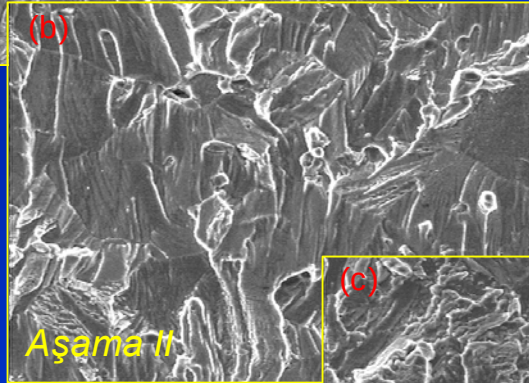


YÇB kırık Yüzeyleri

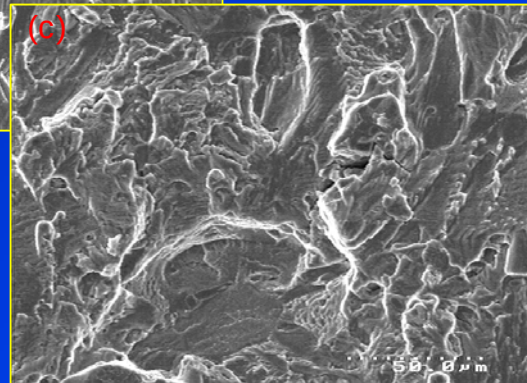
- **Yorulma Çatlak Büyümesi (FCG) testi** sadece çatlak yayılma/büyüme aşamasını içerir, çatlak başlama aşamasını hariç tutar.
- Numunede ilk başta kısa veya küçük bir çatlak bulunur ve bu çatlak çevrimsel yüklemeler altında büyür.



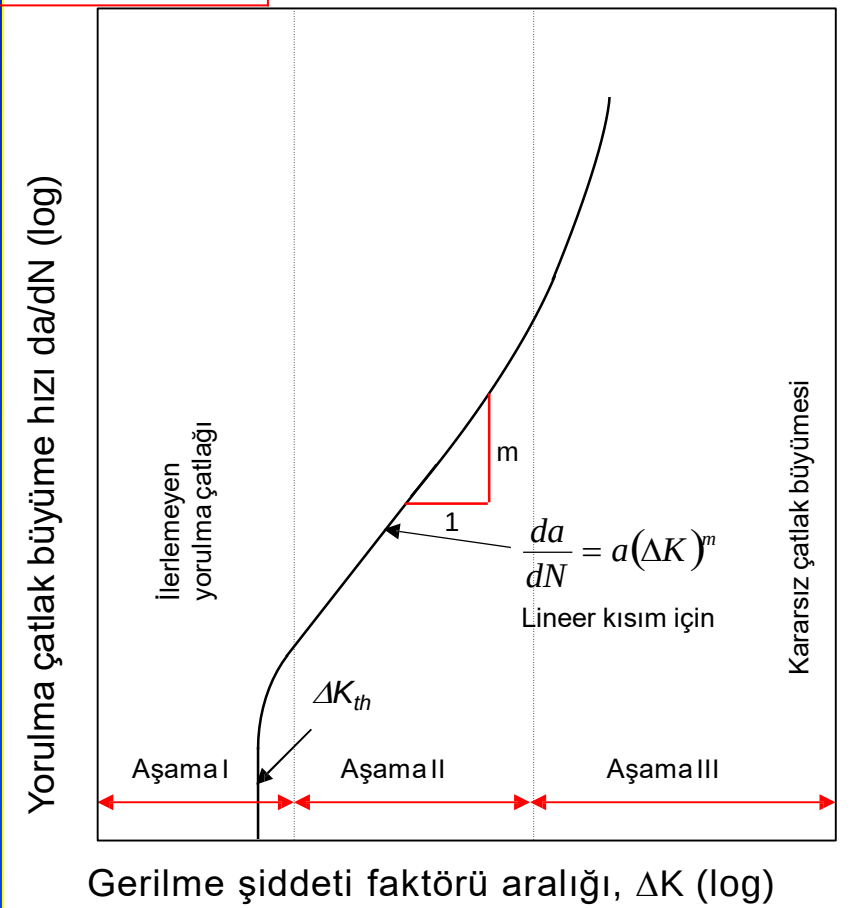
Gevrek yüzeyler(kayma) + yorulma çizgisi



Yorulma çizgileri



Gevrek Yüzeyler (klivaj) +



Yorulma özelliklerini etkileyen faktörler

- *Gerilme konsantrasyonu*
- *Boyut etkisi*
- *Yüzey etkileri*
- *Bileşik gerilmeler*
- *Birikimli yorulma hasarı ve dizi etkileri*
- *Metalurjik değişkenler*
- *Korozyon*
- *Sıcaklık*

Gerilme konsantrasyonunun yorulmaya etkisi

Gerilme yükselteçler ↑ Yorulma Dayanımı ↓ ↓

• Talaşlı ve diğer imalat işlemlerinden kaynaklanabilecek gerilme yükseltici etkilerden kaçınılmalıdır.

• Gerilme yükseltici çentiklerin Yorulma dayanımı üzerine etkisi çentikli ve çentiksiz numunelerin SN eğrileri karşılaştırılarak belirlenebilir. (numunelerin net kesitleri eşit alınarak)

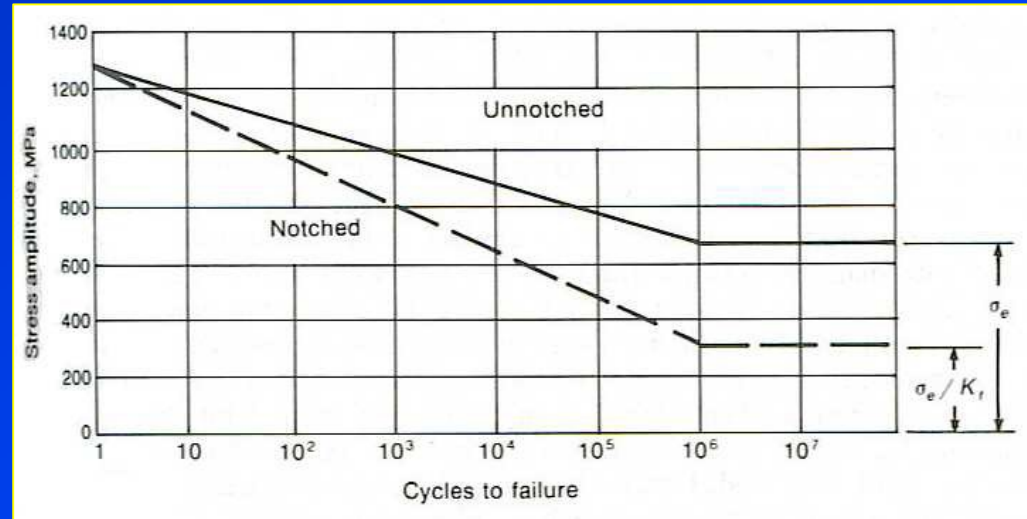
• Yorulma çentik duyarlılığı faktörü q şu şekilde belirlenir,

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad \text{Eq.16}$$

Burada

K_t çatlak ucunun elastikliğine bağlı olarak teorik gerilme-konsantrasyon faktörüdür.

K_f ise yorulma çentik faktörü, çentikli ve çentiksiz numunelerin yorulma dayanımlarının oranıdır.



Çentikli ve çentiksiz numunelerin SN eğrisi

Yorulmaya boyut etkisi

Yorulma Özellikleri

DeneySEL Ölçek

≠

Endüstriyel ölçek

Boyut
etkisine
bağlı

- Küçük boyutlu numunelerde yorulma özellikleri daha iyidir.
- Problem: Test cihazları büyük numuneleri yoramaz.
- **Büyük numuneler** ↗ çevrimsel yüke maruz kalan yüzey alanı (yüzeyde kusurları bulunma olasılığı daha yüksek.,
↘ Gerilme gradyanını düşürür ve ↗ yüksek gerilme etkileyen malzemenin hacmi

Açıkla: Küçük boyutlu laboratuvar numunelerinde aynı gerilme konsantrasyonunu ve gerilme gradyanını yaratmak/oluşturmak genellikle imkansızdır.

Çözüm: İstatiksel yaklaşım kullanılır örn., **Weibull istatistiği.**

Yorulmaya Yüzey etkileri

- *Yorulma özellikleri yüzey şartlarına karşı çok hassastır,*
- *Yorulma başlangıcı maksimum gerilme yüzeyde meydana geldiğinden normal olarak yüzeyde başlar.*
- *Bir yorulma numunesinin yüzeyini etkileyen faktörler kabaca üç kategoriye ayrılabilir*

- *Yüzey Pürüzlülüğü*
- *Yüzey özelliklerinde değişimler*
- *Yüzeydeki kalıntı/artık gerilmeler*

Yüzey Pürüzlülüğü

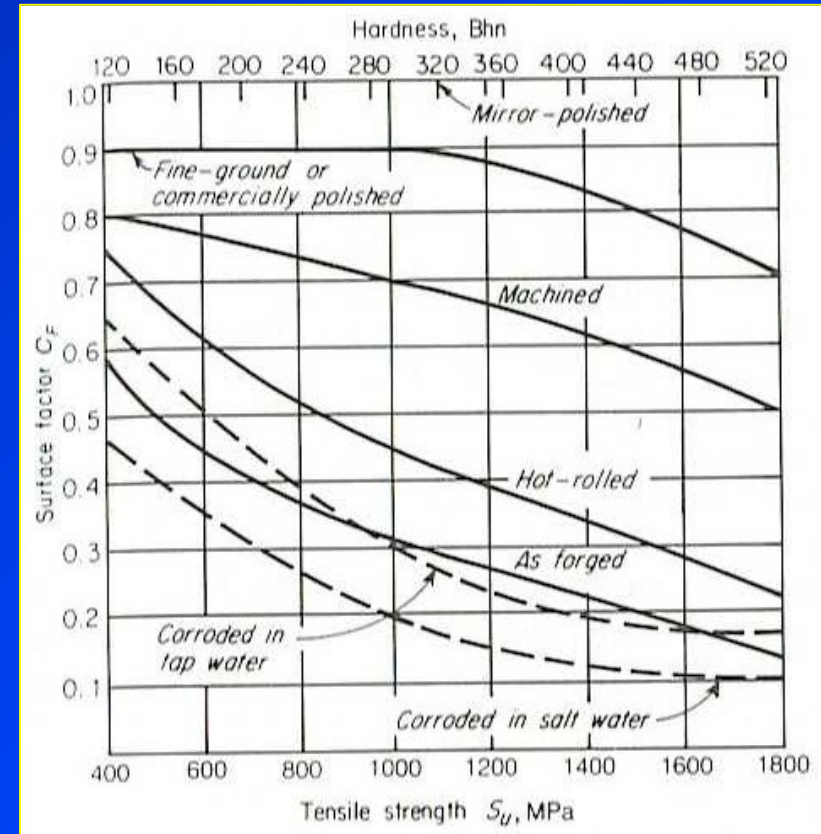
- Farklı **talaşlı işleme** prosesleri tarafından üretilen farklı yüzey bitirme düzeyleri **yorulma performansını** önemli ölçüde etkileyebilir
- Normalde laboratuvarlarda kullanılan ' **par bar** ' olarak bilinen parlatılmış yüzey (çok ince çizikler) **en iyi yorulma mukavemetini** verir.

Table 12-3 Fatigue life of SAE 3130 steel specimens tested under completely reversed stress at 655 MPa†

Type of finish	Surface roughness, μm	Median fatigue life, cycles
Lathe-formed	2.67	24,000
Partly hand-polished	0.15	91,000
Hand-polished	0.13	137,000
Ground	0.18	217,000
Ground and polished	0.05	234,000
Superfinished	0.18	212,000

† P. G. Fluck, *Am. Soc. Test. Mater. Proc.*, vol. 51, pp. 584–592, 1951.

Çeşitli yüzey işlemleri için çeliğin yorulma sınırını azaltma faktörü: yüzey etki katsayısı, C_F



Yüzey özelliklerinde değişiklikler

- Yüzey işlemlerinden dolayı yüzey özelliklerinde değişiklikler



Yorulma
Dayanımı/özelliklerinde
değişimler

Yorulma performansını azaltan işlemler

Dekarbürizasyon

Ör: Isıl işlem görmüş çeliklerin yüzeyinin dekarburizasyonu

Yumuşak kaplamalar

Ör: Yaşlanabilir Al alaşımlarına yumuşak alüminyum kaplama

Elektrolitik kaplamalar

Kalıntı gerilme, yapışma, gözeneklilik, sertlikteki değişikliklerden dolayı yorulma dayanımını azaltabilir.

Yorulma performansını artıran işlemler

Sementasyon

Nitrürleme

Alevle Sertleştirme

İndüksiyonla
Sertleştirme

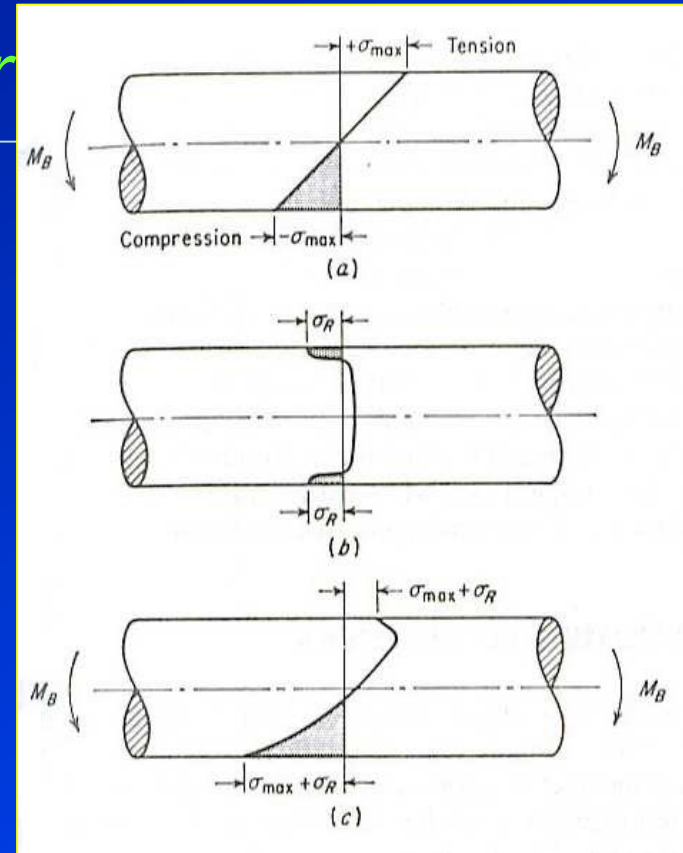
•Yüzeyde basma artık gerilmelerin oluşturulması ile daha sert ve daha güçlü bir yüzey oluşturmak

•Dayanım artırma etkisi, parçanın çapına ve yapılan yüzey sertleştirmenin derinliğine bağlıdır.

Yüzeydeki Kalıntı/Artık Gerilmeler

• **Kalıntı gerilmeler**, plastik deformasyonun deforme olan parçanın tüm kesiti boyunca **homojen olmadığı** durumlarda ortaya çıkar.

Yükleme	Boşaltma
Parça çekme uygulanarak deforme olmuş	Basma Artık Gerilmesi
Parça basma uygulanarak deforme olmuş	Çekme Artık Gerilmesi



Artık gerilmelerle uygulanan gerilmelerin süperpozisyonu

- (a) Elastik gerilme dağılımını, hiçbir **kalıntı/artık gerilme** olmayan bir kiriş içinde gösterir.
- (b) Yüksek basma artık gerilmelerin merkezde küçük çekme artık gerilmesi ile dengelendiği (**shot-peening**) bilya püskürtme işlemi ile üretilen tipik artık gerilme dağılımı
- (c) Dışardan uygulanan **eğme gerilmesinin**, **artık gerilmelerle** cebirsel toplanmasından dolayı oluşan net gerilme dağılımı.

İstenen yönde Basma Artık Gerilmeleri oluşturan Ticari Yöntemler

- **Yüzey Haddeleme**

- Saç haddeleme sırasında yüzeyde basma artık gerilmeleri oluşur

- **Shot peening-Bilya Püskürtme**

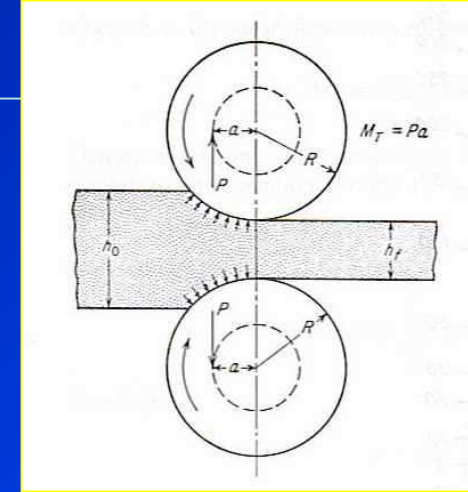
- Yüzeye karşı yüksek hızda ince çelik veya dökme demir bilya fırlatma.

- **Parlatma**

- Yüzey çiziklerinin giderilmesi

- **Isıl Gerilmeler**

- Suverme veya bazı yüzey işlemleri dönüşümsel hacim değişimini sağlayarak yüzeyde basma artık gerilmeleri oluşturur.



Saç Haddeleme

Kombine/Bileşik gerilmelerin yorulmaya etkisi

Farklı gerilme tiplerinin kombinasyonları altında yapılmış yorulma testleriyle ilgili çok az veri bulunur .

- Birleşik eğme ve burulma zorlamaları altında yorulan *yumuşak/sünek metaller* , distorsiyon enerjisi kuralına uyar (*von Mises*).
- *Gevrek malzemeler* ise, maksimum asal gerilme hipotezine uygun davranır (*Tresca*).

Sines bunlar için şu ifadeleri önermiştir,

*Düşük
Genlemede*

$$\left[(\sigma_{a1} - \sigma_{a2})^2 + (\sigma_{a2} - \sigma_{a3})^2 + (\sigma_{a3} - \sigma_{a1})^2 \right]^{1/2} + C_2(m_1 + m_2 + m_3) \geq \frac{\sqrt{2}\sigma_a}{K_f} \quad \text{Eq.17}$$

*Yüksek
Genlemede*

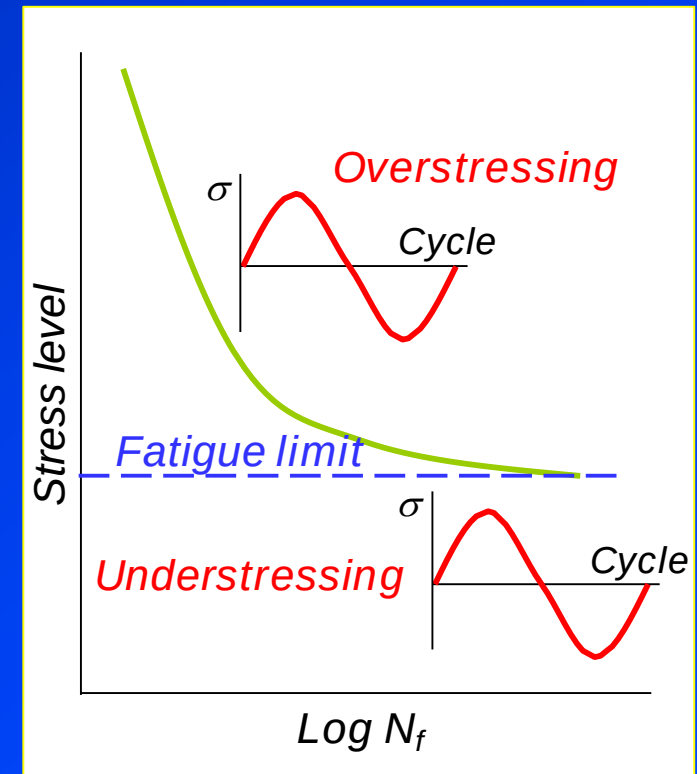
$$\varepsilon_q = \frac{\gamma_{oct}}{2} = \frac{1}{3} \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Eq.18}$$

Not: Artık ve 3 eksenli gerilmelerin etkileri dahil edilmiştir.

Kümülatif yorulma hasarı ve yorulmaya sekansın etkisi

Pratikte, **gerilme seviyeleri** SN testlerinde olduğu gibi sabit değildir, yani tasarlanan gerilme seviyesinin altında veya üstünde olacak şekilde değişebilir.

- **Sınır-Üstü Gerilme**: İlk uygulanan gerilme seviyesinin hasar/kırılma oluşturmaksızın kısa bir süre için yorulma sınırından daha yüksek olduğu, daha sonra tekrarlı bir zorlamanın yorulma sınırının altında kalacak şekilde devam etmesi. Bu aşırı gerilme yüklenmesi, yorulma sınırını azaltır .
- **Sınır-Altı Gerilme**: Uygulanan ilk gerilme seviyesi bir süre için yorulma sınırından daha düşüktür, daha sonra çevrimsel gerilme, yorulma sınırının üstündedir. Bu tür yüklenme, yorulma sınırını arttırır (yüzeyde oluşan deformasyon sertleşmesi nedeniyle olabilir).



Birikimli hasar kuralı

Bir servis gerilme seviyesi için tüketilen yorulma ömrünün yüzdesinin arka arkaya gelen gerilme seviyeleri için olanlarla toplanarak 1'e(hasar) eşitlenmesi olarak tanımlanabilen *Miner kuralı* denen *toplama kuralı*

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = 1 \text{ or } \sum_{j=1}^{j=k} \frac{n_j}{N_j}$$

Eq.19

Burada $n_1, n_2, \dots, n_k$ = belirli sınır üstü gerilme seviyelerindeki çevrim sayısı.

$N_1, N_2, \dots, N_k$ = bu aynı sınırüstü gerilme seviyeleri için SN eğrisinde görünen beklenen (devir olarak) ömürler.

Not: Çentikli numuneler için, yorulma dayanımı Miner lineer hasar kuralından tahmin edilenden çok daha fazla azalır . Bunun nedeni, çentik dibinde oluşan artık gerilmelerin plastik bölgedeki aşırı gerilmelerden etkilenmesidir.

Örnek: Dikdörtgen kesitli bir numune 200 MPa'lık bir gerilme aralığı olan bir zorlamayla 1×10^7 çevrim yüklenmiştir,. Numunenin bundan sonra 500 MPa 'lık gerilme aralığındaki bir tekrarlı bir zorlamaya hasara uğrayana kadar daha kaç çevrim dayanabileceğini tahmin ediniz

Verilen bilgiler

Uygulanan Gerilme Aralığı(MPa)	Hasar çevrim sayıları
600	1×10^4
500	2×10^4
400	5×10^4
300	3×10^5
250	3×10^6
200	8×10^7

Miner' kuralından

Varsayım: Bir parçanın toplam ömrü, her bir sınır üstü gerilme çevrimi tarafından tüketilen ömür yüzdesini ekleyerek tahmin edilebilir.

Bu nedenle, numune, 500 MPa'lık yorulma yüküne daha.....dayanabilir.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = 1$$

$$\frac{1 \times 10^7}{8 \times 10^7} + \frac{x}{2 \times 10^4} = 1$$

$$\frac{x}{2 \times 10^4} = 1 - \frac{1}{8}$$

$$x = \frac{7}{8} \times 2 \times 10^4 = 1.75 \times 10^4 \text{ çevrim}$$

Metalurjik deęişkenlerin yorulma özellikleri üzerine etkileri

- Yorulma özellikleri, normal olarak, gerilme konsantrasyonlarını azaltacak şekilde tasarımları değiştirerek veya yüzeyde artık basma gerilmelerini oluşturarak büyük ölçüde iyileştirilir.
- Yorulma özelliklerini iyileştirmek üzere metalurjik yapıyı geliştirmek için birkaç girişimde bulunulabilir.
- Yorulma özellikleri çekme dayanımı ile ilişkilidir.

$$\text{Yorulma Oranı} = \frac{\text{Yorulma Dayanımı}}{\text{Çekme Dayanımı}}$$

Çekme Dayanımı



Yorulma Dayanımı



Örn: yorulma oranı ~ 0.5 döküm ve yoęruk çeliklerde,
~ 0.35 demirdışı metaller için.

Not: düzgün ve parlatılmış numuneler için.

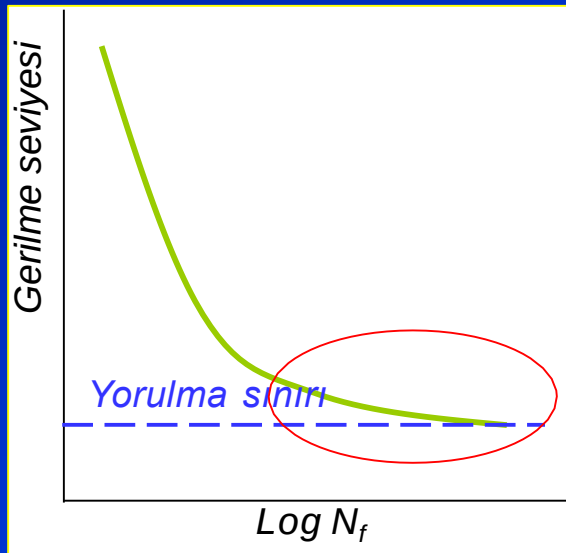
Metalurjik değişkenleri kontrol ederek Yorulma Dayanımını iyileştirme

Çekme Dayanımının Artırılmasıyla

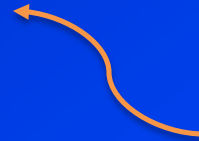
Dayanım artırma mekanizmalarıyla



- Tane küçültme
- Fiber takviyeli karma malzeme
- İkinci faz sertleşmesi
- Soğuk deformasyon



Not: Tüm durumlar için geçerli değil ve orantılı olarak değil.



- Tane boyutu küçültme, düşük gerilme, yüksek ömürlü yorulma rejiminde yorulma ömrü üzerinde en büyük etkiye sahiptir.

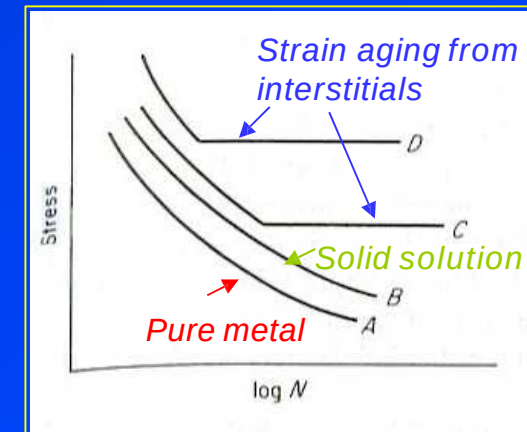
Metalurjik değişkenleri kontrol ederek Yorulma Dayanımını iyileştirme

İçyapının kontrol edilmesiyle

- *Termomekanik* işlemlerle homojen kayma / plastik deformasyon oluşturulmasıyla *artık gerilme* / *gerilme konsantrasyonunu* azaltılabilir.
- Sertleştirilmiş bir yüzey oluşturan ısı işlemler uygulanabilir ancak gerilme konsantrasyonları önlenmelidir.
- *Inklüzyonlardan kaçının* ↑ Gerilme konsantrasyonu ↑ yorulma dayanımı ↓
- *Arayer atomları* akma dayanımını arttırır, ↑ artı deformasyon yaşlanması ↑ yorulma dayanımı artar. ↑

Table 12-4 Influence of inclusions on fatigue limit of SAE 4340 steel†

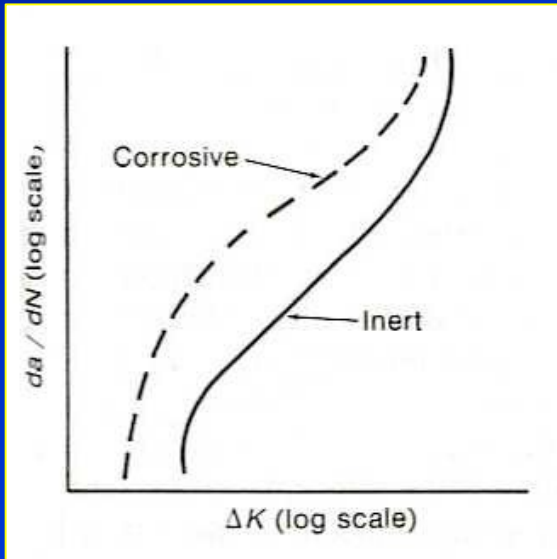
	Electric-furnace-melted	Vacuum-melted
Longitudinal fatigue limit, MPa	800	958
Transverse fatigue limit, MPa	545	827
Ratio transverse/longitudinal	0.68	0.86
Hardness, R _C	27	29



Arayer atomların etkisi

Korozyonun Yorulma Özelliklerine Etkisi

- **Korozyonlu Yorulma, malzemenin** korozif bir ortamda tekrarlı zorlanmaya maruz kalması halinde olur.
- **Korozif etkiler** metalin yüzeyinde çukur (**pitting**) oluşumuna neden olur. Bu çukurlar çentik/çatlak gibi etki ederek yorulma dayanımını düşürür.
- Kimyasal saldırı yorulma çatlağının ilerleme hızını büyük ölçüde artırır.



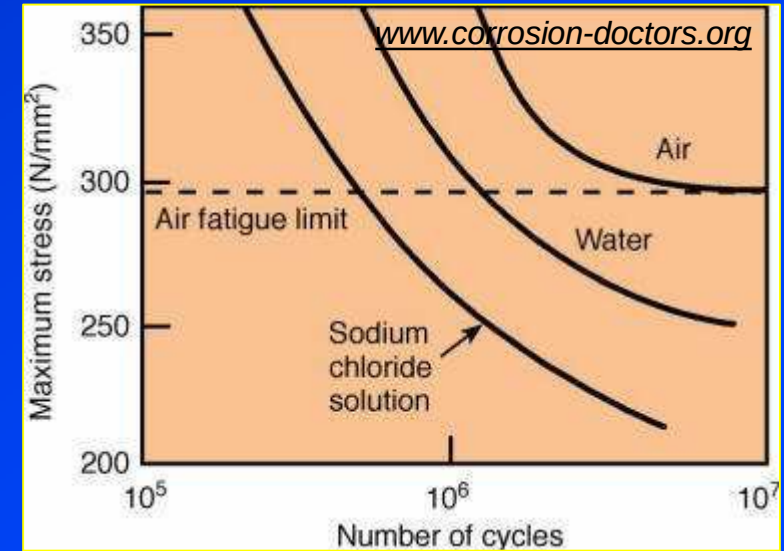
Pirincte korozyonlu yorulma hasarı

*Yorulma çatlak
ilerlemesi üzerine
korozif ortamın etkisi*

Korozyonlu Yorulma Testi

Korozyonlu yorulma testi, normal yorulma testine benzer ancak kontrollü bir koroziv ortamda gerçekleştirilebilir.

- Korozyon işlemi **zamana bağlı bir fenomen** olduğundan , **test hızı** (frekans) ne kadar yüksek olursa, korozyon nedeniyle oluşan hasar o kadar az olur .
- Çevrimsel gerilmenin etkisiyle, korozyon çukurlarındaki yüzey oksit filminin lokal olarak parçalanması korozyonun hızlanmasına neden olur .



Çeşitli ortamlarda S-N eğrileri

Korozyonlu Yorulmanın Önlenmesi için

- İstenilen uygulama için **korozyona dayanıklı malzemeler** seçin .

Örn: paslanmaz çelik, prinç, bronz, ısıtıl işlem görmüş çelikten daha iyi performans gösterir.

- Koruyucu metalik veya metalik olmayan kaplamalar ile metalin **korozif ortamlar** temasının kesilmesi.

- Nitrürleme veya bilye püskürtme vb. işlemlerle yüzey kusurlarını ortadan kaldırıp, yüzeyde **basma artık gerilmeleri** oluşturma.

Sıcaklığın yorulmaya etkisi

Sıcaklık

(Artan σ_{TS})



Yorulma Dayanımı



Deney Sıcaklığı < **YKS** Düşük Sıcaklıkta Yorulma.
Deney Sıcaklığı > **YKS** Yüksek Sıcaklıkta Yorulma

YKS: Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı

- Yüksek sıcaklıkta yorulmada, sıcaklık artışı ile yorulma hasarından sünme hasarına doğru bir geçiş vardır (yüksek sıcaklıklarda sünme daha baskın olmaktadır)
- Sünmenin baskın olduğu durumda **iri taneli metaller** daha yüksek yorulma dayanımı gösterir
- **İnce taneli metaller** düşük sıcaklıklarda daha yüksek yorulma dayanımına sahiptirler.

Sıcaklık



Yorulma hasarı

Tanelerarası
yorulma
kırılması



Sünme hasarı

Taneleriçi
Sünme
kırılması

Isıl Yorulma

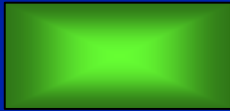
Isıl yorulma , metal yüksek ve düşük sıcaklığa maruz kaldığında meydana gelir ve dalgalı çevrimsel ısıl gerilme oluşturur.

Isıl çevrim



Hacim değişimi

Soğuk



Sıcak



- Normalde yüksek sıcaklık ekipmanlarında meydana gelir.

- Düşük ısıl iletkenlik ve yüksek ısıl genleşme özellikleri çok önemlidir.

- Sıcaklığın ΔT kadar değişmesiyle meydana gelen ısıl Gerilme

$$\sigma = \alpha E \Delta T$$

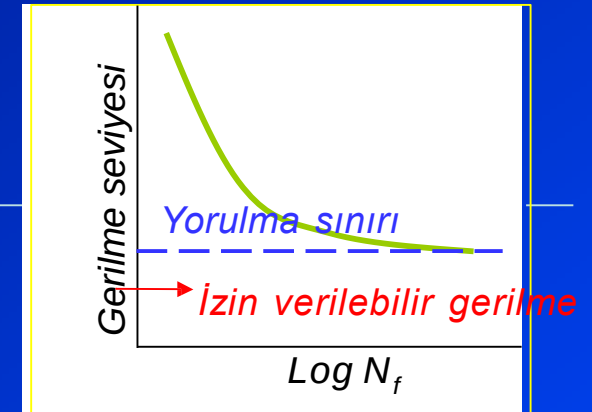
Eq.19

Burada α lineer ısıl genleşme katsayısı,
 E elatisite modülüdür.

Eğer bir ısıll gerilme çevrimi uygulamasıyla hasar olursa, duruma *termal şok* denir .

Yorulma için tasarım

Yorulma için/karşı tasarımla ilgili birkaç farklı yaklaşım vardır.



- 1) Sonsuz-Ömür Tasarımı: (Infinite-life design) Gerilmeyi, malzemenin yorulma sınırının altında tutunuz
- 2) Güvenli Ömür Tasarımı (Safe-life design): Malzemenin kusurlu olduğu ve sınırlı bir ömre sahip olduğu varsayımına dayanarak, malzeme ve imalattaki çeşitli faktörleri ile çevresel etkileri kompanze etmek için için emniyet faktörü kullanılır.
- 3) Hasar Güvenli Tasarım (Fail-safe design): Yorulma çatlakları, gerçek hasara neden olmadan önce tespit edilecek ve onarılacaktır. Uçak endüstrisi için.
- 4) Hasarlara dayanıklı tasarım: (Damage tolerant design): Mevcut bir çatlağın hasara neden olacak kadar büyüüp büyümeyeceğini belirlemek için kırılma mekaniği kullanın.

Referanslar

- Dieter, G.E., Mechanical metallurgy, 1988, SI metric edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-100406-8.
- Suresh, S., Fatigue of materials, 1998, 2nd edition, Cambridge university press, ISBN 0-521-57847-7.
- Ders Notları, M. Demirkol, Malzemelerin Mekanik Davranışı, İstanbul Teknik Üniversitesi