

TÜBİTAK
MARMARA ARAŞTIRMA MERKEZİ
GEBZE

Dr. Ahmet Aran

KIRILMA MEKANİĞİNE GİRİŞ

Seminer Notları

İÇİNDEKİLER

Sayfa

1.	Kırılma ve Çeşitleri	1
2.	Kırılma Mekanizmasının Teorik Esasları	2
3.	Kırılma Tokluğunun Deneysel Olarak Saptanması	9
4.	Bazı Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerleri	15
5.	Çatlak İlerlemesi Mekanizmaları	17
6.	Kırılma Mekanizması Uygulamalarına Bir Örnek	24
	Yararlanılan Kaynaklar	27

Aralık 1981

KIRILMA MEKANİĞİNE GİRİŞ

1. Kırılma ve Çeşitleri

Katı bir cismin gerilmeler altında iki veya daha çok parçaya ayrılması olayı KIRILMA olarak adlandırılır ve genellikle gevrek ve sünek olarak iki grupta ele alınır.

Sünek kırılma, çatlağın oluşması ve büyümesinde önemli ölçüde kalıcı şekil değişiminin görüldüğü kırılma türüdür. Çatlak, boşlukların oluşması ve birleşmesi ile meydana gelir ve yavaş ilerler. Kırılma yüzeyi mat ve lifli bir görünümdedir.

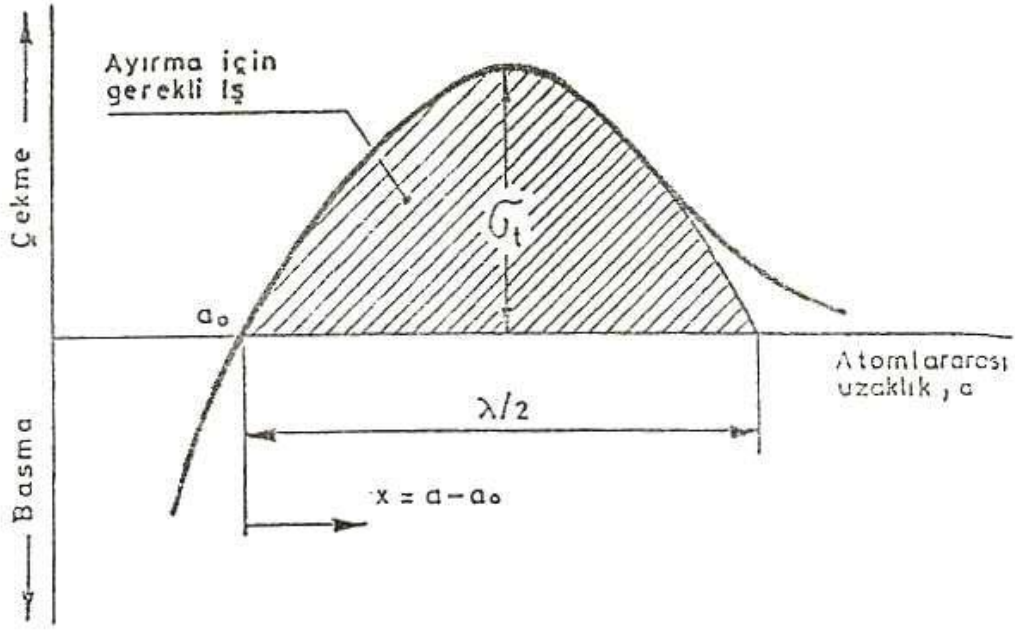
Gevrek kırılmada ise çatlak büyük bir hızla ilerler ve kalıcı şekil değişimi önemsiz düzeylerde olur. Ayrılmalar çok taneli bir yapıda her tanenin en düşük kohezyon dayanımlı kristallografik düzleminde oluşur ve kırılma yüzeyi parlak ve taneli bir görünümdedir. Gevrek kırılmanın diğer bir türü de tanelerarası kırılmadır ve tane sınırlarının kırılma bir yapıda olması halinde görülür.

Yapısal olarak gevrek olarak tanıdığımız malzemelerin yanında, klasik çekme deneyinden sünek olarak tanıdığımız malzemelerde de gevrek kırılma görülebilir. Gevrek kırılmanın oluşmasına neden olabilecek faktörler arasında aşağıdaki hususlar sıralanabilir:

- a) Çok eksenli gerilme durumları (çentik)
- b) Hızlı zorlamalar (darbe)
- c) Düşük sıcaklıklar.

Gevrek kırılma önceden farkına varılmasına imkan olmadan ve büyük bir hızla oluştuğundan en tehlikeli kırılma türüdür. Geçmişte bu nedenle ortaya çıkan hasarların çoğu bir facia ile sonuçlanmış, ancak o yıllarda bu olaylar mühendislik tasarım hatası olarak görülmüştür. Daha sonra malzemelerin gevrek kırılma davranışlarının pek iyi bilinmediği farkedilerek, konuya büyük önem verilmiş ve asrımızın ikinci yarısında Kırılma Mekanikliği olarak adlandırılan yeni bir bilim dalı geliştirilmiştir.

Bu seminerde lineer elastik kırılma mekanikliği, teoriye ancak gerek düzeyde yer verilerek ele alınacak ve kırılma mekanikliğinin özellikle uygulamada kullanılan yönlerine ağırlık verilecektir.



Sekil-1: İki atom arasındaki kuvvetlerin atomlar-
arası uzaklık ile değişimi

2. Kırılma Mekaniğinin Teorik Esasları

2.1. Malzemelerin Teorik Kohezif Dayanımı

Kristal bir yapıda düzlemlerin kırılma yoluyla ayrılması için gerekli teorik kohezif dayanım bu bölümde hesaplanmaya çalışılacaktır. Şekil-1'de iki atom arasındaki kohezif kuvvetin atomlararası uzaklık ile değişimi görülmektedir. Bir kristaldeki iki düzlem arasındaki gerilmelerin düzlemlerarası uzaklık ile değişiminin de benzer şekilde olacağı söylenebilir. Bu eğri iki atom arasındaki çekme ve itme kuvvetlerinin toplanması ile elde edilmiştir.

Denge konumunda atomlararası uzaklık a_0 olup, çekme gerilmesi uygulanması halinde bu uzaklık artmaktadır. Teorik kohezif dayanım olarak adlandırılan bir σ_t değerine ulaşıldığında ayrılma için gerekli en büyük gerilme elde edilmiş olur. Bu eğrinin üst kısmı büyük bir yaklaşımla bir sinüs eğrisi olarak ele alınabilir:

$$\sigma = \sigma_t \cdot \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (1)$$

Burada $x = a - a_0$ atomlararası ayrılma, ise dalga boyudur. Küçük x değerleri için $\sin x \approx x$ olduğundan,

$$\sigma = \sigma_t \cdot \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (2)$$

yazılabilir. Elastik alanda kaldığı ve Hooke kanununun

geçerli olduğu kabul edilirse,

$$\frac{x}{a_0} = \varepsilon \quad , \quad \sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{E x}{a_0} \quad (3)$$

olur. (2) ve (3) eşitliklerinden,

$$\sigma_t = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{E}{a_0} \quad (4)$$

bulunur. Eğrinin altındaki taralı alan düzlemleri ayırmak için harcanan enerjiyi vermektedir.

$$U_0 = \int_0^{\lambda/2} \sigma_t \cdot \sin \frac{2\pi x}{\lambda} dx = \frac{\lambda \sigma_t}{\pi} \quad (5)$$

Sarfedilen bu enerjinin, çatlağın oluşumunda yaratılması gereken iki yüzey için harcandığını kabul edersek,

$$\frac{\lambda \sigma_t}{\pi} = 2 \gamma_y \quad , \quad \lambda = \frac{2\pi \gamma_y}{\sigma_t} \quad (6)$$

bulunur. Bu değer (5) eşitliğinde yerine konulması ile,

$$\sigma_t = \left(\frac{E \gamma_y}{a_0} \right)^{1/2} \quad (7)$$

elde edilir. Bu denklem teorik kohezif dayanımın, malzemenin elastiklik modülü , yüzey enerjisi ve düzlemlerarası uzaklığa bağlı olduğunu göstermektedir. Bu bağıntı ile saptanan dayanımlar $E/10$ mertebesinde olup, gerçek değerlerden 10 ilâ 1000 misli büyüktür. Sadece çok ince kılcal kristallerde (whisker) deneysel olarak saptanan değerler, bu teorik değere yakındır. Hesaplanan teorik değerlerin deneysel bulgulardan farklı olmasının nedeni, yapılan kabullerin yanlış olması değil, malzemelerin kristal yapılarında bazı kusurların (örneğin çatlakların) varlığıdır.

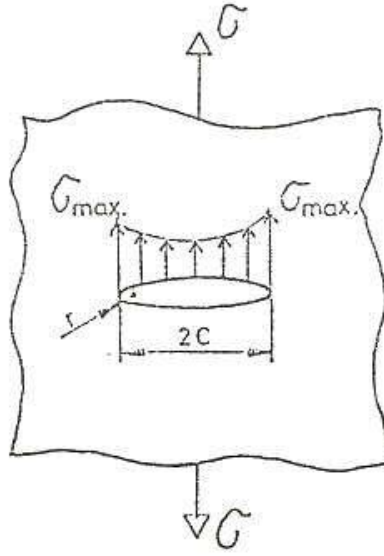
Çatlakların bulunması halinde doğabilecek gerilme yığılmaları

$$\sigma_{\max} = \sigma \left[1 + 2 \left(\frac{c}{r} \right)^{1/2} \right] \quad (8)$$

olarak verilmiştir, Şekil-2. $c \gg r$ olduğundan

$$\sigma_{\max} \approx 2 \sigma \left(\frac{c}{r} \right)^{1/2} \quad (9)$$

olarak kabul edilebilir. En küçük r değerinin a_0 olabileceği düşünülür ve $\sigma_{\max}$ değerinin (7) denklemi ile verilen σ_t 'ye eşit olduğunda çatlağın büyüyeceği kabul edilirse, kırılma gerilmesi olarak,



Sekil-2: Sonsuz büyüklükte bir levhada 2c uzunluğundaki bir çatlakın ucundaki gerilme yığılması

$$\sigma_k = \left(\frac{E \cdot \delta_y}{4c} \right)^{1/2} \quad (10)$$

bulunur ki, bu denklem $c = 2..3 \mu\text{m}$ uzunluğunda çatlaklar için $E/1000$ dolayında değerler vermekte olup, gerçek değerlere çok daha yakındır.

2.2. Griffith Enerji Yaklaşımı

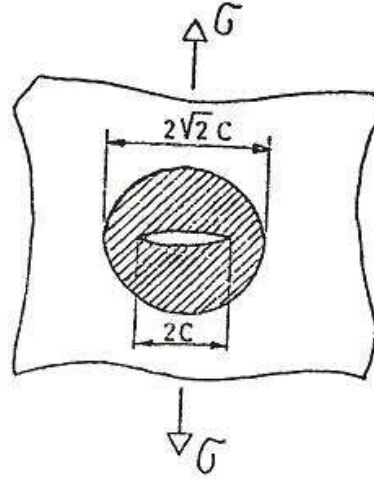
1920 yılında Griffith'in ideal gevrek bir cisim için ortaya koyduğu kriterler kırılma mekaniğinin temelini oluşturmuştur. Griffith, cisimlerin küçük çatlaklar içerdiğini ve bunların büyümesi için yeni yüzeylerin yaratılması gerektiğini, gereken enerjinin ise çatlakın büyümesi ile serbest kalan elastik enerji tarafından sağlandığını savunmuş ve

"Bir çatlakın büyümesi ancak bu sırada serbest kalan elastik enerjinin yeni yüzey yaratmak için gerekli yüzey enerjisine eşit veya daha fazla olması halinde gerçekleşebilir"

kriterini ortaya koymuştur. Matematiksel olarak bu kriter,

$$\frac{\partial(\Delta U_E)}{\partial(2c)} \geq \frac{\partial(\Delta U_y)}{\partial(2c)} \quad (11)$$

şeklinde ifade edilebilir. σ gerilmesi uygulanan bir cismin birim hacminde depo edilen elastik enerji



Sekil-3: $2c$ uzunluğunda bir çatlak çevresindeki elastik enerjinin serbest kaldığı bölgenin şematik gösterilişi

$$U_E = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (12)$$

şeklinde verilmektedir. Öte yandan birim kalınlık için $2c$ uzunluğunda bir çatlak nedeniyle elastik enerjideki düşüş ise,

$$\Delta U_E = \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} \quad (13)$$

olarak bulunmuştur. Bu enerji azalması çatlak çevresinde $2c$ yarıçapında bir bölgenin elastik enerjisinin serbest kalması olarak düşünülebilir, Şekil-3.

Öte yandan $2c$ uzunluğunda bir çatlak yaratmak için gerekli yüzey enerjisi artışı ise,

$$\Delta U_y = 2 \cdot 2 \cdot c \cdot \gamma_y = 4c \cdot \gamma_y \quad (14)$$

olarak yazılabilir. Türevler alınarak (11) denklemi

$$2 \frac{\pi}{E} c \sigma^2 \geq 4 \gamma_y \quad (15)$$

şekline dönüşür ve çatlak ilerlemesi için gerekli gerilme,

$$\sigma \geq \left(\frac{2 E \gamma_y}{\pi \cdot c} \right)^{1/2} = \sigma_K \quad (16)$$

olarak bulunur. Bu bağıntıdaki σ_K değeri, (10) denklemi

ile verilen değerle karşılaştırılırsa mertebe bakımından birbirine çok yakın oldukları görülür.

Griffith bağıntısı cam ve benzeri ideal gevrek cisme yakın malzemelerde gerçeğe yakın değerler vermektedir. Ancak metalsel malzemeler gibi mühendislik açısından çok önemli malzemelerde kırılma öncesi ve sırasında önemli ölçüde kalıcı şekil değişiminin olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Griffith'in ortaya koyduğu kriterlerde serbest kalan enerji yüzey yaratmakta kullanıldığı gibi kalıcı şekil değişimi için de harcanacaktır. Kalıcı şekil değişiminin her malzemeye özgü sabit bir değer olarak bağıntılara girmesi mümkün olmadığından Griffith'in enerji yaklaşımı metalsel malzemelere doğrudan uygulanamaz. Metalsel malzemeler için kırılma mekaniğinin esasları Griffith kriterlerinden yola çıkarak Irwin tarafından geliştirilmiştir.

2.3. "Elastik Enerji Boşalım Hızı" ve "Gerilme Şiddeti Çarpanı"

Sonsuz büyüklükte ve birim kalınlıkta bir levha ele alındığında levhada mevcut $2c$ uzunluğunda bir çatlakın ilerlemesi için zorlayıcı faktör açığa çıkacak elastik enerjidir. İşte bu değere Elastik Enerji Boşalım Hızı veya Çatlak Büyümesi Kuvveti adı verilerek sembolüyle gösterilir.

$$G = - \frac{\partial (\Delta U_E)}{\partial (2c)} \quad (17)$$

Bu büyüklüğün kritik bir G_c değerini aşması halinde çatlak genişler. Yukarıda ele alınan cisimde düzlem gerilme *) durumunda (ince levha)

$$G = \frac{\pi}{E} c \sigma^2 \quad (18)$$

elde edilir. Görüldüğü gibi bu cisimde G değeri $c\sigma^2$ çarpımı ile belirlenmekte, diğer bir deyimle kırılma tehlikesi $c\sigma^2$ çarpımından doğrudan etkilenmektedir. π değeri de bu çarpım içine alınırsa,

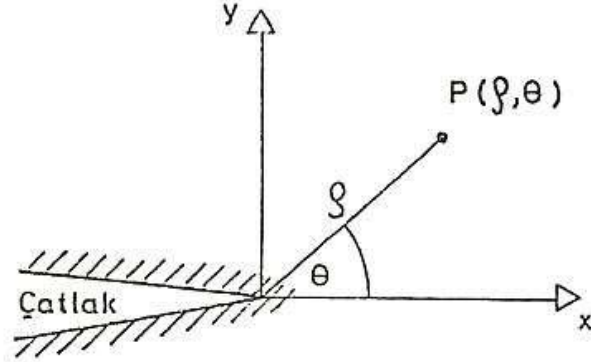
$$K = \sigma \sqrt{\pi \cdot c} , \quad G = \frac{K^2}{E} \quad (19)$$

şeklinde bir tanım yapılabilir. (18) ve (19) denklemleri

*)DÜZLEM GERİLME: Bir noktadaki gerilmelerin tümünün belirli bir düzlem içinde kalması halidir. Örneğin ince bir levhanın levha düzlemindeki kuvvetlerle yüklenmesi halinde, levhanın her iki yüzünde bunlara dik yöndeki gerilme bileşeni sıfırdır ve levha içinde de bu bileşenin sıfır olduğu kabul edilebilir.

düzlem gerilme hali için geçerli olup, düzlem şekil değiştirme **) durumunda E yerine $E/(1-\nu^2)$ koymakla bu eşitlikler kullanılabilir.

K değeri "Gerilme Şiddeti Çarpanı" olarak adlandırılır ve kırılma mekaniğinde çok önemli bir rol oynar. K değeri de kritik bir K_c değerini aştığında çatlak büyümeye başlar ve K_c değeri "Kırılma Tokluğu" olarak adlandırılır. K değerinin birimi $[kgf.mm^{-3/2}]$ veya $[MN.m^{-3/2}]$ dir.



Şekil-4: Çatlak ucundaki gerilmeleri belirlemede kullanılan koordinatlar

Çatlağın büyümesi bakımından çatlak çevresindeki gerilmelerin durumu önemlidir. Sonsuz büyüklükteki bir levhada düzlem gerilme halinde Şekil-4'te verilen koordinatlarla, herhangi bir P noktasındaki gerilmeler aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho\rho} &= \frac{K}{\sqrt{2\pi\rho}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{K}{\sqrt{2\pi\rho}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \\ \tau_{\rho\theta} &= \frac{K}{\sqrt{2\pi\rho}} \left[\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

Görüldüğü gibi çatlak ucundaki gerilme durumu sadece K değeri ve noktanın konumunu belirleyen koordinatlarla saptanabilmektedir. K değeri fiziksel olarak daha anlamlı olmasına rağmen, kırılma mekaniğinde çalışma kolaylığı bakımından K değerinin kullanılması tercih edilmektedir.

**)DÜZLEM ŞEKİL DEĞİŞTİRME: Bir levhanın çok kalın olması halinde ise levha yüzeyine paralel tüm kesitlerin aynı koşullar altında olduğu ve levha düzlemine dik doğrultuda şekil değişiminin sıfır olduğu kabul edilebilir.

K değeri geometriye bağlıdır, ancak aynı K değerine sahip çatlakların çevresindeki gerilme alanları da aynı olmaktadır. Değişik geometrilerdeki cisimler ve yükleme şekilleri için K değerleri elastisite teorisi yardımıyla hesaplanabilir ve gerilme şiddeti çarpanı en genel anlamda

$$K = \alpha \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot c} \quad (21)$$

şeklinde verilir. Örneğin sonlu genişlikte (w) ince bir levhada bu değer,

$$\alpha = \left(\frac{w}{\pi c} \tan \frac{\pi c}{w} \right)^{1/2} \quad (22)$$

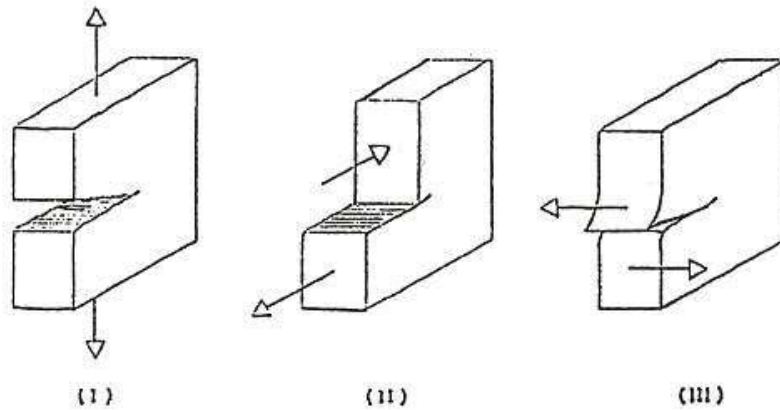
olarak verilmektedir. Çatlağın yanda ve c uzunluğunda olması halinde ise,

$$\alpha = 1,12 \quad (23)$$

olarak hesaplanmıştır.

Şimdiye kadar sadece iki çatlak yüzeyinin kendilerine dik yönde bir gerilmenin etkimesiyle ayrılmaya zorlanması durumu ele alınmıştır. Şekil-5'ten de görülebileceği gibi aslında üç değişik zorlanma hali söz konusudur ve bunlar sırasıyla I, II ve III indisleriyle gösterilmektedir. Bunlar arasında en önemlisi ve kırılma bakımından en tehlikeli olanı I durumudur ve değişik malzemeler için saptanan K_{İC} değerleri bu yükleme şeklinde K_{İC} olarak verilir.

K_{İC} değeri gerilme durumunun düzlem gerilme veya düzlem şekil değiştirme olması ile de önemli derecede etkilenir. Düzlem şekil değiştirme hali kırılma bakımından daha kritik bir durumdur ve K_{İC} değerleri bu koşullar altında en düşük düzeydedir. Bu nedenle K_{İC} değerleri düzlem şekil değiştirme halinde saptanır ve deneysel olarak saptanan K_{İC} değerlerinde aynı malzeme için sabit değerler elde edilir.



Şekil-5: Değişik çatlak yükleme türleri

Bu nedenle "Düzlem Şekil Değiştirme Kırılma Tokluğu" olarak adlandırılan K_{IC} karakteristik bir malzeme özelliği olarak kabul edilerek, kırılma mekaniği yardımıyla yapılan tasarımlarda kullanılmaktadır. Kırılma gerilmesi ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_K = K_{IC} / \alpha \sqrt{\pi \cdot c} \quad (24)$$

3. G_c ve K_{IC} 'nin Deneysel olarak Saptanması

G_c değerinin saptanması için Irwin tarafından bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemin açıklaması Şekil-6,da gösterilen ve yan tarafında c uzunluğunda bir çatlak içeren birim kalınlıktaki örnek üzerinde yapılacaktır. Çatlak önce talaş kaldırılarak açılmış, daha sonra dinamik yükler altında büyütülerek keskin bir uca sahip olması sağlanmıştır. Bu parça P kuvveti ile yüklendiğinde Şekil-7'de görüldüğü gibi Δl kadar uzayacaktır, örneğin in yay katsayısı k ise

$$P = k \cdot \Delta l \quad (25)$$

ve dolayısıyla parça içinde biriken elastik enerji

$$U_e = \frac{P \cdot \Delta l}{2} = \frac{P^2}{2k} \quad (26)$$

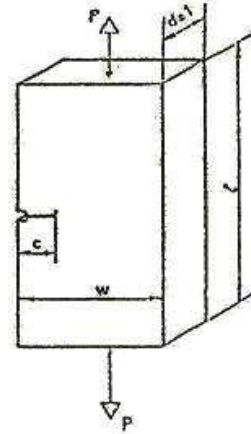
olacaktır. P yükü altında çatlak büyümesi olursa

$c' \rightarrow c + \partial c$ parçanın yay katsayısı da değişecek ve k değeri k' değerine düşecektir, Şekil-7.

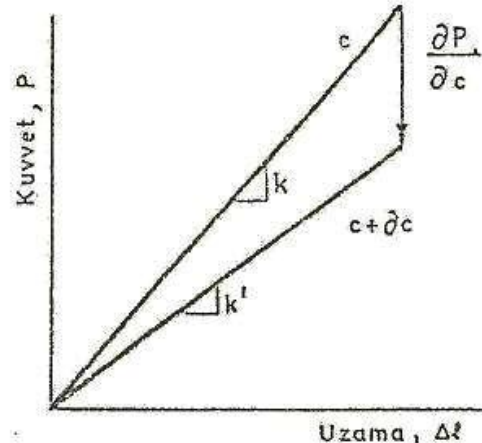
Çatlak ilerlemesi sırasında yüklemenin yapıldığı çenelerin konumu ve dolayısıyla Δl uzaması sabit kalırsa,

$$\Delta l = \frac{1}{k} \cdot P = \text{sabit} \quad (27)$$

yazılabilir ve türevler alınarak,



Şekil-6: Birim kalınlıkta yandan çatlaklı örnek



Şekil-7: Kuvvet-uzama eğrilerinin çatlak büyümesiyle değişimi

$$\frac{\partial(\Delta l)}{\partial c} = \frac{\partial(1/k)}{\partial c} \cdot P + \frac{1}{k} \frac{\partial P}{\partial c} = 0 \quad (28)$$

bulunur. Buradan,

$$\frac{\partial P}{\partial c} = -P \cdot k \frac{\partial(1/k)}{\partial c} \quad (29)$$

elde edilir. Öte yandan Irwin'in tanımını yaptığı "Elastik Enerji Boşalma Hızı" ise

$$\mathcal{G}_I = \frac{\partial U_E}{\partial c} = -\frac{1}{2} \left(\frac{2P}{k} \frac{\partial P}{\partial c} + P^2 \frac{\partial(1/k)}{\partial c} \right) \quad (30)$$

olarak yazılabilir. (29) denkleminde verilen dP/dc değeri yerine konularak,

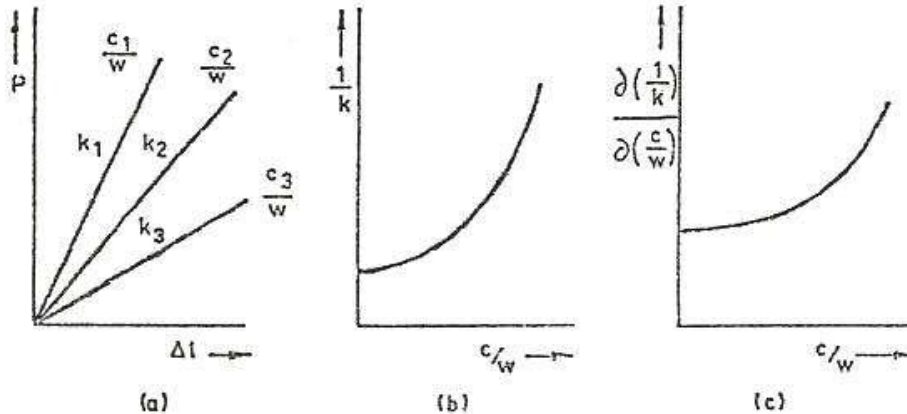
$$\mathcal{G}_I = \frac{1}{2} P^2 \frac{\partial(1/k)}{\partial c} \quad (31)$$

elde edilir. Daha sonra σ gerilmesine geçebilmek için w genişliği de formüle eklenirse,

$$\mathcal{G}_I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{w} \frac{\partial(1/k)}{\partial(c/w)} \quad (32)$$

bulunur. Yukarıdaki bağıntı yardımıyla $\mathcal{G}_I$ 'yi belirleyebilmek için $\partial(1/k)/\partial(c/w)$ değerlerinin bilinmesi gerekir. Dolayısıyla belirli bir boyuttaki (w =sabit) örneklerde çeşitli çatlak uzunlukları için $1/k$ değerleri deneysel olarak saptanmalıdır. Şekil-8a'da verilen eğrilerden önce $1/k$ değerleri (Şekil-8b), daha sonra ise $\partial(1/k)/\partial(c/w)$ değerleri (Şekil-8c) bulunur.

Bu suretle c ve P 'nin belirli olması halinde kullanılan örnek geometrisi için Şekil-8c'de verilen eğrilerden yararlanılarak $\partial(1/k)/\partial(c/w)$ saptanır. $\mathcal{G}_{Ic}$ değeri ise $P-\Delta l$ eğrisinin doğrusallıktan ayrıldığı noktadaki P_c kuvveti ve c_c çatlak uzunluğu için hesaplanır.



Şekil-8: Değişik büyüklükte çatlaklar içeren örnekler üzerinde $\partial(1/k)/\partial(c/w)$ değerlerinin deneysel olarak saptanması

Pratikte G_I değeri yerine K_I 'in kullanılması tercih edildiğinden yukarıdaki formüllerin dönüştürülmesi uygun olacaktır. Uygulanan gerilme için

$$\sigma = \frac{P}{w \cdot d} = \frac{P}{w} \quad (d=1 olduğundan) \quad (33)$$

yazılabilir. (32) eşitliği ise,

$$G_I = \frac{1}{2\pi(c/w)} \frac{P^2}{w^2} c \pi \frac{\partial(1/k)}{\partial(c/w)} \quad (34)$$

$$G_I = \frac{1}{2\pi(c/w)} \sigma^2 c \pi \frac{\partial(1/k)}{\partial(c/w)}$$

şeklinde düzenlenebilir. Düzlem şekil değiştirme hali için,

$$G_I = (1-\nu^2) \frac{K_I^2}{E}$$

olduğundan,

$$K_I^2 = \frac{E}{2\pi(1-\nu^2)(c/w)} \frac{\partial(1/k)}{\partial(c/w)} \sigma^2 c \pi \quad (35)$$

$$K_I = \alpha \sigma \sqrt{c \cdot \pi}$$

elde edilir. Burada değeri (c/w) 'nin bir fonksiyonudur.

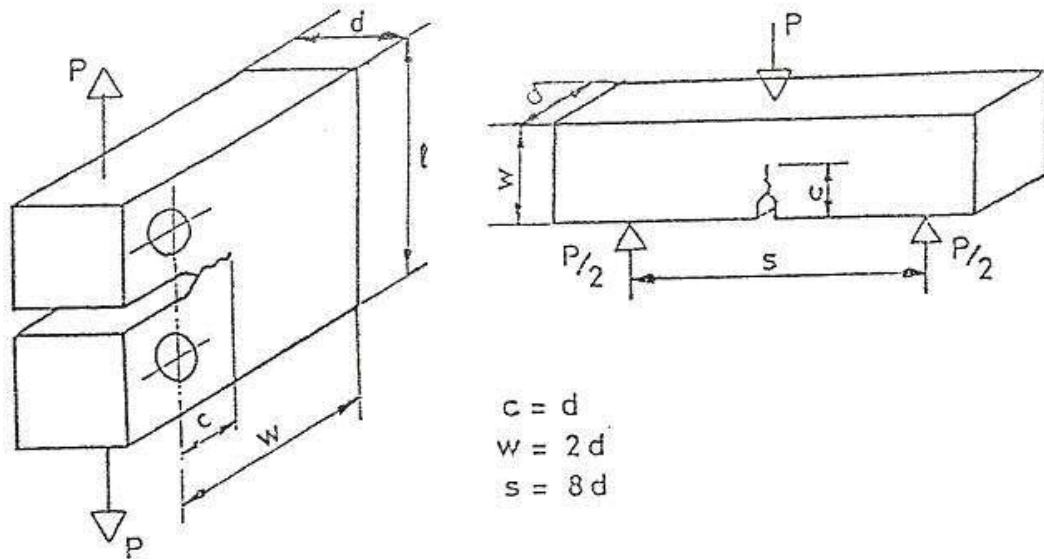
$$\alpha = \alpha(c/w) = \left\{ \frac{E}{2\pi(1-\nu^2)(c/w)} \frac{\partial(1/k)}{\partial(c/w)} \right\}^{1/2} \quad (37)$$

Bu faktör belirli bir deney parçası geometrisi ve çeşitli (c/w) oranları için hesaplanarak eğriler halinde de verilebilir. Düzlem gerilme halinde ise paydadaki $(1-\nu^2)$ çarpanı kalkacaktır. Literatürde "compliance" metodu olarak adlandırılan ve çok sayıda numune gerektiren bu yöntemin uygulanması çok zaman alıcıdır. Bu nedenle sadece teorik çözümlerin kontrolünde veya teorik çözümün bilinmediği hallerde metodun geliştirilmesi için kullanılır.

Pratikte "Düzlem Şekil Değiştirme Kırılma Tokluğu"nun saptanması için değişik standartlardan yararlanılır. ASTM E 399 ve BS 5447 standartlarında kompakt çekme ve üç noktadan eğme deney parçaları standartlaştırılmıştır, Şekil-8. Mühendislik uygulamalarında G_{IC} 'den ziyade K_{Ic} değeri önemli olduğundan bu standartlarla doğrudan K_{Ic} değeri saptanmaktadır.

K_{Ic} değerinin saptanmasında kullanılan deney parçaları düzlem şekil değiştirme durumunun sağlanabilmesi için yeterince kalın olmalıdır. Bu nedenle standartlarda numune kalınlığının

$$d \geq 2,5 (K_{Ic}/\sigma_a)^2 \quad (38)$$



Şekil-8: Kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan kompakt çekme ve üç noktadan eğme deney parçaları (ASTM E 399)

Tablo-1: Deney parçası kalınlığının σ_o/E oranı yardımıyla saptanması

Standartlara göre deney yapılırken örnek tipinin seçilmesi ve boyutlandırılmasından sonra, talaş kaldırma yoluyla açılan çatlakların dinamik yükler altında yorulma çatlakları olarak büyütülmesi gerekmektedir. Bu amaçla uygulanacak zorlama koşulları, gerilme şiddeti çarpanı (K_I) aşağıdaki alt ve üst sınırlar arasında kalacak şekilde seçilmelidir.

$$\begin{aligned} a) K_{I_{üst}} / E &\leq 0,000192 \sqrt{mm} \\ K_{I_{üst}} &\leq 0,5 K_{Ic} \\ K_{I_{alt}} &\leq 0,1 K_{I_{üst}} \end{aligned} \quad (39)$$

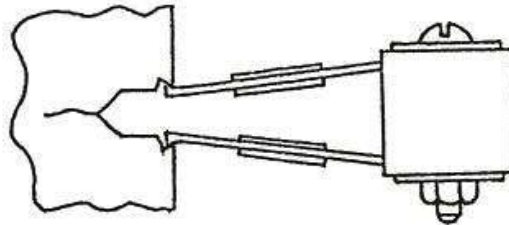
Başlangıçta K_{Ic} değeri kesin olarak bilinmediğinden saptanan bu alt ve üst sınırlar güvenilir değildir. (39) eşitsizlikleriyle verilen koşullar ilk deneyin sonrasında kontrol edilerek gerektiğinde değişikliklere gidilmelidir. Ancak bu şekilde ucu yeterince keskin bir çatlak elde etmek mümkün olabilir. Eğme ve çekme ile ilgili diğer ayrıntılar yukarıda sözü edilen standartlarla belirlenmiştir.

Uzamaların ölçülmesi bu deneyler için özel olarak tasarlanmış ve çatlak ağzındaki açılmaları hassas olarak veren "clip gage"ler yardımıyla gerçekleştirilir, Şekil-9. Deneyin yapılışı sırasında yük ve uzama değerleri X-Y yazıcıda sürekli olarak kaydedilir ve yükleme hızı seçilirken gerilme şiddeti çarpanının dakikada 100..500 kgf.mm^{-3/2} arasında kalacak şekilde artması sağlanır. Metalsel malzemelerde çatlak genellikle önce yavaş olarak büyür ve daha sonra büyük bir hızla ve dengesiz olarak ilerler (pop-in). Deneylerde elde edilen kuvvet-uzama eğrileri üç tipe ayrılmaktadır, Şekil-10.

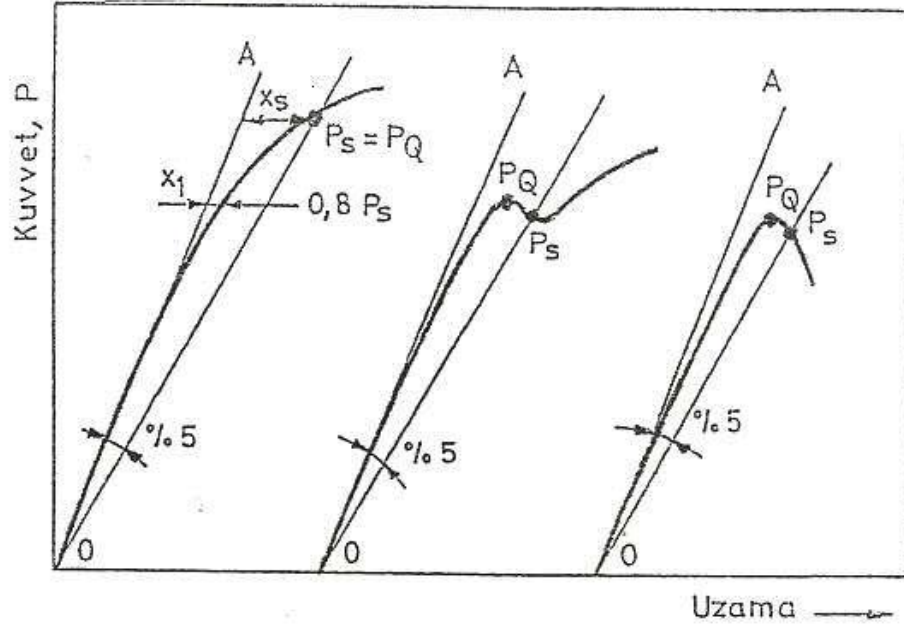
Standartlarda her üç tip eğride de OA teğetinden %5 daha düşük eğimli bir doğru çizilerek P_s noktaları saptanır, Şekil-10.

$$x_1 > 0,25 x_5 \quad (40)$$

olması halinde malzeme çok sünektir, K_{Ic} tayini yapılamaz:



Şekil-9: Çatlak ağzındaki açılmaları ölçmek için kullanılan "clip-gage"



Şekil-10: Kırılma Tokluğu deneylerinde elde edilen değişik kuvvet-uzama eğrileri

- I. Tip: Sünek malzemelerde görülür, çatlağın büyümesi artan kuvvetle yırtılma şeklinde olur.
- II. Tip: Burada belirli bir P_Q kuvvetinde dengesiz çatlak ilerlemesi görülür, ancak daha sonra büyüme artan kuvvet ile yırtılma şeklindedir.
- III. Tip: P_Q kuvvetine erişilmesi ile çatlağın dengesiz büyümesi sonucu hasar oluşur. Bu eğri çok gevrek olan malzemeler için tipiktir.

$$x_1 \leq 0,25 x_s \quad (41)$$

durumunda ise Tip I'de $P_Q = P_s$ değeri, Tip II ve III'te ise P_Q değerleri alınarak, kompakt çekme örnekleri için

$$K_Q = \frac{P_Q}{d \cdot w} \sqrt{c} \left\{ 29,6 - 185,5 \left(\frac{c}{w} \right) + 665,7 \left(\frac{c}{w} \right)^2 - 1017 \left(\frac{c}{w} \right)^3 + 638,9 \left(\frac{c}{w} \right)^4 \right\} \quad (42)$$

üç noktadan eğme örnekleri için

$$K_Q = \frac{P_Q \cdot s}{d \cdot w^2} \sqrt{c} \left\{ 29 - 4,6 \left(\frac{c}{w} \right) + 21,8 \left(\frac{c}{w} \right)^2 - 37,6 \left(\frac{c}{w} \right)^3 + 38,7 \left(\frac{c}{w} \right)^4 \right\} \quad (43)$$

bağıntıları yardımıyla K_Q değerleri bulunur. Bu değerle (38) koşulunun sağlanması halinde, bulunan değer malzemenin karakteristik "Düzlem Şekil Değiştirme Kırılma Tokluğu" olarak kabul edilebilir. Aksi halde numune kalınlığı yeniden saptanarak deneyin tekrarlanması gerekir.

4. Bazı Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerleri

Malzemelerin karakteristik mekanik özelliklerinden olan "Düzlem Şekil Değiştirme Kırılma Tokluğu - K_{Ic} " sadece kimyasal bileşim ve sıcaklıktan değil, diğer birçok mekanik özellikten çok daha fazla olarak ısıtılma işlemi, soğuk şekil değiştirme, katışkı (empürite) v.b. faktörlerden etkilenir. Bu nedenle tasarımda kullanılacak değerlerin güvenilir olması için, mutlaka deneysel olarak saptanması gereklidir. Ayrıca K_{Ic} değerleri ile diğer mekanik özellikler arasında korelasyonlar kurmak ve bunlardan tasarımlarda yararlanmak da tavsiye edilmemektedir.

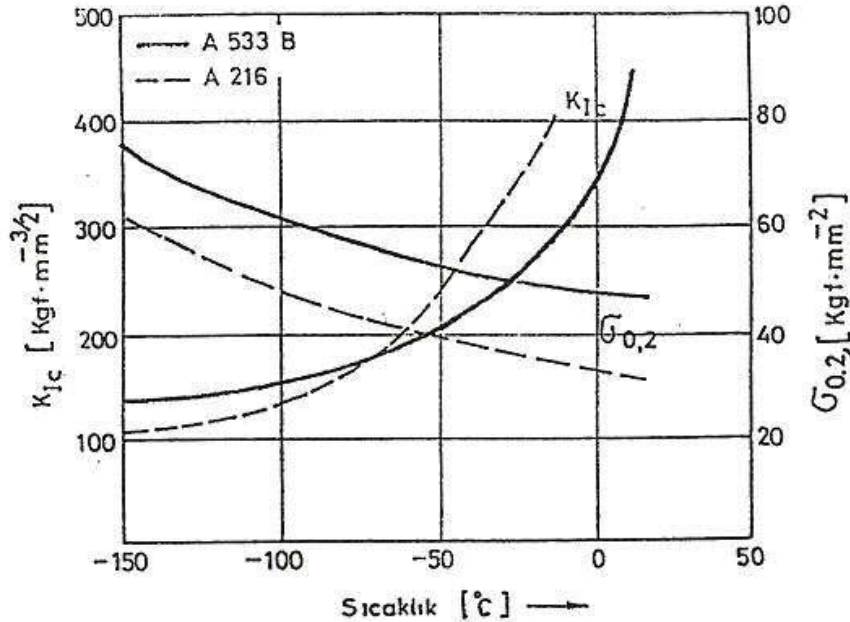
Literatürde rastlanan değerlerin birimlerinin dönüştürülmesinde aşağıdaki bağıntılardan yararlanılabilir:

$$1 \text{ ksi} \cdot \sqrt{\text{in}} = 3,54 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$$

$$1 \text{ ksi} \cdot \sqrt{\text{in}} = 1,1 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

$$1 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}} = 3,22 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$$

Tablo-2'de sadece fikir vermek amacıyla bazı demir esaslı alaşımlar ile birkaç alüminyum ve titanyum alaşımının kırılma tokluğu değerleri verilmiştir. Bu tabloda malzeme tokluğunun bir göstergesi kabul edilebilecek K_{Ic}/σ oranları da görülmektedir. Şekil-11'de ise Tablo-2'de verilen A 216 ve A 533 B malzemeleri için $\sigma_{0.2}$ ve K_{Ic} değerlerinin sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir.



Şekil-11: A 216 ve A 533 B çeliklerinde akma dayanımı ve kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi

Tablo-2: Bazı Alaşımların Kırılma Tokluğu Değerleri

Malzeme Cinsi ve Bileşim	Akma d. σ_a kgf/mm ²	Çekme d. σ_c kgf/mm ²	K _{Ic} kgf.mm ^{-3/2}	$\frac{K_{Ic}}{\sigma_a}$
A216 (0,25C/1,2Mn/0,6Si)	32	50	550	17,2
A533B (0,24C/1,42Mn/ 0,7Ni/0,5Mo)	50	70	460	9,2
A517F (0,16C/0,79Mn/ 0,87Ni/0,53Cr/0,43Mo)	77	85	601	7,8
HY-130 (0,12C/0,91Mn/ 5,3Ni/0,62Cr/0,6Mo)	104	111	870	8,4
4130 (0,32C/0,72Mn/ 1Cr/0,2Mo)	111	115	354	3,2
4147 (0,49C/0,98Mn/ 1Cr/0,2Mo)	96	108	386	4,0
4340 (0,42C/0,7Mn/1,8Ni/ 0,8Cr/0,23Mo) 260°C Tem.	167	196	157	0,9
425°C Tem.	144	155	282	2,0
12Ni-5Cr-3Mo	123	127	460	3,8
12Ni-5Cr-3Mo(vakum er.)	130	134	800	6,1
18Ni-8Co-3Mo	135	140	372	2,8
18Ni-8Co-3Mo(vakum er.)	131	137	566	4,3
18Ni-8Co-5Mo(vakum er.)	172	180	308	1,8
AlCuMg (4Cu/1Mg/0,7Mn)	45	50	90	2,0
2219-T851 (6,3Cu/0,3Mn/ 0,07Ti)	36	46	116	3,3
AlZnMgCu1,5 (5,5Zn/ 2,5Mg/1,6Cu/0,24Cr)	50	58	95	1,9
7075-T6 (5,5Zn/2,5Mg/ 1,6Cu/0,2Cr)	50	60	124	2,5
Ti6Al4V (6Al/4V)	90	100	275	3,1

5. Kritikaltı Bölgede Çatlak İlerleme Mekanizmaları

Kırılma mekaniği yardımıyla geliştirilen (24) bağıntısı uygulanan gerilme ve malzemenin kırılma tokluğu belirli ise,

$$C_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\alpha \cdot \sigma} \right)^2 \quad (44)$$

şeklinde yazılabilir ve her gerilme seviyesine bir "kritik çatlak uzunluğu - c_c " tekabül ettiği söylenebilir. Malzemede mevcut çatlaklardan herhangi biri bu büyüklükte ise kırılma oluşacaktır. Genellikle makina elemanlarında başlangıçta bu büyüklükte çatlaklar bulunmaz, yani diğer bir deyimle pek az hasar ilk yüklemede meydana gelir. Ancak bu kritik değerden daha küçük çatlakların bulunabileceği veya bunların üretim sırasında (suverme çatlakları, taşlama çatlakları, kaynak dikişlerindeki boşluklar gibi) oluşabileceği rahatlıkla iddia edilebilir. Bu nedenle mevcut çatlakların işletme şartlarında kritik çatlak büyüklüğüne kadar büyümesinin sözkonusu olup olmadığının bilinmesi gereklidir. Dolayısıyla kırılma tokluğu yanında, malzemelerin kırılma hasarlarına karşı dayanıklılıklarını belirleyen önemli bir diğer faktör de, kritikaltı bölgede çatlak ilerleme özellikleri olmaktadır. Bu özellik çatlak ilerlemesi ile malzemenin veya makina elemanının yük taşıma kapasitesindeki düşme hızını, dolayısıyla makina elemanının ömrünü belirlemektedir. Ayrıca çatlağın kritik büyüklüğe ulaşmasının hangi sürede olacağını bilmesi hangi aralıklarla çatlak kontrollerinin yapılmasının uygun olacağını ortaya çıkaracaktır.

Kritikaltı bölgede çatlak ilerlemesine genellikle iki değişik mekanizma neden olmaktadır:

- a) Gerilmeli korozyon
- b) Dinamik yükler

Bu bölümde bu iki çatlak büyüme mekanizması özet olarak ele alınacaktır.

5.1. Gerilmeli Korozyon

Gerilmeli korozyon, korozif bir ortam ile statik bir yükün ortak etkimesi sonucu oluşan bir hasar türüdür. Bazı durumlarda malzemeye uygulanan herhangi bir dış yük olmamasına rağmen, mevcut iç gerilmelerin de bu tür hasarlara neden olabileceği gözlenmiştir. Korozif ortama açık olan çatlakların ilerlemesinde mekanik olayların yanında kimyasal ve elektrokimyasal olaylar da etkin olmaktadır.

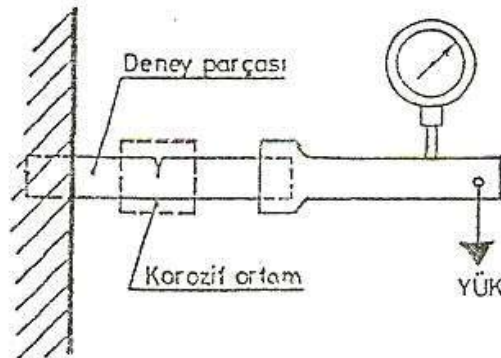
Gerilmeli korozyon çatlakları genellikle gevrek karakterdedir. Çatlak tanelerarası veya taneleriçi olabilir, ancak tanelerarası ayrılma gerilmeli korozyon için daha karakteristiktir.

Tablo-3: Gerilmeli Korozyonun Görüldüğü Malzeme ve Korozif Ortam Çiftlerine Örnekler

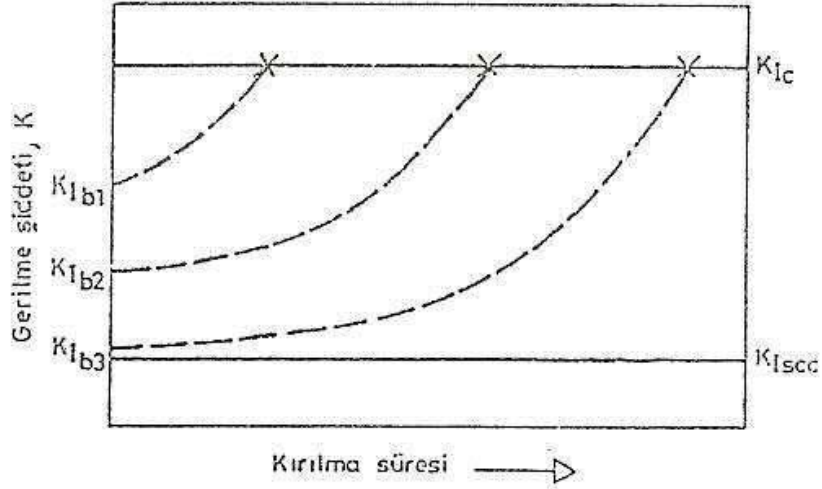
Malzeme	Ortam
Karbon çelikleri	
Yumuşak çelikler	NO_3^- , OH^-
Orta dayanımlı çelikler	HCN
Yüksek dayanımlı çelikler	H_2O , H_2
Alüminyum alaşımları	
% 4..20 Zn içeren alaşımlar	H_2O
Cu ve Mg içeren alaşımlar	tuzlu su
Bakır alaşımları	NH_3
Magnezyum alaşımları	H_2O

Gerilmeli korozyonun genellikle belirli malzeme-ortam çiftleri için sözkonusu olduğu gözlenmiştir. Tablo-3'te bu çiftlere bazı örnekler verilmiştir.

Malzemelerin gerilme korozyonuna karşı dayanımları, korozif ortamlarda değişik yükler altında kırılmanın oluşması için geçen süre saptanarak bulunur. Gerilmeli korozyon kırılması için geçen süre genellikle çatlak başlaması ve ilerleme süreleri olarak ikiye ayrılabilir. Bu tür deneylerde, önceden açılmış yorulma çatlak içeren kırılma mekaniği deney parçaları kullanılması halinde çatlak başlama süresi ortadan kaldırılabilir. Gerilme korozyonu deneyleri genellikle tek uçtan yüklenen eğme parçaları üzerinde yapılır. Şekil-12'de şematik olarak verilen bu deneyde çatlakların ilerlemesi, eğilme sehimi ölçülerek sürekli izlenir. Sabit yük altında "Başlangıç Gerilme Şiddeti Çar-



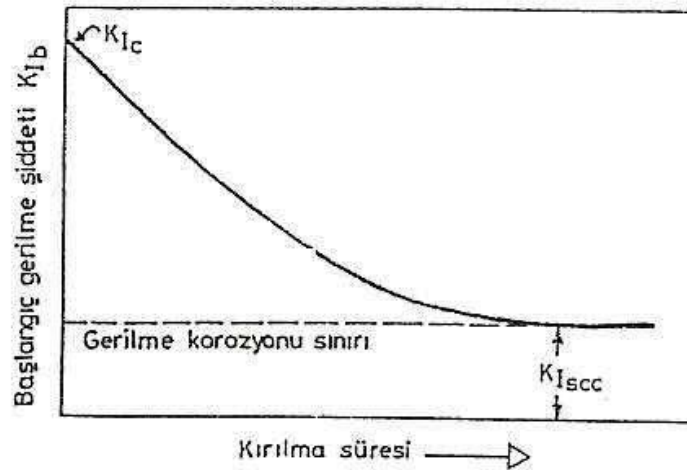
Şekil-12: Tek uçtan yüklenen eğme parçaları üzerinde yapılan gerilmeli korozyon deneylerinin şematik gösterilişi



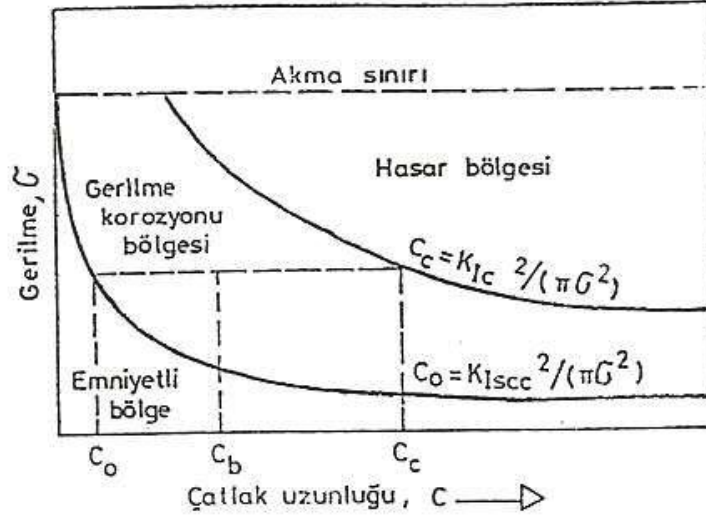
Şekil-13: Gerilmeli korozyon nedeniyle gerilme şiddet çarpanının artarak kırılmaya neden olması

panı - K_{1b} değeri başlangıç çatlak uzunluğu c_b ile belirlenmiştir. Gerilmeli korozyon nedeni ile çatlağın ilerlemesi halinde K_1 değerleri artar ve K_{1c} 'ye ulaştığı anda hasar oluşur, Şekil-13.

Kırılma süresinin başlangıç gerilme şiddeti K_{1b} ile değişimi Şekil-14'te görülmektedir. Deneysel sonuçlar, "Gerilmeli Korozyon Sınırı - K_{1scc} " olarak adlandırılan bir değer altında gerilmeli korozyonun oluşmadığını göstermektedir. Malzemeye, ortam koşullarına ve çatlak ucundaki gerilme durumuna bağlı olan bu değer, düzlem şekil değiştirme halinde en düşük seviyede ve genellikle K_{1c} 'nin üçte biri kadardır.



Şekil-14: Kırılma süresinin başlangıç gerilme şiddeti- K_{1b} ile değişimi

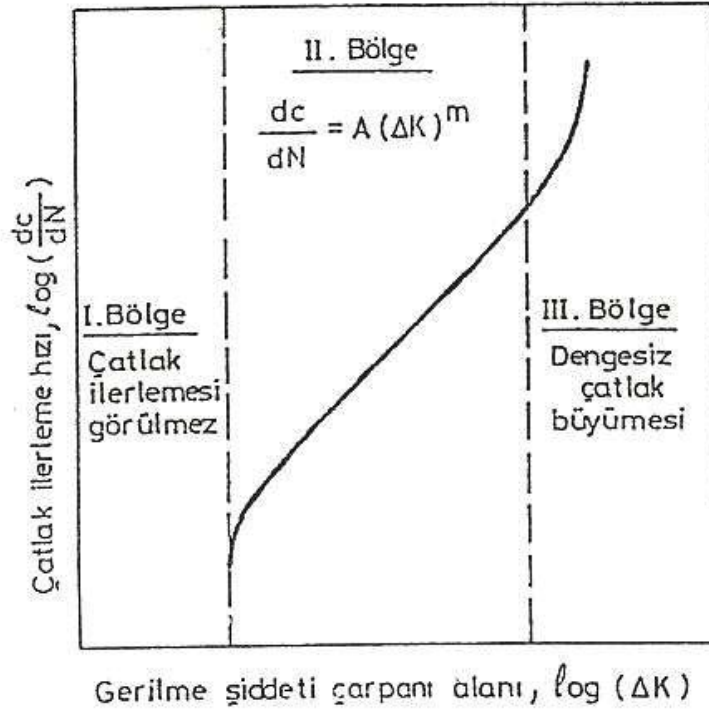


Şekil-15: Gerilmeli korozyon sınırı K_{Iscc} 'nin tasarımlarda kullanılması halinde kritik çatlak büyüklüğünün değişimi

Malzemelerin kullanıldığı ortamlarda korozif etkinin sözkonusu olduğu durumlarda, tasarımlarda K_{Iscc} yerine K_{Iscc} 'nin kullanılması gerekecektir. Şekil-15'ten de görüldüğü gibi gerilmenin sabit kalması halinde kritik çatlak uzunluğu (C_b) gerilmeli korozyon bölgesinde ise, çatlak gerilmeli korozyon nedeniyle C_c 'ye kadar ilerleyecek ve bu değere ulaştığı anda kırılma oluşacaktır. Başlangıç çatlak uzunluğunun C_o değerinin altında kalması halinde ise tasarım emniyetli bölgede olacaktır.

5.2. Dinamik Yükler Altında Çatlak ilerlemesi

Gerilmeli korozyon dışında kritikaltı bölgede uygulanan dinamik kuvvetler de çatlak ilerlemesine neden olmaktadır. Yorulma çatlak ilerlemesi olarak adlandırılan bu mekanizmanın kurallarının tanınması amacı ile yapılan araştırmalar çatlak ilerleme hızı ile gerilme şiddeti çarpanı arasında bağıntılar aramışlardır. Bu çalışmalar çatlak ilerleme hızını kontrol eden büyüklüğün $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ olduğunu göstermiştir. Burada K_{max} ve K_{min} yorulma çevriminin alt ve üst kuvvet sınırlarına tekabül eden gerilme şiddeti çarpanlarıdır. Deneysel sonuçlar çatlak ilerlemesinde K_{max} 'tan daha çok gerilme şiddeti alanı ΔK 'nın etkin olduğunu göstermiştir. ΔK 'nın sabit olduğu durumlarda K_{max} 'ın değişimi ile çatlak ilerleme hızında önemli bir değişiklik oluşmamaktadır. Şekil-16'da korozif olmayan bir ortamda ΔK ile çatlak ilerleme hızı dc/dN arasındaki bağıntı şematik olarak gösterilmiştir. Küçük ΔK

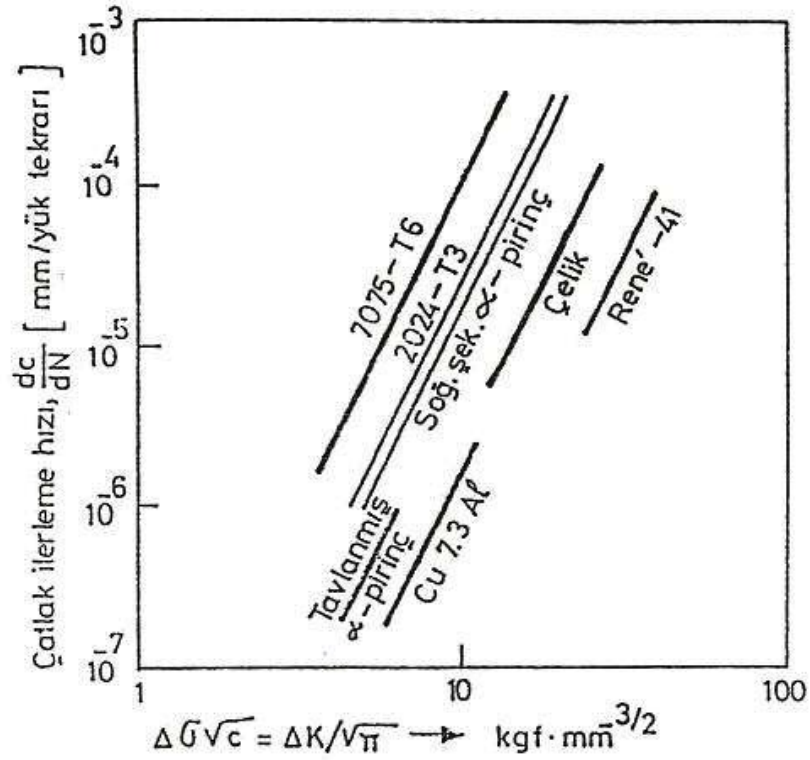


Şekil-16: Gerilme şiddeti alanı ile çatlak ilerleme hızının değişiminin şematik gösterilişi

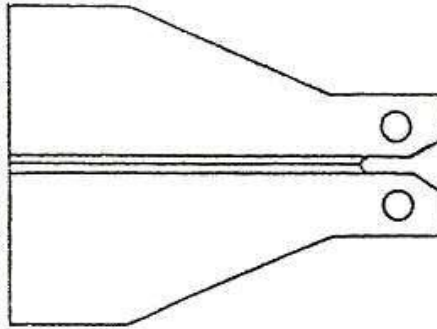
değerlerinde ($<30 \text{ kgf.mm}^{-3/2}$) çatlak ilerlemesinin görülmediği bir bölge mevcuttur. II.bölgede ise,

$$\frac{dc}{dN} = A \cdot (\Delta K)^m \quad (45)$$

şeklinde bir bağıntının geçerli olduğu görülmektedir. Paris-Erdoğan bağıntısı olarak tanınan bu eşitlikte A bir sabit, m ise metaller için 2 ile 4 arasında değerler alan bir üsteldir. III.bölge ise dengesiz çatlak büyümesi bölgesi olarak adlandırılır. Deneysel çalışmalar II.bölgedeki ΔK ile dc/dN arasındaki bağıntının belirli aşam grupları için büyük değişiklikler göstermediği sonucunu vermiştir. Şekil-17'de bu bağıntılara bazı örnekler verilmiştir. Yorulma çatlak ilerlemesinin korozif ortamlarda oluşması halinde bu eğrilerde büyük değişiklikler olmaktadır. Çatlak ilerleme hızının saptanmasında kırılma mekaniği deney parçaları kullanılabilir. Ancak çatlak ilerledikçe K ve dolayısıyla ΔK değişecektir. Deneysel parametrelerin birbirinden bağımsız olarak değiştirilebilmesi için bir "sabit K" deney parçası geliştirilmiştir. Bu parçada çatlak ilerlese dahi geometrik şekil sayesinde K değeri sabit kalmaktadır, Şekil-18.



Şekil-17: Bazı metal alaşımlarında çatlak ilerleme hızlarının karşılaştırılması



Şekil-18: Sabit K deney parçası

(45) eşitliği ile verilen Paris-Erdoğan bağıntısı yardımıyla başlangıçta c_0 büyüklüğünde olan bir çatlakın c_c kritik çatlak büyüklüğüne ulaşması için gerekli yük tekrar sayısı hesaplanabilir. Bu amaçla,

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{M \cdot c} \quad (46)$$

yazılabilir, burada M parçanın ve hatanın geometrisi ile gerilme seviyesine bağlı bir büyüklüktür. Dolayısıyla,

$$dc/dN = A \cdot M^{m/2} \cdot c^{m/2} \cdot (\Delta\sigma)^m$$

şekline dönüşen (45) eşitliği, $\Delta\sigma$ sabit kabul edilerek c_b ile c_c arasında entegre edilirse,

$$\int_{c_b}^{c_c} c^{-\frac{m}{2}} \cdot dc = A \cdot M^{m/2} (\Delta\sigma)^m \int_0^N dN$$

$$\frac{2}{2-m} \cdot c^{\frac{2-m}{2}} \Big|_{c_b}^{c_c} = A \cdot M^{m/2} \cdot (\Delta\sigma)^m \cdot N$$

$$N = \frac{2}{(m-2) \cdot A \cdot M^{m/2} \cdot (\Delta\sigma)^m} \cdot \left\{ \frac{1}{c_b^{\frac{m-2}{2}}} - \frac{1}{c_c^{\frac{m-2}{2}}} \right\} \quad (47)$$

elde edilir. Bu suretle malzemenin Kırılma tokluğu ve M geometri çarpanının bilinmesi halinde, önce (44) bağıntısı yardımıyla kritik çatlak büyüklüğü c_c , daha sonra ise (47) eşitliği ile hasarın oluşması için gerekli yük tekrar sayısı N saptanabilir. Başlangıç çatlak büyüklüğü c_b olarak genellikle tahribatsız muayene yöntemleri ile saptanabilen en küçük hata büyüklüğü alınır (Ek-1).

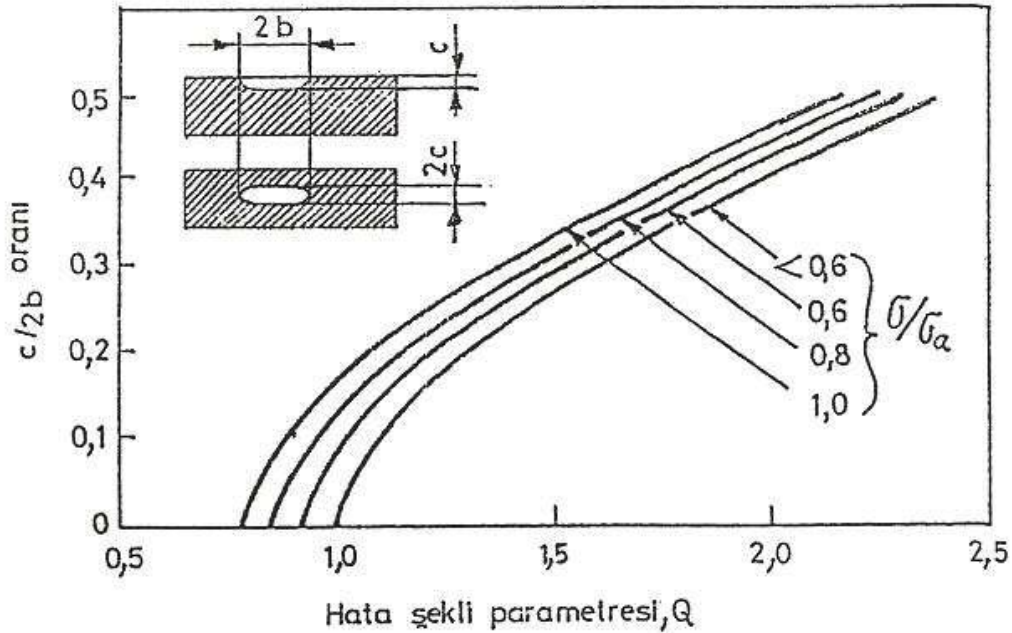
6. Kırılma Mekaniği Uygulamalarına Bir Örnek

Daha önceki bölümlerde kırılma mekaniği ve deneysel uygulaması ile ilgili bilgiler verilmiş idi. Bu bilgilerin tasarımlarda malzeme seçimi ve parçaların boyutlandırılmasında kullanılmasına ait bir örnek bu bölümde verilecektir. Kırılma mekaniğinde hasarın oluşması için kriter, çatlak ucundaki gerilme durumunu veren K değerinin, malzemenin kırılma tokluğu olan K_{Ic} değerini aşması şeklindedir. Parçanın ve çatlak geometrisinin bilinmesi halinde, eğer uygulanacak gerilme belirli ise kritik çatlak büyüklüğü, hata büyüklüğü biliniyorsa kritik gerilme seviyesi saptanabilir.

Gerilme yönüne dik yönde eliptik iç hatalar ve yarı eliptik yüzey hataları pratikte çok sık raslanan bir durumdur. Bu tür hatalar için gerilme şiddeti çarpanı,

$$K_I = \sigma \sqrt{M \cdot c} \quad \begin{array}{l} \text{Yüzey hataları için } M = \frac{1,21 \cdot \pi}{Q} \\ \text{iç hatalar için } M = \frac{\pi}{Q} \end{array} \quad (48)$$

şeklinde verilmektedir. Burada Q "hata şekli parametresi" olarak adlandırılır ve eliptik hatanın geometrisi ile gerilme seviyesine bağlıdır. Bu büyüklüğün her iki değişkene bağlı olarak aldığı değerler Şekil-19'daki eğriler yardımıyla saptanabilir.



Şekil-19: Hata şekli parametresi Q değerinin eliptik hatalar için değişimi

Kritik hata büyüklüğü

$$C_c = \frac{K_r^2}{M \cdot G^2}$$

49)

eşitliği yardımı ile saptanabilir. Ancak M değerlerinin belirlenebilmesi için başlangıçta $c/2b$ değeri için bir kabul yapılır. Daha önce de belirtildiği gibi başlangıçta bu büyüklükte bir hatanın varlığı ve dolayısıyla ilk yüklemde hasarın oluşması çok ender rastlanan bir durumdur. Bu nedenle özellikle kritikaltı bölgede çatlak ilerlemesinin sözkonusu olduğu durumlarda işletme şartlarında uygulanacak en büyük gerilme şiddeti çarpanı Kıscc'den küçük olacak şekilde seçilmelidir. Şayet dinamik yükler altında çatlak ilerlemesi sözkonusu ise (45) denklemindeki A ve m sabitlerinin bilinmesi gerekecektir. Yorulma zorlamaları altında kritik çatlak uzunluğuna ulaşmadan, yani hasar oluşmadan uygulanabilecek en çok yük tekrarının (47) denklemi ile hesaplanabilmesi için başlangıç çatlak büyüklüğünün bilinmesi gerekmektedir. Eğer tahribatsız muayene yöntemleri uygulanmış ise hataya rastlanmayan durumlarda, saptanabilir en küçük hata büyüklüğü başlangıçta var olarak kabul edilir. Diğer bir yöntem ise, işletmede etkiyecek zorlamaların üzerindeki zorlamalar altında test yapmaktır. Uygulanan bu yüksek gerilme seviyesinde hasar oluşmaz ise, bu gerilme seviyesine tekabül eden kritik çatlak büyüklüğündeki hataların malzemede bulunmadığı anlaşılır ve bu değer var olabilecek en büyük başlangıç çatlağı büyüklüğü olarak hesaplamalarda kullanılır.

Yukarıda anlatılan hesaplama için sayısal bir örnek aşağıda verilmiştir:

500 mm çapında ve 20 mm et kalınlığında silindirik bir basınçlı kap azot gazı ile 250 atü basınca kadar her gün bir kez doldurulup boşaltılarak kullanılacaktır. Bu kabın en sık yılda bir kez kontrol edilmesi istenmektedir. Aşağıda özellikleri verilen alüminyum alaşımından üretilmiş olan bu basınçlı kabın bu kullanım şekline uygunluğunu kırılma mekaniği açısından inceleyiniz.

Malzeme: 7075-T6
Akma sınırı: 50 kgf/mm²
Kırılma tokluğu: 155 kgf.mm^{-3/2}
Kritikaltı bölgede çatlak ilerlemesi:
 $dc/dN = 5.10^{-9} (K)^3$

Bu silindirik kaba üretim sonrasında tahribatsız kontrol uygulanmıştır ve üretici firma bu kontrol ile saptanabilir en küçük yüzey veya iç hatanın 4 mm olduğunu belirtmektedir.

Çözüm:

Silindirik basınçlı kaplarda en büyük gerilme çevresel gerilmedir. 250 atü için bu değer

$$\sigma_{max} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot t} = \frac{25 \cdot 500}{2 \cdot 20} = 31,25 \text{ kgf/mm}^2$$

şeklinde hesaplanabilir. Gerilme sıfır ile bu değer arasında değişeceğinden

$$\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 31,25 - 0 = 31,25 \text{ kgf/mm}^2$$

bulunur. Şekil-19'dan $\sigma/\sigma_a = 31,25/50 = 0,63$ ve $c/2b=0,1$ (kabul) için $Q = 1,0$ bulunur. Aynı büyüklükte iç ve yüzey çatlaklarından yüzey çatlakları daha kritik olduğundan, hesaplamalar sadece yüzey çatlakları için yapılacaktır. (49) denklemi yardımıyla kritik çatlak büyüklüğü,

$$C_c = \frac{K_I^2 \cdot Q}{1,21 \cdot \pi \cdot \sigma_{max}^2} = \frac{155^2 \cdot 10}{1,21 \cdot \pi \cdot 31,25^2} = 6,47 \text{ mm}$$

olarak bulunur. Başlangıç çatlak büyüklüğü olarak $c_b=4 \text{ mm}$ alınarak (47) denklemi yardımıyla,

$$N = \frac{2}{(3-2) \cdot 5 \cdot 10^9 \cdot \left(\frac{1,21 \cdot \pi}{1,0}\right)^{3/2} \cdot (31,25)^3} \left\{ \frac{1}{4^{(3-2)/2}} - \frac{1}{6,47^{(3-2)/2}} \right\} = 189$$

elde edilir. Görüldüğü gibi basınçlı kap bir yıl için (yani $N = 365$ için) emniyetli değildir. Bu nedenle saptanabilir en küçük hata büyüklüğü 4 mm 'den daha küçük olan bir tahribatsız muayene yönteminin uygulanması gerekecektir. Bu imkan yoksa, bunun yerine basınç testi yapılabilir. Bu amaçla $N = 365$ yük tekrarı için gerekli emniyeti sağlayacak en büyük başlangıç büyüklüğü (47) denklemi ile belirlenebilir.

$$365 = \frac{2}{(3-2) \cdot 5 \cdot 10^9 \cdot \left(\frac{1,21 \cdot \pi}{1,0}\right)^{3/2} \cdot (31,25)^3} \left\{ \frac{1}{C_b^{(3-2)/2}} - \frac{1}{6,47^{(3-2)/2}} \right\}$$

$$C_b = 2,81 \text{ mm}$$

Bu boyutta bir çatlağın var olmadığının kanıtlanması için basınç testi ile yaratılması gereken gerilme ise (49) denklemi ile

$$\sigma = K_{Ic} \left(\frac{Q}{1,21 \cdot \pi \cdot C_b} \right)^{0,5} = 155 \left(\frac{1,0}{1,21 \cdot \pi \cdot 2,81} \right)^{0,5} = 47,43 \text{ kgf/mm}^2$$

olarak bulunur. Bu gerilmeyi sağlayacak basınç ise,

$$p = \frac{2 \sigma t}{D} = \frac{2 \cdot 47,43 \cdot 20}{500} = 3,79 \text{ kgf/mm}^2 \approx 380 \text{ atü}$$

olmalıdır. Sonuç olarak sözkonusu silindirik basınçlı kabın ancak 380 atü'de basınç testi uygulanması halinde 1 yıl için emniyetle kullanılabileceği söylenebilir. Yukarıdaki hesaplamalarda emniyet katsayısı 1 olarak alınmıştır.

Yararlanılan Kaynaklar (alfabetik sırayla):

1. Dieter, G.E., Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, 1976.
2. Eryürek, B., Kırılma Mekaniği Ders Notları, İTÜ, 1980.
3. Frost, N.E., Marsh, K.J. ve Pook, L.P., Metal Fatigue, Clarendon Press, Oxford, 1974.
4. Gücer, D.E., Mekanik Metalurji Ders Notları, İTÜ, 1974.
5. Heckel, K., Einführung in die technische Anwendung der Bruchmechanik, Carl Hanser Verlag, München, 1970.
6. Hoepfner, D.W., Fracture Prevention and Control, Conf. Proceedings, ASM, 1974.
7. Fracture Toughness, ISI Publication 121, London, 1968.
8. Liebowitz, H. (editor), Fracture vol.1-7, Academic Press, 1971.
9. Tetelman, A.S. ve McEvily, A.J. Jr., Fracture of Structural Materials, John Wiley and Sons, 1967.
10. Timoshenko, S. ve Goodier, J.N., Elastisite Teorisi, Arı Kitapevi, 1969.

Ek-1: Temizlenmiş makina parçaları üzerinde kullanım yerinde yapılan tahribatsız muayenelerle saptanabilir en küçük hata sınırları (mm)

Muayene Yöntemi	Yüzey hataları		iç hatalar	
	imalat kusuru	Yorulma çatlağı	Boşluk	Çatlak
Gözle	6	12	-	-
Ultrasonik	5	5	4	5
Manyetik parçacık	6	10	-	-
Penetran	1	1	-	-
X-Işını	12	*)	4	*)
Eddy Current	5	6	-	-
*) Çatlak kapalı ise X-ışını ile saptanamaz.				