رابطه‌ی معکوس دارد. نسبت تنش به کرنش برابر با ضریب ارتجاعی است که به آن «قانون هوک» می‌گویند و به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$E = \sigma / \epsilon$$

مقدار تغییر شکل ارتجاعی فلزات بسیار کم است و برای اندازه‌گیری آن باید از دستگاه‌های بسیار دقیقی استفاده کرد. در صورتی که نیروی وارد به جسم از حد کشسان تجاوز کند تغییر شکل به وجود آمده در جسم، بر اثر باربرداری از بین نمی‌رود. ایجاد تغییر شکل دائم در یک ماده را تغییر شکل پلاستیکی یا موم‌سان می‌گویند. برای بدست آوردن خواص مکانیکی مواد آنها را تحت نیروهای کششی یا فشاری قرار می‌دهند و نمودار تنش - کرنش آن را بدست می‌آورند. در شکل ۴ نمودار مرسوم تنش - کرنش بدست آمده از آزمون کشش تا شکست جسم را نشان داده است.



شکل ۴: نمودار تنش - کرنش بدست آمده از آزمون کشش یک نمونه

خواص مکانیکی مهمی که جهت مطالعه خواص نانو ساختارها باید با آنها آشنا شوید به صورت زیر هستند:

- ۱- حد تناسب: نقطه‌ای است که در آن منحنی تنش - کرنش از حالت خطی خارج می‌شود. این مقدار بسیار نزدیک به حد کشسان یا تنش تسلیم است ولی چون بدست آوردن حد کشسان بسیار دشوار است، عموماً حد تناسب را محاسبه می‌کنند.
- ۲- مدول یانگ یا کشسانی.
- ۳- استحکام تسلیم: تنش است که مقدار تغییر شکل دائم در آن بسیار کم و برابر با کرنشی به مقدار 0.002 است.
- ۴- استحکام کششی: بیان گردید که اگر تنش بیشتر از حد کشسان شود، تغییر شکل موم‌سان پدید می‌آید. با ازدیاد تغییر شکل موم‌سان، استحکام جسم (عموماً فلزات) افزایش می‌یابد، به حدی که نیروی لازم برای ادامه تغییر شکل مرتباً زیاد می‌شود. در یک

لحظه بار به میزان حداکثر می رسد. حداکثر باری که هر فلز می تواند در برابر آن پایداری کند، تقسیم بر سطح مقطع اولیه جسم، استحکام کششی نام دارد.

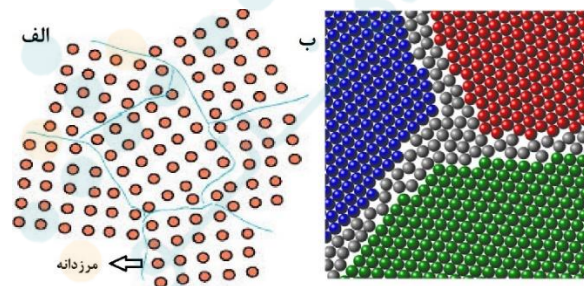
۵- تنش شکست: در فلزات شکل پذیر اگر مقدار بار از نیروی حداکثر تجاوز کند، قطر نمونه به سرعت کم می شود و در نتیجه نیروی وارد شده برای ادامه تغییر شکل به سرعت افت می کند و این به شکست نمونه منجر می شود.

۶- درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع نهایی.

اشاره به این نکته ضروری است که استحکام کششی و استحکام تسلیم، معرف استحکام ماده و درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع معرف شکل پذیری یا داکتیلیته مواد هستند.

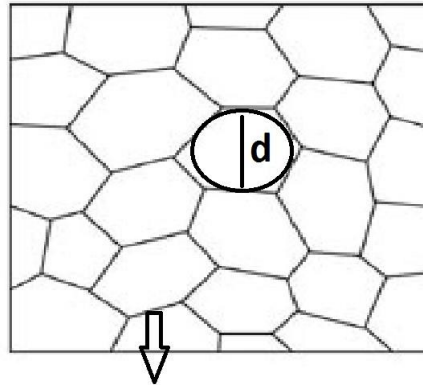
۴- مواد توده ای نانوساختار و خواص مکانیکی آنها

در فصل «چه چیزی خواص مواد را مشخص می کند؟» با مفاهیم ریزساختار، دانه و برخی از نقص های بلوری آشنا شدید. در شکل ۵-الف ریز ساختار ماده ای (برای سادگی دو بعدی در نظر گرفته شده است) را متشکل از ۶ دانه مشاهده می کنید، که هر کدام از دانه ها نظم مخصوص به خود را دارد. جهت گیری و نظم اتم ها با عبور از یک دانه به دانه دیگر ناگهان تغییر می کند. در میان نواحی جداکننده دانه ها (محل تلاقی دانه ها) نیز تعداد بسیار کمی اتم وجود دارد که نظم مشخصی نداشته و متعلق به هیچکدام از دانه های همسایه نیستند (شکل ۵-ب). به این ناحیه آشفته در شبکه بلوری و با عرض تنها چند قطر اتمی، مرزدانه می گویند. مرزدانه ها که جزء نقص های بلوری تلقی می شوند، به طور قابل توجهی ویژگی های مکانیکی مواد بلوری و به خصوص مواد نانوبلوری را تحت تاثیر قرار می دهند.



شکل ۵: الف) مرزدانه ها به عنوان نواحی آشفته جداکننده دانه ها در یک ماده چنددانه ای نشان داده شده است. ب) چینش آشفته و بدون نظم اتم های ناحیه مرزدانه در میان سه دانه نشان داده شده است.

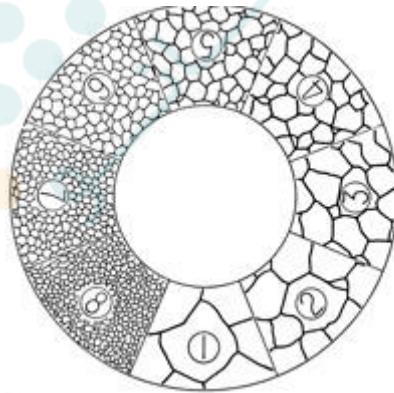
اما به چه موادی مواد نانوبلوری یا نانوکریستال می گوئیم؟ ماده ای توده ای و چندبلوری (ماده ای که تک بلوری یا تک دانه ای نیست) را همانند شکل ۲۵ در نظر بگیرید. هر کدام از چندوجهی ها در حقیقت نمایانگر یک دانه هستند (اتم های داخل دانه ها نشان داده نشده اند) و خطوطی که در شکل مشاهده می کنید همان مرزدانه ها می باشند. اگر هر کدام از دانه ها (یا بلورک ها) را به صورت تقریبی دایره ای شکل در نظر بگیریم، آنگاه می توانیم اندازه حدودی هر دانه را به صورت قطر آن دایره در نظر بگیریم. هر کدام از دانه ها اندازه ی متفاوتی دارد. با این حال می توانیم میانگین اندازه آنها را بدست آورده و به عنوان اندازه دانه ماده در نظر بگیریم.



اندازه دانه $d =$ مرزدانه

شکل ۶- تصویر یک ماده چند بلوری. تمامی خطوط داخل مربع نشان دهنده مرزدانه‌ها است. همچنین اندازه تقریبی یک دانه که برابر قطر دایره فرضی در داخل دانه است، نشان داده شده است.

فرض کنید از طریق روش‌های فیزیکی، ماده فوق را تحت نیروهایی قرار دهیم که منجر به خرد شدن دانه‌ها و تبدیل هر کدام از آنها به چند دانه گردد. در این حالت تعداد دانه‌ها نسبت به حالت اول بیشتر می‌شود. همچنین اندازه میانگین دانه‌ها نیز کاهش می‌یابد. اگر این فرآیند را آنقدر ادامه دهیم (همانند شکل ۷، به عنوان مثال ۸ مرتبه) تا تعداد دانه‌ها بسیار زیاد و میانگین اندازه دانه‌ها به ابعاد نانومتری برسد، ماده حاصله را یک ماده نانوبلوری یا نانوکریستال می‌نامیم. به این مواد همچنین مواد توده‌ای نانو ساختار (مواد بالک نانو ساختار) و یا نانومواد سه بعدی نیز می‌گویند. در بخش معرفی انواع نانومواد بر اساس تعداد ابعاد آزاد به صورت مختصر به این دسته از نانو ساختارها اشاره شده است.



شکل ۷: هشت مرحله خرد کردن دانه‌ها بر اثر وارد کردن نیروهای مکانیکی بر جسم. تعداد دانه‌ها و اندازه آنها با پیشرفت فرآیند به ترتیب افزایش و کاهش یافته است.

یکبار دیگر شکل ۷ را مشاهده کنید. با کوچک شدن دانه‌ها، میزان مرزدانه‌ها (طول کلی آنها) چه تغییری کرده است؟ همانگونه که مطمئناً به درستی بیان کرده‌اید، میزان مرزدانه‌ها به طرز محسوسه‌ای افزایش یافته است. همان طور که بیان شد، مرزدانه‌ها به طور قابل توجهی ویژگی‌های مکانیکی مواد نانوبلوری را تحت تاثیر قرار می‌دهند. این ویژگی‌ها از مواد با دانه‌های معمولی و با ترکیب شیمیایی یکسان، متفاوت هستند. اگر چه تمامی شکل‌های نشان داده شده به منظور سادگی در درک آنها به صورت دو بعدی

هستند، ولی در اجسام حقیقی و سه بعدی نیز تغییر میزان مرز دانه ها با کاهش اندازه دانه به همین منوال است . اثر مرز دانه ها در مواد نانوبلوری بیشتر خود نمایی می کند، زیرا درصد بالایی از اتم ها در مواد نانوکریستالی در مرز دانه ها قرار گرفته اند. عموماً مواد نانوبلوری دارای سختی قابل توجه، استحکام بالا و مقاومت بالا در برابر سایش هستند که این ویژگی ها برای کاربردهای گوناگون، مفید است. جدای از خواص مکانیکی، افزایش مرز دانه ها در مواد نانوبلوری منجر به تغییر برخی دیگر از خواص نانومواد همچون خواص مغناطیسی و مقاومت در برابر خوردگی نیز می گردد. در بسیاری از موارد، سختی بسیار بالا، استحکام بالا و ویژگی مقاومت به سایش مواد نانوبلوری به مرز دانه ها وابسته است. چگونگی تغییر شکل مواد و فلزات خارج از مبحث ما است، با این حال به صورت مختصر اثر مرز دانه ها را این گونه می توان بیان کرد که مرز دانه ها سدهای محکمی در برابر لغزش و حرکت برخی از نقص های بلوری (ناجایی ها) بوده که تغییر شکل و شکست مواد عموماً ناشی از حرکت آنها است .

رابطه کلی بین تنش تسلیم (که معیاری برای سنجش استحکام مواد است) و اندازه دانه توسط دانشمندانی به نام هال و پچ توسعه گردید که به رابطه هال-پچ مشهور است:

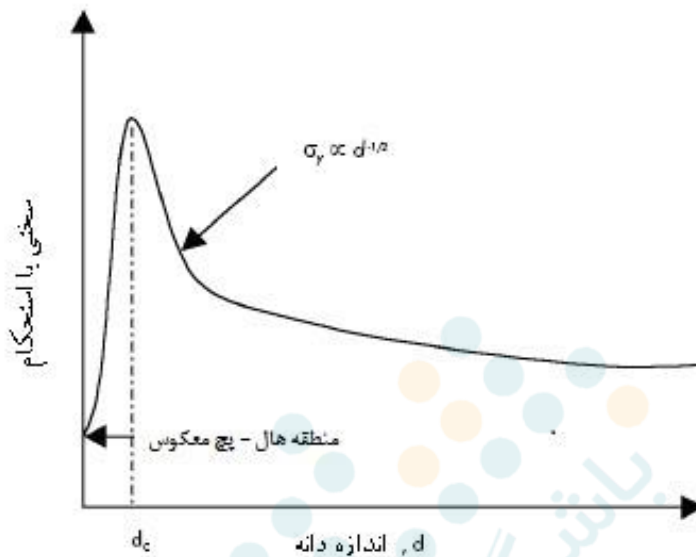
$$\sigma_0 = \sigma_i + K D^{-1/2}$$

در این رابطه σ_0 تنش تسلیم و σ_i تنش اصطکاکی است که معرف مقاومت کلی شبکه بلوری در برابر حرکت نقص های بلوری مسئول تغییر شکل مواد است K ، ثابت بوده و D نشان دهنده اندازه دانه است. این رابطه به روشنی نشان می دهد که با کاهش اندازه دانه، استحکام و تنش تسلیم مواد افزایش می یابد. به عنوان مثال، محققان استحکام تسلیم پالادیوم را در اندازه های ۵۰ میکرومتر و ۱۴ نانومتر مقایسه کرده اند. استحکام تسلیم نانوبلور ۱۴ نانومتری ۲۵۹ گیگاپاسکال بوده که بسیار بیشتر از استحکام تسلیم ۵۲ مگاپاسکالی پالادیوم با اندازه دانه ۵۰ میکرومتر بوده است. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که عموماً با افزایش استحکام مواد، قابلیت شکل پذیری و نرمی مواد کاهش می یابد .

به جای تنش تسلیم می توان سختی (مقاومت در برابر یک فرورونده یا خراشنده) و مقاومت به سایش مواد را نیز در نظر گرفت. بنابراین همانند استحکام، سختی و مقاومت به سایش مواد نیز با کاهش اندازه دانه افزایش می یابد. البته افزایش استحکام با کاهش اندازه دانه تا یک اندازه بحرانی (تقریباً در حدود ۱۰ نانومتر) ادامه پیدا می کند و پس از آن با کاهش اندازه دانه، استحکام یا سختی ماده کاهش پیدا می کند. دلیل این امر تغییر شیوه ها یا مکانیزم های تغییر شکل مواد است (شرح مکانیزم های تغییر شکل خارج از حیطه دانش مورد نیاز دانش آموزان است). در شکل ۴ نمودار تغییرات استحکام و یا سختی مواد با تغییر اندازه دانه نشان داده شده است.

کاهش مدول یانگ مواد نانو ساختار نیز از دیگر تغییرات خواص مکانیکی در مقیاس نانو است. البته این تغییر بیشتر در ابعاد کم تر از ده تا بیست نانومتر محسوس است. محققین گزارش داده اند که مدول یانگ نمونه ی سربی با اندازه دانه ۸ نانومتر حدود ۸۸ گیگاپاسکال است. این مقدار برای اندازه دانه ی بزرگ در حدود ۱۲۳ گیگاپاسکال است. یکی از دلایل ذکر شده برای این تغییر مدول یانگ را حضور تخلخل ها در ساختار مواد توده ای نانو ساختار می دانند. این تخلخل ها در موادی که از زینترینگ نانوپودرها تولید شده اند نمایان تر است. مواد توده ای نانو ساختار را می توان به غیر از روش های مکانیکی و خردایش مواد درشت، از طریق به هم فشردن و به هم چسبانیدن پودرهای حاوی نانوذرات نیز تولید کرد. به این روش اصطلاحاً زینترینگ می گویند. هنگامی که نانوپودرها را فشرده می کنند، ما بین ذرات فضاهای خالی یا تخلخل هایی پدیدار می شود که بر خواص مکانیکی محصول توده ای

نهایی موثر است. این تخلخل‌های باقیمانده می‌توانند باعث افزایش کم‌تر از حد انتظار استحکام نانو ساختار توده‌ای شوند. مدول الاستیک یا یانگ که عموماً با کاهش اندازه دانه (البته نه به ابعادی در حد چند نانومتر) تغییر محسوسی نمی‌کند، بر اثر حضور تخلخل‌های باقیمانده می‌تواند کاهش یابد. گفته می‌شود که این تخلخل‌ها همانند ترک‌هایی درون ماده عمل کرده و مدول الاستیک را کاهش می‌دهند.



شکل ۸: نمودار تغییرات استحکام و یا سختی مواد با تغییر اندازه دانه. به صورت کلی با کاهش اندازه دانه و بر اساس رابطه هال - پیچ، استحکام و سختی مواد با کاهش اندازه دانه افزایش می‌یابد. ولی هنگامی که اندازه دانه از حدی بحرانی (dc) کم‌تر گردید، استحکام و یا سختی به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. به این ناحیه منطقه هال - پیچ معکوس نیز می‌گویند

در بررسی خواص مکانیکی مواد نانو ساختار مشکلات زیادی از جمله عدم امکان تهیه نمونه مطلوب، وجود تخلخل و میکروتُرک، تنش‌های داخلی شدید، وجود ناخالصی‌ها و گازهای حبس شده و نیز عدم امکان ارزیابی برخی کمیت‌ها، نظیر اندازه‌گیری کرنش به دلیل کوچک بودن نمونه‌ها وجود دارد. وجود چنین مشکلاتی باعث شده تا داده‌های آزمایشگاهی مربوط به خواص مکانیکی برای این گروه از مواد محدود باشد.

۵- نانو ساختارهای با خواص مکانیکی فوق‌العاده ذاتی

برخی از نانو ساختارها خواص مکانیکی ذاتی فوق‌العاده‌ای به دلیل نوع ویژه ساختارشان دارند. بهترین مثال در این خصوص، نانولوله‌های کربنی است. این ساختار که از لوله شدن تک لایه‌های گرافیتی (گرافن) ایجاد شده است، خواص منحصر به فردی از جمله استحکام بالا و انعطاف‌پذیری مناسب دارد (عموماً با افزایش استحکام‌پذیری یک ماده، انعطاف‌پذیری آن کاهش می‌یابد). استحکام نانولوله‌ها می‌تواند تا ۱۰۰ برابر بیش‌تر از فولاد باشد. نکته جالب توجه آن است که این ساختار می‌تواند تا ۶ برابر سبک‌تر از فولاد باشد.

موادی که خواص مکانیکی مناسبی ندارند (همچون اکثر پلیمرها) را می‌توان از طریق کامپوزیت‌سازی با نانو ساختارها تقویت کرد. این نانو ساختارها می‌توانند انواع نانوذرات همچون نانولوله‌های کربنی باشند. پر کردن پلیمرها با نانوذرات، نانومیله‌ها یا نانولوله‌ها

باعث بهبود چشمگیر خواص مکانیکی آنها می‌شود. نانومواد خواص مکانیکی جالب توجه دیگری نیز دارند. از جمله‌ی آنها می‌توان به رفتار ابرپلاستیسیته ویژه‌ی نانومواد اشاره کرد. همچنین این مواد دارای خواص خزش و خستگی (انواع دیگری از خواص مکانیکی مواد) متفاوتی از مواد درشت معمول هستند.

منبع : مجموعه مقالات سایت باشگاه نانو

