KIRILMA TOKLUĞU ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ İLE 3 FARKLI MALZEMENİN İNCELENMESİ

Bu çalışma
U.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği
Anabilim Dalına Yüksek Lisans Tezi Olarak
Sunulmuştur.

Mak.Müh. Ergun Ateş

Balıkesir, Ağustos 1987

Bu çalışma U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne Yüksek Lisans Tezi olarak sunulmak üzere hazırlanmıştır.

....

Tez Yöneticisi

Yrd.Doç.Dr. İrfan AY

Bu tez tarafımdan incelenmiş, seviyesi, orjinalliği ve içeriği yönünden U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü yönetmeliğine uygun olarak hazırlandığı saptanmıştır.

JÜRİ ÜYELERİ

1- ....

2- ....

3- ....

4- ....

ÖNSÖZ

Makine elemanlarına etkiyen çalışma yükleri, gele - neksel tasarım yöntemleriyle, akma, çekme ve kırılma mukave met değerlerinin altında tutularak hesaplanmaktaydı. Oysa pek çok yapı bu şekilde dizayn edilmiş olmasına rağmen, hesaplanan gerilmelerin çok altındaki işletme gerilmelerinde hasara uğradıkları görülmüştür.

Bu hasarların nedenleri ve malzemelere etkiyen zorlanma neticesinde oluşan çatlakların, büyüyüp yayılmaları konuyla ilgilenen araştırmacıların çalışmaları sonucu, malzemelerin kırılmaya karşı direncini tam olarak ifade edebilecek kırılma mekaniği esasları'nın belirlenmesini sağlamış lardır.

Bu çalışmada, kırılma mekaniği için tayin edilen kırılma tokluğu ölçüm yöntemlerinden, K_{Ic} ve COD ile 3 farklı malzeme'deki kırılma olayı deneysel olarak incelenmiştir.

Böyle bir konuda çalışma imkanını hocam Yrd.Doç.Dr İrfan AY sağlamış ve çalışmalarımı yönlendirmiştir, kendilerine yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Balıkesir, Ağustos 1987 Mak.Müh. Ergun ATEŞ

ÖZET

Bu çalışmada kırılma tokluğu ölçüm yöntemlerinden K_{Ic} ve COD ile 3 farklı malzemedeki kırılma olayı deneysel olarak incelenmiştir.

1. bölümde, konunun ortaya çıkış sebepleri ve kırıl ma olayı hakkında genel bir bilgi verilmeye çalışılmıştır. 2. bölümde, konuyla ilgili genel bir literatür araştırması ve kırılma olayı için önem taşıyan, çatlak oluşumu, büyüme-si ve yayılması'nın değişik yapıdaki malzemelerde incelenme si verilmiştir. 3. bölüm'de ise, bugün için tamamen tüm e - sasları ortaya konmuş ve uygulanabilecek durumda bulunan, lineer-elastik malzemelerdeki teorik mukavemet, DDH ve DGH için çatlak ucundaki gerilme dağılımı ve kırılma şiddeti faktörü ifadesinin eldesi ile Griffith'in konuyla ilgili or taya koyduğu ifadelerde çatlak'ta enerji dağılımının ince - lenmesi ve sonuçta çatlak açılması için tayin edilen kritik büyüklükler verilir. 4. bölüm'de ise bu kez elasto-plastik malzemeler için, Irwin, Mc Clintock ve Dugdale isimli araş-tırmacıların plastik bölge için çıkarttıkları ifadeler ve çatlak ucunda plastik bölge'nin etkili olması halinde, bü - yüklükler, enerji dağılımı ve çatlak kararlılığı ile çatlak yayılımının incelenmesi yer alır. Bölüm 5'de bu ilk 4 bölüm esas alınarak kırılma tokluğu ölçüm yöntemlerinin (K_{Ic}, COD J integrali) hangi esaslar dahilinde gerçekleştirilmeleri -

gerektiği verilmektedir. Bölüm 6 ise yapılan deneysel çalış malar ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile son bulmaktadır.

Neticede önceki bölümlerde belirlenen teorik esas - lar ile, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile bulu- nan neticelerin uyum içinde oldukları görülmüştür.

ABSTRACT

In this study, I experimentaly investigated the fracture toughness of three different materials using with K_{Ic} and COD measuring techniques.

In the first chapter, I have been explained about fractu re and its reasons. The second chapter is dealing with gene - ral literature and cracking occurence, its growing up, dissi- pation of the cracking in the different structure materials. In the third chapter, the crack tip strength dissipation and the fracture intensity factor are giving which is applicable on the theoretical strength (Plain-deformation state and Pla- in-stress state) of the linear-elastic materials. At the same time it has been examined of the energy dissipation in the c- rack which expressions giving by Griffith and finally all of the critical magnitudes are giving for crack opened. In the fourth chapter, I defined fracture toughness, cracking dissi- pation, energy distribution and all of the magnitudes when p- lastic zone is affect to the crack tip. Simultaneously all of the expression for elastic-plastic materials which are defined by Irwin, Mc Clintock and Dugdale are giving. In the fifth c- hapter, I defined the principles of the measuring techniques (K_{Ic}, COD, İntegral of J) which are bases on before chapters.

In the sixth chapter, dealing with all experimental study and evaluation of conclusions.

Finally, all of the obtaining results with theoretical principles are shown to be suitable.

ŞEKİL LİSTESİ

TABLO LİSTESİ

TERİMLER VE SEMBOLLER

a	çatlak uzunluğu.
a_{eff}	effektif çatlak uzunluğu.
a_{kr}	kritik çatlak uzunluğu.
a_o	atom'lar arası mesafe.
A	alan.
A_o	numune kesiti.
b	çatlak genişliği.
b'	(W-a) değeri.
B	numune kalınlığı.
C	compliance.
C'	a/W numune geometrisi ile bağımlı, BS 5762 1979 standardın'daki (Y) değeri.
C_1	Y fonksiyonu için sabit değer.
C_2	" " " " "
C_3	" " " " "
C_4	" " " " "
C_G	Griffith çatlak uzunluğu.
d	tane çapı.
D.K	dislokasyon kaynağı.
e	yorulma çatlağı uzunluğu.
E	elastisite modülü.
f	şekil değişim uzunluğu.

F	kuvvet.
F_a	çatlağı deforme edecek min. kuvvet.
F_{max}	max. kuvvet.
F_Q	kritik gerilmeyi veren kuvvet.
F_x	(S) doğrusunun F-v eğrisini kestiği nokta.
F'	(F_x.0,8) değeri.
$\hat{F}$	F-v eğrisindeki ilk kararsızlık noktası.
G	çatlak oluşturma kuvveti.
G_k	kayma modülü.
H_1	straingauge.
H_2	"
k	sabit.
k_1	"
k'	pile' up'dan dislokasyonların bırakılması ile ilgili bir parametre.(dislokasyonların sayısı ile ilgili)
$\mathcal{k}$	kinetik enerji.
K	kırılma şiddeti faktörü.
K_f	kırılma faktörü.(numune boyutları, compliance ilgili kuvvet değeriyle bağımlıdır)
l	çatlak ucu önünde minyatür çekme çubukları uzunluğu.

l_o	numune uzunluğu.
L	kayma bandı uzunluğu.
M	moment.
$M_{max.}$	max. moment.
n	dislokasyon sayısı.
r	çatlak ucundan bir noktaya kadar'ki mesafe.
r_{pl}	plastik bölgenin uzunluğu.
t	zaman.
T.S	tane sınırı.
T_1	straingauge.
T_2	"
U	malzemedeki enerji.
U_{el}	elastik enerji.
U'_{el}	malzemede etkili olan deformasyon sonucu açığa çıkan elastik enerji.
U_o	malzemeyi kırmak için gerekli enerji.
U_γ	yüzey enerjisi.
ν	poisson katsayısı.(büzülme katsayısı)
V	yer değişim değeri.
V_e	malzemede tek boyutlu ortamda enine dalga yayılma hızı.
V_h	numune hacmi.

V_o	malzemede tek boyutlu ortamda boyuna dalga yayılma hızı.
V_p	çatlak ucu açılma miktarlarının plastik bileşenleri.
V'	çatlak yayılma hızı.
Y	numune geometrisiyle bağımlı bir düzeltme katsayısı.
Z	numune geometrisine bağlı bir değer.
Z'	numune üst yüzeyine tespit edilen parça'nın (çakı'nın) yüksekliği.
W'	iş ifadesi.
W_b	toplam plastik bölge uzunluğu.
W	numune genişliği.
x	atom'lar arası mesafe.
x_g	çatlak yüzeyleri arası mesafe, çatlak genişliği.
σ_1	asal gerilme.
σ_2	" "
σ_3	" "
σ	normal gerilme.
σ_a	akma gerilmesi.
$\sigma_{a_{0,2}}$	% 0,2'ye karşılık gelen akma gerilmesi.
σ_i	kararlı büyümeye karşılık gelen değer.

σ_k	kırılma (kopma) gerilmesi.
$\sigma_{max.}$	max. gerilme.
σ_v	Von Mises akma gerilmesi.
τ	kayma gerilmesi.
τ_i	tane içi mukavemet değeri.
$\tau_{max.}$	max. kayma gerilmesi.
τ_{xy}	x ve y doğrultularındaki kayma gerilmesi. bileşeni.
α	kayma oranı.
β_1	burulma için.(1)
β_2	çekme için.(1/2)
β_3	çentik için.(1/3)
β	(kayma gerilmesi/nominal gerilme) oranı.
γ	yüzey enerjisi.
γ_e	elastik bölgenin yüzey enerjisi.
γ_p	plastik bölgenin yüzey enerjisi.
γ_y	çatlak yüzey enerjisi.
λ	dalga boyu.
δ	çatlak ucundaki plastik deformasyon miktarı (COD değeri)
ρ	çatlak ucu eğrilik yarıçapı.
ρ_y	malzemenin yoğunluğu.

θ	açı.
φ	sistemdeki tüm enerji.
$\mathcal{F}$	çatlak oluşumu için dışarıdan sisteme verilen enerji.
$\mathcal{H}$	yorulma çatlağı haricindeki çatlak uzunluğu.
ε	(Δl) uzama miktarı.
ε_a	akma gerilmesine karşılık gelen uzama.
ε_f	numunenin çekme süneklilıği.
ε_z	kalınlık yönündeki deformasyon.
(★)	kritik noktaları gösteren değerleri ifade eder.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bir yapısal elemanın tasarımı, verilen yük ve çevre koşullarında yapının uygun bir şekilde işlenmesini sağlamak için geometrisinin, boyutlarının saptanması ve gerekli malzemenin seçilmesidir. Bu işlerin yapılabilmesi için öncelik le yapının gerilme analizinin yapılması daha sonra'da uygun bir tasarım ölçütü kullanılması gerekmektedir. Bu ölçüt genellikle elemandaki "kritik yükün" karakteristik bir malzeme parametresi ile mukayesesinden ibarettir. "Kritik yük" elemana etki eden yüklerin şiddetini ve elemanın geometrisini, malzeme parametresi ile malzemenin dayanıklılığını gösterir. Bugün dahi makine elemanlarının etki altında oldukları işletme yüklerine karşı emniyetli gerilme hesabı, geleneksel tasarım yöntemleriyle,

-Statik yük'ü orantı sınırının altında tutarak aşırı sehimi önleme,

-Statik yük'ü yapının taşıyabileceği max. yük'ün altında tutarak burkulma ve boyun teşekkülünden korunma,

-Yükleme statik halde üniform olmayan gerilme dağılımı şeklinde ise (çentikli yapı), max. gerilme civarındaki bölgesel plastik deformasyonların müsaade edildiği, yapının diğer kısımlarında ise büyük elastik gerilmelerin hakim olduğu, çentik katsayılarının kullanıldığı plastik tasarım tipindeki haller dikkate alınarak oluşturulmaktadır.

Bu yöntemlerde yapının kırılma gerilmesi, akma gerilmesinden büyük, çekme gerilmesinden büyük veya eşit varsayılmıştır. Böylece çalışma yükleri, akma, çekme ve kırılma mukavemet değerlerinin altında tutularak hesaplanmaktaydı.

Genellikle bir elemanın veya tüm yapının kullanılamaz hale gelmesi aşağıdaki nedenlerden biri ile olur.

-Akma, gereğinden fazla şekil değiştirme.

-Yorulma.

-Yapısal stabilite.

-Yenim (korozyon)

-Kırılma.

Bu iş görmezlik modlarından kırılma'nın en belirgin özelliği uygulanan aşırı yük nedeniyle malzemede yeni yüzeylerin belirmesidir. Kırılma denince genellikle önceden herhangi bir belirti vermeden, fazla şekil değişikliği olmadan parçanın ikiye bölünmesi olayı anlaşılmaktadır. Ne yazık'ki tarih bu tür kırılma olaylarının yarattığı facialarla doludur. Bu konudaki ilk yazılı belge 1844'de Oldham İngiltere'de bir değirmendeki dökme demir ana milin kırıldığını ve 20 kişinin öldüğünü belirtmektedir. Çok yakın zamana kadar klasik dizayn kriterleri ile bu tür olaylar açıklanmaya çalı -

şılmış ama başarılamamıştır. Kırılma mekaniğine olan ilgi ö zellikle 2. Dünya Savaşı sırasında artmıştır. Ne yazık'ki bu gelişme'de bir takım facialardan sonra meydana gelmiştir. Bu facialarin en iyi bilinenleri İngiliz'lerin turbojet Com et uçakları ile T2 Tanker ve Liberty gemilerinde olanlardır. Toplamı 5000 kadar, parçaları kaynak kullanılarak eklenmiş bu gemilerden, 1000 tanesinde çatlaklar olmuş, 200 tanesi ciddi bir şekilde hasar görmüş ve 16 tanesi'de ortadan ikiye ayrılmıştır. Bunlara ek olarak daha yakın zamanlarda F 111 ABD Hava Kuvvetleri uçakları düşmüş, Alaska-Kanada petrol boru hattında patlamalar meydana gelmiş, Melborn A - vustralya'da King's Köprüsü aniden çökmüştür. Bütün bu eleman ve yapılarda bilinen klasik tasarım ölçütleri doğru bir şekilde takip edilmiştir.

Buradan çıkan sonuç özellikle çatlak ve hatalara çok hassas olan yüksek mukavemetteki malzemeler için klasik tasarım ölçütlerinin kullanılamaz oluşudur. Her ne kadar de likli, çentikli veya keskin köşeleri olan elemanların tasarımında bu etkileri gözönüne almak için gerilme yığılması katsayıları kullanılıyorsa'da bu kendi başına bir ölçüt değildir ve sadece sistemde meydana gelen gerilme ile uygulanan gerilmenin oranını vermektedir.

Çok keskin çatlağı olan bir yapıda çatlak ucunda ge rilme yığılması katsayısı sonsuza yaklaşmaktadır, klasik ta sarım yöntemlerini kullanan bir tasarımcı için bu sonuç anlamsızdır; çünkü çatlak ucundaki gerilme akma gerilmesinden defalarca daha büyüktür ve buna rağmen içinde çatlak olan bütün yapılar klasik tasarımın öngördüğü gibi hemen çökme - mektedir. Buna ek olarak içinde çatlak olan birçok yapıda akma gerilmesinin çok altındaki gerilmelerde hızlı çatlak i lerlemelerinden dolayı kullanılamaz hale gelmiştir. Bütün bu olaylar içinde ve/veya hata bulunan elemanların tasarımı için yeni bir disiplin gerektirmiştir. "Kırılma mekaniği" diye isimlendirilen bu yeni tasarım disiplininde en önemli varsayım malzeme içindeki mekanik hataların önüne geçilemez olduğu ve bu hataların'da malzemedeki gerilme dağılımını et kilediği dolayısı ile'de sisteme yüklenebilecek yüklerin he saplanmasında önemli rol oynadığıdır. Malzemedeki küçük ha- taların ve mikroskopik ufak çatlakların malzeme dayanıklılı ğına etkisi cam lifleri ile yapılan deneylerde açıkça görü- lebilir. Aynı boydaki cam liflerinden yüzeyi parlatılanında yüzeyi pürüzlü bırakılana göre kırk defa daha fazla bir çek me mukavemeti elde edilmiştir. Bunun nedeni ise parlatılan liflerdeki küçük yüzey hatalarının yok oluşudur.

Kırılma mekaniği ölçütlerini incelemeden evvel kı- rılmanın fiziksel yapısını incelemek gerekmektedir. Kırılma mekaniğinde ana fikir tüm dikkatleri malzemede bulunan kri- tik çatlağın etrafında yoğunlaştırmaktır. Çünkü bu hata, po zisyon ve büyüklüğü uygun ise hızla ilerleyen bir kırılma - nın başlatıcısı olabilir. Kritik olmayan bir hatanın'da kri tik olabilecek bir boyuta zamanla erişebilmesi için bir me- kanizma gereklidir. Bunlar yorulma, korozyon gibi mekanizma lardır. Üretim hatası ve kaynak hataları nedenleri ile'de e lemanda hatalar meydana gelebilir. Bu hatalar kritik olabil dikleri gibi bazen'de yerleştirim sırasında ortaya çıkan gerilmelerle kritik boyutlara ulaşırlar.

Kırılma işlemi aşağıdaki kademelerde meydana gelir.

-Yavaş ilerleme; Bunda kritik olmayan bir hata, gerilmeler nedeniyle çok yavaş olarak kritik hata boyutuna ulaşır.

-Başlangıç; Hatanın boyunun, gerilmeler ısı gibi nedenlerle kritik hale geldiği yani stabilitesinin bozulup ani ilerleyen bir kırılmaya başlangıç olduğu haldir. Kırılmanın başlangıcı kırılgan ve sünek olabilir. Bu, malzemenin cinsine, sıcaklığına, büyüklüğüne, uygulanan yükün uygulama hızına ve malzemenin mikroskopik yapısına bağlıdır. Bu etkilerden büyüklük etkisi diye adlandırılan etki çok ilginç olmakla beraber henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Aynı malzeme ufak deney parçası boyutlarında sünek özellik gösterdiği halde boyutları büyüyünce bu malzemeden yapılan eleman kırılgan özellik gösterebilir. Bunun en belirgin örnekleri gemi, uçak gövdeleri ve basınçlı tanklarda görülmektedir. Bu yapılarda çatlaklar oluştuktan sonra yapılan incelemelerde kırılmanın, malzemenin sünek olmasına rağmen kırılgan bir özellik gösterdiği kırılma yüzeylerinin parlaklığından anlaşılmaktadır.

-İlerleme; Bu durumda sistemdeki yükler altında, hata hızla ilerlemektedir.

-Durdurma; Çeşitli nedenlerle kırılma durmuştur.

Kırılma mekaniğinde bu dört safha ayrı ayrı incelenmelidir. Çünkü birisi için önemli olan diğerleri için önemli olmayabilir. Örneğin hatanın ucundaki gerilmelerin durumu hatanın kritik olup olmaması ve kırılmanın başlamasında önemli bir faktör iken, hatanın ilerlemesinde önemli bir faktör değildir. Yapı elemanını yerleştirme sırasındaki en önemli sorunlardan biri'de hatalardan hangisine izin verile bileceği yani hangi hatanın kritik olacağı ve kırılmanın başlaması safhasıdır. Bundan dolayı kırılmanın başlıyabilme si için gerekli olan şartlar ayrıntıları ile incelenmelidir. Bu aynı zamanda kırılma mekaniğinin en popüler ölçütü olan "Kırılma şiddeti faktörü" ölçütünün'de ana noktasıdır.

Malzemelerin kırılmaya karşı direncini (kırılma tok luğunu) belirliyebilmek için, çatlak yayılmasının izlenmesi ile başlangıçta kalitatif neticeler veren deneyler yapılmış sonraki çalışmalar ise, yapı içerisindeki çatlak ilerlemesi ne karşı malzeme direncini kantitatif olarak ölçebilecek kırılma mekaniği analitik ifadeleri K_{Ic}, COD, J integrali gibi deneysel metodlar üzerine olmuştur. Önceleri Lineer-elastik malzemeler için süren çalışmalar, daha sonra Elasto-p - lastik malzemeler için'de gerçekleştirilmiş ve halen bugün' de devam etmektedir. Geliştirilen bu yöntemlerin geçerliliği hakkındaki tartışmalar ise halen sürmektedir.

Bu çalışmada 3 farklı malzemeye K_{Ic} ve COD yöntemi uygulanarak, çatlak oluşum noktası, çatlak ilerlemesi, ka - rarsız (malzemenin kırıldığı) çatlak başlangıcı ve kırılma tokluğu değerleri, kıyaslamalı olarak incelenmiştir.

BÖLÜM 2
KIRILMA VE TEORİSİ

2.1. Literatür Araştırması

Elasto-plastik malzemelerde, çatlağın kararsız bir şekilde yayılma başlangıç noktasını, kırılma tokluğu değeri ni tayin için pek çok çalışma yapılmıştır. Tam gevrek malze meler için bu konu sorun olmaktan çıkmıştır. Ancak, elasto-plastik malzemeler ve değişik uygulamalar için daha çok a - raştırmaya gerek vardır ve bu konuda çalışmalar hızla sür mektedir.

İlk kez Griffith (1), "Bir çatlak, deformasyon ener jisindeki azalma yeni çatlak yüzeyi meydana getirmek için gerekli olan enerjiye eşit olduğu zaman yayılacaktır." di - yerek çatlağın yayılma kuralını ortaya koydu. Griffith' in ortaya attığı teori, yanlızca tam gevrek malzemeler için ge çerliydi. Orowan (2), Griffith'in teorisinin metallere uygu lanamıyacağını, zira çatlak duvarını büyütmek için yüzey e-nerjisi teriminin kafi gelmiyeceğini, plastik iş teriminin de ilave edilmesi gerektiğini ileri sürüyordu. Hemen hemen benzer bir yaklaşımı aynı tarihlerde Irwın (3)'de söyliyerek çatlak yayma kuvvetini, deformasyon enerjisinin bırakılması şeklinde yorumlayarak "K" Gerilim Şiddeti terimini ortaya atmaktaydı. İlk kez Mott (4), çatlağın yayılma hızını analiz ederek bağıntılar çıkardı. Metallerde çatlağın yayılmasını COD (Crack Opening Displacement) modeline göre açıklamasını Cottrell (5) yaptı. Bu modelin formüllerinin oluşturulması ise Hahn (6) ve Rosenfeld (7) tarafından gerçekleştirildi.

Son zamanlarda COD'un kaynaklı parçalara uygulanmasını sağlamak amacı ile Dawes (8) ve arkadaşları boyutsuz COD-(Φ) terimini ortaya koyarak, pahalı yatırım gereken, toleransları dar kaynaklı parçalar ile oluşturulan yapılarda çok önemli başarı sağladılar. Halen dünya üzerinde pek çok yerdeki büyük kuleler, petrol boru hatları, denizden petrol çıkartma tesisleri, doğal gaz boru hatları vs. gibi büyük işlerde COD yönteminin kaynaklı yapılara uygulanması sürmektedir.

2.2. Metalik Malzemelerde Çatlak

Metalsel malzemelerin kullanılamıyacak hale gelmeleri, çatlak oluşumu, çatlağın yayılması ve kırılma sebebiyledir. Çatlağın oluşumu, yayılması ve kırılma birbirini tamamlayan kavramlardır. Metalsel malzemelerde kırılma tipleri;

-Tam gevrek (Lineer-Elastik)

-Yarı gevrek, küçük akma bölgeli (Lineer-Elastik)

-Yarı gevrek, büyük akma bölgeli (Elasto-Plastik)

-Sünek, genel akma (Sınırlı yük)

tarzında olmaktadır.

2.2.1. Yarı Gevrek Kırılma Tipinde Çatlak Oluşumunun Dislokasyon Teorileri İle Açıklanması.

Malzemelerin birçoğunda gevrek kırılmadan önce azda olsa bir plastik deformasyon görülür. Bu malzemelerde kırık yüzeyi bir gevrek kırılma görüntüsüne sahiptir. Çatlağın oluşmasında ve mevcut çatlakların büyümesinin kontrolünde plastik deformasyon rol almaktadır. Böylece kayma düzlemleri bileşenleri en az çeki gerilmesi bileşemleri kadar önemli olmaktadır.

Malzemelerin kırılma mekanizmalarının oluşumu, yapıdaki incelemeler sonucu;

-Tam gevrek malzemelerde (Elmas, Silikatlar, Mika W, B, Karbürler, Nitritler) bağların kopması,

-Yarı gevrek malzemelerde (HSD metaller, birçok

HMK metaller, Nacl) bağların kopması ve dislokasyon hareketleriyle,

-Sünek malzemelerde (YMK metaller, bazı HMK metaller) dislokasyon hareketleriyle,

gerçekleştiği görülmüştür. Dolayısıyla yarı gevrek bir malzemede kırılma plastik deformasyon içerdiğinden, (küçük akma bölgeli) dislokasyon hareketine izin verecektir. Böyle malzemede bir mikro çatlak oluşturmak için;

a) Akma sınırının üzerinde yüklenen malzemede kayma düzlemlerindeki dislokasyon kaynakları harekete geçmekte ve engeller (tane sınırı, ikinci faz, mevcut çatlak vs.) önünde birikmektedir.

b) Birikmiş dislokasyonların önünde kayma gerilmelerini güçlendirmek,

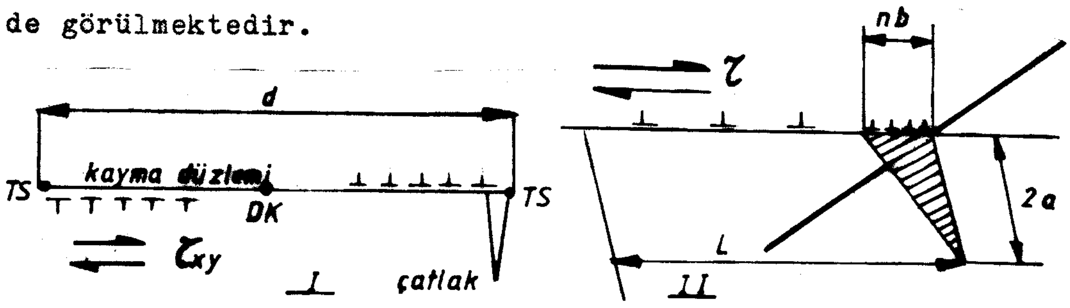
c) daha sonra dislokasyonların hareketini tane sınırlarının engellediği durumda iki olay oluşabilir;

1-Yığılan dislokasyonların oluşturduğu gerilme komşu tanelerde plastik deformasyonu başlatır.

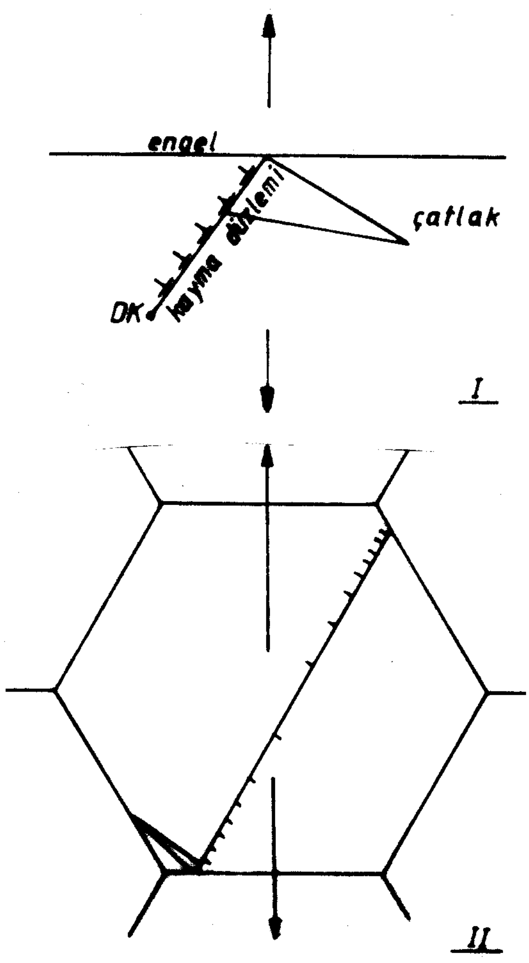
2-Kuvvet tatbiki ile oluşan elastik deformasyon enerjisi, dislokasyonların biriktiği (Pile-Up) yerde ilave dislokasyon hareketi olmaksızın yığılan dislokasyonların oluşturdukları gerilme neticesinde engeller önünde mikro çatlak oluşur. (ve yayılmaya başlar). Şekil 2.1

Tane sınırındaki hatalı bir yığılma çok basit bir tasarıdır. Belirli çaptaki tanede bir mikro çatlak oluşumu için birçok model tasarlamak mümkündür. Dislokasyonların yığılması ve çatlak oluşumuna ait çeşitli modeller şekil 2.2

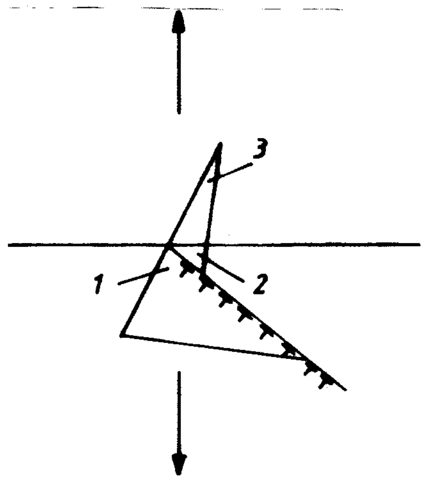
de görülmektedir.



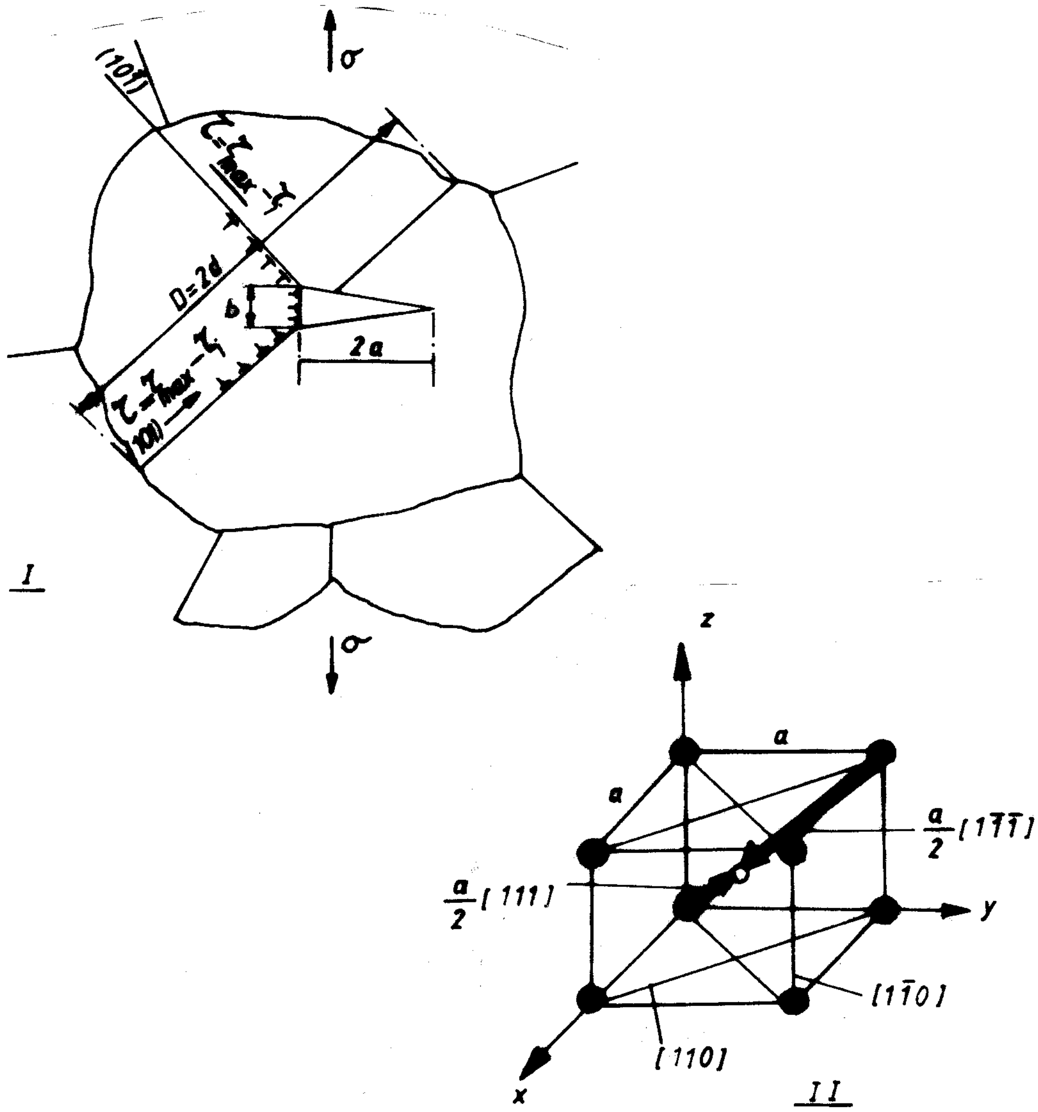
Şekil 2.1 Çatlak oluşumu.



Şekil 2.2.(a) Max. çatlak, bölgesel çeki gerilmelerinin olduğu yerlerde oluşur.



Şekil 2.2.(b) Çatlak, tabakasal yapıya sahip kristallerde görülür. HSD metaller ve Mika'da genellikle kristallografik kayma düzlemleri dayanım yönünden çok zayıftır. 2 nolu çatlak engel ile matris arasında oluşmaktadır. Tane sınırında toplanan empüriteler buraları zayıflatacağından çatlak tane sınırları boyunca yayılır. 3 nolu çatlak engelin diğer tarafında oluşmaktadır. Bu olay engel ile kayma düzlemi arasındaki yönelmenin uygun konumlarında oluşabilir. 2. faz engeli içinde'de böyle bir çatlak oluşabilir.



Şekil 2.2.(c) Bu mikro çatlak oluşum modeli ilk kez Zener (9) tarafından ortaya atılmıştır. Burada farklı kayma düzlemlerinde kayan dislokasyonlar düzlemlerin kesişmesi halinde yığılırlar ve oluşan dislokasyon hiç bir kayma düzleminde bulunmadığından kaymaz, neticede engel vazifesi görerek, burada çatlak oluşmasına neden olurlar. I no ile gösterdiğimiz şeklimizde (101) ve (10$\bar{1}$) kayma

düzlemlerinde hareket eden dislokasyonlar engel ile karşıla şıp bir enerji kazanımından sonra (001) düzleminde n.b ge nişliğinde 2a uzunluğunda çatlak oluşturur. II no ile gös - terdiğimiz şeklimiz ise HMK metallerde aynı olay açıklanma ya çalışılmıştır. Burada;

$$\frac{1}{2}a(111)+\frac{1}{2}a(\bar{1}\bar{1}\bar{1}) = a(100)$$

olacaktır. a(100) dislokasyonu kayma düzlemi üzerinde bulun madığından kaymaz. Yani engel vazifesi görür.

Malzemeler yüksek deformasyon hızlarında veya düşük sıcaklıklarda deforme edilirse dislokasyonların hareketi ye tersiz kalacaktır. Bu durumda ikiz dislokasyonlarının hareketi görülür. Bunların yığılması yine çatlakların oluşmasına yol açar.

Cottrell'e göre iki kayma düzleminin kesişmesi sonu cu bir çatlak oluşabilir. Şekil 2.1 de kayma düzlemlerindeki gerilme bileşeni (τ) olsun. Dislokasyonların harekete geçebilmesi için gerilme bileşeni (τ) nun dislokasyonların sürtünme direnci (tane içi mukavemeti) (τ_i) yi aşması gerekir. Kaymayı oluşturacak etkili gerilme ($\tau - \tau_i$) olur.

Buna bağlı olarak şekil değiştirme oranı;

$$\gamma = \frac{\tau - \tau_i}{G_k} \qquad (2.1)$$

olur. Yığılan dislokasyon n tane ise binların kayma mikta rı α.n.b alınabilir. O halde kayma oranı;

$$\gamma = \frac{\alpha . n . b}{d} \qquad (2.2)$$

olarak' da yazılabilir. Her iki denklem birbirine eşit oldu ğundan;

$$\frac{(\tau-\tau_i)}{G_k}=\frac{\alpha.n.b}{d}$$

$$n=\frac{(\tau-\tau_i).d}{G_k.\alpha.b} \qquad (2.3)$$

olur. Şimdi çatlağın başlangıç durumunu düşünelim, dış kuv vet her bir dislokasyona $(\tau-\tau_i).b$ kuvveti uygular. Toplam kuvvet ise, (n adet dislokasyona uygulanan kuvvet) $(\tau-\tau_i).n.b$ olacaktır.

Stroh (10) pile-up önündeki gerilim yığılmasının p lastik deformasyonla giderilemediğini göstererek kayma ge- rilmelerinin yanında çekme gerilmelerininde teorik mukaveme te erişebileceğini ifade etmiştir.

$$(\tau-\tau_i).n.b=\sigma_{teorik} \qquad (2.4)$$

σ_{teorik} = Teorik çekme mukavemeti

o halde;

$$(\tau-\tau_i).\left(\frac{L}{r}\right)^{1/2}=\left(\frac{E.\gamma}{a_0}\right)^{1/2} \qquad (2.5)$$

şeklinde yazılabilir. Bu formülde;

a_0 : Atomlar arasındaki mesafe.

E : Elastisite modülü.

L : Kayma bandı uzunluğu.

r : Pile-up 'un ucundan çatlağın oluştuğu yere kadar olan mesafe.

τ : Kayma gerilmesi.

τ_i : Dislokasyon sürtünme direnci.

γ : Yüzey enerjisi.

Bir mikro çatlağın oluşması;

$$\tau = \tau_i + \left(\frac{E.r.\gamma}{a_o.L} \right)^{1/2} \tag{2.6}$$

ye eriştiği zaman olacaktır. Eğer, $r \approx a_o$ ve $E \approx 2G_k$ alınırsa,

$$\tau = \tau_i + \left(\frac{2.G_k.\gamma}{L} \right)^{1/2} \tag{2.7}$$

ye indirgenir. Kayma bandındaki dislokasyon sayısıda,

$$n.b \approx L.\frac{(\tau - \tau_i)}{G_k} \tag{2.8}$$

şeklinde bu son denklem ile ifade edilebilir. (2.7) ve (2.8) denklemlerinde L 'lerin işitliğinden,

$$(\tau - \tau_i).n.b \approx 2.\gamma \tag{2.9}$$

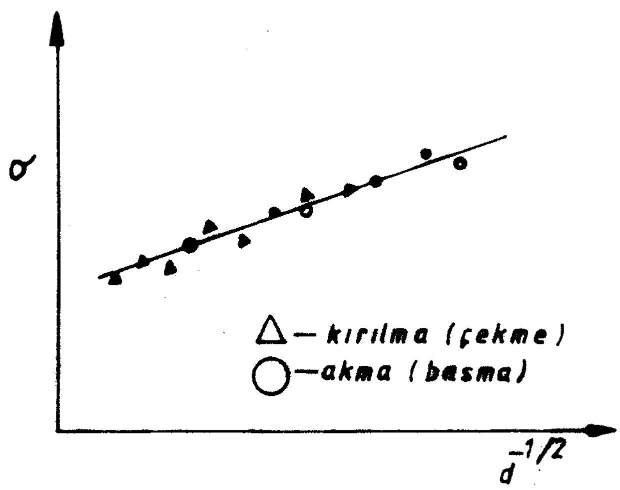
elde edilir.

Cottrell (5) in amaçladığı bu son denklemin fizik - sel izahı, tatbik edilen kayma gerilmeleri ile dislokasyonlara $n.b$ kadar yer değiştirme yaptırıldığından bir iş yapılmıştır. Bu iş, dislokasyonların sürtünme direncine karşı yapmış oldukları (+) işe eşit olduğu anda mikro çatlak oluşacaktır. Son denklem mikro çatlağın uzunluğunu içermediği için ilgi çekicidir. Mikro çatlak teşekkülünde, yanlızca kayma gerilmeleri vardır, çekme gerilmelerinin etkisi yoktur. Çekme gerilmelerinin etkisi çatlağın yayılmasında orta ya çıkar. Metallerde bir çatlağı yaymaya çalışan mekanizma çatlağı oluşturmaya çalışan mekanizmadan daha zor bir olay-dır, oluşan bir mikro çatlak, pile-up 'taki dislokasyonlara dislokasyon kaynağından gelenler baskı yaptığı sürece plastik deformasyonla büyüyecektir.

Dislokasyonların önündeki engel tane sınırı ise oluşan mikro çatlağı komşu tane içinden yaymak hayli zordur. Çelik bir malzemede tane boyutu d 'nin çatlak yayılması ile ilişkisini, Hall-Petch (11) şu şekilde açıklamıştır.

$$\sigma k - \sigma i = k.d^{-1/2} \tag{2.10}$$

Yarı gevrek malzemeler üzerinde yapılan denemeler - de çekme deneyi neticesinde elde edilen kırılma gerilmeleri basma deneyi neticesinde elde edilen akma sınırına uygunluk sağlamışlardır. Çünkü çatlak oluşumu çeki gerilmelerine karşı çok hassastır. Şekil (2.3)



Şekil 2.3 Tane sınırının karbonlu çelikte kırılma ve akma mukavemetine etkisi.

Çekme deneyinde elde edilen kopma gerilmeleri, basma dene - yinde elde edilen akma gerilmelerine eşit olması halinde d tane çapını içeren Hall-petch (11) bağıntısındaki ifade ile uyum gerçekleşmektedir.

Cottrell (5) in tane çapı d 'yi içeren denklemi ise,

$$(\tau_i \cdot d^{1/2} + k') k' = G_k \cdot \gamma \cdot \beta \qquad (2.11)$$

şeklindedir. Burada;

$$\beta \begin{cases} \beta_1 : 1 \text{ Burulma için.} \\ \beta_2 : 1/2 \text{ Çekme için.} \\ \beta_3 : 1/3 \text{ Çentik için.} \end{cases}$$

$$\beta = \frac{\text{Kayma gerilmesi}}{\text{Nominal gerilme}}$$

τ_i : Dislokasyon direnci.

k' : Pile-up 'tan dislokasyonların bırakılması ile ilgili parametre.

γ : ($\gamma_e + \gamma_p$) Toplam yüzey enerjisi.

Denklem (2.11) in sol tarafındaki ifade, sağ tarafındaki i- fadeden küçük ise, mikro çatlak oluşabilir. Fakat büyüyemez. İfade büyük ise, kayma gerilmesi akma gerilmesine eşit oldu ğu zaman, mikro çatlak yayılmaya başlıyacaktır.

Yüksek sürtünme direnci (τ_i) değerlerine sahip metal sel malzemeler gevrek şekilde kırılma gösterirler. Çünki bu malzemelerde akma mukavemetine erişilmeden teorik mukaveme- te erişilir. En iyi örnek seramik malzemelerdir. HMK metal- lerde oda sıcaklığındaki sürtünme direnci (τ_i) değerleri yüksektir. İnce taneli metallerin sürtünme direnci (τ_i) de- ğerleri çok düşük sıcaklıklarda bile gevreklik yaratmayacak değerde olabilmektedir. Bu yüzdende gevrek-sünek dönüşüm sıcaklıkları daha düşük sıcaklıklara kadar varabilir. Dönüşüm sıcaklıklarına çelik kompozisyonunun etkisi d, k', τ_i gibi parametrelerin etkilenmesinden dolayıdır. k' dislokasyon sayısını ifade ettiğinden, metallerin gevrek davranış göstermesinde önemli rol oynar. Yüksek k' değerlerine sahip Fe Mo gibi malzemeler, düşük k' değerlerine sahip Tantalyum Columbium gibi malzemelerden daha fazla gevrek kırılmaya karşı meyillidirler.

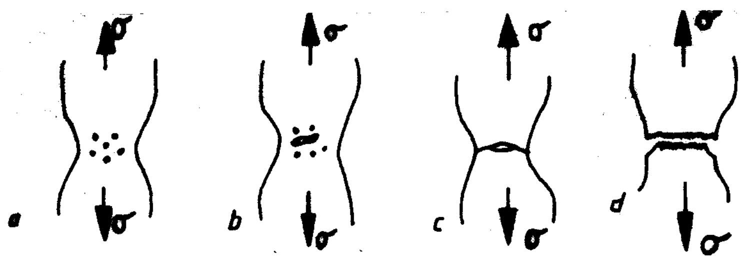
Etkili olan yüzey enerjisi γ büyük ise, gevrek kırılma önlenebilir. Korrozyon ve Hidrojen gibi pek çok çevresel faktör, etkili yüzey enerjisi γ değerini düşürür.

Plastik deformasyonun yarı-gevrek kırılma olayına katkısı, kayma düzlemlerinin az veya çok olmasına ve hareketli dislokasyon sayısına bağlıdır. HMK malzemelerde kolay hareket eden dislokasyonların çoğu, curuflar tarafından engellendiği zaman gevrek bir durum doğmasına karşılık, Çinko gibi sınırlı kayma düzlemine sahip metallerde ise bizzat plastik deformasyonun kendisi gevreklik yaratır.

Hernekadar denklem (2.11) de deformasyon hızının etkisi açıkça görülmüyorsada, yüksek deformasyon hızlarında (τ_i) ve (σ_d) değerleri yüksek olmaktadır.

2.2.2. Sünek Malzemelerde Çatlak Oluşumu.

Sünek malzemelerde kırılma büyükçe bir ön plastik deformasyonla kendini belli ettiğinden tehlikeli olmayıp gevrek malzemelerdeki kırılma olayı kadar önemli değildir. YMK metaller ve yüksek sıcaklıklarda HMK ile HSD metaller bu gruba girer. Deformasyon arasında çatlak oluşumu yoktur ve ideal olarak plastik deformasyon, kristallerin bir birine göre tamamen kayıp ayrılmasına kadar devam eder. Gerçekte kırılma (kopma) olayı plastik deformasyon'un yoğunlaştığı yerlerde (büzülme bölgelerinde) oluşur.



Şekil 2.4 Sünek malzemelerde kopma safhaları.

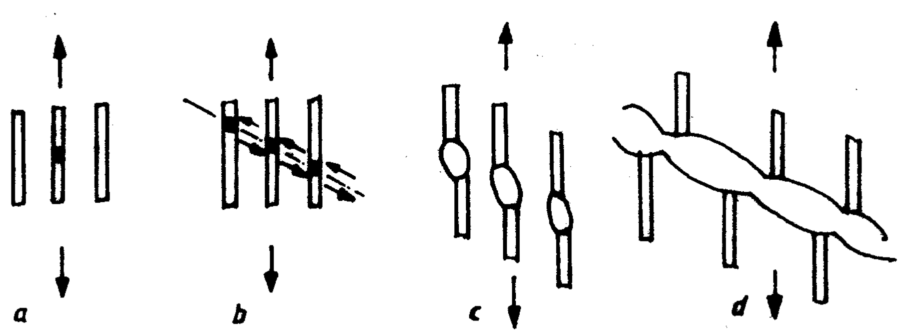
Yukarıdaki şeklimizde;

a) Malzeme yüklemeye maruz kaldığında, gerilme, akma gerilmesine eriştiği zaman malzemede 3 eksenli gerilme hali doğacak ve kesit daralacaktır. Malzeme içinde mevcut daha mukavim mikropartiküller tıpkı yarı-gevrek malzemelerde olduğu gibi buradada kırılma kaynaklarıdır. Bunların civarında oluşan boşluklar gerilme doğrultusuna 50^{o}-60^{o} açı altında (kayma doğrultusuyla) büyüyerek merkezi çatlak oluşturur.

b) Oluşan bu çatlak daha sonra deformasyon eksenine 90° açı altında kenarlara doğru büyüyerek ve kenardan yaklaşık 45° açı yaparak kırılmaya yol açar.

c) Anlaşılacağı gibi sünek malzemelerde kırılma deformasyon esnasında oluşan boşlukların belli düzlemler (kayma düzlemleri) üzerinde birikmesi ile ve birleşmesi ile oluşur. Boşluklar arasındaki metal tıpkı sünek bir çekme numunesi gibi davranarak büzülür, (çatlağın genişlemesi.) ve içinde çatlaklar oluşur, neticede bunlar birleşerek kopma oluşur. Dolayısıyla sünek kırılmada parça yüzeyi süngeri andırır. Tabiiki % 100 saf bir sünek malzeme kopmadan evvel büzülme'yi tam olarak gerçekleştirecektir, yani ayrılma bölgesi bir nokta oluşturacak şekilde büzüldükten sonra kopar. Sünek malzemeler içindeki mevcut sert fazların şekli dağılımı sünekliliğe çok etki eder. Tabiiki bu fazların artışıda sünekliliği azaltacaktır.

Lamelli perlit fazı ihtiva eden çelikte kırılma aşağıdaki şekilde oluşacaktır;



Şekil 2.5 Perlitik çelikte kırılma mekanizması.

perlitik çelikte kırılma mekanizmasını gösteren şeklimizde;

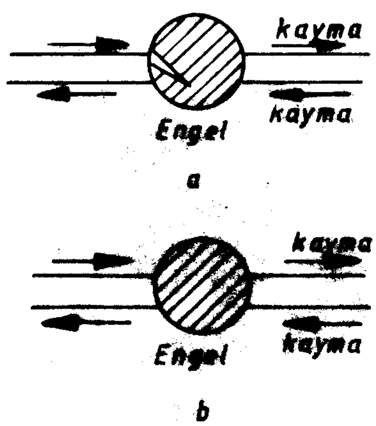
a) Çekme gerilmeleri istikametinde bulunan perlit lamellerinde hem normal hemde kayma gerilmeleri sebebiyle ilk çatlak oluşur.

b) Kayma yani plastik deformasyon (ekseni ile yaklaşık 50^{o} açı yapıyor) diğer lamellerdede çatlak oluşturuyor.

c) Lameller arasındaki bölgede kayma devam ettiği ve gerilme (σ) arttığı için çatlaklar büyüyor.

d) Daha sonra çatlaklar birleşerek kırılma meydana geliyor.

Eğer perlit lamelleri yerine yapı küresel olsa idi karbürlerin kırılması çok daha zor olurdu. Neticede süneklilığin (düktilitenin) artacağı tabiidir. Matrisle bu sert küresel faz arasındaki sınırın azalması dislokasyonların çapraz kayma işlemlerini kolaylaştıracaktır. Eğer ikinci faz (sert faz) bu şekilde yani küresel dağılmış ise kırılma iki şekilde oluşur.

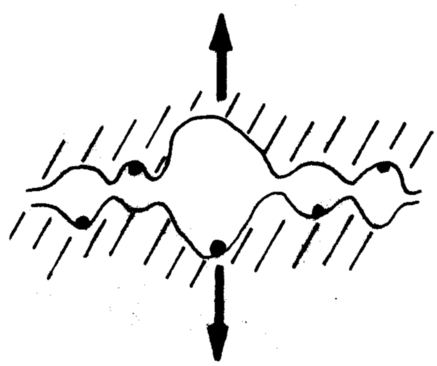


Şekil 2.6 Sünek malzemelerde küresel ikinci faz dolayısıyla kırılma mekanizması.

Şekil 2.6 'da izlenerek;

a) Bu durumda çatlak engel içinde oluşmaktadır. Bu rada engel önünde yığılan dislokasyonların oluşturduğu gerilme engeli çatlatmaktadır.

b) Matris ile engel arasındaki sınır yüzeyin zayıf olması dolayısıyla boşluk meydana geliyor.(empüritelerin segregasyonu bu olaya sebebiyet verebilir.) Bu şekilde oluşan boşluklar büyüyerek birbirleriyle birleşir ve neticede çatlak oluşur. Daha evvelce açıklandığı gibi kırık yüzeyi sünger biçiminde yani birçok boşluklarla dolu bir yüzey halinde kendini göstermektedir. Şekil 2.7



Şekil 2.7 Küresel (yuvarlak) sert fazlar dolayısıyla kırık yüzeyi oluşumu.

2.2.3. Çatlağın Yayılması.

Gevrek kırılma çok hızlı çatlak yayılması olmadıkça gerçekleşmez. Çatlak hızının analizi ile ilk uğraşan araş - tırmacılardan biriside Mott (4) dur. Çatlağın kararsız bir şekilde yayılması esnasında bırakılan elastik deformasyon enerjisi zorlanan kuvvettir. Bu kuvvet, oluşan yeni yüzeylerin yüzey enerjisi ve malzemenin hızla yer değişiminden ortaya çıkan kinetik enerji ile dengelenebilir.

Çatlak hızı;

$$V' = k_1 \cdot V_0 \cdot \left(1 - \frac{C_G}{a}\right) \qquad (2.12)$$

ile ifade edilir. Burada,

k_1 : sbt.

a : Gerçek çatlak uzunluğu.

v_0 : $\left(\frac{E}{\rho_y}\right)^{1/2}$ Malzemedeki ses hızı.

C_G : Griffith çatlak uzunluğu

Eğer $a > C_G$ ise $v' \approx k_1 \cdot v_0$ olur.

Düzlem-gerilme şartlarında $k_1 \approx 0{,}38$ bulunmuştur.

Tablo 1. Gevrek kırılma tipinde çatlak yayılma hızları.

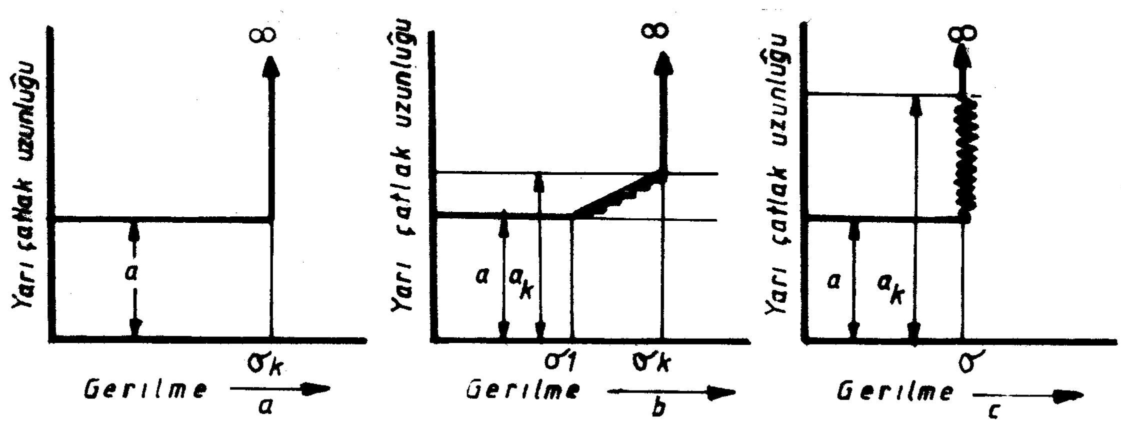
Malzeme	Gözlenen hızlar	v/v_0
Çelik	6,000 ft/s	0,36
Erimiş Quartz	7,200 "	0,42
Lityum Florid	6,500 "	0,31

Tablo 1 de deneysel çatlak hızı değerleri vardır. Sınırlı çatlak yayılma hızı;

$$V' = 0,38 . V_0 = 0,38 . (\frac{E}{\rho_y})^{1/2} \qquad (2.13)$$

formülü ile verilir.

yarı çatlak uzunluğu (a) olan bir mikro çatlağın kararsız yayılması üç şekilde olmaktadır.



Şekil 2.8 Çatlak büyümesinin üç şekli.

Şeklimizde;

a) Gittikçe artan gerilme altında çatlağın önce sbt. uzunlukta sonrada kararsız şekilde yayılması.

Dönüşüm sıcaklığının altında test edilen malzemeler de, tatbik edilen gerilme, kırılma gerilmesine eriştiğinde çatlak kararsız bir şekilde yayılarak kırılma meydana gelecektir.

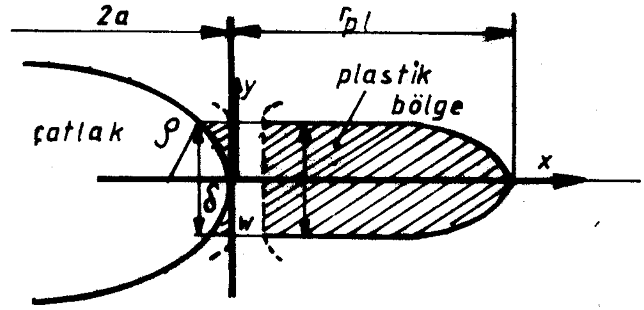
b) Gittikçe artan gerilme altında yavaş çatlak büyümesi. (Çatlağın kararlı yayılması)

Malzeme (a)şıkkındaki malzemeden daha az gevrek ise oluşan mikroçatlak kararsız bir şekilde yayılmaz.Çatlak bir seri boşluklarla oluşur, bu boşluklar plastik deformasyonla birleşirler. Çatlağın kararlı büyümesi (σ_1) de başlar, kritik uzunluğa ve kritik gerilmeye kadar büyümesini seri halde sıçramalarla sürdürür. (σ_k) kırılma gerilmesine eriştiği zaman kararsız bir şekilde yayılır. Dönüşüm sıcaklığının daha alt taraflarında kırılmayı sünek-lifli başlatıp kararlı büyüttükten sonra, kararsız bir tarzda gevrek-ayrılma düzlemli olarak oluşan kırılma şekilleri pek yaygındır.

c) Sabit gerilim altında yavaş çatlak büyümesi.

Metal malzemeler korozyona veya değişken yüklemelere karşı maruz kaldıklarında, bir zaman peryodu içinde sabit gerilmeler altında yavaş yavaş büyüyen çatlak yayılması meydana gelebilir.

Mühendislik malzemelerinde (a) şeklinde verilen çatlak yayılma tarzı, tam gevrek malzemeler için geçerlidir,ve analitik ifadeleri Lineer-Elastik kırılma mekaniğinde mevcuttur. (b) deki çatlak yayılma şekli ise çok önemlidir. Çatlak ucunda plastik bölge oluştuğundan, çatlak önce kademeli olarak büyür sonra ani yayılmaya başlar. Bu olay Elasto-Plastik kırılma mekaniğinde "Crack Opening Displacement" kısaca (COD) görüşü olarak açıklanır.



Şekil 2.9 Çatlak yayılmasinda COD modeli.

Yukarıdaki şeklimizi incelersek, çatlağın önünde (l) uzunluğunda (w) genişliğinde bir dizi minyatür çekme çubukları olduğunu varsayalımt Çubukların (l) boyu, çatlağın kök yarıçapı (ρ) ile ilgilidir, (w) genişliği ise, süneklilıği kontrol eden mikroyapısal faktörlerle ilişkisi vardır. Bu model de çatlağın büyümesi, komşu çubuk kırıldığı zaman başlıyacaktır. Çatlak ucuna yakın ilk çubuğun kırılmasını diğerleri izliyecektir. Bu olayda çubuklardan herbiri direkt olarak kırılmadığı zaman yavaş çatlak büyümesi meydana gelir. Çatlak yayılması esnasında gerilme düşmeye başladıysa çatlak kararsız şekilde yayılıyor demektir.

Kullanılan malzemenin kalınlığı biraz fazla ise,I nolu çatlak açılma mod'u (Şekil 2.10) ile zorlanıyorsa, çatlak ucundaki plastik deformasyon (δ), çatlak kök ucu çapı (2ρ) 'ndaki bir band ile sınırlanır.

Çubuk uzaması;

$$\delta = \mathcal{E} \cdot 1 = \mathcal{E} \cdot (2 \cdot \rho)$$

olur.

Kararsız çatlak yayılması, kritik değere eriştiğinde, çat - lak ucuna yakın çubuklardaki uzama (ε), numunenin çekme sü nekliliği (ε_f) ye eriştiğinde başlıyacaktır. Buna göre;

$$\delta_c = \varepsilon_f \cdot (2\rho)$$

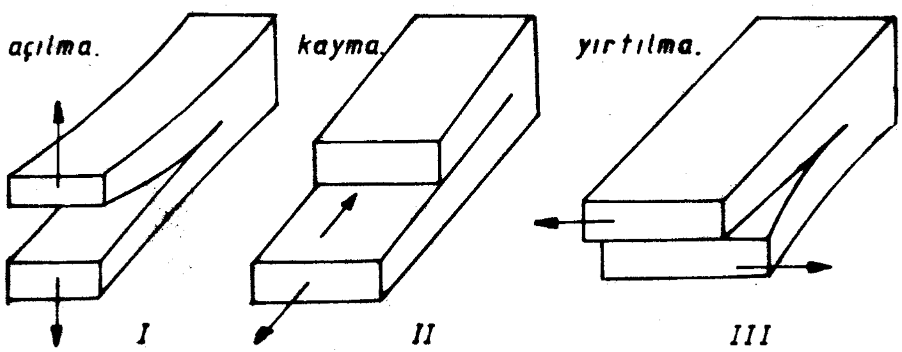
olur. Kullanılan malzemenin kalınlığı epey ince bir malzeme ise, aynı çatlak açılma mod'unda çatlak ucundaki deformas - yonlar, kalınlığın (B) bütünü içinde dağılırlar. O zaman;

$$\delta = \varepsilon \cdot 1 = \varepsilon \cdot B$$

olur. Kararsız çatlak yayılması, yine (ε), (ε_f) 'e eriştiği zaman olacaktır. Ve;

$$\delta_c = \varepsilon_f \cdot B$$

olur. Çatlak yüzeylerinin yerdeğişimleri ölçülenebiliyorsa bulunan değerin COD ile ilişkisi bulunabilir. O zaman dü- şük ve orta mukavemetteki malzemelerin kırılmaya karşı tok luk değerleri önceden bilinebilinir.



I. tip en çok görülen çatlak şeklidir. II. ve III. tipler çatlak yüzeylerinin birbirleri üzerinde kayması şeklindedir ve hareketleri vida ile kenar dislokasyonlarının hareketine benzemektedir.

Şekil 2.10 Çatlak açılma mod'ları.

Çatlağın yayılma hızında, Mott(4)'un ses hızı olarak verdiği, $V_o = \sqrt{\frac{E}{\rho_y}}$ değerinin, tek boyutlu ortamda boyuna dalga yayılma hızı olduğunu biliyoruz. Aynı olay kayma modülü ile ifade edilerek, $V_e = \sqrt{\frac{G_k}{\rho_y}}$ ile bu kez, tek boyutlu ortamda enine dalga yayılma hızı'nı ifade etmiş oluruz. Bu iki hız yönleri birbirine dik olup, çatlak açılması olayında etkili olmaktadırlar. Buradan 2.12 ve 2.13 denklemlerindeki (V') değeri ile uygun; (J.P.Berry(12))

$$V' = \sqrt{\frac{2\pi}{c'}}\sqrt{\frac{E}{\rho_y}} = \sqrt{\frac{G_k}{\rho_y}}\sqrt{\frac{4\pi(1-\nu^2)}{c'}} \qquad (2.14)$$

şeklinde çatlak yayılma hızı olarak belirlenecektir. Burada (G_k) kayma modülü, (E) elastisite modülü, (c') sbt. bir değer, (ρ_y) malzemenin yoğunluğu olarak verilmişlerdir. Bu iki hız değeri, bir çatlakta iki yüzey oluşturmak için gerekli iş ifadesi, $W' = 2.2.a.\gamma.B$ veya çatlağı oluşturmaya çalışan kuvvet, $G = (\sigma^2.\pi.a/E).(1-\nu^2)$ ile bağımlıdır ve neticede; (V_e hızı)

$$V' = 0{,}6 \, . \, V_e \cong 0{,}6 \, . \sqrt{\frac{G_k}{\rho_y}}$$

şeklinde verilmiştir. Dolayısıyla enine ve boyuna dalga yayılma hızları ile çatlak yayılma hızı arasında;

$$V' \cong 0{,}38 \, . \, V_o \cong 0{,}6 \, . \, V_e \qquad (2.15)$$

bağıntısı yazılabilir.

BÖLÜM 3

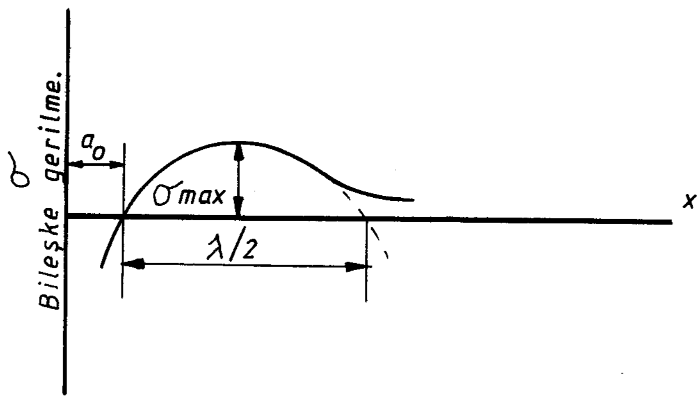
LİNEER-ELASTİK KIRILMA MEKANİĞİ

3.1 Giriş.

Malzemenin zorlanmasının yanlızca lineer-elastik sınırlar içerisinde gerçekleştiği ve plastik şekil değişimine karşı tamamen ilgisiz olduğu kabul edilir.

3.2 Lineer-Elastik Metallerde Teorik Mukavemet.

Metallerin dayanımını atomlar arası bağ kuvvetleri belirler. Aşağıdaki şeklimizde atomlar arası mesafenin bağ kuvvetine etkisi görülmektedir.



Şekil 3.1 Bileşke gerilmenin mesafeyle değişimi.

Malzeme çekme yüküne tabi tutulduğunda atomlar arası (x) mesafesi arttıkça, itici kuvvetler çekici kuvvetlere nazaran hızla düşer, aradaki fark çekme kuvveti ile karşılanır. (x) mesafesi arttıkça itici kuvvetler ihmal edilecek kadar azalır ve böylece şekildeki max. noktaya ulaşılır. Bu değer malzemenin teorik mukavemetidir. Bu eğriyi sinüs eğrisi haline çevirirsek;

$$\sigma = \sigma_{max} . \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \tag{3.1}$$

Ufak deformasyonlar için sin(x) = x alınabildiğinden;

$$\sigma = \sigma_{max} . \left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \tag{3.2}$$

Eğer malzeme Lineer-Elastik malzeme ise (gevrek malzeme, plastik deformasyon göstermiyor.)

$$\sigma = E . \varepsilon = \frac{E . x}{a_0} \tag{3.3}$$

Bu son iki denklemden;

$$\sigma_{max} = \frac{\lambda}{2\pi} . \frac{E}{a_0} \tag{3.4}$$

elde edilir. Malzeme gevrek olduğu için kuvvetin yapacağı iş çatlak oluşturmak, yani 2 yüzey oluşturmaktır. Bu yüzeylerin birim alanının sahip olduğu enerjiye yüzey enerjisi (γ) denir. O halde malzemeyi kırmak için yapılan iş şeklimizdeki alana eşittir;

$$U_0 = \int_0^{\lambda/2} \sigma_{max} . \sin \frac{2\pi x}{\lambda} dx = \frac{\lambda . \sigma_{max}}{\pi} \tag{3.5}$$

Bu enerji birim yüzey için hesaplanmış olduğundan, birim yü zeyin yüzey enerjisine (γ) eşittir.

$$\frac{\lambda . \sigma_{max}}{\pi} = 2\gamma \qquad (3.6)$$

veya;

$$\lambda = \frac{2.\pi.\gamma}{\sigma_{max}} \qquad (3.7)$$

Bu (3.7) ve (3.4) nolu denklemlerden;

$$\sigma_{max} = \left(\frac{E.\gamma}{a_o} \right)^{1/2} \qquad (3.8)$$

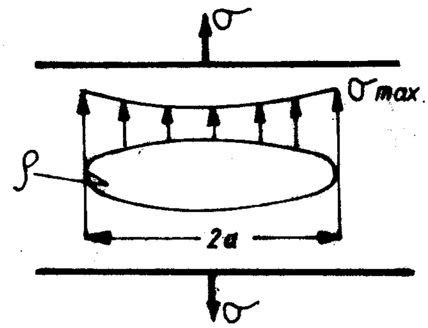
elde edilir. Bağıntıdaki parametrelerin değerlerini yerine koyarsak (çelik için);

E : $2,1 \cdot 10^6$ kp/cm^2

a_o : $2,5 \cdot 10^{-8}$ cm

γ : 10^{-3} kp.cm/cm^2

$\sigma_{max} = 2,7 \cdot 10^5$ kp/cm^2 bulunur. Veya elastik modül cinsinden $\sigma_{max} \approx E/7$ elde edilir. Daha hassas yapılan hesaplamalar neticesinde σ_{max}, $E/4 \div E/15$ arasında değişir. Ortalama olarak E/10 alınabilir. Halbuki deneysel neticeler bu değerden 10, 1000 misli daha düşüktür. Sadece içerisinde kusur bulundurmayan Whiskers kristali bu neticeye yaklaşır. Lineer-Elastik (gevrek) malzemelerde dislokasyonlar hareketsiz olduğundan (plastik deformasyon yok) mukavemetin düşmesine, malzeme içindeki çatlakların, yarıkların sebep olduğu neticesine varılabilir. Çünki çatlak civarındaki gerilmeler, bilindiği gibi, diğer bölgelere kıyasla çatlağın şekline göre daha fazla olmaktadır.



Şekil 3.2 Eliptik Çatlak.

Yukarıdaki şeklimizde, sonsuz geniş bir levhadaki 2a boyundaki eliptik çatlak'ta, çatlak ucunun eğrilik yarı çapı ρ olsun. Çatlak ucundaki max. gerilme;

$$\sigma_{max} = \sigma \left[1 + 2 \left(\frac{a}{\rho} \right)^{1/2} \right] \cong 2\sigma \left(\frac{a}{\rho} \right)^{1/2} \qquad (3.9)$$

Denklemdende görüleceği gibi σmax. ρ ufaldıkça σ ya göre dahada büyüyecektir. Yani σ henüz küçük değerlerde iken σmax. teorik değere ulaşabilecektir. σ gerilmesine kırılma gerilmesi σ_k diyecek olursak (çünkü malzeme kırıldığında elde ettiğimiz makro gerilme değeri bu gerilmedir.) (3.8) ve (3.9) nolu denklemlerimizden;

$$\sigma_k \cong \left(\frac{E.\gamma.\rho}{a.4.a_0} \right)^{1/2} \qquad (3.10)$$

elde edilir. En keskin çatlak ucu eğrilik yarı çapı olarak $\rho \cong a_0$ yazabiliriz. O halde;

$$\sigma_k \cong \left(\frac{E.\gamma}{4.a} \right)^{1/2} \qquad (3.11)$$

olur.

Denklemde;

E : $2{,}1 \cdot 10^6$ kp/cm^2

γ : 10^3 kp.cm/cm^2

a_o : $2{,}5 \cdot 10^{-8}$ cm

ve çatlak uzunluğunu;

a : $10^4 \cdot a_o$: $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ cm

olarak kabul edersek;

$$\sigma k = (1{,}45 \cdot 10^3\ kp/cm^2) = \frac{E}{1450} \qquad (3.12)$$

bulunur. Görüldüğü gibi gevrek malzemelerde çok küçük bir çatlak malzemenin mukavemetini çok fazla düşürmektedir.

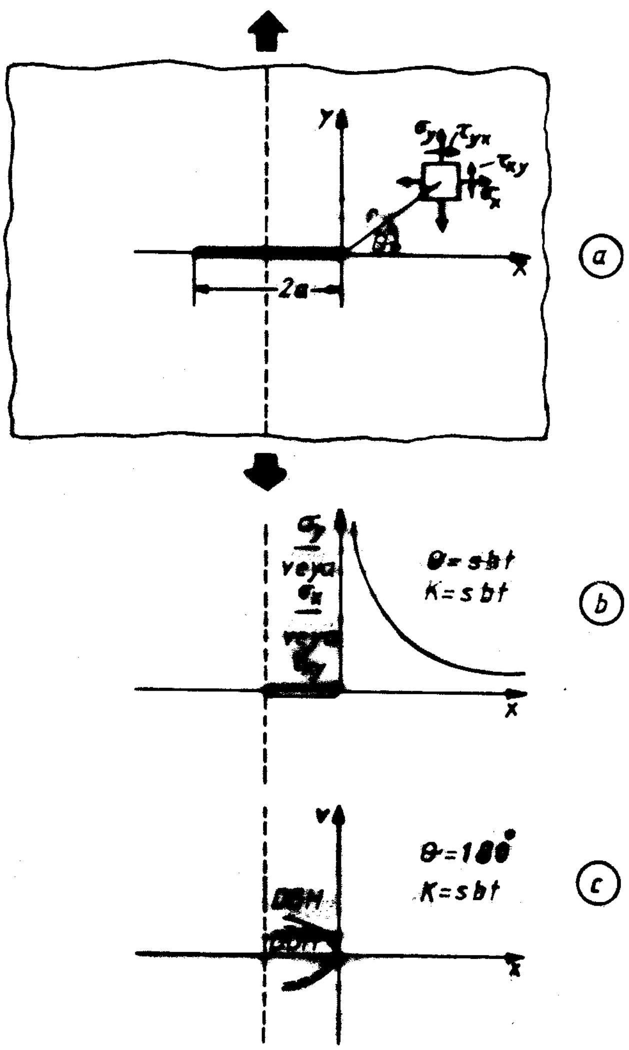
3.3 Düzlem Deformasyon-Düzlem Gerilme

Kalınlığı fazla olan malzemelerde düzlemsel defor - masyona uğrayan bölgeler fazla olacaktır. Bu halde çatlak u cundaki gerilmelerin yüzeye gidildikçe azalacağı ve tam yüzeyde ise sıfır olacağı kabul edilmektedir. Dolayısıyla kalınlık yönündeki deformasyonun sıfır olduğu belirlenmiş ve bu durumda malzemedeki kırılma olayının "Gevrek kırılma - şeklinde" oluşacağı gözlenmiştir. Tüm bu halleri içeren duruma "Düzlem deformasyon hali" adı verilmektedir.

Kalınlığı ince numunelerde ise çatlak civarındaki plastik bölge düzlem gerilme halinin ağır basması sebebiyle daha büyüyecek ve kırılma plastik deformasyon yüzünden en - gellenecektir. İnce levhaların düzlemsel yüklenmelerinde ka lınlık istikametindeki gerilmelerin ihmal edilecek kadar kü çük olduğuda kabul edilmektedir. Malzemedeki kırılma olayının ise "Plastik deformasyon sonucu" olacağı, gözlemlerle tespit edilmiştir. Bu açıklamaları içeren durumada "Düzlem gerilme hali" adı verilir.

3.4 Lineer-Elastik Malzemelerde Çatlak Ucundaki Gerilim Dağılımı ve Gerilme Şiddeti Faktörü.

Lineer-elastik malzemede zorlanmanın plastik şekil değişiminden bağımsız olduğu kabul edilir.



Şekil 3.3 Çatlak ucundaki gerilmeler.

Şeklimizde (B) kalınlığında, sonsuz genişlikteki bir yüzey içerisinde (2a) uzunluğunda çatlak mevcut. Çatlak ucu eğrilik yarıçapı sıfır kabul edilmiştir. (x) ve (y) koordinat eksenlerinde çatlak ucundan (θ) açısı ile (r) kadar uzaklıktaki bir noktada gerilme dağılımını düşünelim. Numunenin kalınlığı, çatlak ucunun durumu ve (r) mesafesi, çatlak ucundaki çok eksenli gerilmelerin değişimiyle yakından ilgilidir. Polar koordinatlarda çatlak ucundan (θ) açısıyla (r) kadar uzaklıktaki mesafeyle gösterilen noktada, r' nin;

$$0 < r \leq a$$

değerlerinde, noktadaki gerilme bileşenleri,

<u>DDH</u> için;

$$\sigma_x = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \, Cos\frac{\theta}{2}\left[1 - Sin\frac{\theta}{2}\, Sin\frac{3\theta}{2}\right] \qquad (3.13)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \, Cos\frac{\theta}{2}\left[1 + Sin\frac{\theta}{2}\, Sin\frac{3\theta}{2}\right] \qquad (3.14)$$

$$\sigma_z = V\left[\sigma_x + \sigma_y\right] \qquad (3.15)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \, Cos\frac{\theta}{2}\, Sin\frac{\theta}{2}\, Cos\frac{3\theta}{2} \qquad (3.16)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \qquad (3.17)$$

DGH için;

$$\sigma_x = DDH \quad gibi. \tag{3.18}$$

$$\sigma_y = DDH \quad gibi. \tag{3.19}$$

$$\sigma_z = 0 \tag{3.20}$$

$$\tau_{xy} = DDH \quad gibi. \tag{3.21}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \tag{3.22}$$

Formüllerdeki (ν) enine uzama sayısı' dır.

Çatlak ucu gerilme bileşenlerinin tümü ile bağıntılıdır. Gerilme bileşenlerinin incelenmesi sonucunda, (r) ve (O) dan bağımsız bir büyüklük olan;

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \tag{3.23}$$

(K) nın birimi ($kp.mm^{-3/2}$) dir,

ve "Kırılma şiddeti faktörü" olarak veya kısaca;

"Kırılma şiddeti" olarak tanınır.

Çatlak ucundaki gerilme dağılımlarını şekil 3.3 (b) ve (c) de görmekteyiz. (xz) düzleminde ($x > 0$) veyahut ($r > \theta$) ile ($\theta = 0^{o}$) için $\tau_{xy} = 0$ dır. σ_x ve σ_y gerilmeleri şekil 3.3 (a) dan; $\sigma_x = \sigma_y = \sigma \left(\frac{a}{2 \cdot r}\right)^{1/2}$ olduğu görülür. Çekme gerilmelerinin tesiri altında (U) ve (V) yer değişim (deformasyon) değerleri, çatlak ucunun (x) ve (y) doğrultusu üzerinde;

DDH

$$V = \frac{K(1+\nu)}{E}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left(\sin\frac{\theta}{2}\left[4-4\nu-2\cos^{2}\frac{\theta}{2}\right]\right) \tag{3.24}$$

$$U = \frac{K(1+\nu)}{E}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left(\cos\frac{\theta}{2}\left[2-4\nu+2\sin^{2}\frac{\theta}{2}\right]\right) \tag{3.25}$$

DGH

$$V = \frac{K(1+\nu)}{E}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left(\sin\frac{\theta}{2}\left[\frac{3-\nu}{1+\nu}+1-2\cos^{2}\frac{\theta}{2}\right]\right) \tag{3.26}$$

$$U = \frac{K(1+\nu)}{E}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\left(\cos\frac{\theta}{2}\left[\frac{3-\nu}{1+\nu}-1+2\sin^{2}\frac{\theta}{2}\right]\right) \tag{3.27}$$

olarak verilirler. Formüllerde;

E : Elastiklik modülü.

θ : $\pm\pi$ için,

U : 0

ve çatlak ucu yer değişiminin (y) doğrultusundaki hesabında ise;

DDH

$$V(r) = \frac{K}{E}(1-\nu^2)\sqrt{\frac{8r}{\pi}} \tag{3.28}$$

DGH

$$V(r) = \frac{K}{E}\sqrt{\frac{8r}{\pi}} \tag{3.29}$$

Eğer $(r \ll a)$ ise, şekil 3.3 (c) de görüldüğü gibi çatlak açıklığı (V), Kırılma şiddeti faktörü (K) ile parabolik orantılıdır.

Numune kalınlığı B, gerilme σ ve Elastik enerji Uel ile gösterilirse, gerilme tesiriyle numunede (2a) uzunluğun da bir çatlak oluşacaktır. Bu;

DDH

$$Uel = \frac{\pi \sigma^2 a^2}{E}(1-\nu^2)B \tag{3.30}$$

DGH

$$Uel = \frac{\pi \sigma^2 a^2}{E} B \tag{3.31}$$

Bu şekilde serbest kalan enerji ifade edilmiş olacaktır.

Deney numuneleri boyutlarını belirli ölçüler kabul ederek şekil 3.3 'e uyarak (2a) uzunluğundaki çatlak tipi için Kı rılma şiddeti faktörünü bulmaya çalıştık. Oysa değişik çat lak tipleriylede karşılaşmak mümkündür. Bu durumda (şimdi-ye kadar incelenen esaslar dahilinde olması şartıyla) Kı - rılma ve deformasyon aynı (3.24 ve 3.28 denklemleri gibi) olacak şekilde alınarak, bu olayı yaratan gerilme değeri i çin gerekli gerilme bileşenlerinin çatlağı oluşturmak için (r) ve (θ) arasında geometrik bağımlılıklar kurulup, yeni bağıntılar çıkarılır. Denklem 3.13 den 3.17 ye kadar olan durumlar ve denklem 3.24 den 3.29 a kadar olan durumlar e-ğer yanlızca denklem 3.23 ifadesine göre açıklanacak olur-sa, neticede bulunacak (K) Kırılma şiddeti faktörünün son-lu büyüklükteki malzemelere ve diğer başka çatlak geometri lerinede uyabilmesi gerekir. (Eğer herhangi bir çatlak şek li ve parça geometrisi için (K) bulunursa, daha evvelce el de edilmiş bağıntılarda kullanılabilir.)

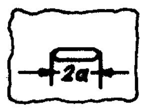
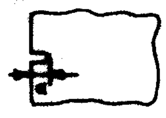
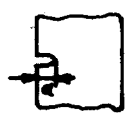
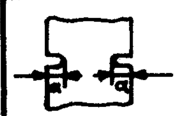
Buna göre, değişik çatlak tiplerinide ihtiva eden;

$$K = \sigma \sqrt{a}\, Y \qquad (3.32)$$

ifadesi yazılacaktır. Burada (K) faktörü, tatbik edilen yük malzeme ve çatlak geometrisine bağımlı bir değerdir. Formül deki (Y) ifadesi ise, çatlak tiplerinin durumuna göre ve - çatlak geometrisine bağımlı bir düzeltme katsayısı olarak - belirlenir.

Aşağıdaki şekilde değişik çatlak tipleri için Kırılma şiddeti faktörü (K) değerleri verilmiştir.

Yazan bölümünde parantez içindeki rakamlar[1]nolu kaynakta verilmiştir.

TİP	ÇATLAK DÜZENLEME ŞEKLİ	GERİLME ŞİDDETİ FAKTÖRÜ (K)	$Y/\sqrt{\pi}$	YAZAN
Sonsuz genişlikteki levhada çatlak		$K = \sigma_n \sqrt{\pi a}$	1	
Sonlu sınırlanmış levhadaki çatlak		$K = \sigma_n \sqrt{\pi a}\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\, tg\, \frac{\pi a}{2W}}$ $K = \sigma_n \sqrt{\pi a}\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\, tg\, \frac{\pi a}{2W}}\; f\left(\frac{a}{W}\right)$	$\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\, tg\, \frac{\pi a}{2W}}$ $\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\, tg\, \frac{\pi a}{2W}}\; f\left(\frac{a}{W}\right)$	(10) (11)
Sonsuz genişlikteki levhada kenar çatlağı		$K = 1{,}12\, \sigma_n \sqrt{\pi a}$	1,12	(12)
Sonlu sınırlanmış levhada kenar çatlağı		$K = \sigma_n \sqrt{\pi a}\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\, tg\, \frac{\pi a}{2W}}\; g\left(\frac{a}{W}\right)$ $K = 1{,}1\sigma_n \sqrt{\pi a}$	$\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\, tg\, \frac{\pi a}{2W}}\; g\left(\frac{a}{W}\right)$ 1,1	(13) (14) (8)
Sonlu sınırlanmış levhada kenar çatlakları		$K = \sigma \sqrt{\pi a}\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\, tg\, \frac{\pi a}{2W}}\; g\left(\frac{a}{W}\right)$ $K = \sigma \sqrt{\pi a}\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\left(tg\, \frac{\pi a}{2W}\; 0{,}1 \sin \frac{\pi a}{W}\right)}$	$\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\, tg\, \frac{\pi a}{2W}}\; g\left(\frac{a}{W}\right)$ $\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\left(tg\, \frac{\pi a}{2W}\; 0{,}1 \sin \frac{\pi a}{W}\right)}$	(15) (8)

Şekil 3.4 Değişik çatlak tipleri için (K) değerleri.

Şekil 3.4 'te görülen değişik çatlak tipleri için verilen (K) değerlerine bağımlı olarak değişim gösteren $(Y/\sqrt{\pi})$ değerleride verilmiştir. Bu;

$$\frac{Y}{\sqrt{\pi}} = \sqrt{\frac{2W}{\pi a} \, tg \, \frac{\pi a}{2W}} \qquad (3.33)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Formülde (a) yarım çatlak uzunluğu, (W) numune genişliği olarak verilip, bunların değişimleriyle $(Y/\sqrt{\pi})$ değerleride değişiklik gösterecektir. Malzemedeki çatlağın incelenmesi ve durumuyla ilgili karar verilmesine yardımcı olması açısından $(Y/\sqrt{\pi})$ ifadesi önemlidir. Buradan, (Y) fonksiyonu (a) ve (W) 'ye bağımlı olarak yaklaşık hesaplamayla,

$$Y = C_1 + C_2 \left(\frac{a}{W}\right) + C_3 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + C_4 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + \ldots\ldots \qquad (3.34)$$

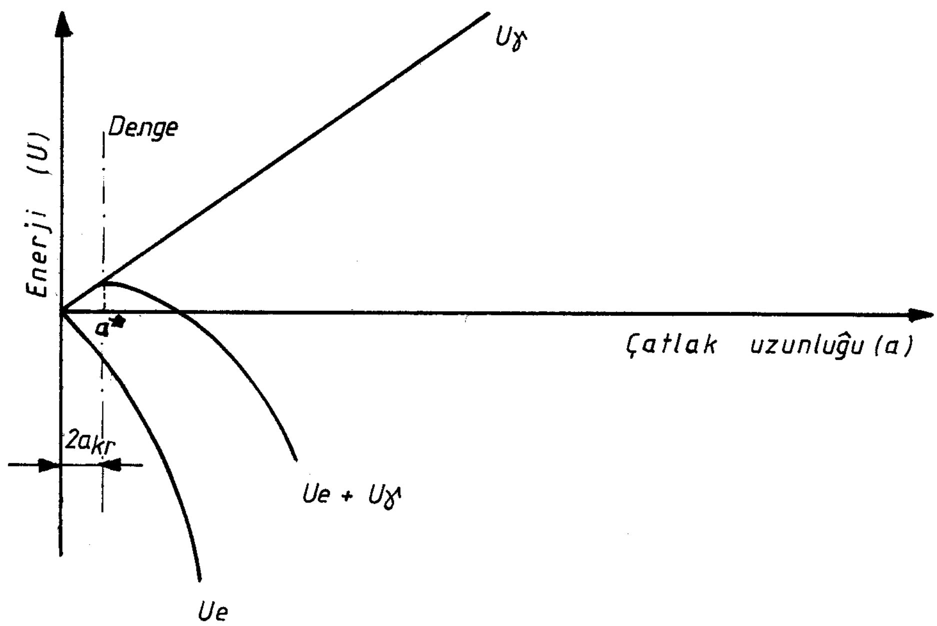
şeklini alacaktır. Bulunan bu değer, tecrübeler ile sıhhatli olmıyan ölçümler neticesinde tespit edilmiştir.

3.5 Griffith Teorisi (1)

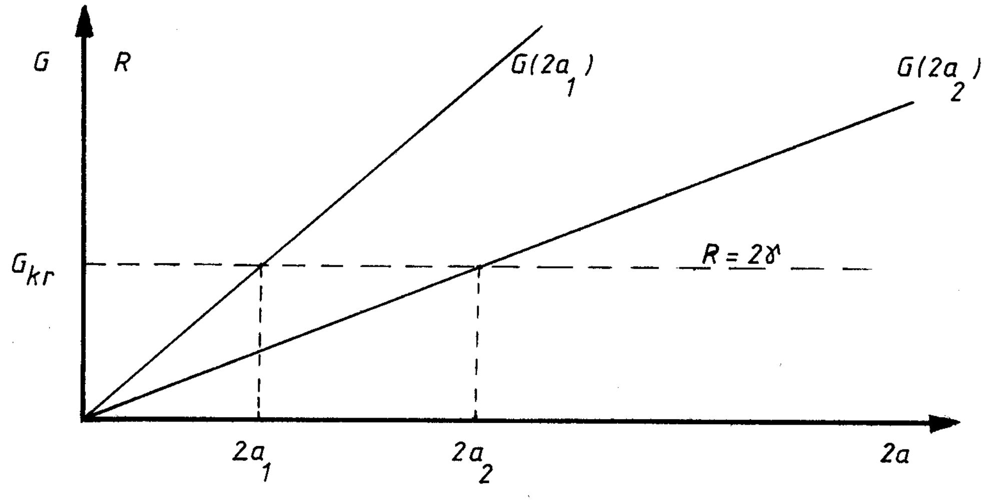
Griffith'e göre lineer-elastik bir malzeme yoğun ince çatlaklar ihtiva etmekte ve bunlar çatlak uçlarında yeterli büyüklükte gerilme yığılmalarına neden olmaktadır. Bu durumda, çatlak ucundaki gerilmeler (σ_{max}) teorik mukavemete çabucak erişirler ve lokal olarak çatlak yayılmaları başlar. Yayılan çatlağın yüzey enerjisinde artma meydana gelir. Artan bu enerjinin kaynağı, çatlak yayılırken bırakılan elastik deformasyon enerjisidir. Griffith bir çatlağın yayılmaya başladığı anı; "Elastik deformasyon enerjisindeki azalma, yeni çatlak yüzeyi oluşturmak için gereken enerjiye eşit olduğu anda yayılmaya başlıyacaktır" şeklinde ifade etmiştir.

Çatlak oluşumu ve yayılması esnasında enerji dönüşümleri olmaktadır. Griffith'in ifadelerinde'de görüleceği gibi yük tatbiki malzemede bir iş yapar. Yük tatbiki ile malzemede depolanan enerji (U_e) olsun. Çatlağın büyüyebilmesi için bırakılan elastik deformasyon enerjisinin bir neticesi olarak enerji girişinin olması şarttır. Bu enerji çatlağın baş tarafındaki, daha sonra ve ondan sonra devam edecek olan atom bağlarını kırmak için gerekli enerji demektir. Bu enerjiye yüzey enerjisi adı verilir ve (U_γ) olarak gösterilir. Herbir çatlak uzunluğuna karşılık gelen ve birbirine dönüşen bu iki enerji toplanabilir. Şekil 3.5 dende görüldüğü gibi yüzey enerjisi (U_γ) çatlak boyu ile lineer artar ve sistemin giriş enerjisi olduğundan pozitif (+) değerdedir.

Elastik deformasyon enerjisi ise yeni çatlak yüzeyi oluştur mada enerji salıverilmesinden dolayı negativ (–) değerdedir. Sistemin toplam enerjisinde çatlak uzunluğu (a) $0 < a < a^*$ arasında olduğunda sisteme enerji verilir ve çatlak kararlı bir şekilde büyür, $a = a^*$ ise çatlağın kararlı büyümesi sona erer, $a > a^*$ ise çatlak kararsız bir şekilde büyür ve sistemin enerjisi bırakılır.



Şekil 3.5 Çatlak uzunluğu ile enerji değişimi.



Şekil 3.6 Ideal lineer-elastik (gevrek) malzemede (G R) bağıntısı.

Son şeklimiz 3.6 da G ile R arasındaki bağıntıyı şekil 3.5 dende yararlanarak gösterebiliriz. Başlangıçta $2a < 2a_1$ büyüklüğünde çatlağa sahip malzemede çatlağın büyümesine karşı koyan enerji (R);

$$R = \frac{1}{B} \frac{d(U\ )}{d(2a)} = 2\gamma$$

formülümüzden şekil 3.5 e göre sabit ve 2γ ya eşittir. Bu $2a_1$ çatlak boyu kritik boy olsun, ayrıca $F =$ sbt. ise bu durumda; (çatlağı büyütmeye çalışan enerji (G))

$$G = \frac{1}{B} \frac{d(Ue)}{d(2a)} = \frac{\pi a \sigma^2}{E^*} = \frac{\pi a \sigma^2}{E} (1-\nu^2)$$

ise (G) değeri çatlağın büyümesi ile lineer artacaktır.(serbest kalan enerji). Çatlak $2a_1$ olunca $G=R$ olacağından malzeme kırılacaktır.

Malzemenin başlangıç çatlağı daha büyük olsun ($a < a_2$ ve a_2 kritik çatlak boyu) yine $G = R$ olunca kırılma meydana gelecektir. Görüldüğü gibi gevrek malzemelerde G_{kr} hiç bir zaman çatlak boyuna bağlı değildir. (Burada DGH'de $E^* = E$ ile DDH'de $E^* = E/(1-\nu^2)$ ve ν poisson oranıdır)

3.5.1 Enerji Dönüşümleri.

Yukarıdaki açıklamasını yapmaya çalıştığımız tüm olayların analitik ifadelerini çıkarmak için aşağıdaki şekil 3.7 de görülen yüzeye σ gerilmesi tesiri sonucu çatlak oluşacaktır. Çatlak oluşması için ise bir (W') işi yapılmış olacaktır. Eğer cisim içerisindeki çatlak büyümesi statik durumdan dinamik hale geçerse bu durumda sistemde diğer enerjiler yanında ($\mathcal{K}$) ile gösterilen bir kinetik enerji hasıl olacaktır. Sistemde çatlak önündeki bölgede etkili olan;

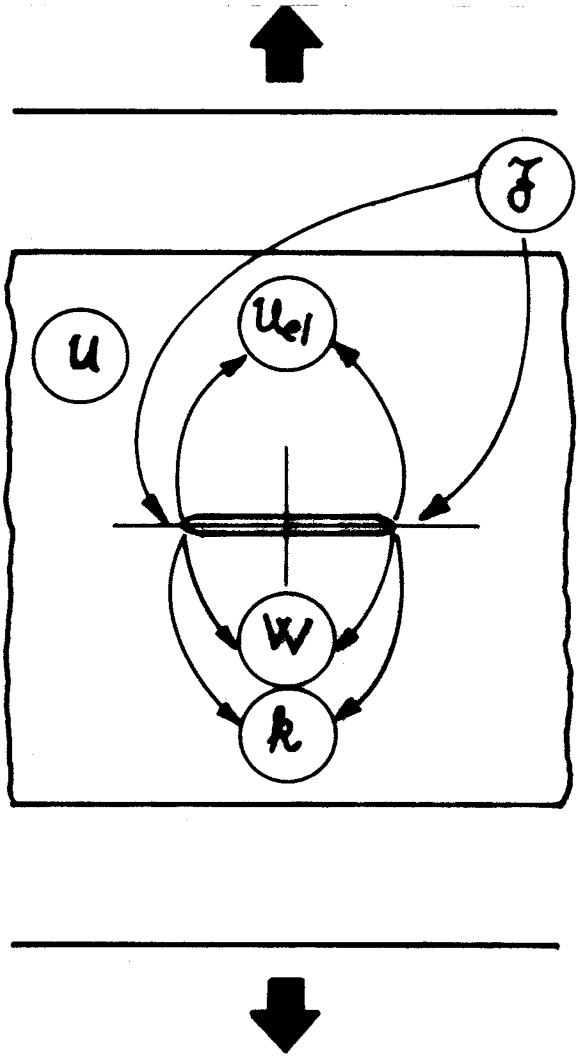
U_{el} Kuvvetin çatlağın büyümesi için harcıyacağı elastik enerji.

$\mathcal{F}$ Çatlak oluşması için dışarıdan sevkedilen enerji.

U'_{el} Çatlak oluşumu esnasında cisme uygulanan kuvvet neticesinde serbest olarak açığa çıkan enerji.

şeklindeki tesirler mevcuttur.

Sistemin herhangi bir andaki tüm enerjisi için geçerli ifadeye φ dersek;



Şekil 3.7 Çatlak oluşum anında enerji dönüşümleri.

$$\varphi = U_{el} + \mathcal{F} - U'_{el} \qquad (3.35)$$

yazılacaktır. φ ifadesindeki U_{el} ile φ aynı taraf ta yazılırsa;

$$U_{el} - \varphi = U_{el} - (U_{el} + \mathcal{J} - U_{el})$$

$$U_{el} - \varphi = -\mathcal{J} + U_{el}$$

olacaktır. İfadeyi;

$$\varphi = (-W' + U_{el}) + U\gamma \qquad (3.36)$$

şeklindede yazabiliriz. Burada $(-W' + U_{el})$ mekanik enerji şek linde tanımlanır ve çatlağın büyümesini sağlıyan enerjidir. $(U\gamma)$ ise çatlağın büyümesini engelleyen enerjiyi ifade et - mektedir. Buna kuvvetin çatlağın büyümesi için harcaması ge reken yüzey enerjisi diyoruz. İş olarak tanımladığımız (W')i le kararsız çatlak halinde (k) nında sistemdeki enerjiye i lave edilmesi gerektiğini belirtmiştik, bu durumda;

$$-\mathcal{J} + U_{el} = W' + k$$

olacaktır. (k) ifadesi yanlız bırakılırsa, kinetik enerji;

$$k = U_{el} - \mathcal{J} - W' \qquad (3.37)$$

şeklinde yazılabilir. Bu sonuca göre çatlakta yapılan ince- lemede kararsız çatlak yayılımı kinetik enerji ifadesine'de bağımlıdır denilebilir. Buradan kinetik enerji ifadesiyle kararlılık tespitinin yapılabileceğini'de belirtmek gerekli dir. (k) nın $(+)$, (0), $(-)$ olduğu her durumda bu ifade (Enerji ifadelerinin çatlak uzunluğuna (a'ya) göre birinci türevleri alınarak)

$$\frac{d\mathcal{L}}{d(2a)} = \frac{d(U'el)}{d(2a)} - \frac{dW'}{d(2a)} - \frac{d\mathcal{T}}{d(2a)} \gtreqless 0 \qquad (3.38)$$

veya;

$$\frac{d(U'el)}{d(2a)} \gtreqless \frac{dW'}{d(2a)} - \frac{d\mathcal{T}}{d(2a)} \qquad (3.39)$$

ile enerji bırakma hızlarını verecektir. Böylece çatlak büyümesi, ilerlemesi olayında dışarıdan verilen enerji dışındaki etkilerin tesirsiz olduğunuda söyliyebiliriz.

$$\frac{d\mathcal{T}}{d(2a)} = 0 \qquad (3.40)$$

Denge hali;

$$\frac{d\varphi}{d(2a)} = 0 \qquad (3.41)$$

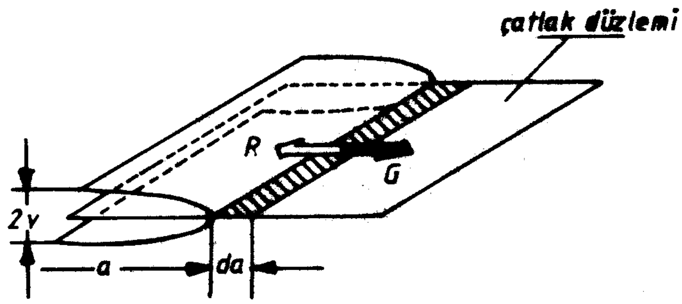
olacaktır. Kararsız haldeki çatlak yayılması için ifademiz;

$$\frac{d(U'el)}{d(2a)} \geq \frac{dW'}{d(2a)} \qquad (3.42)$$

veya;

$$\frac{d(U'el)}{d(2a)} - \frac{dW'}{d(2a)} = \frac{d(U'el - W')}{d(2a)} \geq 0 \qquad (3.43)$$

Bu ifade edilen hal numune boyut ve geometrisinden bağımsız dır. Serbest olarak açığa çıkan elastik enerji (U'el) çatlağın açılmasına yardımcı olacaktır.



Şekil 3.8 Çatlağı oluşturmaya çalışan (G) ve çatlağın oluşmasına karşı koyan (R) kuvvet lerinin çatlaktaki görünümü.

Yukarıdaki açıklamalardan ve şekil 3.8 den çatlağı oluşturmaya çalışan (G) ve çatlak oluşmasına karşı koyan (R) kuv - vetleri, çatlak uzunluğu ve numune genişliği (B) yede bağlı olarak;

$$G = \frac{1}{B} \; \frac{d(U'el)}{d(2a)} \tag{3.44}$$

ve,

$$R = \frac{1}{B} \; \frac{dW'}{d(2a)} \tag{3.45}$$

şeklinde yazılırlar. Şekil 3.8 'in incelenmesinde, bölüm 3.5 'de (G) ve (R) arasındaki ilişkinin anlatılması ile bir çatlağın oluşması ve büyüyüp yayılması hakkındaki açıklamalar ve denklem 3.43 ifadesine uyarak kısaca;

(a) $G < R$ ve $a < a^{*} \longrightarrow$ Kararlı çatlak büyümesi.

(b) $G = R$ ve $a = a^{*} \longrightarrow$ Denge hali. $(\frac{d\varphi}{da} = 0)$

(c) $G > R$ ve $a > a^{*} \longrightarrow$ Kararsız çatlak yayılması.

şeklinde olayların gerçekleşeceği gözlenir. (3.46)

Numunedeki br. mm^2 lik bir kısımda çatlak kenar yüzeyi oluşturmak için gerekli olan enerjiye, üst yüzey enerjisi diyoruz ve (γ) ile gösteriyoruz. Mekanik enerji çatlağı büyütmeye çalışırken (γ) çatlak açılmasını engellemeye çalışacak ve çatlak geometrisine bağımlı olmak şartıyla (Mekanik enerjideki azalma yüzey enerjisindeki artmaya eşittir)

$$W' = U_{el} = 2.2.a.\gamma.B \tag{3.47}$$

yazılır. Denklem 3.30 ve 3.31 deki ($U'el$) ifadeleri ve denklem 3.43 ile 3.46 halleri dikkate alınıp, çatlağı oluşturmaya çalışan kuvvet (G), numune geometrisi ile bağımlı olarak;

DDH

$$\frac{d}{d(2a)}\left[\frac{\pi\sigma^2 a^2}{E}(1-\nu^2)\,B - 4a\gamma B\right]\frac{1}{B} = G - R \geqslant 0 \tag{3.48}$$

Çatlak oluşturma kuvveti;

$$G = \frac{\sigma^2 \pi a}{E}(1-\nu^2) \tag{3.49}$$

veya denklem 3.32 ye uygun olarak;

$$G = \frac{K^2}{E}(1-\nu^2) \tag{3.50}$$

DGH

$$\frac{d}{d(2a)}\left[\frac{\pi\sigma^2 a^2}{E}\,B - 4a\gamma B\right]\frac{1}{B} = G - R \geqslant 0 \tag{3.51}$$

Buradan;

$$G = \frac{\sigma^2 \pi a}{E} \qquad (3.51)$$

veyahut;

$$G = \frac{K^2}{E} \qquad (3.52)$$

Diğer taraftan birim çatlak boyunun büyümesini engelleyen enerji (R);

$$R = 2\gamma \qquad (3.53)$$

olur. Buradan denklem 3.32 dikkate alınarak, kırılma şiddeti faktörü;

<u>DDH</u>

$$\sigma \geq \sqrt{\frac{2.\gamma.E}{\pi.a.(1-\nu^2)}} \qquad (3.54)$$

$$K \geq \sqrt{\frac{2.\gamma.E}{(1 - \nu^2)}} \qquad (3.55)$$

DGH

$$\sigma \geqslant \sqrt{\frac{2.\gamma.E}{\pi.a}} \qquad (3.56)$$

$$K \geqslant \sqrt{2.\gamma.E} \qquad (3.57)$$

Durum 3.28 ve 3.29 incelendiğinde nihai olarak çatlak kenarı oluşabilmesi için denklem 3.54 den 3.57 ye kadar olan ifadeler yardımıyla, kararsız çatlak açılması durumlarında yer değişim kriteri (V(r)) değeri;

DDH

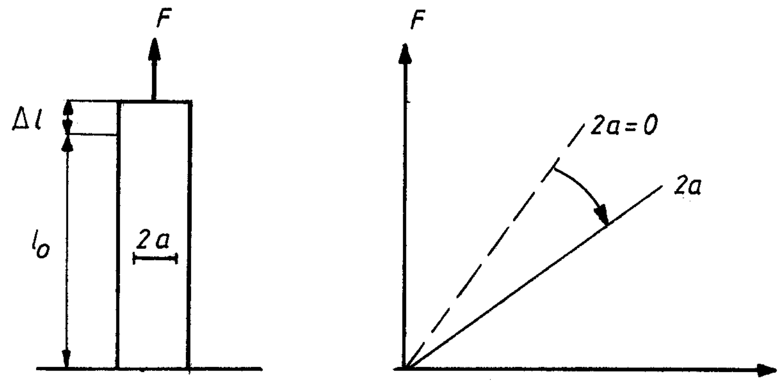
$$V(r) \geqslant 4\sqrt{\frac{r.\gamma.(1-\nu^2)}{\pi . E}} \qquad (3.58)$$

DGH

$$V(r) \geqslant 4\sqrt{\frac{r.\gamma}{\pi . E}} \qquad (3.59)$$

olarak gösterilirler. Tüm bu 3.48 ve 3.51 ile 3.54 den 3.59 a kadar olan ifadeler birbirleriyle bağıntılıdırlar ve 3.48 ile 3.51 ifadesi ise "Griffith gerilme kriteri" olarak bilinmektedir.

3.5.2 (2a) Uzunluğunda çatlağa sahip bir malzemede enerji dağılımının incelenmesi.



Şekil 3.9 Çatlaklı malzemede F-Δl değişimi.

Şekil 3.9 da görüldüğü gibi, çatlak uzunluğu (2a) olan bir malzemede (F) kuvveti ile bir zorlanma olsun, bu durumda (F) kuvveti ile (Δl) arasında;

$$\Delta l = F \cdot c \tag{3.60}$$

bağıntısını yazmak mümkündür. Formülde (c) (compliance) esneklik, (Δl) uzama'dır. (c) değeri;

$$c = f(\, l_0, A_0, E, 2a \,) \tag{3.61}$$

ile bağıntılıdır. Şekil 3.9 dan'da görüldüğü gibi (c), çatlak boyu arttıkça büyüyecektir.Çatlağın büyümediğini kabul edersek (2a=0),(F) kuvveti altında harcanan enerji veya malzemenin elastik şekil değişim enerjisi şekil 3.11 da taralı yüzeyden yararlanarak;

$$U_{el} = \int_0^l F.d(\Delta l) = \frac{1}{2} F.\Delta l = \frac{1}{2} F^2.c = \frac{1}{2} \frac{(\Delta l)^2}{c} \qquad (3.62)$$

olur. Bu bağıntı çatlağın büyümediği sürece geçerlidir. Eğer çatlak büyürse (c) değişeceğinden;

$$d(\Delta l) = F.dc + c.dF \qquad (3.63)$$

olur. $d(2a) > 0$ için hem $d(\Delta l) > 0$ hemde kuvvet düşeceğinden $dF < 0$ ve daima $dc > 0$ olacaktır.

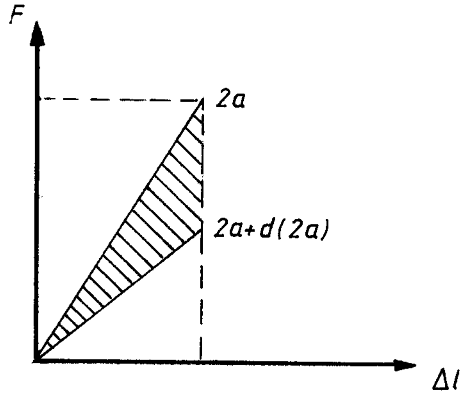
Bölüm 3.4 de Griffith teorisi için yapılan açıklamalar dikkate alındığında, çatlak büyüdükçe (F) kuvvetinin düşeceği ve (c) nin büyüyeceğinden mekanik enerji azalacaktır. Tabii ($U\gamma$) buna karşılık artacaktır. Mekanik enerji çatlağı büyütmeye çalışırken, ($U\gamma$) çatlağın büyümesini engelleyen bir değer olacaktır. Denge hali için; ($\frac{d\wp}{da} = 0$) yazılmıştı - yani mekanik enerjideki azalma yüzey enerjisindeki artmaya eşittir diyebiliyorduk.

Çatlağın büyümesinde, iki extrem yükleme durumunun incelenmesi daha uygun olacaktır.

a) Sbt. boy uzaması hali; ($\Delta l = $sbt.)

Şekil 3.10 da tatbik edilen yükle malzeme boyca uzama gös -

termeden çatlak büyüyor.



Şekil 3.10 ($\Delta l=$sbt.) hali.

$dW' = F.d(\Delta l)=0$ dır. Elastik enerjideki değişim ise $U_{el}=\frac{1}{2}.F^2.c$ ifadesinden;

$$dU_{el}= F.c.dF+\frac{1}{2} F^2.dc \qquad (3.64)$$

ayrıca, 3.63 den, $F.dc = -c.dF$ olduğundan;

$$dU_{el}= -F^2.dc+\frac{F^2}{2} dc= -\frac{1}{2}F^2.dc$$

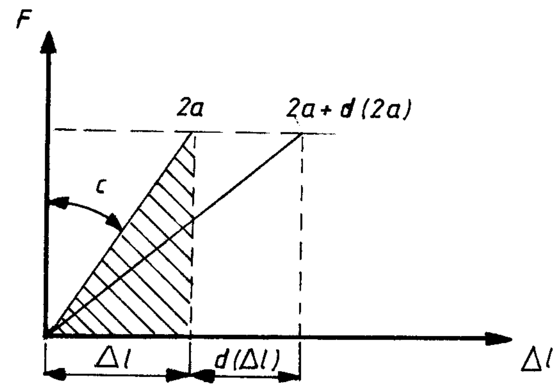
o halde mekanik enerji;

$$-dW' + dU_{el}= -\frac{1}{2}.F^2.dc \qquad (3.65)$$

olacaktır.

b) Sbt. kuvvet durumu; (F=sbt.)

Şekil 3.11 de sbt. yük altında malzemedeki çatlak d(2a) kadar büyürken, boyda $d(\Delta l)$ kadar büyümektedir.



Şekil 3.11 F = sbt. durumu.

O halde dış kuvvetin yapmış olduğu iş;

$$-dW' = -F.d(\Delta l) \quad (3.66)$$

yine, 3.36 tüm enerji ifadesi kararsız hal'de düşünülerek ifade edildiğinde $\varphi = (-W' + U_{el}) + U\gamma + k$ denkleminden, $d(\Delta l) = F.dc$ bulunur, o halde;

$$-dW' = -F^2.dc \quad (3.67)$$

yazılabilir. Elastik enerji (U_{el}) ise;

$$dU_{el} = U_{el_1} - U_{el_2} = \left\{ \frac{1}{2} F[\Delta l + d(\Delta l)] \right\} - \frac{1}{2} F.\Delta l$$

$$dU_{el} = \frac{1}{2} F^2.d(\Delta l) \quad (3.68)$$

3.36 denkleminden;

$$dU_{el} = \frac{1}{2} F^2.dc \quad (3.69)$$

bulunur.

Demekki dış kuvvetin yaptığı daha fazla iş elastik enerjide daha az artış ortaya çıkaracaktır. Mekanik enerji;

$$-dW' + dU_{el} = -F^2.dc + \frac{1}{2}F^2.dc = -\frac{1}{2}F^2.dc \qquad (3.70)$$

elde edilir. Görüldüğü gibi her iki eksterm durumdada çatlağın büyümesiyle mekanik enerji aynı miktarda azalmaktadır. $\Delta l =$ sbt. durumunda çatlak büyürken elastik enerji azalacak $F =$ sbt. durumunda ise gerekli enerji toplam mekanik enerjinin azalmasıyla ortaya çıkacaktır. Bilindiği gibi mekanik enerji çatlağın büyümesini sağlarken, çatlağın büyümesiyle azalmaktadır.

Denklem 3.62 ifadesi çatlak büyürken yazılmak istenirse, (çatlak açılması d(2a), boyca uzama $d(\Delta l)$, ve F=sbt. olduğunda, (c) compliance değeride değişerek (dc) olup, yeni halde;

$$dU_{el} = F.d(\Delta l) - \frac{1}{2}F^2.dc \qquad (3.71)$$

olacaktır. Burada (2a) uzunluğundaki çatlağı açmak için gerekli kuvvet (G) olsun, (B) kalınlığındaki malzeme için, G.d(2a).B yazılabilir. Buradan;

$$dU_{el} = F.d(\Delta l) - G.d(2a).B \qquad (3.72)$$

ve bu son iki denklemden sonuçta;

$$G = \frac{1}{2} \frac{F^2}{B} \frac{dc}{d(2a)} = \frac{1}{2} \frac{F^2}{B} \frac{d(\Delta l/\ F)}{d(2a)} \tag{3.73}$$

bulunur. Böylece çatlak uzunluğu ve kuvvete bağlı ifadeyi a çıklamış oluruz. 3.50 ifadesinden yararlanıp gerilme şiddeti faktörü için geçerli olacak değer biraz farklı bir şekil de;

DDH

$$K = \sqrt{\frac{E}{2(1-\nu^2)} \frac{F^2}{B} \frac{d(\Delta l/\ F)}{d(2a)}} \tag{3.74}$$

veya basit şekil değişiminde;

$$\sigma = F\ /\ B.W \tag{3.75}$$

ile esasen (a) ile genişletilerek ifade;

$$K = \sigma\sqrt{a}\sqrt{\frac{E.B.W}{2(1-\nu^2).a} \frac{d(\ l/F)}{d(2a/W)}} \tag{3.76}$$

ve buradan;

$$K = \sigma.\sqrt{a}\ .\ Y \tag{3.77}$$

bulunur.

DGH

$$K = \sqrt{\frac{E}{2} \quad \frac{F^2}{B} \quad \frac{d(\Delta l/F)}{d(2a)}} \qquad (3.78)$$

ve 3.75 ifadesiyle;

$$K = \sigma\sqrt{a} \cdot \sqrt{\frac{E.B.W}{2a} \quad \frac{d(\Delta l/F)}{d(2a/W)}} \qquad (3.79)$$

ve buradan yine 3.77 ifadesi;

$$K = \sigma\sqrt{a} \cdot Y$$

bulunacaktır. Çatlak uzatma kuvveti, compliance (c) nin ölçümü, numunenin geometrik biçimi, Kırılma şiddeti faktörüne bağımlı ve denklem 3.34 (Y) fonksiyonunun tayiniyle rahatlıkla tespit edilebilir.

3.6 Çatlak Açılmasında Kritik Büyüklükler

$$G - R \geqslant 0$$

şeklindeki 3.48 ve 3.54 den 3.59 a kadar olan ifadeler çat lak açılması olayındaki durumları açıklamaya uygundurlar. Bu denklemler çatlak açılmasında, kararlı, denge hali ve ka rarsız çatlak yayılımını tam olarak ifade edecek tarzdadır- lar. ve,

σ Gerilme.

K Kırılma şiddeti faktörü.

V(r) Çatlak kenarı açılması.

G Çatlak büyütme kuvveti.

sembolleriyle verilmiştir. Uluslararası standartlara göre i se DDH için (Ic), DGH için (c), harfinin yukarıda ki değerlere indis olarak gelmesiyle, çatlak açılmasındaki olaylar her bir durum için ayrı ayrı ifade edilmiş olacak - tır. Buna göre yukarıdaki değerler;

	DDH	DGH
σ	σ_{Ic}	σ_c
K	K_{Ic}	K_c
$V(r)$	$V(r)_{Ic}$	$V(r)_c$
G	G_{Ic}	G_c

şeklinde olacaklardır.

BÖLÜM 4

ELASTO-PLASTİK KIRILMA

4.1 Giriş.

Lineer-elastik malzemelerde kırılma olayı yük etkisi ile plastik deformasyon olmadan ani olarak oluşuyordu. Oysa çatlak ucunda azda olsa bir plastik şekil değişiminin varlığı belirtilerek bu şekilde bir kabül ile incelemelerin yapılmasının uygun olacağı ifade edilmiştir. Çatlak ucunda oluşan plastik bölge küçük ise lineer-elastik kırılma ifade leri geçerli olacaktır. Fakat plastik bölge büyük ise, çatlak ucundaki gerilme değeri değişecektir. Çatlağın kararlı bir şekilde yayılmasının son bulduğu, kararsız bir şekilde yayılmaya başladığı denge durumu hesabında, bu bölgenin dik kate alınma zorunluluğu vardır.

Plastik bölgenin oluşumu akma ile gerçekleşeceğin - den, en genel iki akma kriteri;

1- Tresca(13)'nın ileri sürdüğü, max. kayma değeri kritik bir değere ulaştığı zaman akma başlar.

2- Von Mises(14)'in ileri sürdüğü, hacim başına kay ma deformasyon enerjisi kritik bir değere ulaştığı zaman ak ma başlıyacaktır.

Tresca(13)'nın fikri, pratiğe tatbiki çok daha ko - lay olmasına karşılık, von Mises(14)'in ileri sürdüğü kri - ter deneysel gözlemlerle daha iyi uyum halindedir.

Düzlem gerilme ve düzlem deformasyon hallerinin bir arada olması, gerçek malzemelerde karışık kırılma olarak ad landırılır.

Plastik bölgede çatlağın oluşumunu anlıyabilmek i - çin çatlakta bir "etkili çatlak uzunluğu" hesaplanır. Buna "effektif çatlak uzunluğu" adıda verilmektedir,

$$2a_{eff} = 2(a + r_{pl})$$

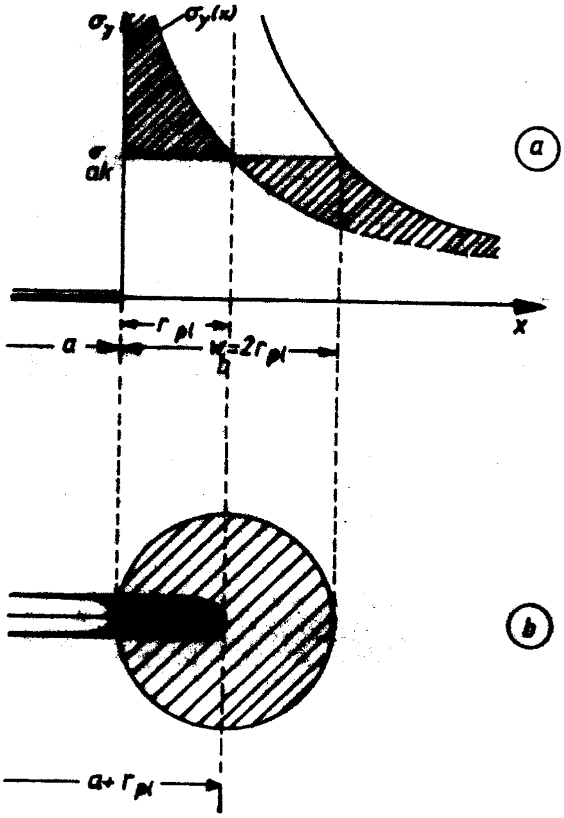
İfadedeki (r_{pl}) plastik bölgenin uzunluğu olarak alınır. Bu bölgenin dışında ($x > a + r_{pl}$) gerilme ve zorlanmalar da ima elastiktir ve evvelce elde edilmiş bağıntılar kullanıla bilinir.

4.2 Irwin Plastik Bölgesi.

Çatlak ucundan ($\theta = 0^\circ$) ve (r) mesafesinde yer alan plastik bölgenin, çok basit olarak genişlediğini varsayıp denklem 3.14 ve 3.19 ile 3.23 den;

$$r_{pl}(\theta = 0^\circ) = r_{pl} = \frac{1}{2} \; a\left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2 = \frac{K^2}{2\pi\sigma_a^2} \qquad (4.1)$$

yazılır.



Şekil 4.1 Irwin plastik bölgesi.

Şekil 4.1 deki gibi bir malzeme çok yüksek bir zorlanmaya maruz kalsın, bu durumda plastik bölge etkili olduğunda gerilme değeri akma sınırının üzerine çıkmaz ve $\sigma_{y(x)}$ ile ifade edilen eğri altında kalan taralı alan σ_a çizgisininde altında sağa doğru kayacaktır. Lineer-elastik malzemelerdeki çatlak oluşumunda $x < r_{pl} \cdot \sigma_y = \sigma_a$ geçerliyde. Burada tesir sahası düşünüldüğünde $0 < x \leqslant r_{pl}$ denkliğinin esas olarak sağlanması gerekirken, değişik bir gerilme olayı ile $x > r_{pl}$ olduğu durumda karşımıza çıkabilir, bu anda açığa çıkan kuvvet;

$$\int_{0}^{r_{pl}} \sigma_y \cdot B \cdot dx - \sigma_a \cdot B \cdot r_{pl} = \sigma_a \cdot B \cdot r_{pl} \qquad (4.2)$$

olarak alınır. Bu denklem şekil 4.1(a) da görülen $\sigma_a \cdot r_{pl}$ ile sınırlı uzun dörtköşe yüzün üzerine $\sigma_{y(x)}$ normal gerilmesinin ilavesiyle eğrinin üst sağ köşeye doğru (plastik bölge sınırlarının) kayacağını ifade eder. Bu sebeple ilave edilen kuvvet ile (taralı yüzeye) kuvvet dengesi artarak değişecektir.

Plastik bölgeyi bu açıklamalara bağlı olarak anlatmaya çalışırsak;

$$W_b = 2 \cdot r_{pl} \qquad (4.3)$$

ifadesi yazılabilir, şekil 4.1(b) deki taslaktan çatlak ucundaki daire formu, numune zorlandığında şekil 4.1(a) da verilen eğriyi ifade için yarım çatlak uzunluğu (a) yerine yeni "etkili çatlak uzunluğu" (a_{eff}) olarak belirlenen bir değerin verilmesi uygun olacaktır. Buradan;

$$a_{eff} = a + r_{pl} \tag{4.4}$$

belirlenir. Kırılma şiddeti faktörü K ise bu yeni değere bağlı olacak şekilde;

$$K = \sigma \sqrt{\pi (a + r_{pl})} \tag{4.5}$$

ifade edilir. Çatlak ilerlemesi,(3.23 ve 4.2 denklemlerinin ifade ettiği değerlerde) $\frac{\sigma}{\sigma_a}$ oranının değişimiyle değişecektir.

4.3 Mc Clintock-Irwin Plastik Bölgesi.

Bu çalışmada plastik bölgenin ölçümü için çok eksen li gerilmeler dikkate alınmıştır. Denklem 3.13 ve 3.22 ye kadar olan ifadeler, lineer-elastik kırılma mekaniğinde bir çatlak ucundan (r) kadar uzaklıktaki gerilme bileşenlerinin hesaplanması sonucu gerilmelerin;

σ_1 ($\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$) değerlerinde olduğu ve asal gerilmeler cinsinden bunlar;

$$\sigma_1 = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 + \sin\frac{\theta}{2} \right) \tag{4.6}$$

$$\sigma_2 = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 - \sin\frac{\theta}{2} \right) \tag{4.7}$$

<u>DGH</u>

$$(\sigma_3 = 0) \qquad \sigma_3 = 0$$

<u>DDH</u>

$$(\sigma_3 = 0) \qquad \sigma_3 = 2\gamma \left(\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) \cos\frac{\theta}{2}$$

ve değişik bir enerji hipotezi ile, (Von mises'in distorsiyon enerjisi kriterine göre bir malzemede akma); (σ_a)

$$\sigma_v = \sigma_a = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - (\sigma_2 - \sigma_3)^2 - (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \tag{4.8}$$

bağıntısının sağlandığı takdirde başlıyacaktır.

Tüm bu açıklamalar sonrasında çatlak ucunda plastik bölgede deformasyon olduğunu kabul ederek ve asal gerilmeleri 4.8 denklemimizde yerine koyarak, plastik bölgenin uzunluğu i - çin;

DDH

$$r_{pl}=\frac{K^2}{2\pi\sigma_a^2}\cos^2\frac{\theta}{2}\left[1+3\sin^2\frac{\theta}{2}-4\nu(1-\nu)\right] \tag{4.9}$$

DGH

$$r_{pl}=\frac{K^2}{2\pi\sigma_a^2}\cos^2\frac{\theta}{2}\left[1+3\sin^2\frac{\theta}{2}\right] \tag{4.10}$$

değerleri bulunacaktır. İnce levhaların düzlemsel yüklenmelerinde kalınlık istikametindeki (σ_z) gerilmelerinin ihmal edilecek kadar ufak olduğunu ve kalın parçalarda ise çatlak ucundaki (σ_z) gerilmelerinin yüzeye gidildikçe azalmakta olduğu ve yüzeyde tam sıfır değerini aldığını biliyoruz. Yani kalınlık yönündeki deformasyon sıfır olmaktadır. Buradan hareketle 4.9 ve 4.10 denklemleri ile şekil 4.2 birbirlerini açıklamaktadırlar. 4.9 ve 4.10 bağıntılarını çatlak doğrultusu boyunca ($\theta=0^\circ$) sayarsak, plastik bölge uzunlukları,

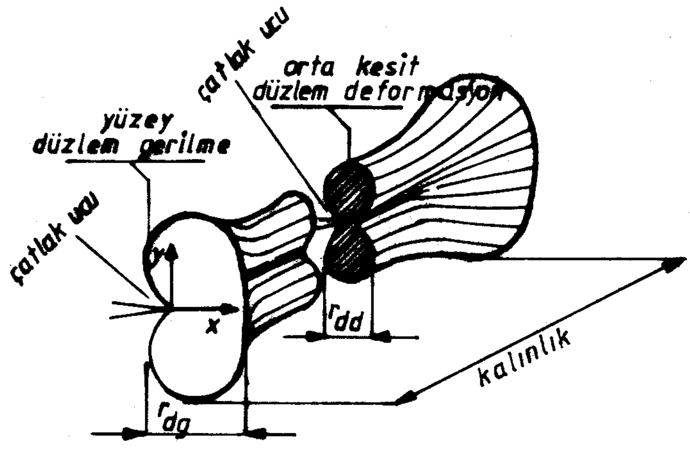
$\sigma_v > \sigma_a$ durumunda, aşağıdaki şekil 4.3 de dikkate alınarak, DDH

$$r_{pl} = r_{pl}\ (\theta = 0^{\circ}) = \frac{K^2}{2\pi\sigma_a^2}\ (1 - 2\nu)^2 \tag{4.11}$$

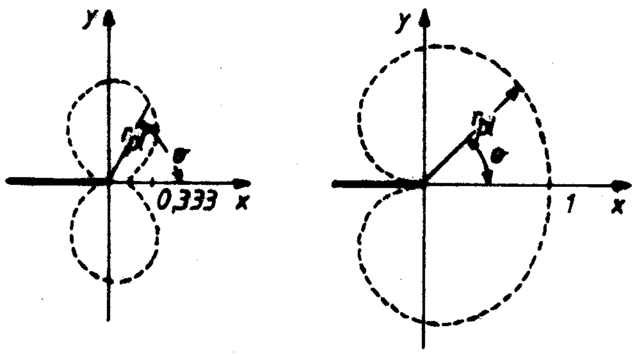
DGH

$$r_{pl} = r_{pl}\ (\theta = 0^{\circ}) = \frac{K^2}{2\pi\sigma_a^2} \tag{4.12}$$

bulunacaktır. Yukarıdaki açıklamalardan $r_{pl}(\theta)$ nın DGH 'nin DDH'den daima büyük olduğunu görüyoruz.



Şekil 4.2 Kalın plaka içinde çatlak ucundaki Mc Clintock-Irwin genişletilmiş plastik bölgenin değişimi.



r_{pl} her defasında $\frac{1}{2\pi}\left(\frac{K}{\sigma_{ak}}\right)^2$ kez
degişim gösterir

Şekil 4.3 Mc Clintock-Irwin plastik bölgesindeki çatlak uzunluğunun DDH ve DGH'de hesabı.

Çatlak ucundaki plastik şekil değişimindeki tesir dikkate alınırsa, Irwin plastik bölgesinde anlatılan olaylar ve şekil 4.1'de verilen $\sigma_{y(x)}$ eğrisinin davranışı ile buradaki açıklamalar sonucunda Mc Clintock-Irwin bölgesinde'ki olayların aynen gerçekleşeceği belirtilmiştir. Buna göre plastik bölgede genişleme ifadesi (denklem 4.3 gibi) ;

$$W_b = 2 \cdot r_{pl}$$

effektif çatlak uzunluğu (denklem 4.4 gibi);

$$a_{eff} = a + r_{pl}$$

ve kırılma şiddeti faktörü (denklem 3.23 e uyarak, denklem 4.5 gibi);

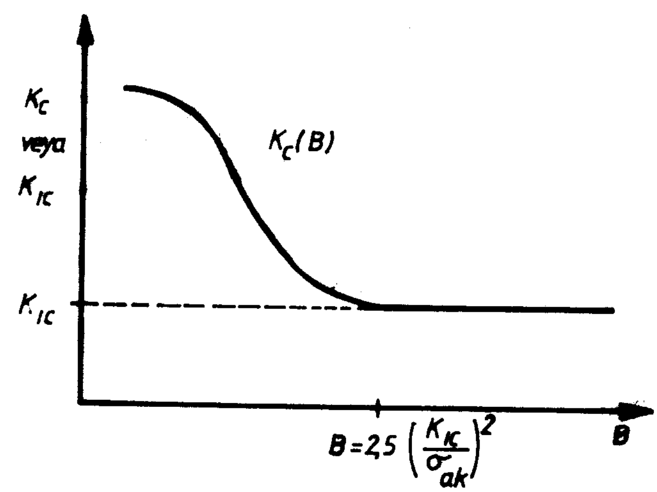
$$K = \sigma\sqrt{\pi(a + r_{pl})}$$

olduğu görülür.

Numunenin değişik formlarda ve kalınlıklarda oluşu plastik bölgedeki olaylarıda etkilemektedir. Bu sebeple numune kalınlığı ile kırılma şiddeti faktörü (B ve K) değerlerinin birbirleriyle bağımlılığı;

$$B \geqslant 2,5 \left(\frac{K}{\sigma_a} \right)^2 \qquad (4.13)$$

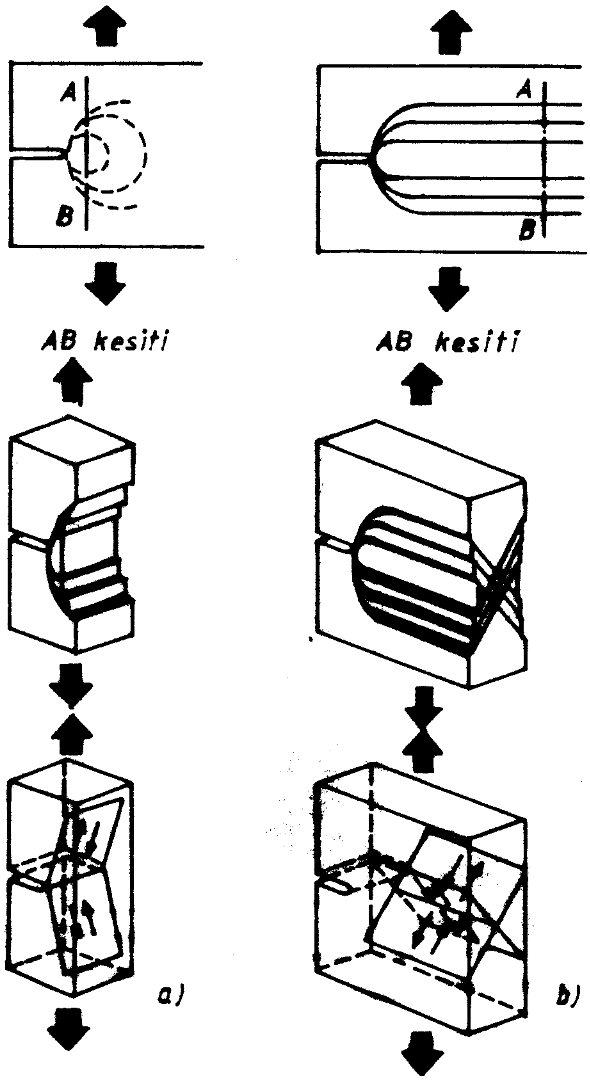
şeklinde verilmiştir. Numune kalınlığına göre (DGH veya DDH den) (K_c) veya (K_{Ic}) 'nin hangisinin olayda etkili olup hesaplamada dikkate alınacağına karar verilmesi ise aşağıdaki şekil 4.4 de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.4 Numune kalınlığı ile kırılma şiddeti faktörünün değişimi.

Yukarıdaki 4.13 ifadesi Mc Clintock-Irwin tarafından, plastik bölgedeki olayların açıklanmasında esas kabul edilmiş - tir.

Şekil 4.4 de, DDH'de (K_{Ic}) nin numune kalınlığı (B) ile il gisiz (Asymptotisch) olduğu, DGH'de ise numune kalınlığı kü çük değerlerde olduğundan kararsız çatlak yayılması görülür ve (K_c) ile (B) birbirleriyle bağımlıdır. Ayrıca şekil 4.4 de soldan sağa doğru gidildikçe (B kalınlığı arttıkça) Şe - kil 4.5(a)'da "menteşe tipi" olarak verilen durum kırılma yüzeylerinde izlenecektir.

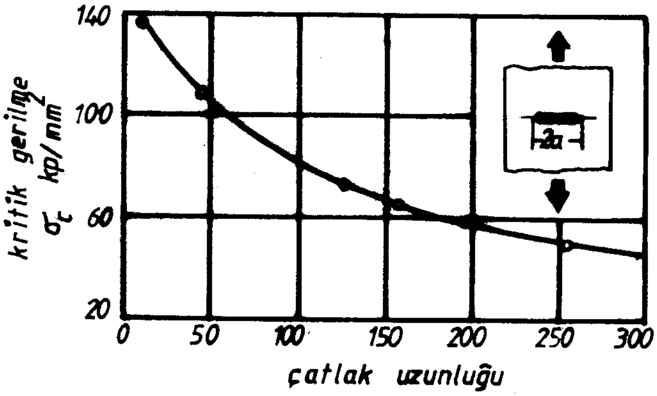


Şekil 4.5 Çatlak ucunda kırılma tipleri.
(a-DDH'de "Menteşe tipi" b-DGH'de "Kama tipi" oluşur.)

Denklem 4.11 ve 4.12 ile uygun (B) ifadesi (r_{pl}) ile bağımlı olarak;

$$B \geqslant \frac{5\pi}{(1-2\nu)^2} r_{pl} \qquad (4.14)$$

şeklindede yazılabilir.



Şekil 4.6 (30NiCrMo83) levhasında, çatlak uzunluğu ile kritik gerilme'nin bağımlılığı.

Şekil 4.6'da (2a) uzunluğundaki çatlağı büyütmek, kırılmayı oluşturacak gerilme değerine doğru yönlenmektir. Eğri üze - rinde, tüm ölçüm noktalarında;

$$K_c = \sigma_c \sqrt{\pi a} = \text{sbt.} = 950 \text{ kp/mm}^{3/2}$$

değeri mevcuttur.

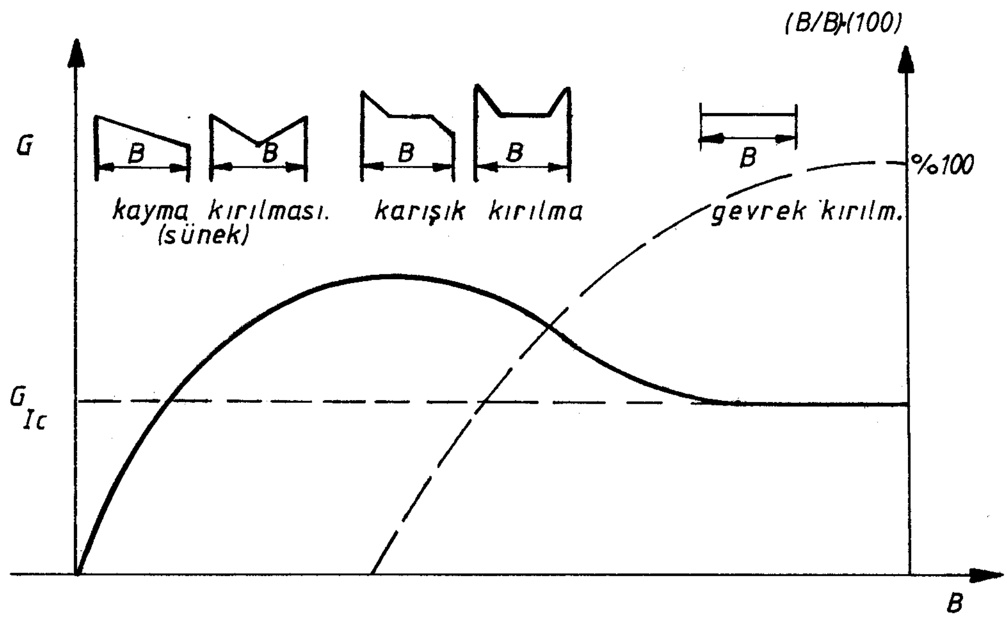
Şekil 4.2 de anlatıldığı gibi malzeme ne kadar kalınlaşırsa düzlemsel deformasyona uğrayan bölge o kadar büyüyecek yani gevrek kırılmaya yatkınlık artacaktır. Eğer malzeme ince ise bu takdirde çatlak civarındaki plastik bölge, düzlem gerilme halinin ağır basması sebebi ile daha büyüyecek ve kırılma böylece plastik deformasyon yüzünden engellenecektir. Plastik deformasyonun kırılmayı engellemesi demek, çatlak boyunun br. büyümesine karşı koyan enerjinin (R) büyümesi demektir. $R = 2\gamma$ olduğundan effektif yüzey enerjisi bu takdirde;

$$\gamma = \gamma y - \gamma pl \qquad (4.15)$$

olacaktır. Burada γy çatlağın yüzey enerjisi, γpl plastik bölgenin yüzey enerjisidir. Tabii bu durumda kararsız çatlak büyümesi için yine $G \geqslant R$ şartı gereklidir. Demekki sonuçta ister DDH ister DGH olsun kritik büyüklükler stabil olmayan çatlak büyümesi sınırını verecektir(DDH ve DGH için bölüm 3.6 da alacakları değerler açıklanmıştır.).

Biraz evvel bahsedildiği şekilde bir malzemenin kalınlaşması çatlak ucundaki plastik deformasyonun kalınlık doğrultusundaki (ε_z) bileşeninin engellenmesine yol açacaktır. Bunu şöyle bir deneyle açıklamamız mümkündür. Aynı malzemeden fakat farklı kalınlıklardaki numunelerin ortalarında oluşturulan çatlak çekme deneyi sonucunda değişik kırılma şekilleri oluşturmaktadır. Şekil 4.7.

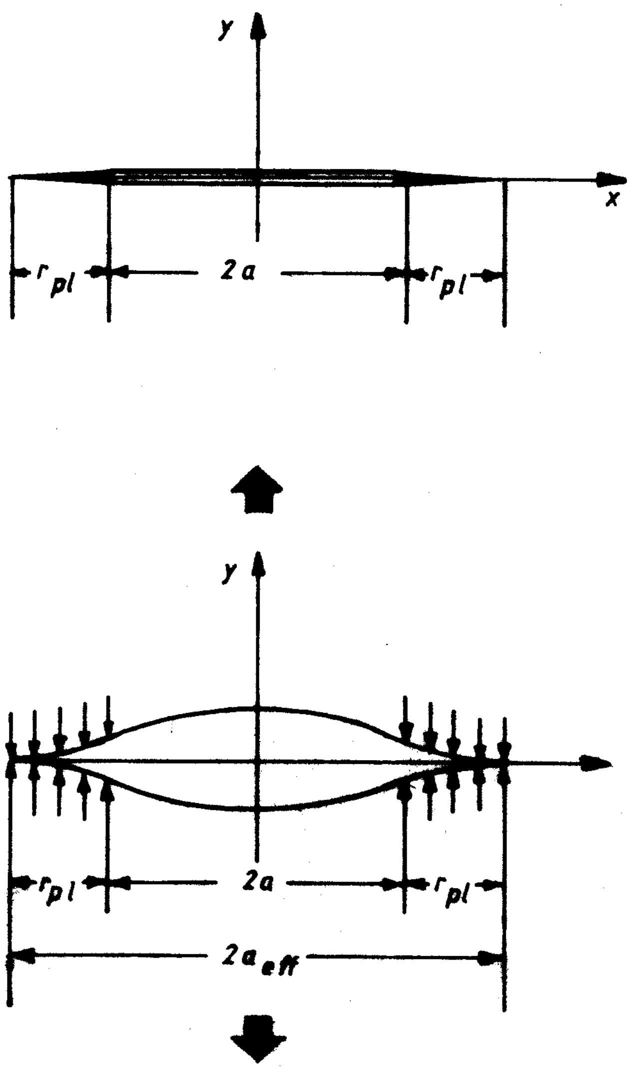
İnce numunelerin kırık yüzeyinde plastik deformasyonun tüm belirtileri görülürken kalınlık arttıkça gevrek kırılmayı karakterize eden bölgeler oluşuyor ve belli bir kalınlıktan sonra ise gevrek kırılma tüm yüzeyi kaplıyor. Bu kalınlıklara bağlı olarak br. çatlak boyu oluşturan enerji (G_c) plastik deformasyon bölgeleri % 100 iken daima yükseliş göstermekte, gevrek kırılma görüldükten sonra ($\frac{B}{B}$=%100) hiç değişmemektedir. Bu değer gevrek kırılmaya aittir. Yani DDH'dir ve ($G_c = G_{Ic}$) dir. Burada G_{Ic} değeri malzeme genişliğine, yani boyutlarına bağlı olmadığı için bu değer malzemeye ait karakteristik büyüklüktür.



Şekil 4.7 (B) kalınlığının kırılma şekline ve (G) değerlerine etkisi.

4.4 Dugdale Plastik Bölgesi.

Bu bölümde Irwin ve Mc Clintock-Irwin plastik bölgelerinden farklı olarak Dugdale, çatlağın uç kısımlarındaki plastik bölgelerin bir gerilme etkisi altında kalarak çatlağın açılmasını engellediğini kabul etmiştir. Durumu aşağıdaki şekilde izlemek mümkündür.



Şekil 4.8 Dugdale'nin çatlak modeli.

Effektif çatlak uzunluğu ifadesi ise denklem 4.4'de olduğu şekilde;

$$a_{eff} = a + r_{pl}$$

dir. Dugdale(16) modelinde (r_{pl})'in hesabında ise, çatlak ucunun şekil 4.8'de görüldüğü gibi gerilmeler tesirinde kalıp doğrusal olarak yayılmak zorunda kaldığını ifade etmiştir. Çatlak ucundaki gerilmelerin akma gerilmesine ulaştığını, daha yüksek zorlanmalarda ise çok daha küçük gerilme değerlerinin ($x \rightarrow a$ olması halinde) dahi akma gerilmesine ulaşarak;

<u>DGH</u>

$$r_{pl} = a \cdot \left[Sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_a}\right) - 1 \right] = a_{eff} \cdot \left[1 - Cos\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_a}\right) \right]$$

$$r_{pl} = a_{eff} \cdot \left[1 - \left\{ 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_a}\right)^2 + \frac{1}{24}\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_a}\right)^4 \ldots\ldots \right\} \right]$$

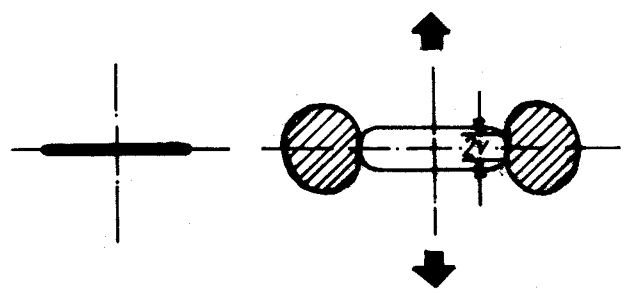
$$r_{pl} \cong a_{eff} \cdot \frac{\pi^2}{8}\left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2 = \frac{\pi}{8}\left(\frac{K}{\sigma_a}\right)^2 \qquad (4.16)$$

yazılacaktır. Bu, bölüm 4.3 ve 4.2'ye yakın sonuçlar verir. Etkili olan plastik bölgenin ölçümü ise denklem 4.3'den biraz farklı olarak;

$$W_b = r_{pl} \qquad (4.17)$$

yazılacaktır.

4.5 Çatlak Ucunda Etkili Olan Plastik Bölge'deki Büyüklükler Ve Enerji Dağılımı.



Şekil 4.9 Çatlak ucundaki plastik bölgede hesaplama.

Şekil 4.9'da verildiği gibi, sonsuz ince bir plaka içinde (2a) uzunluğunda bir çatlağa, düzgün çekme gerilmesi uygulandığında, çatlağın keskin ucunun plastik bölge ile körlendiği görülür. Dugdale(16)'nın plastik bölge açıklaması ile Hahn(6) tarafından, çatlak ucundaki kütleşme miktarı;

$$\delta = 2.V \tag{4.18}$$

olur. Buradan;

$$\delta = \frac{8\,\sigma_a\,(a)}{\pi E}\ \mathrm{Ln}\ \mathrm{Sec}\ \frac{\pi\sigma}{2\sigma_a}$$

Ln(Sec) terimini açıp neticesini ilave etmekle;

$$\delta = \frac{8\sigma_a(a)}{\pi E}\left\{1\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_a}\right)^2 + \frac{1}{12}\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_a}\right)^4 + \frac{1}{45}\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_a}\right)^6 + \cdots\right\} \tag{4.19}$$

ve,

$$\delta = \frac{\pi\sigma^2(a)}{E\sigma_a}\left\{1 - \frac{\pi^2}{24}\left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2\right\} \tag{4.20}$$

bulunur. Diğer taraftan danklam 3.51'deki (G), denklem 4.4 deki (a_{eff}), denklem 4.1'deki (r_{pl}) ifadeleri, gerçek malze melerde çatlak ucunda küçük bir plastik bölgenin varlığının ($r_{pl} \ll a$) şeklinde kabul edilmesiyle;

$$\frac{G}{\sigma_a} \cong \frac{\pi\sigma^2(a)}{E\sigma_a}\left\{1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2\right\} \tag{4.21}$$

ifadesi elde edilir. Bu son iki 4.20 ve 4.21 denklemlerin - den;

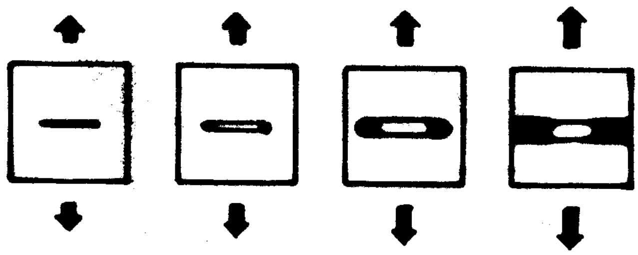
$$\frac{\sigma}{\sigma_a} \ll 1 \qquad \text{durumunda;}$$

(δ) çatlak ucundaki kütleşme miktarı, (G) çatlak yayılma kuvveti, (σ_a) akma gerilmesi olarak alındığında;

$$\delta = \frac{G}{\sigma_a} \tag{4.22}$$

bulunur. Burada $(r_{pl}/a) \ll 1$ olması gereklidir.

4.6 Çatlak Önünde Plastik Bölge Olması Halinde Çatlak Kararlılığı Ve Yayılması'nın İncelenmesi.

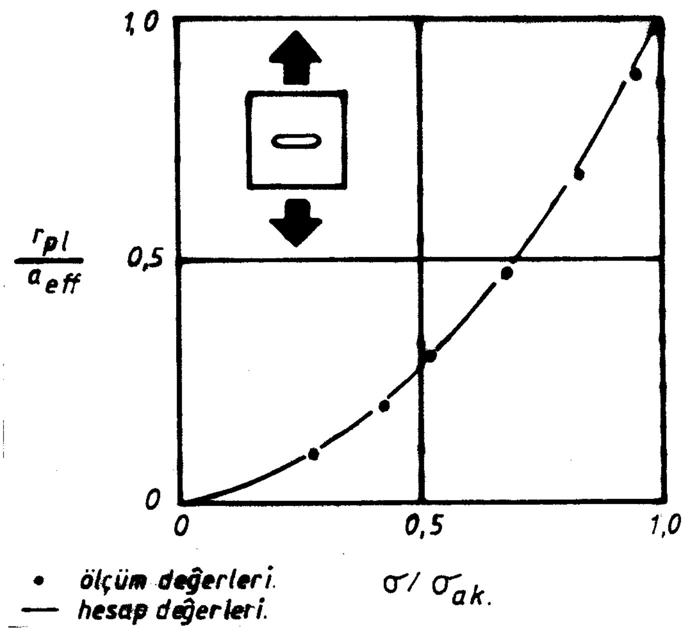


Şekil 4.10 Plastik bölge önündeki çatlağın genişlemesi.

Şekil 4.10'da plastik bölge önünde çatlağın genişlemesinin kuvvetin artışıyla gerçekleştiğini görmekteyiz. Elasto-plastik halde Dugdale tarafından verilen modelde 4.16 denklemindeki (r_{pl}) ve 4.4 denklemindeki (a_{eff}) değerlerinin bağımlılığı ile;

$$\frac{r_{pl}}{a_{eff}} = \left[1 - \text{Cos} \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_a} \right] \qquad (4.23)$$

olacaktır. Şekil 4.11'de ise çelik numunelerde gerçekleştirilen denemelerde, teorik ve deneysel olarak, (r_{pl}/ a_{eff}) i le (σ / σ_a) arasındaki ilişkiler gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Dugdale modelinde, plastik bölgedeki uzunluklar ile gerilmelerin bağımlılığından teorik ve deneysel inceleme lerin sonuçları.

Denklem 3.52 ve $\varepsilon_a = (\sigma_a / E)$ ifadesinden denklem 4.22'ye uyarak (δ);

$$\delta = \varepsilon_a \left(\frac{K}{\sigma_a}\right)^2 = \frac{K^2}{E\,\sigma_a} \qquad (4.24)$$

şeklinde yazılır.

Irwin plastik bölge modeliyle, denklem 4.1 ve 4.5 yardımıyla ($r = r_{pl}$ ve $\theta = \pi$) iken denklem 3.28 ve 3.29 ifadeleri dikkate alınarak, çatlak kenarlarının yer değişimi;

$$V = \frac{2}{\pi} \frac{G}{\sigma_a} = \frac{2}{\pi} \varepsilon_a \left(\frac{K}{\sigma_a}\right)^2 \qquad (4.25)$$

yazılır ve denklem 4.18'den;

$$\delta = 2V = \frac{4}{\pi} \frac{G}{\sigma_a} = \frac{4}{\pi} \varepsilon_a \left(\frac{K}{\sigma_a}\right)^2$$

ile,

$$\delta = \frac{4}{\pi} \left(\frac{K^2}{E\,\sigma_a}\right) \qquad (4.26)$$

bulunur. Bu açıklamaların yapılması, 4.25 ve 4.26 ifadeleri için Irwin plastik bölgesi, 4.24 ifadesi için ise Dugdale plastik bölge modeli göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Ve denklem 4.24 ile 4.26 arasında sonuçta sadece;

$$(4/\pi) = 1,27$$

gibi bir sayı vardır.

Bu 1,27 değerinin plastik bölge ile ilgili olup olmadığı i-
se, yapılan araştırmalar sonucu ifadenin;

$$\delta = \alpha \frac{G}{\sigma_a} = \alpha \, \varepsilon_a \left(\frac{K}{\sigma_a}\right)^2 = \alpha \frac{K^2}{E\,\sigma_a} \qquad (4.27)$$

şeklinde yazılıp, denklemdeki (α) ile gösterilen değerin sbt. bir değer olduğu ve (K) ve (δ)'nun kritik değerleri i le kararsız çatlak yayılması'nın;

$$0,5 < \alpha < 3$$

olduğunda görüleceği belirlenmiştir.

Kararsız çatlak yayılması (δ) COD'un kritik bir de ğerinde olacağından kırılma gerilmesi 3.51'den;

$$\sigma_k = \left(\frac{E\,G_c}{\pi a}\right)^{1/2}$$

ve denklem 4.22'den

$$G_c = \sigma_a \, \delta_c$$

olup;

$$\sigma_k = \left(\frac{E\,\sigma_a\,\delta_c}{\pi a}\right)^{1/2}$$

yazılacaktır. Bu ifademiz denklem 3.11 ile karşılaştırıldığında;

$$\sigma_k = \left(\frac{E\,\gamma}{a\,\pi}\right)^{1/2}$$

dan,

$$\gamma = \sigma_a\ \delta_c \qquad (4.28)$$

buluruz,

$$\delta_c = 2\rho\,\varepsilon_a$$

ifadesinden ve 4.22'den,

$$G = \sigma_a\ 2\rho\ \varepsilon_a$$

olacaktır, bu ifade'de çatlak ucu yarıçapı (ρ)'nun fazla büyümesiyle, çatlağın kararsız bir şekilde yayılabilmesi için daha fazla enerji yutulacağını, yani $G \gg R$ olduğunu göstermektedir. Bu ifadenin tek eksiği, içerisinde malzemenin mikro yapısını gösteren herhangi bir değerin bulunmayışıdır.

Kritik noktalarda, $\delta \rightarrow \delta_c$, $G \rightarrow G_c$, $K \rightarrow K_c$ olacaktır. Burada verilen (δ_c) kritik çatlak açıklığı veya kritik COD değeri (Crack-Opening-Displacement) veyahut COS (Crack-Opening-Stretch) değeri olarak söylenir. Kırılma mekaniğinde COD taslağı çokça kullanılmaktadır, fakat halen tartışılmakta olan bir değerdir.

BÖLÜM 5

KIRILMA TOKLUĞU ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

5.1 Giriş.

Kırılma mekaniği ile ilgili temel esaslar önceki bö lümlerde verilmeye çalışıldı. Malzemedeki zorlanma karşısın da çatlağın oluşumu, büyümesi ve yayılması'nın incelenmesi ve yapılan deneysel çalışmalar'la birlikte birtakım sonuçla ra varılır. Bulunan değerler değişik sıcaklıklar için fark- lı olabilmektedir. Bu durumda belli bir sıcaklık değeri i - çin bulunan değer diğerleri içinde esas kabul edilir. Şekil değişimi sıcaklıktan başka deformasyon hızı ile'de ilgili- dir. Ayrıca Kırılma mekaniğinin incelenmesinde tüm araştır- macılar malzemenin mikroyapısı ile ilgili bağıntılarla bir- likte kırılma olayını açıklamaya çalışmaktadırlar.

Burada K_{Ic}, COD ve J integrali kırılma tokluğu öl - çüm yöntemleri verilmiştir.

K_{Ic}, çatlağın kararsız yayıldığı kritik denge nokta sındaki (Mod I çatlak açılmasında, şekil 2.9) çatlak açılma durumuna göre kritik tokluk değerini ölçmektedir. K_{Ic}'nin tespitinde çatlak yorulmasının'da dikkate alınması gerektiği tecrübeler ile belirlenmiştir. K_{Ic} yöntemi ileride anlatılacağı şekilde bugün'de kullanılır ve geçerlidir.

K_{Ic} yanlızca yüksek mukavemetli malzemelerde çok iyi netice verdiği halde, düşük ve orta mukavemetli malzemelerden, ancak çok düşük sıcaklık çok kalın kesitli numune - ler ve çok yüksek deformasyon hızlarının uygulanması halinde geçerli neticeler alınabilmektedir. Bilindiği üzere bu tür malzemelerin çatlağı önünde küçük veya büyük plastik bölge oluşmaktadır. K_{Ic} tayininde numune boyut sınırlaması olduğundan kırılma tokluğu tayini için plastik bölgenin çat lak ucunda oluşturduğu kütleşme miktarına'da (δ) diyoruz. Çatlak profili, malzeme ve yükleme durumuna bağlı olarak de ğişme göstereceğinden (δ)'nun kritik değerini deneysel ola rak elde etmek zordur. Şekil 5.9 'de görüldüğü gibi çatlak ucu açılma miktarı (V) ile kütleşme miktarı (δ) arasındaki ilişki bulunarak kritik COD (δc) hesaplamasına gidilir.

Çatlak ucunda büyük plastik bölge olması halinde kı rılma tokluğunun ölçülmesi büyük zorluklar gösterdiğinden COD yöntemine alternatif olarak J integrali metodu geliştirilmiştir.

Kırılma olayı sonucu Elastisite modülü (E) ve akma gerilmesi (σa) ve max. gerilme (σmax)'ın bilinmesi ile mal zemenin yapısı hakkında bize gerekli bilgiler verilmiş olacaktır. Lineer-elastik kırılma mekaniği'nde $E/\sigma a$ değeri- kırılma olayında geçerli bir kriter olarak belirlenmiştir.

Bugün malzemeler için; (Gevrek malzemeler)

$$\frac{E}{\sigma_a} \lesssim 150 \qquad (5.1)$$

olması istenir. Lineer-elastik malzemelerde martensitik yapılı çelikler ve östenitik çeliklerde geçerli olacak değer;

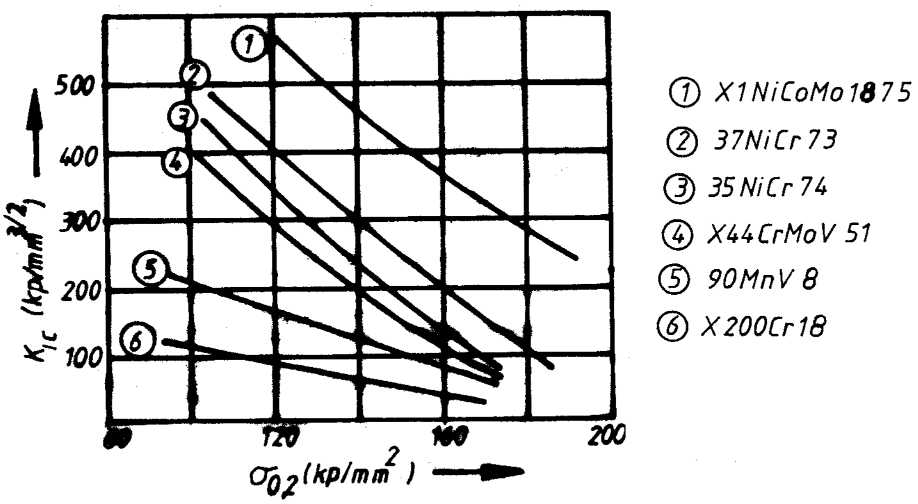
$$150 \lesssim \frac{E}{\sigma_a} \lesssim 300 \qquad (5.2)$$

dir. Lineer-elastik malzemelerdeki kırılma olaylarında, yukarıdaki 5.2 ifadesinin geçerli olduğu gözlenir. Basınçlı kaplar ve dönen çelik miller için ise;

$$\frac{E}{\sigma_a} \gtrsim 300 \qquad (5.3)$$

esas alınır. Lineer-elastik malzemeler'deki kırılma olayı için geçerli ifadeler genelde açıklanmıştır, bunların kullanılması, mühendislik açısından uygun çözümler verecektir.

K_{Ic} ile bağımlı değerler'e göre değişik demir malzemelerin referans eğrileri şekil 5.1 de verilmiştir.



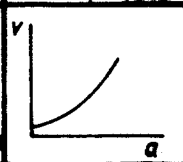
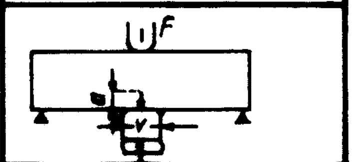
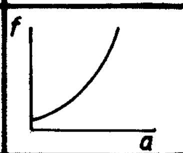
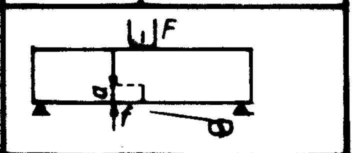
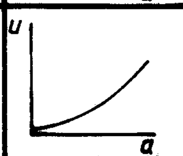
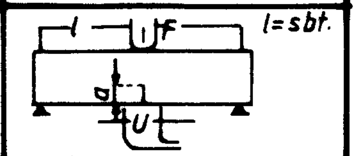
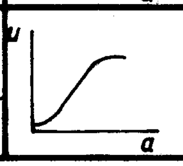
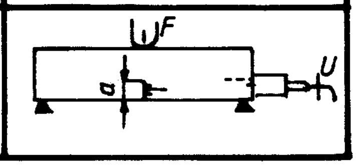
Şekil 5.1 Değişik malzemelerin gerilme ile K_{Ic} bağımlılığı.

5.2 (K_{Ic}) Yöntemi.

Çatlağın kararsız yayıldığı kritik (denge) noktasındaki (şekil 2.9-I çatlak açılma mod'u) durumuna göre, yorulma çatlağı'da dikkate alınarak, kritik tokluk değerini ölçmektir.

5.2.1 Esaslar.

Önceki açıklamalar ve bulunan ifadeler temel alınarak K_{Ic} tayini için;

Çeşit	Ölçüm.	Diagram (F=sbt)	Ölçüm şekli.
Çatlak açıklığı ölçümü	Her iki çatlak yüzeyinin açılışıyla		
Compliance ölçüm.	Numunenin ortadan eğilmesiyle.		
Potansiyel ölçüm.	Her iki çatlak kenarının elektriksel pot.		
Ultrases yöntemiyle ölçüm	Hata sinyallerinin yansıtılması ile.		

Şekil 5.2 Ölçüm şekli.

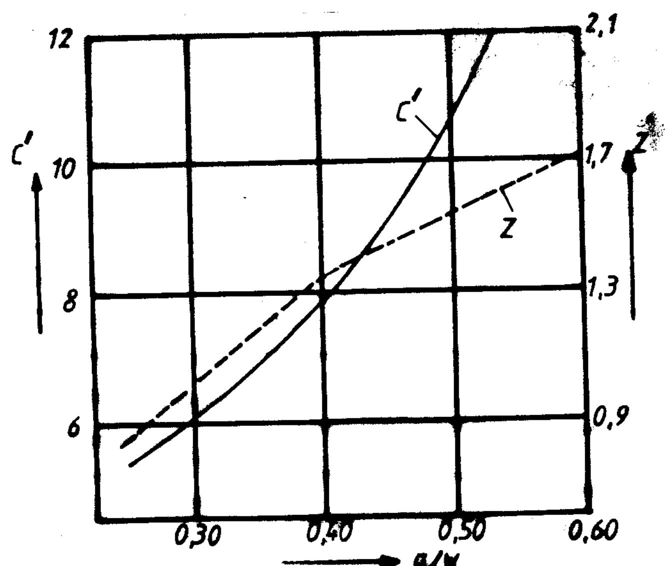
Şekil 5.2'de görüldüğü gibi numuneye üzerinden baskı yapılması sonucu bu uygulanan kuvvet ile, gerekli aletler yardımıyla (V) çatlak açıklığı yerdeğişiminin birlikte bağımlı oldukları bir F-V eğrisi çizdirilir, oluşan eğri kararsız çatlak yayılması ile ilgisizdir. Önceki bölüm 3.4'de numune formuyla ilgili Y fonksiyonu ile, çatlak direnci;

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{a_{eff}}\ Y \cong \sigma_c \sqrt{a}\ .Y \qquad (5.4)$$

ASTM'de; şekil değişim yolu (f), uygulanan kuvvet (F), numune hacmi (V_h), numune geometrisiyle bağımlı şekil 5.3'deki değer (Z), olması halinde, yük etkisiyle kırılmaya kadar yapılan ölçüm ile çatlak dayanımı;

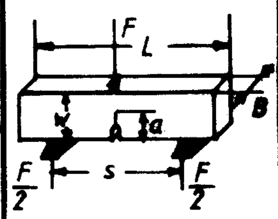
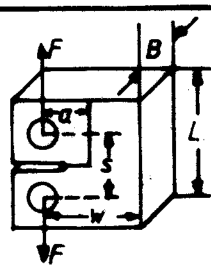
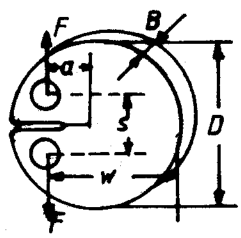
$$K_{Ic} = Z \cdot \sqrt{\frac{E \frac{1}{2} F \cdot f \cdot a}{V_h}} \qquad (5.5)$$

olarak tespit edilecektir.



Şekil 5.3 (a/W) ile bağımlı sabitler.

5.2.2 Numune Formu Ve Boyut Sınırlamaları.

Tip	Gösterim	Ölçüm.	Numune formu	Boyut sınırları.
3-Nokta Eğme Numunesi	3PB	Çatlağın diğer tarafından kuvvet tatbikiyle		$a \geq 2{,}5$ $B \geq 2{,}5$ $W \geq 5{,}0$ $\left\} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ak}}\right)^2 \right.$ $s = 4W$ $L = 4{,}2W$
Compact Tension Numunesi.	CT	Kare form da dairelerden dışa kuvvet tatbiki.		$a \geq 2{,}5$ $B \geq 2{,}5$ $W \geq 5{,}0$ $\left\} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ak}}\right)^2 \right.$ $W = 2B$ $L = 2{,}4B$ $s = 1{,}1B$
Round Compact Tension Numunesi.	RCT	Daire form da dairelerden dışa kuvvet tatbiki.		$a \geq 2{,}5$ $B \geq 2{,}5$ $W \geq 5{,}0$ $\left\} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ak}}\right)^2 \right.$ $s = 0{,}4D$ $D = 2{,}4B$ $W = 0{,}75D$

Şekil 5.4 Numune Formları.

Şekil 5.4'ü incelediğimizde kırılma mekaniğine uyarlanabilecek, uygun sonuçları verecek numune formlarını görebiliriz. K_{Ic}, DDH'de geçerli olacağından plastik bölge burada yeteri kadar küçük ve etkisizdir.

K_{Ic}'nin uygun şekilde belirlenebilmesi için, şekil 4.4 ve B kalınlığı ile bağımlı, 4.13 denkleminden;

$$B \geqslant 2,5 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_a}\right)^2 \qquad (5.6)$$

ifadesi, ve (a) toplam çatlak uzunluğu ile bağımlı;

$$a \geqslant 2,5 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_a}\right)^2 \qquad (5.7)$$

sınırları içerisinde olması gerektiği uygun görülmüştür.

Numunenin, kırılmanın oluşacağı yüzeyler arası mesafe (çatlak genişliği, x_g) ile numune genişliği (W) arasındaki ilişki ise;

$$x_g \leqslant 0,05 \cdot W \qquad (5.8)$$

şeklinde olacaktır.

Çatlak açılma şekilleri değişik tiplerde (şekil 5.5'de verildiği gibi) olabilmektedir. Numunelerin bu değişik şekillere göre, ($\mathcal{H}$) ile gösterilip, yorulma çatlağı dışındaki çatlak uzunluğu olarak bilinen ifadesinin;

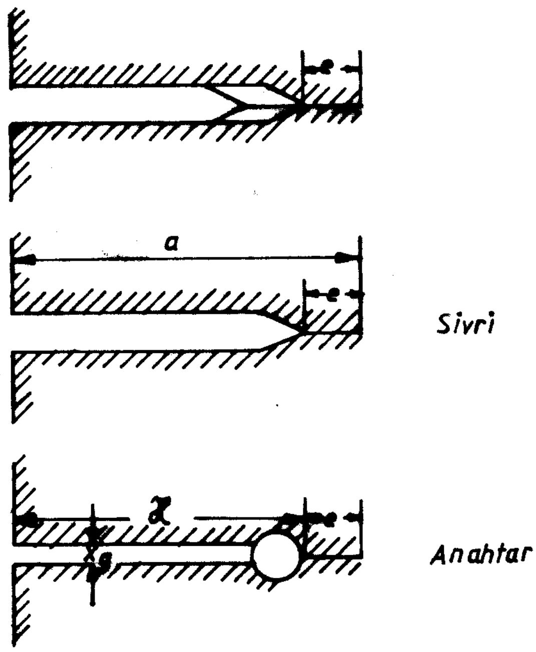
3 PB (3 noktadan eğme) numunesinde;

$$0,45\ W \leqslant \mathcal{H} \leqslant 0,55\ W \qquad (5.9)$$

CT (compack tension) ve RCT (round compack tension) numunelerinde ise;

$$0,55\ W \leqslant \mathcal{H} \leqslant 0,65\ W \qquad (5.10)$$

sınırları içinde hazırlanmaları gerekir.



Şekil 5.5 Çatlak açılma tipleri.

Akma eğrileri denemenin farklılığına göre değişiklik gösterecektir. CT , RCT ve 3 PB numunelerinde;

$$K_{Io} / E \leqslant 6,06 \cdot 10^{-3}\ mm^{1/2} \qquad (5.11)$$

$$K_{Io} \leqslant 0,6 \cdot K_{Ic} \qquad (5.12)$$

$$K_{Iu} \leqslant 0,1 \cdot K_{Io} \qquad (5.13)$$

şartlarının sağlanması gerekir. Burada K_{Io} ve K_{Iu} max. σo ve min. σu için bulunmuş değerlerdir.

Yorulma çatlağı (e) ise;

$$e \geqslant 0,05\ \mathcal{H} \qquad (5.14)$$

olmalıdır. Eğer K_{Ic} hesaplanacaksa, çatlak uzunluğunun en az yorulma çatlağına 5.14 ifadesindeki şekilde eşit olmalıdır. Yorulma çatlağı karşısındaki düzlem eğimi 10^{o}'den fazla olduğunda, bu eğimli yüzey karşısındaki sınırlı düzlemin ölçümünde K_{Ic} geçersiz olacaktır. Bu sonuç denemeler ile edinilen tecrübelerle tespit edilmiştir.

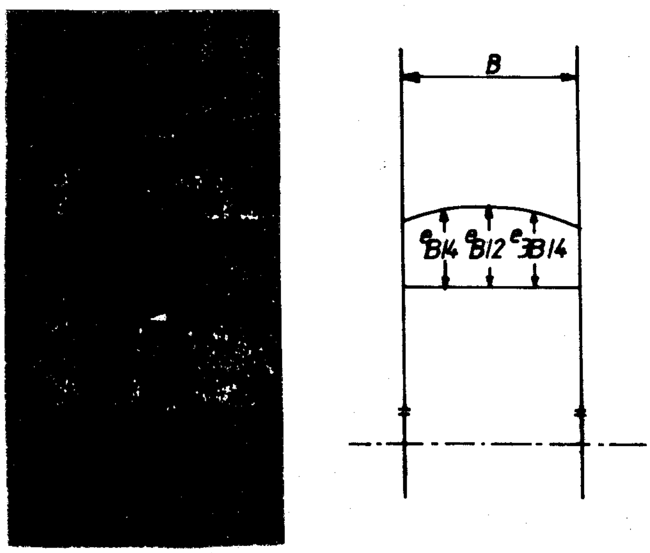
Şekil 5.6'da K_{Ic} numunesinde kırılma yüzeyi ve yandaki şemada ise çatlak tespiti için eğri ile sınırlanan bölüm, yorulma çatlak yüzeyinin sınırlarını vermektedir. Çatlak uzunluğunun ölçümü için kırılma yüzeylerini kullanmaktayız, bunun için şekil 5.6'daki şemada verilen, yorulma çatlak uzun luğu için;

$$e_{B/4} \div e_{B/2} \div e_{3B/4}$$

değerlerinin aritmetik ortalaması, $\overline{e_i}$ ise;

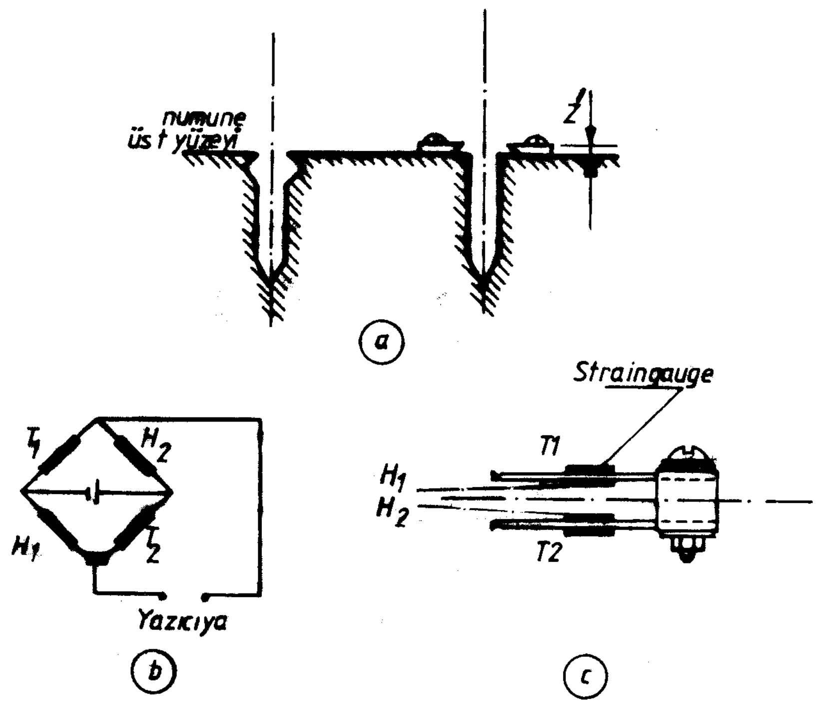
$$\frac{e_i - \overline{e_i}}{\overline{e_i}} \; 100\ \% \geq \%\ 5 \qquad (5.15)$$

sınırları arasında olması kesinlikle istenir.



Şekil 5.6 K_{Ic} numunesinde kırılma yüzeyi ve şemada yorulma çatlak yüzeylerinin sınırları.

5.2.3 Çatlak Açıklığı Ölçümü.



Şekil 5.7 Çatlak açıklığı ölçüm düzeni.

a) Numunede hazırlanmış özel formlar.

b) Wheatston köprü devresi.

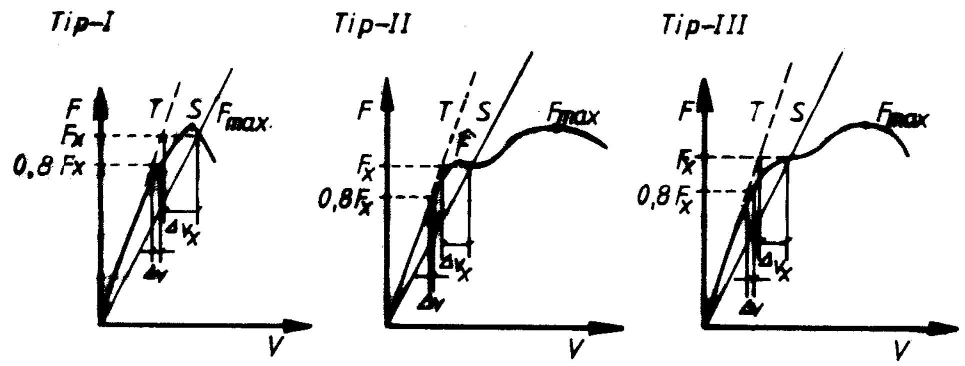
c) Klip-gauge.

Çatlak açıklığı ölçümü şekil 5.7'de görülen düzenek yardımı ile gerçekleştirilir. (c) ile verilen şekilde çatlak açılma değerini ölçebileceğimiz (Klip-gauge) adı verilen düzeneği görmekteyiz. Burada bir gövdeye tutturulmuş iki adet karşılıklı yerleştirilen yay çeliği, ve bunların üzerlerine sinyalleri iletebileceğimiz, T_1, T_2, H_1, H_2 ile gösterilip şekildeki gibi yaylı iki dil üzerine yerleştirilen dört a - det Straingauge ve şekil (b)'de bu Straingaugelerin sinyallerini iletebileceğimiz biçimde hazırlanmış Wheatston köprü devresi ile şekil (a)'da Klip-gauge'nin uçlarına uygun şekilde, uçları tutabilecek şekilde numune üst yüzeyinde ha - zırlanmış özel yerler görülmektedir. (Ź) numune üst yüzeyine yay çeliğini tutacak şekilde tespit edilen çentikli parçanın yüksekliğidir.

Çatlak açılmasında oluşan sinyallerin yazıcıya aktarılması ile sonuç alınmış olacaktır.

5.2.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.

Kullanılan numunelerin cinslerine göre değişik eğriler elde edilir. Yükleme ile çatlak açıklığı F-v değerlerinin eğrileri bir xy yazıcısından alınır. Buradan % 2 çatlak büyümesine karşılık gelen nokta eğri üzerinde işaretlenir. Deneyler sonucu elde edilen eğrinin lineer kısmının eğiminden yaklaşık % 5 daha düşük eğime sahip doğrunun F-v eğrisini kestiği nokta bu kritik noktayı, bu noktada elde edilen değerin kritik kuvveti yani kararsız çatlak büyümesinin başladığı kuvveti göstereceği tespit edilmiştir. Olayı şekil 5.8'de görmek mümkündür.



Şekil 5.8 Değişik yapıdaki numunelere ait F-V eğrileri.

Bölüm 5.2.2 ve 5.2.3'de numunelerin boyut sınırlamaları ve çatlak açıklığı ölçümünde verilen esaslar'a uygun şekilde hazırlanan bir numune ile yapılan denemede, (K) Kırılma şiddeti faktörü'nün zamanla değişim sınırlarının;

$$1,66 \ kpmm^{-3/2}sec^{-1} \leqslant K \leqslant 8,35 \ kpmm^{-3/2}sec^{-1} \qquad (5.16)$$

şeklinde olması gerektiği belirlenmiştir. Deformasyon hızının değişimi ile çatlak oluşumu, büyümesi ve yayılması etkileneceğinden, uygulanan yük F'in etkili olmasında deformasyon hızı'nın değişiminin zamanla sabit kalması gerekmektedir. Şekil 5.8'de verilen eğrilerden,

Tip-I

Çok gevrek malzemelere ait bir eğridir. F_x, $F_{max.}$ dan daha küçük olduğundan ve ayrıca stabil olmayan bölgeye düştüğünden hesaplamada $F_{max.}$ kullanılır.

Tip-II

Burada max. bir yükten sonra ani bir düşüş (kararsız çatlak büyümesi) görülür. Fakat bu daha sonra plastik deformasyonla engellenir. (eğrinin tekrar yükselmesi). Yine aynı eğimde çizilen doğrunun kestiği yük kritik yük'ü verir burada'da aynı kriter, $\Delta v \leqslant 0,25 \cdot \Delta v_x$ geçerlidir. Yanlız elde edilen F_x hem $\hat{F}$'den daha küçük hemde daha az plastik deformasyonla oluştuğundan, K_{Ic} hesabında $\hat{F}$ gözönüne alınır. Bu tip diagrama sahip metaller tip-III 'ü veren metallerden daha gevrektirler.

Tip-III

Bu tip eğriler daha ziyade sünek malzemelere ait eğrilerdir. Kararsız çatlak büyümesinin başladığı noktada eğride önemli bir değişim görülmez. Daha evvelcede belirtildiği üzere elastik bölgenin eğiminden % 5 daha küçük eğime sahip bir doğrunun bu eğriyi kestiği nokta kritik yük'ü verir. Yanlız bu değerin geçerli olabilmesi için 0,8 F_x ' de eğrinin doğrudan sapması olması gerekmektedir. Aksı takdirde plastiklik fazla olacağından K_{Ic} değerleri elde edilemez.

Kararsız çatlak açılmasında kritik gerilmeyi verecek kuvveti (F_Q ile gösterirsek) mutlaka belirlememiz gerekecektir. Şekil 5.8'de (T) ile gösterilen doğru, eğrilerin lineer olarak uzanan kısımları, (S) ile gösterilen doğru ise (T) doğrusundan % 5 meyilli olan doğrudur. Üç noktadan eğme numunelerinde (S) doğrusu (T) doğrusundan yukarıda verildiği şekilde % 5, Compack Tension ve Round Compack Tension numunelerinden elde edilen eğrilerde ise % 4 meyille alınmasının daha uygun çözümler vereceği belirlenmiştir.

F_Q , $\hat{F}$, F_x , F' , $F_{max.}$ ve ΔV ile ΔV_x değerlerinin belirlenmesi ile,

K_{Ic} ,

1- Kritik kuvvet değeri F_Q tespit edilir,

I. eğri tipinde, $F_Q = F_{max.}$

II. " " $F_Q = \hat{F}$ ile $\hat{F} \geqslant F_x$

III. " " $F_Q = F_x$

2- $\Delta V \leqslant 0,25 \cdot \Delta V_x$ olduğu ispat edilmeli,

(5.17)

3- K_Q hesabında,

3 noktadan eğme numunesinde, (3 PB)

$$K_Q^{(3\ PB)} = \frac{F_Q \cdot (S/4)}{B \cdot (W^2/6)} \sqrt{a} \quad Y^{(3\ PB)} \tag{5.18}$$

Compact tension numunesinde, (CT)

$$K_Q^{(CT)} = \frac{F_Q}{B \cdot W} \sqrt{a} \quad Y^{(CT)} \tag{5.19}$$

Round compact tension numunesinde, (RCT)

$$K_Q^{(RCT)} = \frac{F_Q}{B \cdot W} \sqrt{a} \quad Y^{(RCT)} \tag{5.20}$$

Buradan her üç numune formu için geçerli olan (Y) değerleri

3 noktadan eğme numunesinde, (3 PB)

$$Y^{(3\ PB)} = 1,93 - 3,07 \left(\frac{a}{W}\right) + 14,13 \left(\frac{a}{W}\right)^2$$

$$- 25,1 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25,8 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \tag{5.21}$$

Formülde, $0 \leqslant \frac{a}{W} \leqslant 0,6$ olmalıdır.

Compact tension numunesinde, (CT)

$$Y^{(CT)} = 29,6 - 185,5 \left(\frac{a}{W}\right) + 655,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2$$

$$- 1017 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 638,9 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \tag{5.22}$$

Formülde, $0,3 \leqslant \frac{a}{W} \leqslant 0,7$ olmalıdır.

ve son olarak,

Round compact tension numunesinde, (RCT)

$$Y^{(RCT)} = 29{,}6 - 162\left(\frac{a}{W}\right) + 492{,}6\left(\frac{a}{W}\right)^2$$

$$- 663{,}4\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 405{,}6\left(\frac{a}{W}\right)^4 \qquad (5.23)$$

Formülde, $0{,}3 \leqslant \frac{a}{W} \leqslant 0{,}7$ olmalıdır.

4- Bölüm 5.2.2'deki denklem 5.6 ve 5.7'den;

$$K_Q \leqslant \sigma_a \sqrt{\frac{a}{2{,}5}} \qquad (5.24)$$

$$K_Q \leqslant \sigma_a \sqrt{\frac{B}{2{,}5}} \qquad (5.25)$$

değerleri kontrol edilmeli,

5- Yukarıda anlatılan 2 ve 4. maddeler sağlanırsa, K_Q değeri çatlak mukavemeti için geçerli bir değer olarak,

$$K_Q = K_{Ic} \qquad (5.26)$$

şeklinde (Kritik tokluk değeri) belirlenecektir.

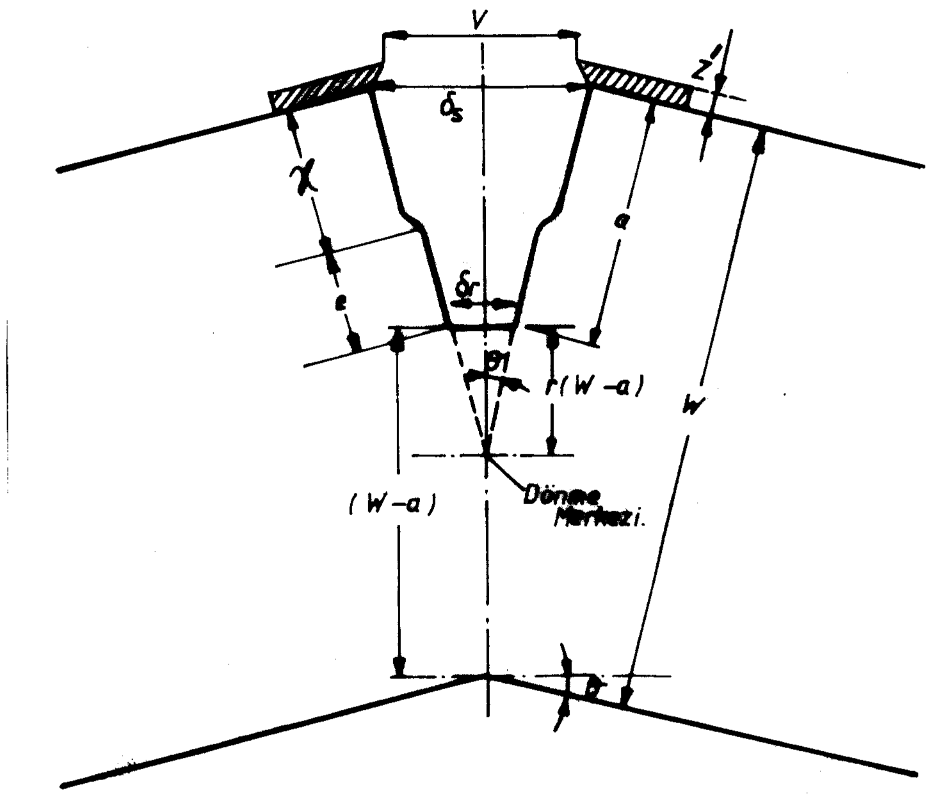
6- Yukarıda anlatılan 2 veya 4. maddelerden birisi, ve ya ikisi birden sağlanamaz ise, çatlak mukavemeti için belirlenen (K_Q) değeri kesinlikle geçersizdir.

Bu durumda (B) kalınlığı daha fazla olan numuneler ile yeni denemeler yapılması gerekecektir.

Malzemelerin sünek olması durumunda geçerli K_{Ic} değeri eldesi için çok büyük boyutlu numuneler gerektiğinden bu durum hem pratik değil hemde ekonomik açıdan büyük zor - luklar çıkarmaktadır. Bu zorlukların aşılması için yeni metodlar geliştirilmiştir.

5.3 COD (Crack-Opening-Displacement) Yöntemi.

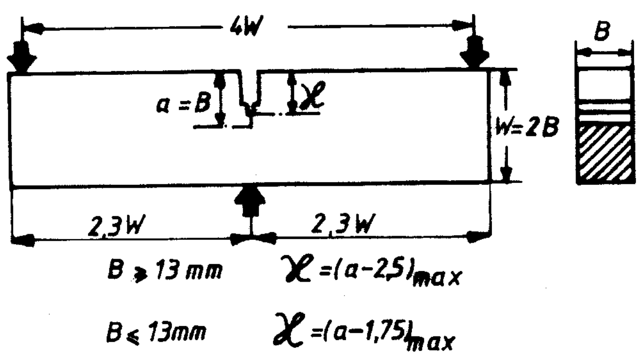
5.3.1 Giriş.



Şekil 5.9 COD çatlak açıklığı ölçüm modeli.

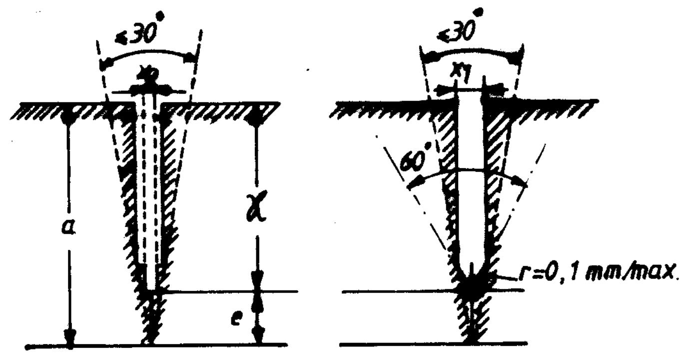
Plastik bölgenin çatlak ucunda oluşturduğu kütleşme miktarı na (δ) diyoruz. Çatlak profili, malzeme ve yükleme durumuna bağlı olarak değişme göstereceğinden (δ)'nun kritik değe rini deneysel olarak elde etmek zordur. Bunun için şekil'de görüldüğü gibi, çatlak ucu açılma miktarı (V) ile kütleşme miktarı (δ) arasındaki ilişki bulunarak kritik COD (δc) he saplamasına gidilir.

5.3.2 Numune Formu Ve Boyut Sınırlamaları.



Şekil 5.10 (δc) tayini için (3 PB) 3 noktadan eğme numunesi.

Şekilde verilen sınırlamalar aynen kullanılır. Numune kalınlığı (B)'nin (χ)'nın farklı değerler almasına göre alacağı değerler'de verilmiştir.



Şekil 5.11 (δc) tayini için numunedeki çentik formu.

Şekil 5.11'deki çentik'de;

$W = 25$ mm, $x_2 = 0{,}15_{max.}$ iken,

$$1{,}5\text{mm} \leqq x_1 < 1/16\ W \qquad (5.27)$$

sınırları arasında olmak zorundadır. Şekilde verildiği gibi e' yorulma çatlağı uzunluğu önünden itibaren açı'nın 30^o olması'da gerekir. Yorulma çatlağı uzunluğu (e) ise;

$$e = a - \chi \qquad (5.28)$$

olmalıdır. Akma gerilmesi ve numune kalınlığı ile bağımlı bir kırılma faktörü (K_f),

$$K_f < 0,63 \cdot \sigma a \cdot \sqrt{B} \qquad (5.29)$$

tespit edilir. Çatlağı deforme edecek min. kuvvet (F_a) ile gösterilirse, bu değer (a/W) ile bağımlı olarak,

$$F_a = \frac{K_f \cdot B \cdot \sqrt{W}}{C'(a/W)} \qquad (5.30)$$

denklemi yazılır. Burada $C'(a/W)$ değeri bir kalibreleme sabitidir, ve şekil 5.3'den alınır. (a/W) değeri ise,

$$0,45 \leqslant a/W \leqslant 0,55 \qquad (5.31)$$

sınırları arasında olmalıdır. Çatlak oluşumu, çatlak uzunluğundaki (0,05 . W) 'lik bir değişim sonucu gerçekleşecektir. Ayrıca kuvvetin uygulanma süresi,

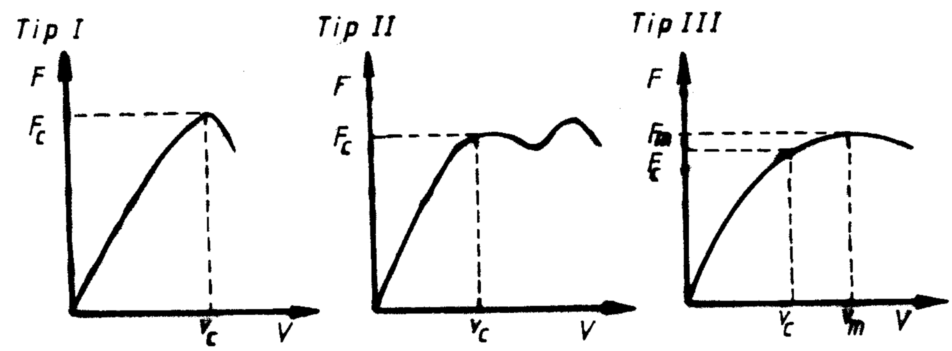
$$30 \text{ sn.} \leqslant t \leqslant 300 \text{ sn.} \qquad (5.32)$$

sınırları arasında olması gerekir.

5.3.3 Çatlak Açıklığı Ölçümü.

Bölüm 5.2.3'de olduğu şekilde gerçekleştirilir.

5.3.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.



Şekil 5.12 COD eldesi için elde edilen F-V eğrileri.

Yukarıdaki gibi eğriler xy yazıcısıyla elde edilip değerlendirilmeleri tiplere göre;

Tip-I

Az bir plastik deformasyondan sonra (bu arada kuvvet aniden düşmektedir) çatlağın kararsız bir şekilde yayılışı görülmektedir. Hesaplamada, kritik kuvvet (F_c) ile kararsız çatlak yayılması ifadesi (V_c) yukarıdaki şekildeki gibi alınır.

Tip-II

Bazı durumlarda (V) değeri büyürken kuvvet (F) sa - bit kalmaktadır. Kararsız çatlak yayılışı bir plastik bölge ile dengelenerek tekrar kuvvet artışı ile eğride yükselme o lur ve tekrar kararsızlık oluşarak eğri düşer, burada 1. yükselip düşen kararsızlık alınarak (V_c) büyümesine karşı - lık gelen (F_c) değeri hesaplamada dikkate alınır.

Tip-III

Fazla plastik deformasyon durumunu içermektedir, bu rada eğer seçilen ilk noktalarda çatlak yayılması başlama - mışsa (F_c) ve (V_c) yerine (F_m) ve (V_m) noktaları alınır.

Buradaki sonuçlar ile, V_c, F_c ile şekil 5.9'da dikkate alınarak (δc) için iki yöntem kullanılır, bunlar;

1-

$$\delta c = M \left[V_c - V_{el} \right] \tag{5.33}$$

Burada,

$$V_c \geqslant 2.V_{el} \tag{5.34}$$

Veyahut,

$$\delta c = M \frac{V_c^2}{4.V_{el}} \tag{5.35}$$

5.35 ifadesinde,

$$V_c \leqslant 2.V_{el} \tag{5.36}$$

alınır. Denklemdeki (M) değeri,

$$M = \frac{0{,}45\ (\ 1 - \frac{a}{W})}{0{,}45 + 0{,}55\ (\frac{a}{W}) + (\ Z'/W\ )} \tag{5.37}$$

şeklindedir, ifadedeki (Z') ise, şekil 5.9'da numune üst yüzeyinden itibaren, klip-gauge'nin tespiti için konulan parçanın yüksekliğidir. (V_{el}) ise, çatlak açıklığının elastik sınır değerini açıklayan bir ifadedir. Bu,

$$V_{el} = Z \cdot \frac{\sigma_a \cdot W \cdot (\ 1-\nu^2)}{E} \tag{5.38}$$

denklemdeki (Z) ise şekil 5.3'den alınabilir.

Çatlak oluşurken numune ortadan ikiye ayrılır ve bu olay bir dönme merkezi etrafında gerçekleşir. Bunu şekil 5.9'da görebiliriz.

2- Bu yöntemde,

$$\delta c = \frac{\left(1 - \frac{a}{W}\right)}{2 \cdot \frac{a}{W} + 3 \cdot \frac{z}{W} + 1} \cdot V_c \qquad (5.39)$$

denklemi kullanılır. Olay bir dönme merkezi etrafında olmaktaydı, bu merkez ile çatlak uzunluğunun son noktası arası mesafenin tecrübeler ile,

$$\frac{1}{3} \cdot (W - a) \qquad (5.40)$$

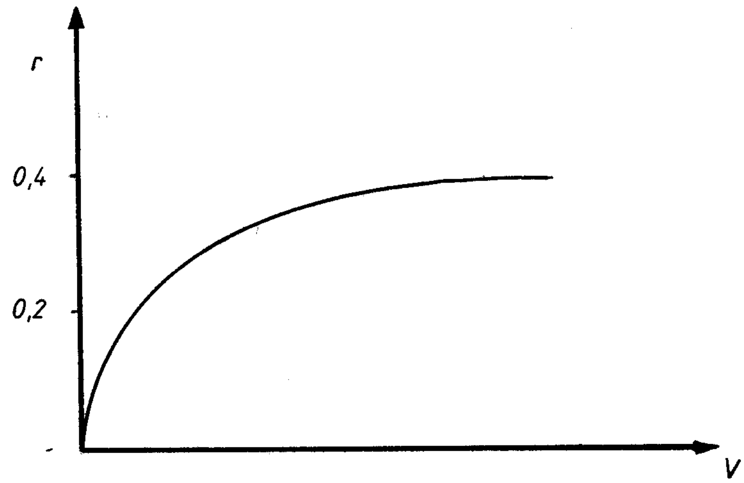
olduğu belirlenmiştir. Burada numune kalınlığının, $B \cong 50$ mm' ye kadar olması halinde (δc) nin,

$$0{,}062 \text{ mm} \leqslant \delta c \leqslant 0{,}625 \text{ mm} \qquad (5.41)$$

sınırları arasında değişim göstereceği belirlenir.

Yukarıda açıklanan 1. ve 2. maddelerde, (δc)'nin hesaplanmasında eğme numunesinin çatlak ucunun bir dönme merkezi etrafında dönerek açılması kabülü ile yapıldığı belirtilmiştir.

Dönme faktörü (r), test parçasında meydana gelen plastiklik ile ilgili olarak, şekil 5.13'de görüldüğü gibi değişir. Ortalama ($r \cong 0,33$) alınırken, aşırır plastiklik durumunda ($r \cong 0,40$) alınır.



Şekil 5.13 Dönme faktörü (r) ile (V)'nin değişimi.

Ayrıca test parçaları sınırlı bir plastik deformasyondan sonra kullanılacaklarından verilen yukarıdaki formüllerin BS 5762, 1979 standartlarında en son kullanılacak şekildeki ifadeleri ise, üç'üncü bir madde olarak, (δc) değeri,

3-

$$\delta c = K_f^2 \frac{(1-\nu^2)}{2\,\sigma_0 E} + \frac{0,4\ (W-a)V_p}{0,4\ W + 0,6\ a + Z'} \qquad (5.42)$$

5.42 ifadesinde,

$$K_f = \frac{C^{\prime}.F}{B.W^{1/2}} \tag{5.43}$$

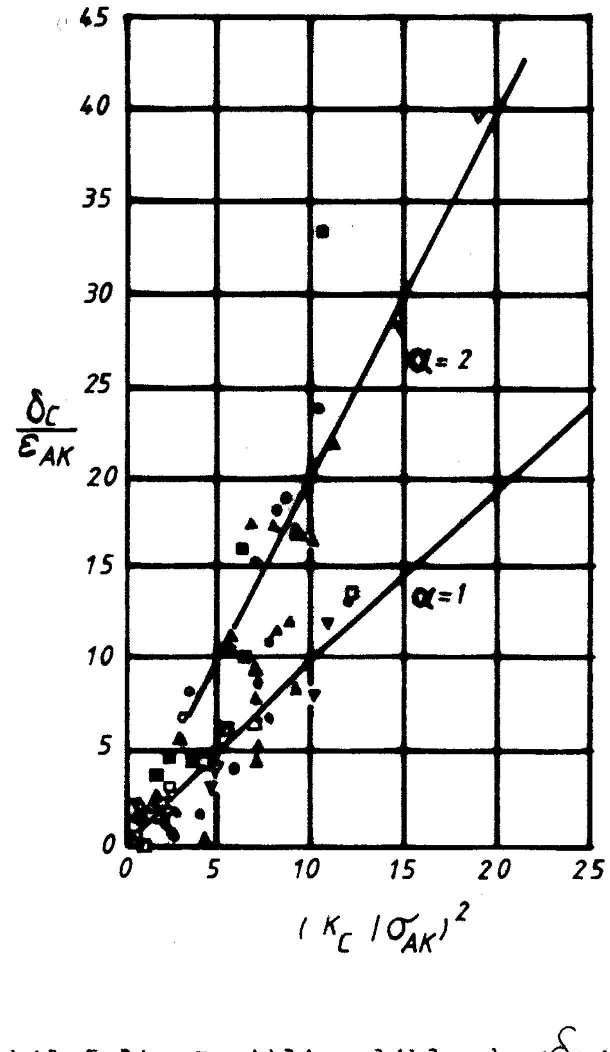
değerindedir. Formülde ($C^{\prime}$, $0{,}15 < a/W < 0{,}7$) değerleri arasındaki üç noktadan eğme numunesi için kompliyans katsayısı değerleridir. (V_p ise, V_i, V_c, V_u, V_m) çatlak ucu açılma miktarlarının plastik bileşenleridir. (V_p bileşenlerinin belirlenmesini, BS 5762:1979 standardın'da görebiliriz)

Robinson(17) ve Tetelman(18) adlı araştırmacılar, $B = 25.\delta c$ olduğunu göstermişlerdir. Bu sınırlılık K_{Ic} testindeki sınırlılıktan çok daha düşüktür. Dolayısıyla daha küçük numuneler kullanarak çatlak ucundaki kütleşme miktarı (δc) kritik COD'un değeri, kırılma tokluğunun değerlendirilmesinde kullanılır.

Eğer ($F_{max.}/F_x$) $< 1{,}1$ ise, (5.8 nolu şeklimizden) bu takdirde kritik çatlak açıklığı olarak lineer bölgeden % 5 daha düşük eğime sahip doğrunun eğriyi kestiği nokta alınır. Böylece K_{Ic}'ye karşılık gelen (δc) elde edilir. Malzeme kalınlaştıkça (δc) değişimi daha yüksek sıcaklıklara itilir. Durumu şekil 5.14'de görmek mümkündür. Ayrıca K_{Ic} ile (δc) arasındaki bağıntıyı veren ifade,

$$\delta_ç = \alpha.\varepsilon a.\left(\frac{K_c}{\sigma_a}\right)^2 \tag{5.44}$$

5.44'de verilen ifade, çeşitli çelikler için incelenmiş ve aşağıdaki şekil 5.14'de görüldüğü gibi ($1 < \alpha < 2$) aralığında uygunluk sağlanmıştır. Bu netice'de bize (δc)'nin malzemenin kırılmaya karşı davranışında (K_c) gibi yeterli bilgi verdiğini göstermektedir.



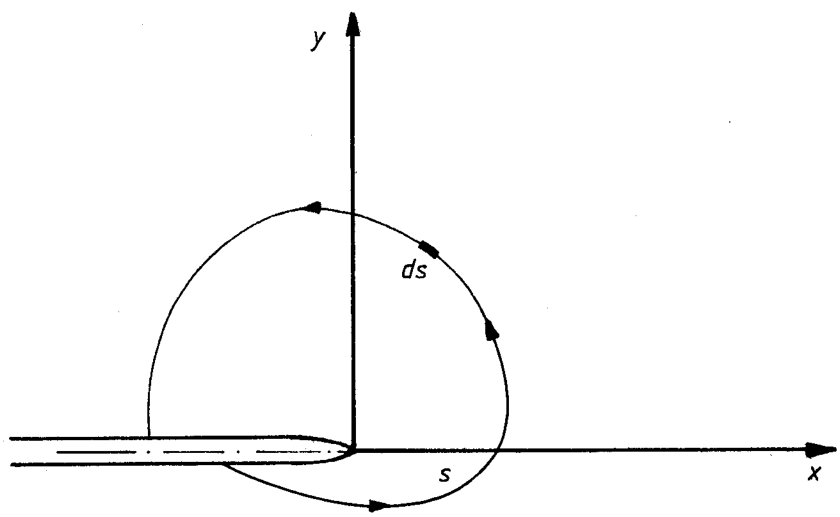
Şekil 5.14 Çeşitli çeliklerde ($\delta c / \varepsilon a$) ile $(K_c / \sigma a)^2$ arasındaki bağıntı.

5.4 J İntegrali.

İçerisinde (2a) uzunluğunda çatlak bulunan ideal - gevrek bir malzemede, zorlanma karşısında çatlak büyürse mekanik enerji değişimi;

$$- \frac{d(-W' + U_{el})}{B.d(2a)} = G_{Ic} \tag{5.45}$$

idi. Bu çatlak ucu civarında çizilen bir kapalı eğri içinde enerji durumu;



Şekil 5.15 J integralini tarifleyen kapalı eğri.

yukarıdaki şekil dikkate alınarak,

$$\frac{W'}{B} = \int_s \vec{\sigma}.\vec{U}.ds \tag{5.46}$$

$$\frac{U_{el}}{B} = \int_A U_{el}.dA \tag{5.47}$$

denklemlerde,

$\vec{\sigma}$ etkiyen gerilme vektörü.

$\vec{U}$ deplasman vektörü.

U_{el} elastik enerji yoğunluğu.

dA eğri içindeki alan.

şeklindedir, bu ifadelerin toplamının $(-W'+U_{el})/B$ çatlak boyuna göre değişimi, uzun işlemlerden sonra,

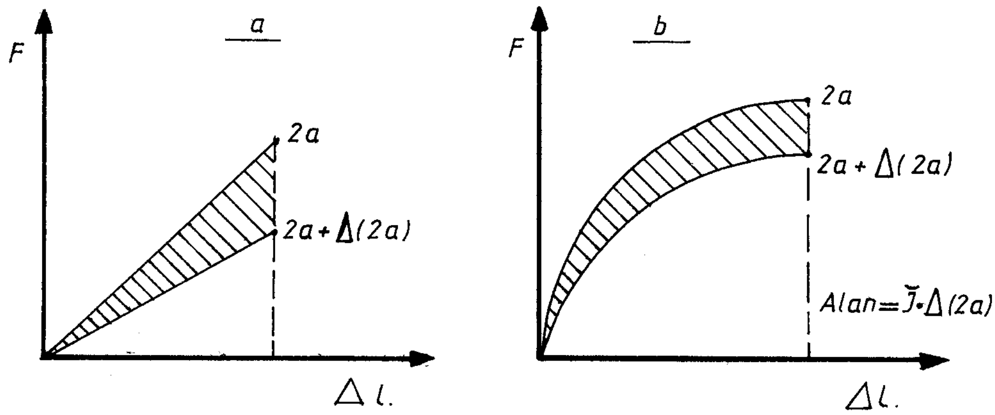
$$-\frac{1}{B}\cdot\frac{d(-W'+U_{el})}{(2a)}=\int_s\left[\vec{\sigma}\left(\frac{\partial\vec{U}}{\partial x}\right)ds+U_{el}\cdot dy\right]=J \qquad (5.48)$$

yani $G_{Ic}=J$ dir.

Yanlız $G_{Ic}=J$ durumu lineer-elastik malzeme için geçerli dir. Çünki plastik bölgede yapılan deformasyon işinin hepsi mekanik enerjiye çevrilemez (plastik deformasyon nedeniyle) aşağıdaki şekilde (a)'da Δl =sbt. halinde lineer-elastik malzemenin farklı iki çatlak boyu durumundaki elastik enerji farkı 5.45 nolu denkleme göre,

$$G_{Ic}\cdot B.d(2a)=J.B.d(2a) \qquad (5.49)$$

ifadesine eşittir. Elasto-plastik bir cisimde ise, şekil 5.16 (b)'de deformasyon işinin hepsi bölgedeki(elastik) mekanik enerjiye çevrilmediğinden bu bağıntıyı, yani $G_{Ic}.B.d(2a)$ bağıntısını yazamayız. Yanlız 5.48 nolu denklem deki integral ister Lineer-elastik isterse Elasto-plastik malzeme olsun yola bağlı değildir. Yani çatlak civarında çizilen herhangi bir kapalı eğri boyunca integralin değeri aynı kalmaktadır. Diğer taraftan integral ifadesine dikkat edilecek olursa bunun çatlak uzunluğundaki artışa göre, mekanik enerjideki değişimi verdiği görülür. Ayrıca yola bağlı olmaması bu değerin tıpkı (K) ve (G) gibi malzemeye ait karakteristik bir büyüklük olduğunu gösterir. Yanlız kırılma kriteri olarak kararsız çatlak büyümesinin sınırını vermez. (İdeal gevrek malzemeler hariç)



Şekil 5.16 Lineer-elastik ve Elasto-plastik malzemelerde F-Δl eğrileri.

Kısaca J integrali belli bir kritik değere çıkınca J_c veya J_{Ic} çatlak büyümesi başlar. Bu duruma göre şekil 5.16 (b) deki elasto-plastik malzemenin $\Delta l =$ sbt. durumunda farklı iki çatlak boyu durumundaki enerji farkının (U) çatlak boyuna göre değişimi,

$$-\frac{1}{B} \cdot \frac{dU}{d(2a)} = J \qquad (5.50)$$

Yani taralı alanın değeri J.B.d(2a) olur. Yani çatlağın (2a) uzunluğundan (2a+d(2a)) uzunluğuna büyüyerek erişmesi halinde, iki uzunluk arasındaki mekanik enerjinin çatlak boyuna göre değişiminin farkını verir. Yani J integrali G enerji bırakma hızı ile ilgilidir. Küçük miktarlardaki plastik deformasyon durumları için,

$$J = G \qquad (5.51)$$

yazılabilir, Kritik değerleri ise,

$$J_{Ic} = G_{Ic} \qquad (5.52)$$

olacaktır. Büyük miktarda plastik deformasyon olduğu zaman;

$$J_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E} \qquad (5.53)$$

şeklindedir.

Kritik (J_{Ic}) parametresini tanımlamak için iki yaklaşım ileri sürülmüştür.

1- Begley(19) ve Landes(20)'in çok numune yaklaşımı.

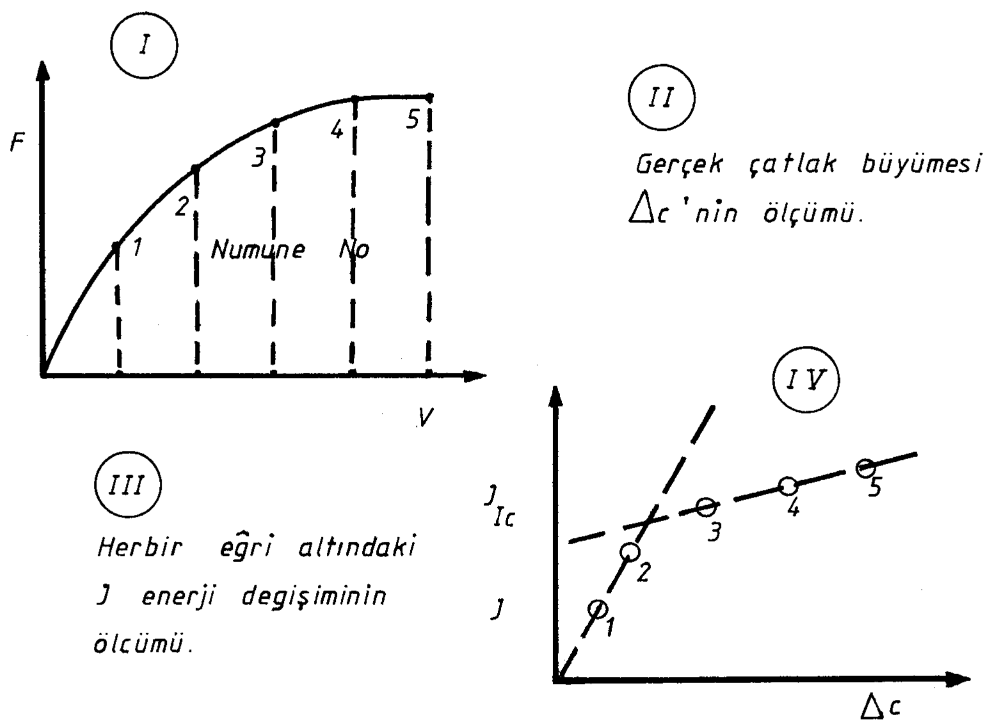
2- Paris(21)'in tek numune yaklaşımı.

Çok numune yaklaşımıyla (J_{Ic}) kritik (J) bulunmasının ana -

hatları şekil 5.17'de görülmektedir. Begley(19) ve Landes böyle bir diagramın iki yaklaşık eğriye sahip olduğunu, birinci lineer eğrinin gerçek çatlak büyümesinden önce çatlağı körleştirmeye çalıştığını, ikinci eğrinin ise çatlağın kendi büyümesine ortak olan eğri olduğunu göstermişlerdir. Bu iki lineer eğrinin kesiştikleri yerdeki değer, kritik $J-J_{Ic}$ değeridir. Bu değerden (K_{Ic}) değeri hesaplanır. Bu testin numune boyutu ile ilgili sınırlamasının;

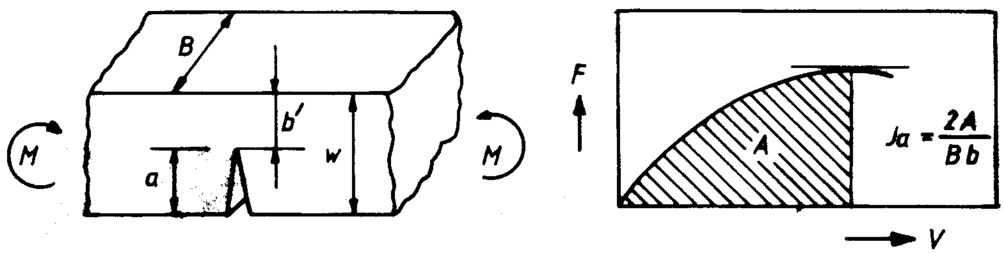
$$W - a = 50 \cdot \left(\frac{J_{Ic}}{\sigma_a}\right) \qquad (5.54)$$

olduğu tecrübelerden bulunmuştur.



Şekil 5.17 Çok numune yaklaşımıyla kritik-J (J_{Ic})'nin bulunması.

Paris(21)'in tek numune yaklaşımı ise şekil 5.18'de göste - rilmiştir.



Şekil 5.18 Tek numune yaklaşımıyla (J_{Ic})'nin bulunması.

Eğer, $$M_{max.} > 0{,}3.B.b^2.\sigma a_{0,2} \tag{5.55}$$

ve, $$A,B,b' > 50.\left(\frac{J_Q}{a}\right) \tag{5.56}$$

ise, $$J_Q = J_{Ic} \tag{5.57}$$

olur. Tek numune yaklaşımıyla kritik-J(J_{Ic}) değerini bulurken, şekil 5.18'deki gibi boyutlandırılmış numunede F-V eğrisinde görülen max. yüke karşılık gelen çatlak başlangıç noktasına kadar absorbe edilen enerji kullanımından istifade edilir. Yukarıdaki ifadelerden, 5.55, 5.56, 5.57'den,

$\sigma a_{0,2}$ = % 0,2 ye tekabül eden akma gerilmesi.

σkop = Kopma mukavemeti.

$\sigma a = \frac{1}{2}(\sigma a_{0,2} - \sigma kop)$'yı simgeler.

Paris'in tek numune yaklaşımında kullanılan numunelerin henüz standardı geliştirilmemiştir. Çalışmalar devam etmektedir.

J-İntegrali üzerindeki kuşkular, kritik-J(J_{Ic})'nin hassas olarak bulunup bulunmadığı ve gevrek malzemelerde G_{Ic} ile J_{Ic} arasındaki geliştirilen bağıntılara duyulan tereddütler üzerindedir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

6.1 Giriş.

Önceki 5 bölüm'de, kırılma mekaniği'nin temel esasları ile kırılma mekaniği'nde önemli bir büyüklük olan Kırılma şiddeti faktörü'nü belirliyebilmek için, geçerli olacak kırılma tokluğu ölçüm yöntemleri açıklanmaktadır.

Bu son bölüm'de ise, önceki 5 bölümde anlatılan tüm esaslara uygun olacak şekilde, seçilen numuneler ile deneysel çalışmanın yapılışı ve bu çalışma sonucu elde edilen eğrilerin değerlendirilmesiyle, bulunan sonuçlar verilmektedir.

6.2 Seçilen malzeme'ler.

Deneysel çalışma'da gevrek malzeme'lerdeki olayları gözlemek için Special-K ve Plexiglas ile sünek malzeme'lere örnek olabilecek Alüminyum seçilmiştir.

6.2.1 Special-K

Malzeme yüksek alaşımlı çelikler sınıfındadır. Standartlarda gösterimi,

2080 X 210 Cr 12 Ç.512200

şeklindedir.

Kullanıldığı yerler, kesme, delme, basma, (4mm kalınlığa kadar), soğuk işleme takımları, tel çekme haddeleri broşlar, tuğla kalıpları, her çeşit sübap yatakları (yuvaları).

Tablo 2. Special-K'nın bileşimindeki maddeler ve oranları.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Diğerleri.
2-2,5	0,30	0,30	11,5	-	-

Tablo 3. Çekme ve akma gerilmeleri ile uzama, sıcakta çekme mukavemetinin (en az) değişimi.

$\sigma_ç$ (kp/mm^2)	σ_a (kp/mm^2)	δ (%)	100	200	300	400	500	600	700	800
						(C^o)				
80-95	50	8	75	70	65	60	40	20	10	-

Tablo 4. Isıl işlem dereceleri. (C^o)

Soğuk şekillendirme	1050-850
Yumuşatma	800-840
Sertleştirme, (yağ)	930-960
" (hava)	950-980
Meneviş	100-400

Tablo 5. Sertlik değerleri ve sertliğin menevişle değişimi.

Yumuşak tavlanmış halde,				220-250	HB
Sertleştirilmiş halde,				63- 64	RC
Menevişlenmiş halde,					
C^o	100	200	300	400	
HRC	63	62	60	58	

Tablo 6. Ebada göre sertleşme kabiliyeti.

Çap (mm)	Yüzey	Merkez
25	64	64
50	64	63
75	63	62
100	63	60

6.2.2 Alüminyum

Amerikan standartlarında gösterim, (1100) şeklindedir.

Tablo. 7 Alüminyum malzemenin özellikleri.

Kompozisyon, (%)	Al: 99,0 Min.
Fiziksel özellikleri,	
Özgül ağırlık (Gm/cm^3)	2,713
Ergime noktası (^oC)	645 - 660
Isı iletkenliği (25^oC)	
(KCal/Sa/Cm/^oC) Tavlanmış	190
Genleşme katsayısı	
(20 - 100 ^oC) ($^oC^{-1}$)	23,6 . 10^{-6}
Isınma ısısı (100^oC)	
(KCal/Kg/^oC)	0,22
Özdirenç (20^oC) ($\mu\Omega$- Cm)	
Tavlanmış	3,92
Sert (H18 veya H38)	3,02
Mekanik özellikleri,	
Gerilmede elastik modül,	
(Kg/cm^2).10^3	705
Çekme mukavemeti	
(24 ^oC) (Kg/cm^2)	
Tavlanmış (O)	915
Yarı sert	1265 (H14)
Sert	1685 (H18)

Akma mukavemeti	
(24 °C) (Kg/cm^2)	
Tavlanmış (O)	350
Yarı sert	1195 (H14)
Sert	1545 (H18)
Uzama (5 cm'de)	
(24 °C) (%)[a]	
Tavlanmış (O)	35 - 45
Yarı sert	9 - 20 (H14)
Sert	5 - 15 (H18)
Sertlik (Brinell)[b]	
Tavlanmış (O)	23
Yarı sert	32 (H14)
Sert	49 (H18)
Dayanıklılık sınırı	
(Kg/Cm^2)	
Tavlanmış (O)	350
Yarı sert	490 (H14)
Sert	635 (H18)
Kesme mukavemeti	
(Kg/cm^2)	
Tavlanmış (O)	635
Yarı sert	775 (H14)
Sert	915 (H18)

Isıl işlem

Tavlama sıcaklığı (°C)	345

İşlenme özellikleri

Sıcak işleme sıcaklığı (°C)	250 - 510
İşlenebilmesi	İyi

Kaynak özellikleri(c)

Oksi-Asetilen kaynağı	A
Asal Gaz-Ark kaynağı	A
Elektrik direnç kaynağı	A

Korozyon özellikleri

Kır, kent ve sanayi atmosferine çok dayanıklıdır. Tatlı ve tuzlu suya, besin artıklarına, organik asit ve anhidritlere, ester, keton, yağ, gaz, gres, mum ve diğer petrol ürünlerine, amonyak ve bileşiklerine, % 82 nin üzerinde derişikliği olan nitrik asitlere, amidlere, nitroparafinlere, taş kömürü ürünlerine, hidrojen peroksite ve bir çok inorganik tuz eriğine karşı dayanıklıdır.

Bulunduğu şekiller

Saç, levha, kütük, tel, çubuk, perçin, dövme, yaprak.

Kullanma yerleri

Kablo zırhları, magnezyum parçalar için perçin.

Tablodaki açıklamalarda yer alan,

(a) Değerler sırasıyla 1,6mm. saç ve 12,5mm. çapında çubuk.

(b) 500 Kg. yük altında 10mm. çaplı bilya.

(c) Yalnız Alüminyum ve alaşımları arasında yapılan bir oranla, (A) çok iyi, (B) iyi, (C) orta, (D) kötü.

DIN 1725'de gerekli diğer bilgiler mevcuttur.

6.2.3 Pleksiglas.

Son zamanlarda birçok alanda yararları görülen, İngiltere'de kullanılan cinsleri Perspex ve Diakon ile Almanlar'ın Plexi-glas olarak tanımladıkları veya Lucite'de denilen bu plastik malzemelerin yapısı, Metil metakrilat gibi monomerik bileşiklere dayalı Akrilik polimerlerdir.

Bu polimerler etilen'den türevlenmişlerdir. Başlangıç maddesi yani birim molekülü Metil metakrilat oluşturmaktadır.

$$\begin{array}{ccc} H & & COOCH_3 \\ | & & | \\ C & = & C \\ | & & | \\ H & & CH_3 \end{array} \qquad \text{(Metil metakrilat)}$$

Burada etilen molekülündeki hidrojenler'den biri bir ester grubu ($COOCH_3$) ve diğeri ise (yine aynı karbon üzerindeki H olmak üzere) bir metil (CH_3) grubu ile yer değiştirerek Metil metakrilat'ı meydana getirmişlerdir. Bu bir katalizör yardımıyla ısıtıldığında etilen gibi polimerizasyona uğrar. Elde edilen Metil metakrilat plastiği, kristal kadar saf, hafif, sert ve dayanıklı bir maddedir. Fakat en kötü yanı sert maddelerle kolayca çizilebilmesidir.

Perspex'in su, alkaliler, sulu inorganik tuzlar ve sulu asitlerin çoğuna direnci yüksektir. Nitrik, sülfirik -

kromik gibi koyu oksitleyici asitlerin çoğu ve hidroklorik asit gibi bazı sulu asitlerle reaksiyona girerek bozulur. Birçok organik asitler malzemede şişme, çatlama, mekanik za yıflama meydana getirirler ve hatta tamamiyle eritebilirler. Aşağıdaki tabloda Pleksiglas'ın birçok kimyasal maddelere karşı durumları belirtilmiştir. Bazı hallerde yoğunluklar arttırılabilirse'de malzemede çatlama olabilir.

Tablo 8. Perspex'in kimyasal maddelere karşı durumu.

Kimyasal bileşik.	20^{o}C'da "Perspex" in direnci.
Asetik asit	% 10'a kadar
Amonyak	0,880 özgül ağırlığa kadar
Kromik asit	% 10'a kadar, lekelenme olabilir
Sitrik asit	Doymuş eriyiğe kadar
Formaldehid	% 40'a kadar
Formik asit	% 10'a kadar
Gliserin	Tamamiyle dayanıklı
Hidroklorik asit	% 10'da hafif çizgi oluşumu
Hidroflorik asit	Uygun değil
Hidrojen peroksit	% 10'a kadar (hacmen)
Laktik asit	Hafif çizgi oluşumu
Nitrik asit	% 10'a kadar
Okzalik asit	Doymuş eriyiğe kadar
Fosforik asit	% 10'a kadar
Sodyum hidroksit	Doymuş eriyiğe kadar
Sodyum hipoklorit	% 10 mevcut klora kadar
Sülfirik asit	% 10'a kadar
Tartarik asit	Doymuş eriyiğe kadar

Tablo 9. Pleksiglas'ın oda sıcaklığında ölçülen önemli ortalama fiziksel özellikleri.

Özgül ağırlık	1,19
Çekme dayanımı	840 kg/cm^2
Kırılma dayanımı	1400 kg/cm^2
Esneklik modülü	3.10^4 kg/cm^2
Isıl distorsiyon noktası (18,5 kg/cm^2 yükleme)	100 °C
Isıl genleşme katsayısı	$7,3.10^{-5}$/ °C
Özgül ısı	0,35
Isıl iletkenlik ($cal.cm/cm^2.°C.san$)	$4,5.10^{-4}$

Pleksiglas kesilebilir, delinebilir, tornalanabilir frezelenebilir, vidalanabilir, kılavuz çekilebilir ve kazınabilir. Bütün bu işlemlerden sonra yüzeyi tekrar ilk parlaklığına getirmek mümkündür. Derin çizikler ve markalama işaretleri gittikçe daha artan incelikteki zımparalama ve nihayet parlatma suretiyle tamamen yok edilebilir. Pleksiglas ın işlenmesinde ağaç ve metal tezgahları kullanılmışsa'da genellikle metal işleme tezgahları tercih edilir. İşlem esnasında malzemenin bir hava jetiyle soğutulması şarttır, aksi halde pleksiglas yumuşar ve kesilen yüzeye yapışır. Soğutma için su ve diğer bazı yağlar kullanılabilir.

Metil metakrilat plastiğinin korrozyon alanındaki uygulamaları, daha çok fotoğraf tavaları, galvano plasti tamburları, geçirgen pencereler ve denetim pencereleri şeklindedir. Günümüzde dişçilikte, sun'i mücevheratçılıkta, laboratuvar eşyası olarak ve uçak camlarının imalatında kullanılır. Teknik bakımdan büyük bir özellik taşıyan organik sun'i camlar'da Metakril (Meta-cryl) asidi metil esteridirler. Bu camlar adi cam'dan hafif, tamamen renksiz, saydam olup normal cam gibi kırılmamaktadırlar. Güneş ve yağmur gibi etkilerdende etkilenmezler. Tüm bu özellikleri sebebiyle bu camlar bilhassa nakil vasıtaları içinde pek uygundurlar.

6.3 Kırılma Tokluğu Ölçüm Yönteminin Tespiti.

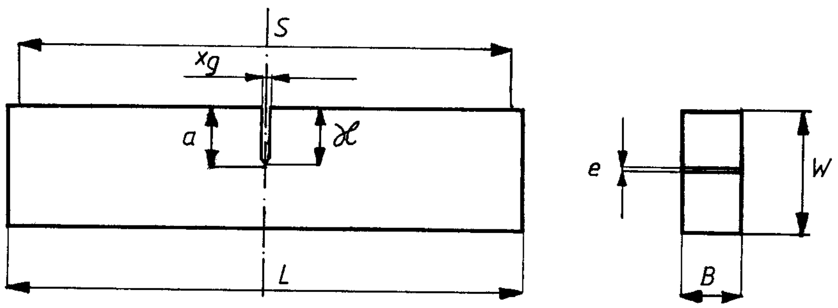
Gevrek malzemeler için (Special-K ve Pleksiglas) K_{Ic} düzlem deformasyon kırılma tokluğu test yöntemi kullanışlıdır. Sünek malzemeler için ise (Alüminyum), COD ve J integrali yöntemleri tatbik edilmelidir. J integrali test yönteminin henüz standart'lara geçmemiş olması, çok numune ve tek numune tercihinin hangisi ile testin yapılacağının belirlenememesi nedeniyle, halen standardı yapılmış ve sü - nek malzemelerde kullanılabilecek durumda olup, amprik formülleri geliştirilmiş olan COD yönteminin, kırılma tokluğu ölçüm yöntemi olarak, deney için belirlenmesi uygun olacaktır.

6.4 Deney Parçalarının Boyutlandırılması Ve Hazırlanması.

Seçilen malzemeler için, bölüm 6.2'de kırılma tokluğu ölçüm yöntemleri belirlenmişti. Bu yöntemlerin açıklamalarının yapıldığı,

K_{Ic} için;

Bölüm 5.2.2'de numune formu ve boyut sınırlamalarında verilen tüm esaslara uyarak, şekil 5.4'deki numune formlarından (3 PB), 3 noktadan eğme numunesi seçilmiş tir. Boyut sınırlamaları aynen esas alınarak, numune ölçüleri aşağıdaki şekilde verildiği gibidir.



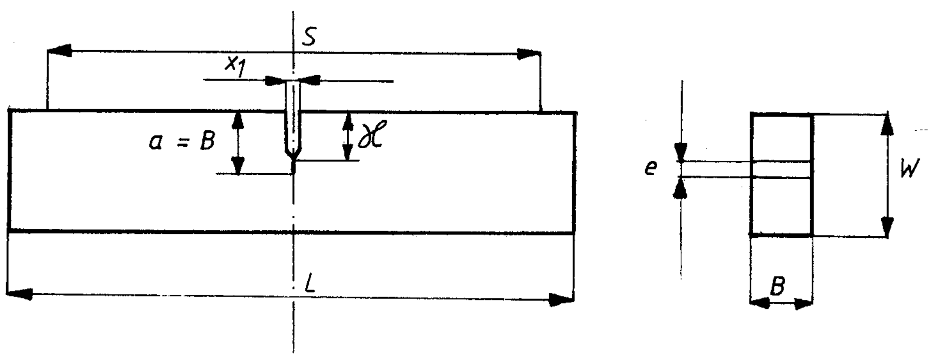
$a = 8$ mm.
$e = 0,4$ mm.
$\varkappa = 7,6$ mm.
$L = 67,2$ mm.
$S = 64$ mm.
$W = 16$ mm.
$B = 8$ mm.
$x_g = 0,8$ mm.

Ölçüler boyut sınırlamalarına uygundur.

Şekil 6.1 K_{Ic} numunesi için belirlenen kesin ölçüler.

COD için ise;

Bölüm 5.3.2'de numune formu ve boyut sınırlamalarında verilen tüm esaslara uyarak, şekil 5.10'daki nu mune formu (3 PB), 3 noktadan eğme numunesi seçilmiştir. Boyut sınırlamaları aynen esas alınarak, numune ölçüleri aşağıdaki şekilde verildiği gibidir.



$a = 8$ mm.
$e = 1{,}75$ mm.
$\mathcal{H} = 6{,}25$ mm.
$S = 64$ mm.
$L = 73{,}6$ mm.
$W = 16$ mm.
$B = 8$ mm.
$x_1 = 1{,}5$ mm.

Ölçüler boyut sınırlamalarına uygundur.

Şekil 6.2 (δc) numunesi için belirlenen kesin ölçüler.

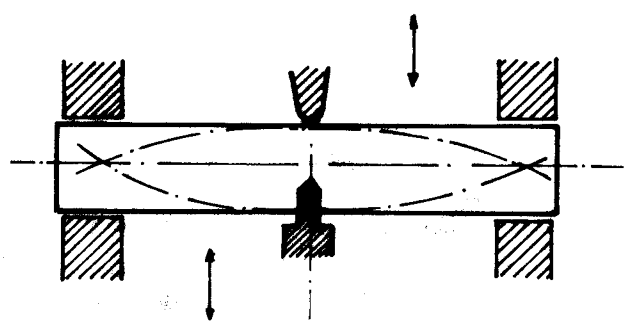
Çentik açma;

K_{Ic} ve c numunelerindeki çentikler, bölüm 5.3.2'deki şekil 5.11'de çentik formu için verilen ölçülere uyacak biçimde testere ile açılmıştır. Çentik ucunun -

60^{o} lik açısı ve 0,1 mm. olması istenen radyüsü için ayrı bir bıçak yapılmıştır. Bu bıçak ile BS 5762 standardındaki şartlarda sağlanmıştır.

Yorulma çatlağının açılması;

Yorulma çatlağı 300 saykıl/dak. titreşim yapan bir yorulma cihazında açılmıştır. Şematik gösterilişi aşağıdaki şekilde olduğu gibidir.



Şekil 6.3 Yorulma çatlağının açılmasının şematik olarak gösterilişi.

Deney numunelerine yorulma çatlağı açarken BS standardının çatlak boyutu ve yorulma çatlağı boyu ile ilgili sınırlamalara tamamen uyulmuştur. Çatlağın yayılma düzleminden sapmasının 10^{o} yi geçmediği'de büyüteçle gözlenmiştir.

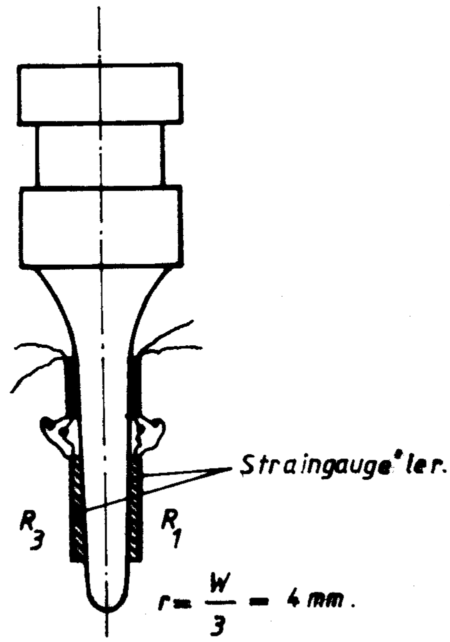
6.5 Test Ekipmanları.

Deneysel çalışmada kullandığımız test ekipmanları; 2 adet kuvvet ölçer, çentik ucu açılmasını ölçer Clip-gauge numune eğme aparatı, xy yazıcı recorder, amplifikatör ve de nemenin yapıldığı test makinasından oluşmaktadır.

6.5.1 Kuvvet Ölçer.

Deney için seçtiğimiz malzemelerimizden Special-K çok sert ve gevrek, Pleksiglas yine çok sert ve gevrek fa - kat Special-K'ya nazaran çok daha düşük kuvvet değerlerinde kırılabilmektedir, Alüminyum ise sünektir ve yine daha dü - şük yüklerde kırılabilmektedir. Bu doğrultuda Special-K mal zemesini kırmak için hazırladığımız kuvvet ölçer'in (numune ye bir noktadan kuvvet tatbik eden cihaz'ın), basma anında deforme olmaması için, Straingauge'lerin yapıştırıldığı yü-zeylerin bulunduğu kalınlığı 4 mm. olarak, aşağıdaki şekil-de görüldüğü gibi hazırlanmıştır.

Oysa, Alüminyum ve Pleksiglas malzemelerinin daha düşük kuvvetlerle kırıldığını bilirtmiştik, bu durumda elde edilen sinyallerin daha iyi algılanabilmesi için bu kez, St raingauge'lerin yapıştırıldığı yüzeylerin kalınlığı 2 mm o-lan ikinci bir kuvvet ölçer hazırlanmıştır.



Şekil 6.4 Deneyde kullanılan kuvvet ölçerin şematik gösterilişi.

Kuvvet ölçümü için direnci 120 Ω' luk, gauge faktörü 2,07 olan Straingauge'lerle bir köprü devresi kurulmuştur. Wheatstone köprü devresi II. kuralına göre dengelenmemiş durumdaki köprü devresinde, zıt kollardaki dirençler, değişimlerinin toplamı kadar çıkış verirler. Dirençler basma kuvveti etkisinde kaldıklarında;

$$(-\delta R_1 \mp \delta R_{1t})+(-\delta R_3 \mp \delta R_{3t}) = -\delta R_1 - \delta R_3 \mp \delta R_{1t} \mp \delta R_{3t} \quad (6.1)$$

şeklinde yazılır. Burada, (R_1), (R_3) dirençler ve (R_{1t}) ile (R_{3t}) aynı dirençlerin sıcaklıktan etkilendikleri zamanki değerlerini göstermektedir.(+ sıcaklık artışında veya - sıcaklık düşmesi durumunda)

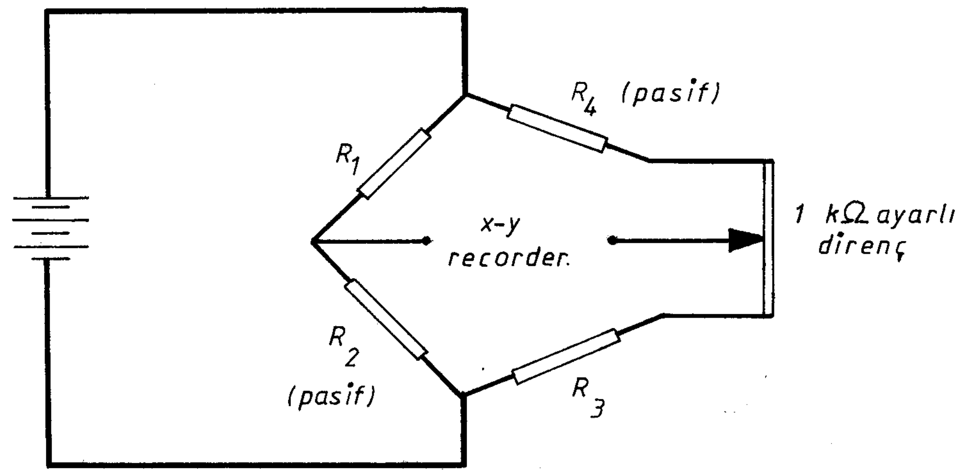
Kullanılan dirençler eşit olduğunda $(R_1 = R_3)$ en son denklem (6.1)'in sonucu,

$$-2\delta R \mp 2\delta R_t \quad (6.2)$$

olur. Dirençler basma kuvvetlerine maruz kaldıklarından zıt yönde çıkış verirler. Fakat sıcaklık kompenzesyonu sağlanmış olmaz. Bu nedenle pasif direnç kullanarak köprü devresindeki dirençlerin sıcaklıktan etkilenmemesi sağlanmış olur. Pasif direnç kullanılınca denklem sonucu, Wheatstone köprü devresi I. kuralına göre yazılırsa,

$$(-2\delta R \mp 2\delta R_t)-(\mp \delta R_t \mp \delta R_t) = -2\delta R \quad (6.3)$$

olur. XY Recorder'ında kalem ayarı sağlamak için Wheatstone devresine 1 kΩ'luk ayarlı direnç konmuştur.(Şekil 6.5)



Şekil 6.5 Kuvvet ölçer'in Wheatstone köprü devresi.

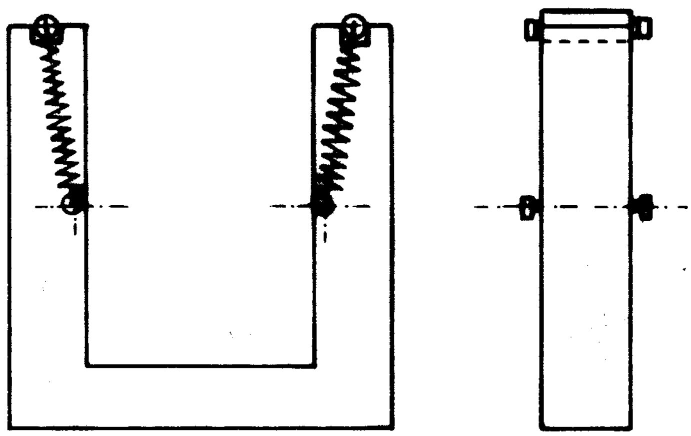
6.5.2 Çentik Ucu Açılmasını Ölçer, Clip-gauge.

Çatlak açıklığı (V)'nin ölçümü için, bölüm 5.2.3'de (çatlak açıklığı ölçüm düzeninde) yapılan tüm açıklamalar ile, şekil 5.7 c,b ve a'da verilen düzenek aynen kullanılır.

Burada Straingauge'lerin tespit edildiği parçalar yay çeliğinden 0,5 mm kalınlık, 20 mm genişlik ve 40 mm uzunluğunda 2 adet parça ile bir gövdeye ve bu çelik parçala rın üzerine dirençleri 120Ω ve gauge faktörü 2,07 olan 4 adet Straingauge, şekil 5.7.c'deki gibi tespit edilmişler - dir. Clip-gauge'deki yay uçları çakı tarafından tutulacak şekilde yuvarlatılmıştır. Clip-gauge'nin sinyallerini alabi leceğimiz Wheatstone köprü devre şeması ise şekil 5.7.b' de olduğu gibidir.

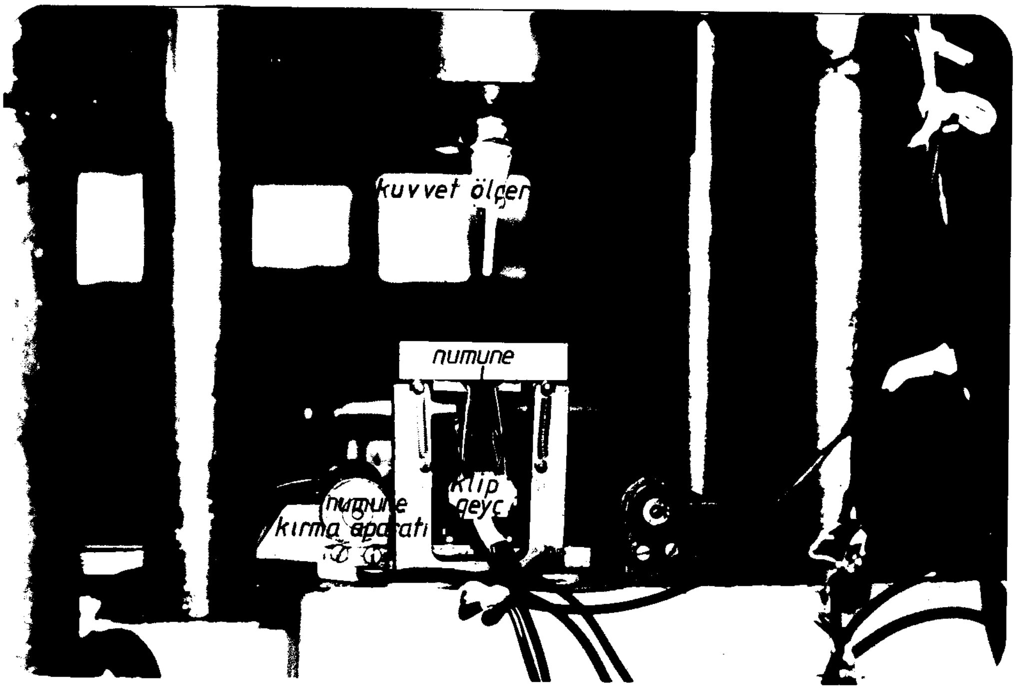
6.5.3 Numune Eğme Aparatı.

Hazırlanan test numunelerinin üzerinde kırılmasını sağlıyacak aparatın boyutları BS 5762 standardındaki esasla ra uyularak aşağıdaki şekilde olduğu gibi yapılmıştır.

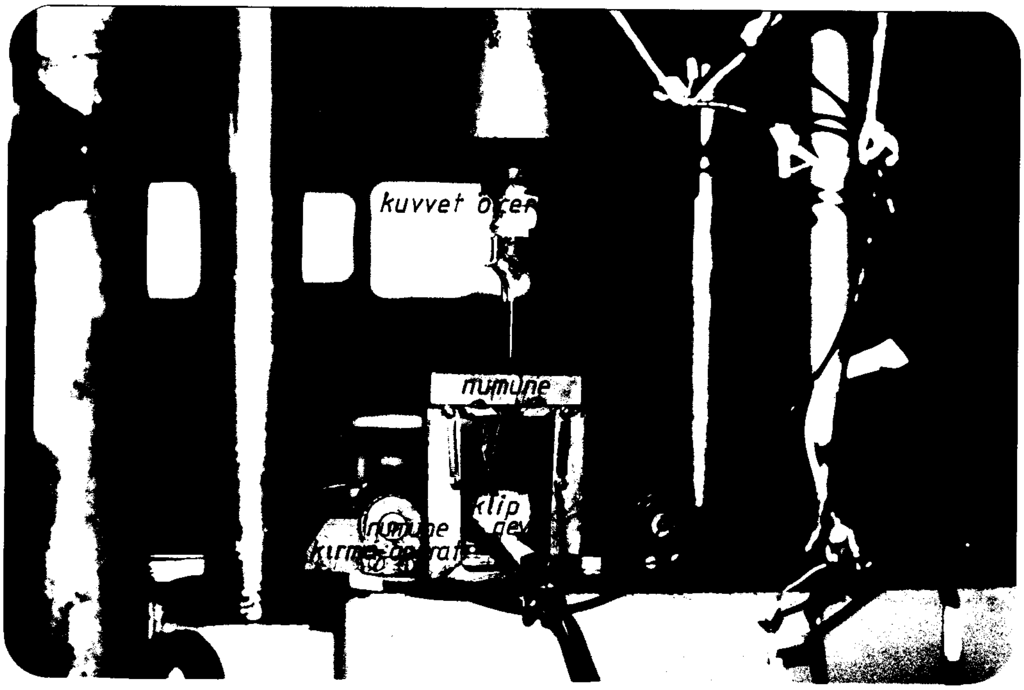


Şekil 6.6 Numune eğme aparatı.

Numune eğme aparatı, Clip-gauge ve 2 farklı kuvvet ölçer'in numuneyi kırmaya hazır haldeki durumları,



Şekil 6.7 4 mm'lik kuvvet ölçer ile ölçüme hazır düzenek.

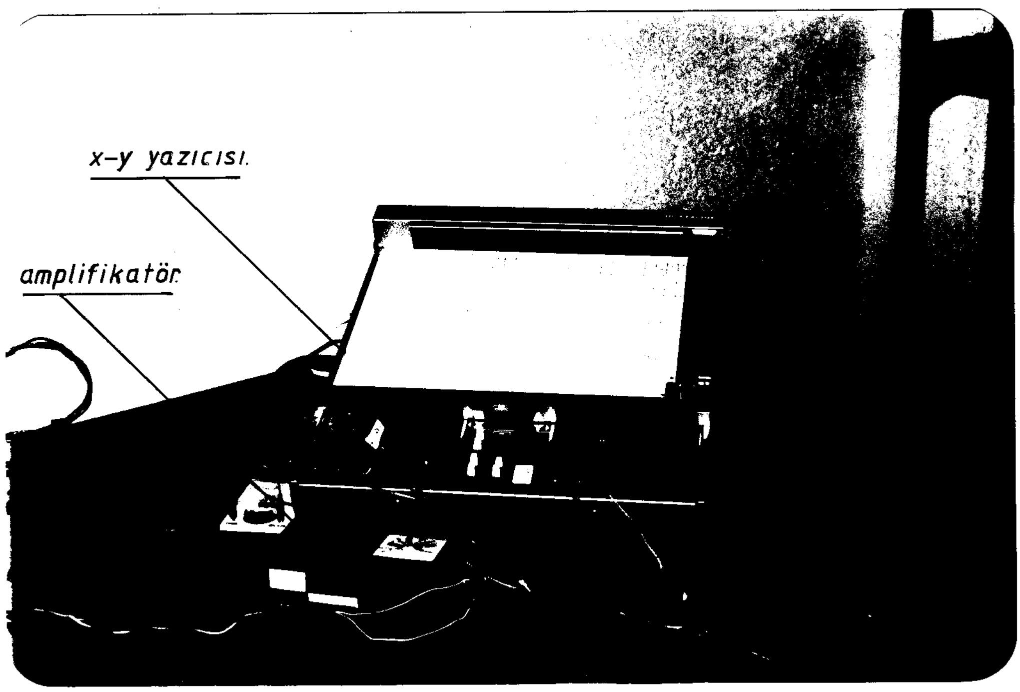


Şekil 6.8 2 mm'lik kuvvet ölçer ile ölçüme hazır düzenek.

6.5.4 Amplifikatör, X-Y Recorder Ve Test Makinesi.

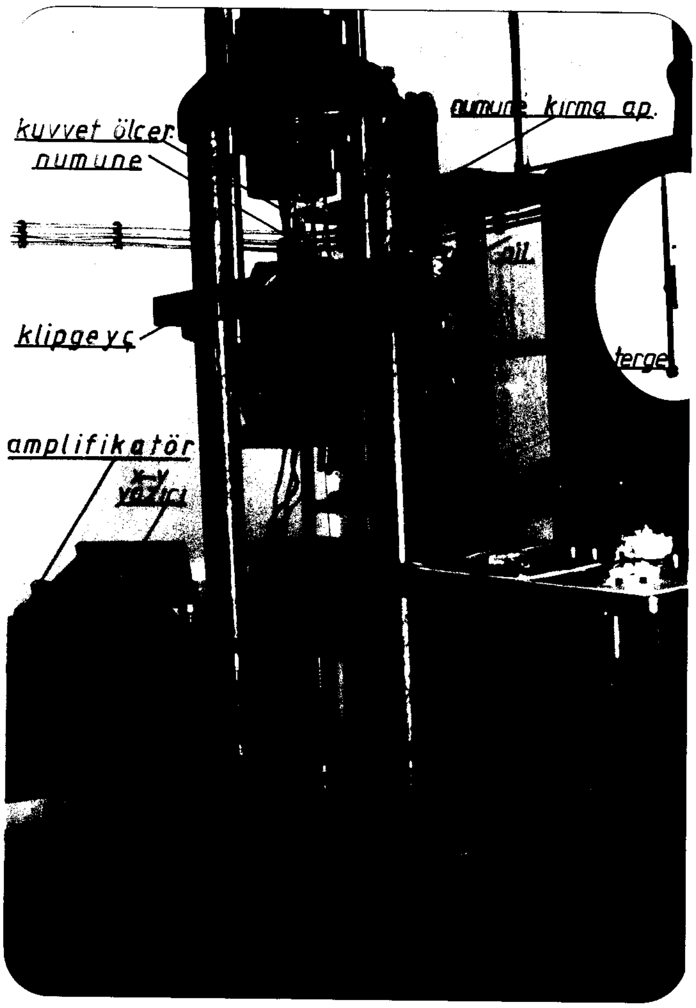
Test esnasında kuvvet ölçerdeki zayıf sinyalleri kuvvetlendirmek amacıyla 4000 kez'e kadar büyütme yapabilen (µA 741 Entegre ile imal edilmiş) bir amplifikatör kullanılmıştır. Test öncesi amplifikatör sıfır ayarı yapılmıştır.

Kuvvet-çatlak ucu yerdeğişim eğrisi ise RW-11T Rikadenki marka x-y Recorder'ı ile kaydedilmiştir. Amplifikatör ve yazıcı aşağıdaki şekilde görülmektedir.

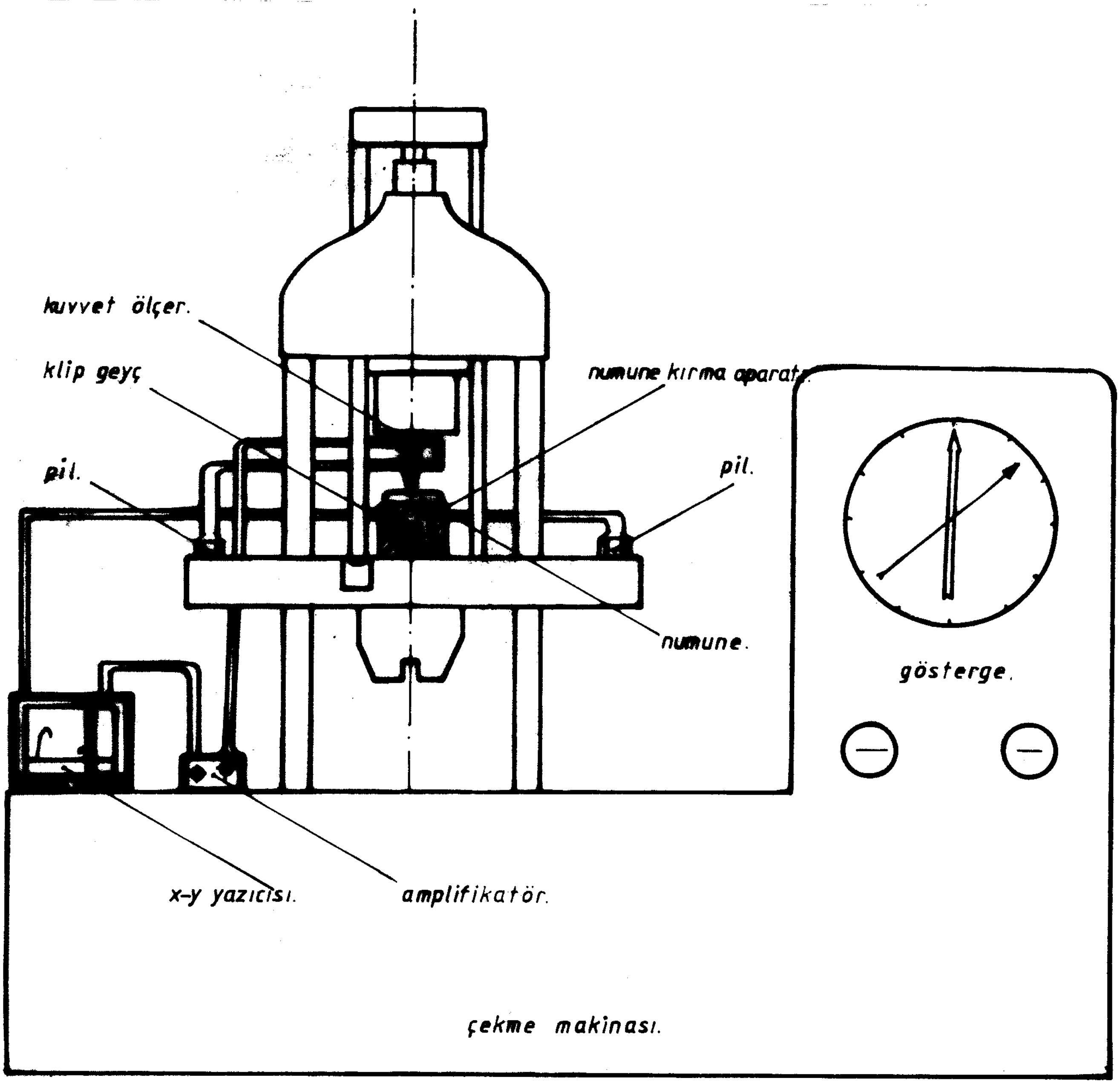


Şekil 6.9 X-Y Recorder ve Amplifikatör.

Test makinesi, Alşa marka, 20 ton çekme yapabilen bir cihazdır. Deney 5.10^{-5} m/sn. lik yükleme hızlarında yapılmıştır. Deney standının resmi ve şematik gösterimi ise şekil 6.10 ve şekil 6.11 de verilmiştir.

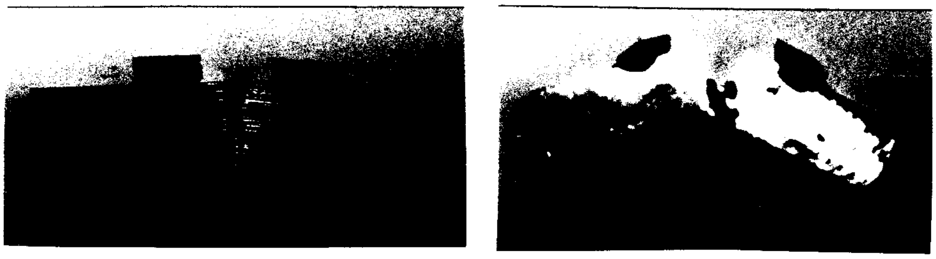


Şekil 6.10 Deney standı.

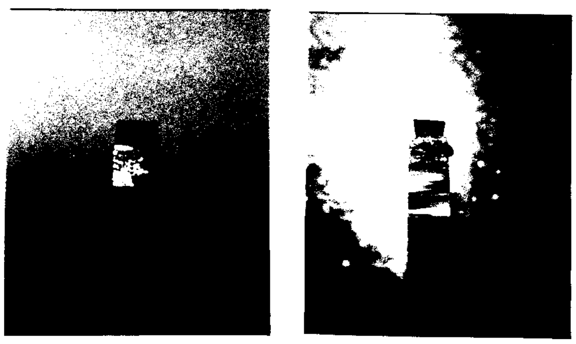


Şekil 6.11 Deney standının şematik gösterimi.

Olması gereken sınırlar içerisinde kalacak şekilde hazırlanan numunelerin, deneye tabi tutulmasından sonra çekilmiş fotoğrafları, aşağıdaki şekillerde olduğu gibidir.



Şekil 6.12 Special-K ve Alüminyum malzemelerden hazırlanmış numunelerin, deney sonrası durumları.



Şekil 6.13 Special-K ve Pleksiglas numunelerinin deney sonrası kırılma yüzeyleri.

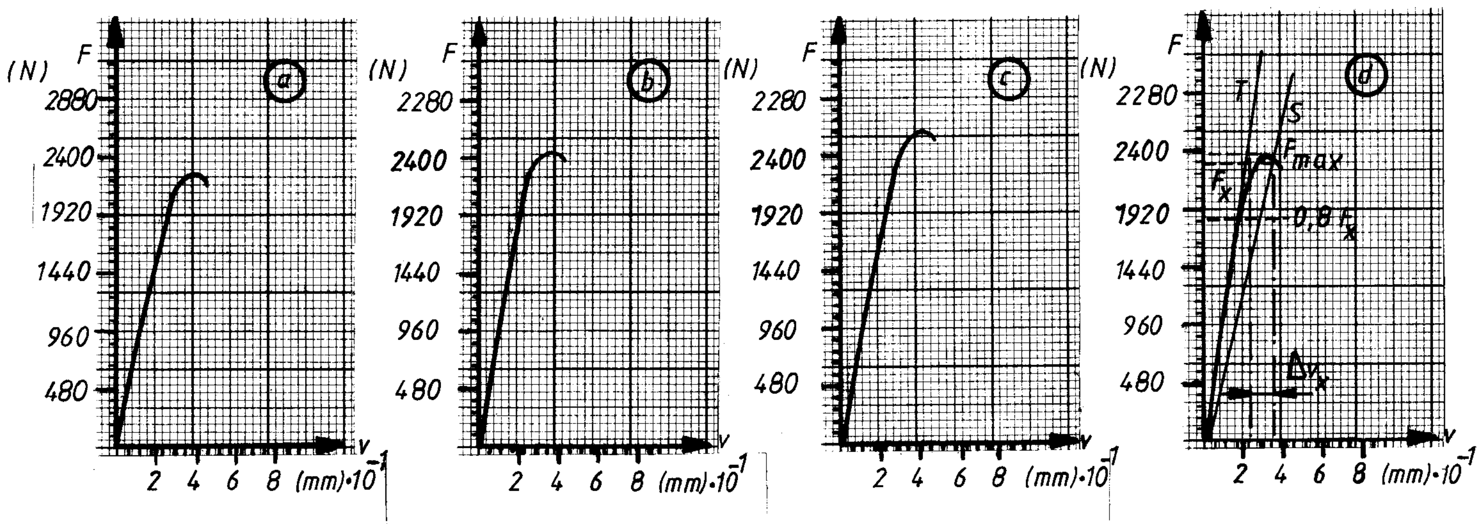
6.6 Alınan (F-v) Eğrileri.

Seçilen her 3 malzeme'den 30'ar adet numune (3 PB, 3 noktadan eğme numunesi şeklinde) kırılma tokluğu ölçüm yöntemlerine göre, olması gerekli boyut sınırlamalarına uygun olarak hazırlandı.

Special-K ve Plexiglas gevrek'likleri dikkate alınarak K_{Ic} yöntemi ve Alüminyum ise sünek olması nedeniyle COD yöntemiyle ve bu yöntemlerin gerektirdiği tüm esaslara uyarak, bölüm 6.5'de anlatılan ve şekilleri verilen test ekipmanları ile hazırlanan deney standı'nın kullanılması sonucu (numuneye kuvvet ölçer'in baskı yapması ile oluşan sinyal - ler ve bu anda çatlak yüzeyleri'nin ayrılışını, numunedeki çakılara tespit edilmiş olan Clip-gauge'nin uçlarının açılması ile oluşan sinyaller ile birlikte, Recorder'dan alınması ile) deneysel çalışmayı gerçekleştirmiş oluruz.

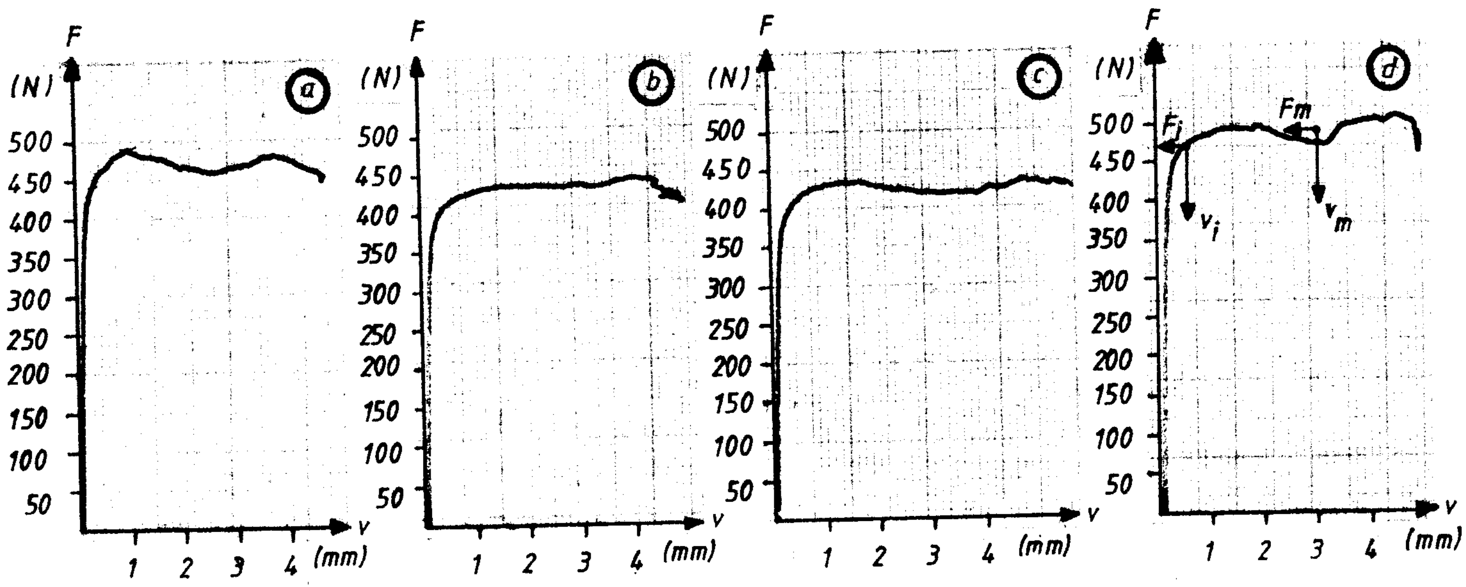
Numunelerin tümü deney esnasında kırılmıştır, neticede her üç malzeme için Recorder'dan alınan eğriler'den, her bir malzeme için genelde aynı tip eğrileri veren 4 farklı sayılabilecek eğri, hesaplamalarda dikkate alınmak üzere (F-v, yük-çatlak açıklığı şeklinde) aşağıda verilmiştir.

Eğriler deney anında $y \geqslant 20$ mV/cm. $x \geqslant 2$ mV/cm iken çizdirilmiş olup F (yük) ekseninde işaretli iki çizgi arası 96 N v (çatlak açıklığı) ekseninde işaretli iki cizgi arası 0,057 mm'yi göstermektedir.



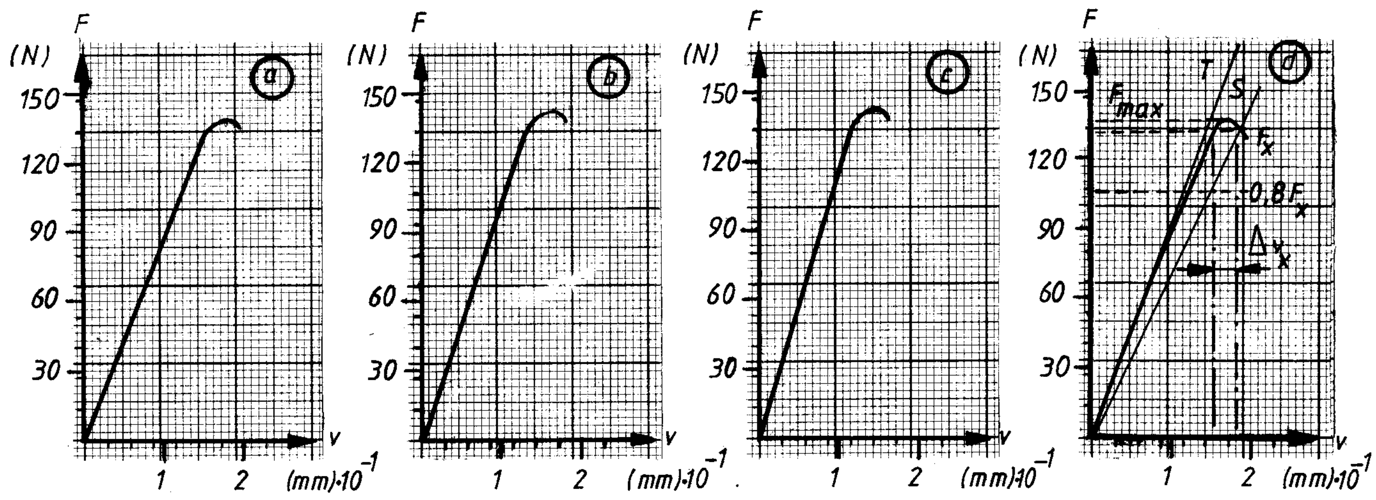
Şekil 6.14 Special-K malzemeden hazırlanmış numuneler ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu, Recorder'dan alınan (F - v) eğrileri.

Eĝriler deney anında $y \geq 0{,}1$ mV/cm. $x \geq 5$ mV/cm. iken çizdirilmiş olup
F (yük) ekseninde iki çizgi arası 10 N
v (çatlak açıklığı) ekseninde iki çizgi arası 0,143 mm'yi
göstermektedir.



Sekıl 6.15 Alüminyum malzemeden hazırlanmış numuneler ile — gerçeklestirilen deneysel çalışma sonucu Recorder dan alınan (F-v) eĝrileri.

Eĝriler deney anında $y \geqslant 0{,}05$ mV/cm. $x \geqslant 1$ mV/cm. iken çizdirilmiş olup F (yük) ekseninde işaretli iki çizgi arası 13,3 N v (çatlak açıklığı) ekseninde işaretli iki çizgi arası 0,0285 mm'yi göstermektedir.



Sekıl 6.16 Plexiglas malzemeden hazırlanmış numuneler ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu, Recorder'dan alınan (F–v) eĝrileri.

6.7 Değerlendirme.

Her üç malzemeden hazırlanmış numuneler için, belir lenen yöntemlere göre hesaplamalar yapılacaktır. Special-K ve Plexiglas için K_{Ic} , Alüminyum için ise COD yöntemi uygulanacaktır.

6.7.1 Special-K İçin Hesaplama.

Bölüm 5.2.4'deki eğri tipleri incelendiğinde (şekil 5.8) I no'lu eğri'nin malzememizden hazırlanan numuneler ile çizdirdiğimiz eğrilere uygun olduğunu görürüz.

Bu tip hakkındaki açıklamalar dikkate alınarak, şekil 6.14'de alınan eğrilerin her biri için eğrinin lineer kısmının eğimini veren T doğrusundan %5 meyilli S doğrusu çizilip, gerekli olan büyüklükler aşağıdaki tablo.10'da olduğu gibi tespit edildi.

Tablo 10. Special-K için gerekli büyüklükler.

Numune	F_{max} (daN)	F_x (daN)	$0,8.F_x$ (daN)	Δv (mm)	Δv_x (mm)
a	230,4	220,8	176,64	0	0,114
b	249,6	235,2	188,16	0	0,143
c	268,8	259,2	207,36	0	0,157
d	240,0	233,6	186,84	0	0,128

Tablo 10'daki verilere göre, bölüm 5.2.4'ün son kısmında K_{Ic} hesabı için maddeler halinde verilen yöntemi aynen tatbik edersek,

1- Eğri tipimiz (şekil 5.8'e göre) I no'lu tip idi. bu durumda, $F_Q = F_{max}$ olacaktır. Buna göre- Tablo 10'daki F_{max} değerleri hesaplamada her bir numune için F_Q olarak alınır.

2- $\Delta v < 0,25\,\Delta v_x$ olduğunu her bir numune için görürüz.

3- K_Q değerleri her bir numune için 1. madde'de seçilen F_Q ile ve numune geometrisine bağımlı olan Y fonksiyonu (5.18 ve 5.21) denklemlerinden aşağıdaki tablo 11.'de olduğu gibi bulunmuşlardır.

Tablo 11. Special-K numuneler için Y ve K_Q değerleri.

Numune	Y	K_Q $(kp/mm^{3/2})$
a	2,4025	73,389
b	2,4025	79,505
c	2,4025	85,621
d	2,4025	76,447

4- K_Q değerinin, σ_a ve çatlak boyu ile numune kalınlığı arasındaki bağıntıyı veren ifade (denklem 5.24 ve 5.25) ile karşılaştırılması yapılırsa, (bölüm 6.2.1'de Special-K için $\sigma_a = 50$ kp/mm^2 verilmiştir)

K_Q'nun her numune için değerinin $<$ 89,443 olduğu

gözlenir, dolayısıyla 4. madde sağlanmış olur.

5- Bölüm 5.2.4'e göre, 2 ve 4. maddeler sağlandığında bulunan K_Q değerinin K_{Ic} olarak alınabileceğinin mümkün olduğu belirlenmiştir. O halde tüm numunelerimiz için, (2. ve 4. maddeler uygun olduğundan) K_Q lar K_{Ic} olarak aşağıdaki tabloda olduğu şekilde belirlenir.

Tablo 12. Special-K numuneler için bulunmuş K_{Ic} değerleri.

Numune	K_{Ic} (kp/mm$^{3/2}$)
a	73,389
b	79,505
c	85,621
d	76,447

6.7.2 Plexiglas İçin Hesaplama.

Eğri tipleri Special-K'da incelenen eğri'ler ile uygun olduğundan, bölüm 6.7.1'deki hesap yöntemleri burada'da aynen tekrar edilerek, aşağıdaki tablodaki büyüklükler tespit edilmiştir.

Tablo 13. Plexiglas numuneler ile gerçekleştirilen denemede bulunmuş büyüklükler.

Numune	F_{max} (daN)	F_x (daN)	$0,8.F_x$ (daN)	Δv (mm)	Δv_x (mm)
a	14,23	13,81	11,05	0	0,040
b	14,43	13,93	11,14	0	0,033
c	14,56	14,14	11,31	0	0,036
d	13,91	13,30	10,64	0	0,029

Bulunan bu değerler ile bölüm 5.2.4'de K_{Ic} hesabı için verilen yöntem, Special-K'nın hesabında olduğu şekilde yine aynen uygulanarak,

1- Tablo 13'de belirlenen F_{max} değerleri, F_Q olarak alınır.

2- $\Delta v < 0,25 \Delta v_x$ olduğunu her bir numune için görürüz.

3- K_Q değerleri her bir numune için 1. madde'de seçi len F_Q ile ve numune geometrisine bağımlı olan Y fonksiyonu (5.18 ve 5.21) denklemlerinden aşağıda ki tablo 14.'de olduğu gibi bulunmuşlardır.

Tablo 14. Plexiglas numuneler için bulunmuş Y ve K_Q değerle ri.

Numune	Y	K_Q $(kp/mm^{3/2})$
a	2,4025	4,533
b	2,4025	4,597
c	2,4025	4,639
d	2,4025	4,431

4- K_Q değerinin, σ_a ve çatlak boyu ile numune kalın lığı arasındaki bağıntıyı veren ifade (denklem 5. 24 ve 5.25 ile) dikkate alınırsa, (bölüm 6.2.3 ' de Plexiglas için kırılma gerilmesi 14 kp/mm^2 ve rilmiştir)

K_Q ' nun her numune için değerinin $<$ 16,69 olduğu

gözlenir, dolayısıyla 4. madde sağlanmış olur.

5- Bölüm 5.2.4'den, 2 ve 4. maddeler sağlandığında - K_Q değerinin K_{Ic} olarak alındığını biliyoruz, denememiz sonucu bulunan değerler ile yaptığımız hesaplamada 2 ve 4. maddelerimiz sağlandığından, K_Q değerlerini aşağıdaki tabloda olduğu şekilde be - lirleriz.

Tablo 15. Plexiglas numuneler için bulunmuş K_{Ic} değerleri.

Numune	K_{Ic} $(kp/mm^{3/2})$
a	4,533
b	4,597
c	4,639
d	4,431

6.7.3 Alüminyum İçin Hesaplama.

Şekil 6.15 'de Alüminyum için elde edilmiş eğriler incelendiğinde, genelde kuvvet etkisiyle eğrinin belli bir noktaya yükselip o değerde sabit bir şekilde etkidiği gözlenir. Bu durumda, şekil 5.12 'deki III nolu eğri tipi ve ayrıca BS 5762:1979 standardın'daki şekil 7 'de referans olarak verilen eğri tiplerinden (5) nolu eğri tipi, hesaplamalarımız için uygun eğri tipi olarak seçilmiştir.

Bu durumda hesaplama için gerekli olan, kuvvetler F_i ve F_m ile çatlak açıklığı değerleri V_i ve V_m 'in belirlenmesi, her bir numune için aşağıdaki tabloda olduğu gibidir.(F_i ve V_i, yavaş çatlak büyümesinin başlangıcındaki ve F_m ile V_m ise, max. kuvvet platosundaki değerlerdir)

Tablo 16. Alüminyum numuneler için tespit edilen değerler.

Numune	F_i (daN)	V_i (mm)	F_m (daN)	V_m (mm)
a	46,5	0,572	47,5	2,360
b	41,0	0,572	44,5	2,860
c	42,0	0,572	43,0	3,075
d	47,0	0,572	49,0	3,003

C' değerini (0,15 $<a/W<$ 0,7) BS 5762 standardın'dan (numunemiz için, a/W, 0,50 idi) " 10,61 " olarak tespit ediyoruz. K_f, kırılma şiddeti faktörü, (5.42 nolu denklem) gerekli değerler yerine konularak, her bir numune için (Tablo 16 daki F_i ve F_m 'e göre) hesaplanmış değerleri aşağıdaki tabloda görebiliriz.

Tablo 17. Alüminyum numuneler için hesaplanmış K_f değerleri. (F_i ile hesaplanmış değer, $K_{f(i)}$, F_m ile hesaplanmış değer, $K_{f(m)}$ olarak gösterilmektedir)

Numune	$K_{f(i)}$ ($Kp/mm^{3/2}$)	$K_{f(m)}$ ($Kp/mm^{3/2}$)
a	15,418	15,750
b	13,594	14,755
c	13,926	14,257
d	15,583	16,247

(5.42) denklemimiz ise,

δi, yavaş çatlak büyümesinin başlangıcındaki yer değişimi,

δm, max. kuvvet platosuna ilk erişmedeki çatlak açılma yer değişimi'ni ifade edip,

Bölüm 6.2.2 'de Alüminyum için verilen gerekli de -

ğerlerin denklemde yerine konulmasıyla, her bir numune için bulunan δi ve δm (COD) değerlerini aşağıdaki tabloda gö rebiliriz.

Tablo 18. Alüminyum için hesaplanmış δi ve δm (COD) değerleri.

Numune	δi (mm)	δm (mm)
a	0,1142	0,4674
b	0,1139	0,5661
c	0,1140	0,6084
d	0,1143	0,5946

Alüminyum numuneler için elde ettiğimiz δc değer- lerinin karşılığı olan K_c değerlerini, bölüm 5.3.4 'de veri len 5.44 denkleminden bulabiliriz. Neticede bulunan (COD) δ değerlerini, diğer numunelerden elde edilen K_{Ic} değerle rine karşı gelen değer olarak yazıp, birbirleriyle karşılaş tırma yapabiliriz.

BS 5762:1979 standardın'a göre, Alüminyum numuneler den elde ettiğimiz eğrilere uygun olarak belirlenen eğri ti pi için, F_i, V_i ve F_m, V_m değerlerinin geçerli olduğunu bi liyoruz. Dolayısıyla bu eğri tipinde, δc olarak denklem

5.44 'de yerine konması gereken değer yerine, δm değeri K_c hesaplaması için konulacaktır.

Buradan gerekli değerlerin ilgili bölümlerden seçilip, denklem 5.44 'de yerine konulmasıyla, Alüminyum numuneler için δm değerlerine karşılık gelen K_c değerleri, aşağıdaki tabloda olduğu şekilde belirlenmiştir.

Tablo 19. Alüminyum numuneler'den bulunmuş δm değerlerine karşılık gelen K_c değerleri.

Numune	δm (mm)	K_c ($Kp/mm^{3/2}$)
a	0,4674	12,204
b	0,5661	13,431
c	0,6084	13,924
d	0,5946	13,765

6.8 Sonuçlar.

Farklı 3 malzemeden hazırlanmış numunelere, kırılma tokluğu ölçüm yöntemlerinin uygulanmasıyla gerçekleştirilen deneysel çalışma ile, aşağıdaki neticeler tespit edilmiştir.

1- Special-K ve Plexiglas numunelerin eğrileri, plastik deformasyon göstermeden, kararsız çatlak yayılması sonucu aniden kırılan malzemeler'in eğrileri gibidir. Alüminyum numunelerden elde ettiğimiz eğrilerde plastik bölgeyi görebilmekteyiz. Bu numuneler'de kırılma akmanın tamamen sona ermesi sonucu oluşmaktadır. Buradan, daha önceden'de tahmin edildiği gibi, Special-K ve Plexiglas malzemelerinden hazırlanan numunelerin gevrek, Alüminyum'un ise sünek olduğu'da perçinlenmiş olacaktır.

2- Eğriler,

Special-K,	230,4	ila	260	Kp
Alüminyum,	49	"	43	Kp
Plexiglas,	13,91	"	14,56	Kp

değerlerinde, numunelerin kırıldıklarını göstermektedir.

3- Gevrek malzemeler için K_{Ic} yöntemiyle kırılma dayanımı hesaplandığında,

Special-K,	73,389	ila	85,621	$Kp/mm^{3/2}$
Plexiglas,	4,431	"	4,639	$Kp/mm^{3/2}$

Alüminyum ise sünek olduğundan (COD) yöntemiyle kırılma tokluğu değerlendirilmiş olup, yavaş çatlak büyümesinin başlangıcındaki yer değişimi, (δi), max. kuvvet platosuna ilk erişmedeki çatlak açılma yer değişim değeri, (δm) ve (δm) değerlerine karşılık gelen (K_c) değerleri ise,

Alüminyum,	δi,	0,1139	ila	0,1143	mm
	δm,	0,4674	"	0,6084	mm
	K_c,	12,204	"	13,924	$Kp/mm^{3/2}$

olarak tespit edilmiştir. Buradan'da görüldüğü gibi, Alüminyum'da çatlağın başlangıç noktasında, çatlak ucunda oluşan plastik bölgenin ($K_{Ic} = \delta c$) büyüklüğü az olup, çatlak büyümesi, (δm) plastik bölge büyüklüğüne erişince kararsız yayıldığı görülmektedir.

4- Her 3 malzeme kıyaslandığında, Special-K 'nın gevrek ve fazla kuvvet gerektirdiği, Plexiglas'ın yine gevrek fakat çok az kuvvet gerektirdiği ve bu iki malzemenin kırılma problemi göstereceklerі bu nedenle çok dikkatli olunması gerektiği, Alüminyum ise sünek bir malzeme olduğu ve kırılmasının büyük bir problem olmadığı söylenebilir.

5- Her 3 malzemenin daha değişik şartlar (sıcaklık kompozisyonu gibi) altında üretilmeleriyle, malzemelerin mikro yapılarıyla kırılma toklukları (K_{Ic}, COD) arasındaki ilişkiler'in incelenmesi, bu çalışmanın devamı sayılabile - cek bir uygulama olacaktır.

KAYNAKLAR

1- Dahl, W. "Grundlagen des Festigkeits und Bruchverhaltens", pp 143-161 Aachen, 1974

2- Griffith, A.A. (1) "Trans Royal Society", vol 221 A pp 63-198, London, 1920

3- Dieter, E.G. (1,2) "Mechanical Metallurgy", Second edition, pp 248-291, 491-527 Mc Graw-hill, Kogakusha, 1976

4- Irwin, G.R. (3) Fracture in "Encylopedia of Physics" vol VI, Springer, Heidelberg, 1958

5- Mott, N.F. (4) "Engineering", vol 165, pp 1948

6- Cotrell, A.H. (5) "Trans Metall Society", AIME, vol 212 pp 192-203, 1958

"Proc. Roy. Soc.", vol 285, pp 10 London, 1965

7- Dawes, M.G. (8) "Contemporary measurements of Weld Metal Fracture Toughness", Welding J, vol 55, pp 1052-1057, 1967

8- Harrison, J.D. Dawes, M.G. Archer, G.L. Komath, M.S. (8) "The COD approach and its application to Welded Structures", Elastic-Plastic Fracture, (Proc. Conf.), Atlanta Ca. 16-18, Nov. pp 606-631, 1977

9- Zener, C. (9) "The micro-mechanism of Fracture in Fracturing of Metals", American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1948

10- Stroh, A.N. (10) — "Advance Phys.", vol 6, pp 418 1957

11- Petch, N.J. (11) — "Iron Steel Inst.J.", vol 174 pp 25, 1953

12- Parker, A.P. (1,3,14,15) — "The Mechanics of Fracture and Fatique", 1981

13- Tetelman, A.S. Mc Evily, A.Jr. (18) — "Fracture of Structure of Materials" pp 60-78, John Wiley and Sons Inc. 1967

14- Kaufman, J.G. (17,18) — "Fracture Toughness Testing", Application of Fracture Mechanics to Design, vol 22, pp 23-42, 1979

15- Begley, J.A. Landes, J.D. (19,20) — "The J integral as a Fracture Criterion" in Fracture Toughness special technical Publication 514 Philadelphia, ASTM, pp 24-39, 1972

16- Paris, P.C. Tada, H. Zahcer, A. Ernot, H. (21) — "The theory of instability of the tearing Mode of elastic-plastic crack growth", ASTM STP 668 pp 5-36, 1979

17- Clark, A.G. Andrews, W.R. Paris, P.C. Schmidt, D.W. (21) — "Single Specimen Tests for J_{Ic} Determination" Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590, ASTM, pp 27-42 1976

18- "Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing" BS 5762, British Standarts Instution 1979

19- Standart Test Methods for "Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", E 399-74 American Standart Instution, 1974

20- Hoffmann, K. ABM Elektrisches messen mechanischer Grössen, "Anwendung der Wheatstone Brückenschaltung", Hottinger Baldwin Messtechnik, Deutschland, 1974

21- Aksoy, T. "Kırılma Mekaniği", İzmir, 1954

22- Ay, İ. "U.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırılma Mekaniği ders notları"

"Reaktif Kule İmali Kaynağında Çatlak İlerlemesi ve Önleme Yöntemleri" İzmir, 1985

23- Doruk, M. "O.D.T.Ü. Kırılma Mekaniği ders notları"

24- Yahşi, O.S. "Kırılma Mekaniği'nin Tasarımdaki önemi", Mühendis ve Makine, cilt 25 sayı 293, s 6-9, Ankara, 1984

25- Oğuz, B. "Oerlikon Kaynak Bilimi", sayı 1 s 17-22, 1984

26- Keskin, İ. "Malzeme El Kitabı", s 100

27- Necdet, T. "Malzeme III, Demir Karbon Alaşımları" s 231-232, İstanbul, 1979

28- Güventürk, F. "Çelik El Kitabı", Güven Çelik Tic. ve San. s 51

29- Akkurt, M. Malik, K. "Makina Elemanları", cilt 1, s 600,609 İstanbul, 1979

30- Çiğdemoğlu, M. "Korozyona Karşı Plastikler" Makina Mühendisleri Odası Yayın No:59, s 32-35, Ankara, 1970

31- Özdemir, İ. "Genel Anorganik ve Teknik Kimya" cilt II, s 418, İstanbul, 1970

32- Hakdiyen, İ. "Genel ve Teknik Kimya", s 486 İstanbul, 1972