

YORULMA TEORİSİ BAŞLANGIÇ EĞİTİMİ

Aydın Kuntay
BIAS MÜHENDİSLİK
2015

Uyarı!

- Bu dokümanda yer alan bilgiler Bias Mühendislik'in eğitim amaçlı derlediği/yazdığı bilgilerdir.
- Bu dokümandaki bilgilerin kullanımından, sonuçlarından Bias Mühendislik sorumlu tutulamaz.

İçerik

- Yorulma mekaniği
- Stress-Life (S-N)
- Yorulma ömrünü etkileyen parametreler
- Strain-Life (e-N)

Amaç ve Kaynakça

- Yorulma konusuna girmek isteyenler için temel seviyede, basit, anlaşılır bir kaynak oluşturmak.
- Kaynakça
 - nCode fatigue sunumları ve eğitimleri
 - MSC.Fatigue notları ve örnekleri
 - Fatiguecalculator.com sitesi
 - FatigueMadeEasy makalesi (Darrel Socie)
 - SAE makaleleri
 - SAE Fatigue Design Handbook

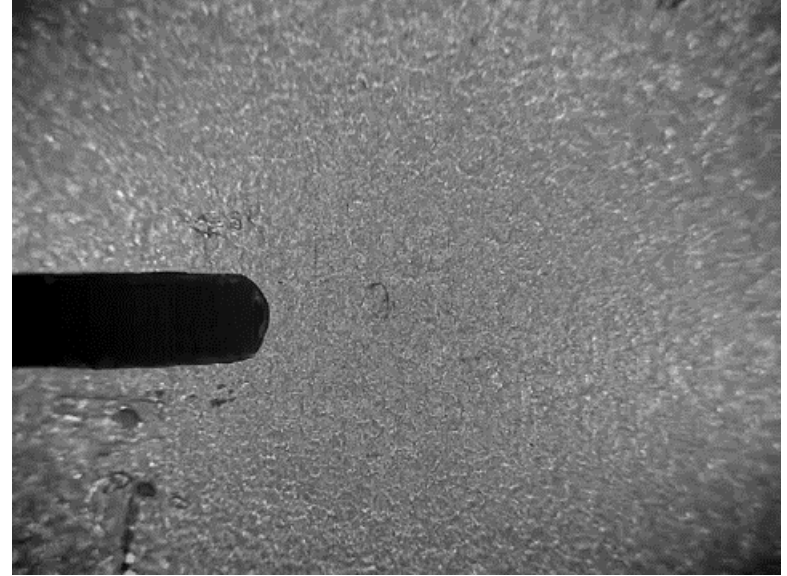
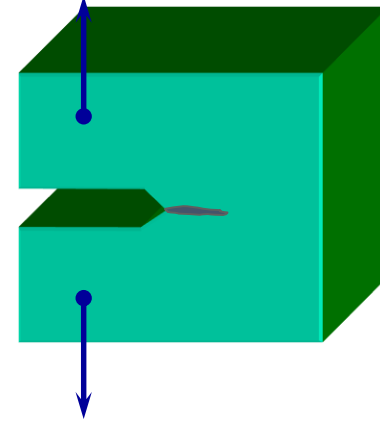
Yorulma Nedir?

Yorulma Nedir:

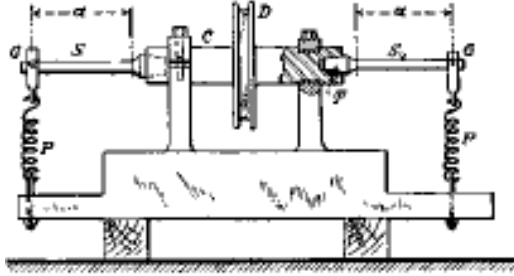
Normalde tek sefer uygulandığında herhangi bir hasar meydana getirmeyecek seviyede olan ancak tekrarlı şekilde uygulandığında çatlak veya kırılma şeklinde hasar meydana gelme durumudur.

Nasıl Oluşur:

1. Yapıda küçük çatlağın oluşumu
2. Çatlağın ucu elastik-plastik gerilme ortamında genişir
3. Çatlak makro ölçekte yapıdaki elastik gerilmeler altında büyür
4. Kırılma meydana gelir



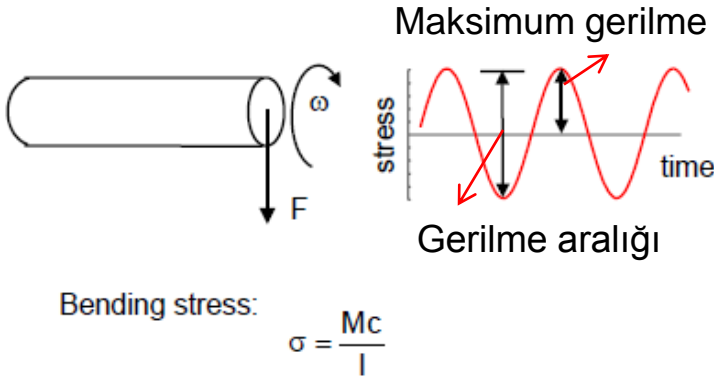
Tarihteki Önemli İsimler ve Bulguları



Wöhler circa 1850

Wohler (1850) – Tren aksı incelemesi

- Malzeme tekrarlı yükler altında akma gerilmesinin altında olduğu halde kırıldı.
- Ömrü belirleyen maksimum gerilmeden ziyade uygulanan gerilme aralığı.
- Belirli bir gerilme aralığı limiti var ki sonsuz ömre sahip görünüyor.



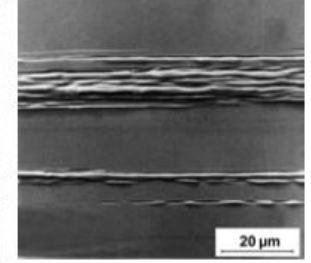
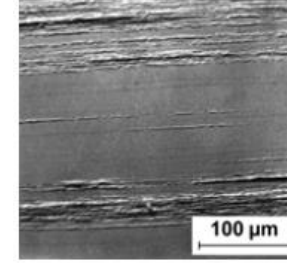
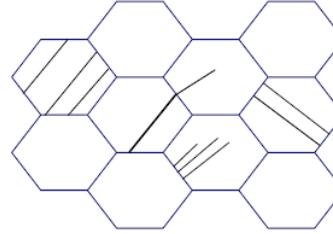
GOODMAN (1890): Wohler'ün bulgularının üzerine ortalama gerilmenin etkisine dair ampirik bir formül geliştirdi.

MINER (1945): Hasarın birikimli toplanmasına dair çalışmalar yapmıştır.

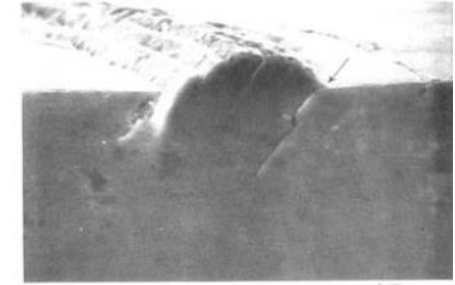
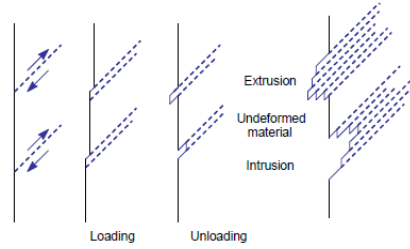
BAUSCHINGER(1870): Malzemelerin çevrimsel çekme deneylerini yapmıştır.

Çatlak Oluşum Tipleri

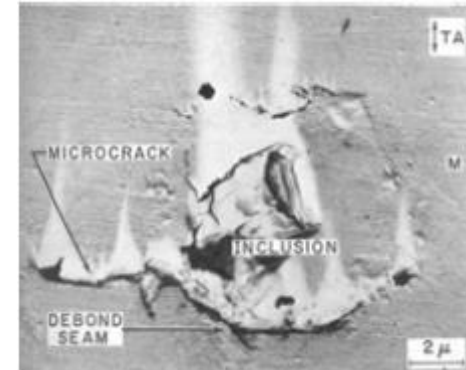
Kristal ölçeğinde mikroskopik çatlak oluşumu



“Slip band” oluşumu

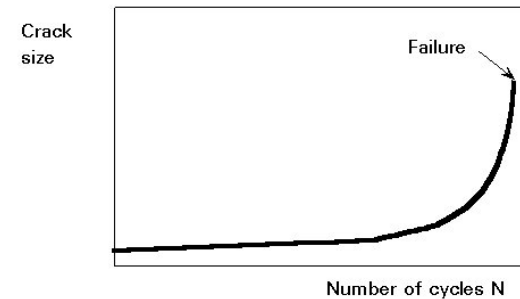
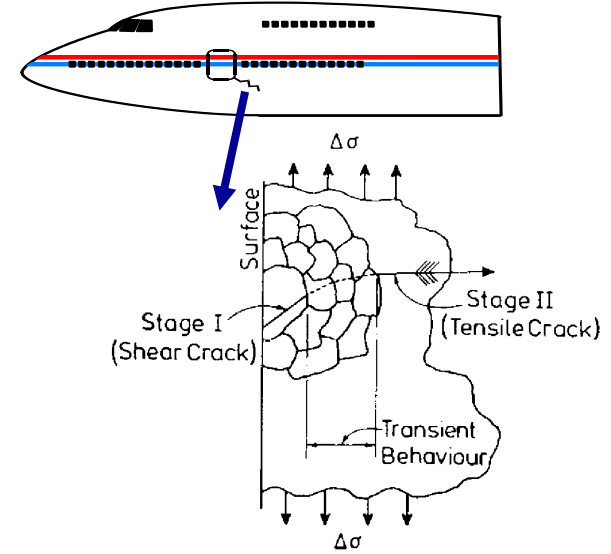
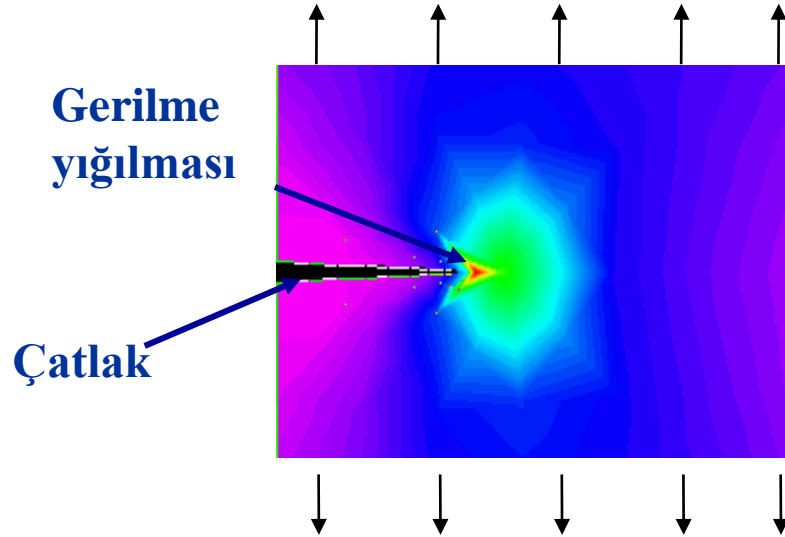


4340 çelikte çatlak oluşumu.
Malzeme içindeki kusurun kenarında başlamış



Çatlağın Başlaması ve Büyümesi

Çatlağın ucundaki çentik lokal gerilme yığılmasına neden olur. Böylece çatlağın ucu tekrarlı plastik deformasyona uğrar. Ömrün büyük kısmı ilk çatlağın oluşmasına kadar geçen sürede harcanır.



Yorulma Ömrü Hesaplama Yöntemleri

En çok kullanılan 3 yöntem aşağıdakilerdir:

- **S-N (Stress-Life)**

Genel kesit veya lokal elastik gerilmeyi toplam ömürle ilişkilendirir

- **ϵ -N (Strain-Life)**

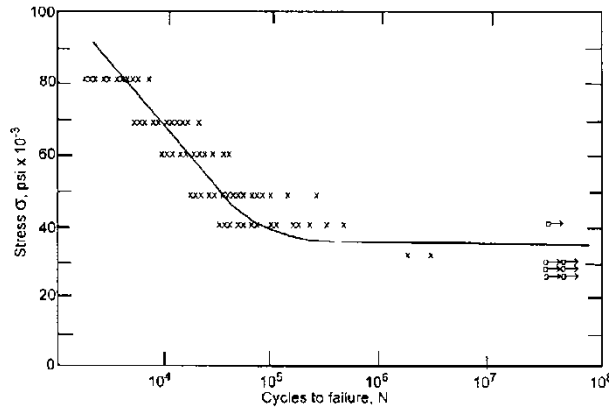
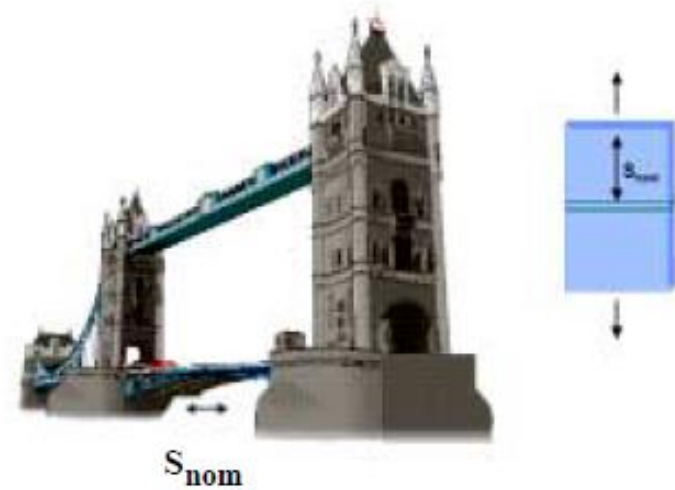
Lokal strain değerini çatlak başlangıcı ile ilişkilendirir

- **LEFM (Crack Propagation)**

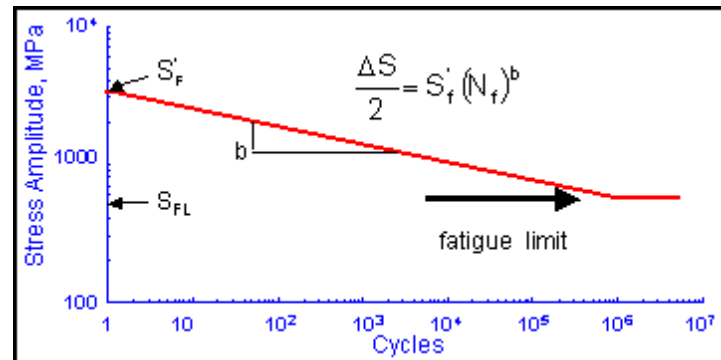
Çatlağın ilerlemesini gerilme yoğunluğu ile değerlendirir

S-N (Gerilme-Ömür) Yöntemi

- En çok kullanılan ve en basit yöntem
- Gerçek yapıdaki gerilme değişiminin aynısını, malzeme numunesinde yaparsak; numune ömrü ile gerçek yapının ömrü aynı olur.
- S-N eğrisi lineer ve log skalada aşağıdaki gibi görünür



S-N eğrisi (lineer skala)



S-N eğrisi (log skala)

S-N Yöntemi

Varsayımlar

- Deformasyon elastiktir.
- Malzeme mukavemeti ön plandadır.
- Geometrinin çentik etkilerinin bilinmesi gerekir.

Avantajları

- Kullanımı kolaydır.
- Literatürde malzeme veri tabanı bulunabilir.
- Malzeme ve geometrideki değişiklikler kolayca hesaplanabilir.

Kısıtlamalar

- Çentiklerde bile plastik bölgeye geçmediği varsayılır.
- Genelde ortalama gerilme hesabı yanlışlık içerir.
- Çentik etkisinin iyi bilinmesi gerekir.

S-N Yöntemi

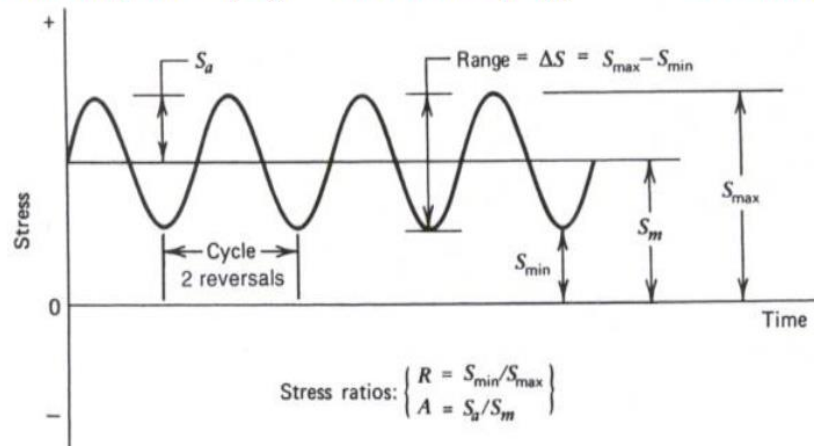
- S-N yöntemini anlamak için S-N eğrisinin nasıl çıkarıldığını ve ne anlama geldiğini iyi öğrenmemiz gerekiyor.
- S-N eğrisi bazen farklı şekillerde de ifade ediliyor. Hesaplarda en çok hata da bu yüzden yapılıyor.
- S-N eğrisi genelde en az 10-15 numune ile tek eksenli gerilme hali altında test edilerek çıkarılıyor.
- Gerilme hali çekme-basma, burulma veya eğilme olabiliyor. Bu yükleme modu S-N eğrisinde belirtiliyor.
- Genelde en az 5 gerilme seviyesi ve her gerilme seviyesinde 3 numune ile test yapılıyor.
- Yükleme genliği basmada ve çekmede farklı olabilir. S-N eğrisinde belirtilir (R-Ratio).
- Parçalar kırılıncaya kadar yükleme devam ediyor. Bu yüzden S-N'e toplam ömür veriyor deniyor.
- S-N eğrisi genelde 1000 çevrimden daha kısa ömürler için doğru sonuç vermez. Sadece karşılaştırma amaçlı kullanılabilir.

Bazı Tanımlar

- Gerilme Aralığı, $\Delta S = S_{max} - S_{min}$
- Gerilme Genliği (S_a , S_{amp}) = $(S_{max} - S_{min}) / 2$
- Yükleme Oranı (R-Ratio) = S_{min} / S_{max}
- Ortalama Gerilme (S_m) = $(S_{max} + S_{min}) / 2$
- 1 Tekrar (cycle) = 2 x Çevrim (Reversals)
- Ömür (Life) = 1 / Hasar (Damage)

Minimum stress, S_{min} Maximum stress, S_{max} Stress range, ΔS

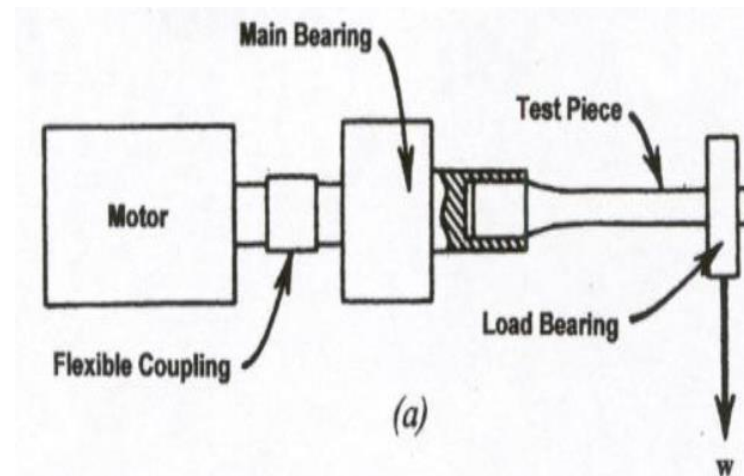
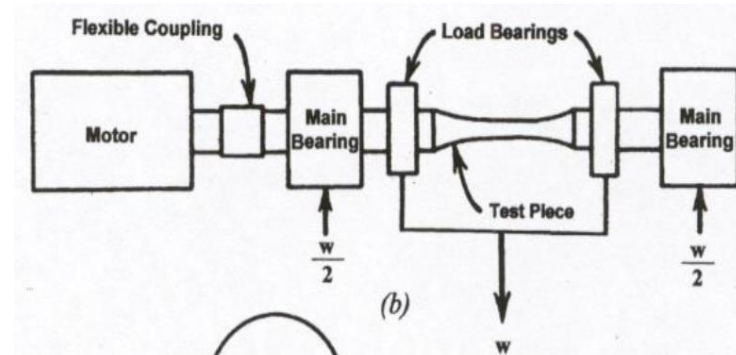
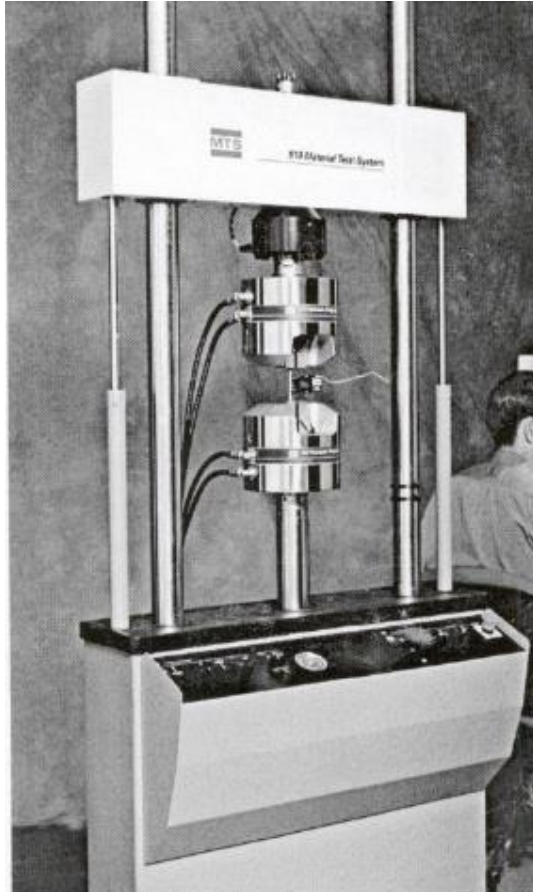
Alternating stress, S_a Mean stress, S_m Stress ratio, R



Bazı Tanımlar

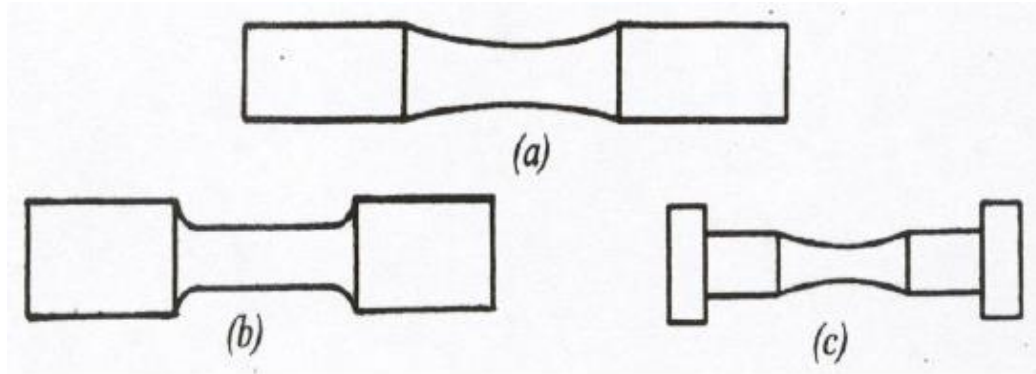
- Teoride yüklemenin frekansı önemli değildir (çevresel etkiler, doğal frekans, malzemenin ısınması haricinde). 0-200Hz için metallerde ihmal edilir.
- Yükleme formu (kare dalga, sinüs, üçgen v.b.) önemli değildir (çevresel etkiler haricinde)
- Gerilme yerine kuvvet, moment, tork gibi gerilme ile doğrudan ilgili diğer parametreler de kullanılabilir.
- $R = -1$ ve $R = 0$ en çok kullanılan malzeme yorulma karakterizasyon durumlarıdır.
 - $R = -1$ tam bir tekrardır ($S_{min} = -S_{max}$)
 - $R = 0$, $S_{min} = 0$, çek-bırak yükleme durumudur.
- Bir «tekrar» gerilmenin maksimuma çıkıp, minimuma inmesi sonra tekrar maksimuma çıkmasıdır. Yani tam bir periyodik sinyaldir.
- Gerçek yükleme durumunda, sinyaller sinüs gibi olmadığı için tam tekrar görülmeyebilir, bu yüzden çevrim (1/2 tekrar) kullanılır.

Malzeme Yorulma Test Makinaları



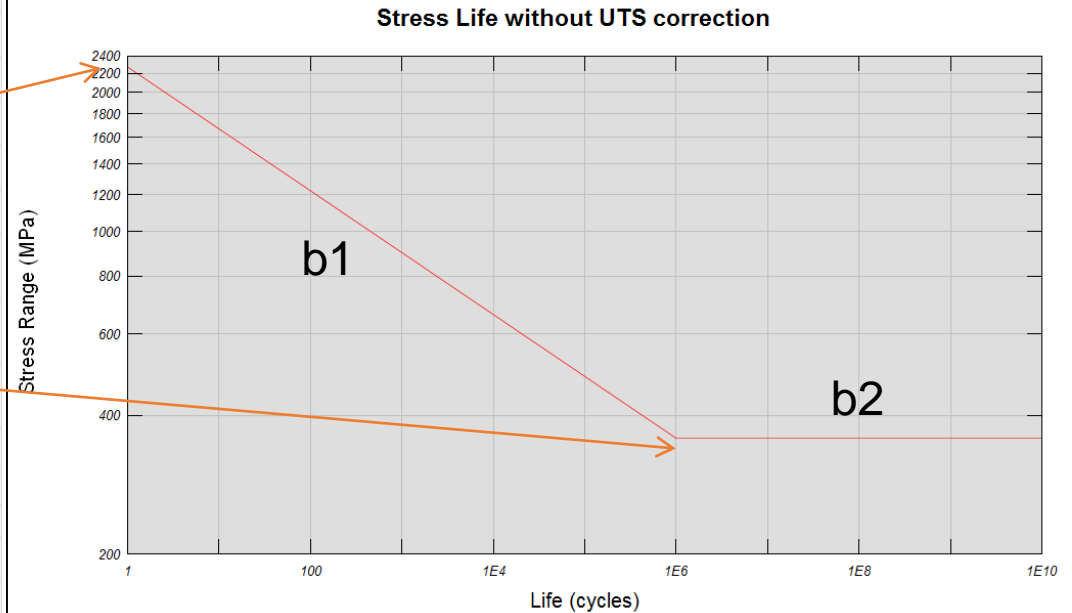
Malzeme Yorulma Testi Numuneleri

- Yandaki numune tipleri genelde aksenal ve eğilme testlerinde kullanılır.
- Yüzeyleri genelde taşlanmıştır.
- Çentik etkisi incelenmek istenirse çentikli numuneler kullanılır.



S-N Örneği

| | Steel_UML_UTS500::Stress-life (S-N) | Description |
|--------------|---|-----------------------------------|
| MaterialType | 99 | Material Type |
| YS | 384.615 | Yield Strength (MPa) |
| UTS | 500 | Ultimate Tensile Strength (MPa) |
| E | 2.1E5 | Elastic Modulus (MPa) |
| me | | Elastic Poisson's Ratio |
| mp | | Plastic Poisson's Ratio |
| SRI1 | 2268 | Stress Range Intercept (MPa) |
| b1 | -0.1339 | First Fatigue Strength Exponent |
| Nc1 | 1E6 | Fatigue Transition Point (cycles) |
| b2 | 0 | Second Fatigue Strength Exponent |
| SE | 0.1 | Standard Error of Log(N) |
| RR | -1 | R-ratio of Test |
| Nfc | 1E30 | Fatigue CutOff |
| M1 | | Mean stress parameter M1 |
| M2 | | Mean stress parameter M2 |
| M3 | | Mean stress parameter M3 |
| M4 | | Mean stress parameter M4 |
| Comments | Data generated from Uniform Material Law. | Comments |
| References | nCode Book of Fatigue Theory. | References |



Legend
■ Steel_UML_UTS500::Stress-life (S-N) SRI1: 2268 MPa b1:-0.1339 b2:0 NC1: 1E6

Ref: nCode

S-N Eğrisi Örneği

MIL-HDBK-5H
1 December 1998

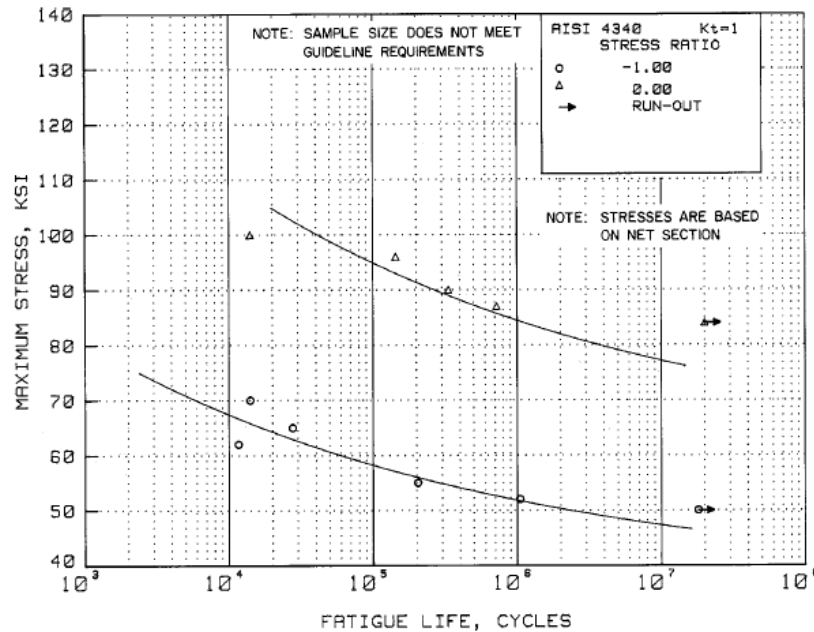


Figure 2.3.1.3.8(a). Best-fit S/N curves for unnotched AISI 4340 alloy steel bar, $F_{10} = 125$ ksi, longitudinal direction.

Correlative Information for Figure 2.3.1.3.8(a)

Product Form: Rolled bar, 1-1/8 inches diameter, air melted

Properties:

| TUS, ksi | TYS, ksi | Temp., °F |
|----------|----------|----------------|
| 125 | — | RT (unnotched) |
| 150 | — | RT (notched) |

Specimen Details: Unnotched
0.400-inch diameter

Surface Condition: Hand polished to RMS 10

Reference: 2.3.1.3.8(a)

Test Parameters:
Loading - Axial
Frequency - 2000 to 2500 cpm
Temperature - RT
Atmosphere - Air

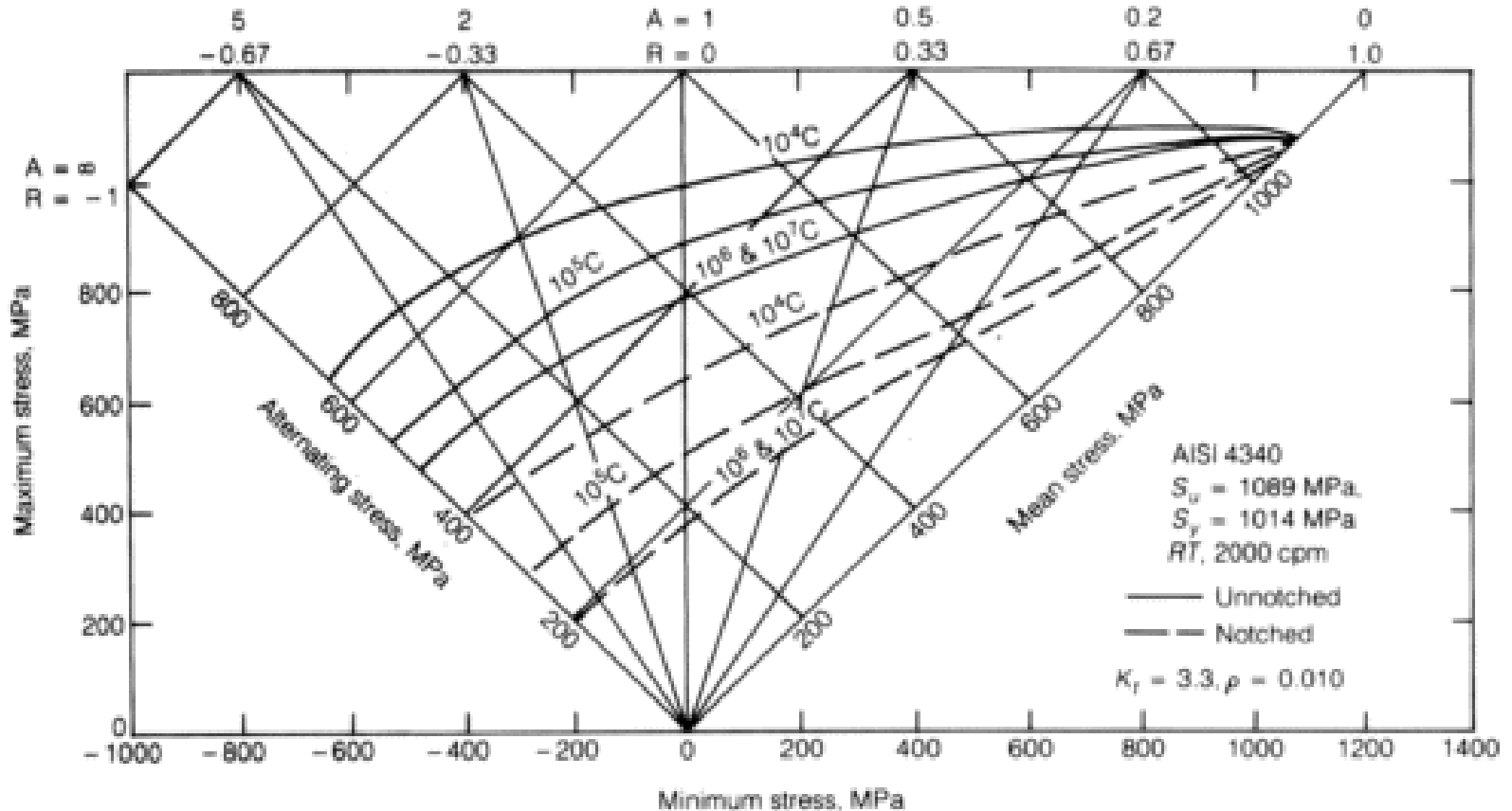
No. of Heat/Lots: 1

Equivalent Stress Equation:
 $\log N_f = 14.96 - 6.46 \log (S_{eq}/60)$
 $S_{eq} = S_{max} (1-R)^{0.70}$
Standard Error of Estimate = 0.35
Standard Deviation in Life = 0.77
 $R^2 = 75\%$

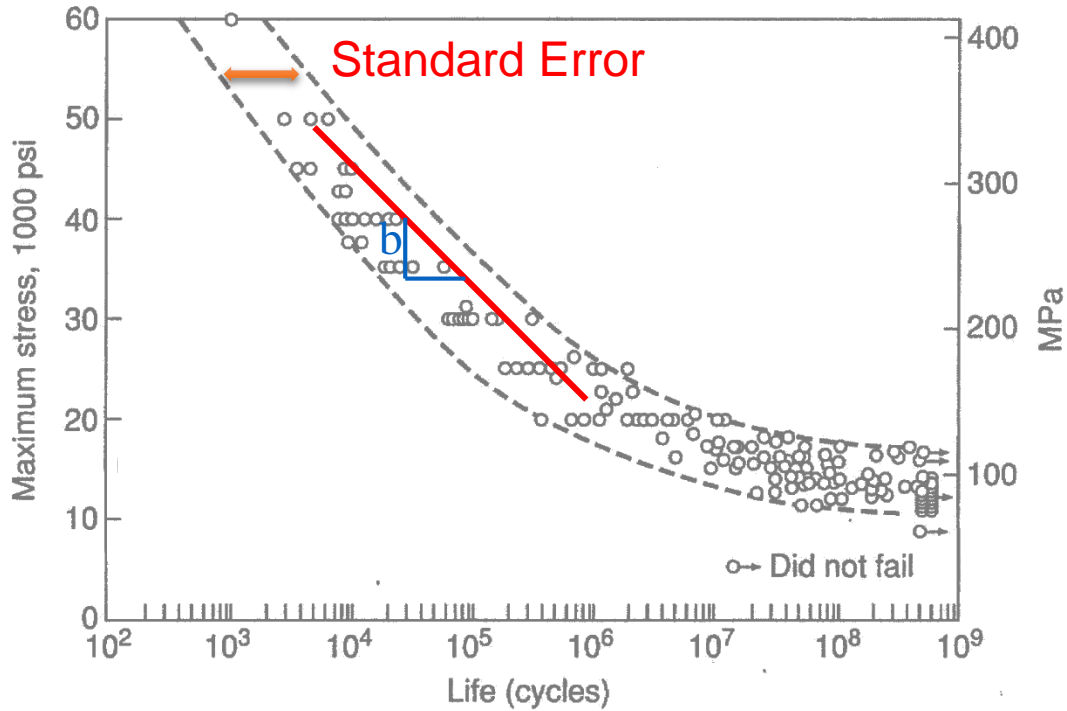
Sample Size = 9

[Caution: The equivalent stress model may provide unrealistic life predictions for stress ratios beyond those represented above.]

S-N Eğrisi :Haigh Curves Şeklinde



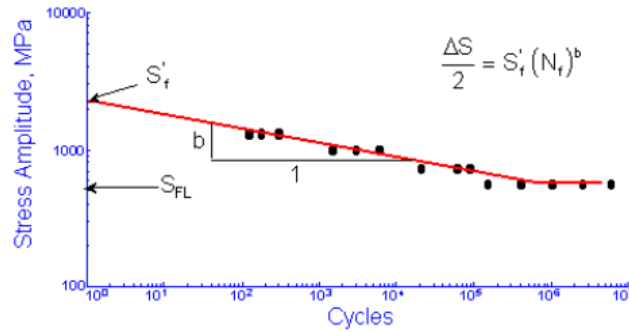
Standard Error



- Malzeme S-N testinde aynı seviyede birden fazla numune test ediliyor.
- Bu noktalardan tek bir eğri geçiriyoruz.
- Bu noktaların eğriden ne kadar saptığı Standard Error ile ifade ediliyor.

S-N Formülü

Gerilme genliği-Ömür



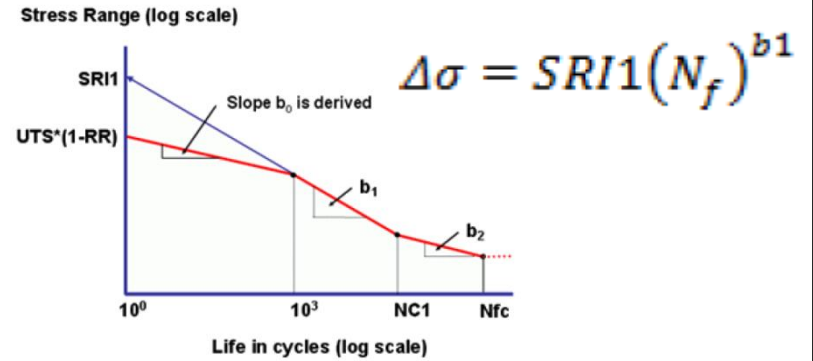
S_f' : b eğiminin y-eksenini kestiği nokta .

S_{FL} : Sonsuz ömür çizgisi

$\Delta S/2$: Gerilme genliği (amplitude)

N_f : çevrim (cycle)

Gerilme aralığı-Ömür



NC1: b_1 - b_2 eğimleri arasındaki nokta. Eğer b_2 sıfırsa, NC1 sonsuz ömür çizgisi oluyor.

SRI1: b_1 eğiminin y-eksenini kestiği nokta. Bu UTS'den büyük olduğu için gerçekçi değil. Bu yüzden 1000çevrimden y-ekseninde UTS'ye çizgi çekilir.

RR= R-Ratio. $\sigma_{min}/\sigma_{max}$.

İki ifade de aynı. Birisi gerilmenin genliği, diğeri gerilmenin aralığı (max-min) ile ömrü ilişkilendiriyor. Bu eğriler birbirine dönüştürülebilir. Değişik kitaplarda notasyonlar farklı olabilir.

Örnek S-N Parametreleri

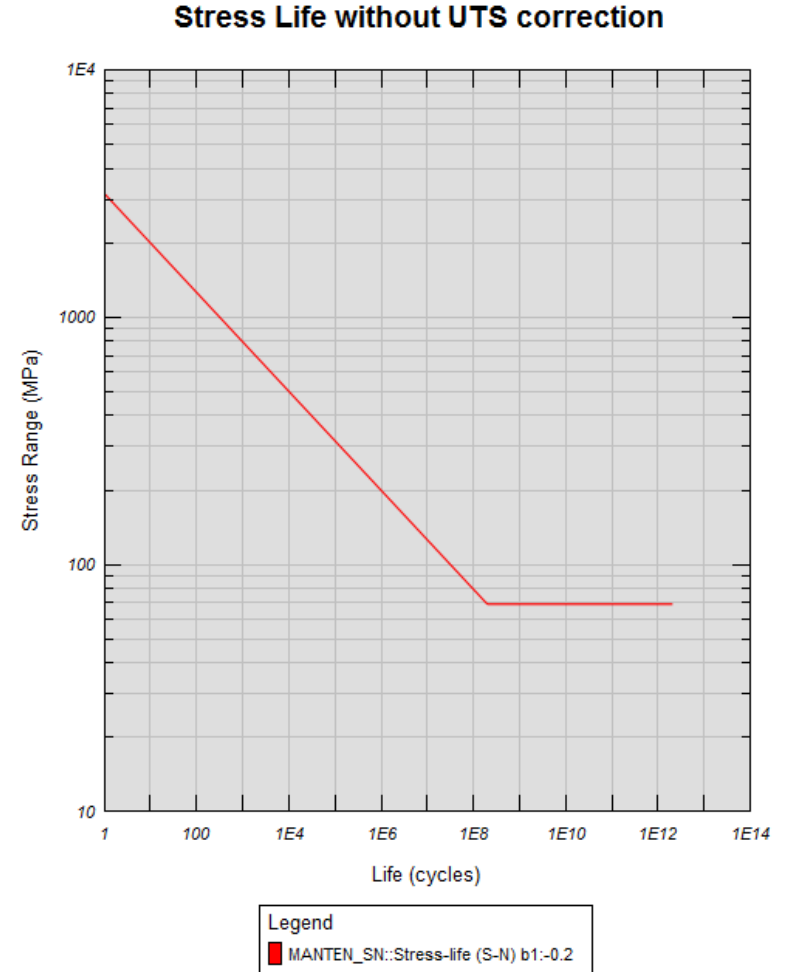
| | Steel SAE1035_169_CON::Stress-life | I Weld BS5400 ClassD::Stress-life (| _UML_UTS300::Stress-life | _UML_UTS400::Stress-life | Description |
|--------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| MaterialType | 99 | 99 | 99 | 99 | Material Type |
| YS | 410 | 355 | 230.769 | 307.692 | Yield Strength (MPa) |
| UTS | 550 | 500 | 300 | 400 | Ultimate Tensile Strength (MPa) |
| E | 2.1E5 | 2.07E5 | 2.1E5 | 2.1E5 | Elastic Modulus (MPa) |
| me | | 0.3 | | | Elastic Poisson's Ratio |
| mp | | 0.5 | | | Plastic Poisson's Ratio |
| SRI1 | 2137 | 1.5861E4 | 1361.4 | 1815.2 | Stress Range Intercept (MPa) |
| b1 | -0.0872 | -0.3333 | -0.1339 | -0.1339 | First Fatigue Strength Exponent |
| Nc1 | 1E6 | 1E7 | 1E6 | 1E6 | Fatigue Transition Point (cycles) |
| b2 | -0.0872 | -0.2 | 0 | 0 | Second Fatigue Strength Exponent |
| SE | 0 | 0.2097 | 0.1 | 0.1 | Standard Error of Log(N) |
| RR | -1 | -1 | -1 | -1 | R-ratio of Test |
| Nfc | 1E30 | 1E30 | 1E30 | 1E30 | Fatigue CutOff |

Alıştırma: S-N Eğrisini Çizmek

S-N Malzeme Testi Yapmış Olalım

| Gerilme Aralığı MPa | Ömür Çevrim |
|------------------------|----------------|
| 50 | 1E30 |
| 70 | 2E08 |
| 200 | 1,000,000 |
| 300 | 100,000 |
| 500 | 10,000 |

1. Sonsuz ömür limitini 2E8 al.
2. log-log skalada grafiği çizdir
3. S-N parametrelerini bul:
 S_f' (gerilme genlik) - b
 S_{RI} (gerilme aralığı) - b
 Fatigue limitteki gerilme değeri S_{FL}



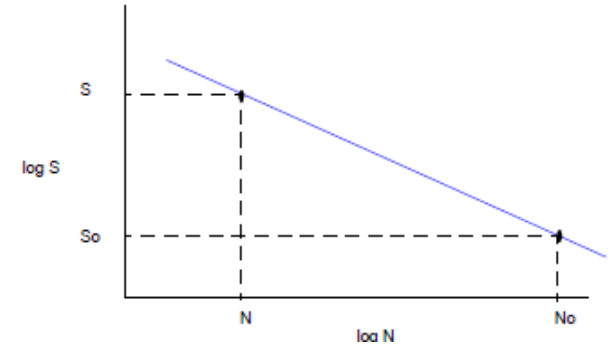
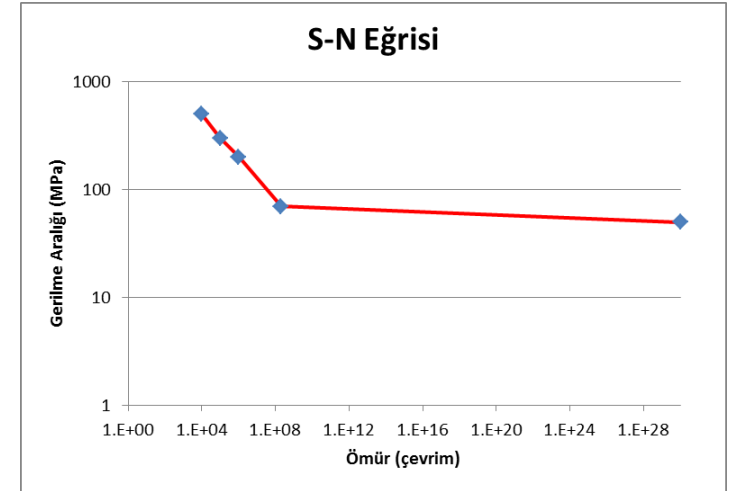
Alıştırma (devam)

- S-N değerlerini Excel'de girersek log skalada aşağıdaki grafik çıkar
- Eğimi hesaplamak için yandaki formülden yararlanabilirsiniz.

$$b = - (\log S - \log S_0) / (\log N_0 - \log N)$$

$$\log N_0 - \log N = -1/b \log(S/S_0)$$

$$\log N = \log N_0 + 1/b \log(S/S_0)$$



| Gerilme Aralığı-Ömür | | $\Delta\sigma = SRI1(N_f)^{b1}$ |
|----------------------|-----------|-------------------------------------|
| b1 | -0.20 | |
| SRI | 3,112 MPa | |
| Gerilme Genliği-Ömür | | $\frac{\Delta S}{2} = S'_r (N_r)^b$ |
| b | -0.20 | |
| Sf' | 1,556 MPa | |

Sonsuz Ömür – UTS İlişkisi

Bir çok farklı çelikte yapılan testlerde bulunan sonsuz ömür (yorulma limiti) ile kopma mukavemeti ilişkisi yanda verilmiştir. Sonsuz ömür limiti, UTS ile doğru orantılıdır.

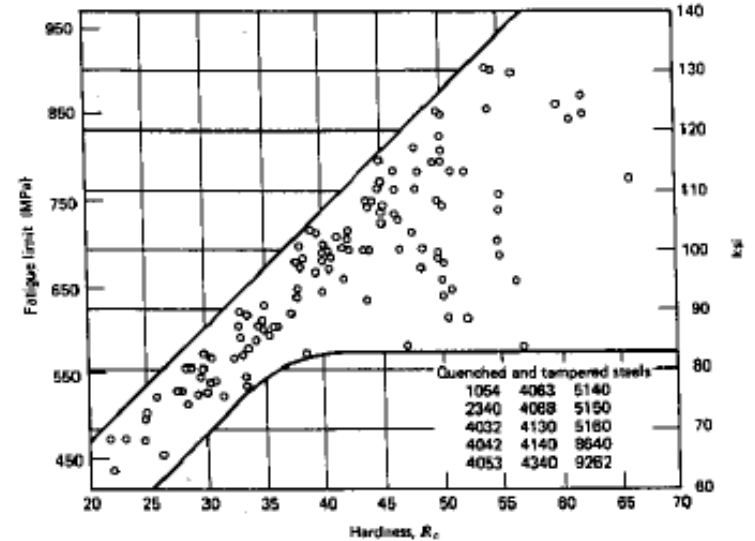
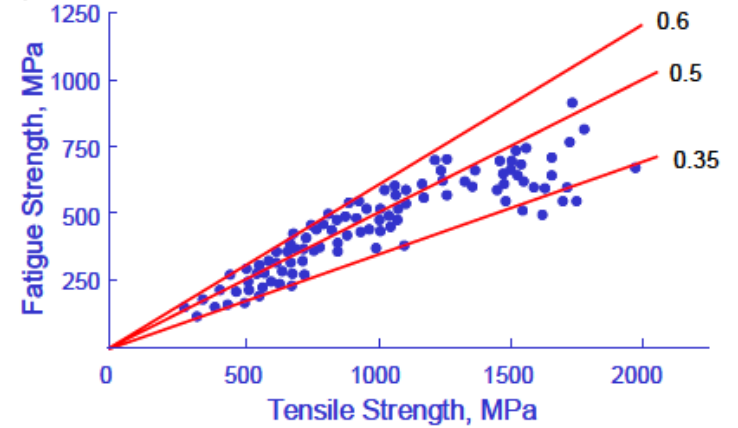
Kabaca $S_{FL} = 0.35-0.6$ UTS

Malzemenin sertliği ile sonsuz ömür ilişkisi sağ altta verilmiştir.

Kabaca $S_{FL} = 0.25$ (BHN) (ksi)

Bir diğer kaba tarif de 1000 çevrim ömrün, 0.9 UTS'ye eşit olduğudur.

Haliyle elde malzeme S-N eğrisi olmadığı zaman yukardaki ilişkilerle S-N eğrisi oluşturulabilir.



Forrest, *Fatigue of Metals*, Pergamon Press, London, 1962

Alıştırma: S-N Eğri Türetme

- Eğer malzemenin S-N eğrisi yoksa, daha önce bahsedilen yaklaşımlar kullanılarak S-N eğrisi türetilebilir.

Çelik UTS=800MPa

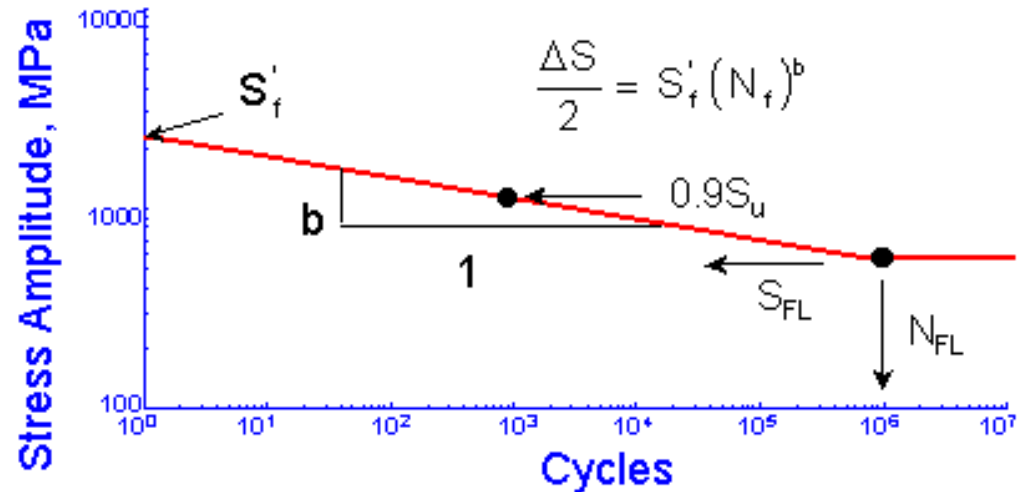
SFL=0.5xUTS = 400MPa

S3=0.9xUTS = 720MPa

NFL=1E6

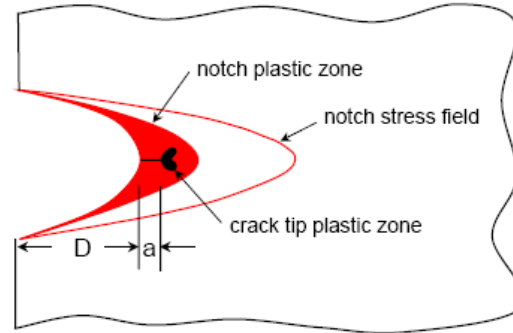
→ $b=-0.085$

→ $S_f'=1295\text{MPa}$



Düşük ve Yüksek Çevrim Bölgeleri

- Yorulma konusundaki çalışmalar ve bazen kullanılacak yöntem (S-N veya e-N) çevrim sayısı ile değerlendirilir.
- Düşük tekrar bölgesi (Low Cycle Fatigue, LCF): göreceli büyük genlikli tekrarlar, düşük tekrar sayısı ($<10E5$) ve yüksek lokal plastik gerinme. Genelde e-N yöntemi uygundur.

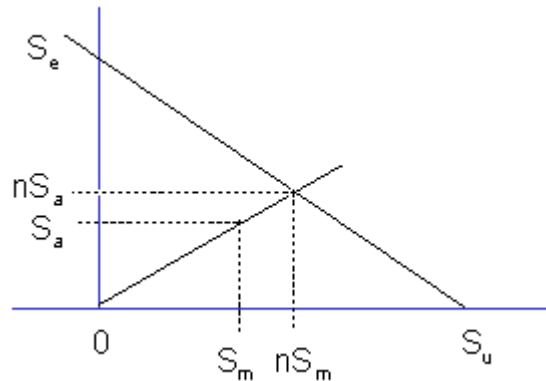


- Yüksek tekrar bölgesi (High Cycle Fatigue, HCF): düşük genlik, yüksek tekrar sayısı ($>10E5$), elastik gerinme.

Emniyet Katsayısı

- Sonsuz ömürlü bir tasarım için gereken katsayıdır, n
- Hesaplamalarda ömür değeri, yorulma limitini (S_{FL}) geçtiği zaman, ömür yerine Emniyet Katsayısı verilebilir.

$$\frac{S_a}{S_{FL}} + \frac{S_{mean}}{S_u} = \frac{1}{n}$$



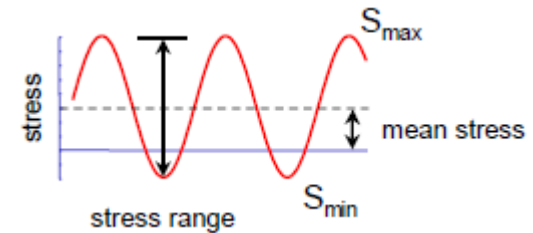
Alıştırma: S-N Eğrisi ile Ömür Hesabı

Samp=50Mpa, Smean=0Mpa

Malzeme 1020 soğuk hadde

UTS=455MPa; Sf'=813MPa, b=-0.118

Sonsuz ömrü 1E6 al.



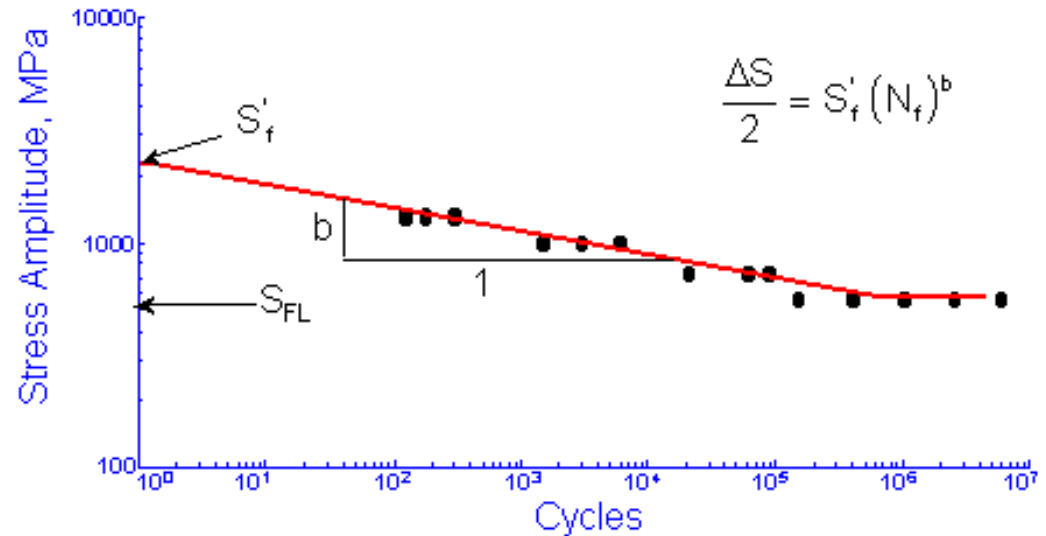
Sonuç:

NFL = 1E6

S_{FL} (fatigue limit) =160MPa

$N_f=1.8E10$

$n=3.2$



Alıştırma: S-N Eğrisi ile Ömür Hesabı

$S_a=150\text{Mpa}$, $S_m=0\text{Mpa}$

Malzeme 1020 soğuk hadde

$S_u=455\text{MPa}$; $S_f'=813\text{MPa}$, $b=-0.118$

$S_a=200\text{Mpa}$, $S_m=0\text{Mpa}$

Malzeme 1020 soğuk hadde

$S_u=455\text{MPa}$; $S_f'=813\text{MPa}$, $b=-0.118$

Sonuç:

$\text{NFL} = 1 \times 10^6$ (default)

SFL (fatigue limit) = 160MPa

$N_f=1.67 \times 10^6$

$n=1.1$

Sonuç:

$\text{NFL} = 1 \times 10^6$ (default)

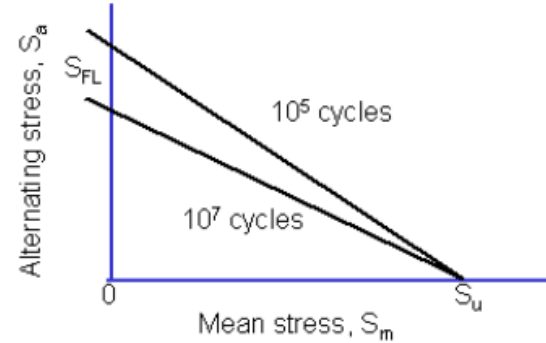
SFL (fatigue limit) = 160MPa

$N_f=1.45 \times 10^5$

$n=0.8$

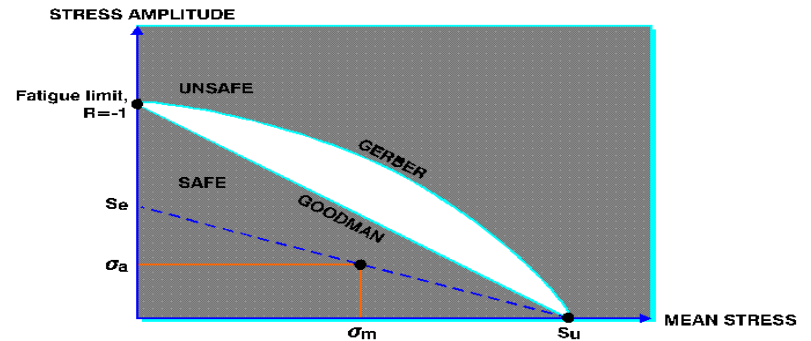
Ortalama Gerilme Etkisi

- Çekme gerilmelerinin ömrü kısalttığı, basma gerilmelerinin ise ömrü uzattığı bilinmektedir.
- Ortalama gerilme değeri Goodman diyagramı kullanılarak etkisi 0 ortalama gerilmeye eşdeğer yeni gerilme seviyesi S_{eq} bulunur. Bu değer S_a yerine kullanılır
- $S_{eq} = S_a / (1 - S_m / S_u)$



$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \text{ Goodman}$$

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1 \text{ Gerber}$$



Alıştırma

- Goodman kullanarak eşdeğer gerilme hesapla

$$S_{\max}=700\text{Mpa}$$

$$S_{\min}=70\text{MPa}$$

$$\text{UTS}=1050\text{MPa}$$

$$S_a=(S_{\max}-S_{\min})/2= (700-70)/2=315\text{MPa}$$

$$S_m=(S_{\max}+S_{\min})/2=(700+70)/2=385\text{MPa}$$

$$S_a/S_e+S_m/S_u=1 \rightarrow S_{eq}=497\text{MPa}$$

Alıştırma

- Goodman kullanarak ömür hesapla

$S_a=200\text{Mpa}$, $S_m=50\text{Mpa}$

Malzeme 1020 soğuk hadde

$S_u=455\text{MPa}$; $S_f'=813\text{MPa}$, $b=-0.118$

Sonuç:

$NFL = 1 \times 10^6$

$SFL = 160\text{MPa}$

$S_{eq} = 220\text{MPa}$

$b = -0.118$

$N_f = 5.4 \times 10^4$

- Goodman kullanarak ömür hesapla

$S_a=150\text{Mpa}$, $S_m=30\text{Mpa}$

Malzeme 1020 soğuk hadde

$S_u=455\text{MPa}$; $S_f'=813\text{MPa}$, $b=-0.118$

Sonuç:

$NFL = 1 \times 10^6$

$SFL = 160\text{MPa}$

$S_{eq} = 160\text{MPa}$

$b = -0.118$

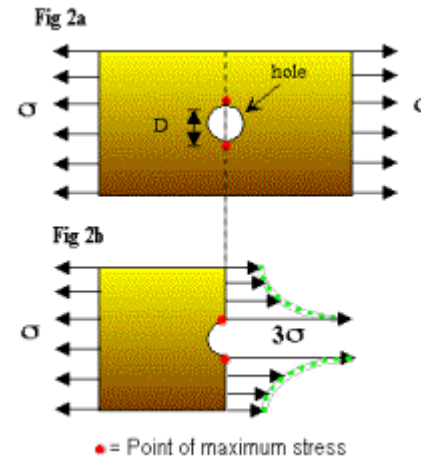
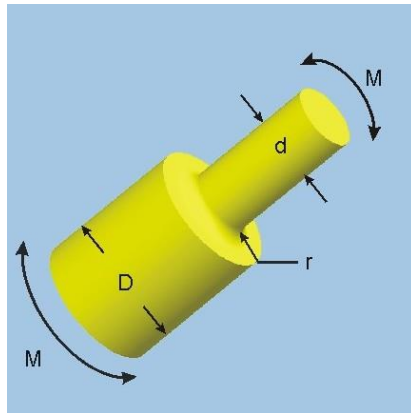
$N_f = 9.3 \times 10^5$

Ömrü Etkileyen Diğer Faktörler

- Gerilme yığılması, çentik (stress concentration)
- Yükleme tipi: çekme-basma, burulma, eğilme
- Yüzey bitirme işlemi (surface finish)
- Malzeme kalınlığı

Gerilme Yığılması

- Sonlu elemanlar analizinde (SEA) modelde çentik detayı varsa çentikte oluşan gerilme hesap ediliyor. SEA'da tekil nokta oluşmasına dikkat edilmeli.
- Eğer SEA'da detay yoksa veya genel kesitte el hesabı yapılıyorsa, çentik faktörü çeşitli kaynaklardan bulunabilir.
- Referans alınan gerilme seviyesini bu faktörle çarparak çentikteki gerilme seviyesi elde edilir



Gerilme Yığılması

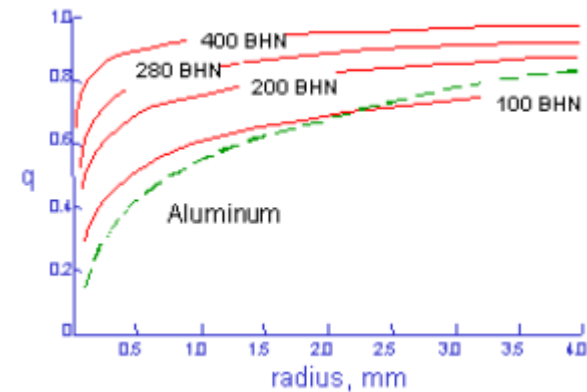
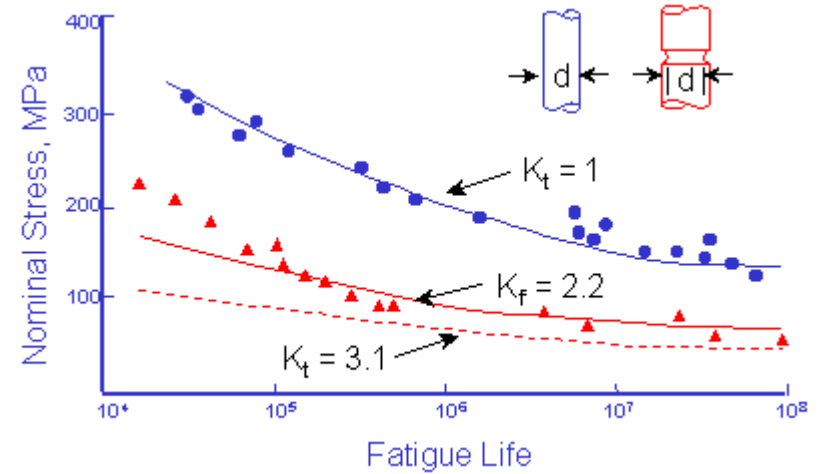
- İlk bakışta çentikteki gerilmeyi S-N eğrisinde yerine koymak mantıklı gözükmemektedir
- Ancak her malzemede çentik etkisinin yorulma ömrüne etkisinin aynı olmadığı görülmüştür
- Bu nedenle çentik etkisi K_t 'den, fatigue notch factor, K_f hesaplanır. K_f , K_t yerine kullanılır

$$K_f = 1 + (K_t - 1)q$$

- Bu olayın nedeni çatlak ucundaki plastik deformasyonun gerilme yığılmasının etkisini azaltmasıdır. Ömür kısaldıkça K_f 'nin etkisi de azalmaktadır. Bu nedenle sünek malze

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{0.025 \left(\frac{2070 \text{ MPa}}{S_u} \right)}{\rho}} \text{ for steel}$$

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{0.5 \text{ mm}}{\rho}} \text{ for aluminum}$$



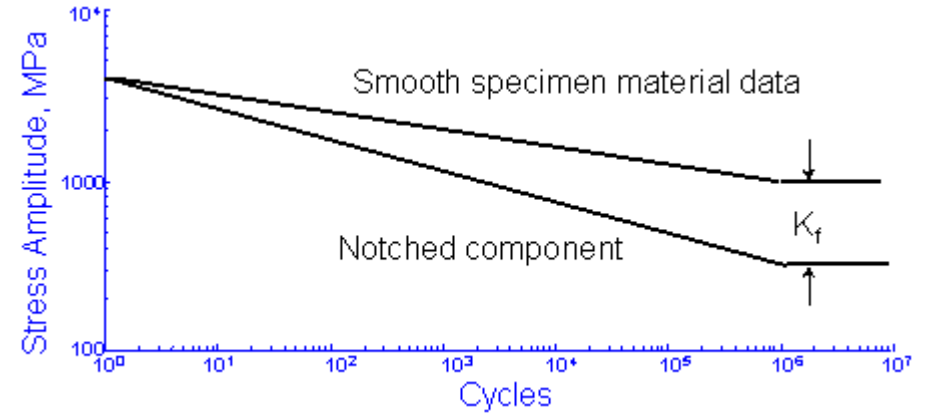
Gerilme Yığılması

- S-N eğrisinde 10E6 tekrardaki fatigue limiti K_f (veya K_t) faktörüne bölünür.
- Böylece Stress Intercept (S_f') değişmezken, eğim değişir.
- Yeni eğim:

$$b_{notch} = b - \frac{\log\left(\frac{K_f}{k_{SF} k_L k_{size}}\right)}{\log(N_{FL})}$$

$$S_a = \frac{\Delta S}{2} = S_f' (N_f)^{b_{notch}}$$

- Ömür hesabında artık bu yeni eğim kullanılır.
- Formülden görüleceği gibi diğer faktörlerde eğimi etkilememektedir. Bu faktörleri ileride göreceğiz.



Yükleme Tipi (Load Factor)

- Geleneksel olarak S-N eğrileri bending testleri ile çıkarılmıştır
- Oysa çekme ve basma tipi testlerde farklı ömürler elde edilmektedir
- Bu etkiyi telafi etmek için k_L (load factor) kullanılır

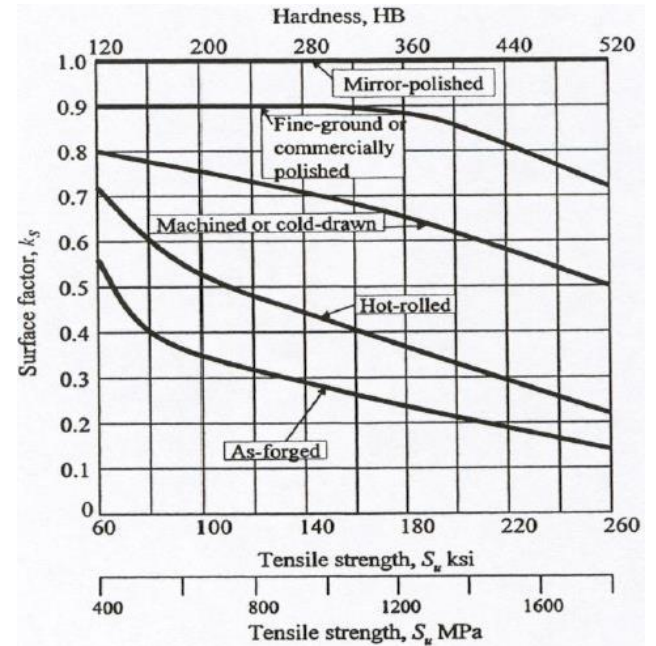
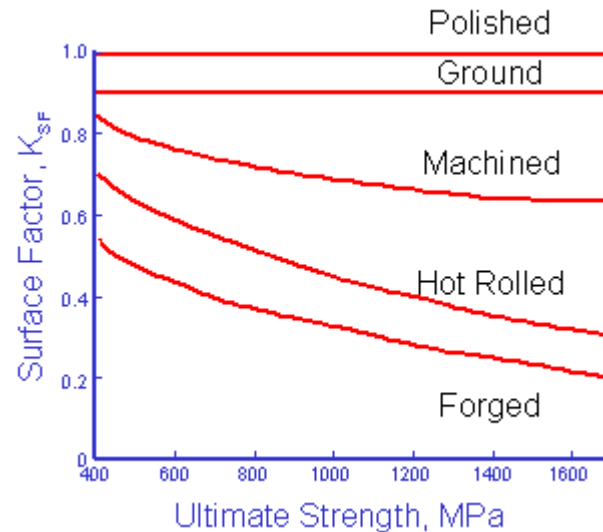
| LOAD FACTOR | k_L |
|------------------------------|-------|
| | k_L |
| Tension, $S_u \leq 1500$ MPa | 0.92 |
| Tension, $S_u > 1500$ MPa | 1 |
| Bending | 1 |
| Torsion | 0.58 |

Yüzey Pürüzlülüğü

- S-N eğrisinin elde edildiği testte kullanılan malzeme pürüzsüz numunedir
- Oysa gerçekte yüzey bitirme işlemine bağlı olarak farklı pürüzlülükler vardır
- Fatigue çatlaktan bağladığı ve pürüzler de çatlağın başlamsını sağladığı için önemlidir
- Bu etki yüzey faktörü (k_{SF}) ile telafi edilir

$$k_{SF} = \alpha S_u^\beta$$

| | α | β |
|------------|----------|---------|
| Ground | 1.58 | -0.085 |
| Machined | 4.51 | -0.265 |
| Hot Rolled | 57.7 | -0.718 |
| Forged | 272 | -0.995 |



Kalınlık Etkisi (Size Factor)

- Küçük çaplar, büyük çaplara göre daha uzun fatigue limit vardır
- Bu etki k_{SIZE} ile telafi edilir

Faktörlerin S-N eğrisine uygulanması

- Yüzey, yükleme tipi ve kalınlık etkisi faktörleri S-N eğrisinde fatigue limiti, yani eğimi değiştirmekte kullanılır

$$S_{FL}(\text{component}) = S_{FL}(\text{malzeme}) \cdot k_{SF} \cdot k_L \cdot k_{SIZE}$$

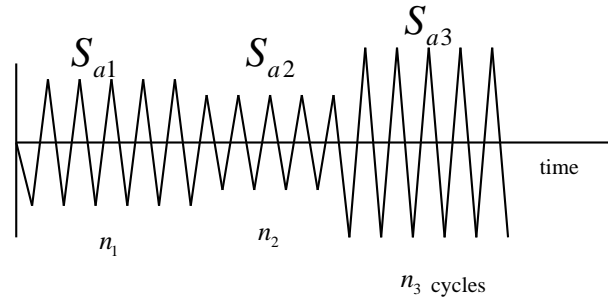
- Böylece daha önce verilen yeni eğim hesaplanır

$$b_{notch} = b - \frac{\log\left(\frac{K_f}{k_{SF} k_L k_{size}}\right)}{\log(N_{FL})}$$

Değişken Genlikli Gerilme

Yükleme tek bir genlikte olmayabilir. Değişken genliklerde, farklı tekrar sayılarında olabilir.

Her genlik seviyesi ve ilgili tekrar sayısı, önce Goodman ile eşdeğer genlik ve tekrar sayısına çevrilmelidir.



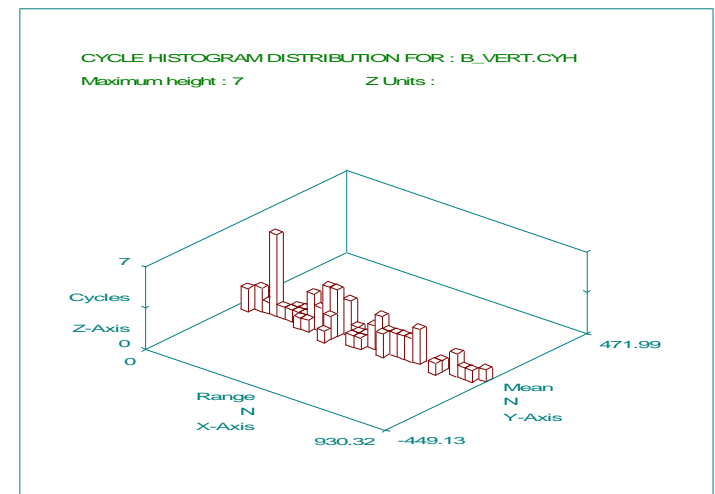
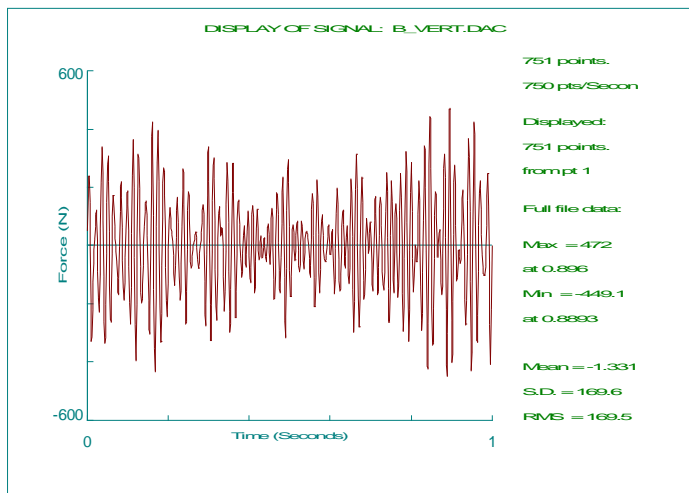
Palmgren Miner yöntemi hasarları toplar.
Toplam hasar 1 olduğunda parça kırılmış demektir

$$\sum \frac{n}{N} = 1.0$$

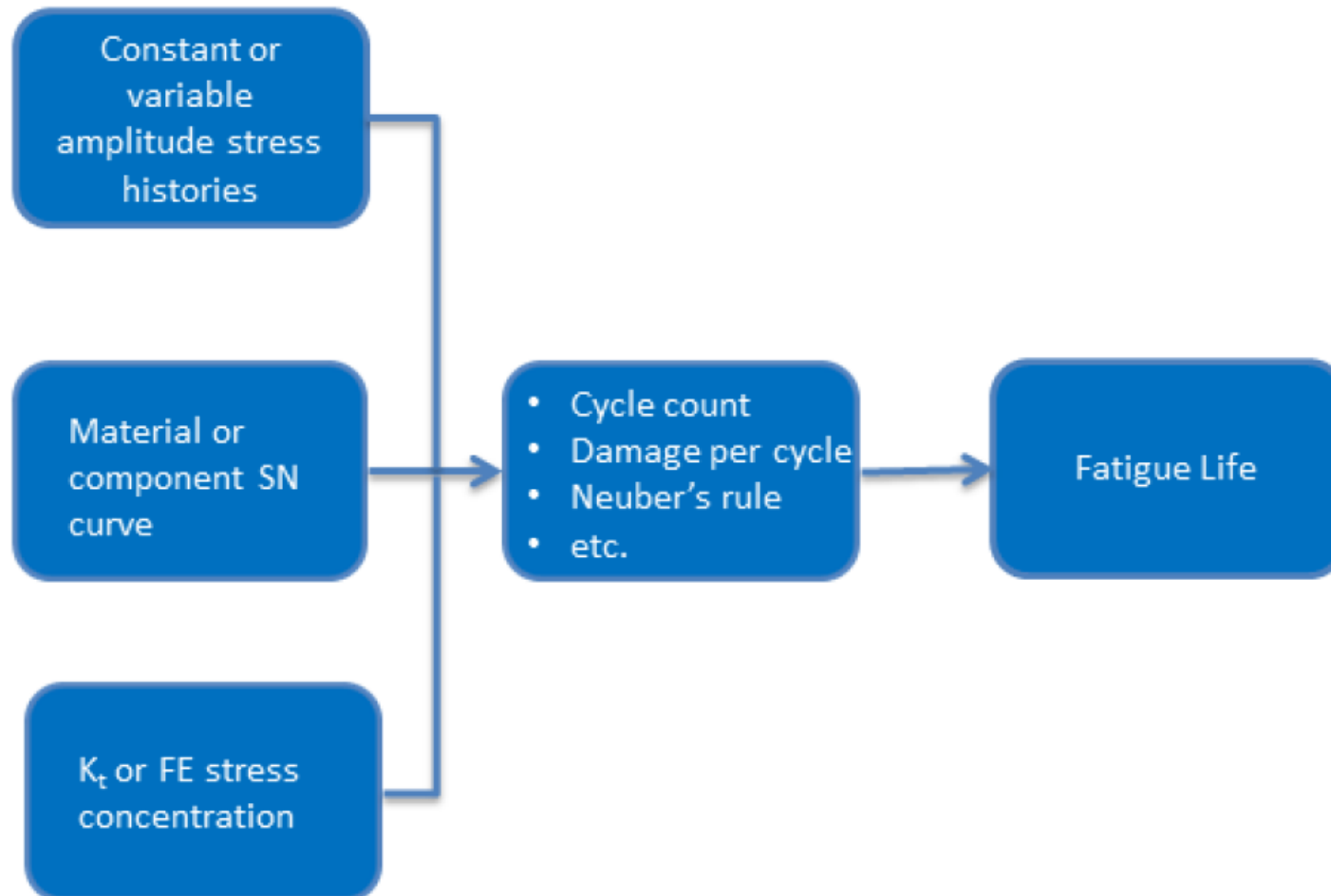
$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 1.0$$

Rastsal Yükleme

- Gerçek hayattaki gerilmeler bazen çok daha karmaşık olabilir
- Karmaşık bir yüklemeyi sabit genlikli basit yüklemelere dönüştürmek için Rainflow Cycle Counting kullanılır
- Rainflow karmaşık bir yüklemeyi, her biri sinüs yüklemesi olarak düşünebileceğimiz, genlik-ortalama-tekrar matrisine dönüştürür.



Ömür Hesabı İşlem Şeması

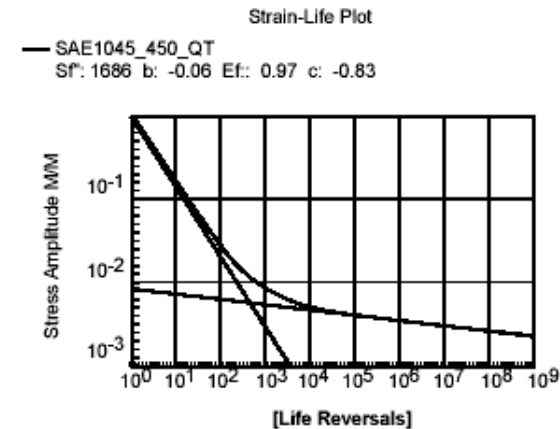
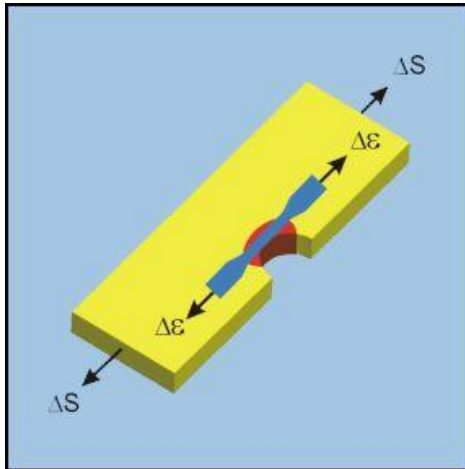


Sonlu Elemanlar ile Ömür Hesabı

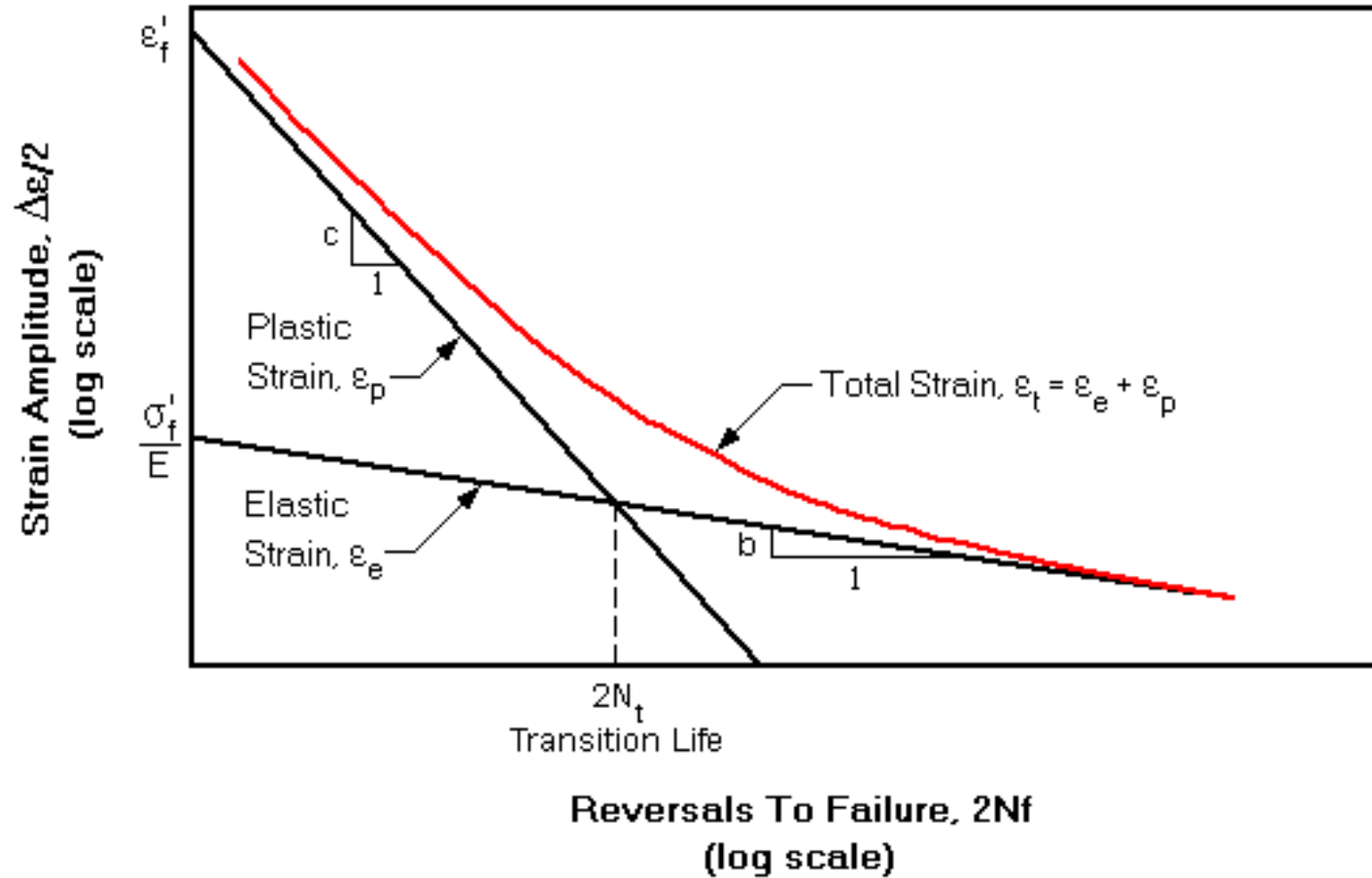
- Analizlerde gerilme ve gerilmeler elde edilir
- Yapılacak analiz statik, dinamik, modal superpozisyon veya frekans alanında olabilir
- Eğer analiz birim yüklerle yapıldıysa, gerçek yükleme ile analiz sonucu çarpılır (fatigue programında)
- Sonlu eleman analizi, yorulma hesabı için bir girdidir
- Lokal gerilmelerin doğru hesaplanması için sonlu eleman ağı düzgün yapılmalıdır
- Yorulma yüzeyde olacağı için özellikle yüzeydeki eleman ağına dikkat edilmelidir

Strain-Life Yöntemi

- Düzgün bir numunenin malzemesinin strain kontrollü testteki davranışı ile çentikli bir yapının malzemesi arasında benzerlik varsayar
- Herhangi bir yükleme altında numunede ve çentikte meydana gelen hasar aynı kabul edilir.
- Lokal gerilme-gerinme datası elde edilmelidir



Strain Life (e-N) Eğrisi



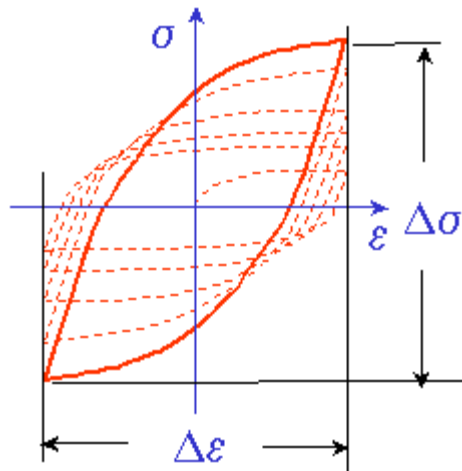
Strain-Life Data

- Strain-Life'da tekrar (cycle) yerine çevrim (reversal) kullanılır (1 tekrar = 2 çevrim)

| Parameter Name | S.J. Units | Imperial Units | Parameter |
|----------------------------------|--------------------------|----------------|--------------|
| Fatigue strength coefficient | MPa or MN/m ² | PSI | σ_f |
| Fatigue strength exponent | none | none | b |
| Fatigue ductility coefficient | none | none | ϵ_f |
| Fatigue ductility exponent | none | none | c |
| Young's modulus | MPa or MN/m ² | PSI | E |
| Cyclic strain hardening exponent | none | none | n' |
| Cyclic strength coefficient | MPa or MN/m ² | PSI | K' |
| Cut off in reversals | none | none | Rc |

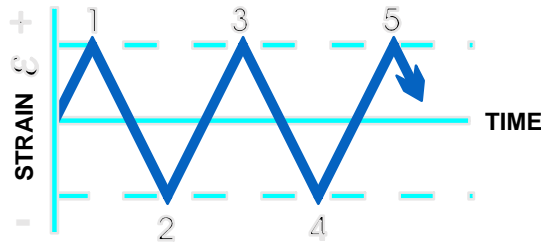
e-N Malzeme Testi

- Gerinme kontrollü testler hep aksenal yüklemde yapılır
- Deformasyon kontrol edilir ve gerinme hesaplanır. Gerilme kuvvetten genel kesit için hesaplanır
- Metaller genelde belirli bir süre sonra kararlı gerilme-genleme değerine gelirler. Hysteresis loop görülür
- Strain-Life verisi kararlı gerilme-genleme değerlerinden çizilir

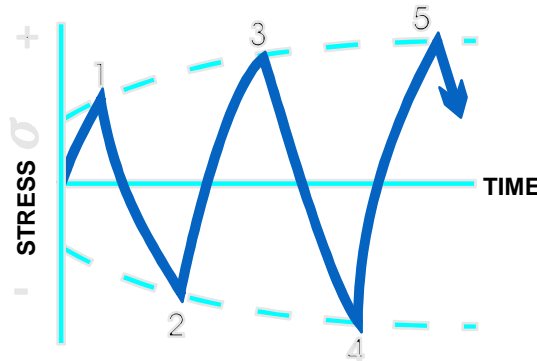


Cyclic hardening and softening

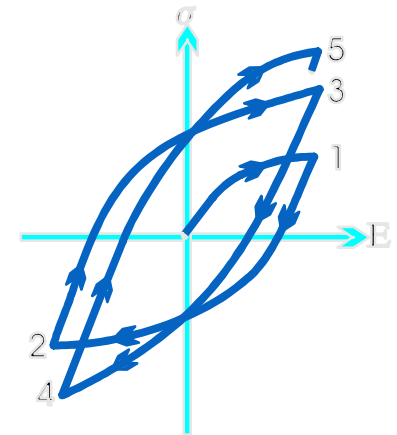
Cyclic Hardening



CONTROL CONDITION

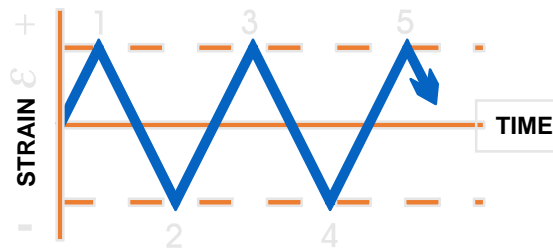


RESPONSE VARIABLE

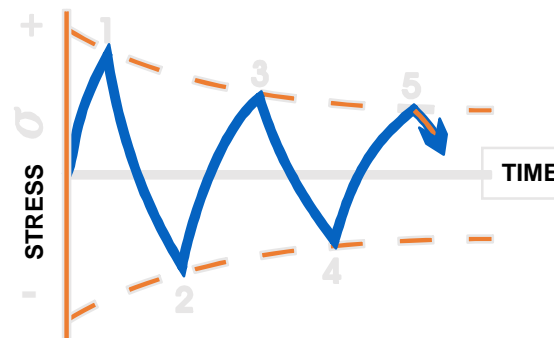


HYSTERESIS LOOPS

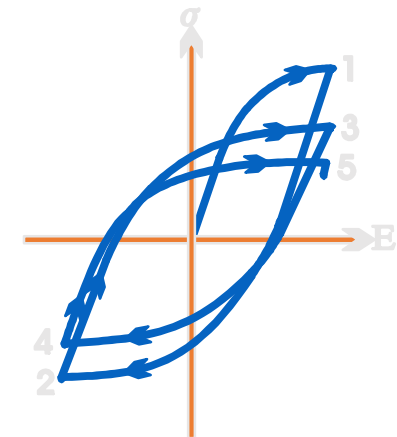
Cyclic Softening



CONTROL CONDITION

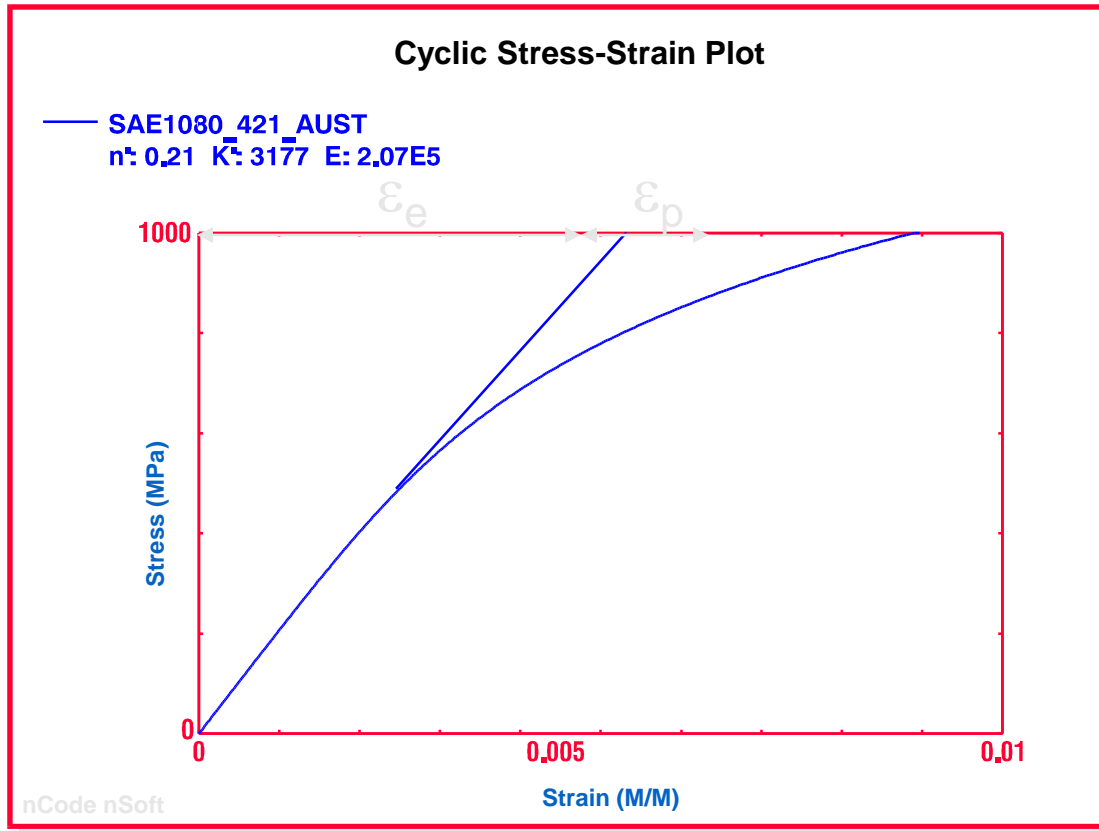


RESPONSE VARIABLE



HYSTERESIS LOOPS

Stress-Strain Relationships



Monotonic

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left[\frac{\sigma}{K} \right]^{1/n}$$

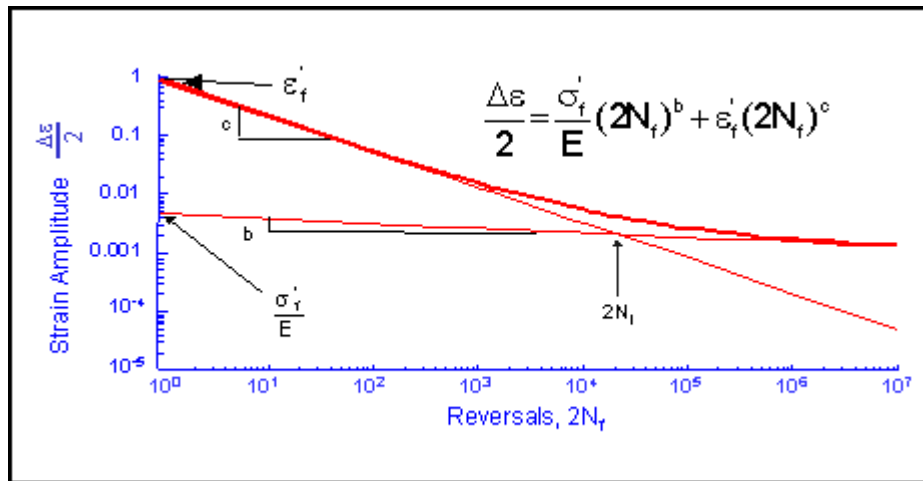
Cyclic

$$\varepsilon = \frac{\sigma_a}{E} + \left[\frac{\sigma_a}{K'} \right]^{1/n'}$$

Ramberg-Osgood Relationships

e-N Eğrisi

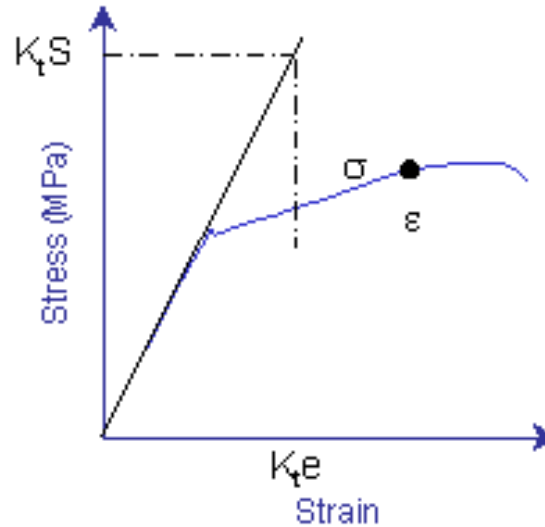
- Testten elde edilen veri basit power fonksiyona fit edilir
- Malzeme Sabitleri:
fatigue ductility coefficient, e' , fatigue ductility exponent, c ,
fatigue strength coefficient, s' , and fatigue strength exponent, b .
- Toplam gerinme, elastik ve plastik kısımlarının toplamıdır



$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c$$

e-N'de Gerilme Yığılması

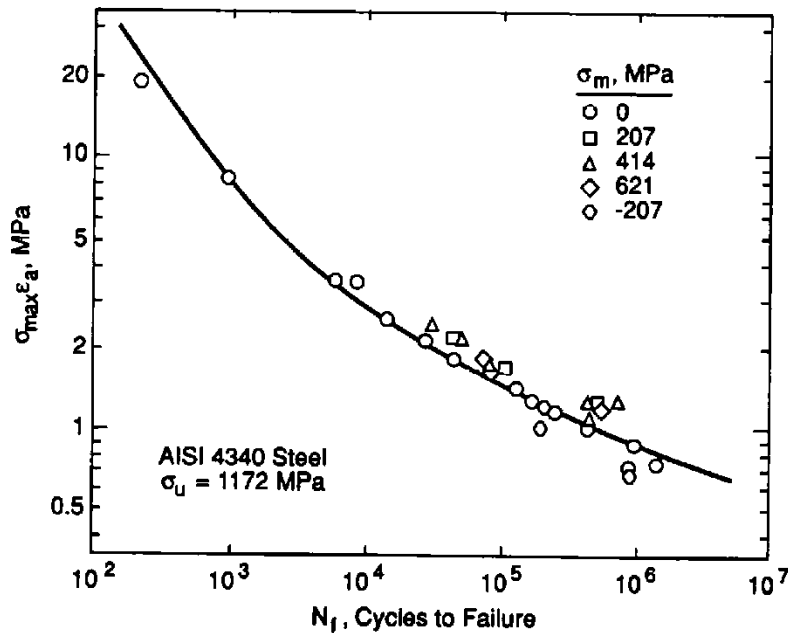
- K_t veya K_f çentik kenarındaki elastik deformasyonu tanımlar. Ancak «strain-life» için plastik gerinmeyi tespit etmek gerekmektedir
- Elastik olarak hesap edilen gerilme, akma gerilmesini geçtiği zaman Neuber kuralı ile elastik-plastik gerilme-gerinme değerine çevrilir.
- $K_t S \cdot K_{te} = \sigma \cdot \epsilon$



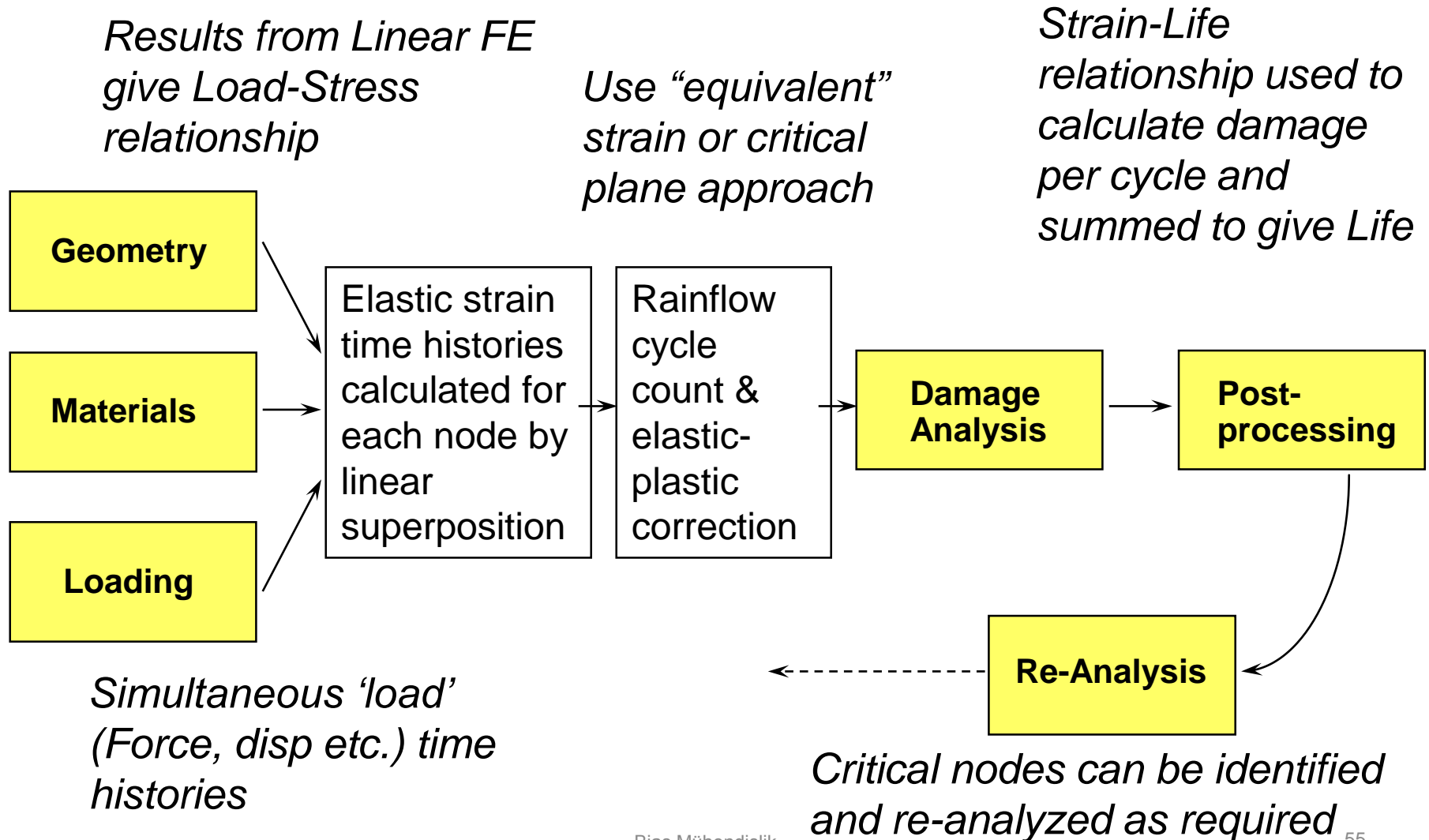
e-N Yönteminde Ortalama Gerilme

- En çok kullanılan yöntemlerden birisi Smith-Watson-Topper (SWT)'dir.

$$P_{SWT} = \sigma_{max} \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \left(\frac{\Delta \sigma}{2} \right)_{R=-1} \left(\frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \right)$$

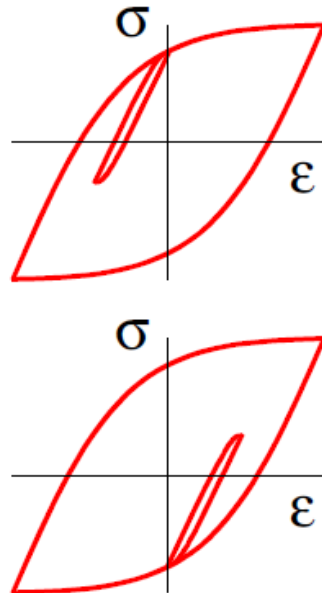
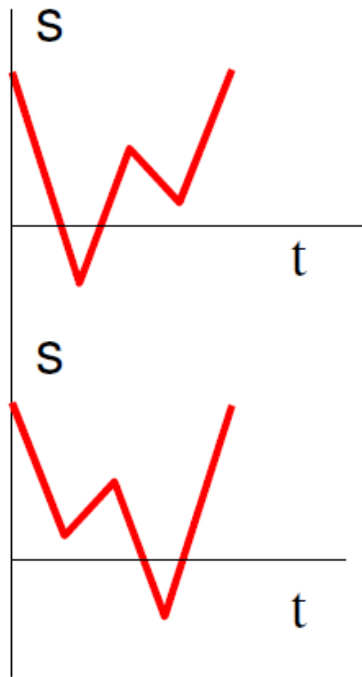


Linear Static, Strain-Life Example



Yüklemenin Zamanlaması

- Yüklemenin sıralaması yorulma ömrünü nasıl etkiler. Örneğin çok yüksek genlikli bir yüklemenin ömrün başında veya sonuna doğru olmasının farkı nedir?



Hanging Loop

Tensile mean =
more damage

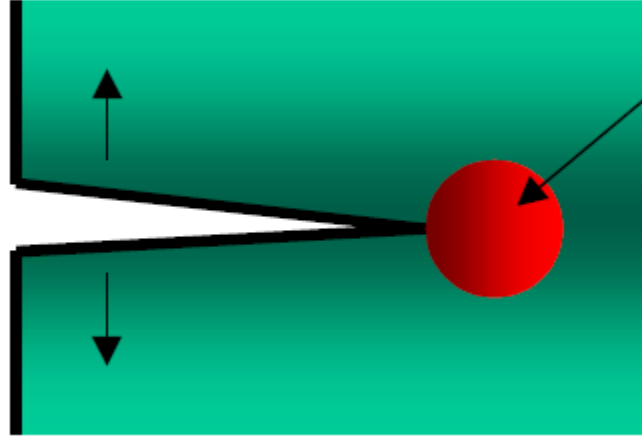
Standing Loop

Compressive mean =
less damage

Aşırı yüklemenin etkisi

- Anlık çok yüksek yüklemenin yorulma ömrüne etkisi nedir?

Aşırı yükleme, çatlak ucunun ötesinde-çevresinde plastik deformasyon yaratır. Bunun sonucunda o bölge basma gerilmesi altında kalır. Yeni yükleme önce bu basma gerilmesini aşmak zorundadır. Ömre pozitif etkisi vardır.



TEŞEKKÜRLER