جلسه سوم

۱. آشنایی با پدیده خستگی

در بسیاری از موارد قطعات ماشین بر اثر وارد آمدن تنش ها تکراری و نوسانی می شکند. با انجام تحلیل ها و تحقیقات دقیق، مشخص شده که بیش ترین مقدار تنش تکراری یا نوسانی وارد بر قطعه که باعث شکست ان شده است کمتر از استحکام نهایی آن است و در بسیاری موارد حتی کمتر از استحکام تسلیم قطعه می باشد. مهمترین ویژگی این شکست ها این است که بر اثر تنش هایی که به دفعات زیاد تکرار شده اند، رخ می دهد. به همین دلیل اینگونه شکست ها را شکست ناشی از خستگی یا به طور خلاصه «شکست خستگی» می نامند.شکست خستگی به صورت کاملا ناگهانی اتفاق می افتد و در قطعات شکل پذیر مانند شکست استاتیکی در قطعات ترد بدون تغییر شکل رخ می دهد و به همین دلیل بسیار خطرناک و خسارت بار است.

- مقطع قطعه ای که به صورت ترد شکسته شده مشابه قطعه ای است که بر اثر خستگی شکسته شده است.

- شکست ناشی ار خستگی در سه مرحله رخ می دهد که عبارتند از : در مرحله ی اول، یک یا چند ریز ترک بر اثر تغییر شکل پلاستیک دوره ای آغاز می شود؛ در مرحله ی دوم، ریز ترک ها گسترش یافته و در هم می آمیزند و سطوح شکست فلات مانندی را به وجود می آورند. مرحله ی سوم در طی سیکل تنش نهایی، در موقعی که ماده ی باقی مانده توان تحمل بارهای وارد را ندارد اتفاق می افتد.

- نکته: ترک در امتداد قائم بر صفحات تنش کششی ماکزیمم گسترش پیدا می کند.

۲. روش های بررسی پدیده خستگی

سه روش عمر خستگی وجود دارد که در طراحی و تحلیل قطعات ماشین به کار می روند. این سه روش عبارتند از:

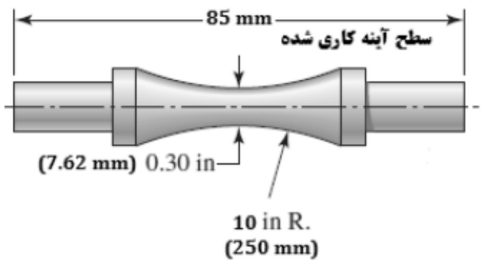
۱- روش تنش عمر ۲- روش کرنش-عمر ۳- روش مکانیک شکست الاستیک خطی.

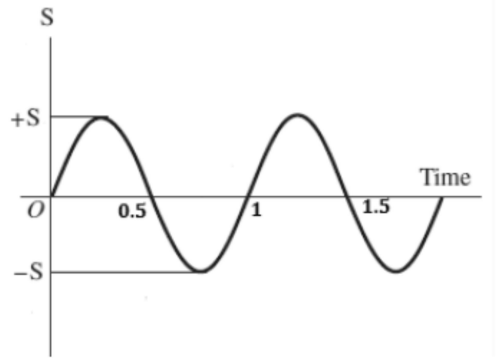
- در این روش ها عمر قطعه ی ماشین عبارت از تعداد سیکلی(N) از بار معین است که این قطعه می تواند تا لحظه ی شکست تحمل کند.
- اگر قطعه ای در محدوده ی $1\leq N\leq 10^3$ سیکل باشد /ان را کم تناوب ولی اگر یک قطعه پس از تعداد سیکل $N> 10^3$ بشکند، شکست ان را شکست پر تناوب می نامند.
- روش تنش- عمر کم دقت ترین روش است، به ویژه اگر سیکل بار کمتر باشد. اما این روش آسان ترین روش برای طراحی قطعات است.
- روش کرنش-عمر که بر مبنای تحلیل تغییر شکل های پلاستیک در نواحی موضعی قطعه است برای قطعات با عمر کم متناوب است.
- در روش مکانیک شکست فرض می شود که ترک در ابتدا در ماده بوده و آشکار سازی شده است.گسترش این ترک را بر حسب شدت تنش محاسبه می کنند. این روش کاربردی ترین روش برای طراحی سازه های بزرگ است. زیرا برای انجام محاسبات می توان از نرم افزارهای کامپیوتری برنامه بررسی پریودیک استفاده کرد.
- در این جزوه به بررسی روش تنش- عمر می پردازیم.

۳. آزمایش خستگی

برای بدست آوردن مقاومت مصالح تحت بارهای نوسانی و تکراری، ۴ نوع آزمایش انجام می شود که عبارتند از کشش، پیچش، خمش و ترکیبی از این ها. در هر یک از این روش ها نمونه تحت بار متناوب با مقدار معین قرار گرفته و در حالیکه تعداد تناوب شمرده می شود، قطعه تا مرحله ی شکست پیش می رود. یکی از دستگاههای کاربردی آزمایش خستگی، دستگاه R.R Moore می باشد. برای انجام آزمایش با این دستگاه نمونه تحت بار معینی قرار می گیرد، سپس با روشن شدن موتور تیر(همان نمونه) شروع به گردش می کند ولی وزنه ها در جای خود ثابت اند. دراین روش دستگاه یک گشتاور خمشی خالص را با سرعت بالا به نمونه ای که سطح آن آینه کاری (سطح عاری از هرگونه تمرکز تنش ناشی از پیوستگی های سطح) شده و دارای سطح مقطع دایره ای است اعمال می کند در حالیکه نمونه درحال گردش است یک نقطه روی سطح به طور پیوسته تحت کششی ماکزیمم و سپس تنش فشاری می نیمم قرار میگیرد. تا این کار تا جایی ادامه می یابد که قطعه بشکند. با شکسته شدن قطعه اتصال شمارنده قطع می شود و نتیجه ی آزمایش عمر تحت تنش اعمالی معین می باشد.

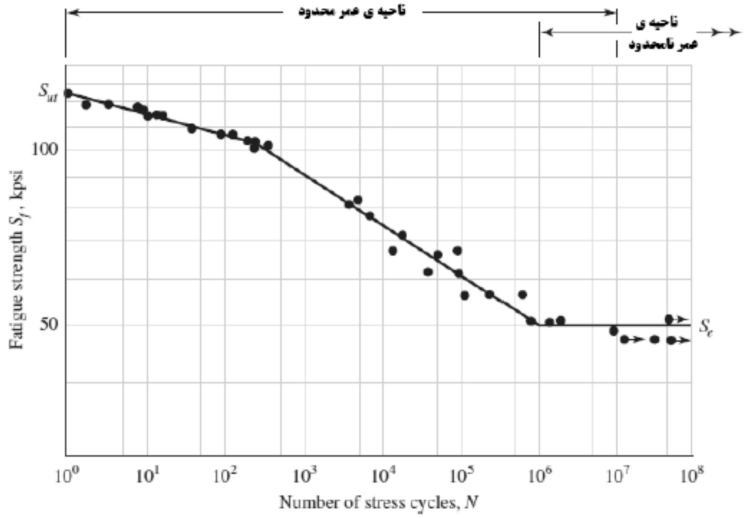
اندازه های استاندارد یک نمونه به شرح زیر است:





۴. نمودار تنش – عمر (S-N)

برای رسم نمودار S-N آزمایش خستگی را به ازای بارهای مختلف چند بار انجام می دهیم.سپس داده ها را روی نمودار مشخص کرده و با استفاده از میان یابی نمودار رسم می کنیم.این نمودار مربوط به یک نمونه فولادی است.



- توجه داشته باشید، برای آلیاژهای آلومینیوم عمر نامحدود وجود ندارد.

۵. حد تحمل(Endurance Limit)

در طراحی قطعات با عمر نامحدود حد تحمل مهم است.برای به دست آوردن حد تحمل استفاده از جدول زیر پیشنهاد می شود.

بار گذاری خمشی معکوس شونده:

فولاد ها :

$$S'_e = 0.5\,S_u \qquad S_u < 1400\,Mpa(200\,ksi)$$
$$S'_e = 700\,Mpa(200ksi) \qquad S_u \geq 1400\,Mpa(200\,ksi)$$

آهن ها:

$$S'_e = 0.4\,S_u \qquad S_u < 400\,Mpa(60\,ksi)$$
$$S'_e = 160\,Mpa(24ksi) \qquad S_u \geq 400\,Mpa(60\,ksi)$$

آلومینیوم ها:

$$S'_e = 0.4\,S_u \qquad S_u < 330\,Mpa(48ksi)$$
$$S'_e = 130\,Mpa(19ksi) \qquad S_u \geq 330\,Mpa(48\,ksi)$$

آلیاژهای مس:

$$S'_e = 0.4\,S_u \qquad S_u < 280\,Mpa(40\,ksi)$$
$$S'_e = 100\,Mpa(14ksi) \qquad S_u \geq 280\,Mpa(40\,ksi)$$

بارگذاری محوری

$$S'_e = 0.45 S_u \qquad S_u \leq 600\,Mpa$$
$$S'_e = 275\,Mpa \qquad S_u > 600\,Mpa$$

فولادها: $S'_e = 0.45\,S_u$

بارگذاری پیچشی

فولاد ها: $S'_e = 0.29\,S_u$

آهن ها: $S'_e = 0.32\,S_u$

آلیاژهای مسی: $S'_e = 0.22\,S_u$

و همچنین

فولادها: $S'_e = 0.67\,S_u$

۷. ضرایب تصحیح حد تحمل

نمونه ی آزمایش تیر چرخان با دقت زیادی ساخته شده و نباید انتظار داشته باشیم حد تحمل یک قطعه مکانیکی واقعی دقیقا برابر با حد تحمل نمونه باشد بنابراین از ضرایب تصحیح استفاده می کنیم. S'_e: حد تحمل نمونه آزمایشی، S_e: حد تحمل قطعه واقعی

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

K_a: فاکتور اصلاحی صافی سطح — K_d: فاکتور اصلاحی درجه حرارت

K_b: فاکتور اصلاحی اندازه — K_d: فاکتور اصلاحی تمرکز تنش

K_c: ضریب تصحیح بار — K_f: ضریب اثرات دیگر

- توجه: تمامی ضرایب تصحیح حد تحمل اعدادی کوچکتر یا مساوی ۱ هستند.

K_a: ضریب تصحیح شرایط سه قطعه

در اینجا ۲ روش برای محاسبه K_a معرفی می شود.

۱- $k_a = A\, S_{ut}^{b}$

که در آن A وb ضرایب ثابت هستند که از جدول زیر با توجه به مشخصات سطح به دست می آیند:

پرداخت سطح	ضریب A MPa	(KSi)	B
سنگ زنی شده	1.58	(1.34)	-0.085
ماشین کاری یا سرد کشیده	4.51	(2.7)	-0.265
نورد گرم شده	57.7	(14.4)	-0.718
آهنگری شده	272.0	(39.9)	-0.995

۲- استفاده از نمودار زیر:

ضریب اندازه(K_b)

نکته: برای بار گذاری محوری $K_b=1$ در نظر گرفته می شود.

در اینجا هم دو روش برای محاسبه ی K_b ارائه می شود:

۱.

(اینچی)

$$k_b = 0.879 d^{-0.107} \qquad 0.11 \le d \le 2in$$
$$k_b = 0.91 d^{-0.157} \qquad 2 < d \le 10in$$

(متریک)

$$k_b = 1.24 d^{-0.107} \qquad 2.79 \le d \le 51mm$$
$$k_b = 1.51 d^{-0.157} \qquad 51 < d \le 254mm$$

۲.

$$k_b = 0.85 \quad (13mm < D \le 50mm) \qquad (\frac{1}{2} < D \le 2in)$$
$$k_b = 0.70 \quad (D > 50mm) \qquad (D > 2in)$$

ضریب تصحیح بار(K_c):

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{خمشی} \\ 0.85 - 0.9 & \text{محوری} \\ 0.5 - 0.8 & \text{پیچشی} \end{cases}$$

ضریب تصحیح دما(K_d):

دو روش برای محاسبه K_d ارائه می شود:

۱-
$$K_d = \begin{cases} 1 & (T \le 450^\circ c) \quad 840^\circ F \\ 1 - 0.0058(T - 450) & (450^\circ c < T \le 550^\circ c) \\ 1 - 0.0032(T - 840) & 840^\circ F < T \le 1020^\circ F \end{cases}$$

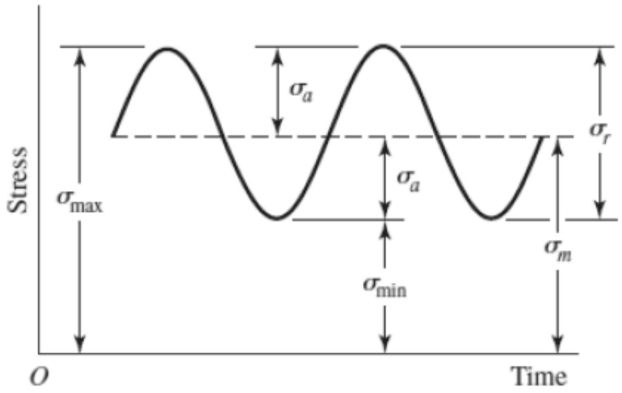
۲- ضریب تصحیح دما $k_d = \dfrac{S_T}{S_{RT}}$ دما بر حسب سانتیگراد

دما بر حسب سانتیگراد	ضریب تصحیح دما
20-250	1
300	0.975
350	0.943
400	0.900
500	0.768
600	0.549

- حال K_e ضریب تمرکز تنش را به صورت زیر محاسبه می کنیم:

$$k_e = \frac{1}{k_f} \qquad or \qquad k_e = \frac{1}{k_{fs}}$$

۹. مشخصات تنش های نوسانی:



σ_{min}: تنش مینیمم

σ_{max}: تنش ماکزیمم

σ_α:معرف بارگذاری خستگی

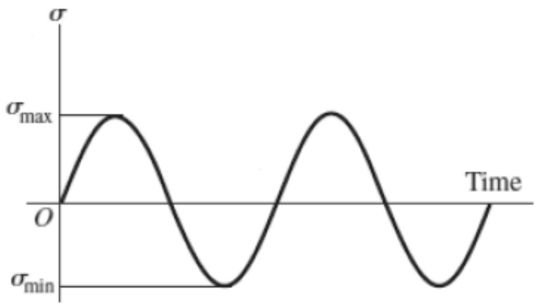
σ_m: معرف بارگذاری استاتیکی

σ_r: حدود تغییرات تنش

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{max} + \sigma_{min}) \quad ; \quad \sigma_\alpha = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min})$$

نسبت تنش: $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$; $A = \frac{\sigma_\alpha}{\sigma_m}$

- وقتی تنش به طور کامل معکوس شونده است $R=1\ (\sigma_m=0)$ ولی $A=\infty$ می شود.



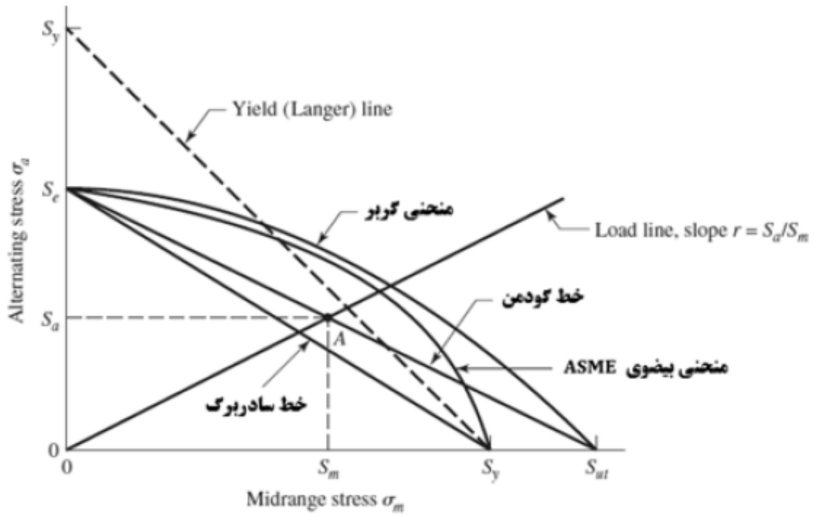
$\sigma_m = 0;$ $\quad \sigma_{min} = -\sigma_a$

$\sigma_{max} = \sigma_a;$ $\quad R = -1$

۱۰. ملاک های شکست خستگی برای تنش های نوسانی:

تئوری شکست :	گود من (Good Man)	گربر (Gerber)	ASME
معادله :	$\frac{\sigma_a}{S_e}+\frac{\sigma_m}{S_{ut}}=1$	$\frac{\sigma_a}{S_e}+\left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2=1$	$\left(\frac{\sigma_a}{S_e}\right)^2+\left(\frac{\sigma_m}{S_y}\right)^2=1$

تئوری تسلیم :	سادربرگ (Soderberg)	گودمن اصلاح شده
معادله :	$\frac{\sigma_a}{S_e}+\frac{\sigma_m}{S_y}=1$	$\begin{cases}\frac{\sigma_a}{S_e}+\frac{\sigma_m}{S_{ut}}=1 & for\ \frac{\sigma_a}{\sigma_m}\geq\beta\\ \frac{\sigma_a+\sigma_m}{S_y}=1 & for\ \frac{\sigma_a}{\sigma_m}\leq\beta\end{cases}$



توجه: در معادله ی گود من اصلاح شده

$$\beta=\frac{S_e(S_{ut}-S_y)}{S_{ut}(S_y-S_e)}$$

مثال:

۲- میله ای توپر به مقطع ربعی و یک سرگیر دارد مفروض است. طول میله 0.8m است و بر سر آزاد ان بار قائم کاملا معکوس شونده به مقدار ±1KN وارد می شود. جنس میله فولاد نورد گرم AISI 1045 است. لازم است این میله بار وارد شده را به تعداد 10^4 سیکل با ضریب اطمینان ۱.۵ تحمل کند. ابعاد مقطع مربعی این میله چقدر باید باشد؟ از تمرکز تنش موجود در انتهای میله صرفنظر کنید.

حل: برای فولاد گرم کشیده AISI 1045 : $S_y = 310 mpa$, $S_{ut} = 570 mpa$

$$F = \pm 1 kN$$

$$S'_e = 0.504 S_{ut} = 287.3 mpa$$

$$\sigma_{max} = -\sigma_{min} = \frac{MC}{I} = \frac{M(b/2)}{b(b^3)/12}$$

$$\sigma_{max} = -\sigma_{min} = \frac{6M}{b^3}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \sigma_{max} = \frac{6M}{b^3} = \frac{4800}{b^3}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 0$$

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f s'_e = 0.606 \times 0.85 \times 287.3 = 148 mpa$$

$$k_a = 57.7 (570)^{-0.718} = 0.606$$

برای محاسبه K_b فرض می کنیم $13^{mm} \le d_e \le 50^{mm}$ باشد و پس از محاسبه b فرض را چک می کنیم.

$$k_b = 0.85$$

$$S_f = C N^b \ , \ C = \frac{(0.8 S_{ut})^2}{S_e} = 1405 \ ; \ b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{0.8 S_{ut}}{S_e}\right)$$

$$S_f = 1405 \times (10^4)^{-0.163} = 313 mpa \quad = -0.163$$

از معیار گودمن استفاده می کنیم

$$\frac{\sigma_a}{S_f} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \rightarrow \sigma_a = \frac{S_f}{n} \rightarrow \frac{4800}{b^3} = \frac{313 \times 10^6}{1.5}$$

$$\rightarrow b = 28.44 mm$$

چک کردن فرض: با استفاده از فرمول $d_e = 0.808\ b$ ، d_e را حساب می کنیم:

$$d_e = 0.808 \times 28.44 = 23 \ , \quad 13^{mm} \le 23^{mm} \le 50^{mm}$$

بنابراین $b = 28.5^{mm}$ صحیح است و اگر فرض غلط از آب در می امد می بایست یکبار دیگر مسئله را با فرض $d_e > 50^{mm}$ حل می کردیم.

پایان جلسه سوم