

اصول متالورژی

۱- تقسیم بندی مواد

مواد براساس ترکیب شیمیایی به چهار دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند این چهار گروه عبارتند از:

الف) مواد فلزی: شامل آلیاژهای آهنی که حاوی درصد بالایی آهن بوده و آلیاژهای غیرآهنی که حاوی مقادیر زیادی عناصر فلزی بغیر از آهن نظیر آلومینیوم، مس، نیکل و ... می‌باشند. این مواد عمدتاً دارای قابلیت هدایت حرارتی و الکتریکی خوبی بوده و در دمای محیط شکل پذیر هستند.

ب) مواد غیز فلزی معدنی یا سرامیکی: شامل ترکیباتی از عناصر فلزی با اکسیژن (سرامیک‌های اکسیدی) کربن (کاربیدها)، نیتروژن (نیتريدها) سیلیسیم (سیلیسیدها) و ... می‌باشند.

این گروه از مواد دارای ضرایب حرارتی و الکتریکی بسیار کمی بوده لذا بعنوان عایق مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ج) **مواد مصنوعی:** این گروه از مواد از کنار هم قرار گرفتن مولکولهای زنجیره‌ای یا شبکه‌ای بزرگ مواد آلی که از کربن، هیدروژن، کلر، فلوئور، اکسیژن، نیتروژن و ... تشکیل شده اند، به وجود می‌آیند.

د) **مواد مرکب یا مختلط:** این مواد یا همان کامپوزیت‌ها از مخلوط کردن چندین ماده (حداقل دو ماده) با خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت بدست می‌آیند. در این حالت مجموعه ای از خواص خوب در کنار هم ایجاد می‌شود.

۲- خواص فیزیکی و ساختار مواد

خواص مواد به نوع آرایش و ساختمان اتمی و نیز به نوع پیوند بین آنها بستگی دارد. بعنوان مثال کربن می تواند با تغییر آرایش اتمی خود به دو صورت الماس و گرافیت که خواصی کاملاً متفاوت دارند شکل بگیرد. همچنین می توان از فولاد آبدیده یا ساده نیز نام برد. بطور کلی جامدات از لحاظ ساختار درونی در دو گروه بصورت زیر جای می‌گیرند:












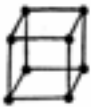


الف) **جامدات کریستالی (بلورین)** که در آنها اتم‌ها با نظم و ترتیب خاصی در سه جهت فضایی در کنار یکدیگر قرار گرفتند. فلزات و برخی از سرامیک‌ها در این گروه جای می‌گیرند.

ب) جامدات بی شکل (آمورف) که در آنها اتم ها بدون هرگونه نظم و ترتیبی کنار هم قرار گرفته اند. از مواد این گروه می توان به شیشه ها، پلاستیک ها و ... اشاره نمود. گاهی اوقات به این گروه جامدات شیشه ای هم گویند. همانطور که پیشتر نیز اشاره شد فلزات در حین انجماد بصورت بلورین و کریستالی به جامد تبدیل می شوند. این بدان معناست که اتم ها در یک نظم تکرار شونده و سه بعدی در کنار هم قرار می گیرند.

۲-۱- کریستالوگرافی

در این قسمت به بررسی ساختمان درونی جامدات منظم یا همان جامدات بلورین می پردازیم. همانگونه که قبلاً نیز گفته شد این نظم در هر سه جهت بوده و کاملاً تکرار شونده می باشد. کوچکترین واحد هر شبکه فضایی که بصورت منظم و متوازن در شبکه تکرار می شود، سلول واحد یا Unit Cell نام دارد. فقط هفت نوع شبکه فضایی وجود دارد که هر کدام از آنها ممکن است دارای زیر مجموعه هایی هم باشند. بعنوان مثال نوع مکعبی به سه شکل مکعبی ساده (SC) مکعبی مرکز دار (BCC) و مکعبی سطوح پر (FCC) یافت می شود. پس بطور کلی و با احتساب زیر مجموعه های هر نوع شبکه کلاً چهارده نوع سلول واحد که به **شبکه های براوه** موسوم هستند و در جدول ۱ نشان داده شده اند، بدست می آید.

جدول ۱: شبکه های براوه

	ساده Primitive	فاصله‌های مرکز دار Base Centred	مرکزدار Body Centred	سطوح مرکزدار Face Centred
تری‌کلینیک Triclinic				
مونوکلینیک Monoclinic				
هگزاگونال (Trigonal) (تری‌گونال)				
رُمبهدرال (Trigonal) (تری‌گونال)				
ارتورمبیک Orthorhombic				
تتراگونال Tetragonal				
مکعبی Cubic				

فلزات عموماً به سه شکل BCC , FCC , HCP متبلور می‌شوند. در هر شبکه مکعبی محورهای شبکه دارای زاویه ۹۰ درجه بوده و ابعاد نیز در هر سه درجه یکسان و برابر است. اشکال ۱ و ۲ نشان دهنده ساختارهای BCC و FCC می‌باشد.

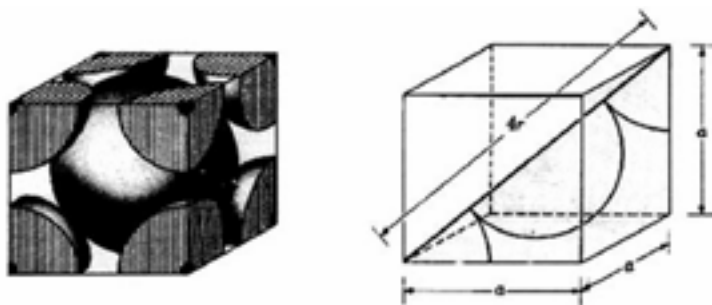
همانطور که از اشکال برمی‌آید برخی از اتم‌ها بین چند سلول واحد مشترک هستند. مثلاً در شبکه BCC صرفاً یک اتم که در مرکز واقع شده است مختص یک سلول بوده و هشت اتم گوشه بین هشت سلول مشترک می‌باشد. لذا تعداد اتم‌های موجود در هر سلول بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\text{BCC: } \left(8 \times \frac{1}{8} \right) + 1 = 2$$

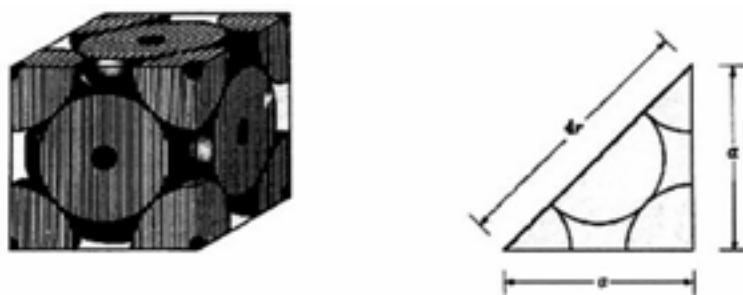
$$\text{FCC: } \left(8 \times \frac{1}{8} \right) + \left(6 \times \frac{1}{2} \right) = 4$$

از انواع فلزات با ساختار BCC می‌توان به کروم، تنگستن، مولیبدن و ... و از جمله فلزات با ساختار FCC نیز می‌توان به آلومینیوم، نیکل، مس، طلا، نقره و ... اشاره نمود.

ذکر این نکته نیز ضروری است که برخی از فلزات با تغییر دما دچار تغییر در شبکه کریستالی می‌شوند. به بیان دیگر در دماهای مختلف دارای ساختارهای متفاوت هستند به این خاصیت **آلوتروپی** گفته شده و می‌توان بعنوان مثال به آهن اشاره نمود.



شکل ۱: ساختار کرسطالی BCC



شکل ۲: ساختار کرسطالی FCC

با توجه به شکل‌های ۱ و ۲ می‌توان گفت که تمام فضای یک سلول توسط اتم‌ها اشغال نشده و مقداری فضای خالی نیز در بین آنها وجود دارد. برهمین اساس فاکتوری به نام ضریب تراکم به شکل

$$\text{ضریب تراکم} = \frac{\text{فضای اشغال شده توسط اتم‌ها}}{\text{حجم کل سلول}}$$

ضریب فوق نشان دهنده این است که چه حجمی از سلول توسط اتم‌ها اشغال شده و چقدر هم فضای خالی در بین آنها وجود دارد.

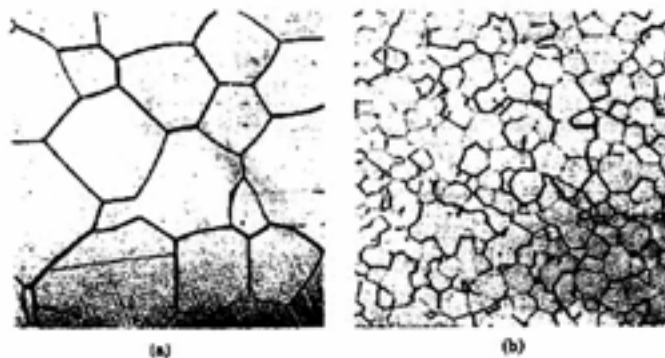
این فاکتور برای شبکه‌های BCC و FCC به ترتیب برابر $0/68$ و $0/74$ می‌باشد.

۲-۲- دانه و مرزهای دانه

کریستال‌ها در حین فرآیند انجماد در یک جهت مشترک و واحد قرار می‌گیرند. به مجموعه این کریستال‌های همسو دانه گفته می‌شود. شکل یک دانه عموماً توسط دانه‌های هم‌جوار کنترل می‌شود. در یک دانه به خصوص، تمام کریستال‌ها در یک جهت قرار می‌گیرند.

شکل ۳ نشان دهنده دانه بندی مولیبدن (a) و اکسید مولیبدن (b) با بزرگنمایی ۲۵۰ برابر می‌باشد.

اندازه دانه تاثیر مهم و بسزائی بر روی خواص مواد دارد.



شکل ۳: دانه بندی مولیبدن و اکسید آن

۲-۳- فازها و آلیاژها

آلیاژ به ماده‌ای گفته می‌شود که خواص فلزی داشته و از دو یا چند عنصر که حداقل یکی از آنها فلز می‌باشد، تشکیل شده باشد. فاز به حالتی از جسم گفته می‌شود که یکنواخت بوده و از نظر فیزیکی مشخص باشد. یکنواختی در مقیاس اتمی مدنظر می‌باشد.

۲-۴- فولادها و چدن‌ها

آلیاژ آهن و کربن در صورتی که میزان کربن کمتر از دو درصد باشد، فولاد و اگر بیش از دو درصد باشد چدن نام دارد. فولادها براساس میزان کربن به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.

الف) فولادهای کم کربن با میزان کربن ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ درصد

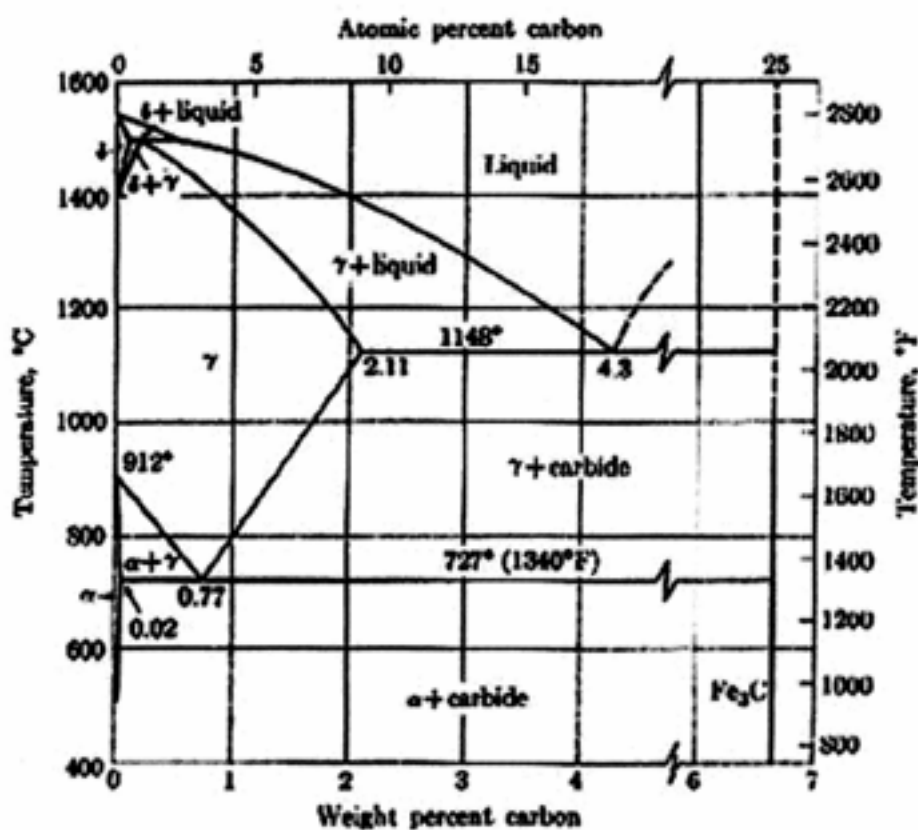
ب) فولادهای با کربن متوسط با میزان کربن ۰/۳ تا ۰/۵۵ درصد

ج) فولادهای پر کربن با میزان کربن ۰/۶ تا ۱/۳ درصد

۲-۴-۱- نمودار فاز تعادلی آهن - کاربید آهن

دیاگرام فاز $Fe - Fe_3C$ (آهن - کاربید آهن) در شکل ۴ آورده شده است. این دیاگرام نشان دهنده دما و شرایط دمایی و ترکیبی لازم برای پایداری هر فاز در

حالت تعادلی می‌باشد. قابل تذکر آن که درصد کربن تا ۶/۶۷ درصد روی محور کربن یعنی تا درصدی از کربن که با کاربید آهن Fe_3C برخورد می‌شود مورد نظر قرار دارد.



شکل ۴: نمودار تعادلی آهن - کاربید آهن

آهن خالص تا دمای ۹۱۲ درجه سانتیگراد دارای ساختار BCC بوده ولی از این دما به بالا تغییر ساختار داده و به FCC تبدیل می‌شود. این ساختار تا دمای ۱۴۰۰

درجه سانتیگراد پایدار بوده و از این پس مجدداً ساختار BCC را خواهیم داشت تا دمای ۱۵۳۹ درجه سانتیگراد که آهن جامد به مذاب تبدیل می‌شود. با بررسی آهن خالص به سه فاز جامد آلفا (α)، گاما (γ) و دلتا (δ) در سمت چپ نمودار برخورد می‌شود. اگر آهن آلفا از ۲۰ درجه سانتیگراد به آرامی حرارت داده شود باید انتظار داشت که در ۹۱۰ درجه سانتی گراد به آهن گاما و گاما در ۱۳۹۳ درجه سانتیگراد به دلتا استحاله و نهایتاً دلتا در ۱۵۳۸ درجه سانتی گراد به آهن مذاب تبدیل شود.

تحقیقات اولیه نشان داده بود که نزدیک به ۷۶۰ درجه سانتیگراد آهن فرومغناطیس بودن خود را از دست می‌دهد و این پدیده را به مثابه استحاله فازی محسوب کرده و به آهن در حرارت بین ۷۶۰ تا ۹۱۰ درجه سانتیگراد علامت بتا (β) داده بودند. بعداً چنین دریافت شد که این تغییر در خواص مغناطیسی، استحاله فازی نیست بلکه به سبب تغییر در همسوئی اتمهای آهن است. موضوع بعد از آن که به کمک اشعه ایکس معلوم گردید که هر دو فاز آلفا و دلتا دارای ساختار مشابه اتمی BBC هستند، ساده تر شد. به ویژه آنکه تأیید گردید ثابت شبکه (Lattice Parameter) هر دو فاز نیز با احتساب انبساط حرارتی برابر هستند.

فاز آلفا دارای شبکه FCC است و بنابراین از نظر اتمی متراکم‌تر است. در استحاله آلفا به گاما انقباض حجمی در حدود یک درصد و در تغییر گاما به دلتا انبساطی در حدود ۵/۰ درصد اتفاق می‌افتد. نکته قابل استنتاج با اهمیت از نمودار تعادل فوق این است که حداکثر میزان کربن محلول در گاما در حرارت ۱۱۳۰ درجه سانتیگراد ۲

درصد است که خود چندین برابر حداکثر قابلیت انحلال کربن در آلفا یعنی ۰/۰۲۵ درصد در حرارت ۷۲۳ درجه سانتیگراد می‌باشد. اساس این اختلاف اندازه حفره‌های بین اتمی در واحد شبکه های BCC و FCC است.

علاوه بر محلولهای جامد آهن و کربن، فاز جامد دیگری که در نمودار وجود دارد کاربید آهن Fe_3C است که سمانتیت (Cementite) نیز نامیده می‌شود.

از نمودار تعادل آهن چنین استنباط می‌شود که در ۲۰ درجه سانتیگراد فاز سمانتیت در کلیه آلیاژهای محتوی از ۰/۰۰۶ تا ۶/۶۷ درصد کربن برخورد می‌شود. برخلاف آهن با ساختارهای BCC و FCC که هر دو قابل انعطاف (بیش از ۴۰٪ ازدیاد طول نسبی) و نرم (عدد سختی برینل بین ۱۰۰ تا ۱۵۰) هستند، سمانتیت شکننده (صفر درصد ازدیاد طول پلاستیک) و سخت (عدد سختی برینل بیش از ۷۰۰ یا عدد سختی ویکرز ۱۲۰۰) است.

فاز γ یا آستنیت دارای حداکثر حلالیت ۲/۱۱ درصد برای کربن بوده و در دماهای بالای ۷۲۳ درجه سانتیگراد پایدار می‌باشد. لذا این فاز در دمای اتاق دیده نمی‌شود. فاز α یا فریت این فاز توانایی انحلال حداکثر ۰/۰۲۵ درصد کربن را در خود دارد. فازی نرم با قابلیت شکل‌پذیر خوب می‌باشد.

Fe_3C یا سمنتیت فازی با میزان کربن ۶/۶۷ درصد که یا سختی بسیار بالا بوده و از طرفی نیز ترد می‌باشد.

۲-۴-۲- عملیات حرارتی فولادها

عملیات حرارتی بطور کلی شامل گرم کردن فولاد تا درجه حرارت معین، نگهداری در آن درجه حرارت و سپس سرد کردن فولاد با سرعت‌های مختلف می‌باشد. هدف از این عملیات تغییر ساختمان داخلی فولاد و تغییر در خواص آن می‌باشد.

هریک از فرآیندهای عملیات حرارتی شامل مراحل ذیل می‌باشد:

- حرارت دادن فولاد تا درجه حرارت مقرر

- نگهداری فولاد به مدت کافی در درجه حرارت مقرر به منظور اشباع حرارتی و تکمیل تغییرات ساختمانی.

- سرد کردن با سرعت معین.

سرعت سرد کردن بستگی به ترکیب شیمیایی و شکل و اندازه فولاد دارد.

بازپخت فولادها

عملیات بازپخت به منظور کاهش سختی فلزات یا آلیاژها انجام می‌گیرد، ضمن اینکه باعث حذف تنش‌های داخلی شده و ساختمان داخلی قطعه را تصحیح می‌نماید. این عملیات منجر به بهبود قابلیت ماشین‌کاری نیز می‌گردد و امکان تغییر شکل قطعه را در طول سخت کردن آن از بین می‌برد.

نرماله کردن فولادها

عملیات نرماله کردن به منظور تصحیح ساختمان فولادی که بیش از حد حرارت داده شده، هم چنین برای از بین بردن تنش‌های داخلی و بهبود قابلیت ماشین‌کاری

فولادهای کربنی ساختمانی و فولادهای کم آلیاژ بکار می‌رود. این فرایند شامل حرارت دادن قطعه فولادی تا منطقه آستنیت، نگهداری به اندازه کافی و سپس سرد کردن در کوره عملیات حرارتی می‌باشد.

نرماله کردن شامل حرارت دادن قطعه فولادی تا منطقه آستنیت، نگهداری به اندازه کافی و سپس سرد کردن در هوا می‌باشد. هنگامیکه افزایش عمق سختی در فولادهای کربنی لازم گردد، عملیات نرماله کردن روی آنها انجام می‌شود.

سخت کردن فولادها

عملیات سخت کردن به منظور افزایش سختی فولادها انجام می‌گردد. برای سخت کردن، فولاد را آستنیت کرده و سپس آنها را سریعاً سرد می‌کنند. سرد کردن فولادها در محیط‌های آب، روغن و هوا انجام می‌گیرد. سرعت سرد کردن و انتخاب محیط سردکننده بستگی به ترکیب شیمیایی، اندازه شکل قطعه دارند.

بازگشت فولادها

فرایند بازگشت به منظور کاهش یا حذف تنش‌های داخلی، نرم کردن قطعه فولادی سخت شده و افزایش قابلیت شکل‌پذیری آن بکار می‌رود.

فرآیند بازگشت شامل گرم کردن قطعه در زیر درجه حرارت آستنیت و نگهداری قطعه در آن درجه حرارت به مدت مقرر و سپس سرد کردن قطعه می‌باشد. برای بازگشت، قطعه را در حمام‌های روغن، نیترات سدیم (شوره) یا قلیا حرارت می‌دهند.

همچنین می‌توان قطعه را در کوره با اتمسفر هوا بازگشت داد. کل زمان نگهداری در کوره نباید از ۳۰ الی ۴۰ دقیقه کمتر باشد. بطور متوسط زمان نگهداری در کوره برای بازگشت بایستی ۲ تا ۳ دقیقه به ازاء هر میلی‌متر از مقطع قطعه باشد. هنگامیکه تعداد قطعات زیاد و وزن آنها هم زیاد باشد در این صورت زمان نگهداری در کوره ۱/۵ الی ۲ مرتبه بیشتر از موقعی است که تنها یک قطعه در کوره باشد. قطعه پس از گرم شدن (بازگشت) در کوره به کمک هوا سرد می‌گردد.

۲-۴-۳- عناصر آلیاژی

عناصر آلیاژی به منظور افزایش و بهبود خواص مواد به آنها اضافه می‌شوند. افزودن عناصر مذکور به فولادها عموماً باعث افزایش سختی و استحکام آلیاژ مذکور می‌شود. از جمله عناصر آلیاژی پر استفاده در فولادها می‌توان به کروم، تنگستن، وانادیوم، مولیبدن، نیکل، منگنز و سیلیکون اشاره نمود. این فلزات به صورت زیر در فولادها قرار می‌گیرند:

الف) محلول جامد که در این حالت عنصر آلیاژی در داخل شبکه کریستالی فولاد قرار می‌گیرد.

ب) ترکیب شیمیایی با کربن و تشکیل کاربیدها.

ج) تشکیل اکسید با ناخالصی‌ها و در نهایت خالص شدن فولاد.

گوگرد و فسفر دو عنصر شدیداً مضر برای فولادها هستند. مقادیر آنها نباید بیش از ۰/۰۳ درصد باشد.

۳- خواص مکانیکی مواد و الاستیسیته

در این قسمت به معرفی برخی از اصطلاحات در رابطه با خواص مکانیکی مواد می‌پردازیم:

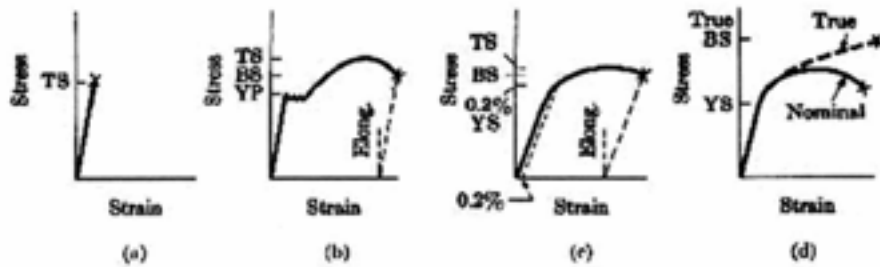
تغییر فرم در فلزات به دو صورت می‌باشد. تغییر فرمهایی که بعد از برداشتن بار، فلز به حالت اولیه خود برمی‌گردد، به اینگونه تغییر فرم‌ها **تغییر شکل الاستیک** گفته می‌شود. ولی گاهی اوقات میزان تغییر طول زیاد بوده و فلز پس از برداشته شدن بار کاملاً برنگشته و مقداری تغییر فرم دائمی در آن ایجاد می‌شود. به اینگونه تغییر فرمها، **تغییر شکل پلاستیک** اطلاق می‌شود. جدول ۲ بطور خلاصه به معرفی برخی خواص مکانیکی مواد پرداخته است.

جدول ۲: معرفی برخی خواص مکانیکی مواد

Property, or characteristic	Symbol	Definition (or comments)	Common units	
			English	SI
Stress	σ	Force/unit area (F/A)	psi* lb _f /in. ²	pascal* (Nt/m ²)
Strain	ϵ	Fractional deformation ($\Delta L/L$)	—	—
Elastic modulus	E	Stress/elastic strain	psi	pascal
Strength		Stress at failure	psi	pascal
Yield	YS	Resistance to plastic deformation		
Tensile	TS	Maximum strength (based on original dimensions)		
Ductility		Plastic strain at failure	—	—
Elongation	El	$(L_f - L_0)/L_0$		
Reduction of area	R. of A.	$(A_0 - A_f)/A_0$		
Toughness		Energy for failure by fracture	ft-lb	joules
Hardness‡		Resistance to plastic indentation	Empirical units	

الاستیسیته به توانایی فلز برای بازگشت به حالت اولیه پس از برداشتن و از بین رفتن تنش گفته می‌شود. تغییر فرم موقعی حاصل می‌شود که ماده تحت اعمال نیرو قرار بگیرد. مقدار تغییر شکل در واحد طول را **کرنش** و مقدار نیرو بر واحد سطح را نیز **تنش** می‌نامند. نمودار تنش - کرنش بطور شماتیک در شکل ۵ آورده شده است.

استحکام به مقدار تنشی گفته می‌شود که لازم است تا ماده بشکند. **دکتیلیته** به مقدار کرنش در نقطه شکست اطلاق می‌شود. **چقرمگی** نیز مقدار انرژی جذب شده توسط ماده تا شکست می‌باشد. **سختی** به مقاومت ماده در برابر فرو رفتن جسمی در سطح آن اطلاق می‌گردد.



شکل ۵: نمودار تنش - کرنش مواد

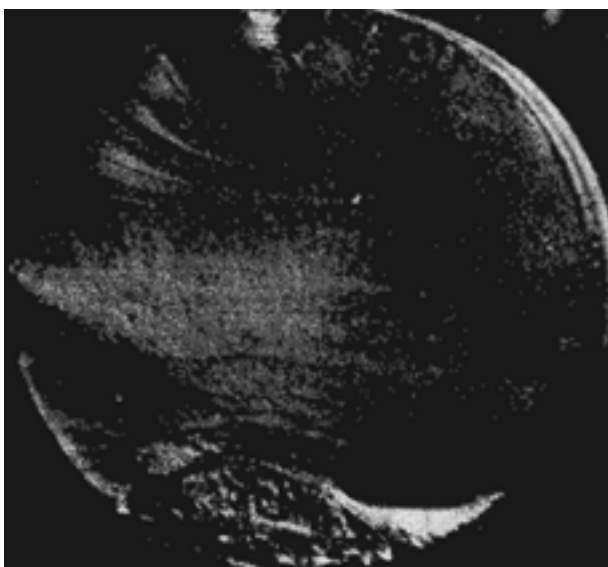
۳-۱- شکست در فلزات

نقطه شکست در پایان منحنی تنش - کرنش مواد واقع شده است. دو فرآیند مختلف که خستگی و خزش نامیده می‌شوند بعد از یک مدت بار گزاری بر روی قطعات اتفاق

می‌افتد که هر دوی آنها به شکست قطعه خواهد انجامید.

خزش به تغییر طول آهسته (تغییر کرنش آهسته) تحت بار ثابت در دماهای بالا اطلاق می‌شود. وقتی که کرنش افزایش می‌یابد، سطح مقاوم در برابر بار کاهش یافته و لذا تنش افزایش می‌یابد. کاهش مقدار سطح مقطع در اثر افزایش طول به دلیل ثابت بودن حجم قطعه می‌باشد. زمان لازم برای از بین رفتن و شکستن احتمالی قطعه با افزایش دما و تنش اعمالی، کاهش می‌یابد.

خستگی، از بین رفتن ماده تحت بار سیکلی می‌باشد. تنش‌هایی که ماده در حالت سیکلی می‌تواند تحمل کند بسیار کمتر از تنش‌ها در حالت ایستا می‌باشد. ترک‌های خستگی معمولاً از سطح قطعه در جایی که خمش و یا پیچش بیشترین تنش را ایجاد کرده و یا در مکان‌هایی که به دلایلی باعث تمرکز تنش می‌شود، شروع می‌گردد.



شکل ۶: سطح شکست در
اثر پدیده خستگی

لذا حد تحمل شدیداً به شرایط تمام کاری سطحی حساس می‌باشد. جدول ۳ نشان دهنده اثر شرایط سطح قطعه بر حد تحمل آن در فولاد SAE ۴۰۶۳ می‌باشد.

جدول ۳: اثر شرائط سطحی قطعه بر خواص مکانیکی در فولاد SAE ۴۰۶۳

Type of finish	Surface roughness,		Endurance limit,	
	$\mu\text{in.}$	μm	psi	MPa
Circumferential grind	16-25	0.4-0.6	91,300	630
Machine lapped	12-20	0.3-0.5	104,700	720
Longitudinal grind	8-12	0.2-0.3	112,000	770
Superfinished (polished)	3-6	0.08-0.15	114,000	785
Superfinished (polished)	0.5-2	0.01-0.05	116,750	805

۴- آزمون‌های غیر مخرب

آزمون‌های غیر مخرب به آن دسته از آزمایشاتی اطلاق می‌شود که کیفیت قطعه را بدون معیوب کردن آن مشخص می‌کند. از بین روشهای مخلف آزمون‌های غیر مخرب، آزمایش ذرات مغناطیسی، جذب رنگ، رادیوگرافی و التراسونیک بیشترین استفاده را دارند.

آزمون ذرات مغناطیسی از جمله آزمایشات غیر مخربی می‌باشد که برای پیدا کردن ناهمگونی‌ها و عیوب نزدیک سطح در مواد فرومگنت مناسب می‌باشد. روش کار به این صورت است که در ابتدا قطعه مغناطیسی شده سپس ذرات مگنت بر روی سطح آن ریخته می‌شود. در حالتی که قطعه در جهت صحیح در میدان مغناطیسی

قرار گرفته باشد یک ناهمگونی باعث نشت در میدانی که ذرات را جذب کرده و نگه می‌دارد، شده و عیب نمایان می‌شود.

آزمون جذب رنگ برای آشکار کردن عیوبی که به سطح قطعه رسیده اند (عیوب سطحی) بکار گرفته می‌شود. قطعه قبل از اعمال آزمون باید کاملاً تمیز شود سپس مایع جذب برای روی قطعه قرار داده می‌شود. زمانی حدود ۱ تا ۳۰ دقیقه برای جذب شدن مایع نیاز می‌باشد. مقدار اضافی مایع باید با دقت از روی سطح برداشته و پاک شود. پس از آن ماده‌ای بنام Developer که معمولاً پودر ریزی مانند تالک که در یک مایع ریخته شده است می‌باشد، به منظور بیرون آوردن مایع جذب از داخل عیوب، بر روی سطح قرار داده می‌شود. لذا مکان، شکل و اندازه تقریبی عیوب نمایان می‌شود.

در **آزمون رادیوگرافی** از اشعه‌های X و گاما برای آشکار کردن عیوب، حفرات، ناخالصی‌ها و ... استفاده می‌کند.

اشعه X در طول موجهای مختلف زمانی حاصل می‌شود که یک الکترون پر سرعت در یک محفظه (تیوپ) خلاء بطور ناگهانی متوقف شود. با افزایش ولتاژ محفظه طول موجها اشعه کوتاهتر شده و شدت اشعه بیشتر می‌شود. اشعه گاما در یک طول موج خاص در هسته عناصر رادیو اکتیو مانند کوبالت - ۶۰ و یا ایریدیوم - ۱۹۲ بدست می‌آید.

در روش **التراسونیک** با استفاده از انرژی لرزش مکانیکی فرکانس بالا برای آشکارسازی و تعیین موقعیت عیوب و ناهمگونی‌های ساختمان مواد و همچنین اندازه‌گیری ضخامت در بسیاری از انواع مواد استفاده می‌شود.

یک پالس الکتریکی در دستگاه آزمون تولید شده و توسط یک مبدل به لرزش مکانیکی تبدیل می‌شود. این لرزش توسط یک پروب به درون قطعه فرستاده می‌شود. در این حالت عبور، پخش یا بازگشت انرژی التراسونیک شرایط درونی ماده را مشخص می‌نماید. صوت باز تابیده شده مجدداً توسط مبدل‌هایی، به پالس‌های الکتریکی تبدیل شده و به داخل دستگاه برمی‌گردد و تقویت می‌شود. پس از آن انرژی بازگشتی توسط یک تیوب اشعه کاتدی نمایش داده می‌شود.