

# خستگی

## Fatigue

آزمایش مکانیکی مواد ۱، تهیه کننده: ش. منصورزاده

### مقدمه

- ▶ در سال ۱۸۳۰ متوجه شدند فلزات تحت تنش نوسانی (متغیر) یا تکراری (چرخه ای) با تنش کمتر از تنش کششی می شکنند. این نوع شکست را شکست خستگی نامیدند.
- ▶ قطعاتی مانند خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ، توربین، پل ها، اجزای ماشین و غیره که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی هستند، در شرایط خستگی می باشند.
- ▶ هم اکنون دلیل حداقل ۹۰ درصد شکست های ناشی از عوامل مکانیکی در حین کار، خستگی است.

## خستگی

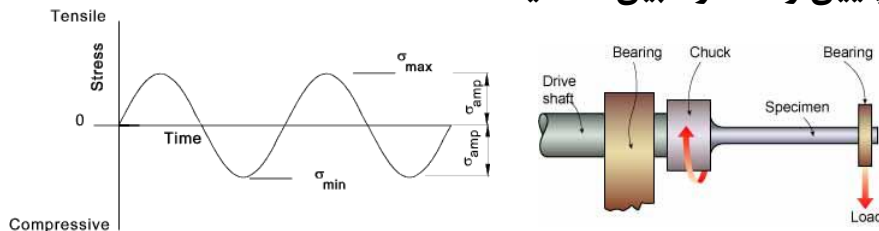
سه شرط لازم برای وقوع شکست خستگی عبارتند از

- ▶ ۱- تنش کششی (به اندازه کافی بزرگ) : باعث رشد ترک
- ▶ ۲- تنش نوسانی یا متغیر با تغییرات به اندازه کافی زیاد
- ▶ ۳- زیاد بودن تعداد دفعات (چرخه) اعمال تنش متغیر

▶ 3

▶ اگر تنش متغیر را به شکل سینوسی فرض کنیم ۳ حالت وجود دارد که نمودار تنش - تعداد چرخه آن به صورت زیر است

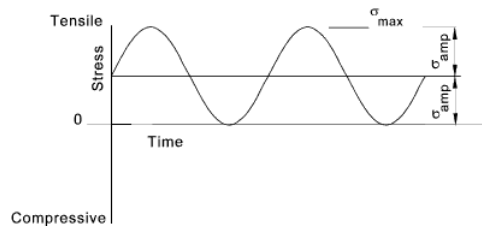
- ▶ ۱- چرخه کاملاً معکوس ۱ : در این نوع، تنش های حداکثر و حداقل برابرند اما تنش حداکثر کششی و تنش حداقل فشاری، مانند نمونه زیر که تحت پیچش و خمش (خمش به سمت بالا و پایین و محدود بین ۲ تکیه گاه است)



- ▶ 1- Completely reversed cycle

▶ 4

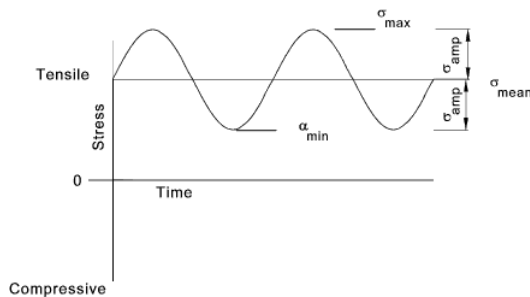
- ۲- چرخه تنش تکراری<sup>۱</sup>: تنش حداکثر و حداقل مساوی نیستند ،  
 مثل شکل زیر تنش حداکثر کششی و حداقل صفر ، مانند نوک  
 چرخ دنده یا پرس ضربه ای



#### 1-Repeated stress cycle (pulsating tension)

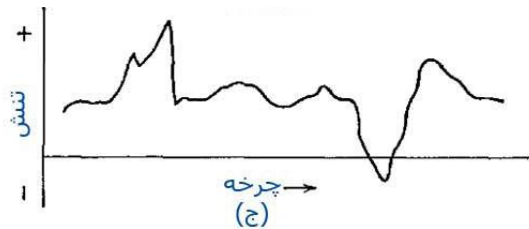
▶ 5

- ۳- چرخه متغیر موجی از نوع کششی<sup>۱</sup>: تنش حداکثر و حداقل  
 کششی هستند (نمودار کاملاً در منطقه کششی) ، مانند پیچ  
 سرسیلندر ماشین که زمان احتراق، تنش حداکثر و زمان تخلیه،  
 تنش حداقل را تحمل می کند



#### 1- Fluctuating tension

- خیلی اوقات در صنعت چرخه سینوسی نداریم و چرخه تنش مرکب<sup>۱</sup> مشاهده می گردد، مانند بال هواپیما یا پره توربین (شکل زیر)



- **Complicated stress cycle**

► 7

برای تنش متغیر خستگی ، کمیت های زیر تعریف می شود

۱- دامنه تنش (Stress range)

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

۲- تنش تناوبی (Alternating stress)

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2}$$

۳- تنش میانگین یا متوسط (Mean stress)

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

► 8

و برای این که نشان دهیم خستگی تنها در کشش یا در فشار و ترکیبی از کشش و فشار است از دو کمیت زیر استفاده می شود

۴- نسبت تنش (Stress ratio)

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

۵- نسبت نوسان (Amplitude ratio)

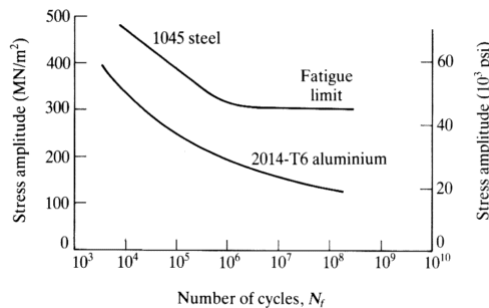
$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1 - R}{1 + R}$$

► 9

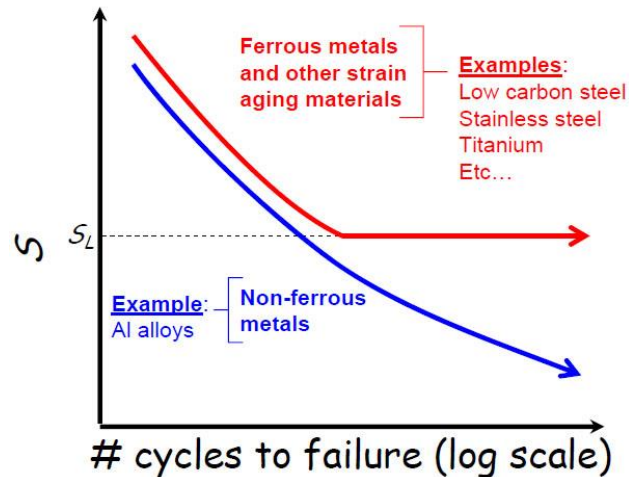
### منحنی تنش - چرخه ( $S-N_f$ )

► روش اصلی ارائه داده های مهندسی در خستگی، منحنی  $S-N_f$  است محور عمودی،  $S$  بر حسب یکی از  $\sigma_{max}, \sigma_{min}, \sigma_a$  و محور افقی  $N_f$  تعداد چرخه که منجر به شکست قطعه می شود. معمولاً  $N_f$  در مقیاس لگاریتمی گزارش می شود.

► اکثر اطلاعات خستگی برای چرخه کاملاً معکوس یا  $\sigma_m = 0$  است، چون انجام آزمایش در این حالت ساده تر است.



► 10



► 11

► در نمودار تنش - چرخه ، برای فلزات غیر آهنی با کاهش تنش ، چرخه شکست افزایش می یابد اما برای فلزات آهنی و تیتانیوم یک مجانب ملاحظه می شود و تنش معادل مجانب را حد تحمل<sup>۱</sup> یا حد خستگی<sup>۲</sup> می گویند

► حد تحمل یا خستگی : ماکزیمم تنشی که جسم تحمل می کند و تا  $5 \times 10^7$  یا  $10^8$  چرخه می رود و نمی شکند

► اگر تنش روی قطعه آهنی یا تیتانیومی کمتر از حد خستگی باشد ، تعداد چرخه  $N > 5 \times 10^7 \text{ or } 10^8$  خواهد شد و اصطلاحاً قطعه دارای عمر بی نهایت<sup>۳</sup> می گردد

- 1- Endurance limit      2- Fatigue limit      3- Infinite life

► 12

## انواع خستگی

بر اساس تعداد چرخه ، ۲ نوع می باشد

► ۱- کم چرخه (Low cycle): تعداد چرخه  $N < 10^4 \text{ or } 10^5$   
 کرنش حاصله در حد پلاستیک است اما در منطقه الاستیک هستیم.

تنش اعمالی در حد الاستیک - پلاستیک است  
 زمانی که قطعه به دفعات گرم و سرد می شود این خستگی دیده می شود مانند هواپیما ، مخازن تحت فشار راکتور هسته ای ، توربین بخار .....

► ۲- پر چرخه (High cycle): تعداد چرخه  $N > 10^5$   
 تنش اعمالی در حد الاستیک است

► 13

### سطح مقطع شکست

► سطح مقطع شکست خستگی شامل ۳ ناحیه است (شکل ۱- الف):

✓ ۱- جوانه زنی ترک (Initiation): اکثر موارد جوانه از سطح قطعه زده می شود.

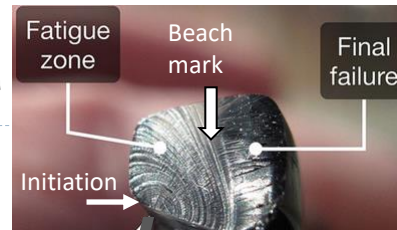
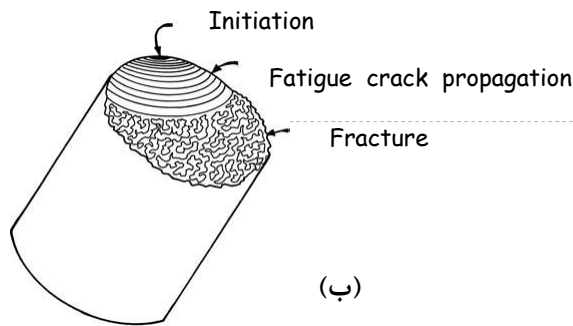
✓ ۲- مرحله رشد ترک (Fatigue crack propagation)

این ناحیه به شکل خطوطی تقریباً دایره ای با چشم دیده می شوند که به آن علائم ساحلی (Beach marks) می گویند. اگر همین سطح با میکروسکوپ الکترونی مشاهده شود، بین هر دو علامت ساحلی خطوط نازک زیادی دیده می شوند که به آنها خطوط خستگی (Fatigue striations). هر خط خستگی (A striation) طی یک چرخه حاصل می شود. عبارتی هر خط، نوک ترک را در چرخه مربوطه نشان می دهد. (شکل ۲- ب و ج)

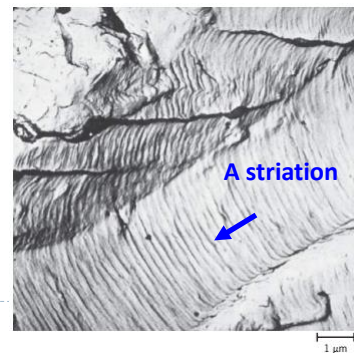
۳- ناحیه شکست (Fracture)

وقتی طول ترک به حد بحرانی رسید، سطح قطعه تحمل نمی آورد و می شکند. سطح شکست به رنگ تیره و ظاهر ناهموار یا رشته ای (Fibrous) دارد.

► 14



(ج)



شکل ۱- (الف) و (ب) سطح شکست خستگی،  
ج- میکروگراف شکست با میکروسکوپ TEM  
بزرگنمایی  $\times 9000$ .

► 15

## روشهای بهبود مقاومت خستگی

► خستگی پدیده ای است که از سطح شروع می شود و شامل مراحل جوانه زنی و رشد ترک (به داخل ماده) است. با روشهای تقویت سطح می توان  $50\% - 60\%$  عمر قطعه را افزایش داد. این روش های به ۳ گروه تقسیم می شوند

► ۱- عملیات ترموشیمیایی: شامل روش های نیترووره ، کربوره ، .... هستند و با ایجاد رسوبات ریز نیتریدی ، کاربیدی ..... باعث ایجاد تنش پس ماند فشاری در لایه های سطحی می شوند. بنابر این تنش کششی اعمالی ، ابتدا باید تنش فشاری را حذف کند و اگر بیشتر باشد صرف رشد ترک سطحی می شود و در نتیجه عمر قطعه افزایش می یابد.

► 16

► ۲- ایجاد تنش فشاری در سطح: عملیات ساچمه زنی ، نورد می تواند در لایه های سطحی تنش پس ماند فشاری ایجاد کند و عمر قطعه افزایش یابد

► ۳- صیقل کردن سطح: هر چه سطح صیقل تر باشد، فرورفتگی های سطحی کمتر خواهد بود. فرورفتگی ها محل های مناسبی برای جوانه زنی ترک هستند. با کاهش محل جوانه زنی ، در واقع عمر قطعه افزایش می یابد.