

**FERRİTİK ÇELİKLERDE KARBON ORANININ
KIRILMA TOKLUĞUNA ETKİSİ**

Yüksek Lisans Tezi
Burak SERT

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Ağustos, 2012

Bu tez çalışması 11.FEN.BİL.36 numaralı proje ile bilimsel araştırma projeleri tarafından desteklenmiştir.

T.C.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FERRİTİK ÇELİKLERDE KARBON ORANININ
KIRILMA TOKLUĞUNA ETKİSİ**

Burak SERT

**DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN**

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Ağustos, 2012

TEZ ONAY SAYFASI

Burak SERT tarafından hazırlanan “ferritik çeliklerde karbon oranının kırılma tokluğuna etkisi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca/...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN

Başkan : Yrd. Doç. Dr. İsmail UCUN
. Teknik Eğitim Fakültesi, İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN
. Teknoloji Fakültesi, İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ
. Teknoloji Fakültesi, İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

07 / 08 / 2012

İmza

Burak SERT

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

FERRİTİK ÇELİKLERDE KARBON ORANIN KIRILMA TOKLUĞUNA ETKİSİ

Burak SERT
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN

Metalik malzemelerin kırılma tokluğunun belirlenmesinde ASTM E-399 standardı kullanılmaktadır. Bu standarda göre ferritik çeliklerin kırılma tokluğunun belirlenmesinde düzlemsel deformasyon şartının (boyut şartı) yerine getirilmesi için büyük boyutlu numuneler deneye tabi tutulur. Boyut şartını telafi etmek için, ferritik çeliklerin kırılma tokluğunun belirlenmesinde ASTM E-1921 standardı geliştirilmiştir. Bu çalışmada, hem ASTM E-1921 standardında yer alan çatlaklı numune kullanımını ortadan kaldıran ve hem de her iki standarda alternatif olarak geliştirilen yeni bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem, malzemenin kırılma tokluğunu temel mekanik özelliklerle bağlarken, aynı zamanda kırılmanın doğasını da açıklamaktadır. Çalışmada kullanılan yöntem sayesinde kırılma tokluğu oldukça basit ve düşük maliyetle belirlenebilmektedir. Araştırmalar, sadece karbon oranı ile değişen, düşük alaşımlı 4 farklı çelik üzerinde yapılmıştır. Böylece, kırılma tokluğunun belirlenmesinde söz konusu alternatif yöntem kullanılarak, ferritik çeliklerde karbon oranının kırılma tokluğuna etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimer: Ferritik çelikler, Kırılma tokluğu, ASTM E-399 standardı, ASTM E-1921 standardı.

ABSTRACT
M.Sc Thesis

**EFFECT OF CARBON RATE TO THE FRACTURE TOUGHNESS OF FERRITIC
STEELS**

Burak SERT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metal Training

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN

ASTM E-399 standard used for the determination of the fracture toughness of metallic materials. According to this standard the determination of the fracture toughness of ferritic steels, large samples (size requirement) should be tested for the providing of plane deformation requirement. To recover size requirements, ASTM E-1921 standard have been developed on the determination of the fracture toughness of ferritic steels. As for that study, both eliminates the standard ASTM E-1921 contained in fractured sample using and also new method is used as an alternative to the two standard. This method is based on the fracture toughness of the material connecting the basic mechanical features, but also explains the nature of the fracture. The fracture toughness is determined due to the method used in this study with a very simple and low cost. Researches were conducted on changing with a rate of only C low-alloy four different steel. Thus the determination of the fracture toughness is used alternative method, rate of carbon in the ferritic steels investigated the effect of the fracture toughness.

Key Words: Ferritic steels, fracture toughness, ASTM E-399 standard, ASTM E-1921 standard.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Sinan ULU'ya, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 11.FEN.BİL.36 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri tarafından desteklenmiştir.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Burak SERT

AFYONKARAHİSAR, 2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİSİ	4
3. MATERYAL ve METOT	7
3.1 İncelenen Çelikler	9
3.2 Kırılma Mekanîği.....	10
3.2.1 Kırılma Tokluğunun Saptanmasında Kullanılan Standartlar	13
3.2.1.1 ASTM E-399 Standardı	13
3.2.1.2 ASTM E-1921 Standardı	19
3.3 Ferritik Çeliklerin Kırılma Tokluğunun Saptanmasında Kullanılan Yöntem.....	20
3.3.1 Ferritik Çeliklerde Temel Mekanik Özelliklerin Sıcaklıkla İlişkisi	20
3.3.2 Akma Dayanımının Sıcaklıkla İlişkisi	22
3.3.2.1 Yaroshevich Yaklaşımı	22
3.3.2.2 Makhutov Yaklaşımı.....	23
3.3.3 Metal ve Alaşımların Gevrek Kırılma Şartı	25
3.3.4 Kırılma Hipotezi ve Mekanizması.....	26
3.3.5 Düzlemsel Deformasyon Şartı ve Kırılma Tokluğu Formülü	28
3.3.6 Pekleşme Katsayısının Saptanması.....	33
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	36
4.1 Mikro Yapı Analizleri	36
4.2 Tane Boyutunun Belirlenmesi	38
4.3 Darbe Deneyi Sonuçları	42
4.4 Çekme Deneyi Sonuçları.....	43
4.5 Pekleşme Katsayısı	47
4.6 Kırılma Tokluğunun Saptanması.....	48
5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME	50
6. KAYNAKLAR	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

HMK	Hacim Merkezli Küp Kafes
YMK	Yüzey Merkezli Küp Kafes
ASTM	American society for testing and materials
σ_c	Kritik gerilim
σ_y, σ_{ag}	Akma gerilimi
σ_0	Akma geriliminin sıcaklıkla bağımsız değeri
σ_{y0}	Akma geriliminin T=293 K sıcaklığındaki değeri
σ_i	Gerilim konsantrasyonu bölgesinde eşdeğer gerilim değeri
S_{k0}	Kopma gerilimi
S_{kop}	Plastik deformasyon olmadığı kopma gerilimi (tam gevrek)
δ	Uzama oranı
ψ	Daralma oranı
K_c	Düzlem gerilme kırılma tokluğu
K_I	Gerilim şiddet katsayısı (I.mod)
K_{IC}	Kırılma tokluğu (kritik gerilim şiddet katsayısı)
K_{IC}^0	Kırılma tokluğunun T=0 K sıcaklığındaki değeri
K_{min}	Kırılma tokluğunun teorik alt sınır
l_c	Kritik çatlak uzunluğu
P_Q	“ P-V ” grafiğinde en büyük kuvvet
Y	Malzemenin boyut faktörü, çatlağın dış kuvvete göre yerleşim durumu
t	Numune kalınlığı
b	Numune genişliği
l_0	Çatlak uzunluğu
A_0	Numunenin ilk kesit yüzeyi
n	Pekleşme Katsayısı
d_{ort}	Ortalama tane boyutu
A	Akma geriliminin T = 0 K sıcaklığındaki etkili değeri
α	Akma geriliminin belirli bir deformasyon hızında sıcaklığa hassasiyetini gösteren parametre
Δ	P- Δ l grafiğinde bölümlenmiş kesitler arasındaki mesafe
m	Kırılma tokluğunun sıcaklığa hassasiyetini ifade eden parametre

k	Bölümleme sayısı
P_k	Bölünmüş kesitlerin kuvvet değeri
Q	Fotoğrafların büyütme oranı
$N_{1,2,3,4}$	Doğru üzerine düşen tane sayısı
$l_{1,2,3,4}$	Fotoğraf üzerine çizilen çizgilerin uzunlukları
$\square$	Deformasyon hızı $\left(\frac{1}{sn}\right)$
V	Çekme cihazının çenelerinin hareket hızı
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Her hangi bir gerilim konsantrasyonu ucunda meydana gelen normal gerilimler
φ	Gerilim durumunu ifade eden bir katsayı
$T_{s,p}$	Sıfır plastiklik sıcaklığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. 1 Malzeme seçimi prensibi üzerine yorumlar	2
Şekil 3. 1 Darbe deneyi numunesi.....	7
Şekil 3. 2 Darbe deney cihazı.....	8
Şekil 3. 3 Çekme cihazında kullanılan numune tipi	8
Şekil 3. 4 Çekme deney cihazı	9
Şekil 3. 5 Düzlemsel gerilim ve düzlemsel deformasyon durumları (Kopelman 1978)	11
Şekil 3. 6 Kırılma tipleri (Makhutov 1973)	12
Şekil 3. 7 Kritik gerilim şiddet katsayısının, numune kalınlığı ile değişim grafiği (Broek 1974)	13
Şekil 3. 8 Dinamometrenin montaj metodu ve klips ölçüleri.....	14
Şekil 3. 9 3 tip çatlak-açılma (P-V) grafiği	15
Şekil 3. 10 ASTM standardına göre I. Tip numune şekli	16
Şekil 3. 11 ASTM standardına göre II. tip numune şekli	17
Şekil 3. 12 ASTM standardına göre III. tip numune şekli	18
Şekil 3. 13 ASTM standardına göre IV. tip numune şekli.....	18
Şekil 3. 14 HMK ve YMK kafese sahip metal ve alaşımlarda akma geriliminin sıcaklıkla değişimi	20
Şekil 3. 15 P-Δl grafiklerinin sıcaklıkla değişimi.....	21
Şekil 3. 16 Temel mekanik özelliklerin sıcaklıkla değişimi	21
Şekil 3. 17 Akma geriliminin atermik (σ_0) ve termoaktivasyon kısmı.....	22
Şekil 3. 18 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ 'ın çeşitli çeşitli deformasyon hızlarında, sıcaklıkla değişimi	23
Şekil 3. 19 Akma geriliminin β_y ile ilişkisini gösteren grafik (Makhutov 1973).....	24
Şekil 3. 20 Akma gerilimin atermik (σ_0) kısmını değerlendirme üzerine bir şema	24
Şekil 3. 21 Sünek - gevrek geçiş sıcaklık sınırına etkisi (IOFFE şeması)	26
Şekil 3. 22 Romb (baklava dilimi) şeklindeki gerilim konsantrasyonları	29
Şekil 3. 23 $\frac{S_{kop}}{\sigma_y}$ değerinin sıcaklığa göre değişimi	31
Şekil 3. 24 Kırılma tokluğunun sıcaklığa göre değişimi.....	32
Şekil 3. 25 Kesitlere bölünmüş olan P-Δl şeması.....	33
Şekil 3. 26 Gerçek Gerilim-Gerinim Grafiği (Logaritmik).....	34
Şekil 4. 1 1010 çeliğinin iç yapısı (200x).....	36
Şekil 4. 2 1020 çeliğinin iç yapısı (200x)	37

Şekil 4. 3 1040 çeliğinin iç yapısı (200x)	37
Şekil 4. 4 1050 çeliğinin iç yapısı (200x)	38
Şekil 4. 5 1010 çeliğinin mikro yapısından tane çapının belirlenmesi (100x).....	39
Şekil 4. 6 1020 çeliğinin mikro yapısından tane çapının belirlenmesi (100x).....	39
Şekil 4. 7 1040 çeliğinin mikro yapısından tane çapının belirlenmesi (100x).....	40
Şekil 4. 8 1050 çeliğinin mikro yapısından tane çapının belirlenmesi (100x).....	40
Şekil 4. 9 Karbon oranı ile ortalama tane çapı değişim	41
Şekil 4. 10 Çelikteki karbon oranının darbe tokluğuna etkisi	42
Şekil 4. 11 Yüzde daralmanın karbon oranı ile değişimi	44
Şekil 4. 12 Yüzde uzamanın karbon oranı ile değişimi	44
Şekil 4. 13 Akma geriliminin karbon oranı ile değişimi	45
Şekil 4. 14 Çekme geriliminin karbon oranı ile değişimi	45
Şekil 4. 15 Akma geriliminin sıcaklıkla değişimi	46
Şekil 4. 16 Pekleşme katsayısının karbon oranı ile değişim	47
Şekil 4. 17 Kırılma tokluğunun çelikteki karbon oranı ile değişimi.	48
Şekil 4. 18 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 3.1 Çeliklerin kimyasal bileşimleri.....	10
Çizelge 3.2 Çeliklerin kullanım alanları.....	10
Çizelge 4.1 Darbe deneyinden elde edilen veriler.....	42
Çizelge 4.2 İncelenen çeliklerin çekme deney sonuçları.....	43
Çizelge 4.3 Kırılma tokluğunun saptanmasında kullanılan parametreler ve kırılma tokluğu.....	48

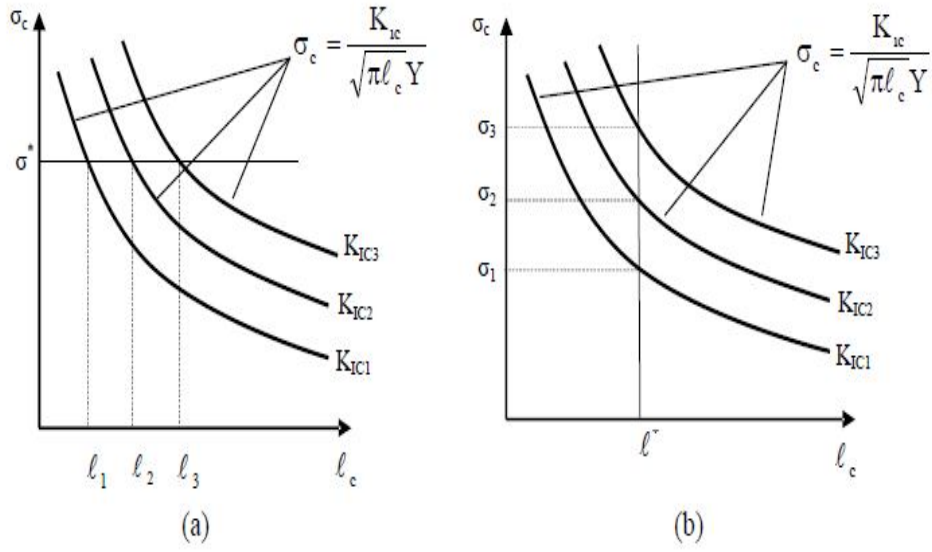
1. GİRİŞ

Metalik malzemelerin kırılma tokluğunun belirlenmesinde ASTM E-399 standardı geliştirilmiştir. Bu standarda göre ferritik çeliklerin kırılma tokluğunun belirlenmesinde düzlemsel deformasyon şartının (boyut şartı) yerine getirilmesi için büyük boyutlu numuneler deneye tabi tutulmaktadır. Boyut şartı telafi etmek için, ferritik çeliklerin kırılma tokluğunun saptanmasında ASTM E-1921 standardı geliştirilmiştir.

Kırılma mekaniğinin temel araçlardan biri kırılma tokluğu (K_{IC}) aracılığıyla malzeme seçimidir. Kırılma tokluğu aracılığıyla malzeme seçimini, çatlak ucundaki kritik gerilim (σ_c) ve çatlağın kritik uzunluğu (l_c) arasındaki bağlantıyı sağlayan, aşağıdaki formül oluşturur.

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi l_c} \text{ veya } \sigma_c = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi l_c Y}} \quad (1.1)$$

Formül (1)'e göre malzeme seçimi prensibi şematik olarak şekil 1,a ve 1,b' de açıklanmıştır. Farklı kırılma tokluğuna sahip üç adet malzemedan yapılan ve (σ^*) gerilimi etkisi altında çalışan bir makine parçası için malzeme seçimi istenmektedir. Şekil 1, a' dan görüldüğü gibi, en uzun çatlağı (l^*_3) 3 nolu malzeme temin eder. Müsaade edilen çatlak uzunluğu bir malzemedan yapılmış olan bir parçanın ömür uzunluğunu ifade etmektedir. Diğer taraftan, şekil 1, b' de gösterildiği gibi, parçada bulunan çatlak uzunluğu (l^*) için en yüksek gerilimi (σ^*_3) 3 nolu malzeme temin eder. Böylelikle, 3 nolu malzeme kırılma açısından daha avantajlıdır, yani bu malzemedan yapılmış olan herhangi bir parça daha büyük ömür uzunluğuna sahip olur.



Şekil 1. 1 Malzeme seçimi prensibi üzerine yorumlar

Böylelikle, malzemenin kırılma tokluğunu sayısal olarak tayin etme malzeme anabilim dalında büyük önem taşır. Bu amaç için ASTM E-399 Standardı geliştirilmiştir (ASTM 2003a). Kırılma tokluğunun ASTM E-399 ve E-1921 standartlarına göre saptanabilmesi için çatlaklı numuneler kullanılmalıdır. Tez çalışmasında, kırılma tokluğunun belirlenmesinde önceden geliştirilmiş olan bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemle kırılma tokluğunun belirlenmesi için malzemenin tane çapı ve mekanik özelliklerinin bilinmesi yeterlidir.

ASTM E-399 standardına göre, ferritik çeliklerin kırılma tokluğunu belirlemek için büyük boyutlu numunelerin deney yapılması gerekmektedir. ASTM E-399 standardına göre deney yapılışını zorlaştırmakta ve maliyeti artırmaktadır. Dolayısıyla önemi yüksek birkaç çelik haricinde kırılma tokluğu saptanamamıştır. Bu tezde söz konusu standarda alternatif olarak geliştirilmiş yeni bir yöntem kullanılarak kırılma tokluğu basit ve düşük maliyetle belirleme imkânı sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan yöntem, literatür’de yer alan Aytekin (2009)’in doktora çalışmasında daha da geliştirilmiş ve aynı zamanda geçerliliği de kanıtlanmıştır. Ayrıca yöntemin temellerini ortaya atan Said’in birçok ulusal ve uluslararası çalışmaları da mevcuttur. Bu çalışmada ise bu yöntem kullanılarak çelikteki karbon oranının kırılma tokluğuna etkisi araştırılmıştır.

Geliştirilmiş olan yöntemle göre kırılma tokluğunun belirlenmesi için malzemenin tane çapının ve mekanik özelliklerinin saptanması gereklidir. Bunun için gerekli tüm deneyler ve analizler yapılmıştır.

Çalışmada 4 farklı çelik incelenmiştir. Çeliklerin seçiminde, az alaşımlı düşük karbonlu çeliklerden, diğer tüm alaşım elementleri aynı olan ve sadece karbon oranı değişen çelikler göz önünde tutulmuştur.

2. LİTERATÜR BİLGİSİ

Saidov'un çalışmasında, metallerin plastik deformasyonunun termoaktivasyon enerjisi analizi temelinde deformasyon hızı, sıcaklık, tane boyutu ve mekanik özellikler ile kırılma tokluğu arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Bu ilişkinin, çatlak ilerlemesine dirençli alaşımların üretilmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada ortaya atılan fikirler HMK kafesli metal ve alaşımlar ile sınırlandırılmaktadır (Saidov 1997).

HMK kristal yapıya sahip az karbonlu düşük alaşımlı çeliklerin kullanıldığı konstrüksiyonların imalatında kaynak teknolojisinin geniş bir alanda uygulandığı göz önünde tutulursa, böyle bir konstrüksiyonun emniyetini ve ömür uzunluğunu sağlamak için yapılacak olan projelerin gerçekleştirilmesinde malzemenin kırılma tokluğu (K_{Ic}) temel olarak ortaya çıkmaktadır. Günümüzde kullanılan ASTM E-399 standardına göre, söz konusu çelik alaşımların K_{Ic} değerini elde etmek için büyük boyutlu çatlaklı numuneler deneye tabi tutulmalıdır. Ayrıca, söz konusu olan standart K_{Ic} değerini saptamak için çatlak ucunda gerçekleşen kırılma mikro mekanizmalarını göz önünde tutmamalıdır ve bu nedenle K_{Ic} malzeme seçiminde ancak kalite kontrol görevini yerine getirmektedir. Bu çalışmada, ileri sürülmüş ve birçok farklı çeliklerin deneyleriyle ispat edilmiş olan hipotez temelinde, K_{Ic} 'nin doğasını açıklamaya, yani kırılma tokluğu ile malzemenin temel mekanik özellikleri ve içyapıları arasında bağımlılığı net olarak ortaya çıkarması üzerinde durulmuştur. Bu amaçla, çatlak ucunda meydana gelen plastik deformasyonun termoaktivasyon enerji analizi kullanılmıştır. Sonuçta, hem kırılma tokluğu daha yüksek olan alaşımlar geliştirme hem de HMK kafesli metal ve alaşımların kırılma tokluğunu oldukça kolay bir yöntem ile saptamak amacı ile bir standart oluşturma imkânı sağlanmıştır (Said 1999).

Akma gerilimi sıcaklık ve deformasyon hızına çok hassas olan HMK kafesli metal ve alaşımların kırılma tokluğunun saptanması için yeni bir metot önerilmiştir. Hipotezde ileri sürülen HMK kafesli metal ve alaşımların kırılma tokluğu çatlak ucundaki plastik deformasyonun termoaktivasyon enerjisine exponansiyal olarak bağlanmıştır. Çalışmanın teorik temeli iki açıdan ele alınır: (1) söz konusu alaşımların "akma gerilimi - sıcaklık" grafiğindeki atermik ve termoaktivasyon bölgelerinin farkı. (2) kritik gerilim

altında çatlak ucunda mikro çatlakların gelişmesi ve sonra bu çatlakların ana çatlak ile birleşerek ana çatlağın ilerlemesi. Kırılma tokluğu, temel mekanik özellikler ve çeliklerin mikro yapısı arasında elde edilen ilişkiler, deney sonuçlarını onaylamaktadır (Said and Taşgetiren 2000).

ASTM E-399 standardına göre HMK kafesli çelik ve alaşımların kırılma tokluğunu (K_{Ic}) saptamak için büyük boyutlara sahip çatlaklı numuneler deney yapılması gerektiğinden, sadece önemi yüksek çelikler deneye tabi tutulmuştur. Bu çalışmada ASTM E-399 standardına alternatif olarak geliştirilmiş olan yönteme göre HMK kafesli metal ve alaşımların kırılma tokluğunun (K_{Ic}), her hangi bir araştırma veya fabrika laboratuvarında oldukça düşük maliyet ile saptanabilir (Said 2001).

Az karbonlu düşük alaşımlı çeliklerin (düşük ve orta mukavemetli çelikler) kırılma tokluğunu tayin etmek için büyük boyutlara sahip olan çatlaklı numunelerin ASTM E-399 Standardına göre deney yapılmasına ihtiyaç olmadığı ortaya çıkarılmıştır.

Söz konusu çeliklerin kırılma tokluğunu tayin etmek için silindirik numunelerin tek eksenli çekme deney sonuçları ve malzemenin içyapısını temsil eden ortalama tane boyut değeri yeterlidir. Dolayısıyla, bu yöntem esas alınarak, ASTM E399 Standardına alternatif bir Standardın geliştirilmesi söz konusudur (Said ve Aytekin 2007).

Saidov ve arkadaşlarının çalışmasında, Krasovsky (1983) tarafından geliştirilmiş olan K_{Ic} kırılma modeli temelinde, akma geriliminin sıcaklıkla değişimini göz önünde tutan bir yöntem kullanılmıştır. Böylece malzemenin tane boyutu, pekleşme katsayısı, sünek-gevrek geçiş sıcaklığı ve sıcaklık ile düşük ve orta mukavemetli çeliklerin kırılma tokluğu arasındaki bağılılık ortaya çıkarılmıştır. Söz konusu yöntem iki çelik üzerinde uygulanmış ve yönteme göre saptanan sonuçlar, deney sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur (Saidov and Seleznyova 1997).

ASTM E-1921 standardı, sadece kırılma mekaniği test pratikleri ve ileri istatistiksel metotlar kullanılarak, yapı çeliklerinin kırılma tokluğunun sünek-gevrek geçiş aralığını saptamak için geliştirilmiştir.

ASTM E-1921 standardında,

1- Numunede baskın lineer elastik durum sağlanması şart değildir.

2- Kırılma tokluğuna numune boyutunun etkisi, çatlak ucu sınır şartlarına göre değil de, en zayıf bağ (weakest-link) mekanizmasına göre kontrol edilir.

En zayıf bağ davranışı, kırılma bölgesindeki çatlak başlatıcılar (çökeltiiler, inklüzyonlar ve tane sınırı gevrekliğı gibi çelikteki tüm mikro yapısal özellikler) olarak tanımlanmıştır (McCabe et al. 2000).

3. MATERYAL ve METOT

Tez çalışması kapsamında 4 farklı çelik seçilmiştir. Bu çelikler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Metalografi Laboratuvarında çeşitli deneylere tabi tutulmuştur.

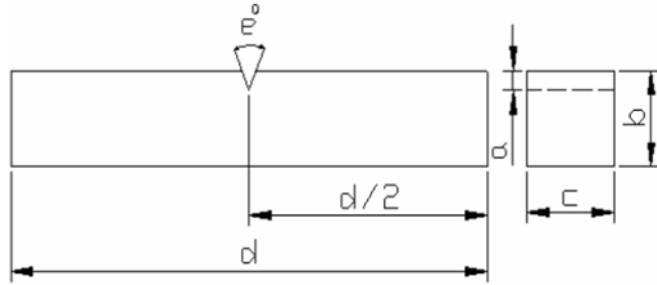
Çeliklere yapılmış olan tüm deneyler aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Metalografik analizler,
- Çeliklerin ortalama tane boyutunun saptanması,
- Darbe deneyi,
- Çekme deneyi,

Çalışmada incelenen tüm çeliklere, aynı mekanik şartlara sahip olmaları için, satın alındıktan sonra sadece gerilim giderme tavlaması yapılmıştır. Hazırlanan numuneler (koruyucu atmosfer olarak Argon gazı altında) ısıtılma fırınında 680°C 'de 1,5 saat bekletilmiş ve fırında soğutulmuştur.

Darbe deneyi için incelenen çeliklerden şekil 3.1'de ölçüleri verilen çentikli numuneler hazırlanmış ve şekil 3.2'de gösterilen max. 300J uygulama kapasitesine sahip serbest salımlı darbe cihazı kullanılmıştır.

- $a = 2 \text{ mm}$
- $b = 10 \text{ mm}$
- $c = 10 \text{ mm}$
- $d = 55 \text{ mm}$
- $e = 45^{\circ}$

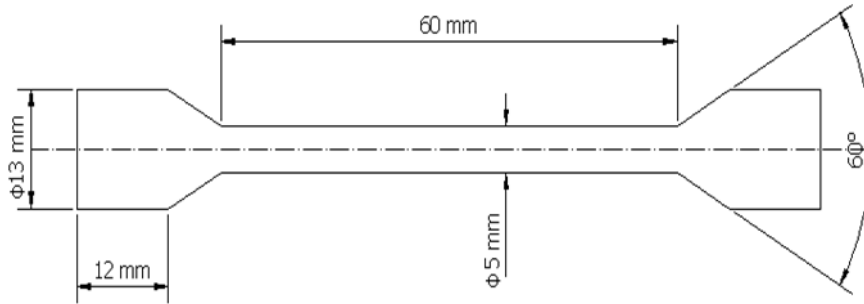


Şekil 3. 1 Darbe deneyi numunesi



Şekil 3. 2 Darbe deney cihazı

Bu çalışmada kullanılan numune tek eksenli çekme deney cihazının kapasitesine göre belirli ölçülerde (şekil 3.3) hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, bilgisayar kontrollü tek eksenli 5 tonluk çekme kapasitesine sahip çekme cihazında (şekil 3.4) deneyler yapılarak kuvvet-deformasyon (P- Δ) diyagramı elde edilmiştir.



Şekil 3. 3 Çekme cihazında kullanılan numune tipi



Şekil 3. 4 Çekme deney cihazı

Kırılma tokluğunun saptanmasında ve t n deney verilerinin analizinde MATLAB programı kullanılmıştır.

3.1 İncelenen  elikler

Tez çalışmasında incelenen çeliklerin kimyasal bileşimleri specktro-analiz yöntemiyle belirlenmiş ve  izelge 3.1’de, kullanım alanları ise  izelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Çeliklerin kimyasal bileşimleri

Çelik	Karbon (C)	Silisyum (si)	Mangan (Mn)	Fosfor (P)	Kükürt (S)
1010	0,154	0,184	0,678	0,0205	0,0296
1020	0,216	0,191	0,808	0,0233	0,0310
1040	0,389	0,288	0,741	0,0187	0,0187
1050	0,448	0,213	0,740	0,0230	0,0144

Çizelge 3.2 Çeliklerin kullanım alanları

Çelik	Kullanım Yeri
1010	Cıvata, somun, konstrüksiyonda görev alarak ıslah edilebilir makine parçaları imalatında kullanılır.
1020	Makine, cıvata, somun yapımında kullanılır. Isıl işlem uygulanabilir.
1040	Transmisyon mili, ray, dişli vs. yapımında kullanılır. İndüksiyon ve alevle sertleştirilebilir.
1050	Cer kancası, dişli, kazma, frezeli mil yapımında kullanılır

3.2 Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniğinin temelleri aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır. Makine parçalarında meydana gelen kırılmanın üç nedeni vardır. Bunlar;

- 1-) Kırılma, gerilim konsantrasyonu bölgesinde gerçekleşmektedir.
- 2-) Kırılmaların tümü gevrek niteliktedir.
- 3-) Kırılma anında gerilim, akma geriliminden çok küçüktür.

Kırılma mekaniği esas olarak gevrek kırılma üzerinde durmaktadır. Gerilim konsantrasyonu olarak ise en tehlikeli olan çatlak göz önünde tutulmaktadır. Kırılma mekaniği malzemenin en kötü şartlarda kırılıp kırılmayacağını araştırmaktadır.

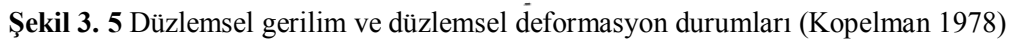
Kırılma mekaniğinin kriteri şu şekilde yazılır.

$$K_I \leq K_{Ic} \quad (3.1)$$

K_I - gerilim şiddet katsayısı

K_{Ic} – kritik gerilim şiddet katsayısı

Şekil 3.5’de düzlemsel gerilim düzlemsel deformasyon durumlarını açıklamak için şemalar verilmiştir (Kopelman 1978).



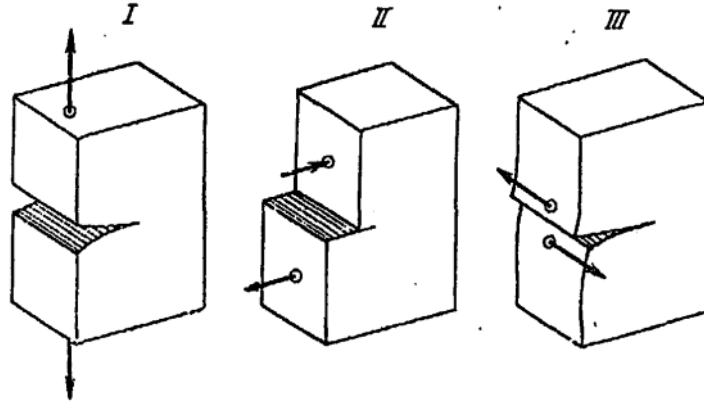
Şekil 3.5, b’de ise levhanın kalınlığı δ , çentik ucunun yarı çapından çok büyüktür. Bu durumda, malzeme (z) ekseninde deforme olmaz ve σ_z gerilimi meydana gelir.

Kırılma mekaniğinde üç çeşit kırılma söz konusudur. Bu şemalar şekil 3.6'de gösterilmiştir (Makhutov 1973).

I. tür; normal kayma (K_I)

II. tür; çatlak yüzeyi boyunca kayma (K_{II})

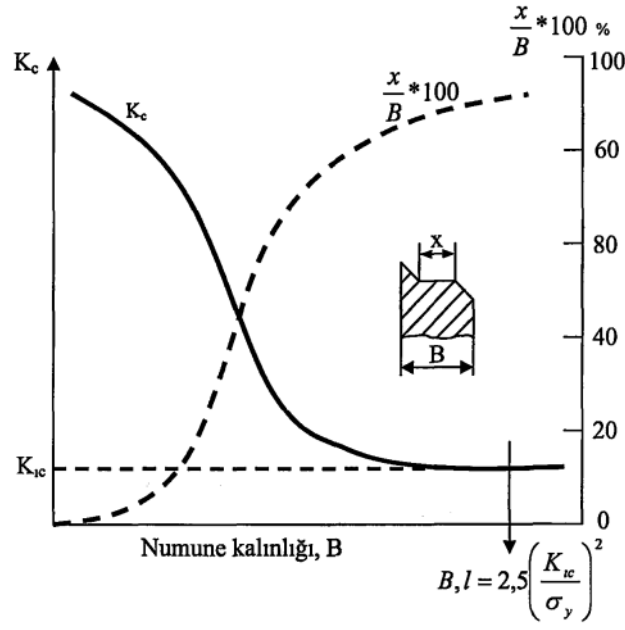
III tür; çatlak yüzeyine ters yönde kayma (K_{III})



Şekil 3. 6 Kırılma tipleri (Makhutov 1973)

Kırılma mekaniği gevrek kırılma üzerine odaklandığı için, aşağıda düzlemsel deformasyon üzerinde durulacaktır. Kırılma türü olarak da en zor şartı sağlayan I. tür normal kayma (K_I) göz önünde tutulacaktır.

Şekil 3.7’de görüldüğü üzere numune kalınlığı arttıkça K_c değeri azalmakta ve numune kalınlığı belirli bir kalınlığa ulaştığında $K_c=K_{lc}$ olmaktadır. Bundan sonra kalınlık artsa da bu değer değişmez. Buna göre K_{lc} malzemenin sabiti sayılır. Aynı zamanda kırılma tavrı, plastikten (K_{cmax} ’dan), gevrek kırılmaya kadar değişmektedir. Kritik gerilim şiddet katsayısı K_c ’nin, numune kalınlığı ile bağılılığı gösterilmiştir (Broek 1974).



Şekil 3. 7 Kritik gerilim şiddet katsayısının, numune kalınlığı ile değişim grafiği (Broek 1974)

Düzlemsel deformasyon durumundaki kesit kalınlığında tam gevrek kırılma gerçekleşmekte ve kırılma tokluğu K_{ic} ile ifade edilmektedir.

Düzlemsel deformasyon durumunun (gevrek kırılma) gerçekleşmesi için ($K_c = K_{ic}$ olması için) numune kalınlığı aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$B, l = 2,5 \left(\frac{K_{ic}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (3.2)$$

K_{ic} 'yi değerlendirmek için formül (3.2)'ye göre numune kalınlığının gerekli boyutlarda olması zorunludur.

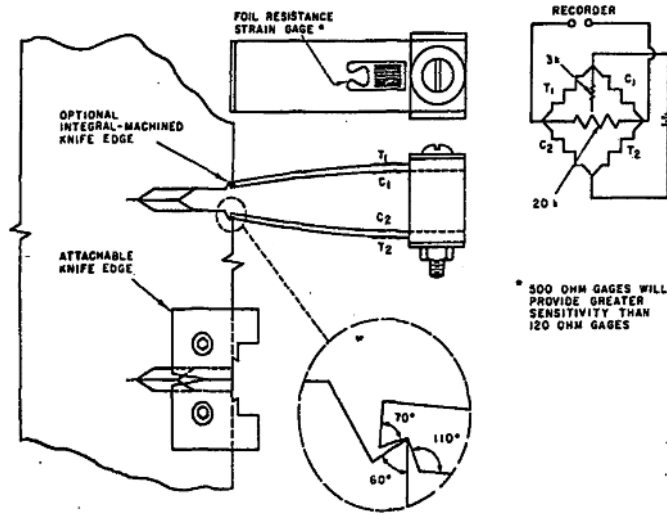
3.2.1 Kırılma Tokluğunun Saptanmasında Kullanılan Standartlar

3.2.1.1 ASTM E-399 Standardı

K_{ic} 'yi tayin etmek için ASTM E-399 standardı geliştirilmiştir. ASTM standardı uyarınca, düşük akma gerilimine sahip çeliklerin kırılma tokluğunun tayin edilmesi için,

düzlemsel deformasyon durumuna şekil 3.7’de gösterilen (gevrek kırılma) uygun büyük boyutlu numunelerin deneye tabi tutulması gereklidir (ASTM, 2003a).

Şekil 3.8’de kuvvet çatlak açılma (P-V) grafiklerinin çatlak açılma koordinatının çizilmesi için kullanılan dinamo metrenin şematik görünüşü verilmektedir (ASTM, 2003a).



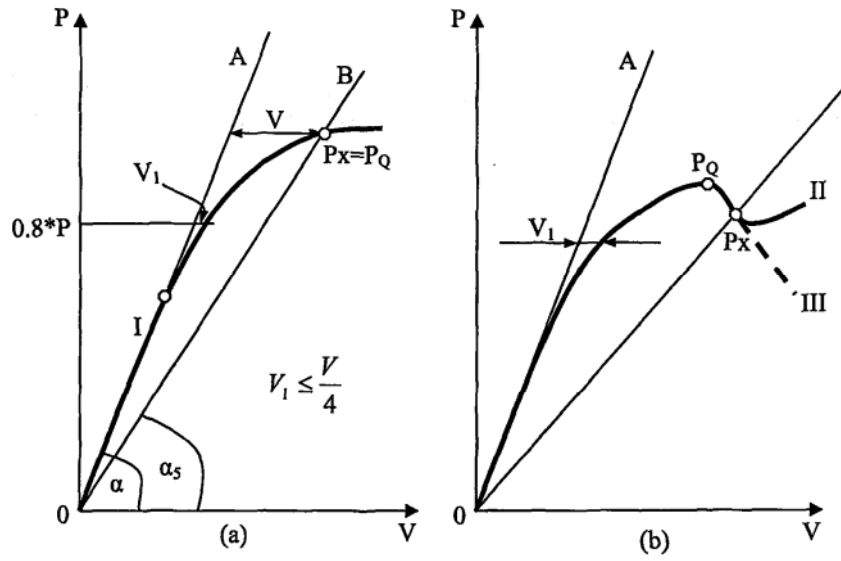
Şekil 3. 8 Dinamometrenin montaj metodu ve klips ölçüleri

Deney esnasında kuvvet-çatlak açılma (P-V) grafikleri çizilir. Bu çizilen grafikler standarda göre özel yöntemlerle analiz edilir. Malzeme özellikleriyle bağımlı olan 1., 2. ve 3. tip grafikler şekil 3.9’de verilmiştir.

Standarda göre şekil 3.9’deki grafiklerle K_{Ic} ’yi değerlendirmek için kullanılan P_Q kuvveti tayin edilmelidir. Şekil 3.9, a’daki grafikte elastik bölge çizgisi devam ettirilir ve bu çizginin açısı a’dan %5 daha az bir açıda OB çizgisi çizilir.

Burada – olmalıdır.

(3.3)



Şekil 3. 9 3 tip çatlak-açılma (P-V) grafiği

Formül 3.9 sağlanırsa, düzlemsel deformasyon gerçekleşmiş ve numune kalınlığı yeterli sayılır. Bu şart yerine getirildiğinde P_Q kuvveti şekil 3.9 b’de ise 2. ve 3. tip grafiklerde P_Q kuvveti gösterilmiştir.

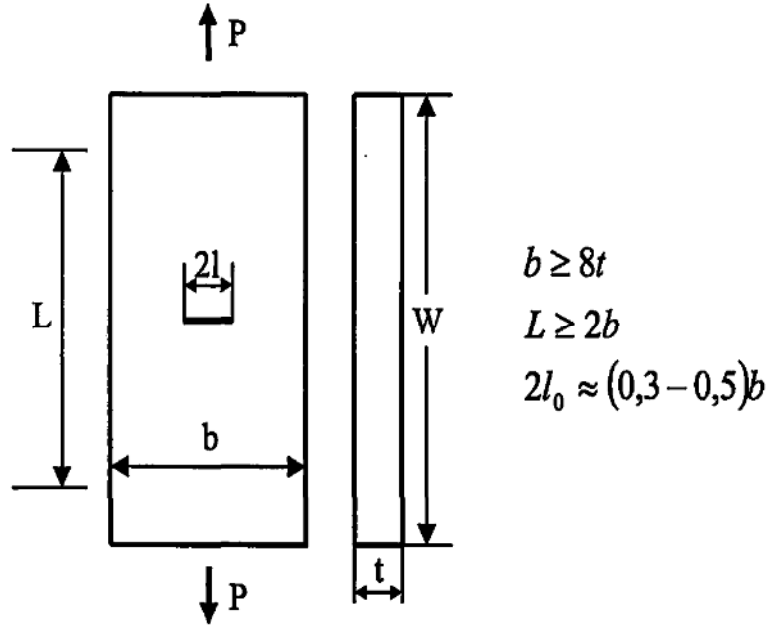
Elde edilmiş olan P_Q kuvvetine göre aşağıdaki durum yerine getirilirse, kırılma tokluğu $K_Q=K_{IC}$ olarak kabul edilir.

$$(3.4)$$

ASTM E-399 standardı uyarınca deneylere tabi tutulan numunelerde oluşturulan çatlaklar, gerilim konsantrasyonu ile başlar ve titreşim makinelerinde elde edilir. Çatlak, gerilim konsantrasyonunun ucundan itibaren ilerlemeye başlar ve istenen çatlak uzunluğu elde edilir. Deneyden sonra kırılmış numune üzerinden gerçek çatlak uzunluğu ölçülür (ASTM, 2003a).

Bu standarda göre, aşağıdaki şekillerdeki 4 tip çentikli numune, K_Q parametresini değerlendirmek için deneye tabi tutulmaktadır (ASTM, 2003a).

Şekil 3.10’de, numunenin orta kısmında bir gerilim konsantrasyonu ve daha sonra çatlak oluşturulmaktadır. Bundan sonra numune eksenel çekmeye tabi tutulmalıdır.



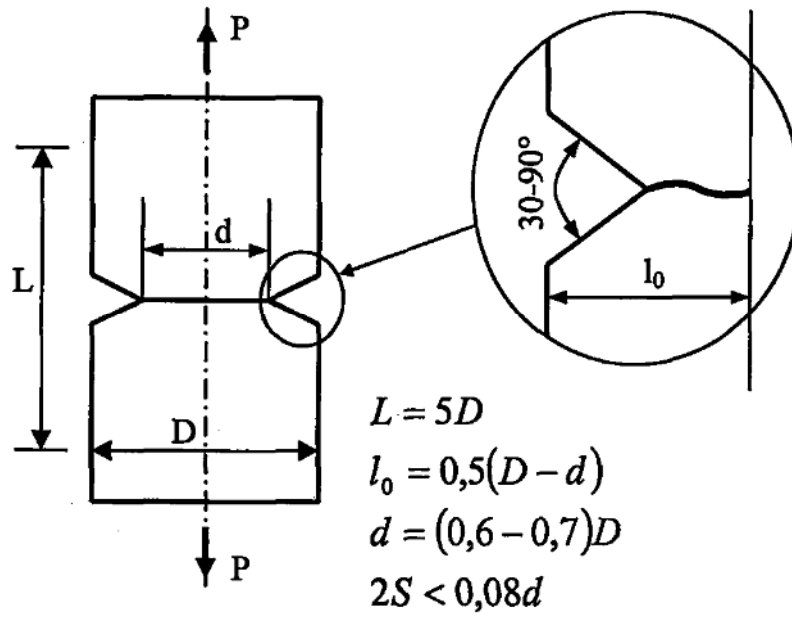
Şekil 3. 10 ASTM standardına göre I. Tip numune şekli

I. tip numune için,

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.5)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.6)$$

Şekil 3.11'deki numune silindiriktir. Gerilim konsantrasyonu olarak çentik açılmakta ve şekil 3.10'deki gibi eksenel çekmeye tabi tutulmaktadır.



Şekil 3. 11 ASTM standardına göre II. tip numune şekli

II. tip numune için,

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.7)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.8)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.9)$$

Şekil 3.12'deki numune eksentrik (eksenel kaçık) çekmeye tabi tutulmaktadır.

IV. tip numune için,

$$K_Q = \left(\frac{P_Q L}{t \sqrt{b^3}} \right) Y_4 \quad (3.12)$$

$$Y_4 = 3,494 \left[1 - 396 \left(\frac{l_0}{b} \right) + 5,839 \left(\frac{l_0}{b} \right)^2 \right] \quad (3.13)$$

Burada;

Y – numunenin sınırlı boyutunu göz önünde tutan parametre

t – numune kalınlığı

b – numune genişliği

l_0 – çatlak uzunluğu

Y, parametresi çatlakın nispi uzunluğu ile bağlı olup polinom, grafik veya tablo şeklinde verilebilmektedir. Formül (3.6, 3.8, 3.11 ve 3.13)’de Y polinom olarak verilmiştir.

3.2.1.2 ASTM E-1921 Standardı

ASTM E-1921 standardı, elastik veya elasto-plastik K_{JC} değerleri kararsızlıklar bulunan ferritik çeliklerin kırılma tokluğunu karakterize eden T_0 referans sıcaklığının saptanması için geliştirilmiştir (ASTM 2003b). Bu standart akma gerilimi 275-825 MPa arasında olan ferritik çelikleri kapsar. Numuneler, tek kenarı çentikli ve çentik ucunda yorulma ön çatlakına sahip olan bar şeklinde ‘SE(B)’ eğme ve standart ‘C(T)’ veya disk şeklinde ‘DC(T)’ çekme numuneleridir. Numunelerin tüm ölçüleri, numune kalınlığına bağlı olarak değişir. Standarda göre referans sıcaklığının saptanabilmesi için belirli sayıda benzer ve doğru teste ihtiyaç duyulmaktadır.

Numune boyutuna geçiş aralığı bölgesindeki K_{JC} değerleri üzerine istatistiksel etkisi, kırılma tokluğu değerlerinin üç parametrelili bir Weibull dağılımına uygulanmış olan en zayıf bağ teorisi kullanılarak analiz edilmiştir. İstatistiksel metot, geçiş aralığındaki kırılma tokluğunun eğimini tahmin etmek için kullanılır ve deneye tabi tutulan malzemenin 1T (25,4 mm) numunesi için tolerans sınırını belirtir. Veri dağılımının standart sapması, Weibull eğiminin bir fonksiyonu olmakla birlikte, aynı zamanda ortalama K_{JC} ’dir.

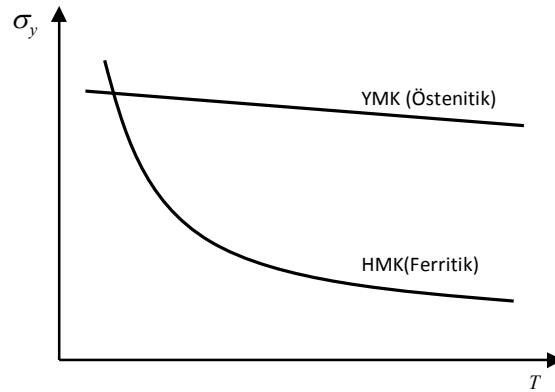
ASTM E-1921 standardına göre deneye tabi tutulan malzemeler, makroskobik ölçüde düzgün dağılımlı çekme ve tokluk özelliklerine sahip olmalıdır. Standarda göre T_0 'ın saptanabilmesi için 1T (25,4 mm) ölçülerine sahip numunelerin K_{JC} deney verileri gerekmektedir.

3.3 Ferritik Çeliklerin Kırılma Tokluğunun Saptanmasında Kullanılan Yöntem

3.3.1 Ferritik Çeliklerde Temel Mekanik Özelliklerin Sıcaklıkla İlişkisi

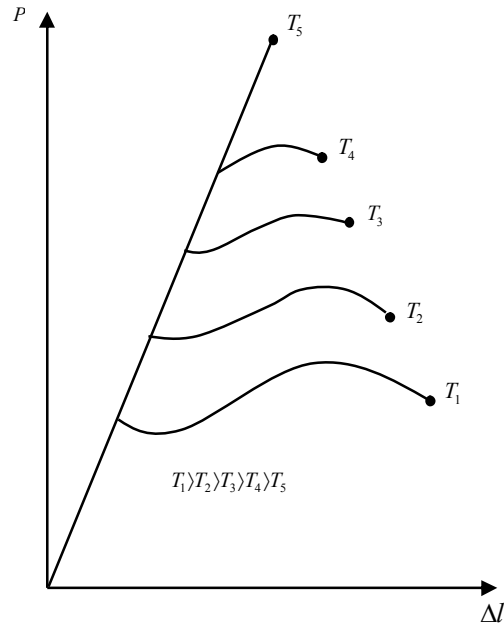
İncelenen yöntem, HMK kafes yapısına sahip olan yapı çelikleri üzerinde uygulanabilmektedir. Bu durumun sebebi; bu çeliklerin akma geriliminin sıcaklıkla ve deformasyon hızıyla değişmesindendir. Aynı şekilde, kırılma tokluğu da sıcaklıkla ve deformasyon hızıyla değişmektedir.

Aşağıda ortaya atılacak olan tüm fikirler metal ve alaşımlarda akma geriliminin sıcaklıkla değişimi göz önüne alınarak, HMK kafes yapısına sahip olan metal ve alaşımlarda geçerlidir (Şekil 3.14).

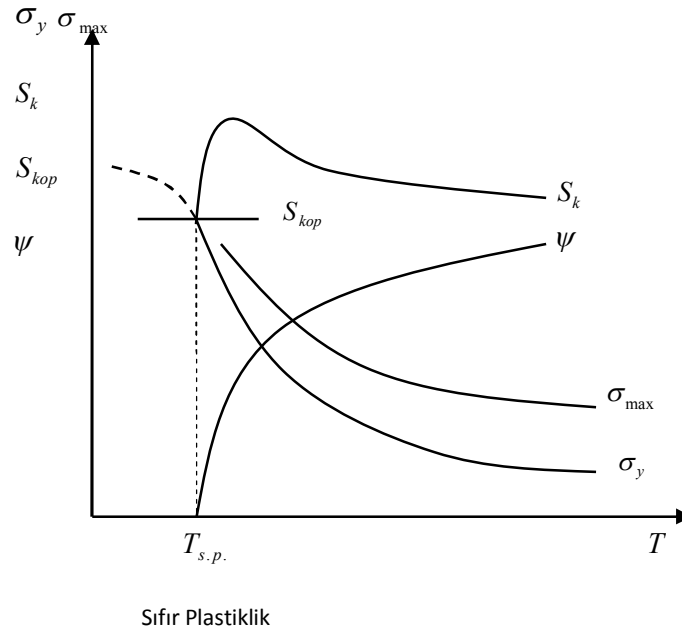


Şekil 3. 14 HMK ve YMK kafese sahip metal ve alaşımlarda akma geriliminin sıcaklıkla değişimi

HMK kafesli metal ve alaşımlar için tek eksenli çekme deneylerinde elde edilen “kuvvet-deformasyon” ($P-\Delta l$) grafiklerinin sıcaklıkla değişimi şekil 3.15’de, temel mekanik özelliklerin (σ_y , σ_{max} , S_k , S_{kop} , Ψ) sıcaklıkla değişimi, şekil 3.16’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 15 P-Δl grafiklerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 3. 16 Temel mekanik özelliklerin sıcaklıkla değişimi

S_{kopma} (S_{kop}) ne sıcaklıkla ne deformasyon hızıyla ne de gerilim konsantrasyonlarına bağlı değildir. S_{kop} sadece malzemenin tane boyutuna bağlıdır.

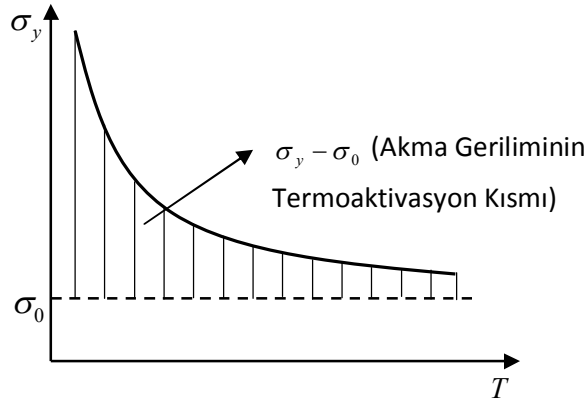
3.3.2 Akma Dayanımının Sıcaklıkla İlişkisi

3.3.2.1 Yaroshevich Yaklaşımı

1970’li yıllarda Yaroshevich (1970) tarafından, “dislokasyonların çiftli eğilerek hareketi modeli” esasında, akma geriliminin sıcaklıkla ve deformasyon hızı ile bağımlılığını göz önünde tutan bir formül elde edilmiştir.

$$\sigma_y = \sigma_0 + A e^{-\alpha T} \quad (3.14)$$

Formül (3.14), akma geriliminin, deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) ve sıcaklıkla (T) bağılılığını göstermektedir. Deformasyon hızı arttıkça, α azalır ve σ_y değeri artar. Formül (3.14)’nin σ grafiksel ifadesi şekil 3.17’deki gibidir.

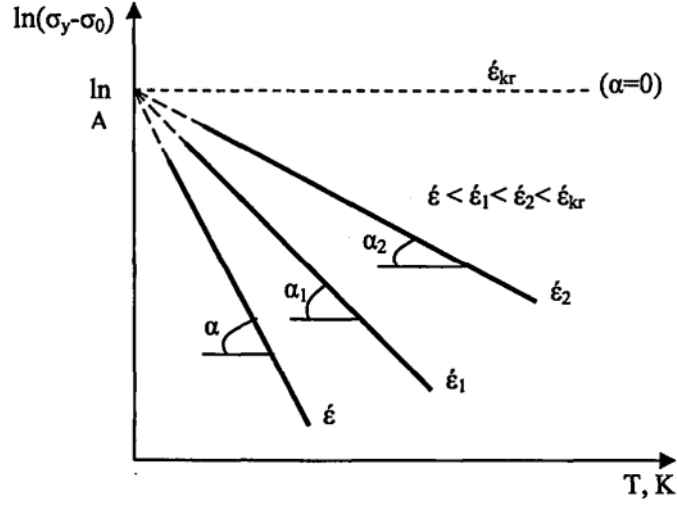


Şekil 3. 17 Akma geriliminin atermik (σ_0) ve termoaktivasyon kısmı

Formül (3.14)’de bazı değişiklikler yapılarak her iki tarafın logaritması alınırsa;

$$\ln(\sigma_y - \sigma_0) = \ln A - \alpha T \quad (3.15)$$

formül (3.15) yarı logaritma $\ln(\sigma_y - \sigma_0) - T$ koordinat alanında doğru çizgiyi ifade etmektedir.



Şekil 3. 18 $\ln(\sigma_y - \sigma_0)$ 'ın çeşitli çeşitli deformasyon hızlarında, sıcaklıkla değişimi

Şekil 3.18'da görüldüğü üzere deformasyon hızı arttıkça, malzemenin akma gerilimi artmakta ve aynı zamanda akma geriliminin, sıcaklığa göre deformasyon hızına hassasiyeti zayıflamaktadır. $\square = \square_{kr}$ olduğunda akma geriliminin, deformasyon hızına hassasiyeti olmaz.

3.3.2.2 Makhutov Yaklaşımı

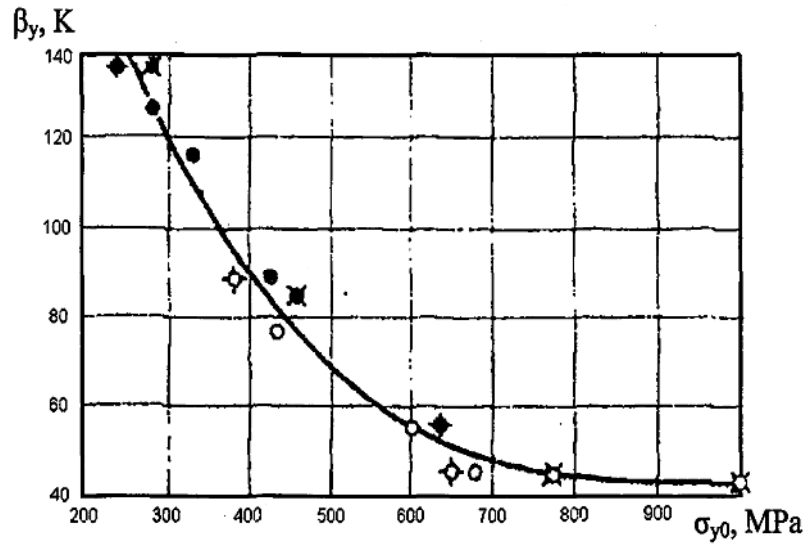
Oda sıcaklığında çekme deneyi sonuçlarına göre akma geriliminin sıcaklıkla bağımlılık grafiği elde edilir. Bunun için Makhutov tarafından ortaya atılan formül kullanılır (Makhutov 1973).

$$\sigma_y = \sigma_0 \exp\left(\frac{\beta \dot{\epsilon}}{T - T_0}\right) \quad (3.16)$$

Burada;

σ_{y0} – akma geriliminin $T_0=293K$ 'deki değeri

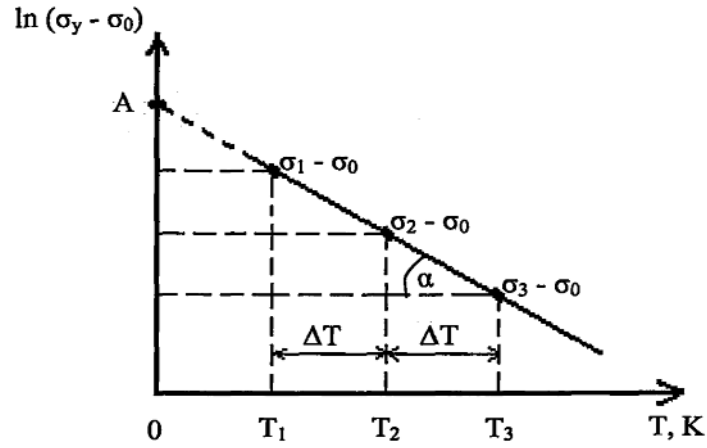
β_y ile σ_{y0} 'nın bağımlılığı şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3. 19 Akma geriliminin β_y ile ilişkisini gösteren grafik (Makhutov 1973)

Formül (3.14)'de yer alan σ_0 , A, α parametrelerinin belirlenmesinde formül (3.16) kullanılır. Bunun için çeşitli sıcaklıklarda formül (3.16)'e göre σ_y değerleri hesaplanır.

Şekil 3.21'de akma geriliminin atermik (σ_0) kısmını değerlendirmek için bir şema gösterilmiştir.



Şekil 3. 20 Akma gerilimin atermik (σ_0) kısmını değerlendirme üzerine bir şema

Şekil 3.21'ye göre üç nokta (sıcaklık) üzerinde σ_0 ;

$$\sigma_0 = \sigma_y - \ln(\sigma_y - \sigma_0) \quad (3.17)$$

α ve A parametreleri ise aşağıdaki formüllerle ifade edilir.

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_2 - \sigma_0}\right)}{\Delta T} \quad (3.18)$$

$$A = (\sigma_1 - \sigma_0)e^{\alpha T_1} = (\sigma_2 - \sigma_0)e^{\alpha T_2} = (\sigma_3 - \sigma_0)e^{\alpha T_3} \quad (3.19)$$

3.3.3 Metal ve Alaşımların Gevrek Kırılma Şartı

Söz konusu metal ve alaşımların kırılması için iki şartın birlikte gerçekleşmesi gerekir (Kopelman 1978).

$$\text{a) } \sigma_1 \geq S_{\text{kop}} \quad (3.20)$$

$$\text{b) } \sigma_i \geq \sigma_y$$

Burada;

σ_1 - en büyük normal gerilim değeri

σ_i - gerilim konsantrasyon bölgesinde eşdeğer gerilim değeri

S_{kop} - Şekil 3.13'de $\sigma_y = \sigma_{\text{max}} = S_k (\square=0)$ şartına uygun malzemenin kopmaya direncini ifade etmektedir.

S_{kop} sadece malzemenin tane boyutuna bağlıdır. Yani çeşitli ısı işlemleriyle tane boyutunu değiştirerek S_{kop} değiştirilebilir.

Tek eksenli çekme deneyinde (silindirik numunede) $\sigma_i = \sigma_1$ ($\sigma_2=0$; $\sigma_3=0$)'dır. Gevrek kırılmanın belirli bir ($T=T$) gerçekleştiği göz önünde tutulursa formül (3.20)'den;

$$\varphi = \frac{\sigma_1}{\sigma_i} = \frac{S_{\text{kop}}}{\sigma_y} \Big|_{T=T_{sp}} \quad (3.21)$$

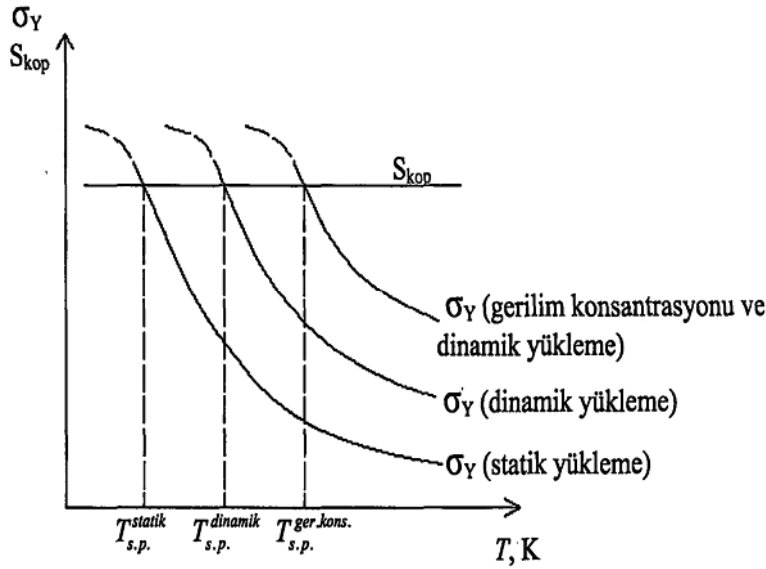
Burada; φ - gerilim durumunu ifade eden bir katsayı

Eşdeğer gerilimi (σ_i) bulmak için Von Mises kriteri kullanılır.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3.22)$$

Burada; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – her hangi bir gerilim konsantrasyonu kökünden meydana gelen gelen normal gerilimlerdir.

Söz konusu metal ve alaşımların sünek-gevrek geçiş sıcaklık sınırına, bazı çalışma şartlarının etkisi IOFFE şeması üzerinde açıklanır (Kopelman 1978).



Şekil 3. 21 Sünek - gevrek geçiş sıcaklık sınırına etkisi (IOFFE şeması)

3.3.4 Kırılma Hipotezi ve Mekanizması

Az karbonlu düşük alaşımlı çelikler için kırılma tokluğunun çatlak ucunda meydana gelen plastik deformasyonun termoaktivasyon enerjisi ile eksponansiyel bağıllığı hakkında hipotez ve K_{Ic} kırılma modeli kabul edilmiştir (Saidov 1989). Kabul edilen hipotez ve kırılma mikro mekanizmasına göre kırılma tokluğu (K_{Ic}) formül (3.23) ile ifade edilir.

$$K_{Ic} = \exp(\alpha m T) \quad (3.23)$$

Bu yöntemin uygulanabildiği alanlar:

- a) HMK kafesli metal ve alaşımlar
- b) $0 \leq T \leq 0,2T_{er.}, K;$
- c) $\sigma \leq \sigma_{kr};$

Söz konusu çelikler için K_{μ} modelinin temelini, çatlak ucundan belirli bir mesafede (ρ_c) meydana gelen kritik gerilim (σ_c) etkisi altında, mikro çatlağın meydana gelmesi ve bu çatlağın ana çatlığa doğru hareket ederek ana çatlak ile birleşmesi (aynı işlem defalarca tekrar etmektedir) sonucunda, ana çatlağın ilerlemesi oluşturur. Bu kırılma mekanizmasına göre, kırılma tokluğu için formül (3.24) elde edilmiştir (Krasovsky 1983).

$$\left(\frac{K_{Ic}}{K_{\mu}}\right) = \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_y}\right)^{\frac{(l-n)}{2n}} \quad (3.24)$$

$$K_{\mu} = \sigma_c \sqrt{\pi \rho_c} \quad (3.25)$$

σ_c – çatlak ucunda ρ_c mesafede meydana gelmiş olan kritik gerilim değeri.

n – malzemenin deformasyon etkisinde pekleşme katsayısı.

Formül (3.24)'da yer alan K_{μ} ve σ_c değerleri, sıcaklık deformasyon hızına bağlı değildir (Krasovsky 1983).

Formül (3.23)'in logaritması alınır,

$$\ln \left(\frac{K_{Ic}}{K_{Ic}^0}\right) = \alpha m T \quad \text{olur.} \quad (3.26)$$

Formül (3.25)'da σ_c ve K_{μ} sıcaklık deformasyon hızı ile bağımsız olduğu göz önünde tutularak K_{Ic} için, aşağıdaki eşitlikler kabul edilir (saidov 1989).

$$\begin{aligned}
a) \quad K_{\mu} &= K_{lc}^0 \\
b) \quad \sigma_c &= \sigma_y(0) - \sigma_0 = A \\
c) \quad \rho_c &\approx d
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Formül (3.27)'daki a ve b eşitlikleri formül (3.24)'da göz önünde tutulursa,

$$\left(\frac{K_{lc}}{K_{\mu}} \right) = \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_y} \right)^{\frac{(l-n)}{2n}} \quad \text{veya} \quad \ln \left(\frac{K_{lc}}{K_{lc}^0} \right) = \frac{1-n}{2n} \ln \left(\frac{A}{\sigma_y} \right) \quad \text{olur.} \tag{3.28}$$

Formül (3.26) ve (3.28)'nin sol tarafları birbirine eşittir. Buna göre;

$$\alpha m T = \chi \ln \left(\frac{A}{\sigma_y} \right) \tag{3.29}$$

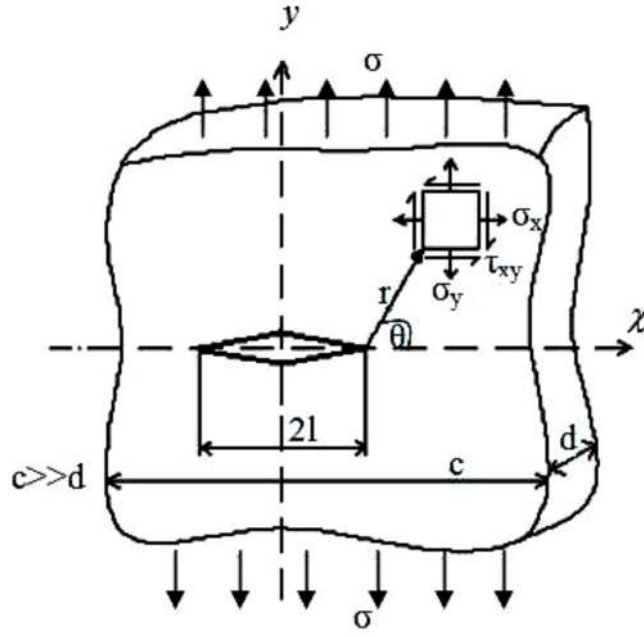
Burada;

$$\chi = \frac{1-n}{2n} \tag{3.30}$$

3.3.5 Düzlemsel Deformasyon Şartı ve Kırılma Tokluğu Formülü

Kırılma tokluğu (K_{IC}), çatlak ucunda düzlemsel deformasyon şartını (gevrek kırılma) göz önünde tuttuğu için, formül (3.21)'de yer alan $\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)$ oranı değerlendirilmelidir. Bu orandaki σ_i , formül (3.22)'e göre değerlendirilir.

Aşağıda düzlemsel gerilim şemasında, romb (baklava dilimi) şeklindeki gerilim konsantrasyonu, dış gerilim (σ) altında yüklenmiştir. θ açısı altında 'x-y' koordinat alanında bulunan herhangi bir bölge için, dış gerilim etkisi ile meydana gelen σ_x σ_y τ_{xy} gerilimleri görülmektedir (şekil 3.22).



Şekil 3. 22 Romb (baklava dilimi) şeklindeki gerilim konsantrasyonları

Şekil 3.22'deki şemaya göre y eksenini boyunca gerilimi aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$\sigma_y = \sigma \left(1 - \frac{2l^2}{r^2} \cos^2 \theta \right) \quad (3.31)$$

Şekil 3.22'deki şemada, gerilim şiddet katsayısını belirlemek için Irwin tarafından aşağıdaki formül elde edilmiştir.

$$K_t = \frac{\sigma \sqrt{2l}}{\sqrt{\pi a}} \quad (3.32)$$

Formül (3.32), formül (3.31)'de yerine konulursa,

$$\sigma_y = \sigma \left(1 - \frac{2l^2}{r^2} \cos^2 \theta \right) \quad (3.33)$$

Formül (3.33), çatlak bulunan bir parçanın temel parametrelerini kapsamaktadır. Dış gerilim (σ) sabit olduğu için çatlak ucunda meydana gelen gerilim (σ_y), çatlak uzunluğu (l) ve radius vektörü (r) ile bağlıdır (Makhutov 1973).

Şekil 3.22'deki şemada, Q açısını da kapsayan 'x-y' koordinat alanında herhangi bir bölge için, dış gerilim etkisiyle meydana gelen σ_x , σ_y , τ_{xy} gerilimlerinin değeri, aşağıdaki formüllerle ifade edilir.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right) \\ \sigma_y &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K}{2\pi r} \left(\cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)\end{aligned}\quad (3.34)$$

Formül (3.34)'e göre asal gerilimler,

$$\sigma_{1,2} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 \pm \sin \frac{\theta}{2} \right] \quad (3.35)$$

Düzlemsel deformasyon şartında $\theta=0$ için,

$$\sigma_3 = 2\nu \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.36)$$

Böylelikle,

$$\sigma_1 = \sigma_2 \quad \sigma_3 = 2\nu \sigma_1 = 2\nu \sigma_2 \quad (3.37)$$

bu değerler formül (3.24)'e konulursa,

$$\sigma_i = \sigma_1 (1 - 2\nu) \quad (3.38)$$

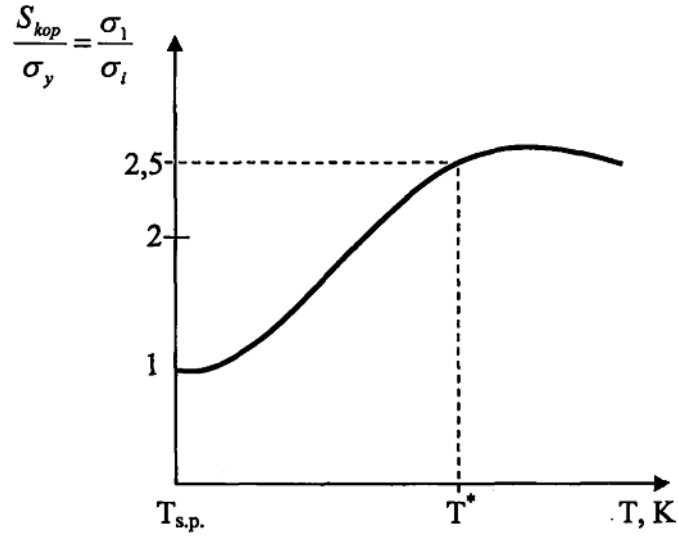
Sonuçta formül (3.23) şu şekilde yazılır.

$$\frac{\sigma_I}{\sigma_i} = \frac{1}{(1 - 2\nu)} \quad (3.39)$$

Söz konusu çelikler için $\nu=0,3$ kabul edilirse,

$$\frac{S_{kop}}{\sigma_y} = \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \quad (3.40)$$

Formül (3.40)'de yer alan $\frac{S_{kop}}{\sigma_y} = \frac{\sigma_1}{\sigma_i}$ oranının sıcaklıkla ilişkisini şematik olarak şekil 3.23'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 23 $\frac{S_{kop}}{\sigma_y} = \frac{\sigma_1}{\sigma_i}$ değerinin sıcaklığa göre değişimi

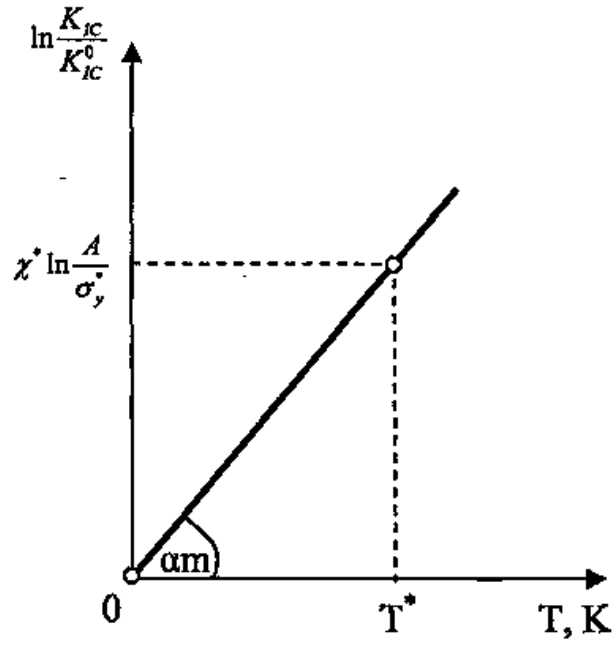
Şekil 3.23'a göre elde edilmiş olan T^* sıcaklığı, formül (3.20)'da yerine konulursa,

$$\frac{S_{kop}}{\sigma_y} = \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \quad (3.41)$$

Formül (3.41)'den α_m değeri, formül (3.19)'da yerine konulursa,

$$\frac{S_{kop}}{\sigma_y} = \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \quad (3.42)$$

Formül (3.42)'de ' $\alpha_m - T^*$ ' koordinat alanında α_m açısı altında çizilmiş olan doğru çizgiyi ifade etmektedir (şekil 3.24).



Şekil 3. 24 Kırılma tokluğunun sıcaklığa göre değişimi

Şekil 3.24'de yer alan noktaların koordinatları,

- 1) $T=0 \text{ K}, \quad \ln \frac{K_{IC}}{K_{IC}^0} = 0$
- 2) $T=T^* \text{ K}, \quad \ln \frac{K_{IC}}{K_{IC}^0} = \chi^* \ln \frac{A}{\sigma_y^*}$

Böylelikle kırılma tokluğu ve sıcaklık arasındaki ilişki aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$K_{IC} = K_{IC}^0 \exp \left[\frac{T}{T^*} \chi^* \ln \frac{A}{\sigma_y^*} \right] = K_{IC}^0 \left(\frac{A}{\sigma_y^*} \right)^{\frac{\chi^*}{T^*} T} \quad (3.43)$$

burada,

$$\chi^* = \frac{1-n^*}{2n^*}$$

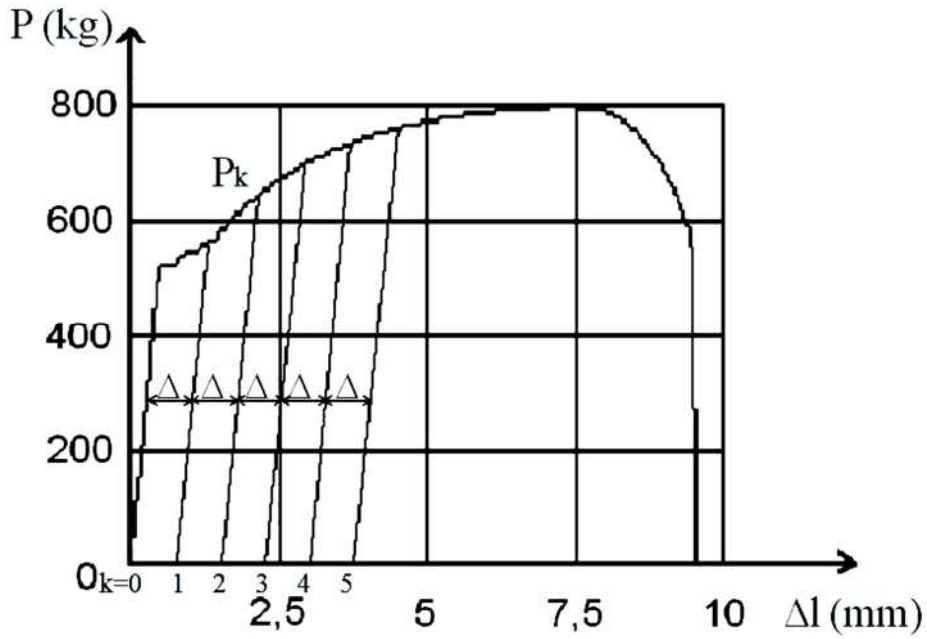
Malzemenin tane boyutu göz önünde tutulursa

$$\frac{K_{IC}}{\sqrt{B}} = \frac{P_k}{\sqrt{B}} \quad (3.44)$$

Formül (3.44), malzemenin kırılma tokluğunun (K_{IC}), içyapıyla, deformasyon hızıyla, sıcaklıkla ve mekanik özelliklerle bağlılığını ifade etmektedir. Kırılma tokluğu çekme deneyinden elde edilen mekanik özellikler ve metalografik analizler sonucunda tayin edilen tane boyutu ile saptanır.

3.3.6 Pekleşme Katsayısının Saptanması

Şekil 3.25’de gösterilen kuvvet deformasyon grafiği, gerçek gerilim-gerinim grafiğine çevirmek için, P- Δl grafiğinde orantılı deformasyon bölgesini 5 eşit parçaya ayırmak gerekir. Örnek bir malzemenin kesitlere bölünmüş olan P- Δl grafiği şekil 3.21’de gösterilmiştir (saidov 1989).



Şekil 3. 25 Kesitlere bölünmüş olan P- Δl şeması

Şekil 3.25’e göre gerçek gerilim-gerinim arasındaki ilişki;

$$\sigma_i = B \quad (3.45)$$

Bu formülün logaritması ise;

$$\ln \sigma_i = \ln B + n \ln \varepsilon_i \quad (3.46)$$

Formül (3.45)'deki B'yi modül tayin etmek için $\varepsilon_i=1$ değerinde σ_i bulunur.

Formül (3.46)'deki σ_i ve ε_i , şekil 3.25'deki P- Δ grafiği üzerinde, aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$\sigma_i = \frac{P_k}{A_0} \left(1 + \frac{k\Delta}{l_0} \right) \quad (3.47)$$

$$\varepsilon_i = \ln \left(1 + \frac{k\Delta}{l_0} \right) \quad (3.48)$$

Burada;

P_k – bölünmüş kesitlerin kuvvet değeri

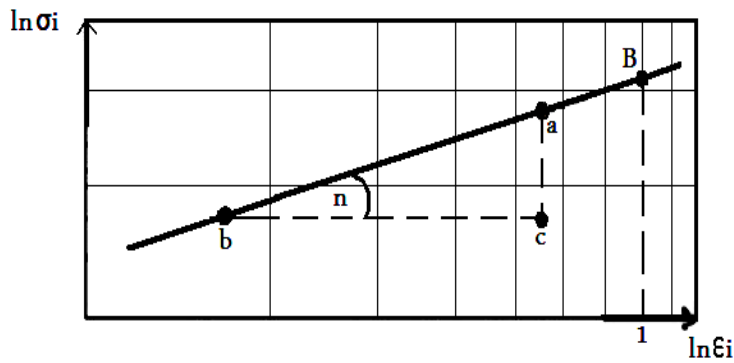
A_0 – Numunenin ilk kesit yüzeyi

k – bölümlene sayısı

Δ - bölümlenmiş kesitler arasındaki mesafe

l_0 – numunenin ilk uzunluğu

Formül (3.46), çift logaritma koordinat alanında doğru çizgiyi ifade etmektedir (şekil 3.26).



Şekil 3. 26 Gerçek Gerilim-Gerinim Grafiği (Logaritmik)

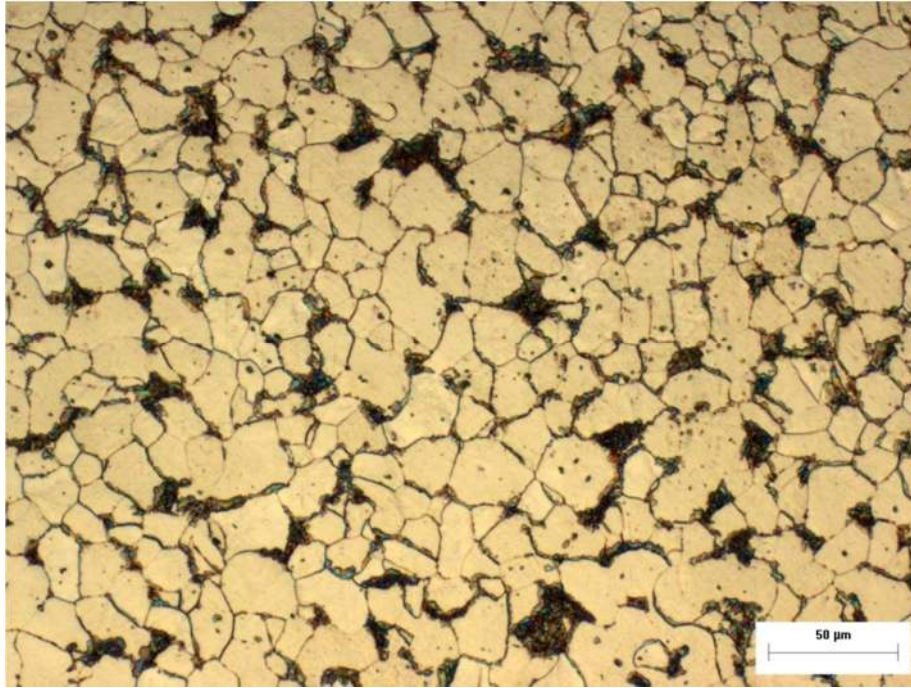
Şekil 3.26’de çizilen $\ln\sigma_i - \ln\varepsilon_i$ logaritmik değişim grafiğindeki doğru çizginin eğimi, pekleşme katsayısını vermektedir. Pekleşme katsayısı aşağıdaki formülle ifade edilmektedir.

$$n = \frac{\ln \frac{\sigma_a}{\sigma_b}}{\ln \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b}} \quad (3.49)$$

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

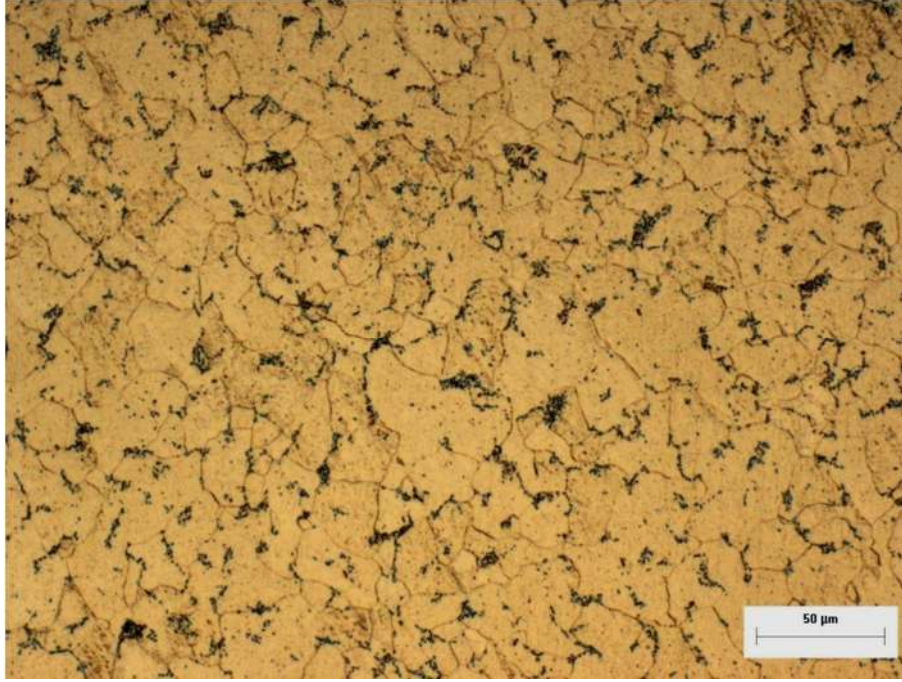
4.1 Mikro Yapı Analizleri

Mikro yapı görüntüleri için numuneler Metalografi laboratuvarında hazırlandıktan sonra % 3'lük nital (nitrik asit + etil alkol) dağlayıcı ile dağlanmıştır. Dağlanan numuneler optik mikroskop altında çeşitli büyütmelerde incelenmiştir. İç yapı resimleri şekil 4.1-4.4'de verilmiştir.



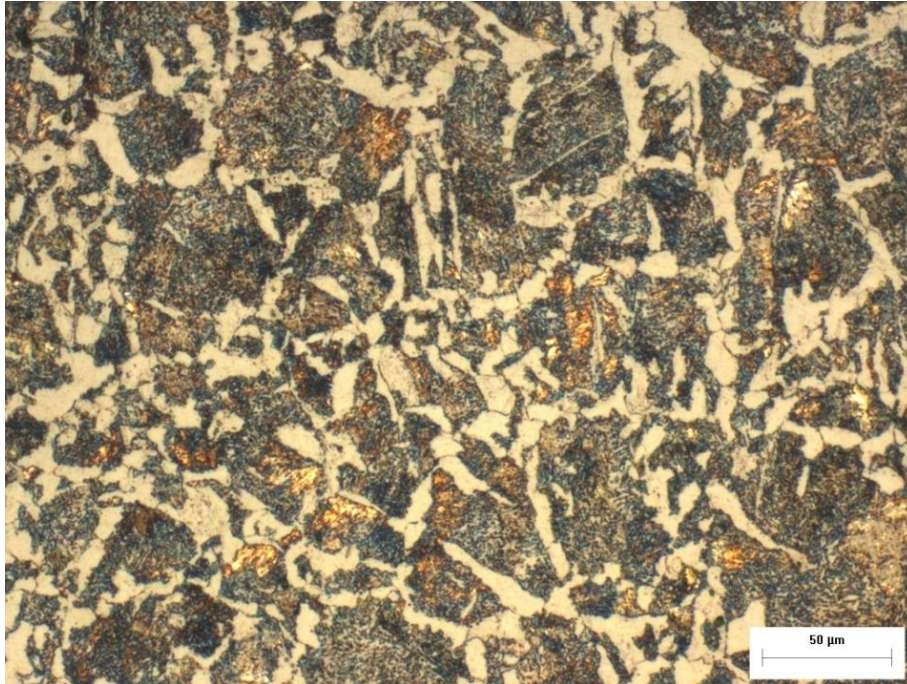
Şekil 4. 1 1010 çeliğinin iç yapısı (200x)

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, tane sınırları belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Beyaz bölgeler ferrit, siyah bölgeler ise perlit yapısıdır. Resimde ferrit bölgelerin üzerinde görülen siyah noktalar ise dağlama hatalarıdır.



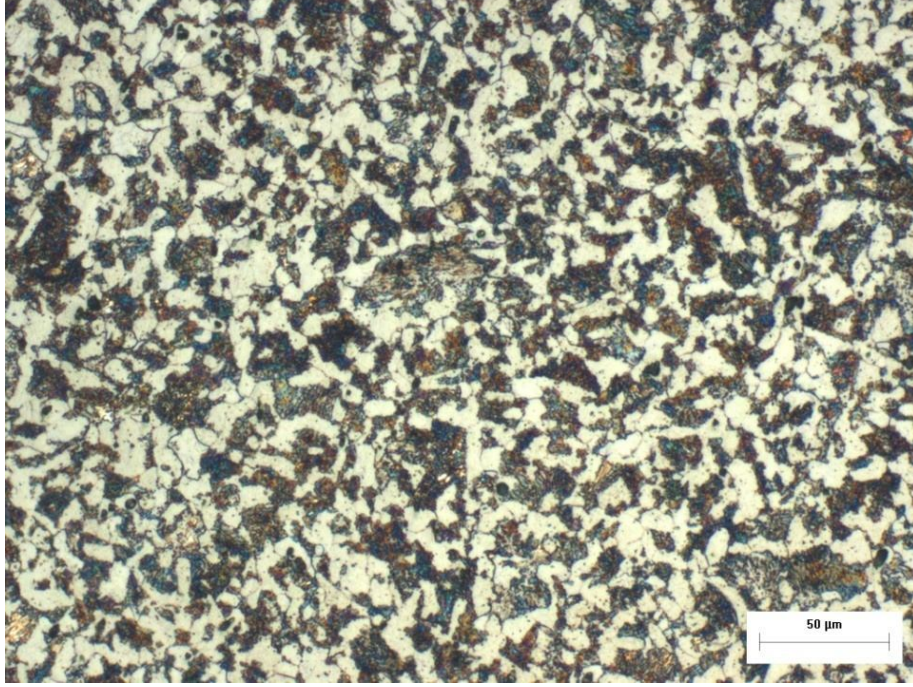
Şekil 4. 2 1020 çeliğinin içyapısı (200x)

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere tane sınırları nisbeten belirgindir. Perlit- ferrit bölgeleri orantılı bir şekilde dağılmıştır. Ferrit bölgelerinin üzerinde bulunan siyah noktalar dalgama hatalarında oluşmuştur.



Şekil 4. 3 1040 çeliğinin iç yapısı (200x)

Şekil 4.3’de görüldüğü üzere ferrit bölgeleri azalmakta perlit bölgeleri artmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere perlit bölgeleri arasına ferrit bölgeleri bulunmaktadır.



Şekil 4. 4 1050 çeliğinin içyapısı (200x)

Şekil 4.1 - 4.4’deki iç yapı resimlerine bakıldığında kabaca ferrit-perlit oranları çeliklerin karbon oranları ile uyumludur. Yani çeliklerin karbon oranları arttıkça perlit bölgesi artmakta ferrit bölgesi azalmaktadır.

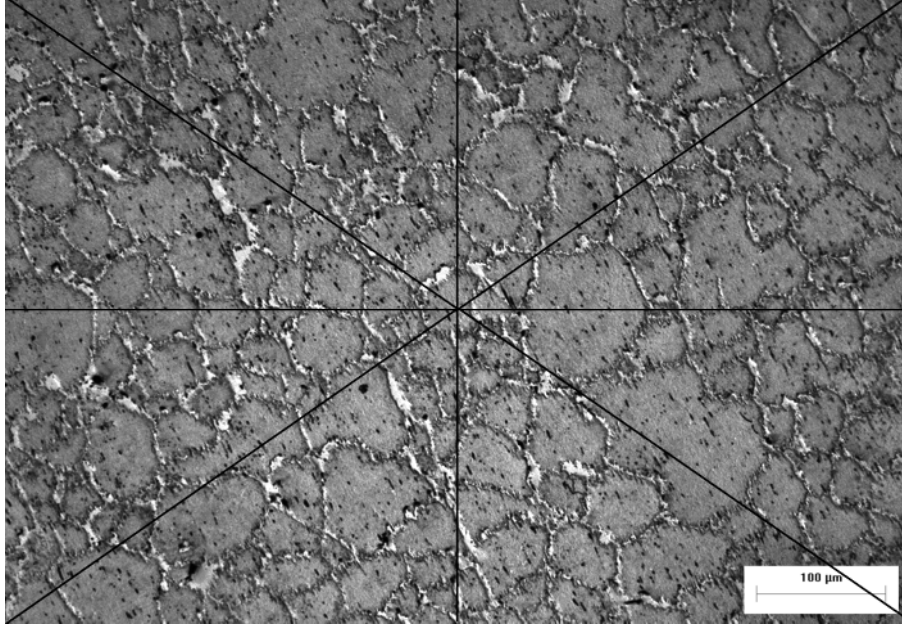
4.2 Tane Boyutunun Belirlenmesi

Çalışmamızda tane boyutunu hesaplamak için oksitleme yöntemi kullanılmıştır.

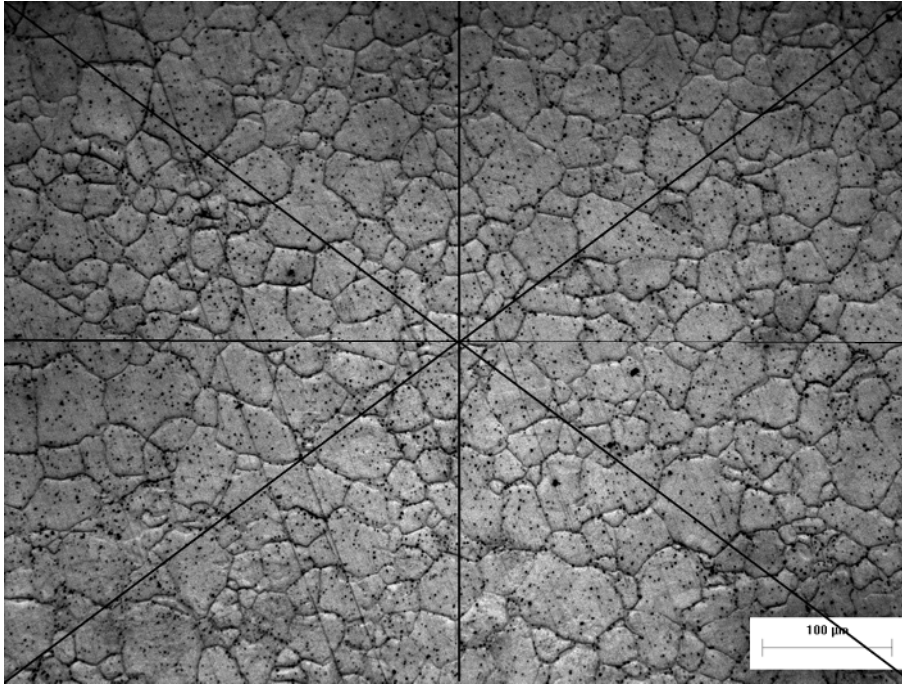
Parlatılmış metalografik numuneler fırında 950°C sıcaklıkta 3 saat bekletilir. Sonra fırında 30-60 saniye hava verilir ve numuneler suda soğutulur. Bu işlemlerden sonra numuneler yeniden parlatılır ve % 15 HCl + %85 etil alkol ile dağlanır. Optik mikroskopta incelenir.

İncelenen numunenin optik mikroskopta 200x defa büyütülerek fotoğrafı çekilmiştir. Bu fotoğraflar aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

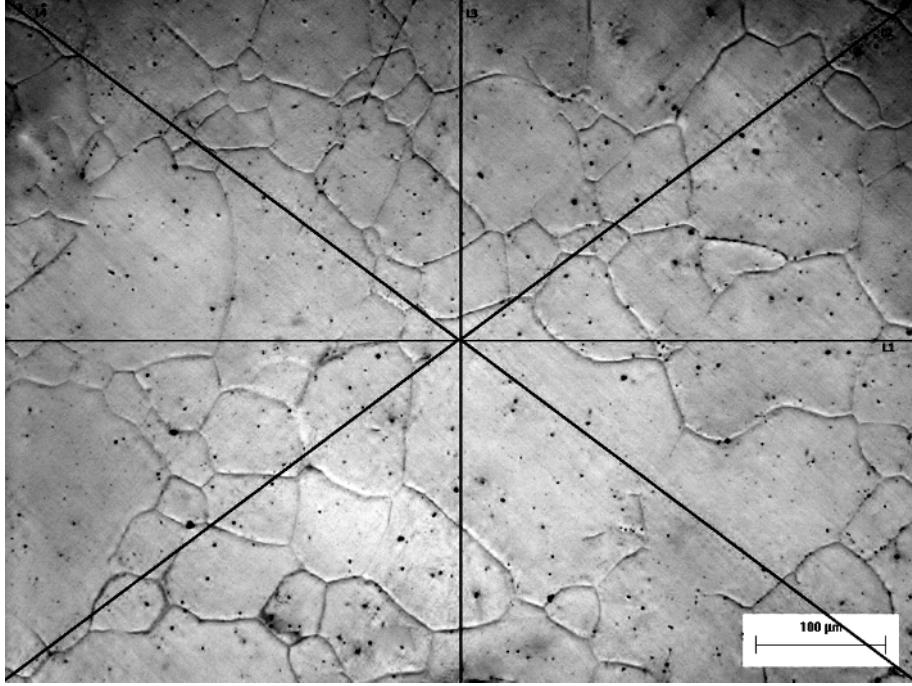
Şekil 4.5-4.8'deki içyapı resimlerinde tane sınırları belirgin bir şekilde görülmektedir. İçyapı resimlerindeki siyah noktalar dağlama hatalarıdır. Tane çapının saptanmasında, düz çizgilerin L_1 , L_2 , L_3 , L_4 mesafeleri şekiller üzerinden alınmıştır.



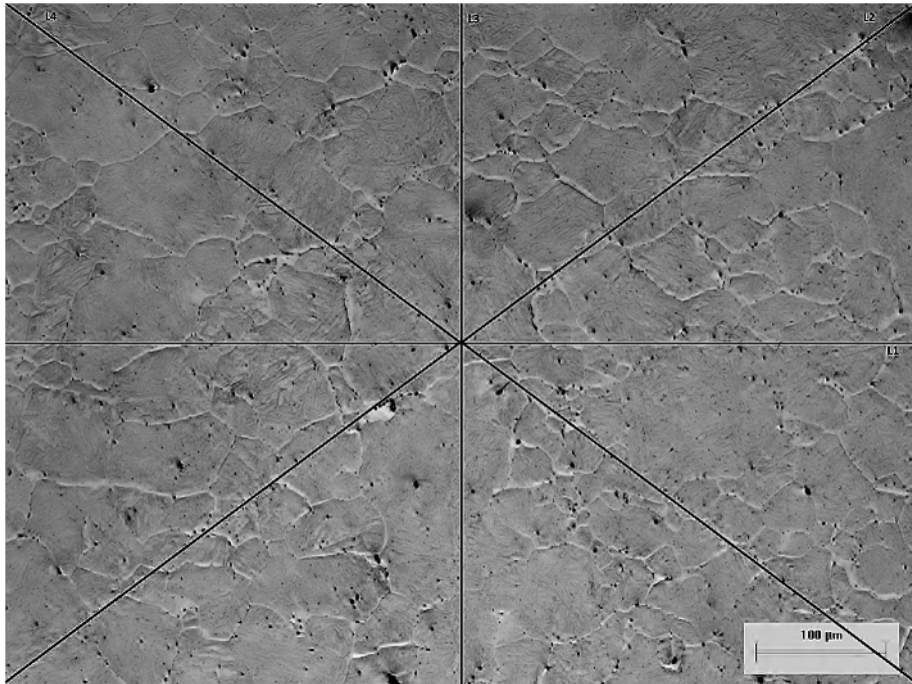
Şekil 4. 5 1010 çeliğinin mikro yapısından tane çapının belirlenmesi (100x)



Şekil 4. 6 1020 çeliğinin mikro yapısından tane çapının belirlenmesi (100x)



Şekil 4. 7 1040 çeliğinin mikro yapısından tane çapının belirlenmesi (100x)



Şekil 4. 8 1050 çeliğinin mikro yapısından tane çapının belirlenmesi (100x)

Tane çapını hesaplamak için, resim üzerine dört düz çizgi çizilir, çizgilerin uzunlukları ölçülür ve çizgilerin kestiği tane sınırı sayısı sayılır. Bu değerler, aşağıdaki formülde yerine yazılır.

$$d_{ort} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{(N_1 + N_2 + N_3 + N_4) \times Q} \quad (4.1)$$

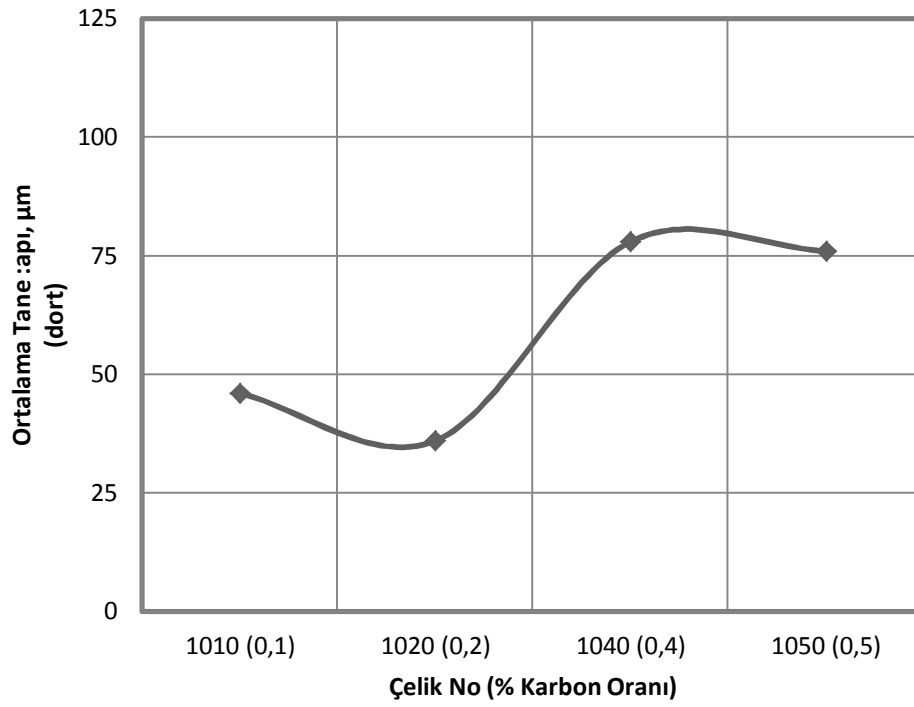
Burada;

Q -fotoğrafların büyütme oranını gösterir.

$L_{1,2,3,4}$ -fotoğraf boyutları

$N_{1,2,3,4}$ -doğru üzerine düşen tane sayısı

$N > 10$ olmak zorundadır



Şekil 4. 9 Karbon oranı ile ortalama tane çapı değişim

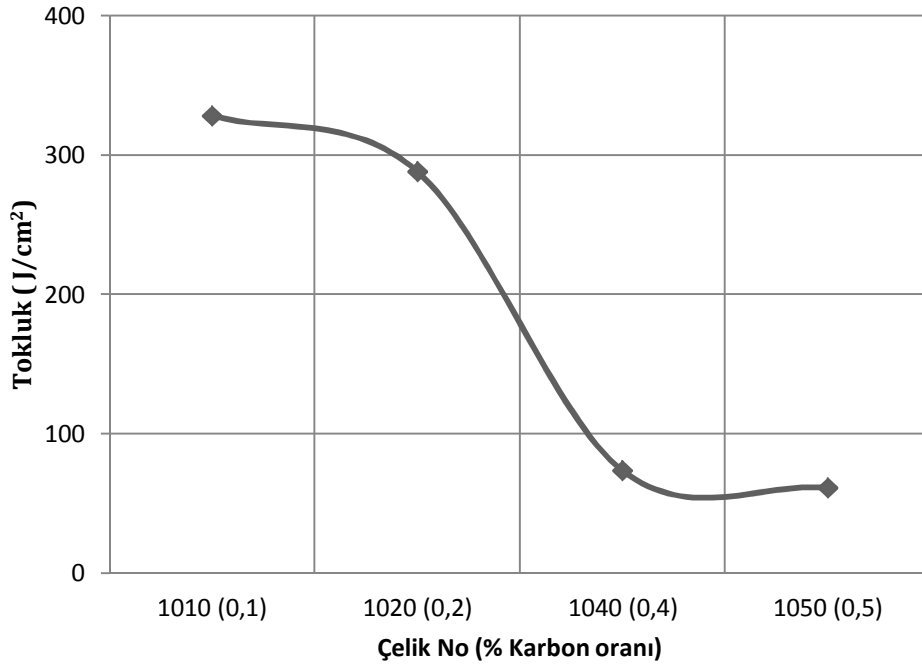
4.3 Darbe Deneyi Sonuçları

Darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve numune ölçüleri çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Darbe deneyinden elde edilen veriler

	b	c	b - a	Tokluk	
	cm			Joule	Joule/cm ²
1010	1	1	0,8	262,78	328,4
1020	1	1	0,8	230,78	288,4
1040	1	1	0,8	58,96	73,6
1050	1	1	0,8	49,16	61,4

Bir malzemenin darbe tokluğu ile sünekliği arasında ilişki vardır. Fazla süneklik göstermeyen malzemelerin darbe tokluğu da düşüktür. Çeliklerde karbon oranının artmasıyla daha gevrek bir yapıya sahip olduğu için sünekliğide azalmaktadır. Şekil 4.10’da görüldüğü üzere çeliklerin karbon oranı artıkça darbe tokluğu azalmaktadır.



Şekil 4. 10 Çelikteki karbon oranının darbe tokluğuna etkisi

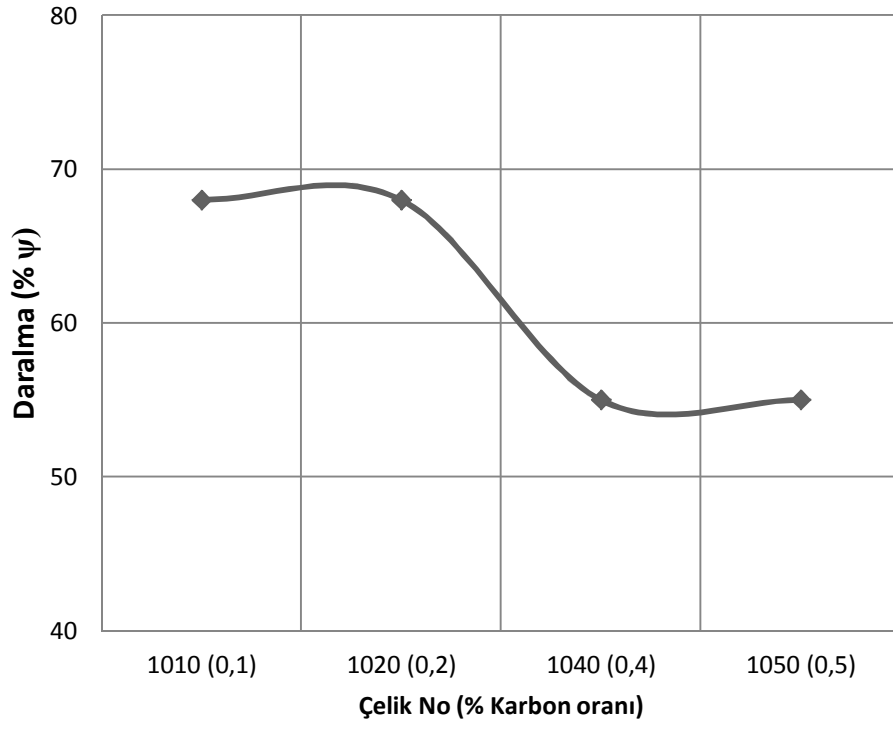
4.4 Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneyi işlemi sonucunda bilgisayar ortamında çizilen kuvvet-deformasyon (P- Δl) grafiklerinden elde edilen tüm veriler çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

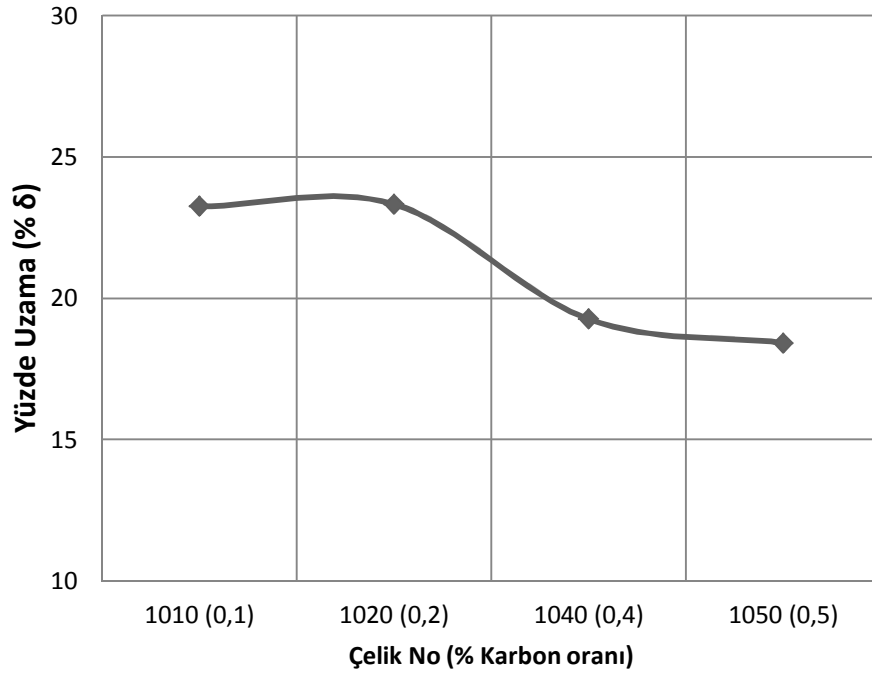
Çizelge 4.2 İncelenen çeliklerin çekme deney sonuçları.

Çelik	$\sigma_{\max}$	σ_y	S_{k0}	Ψ	δ
	<i>MPa</i>			%	
1010	436	267	862	68	23
1020	496	290	1055	68	23
1040	662	353	1109	55	19
1050	663	425	1131	55	18

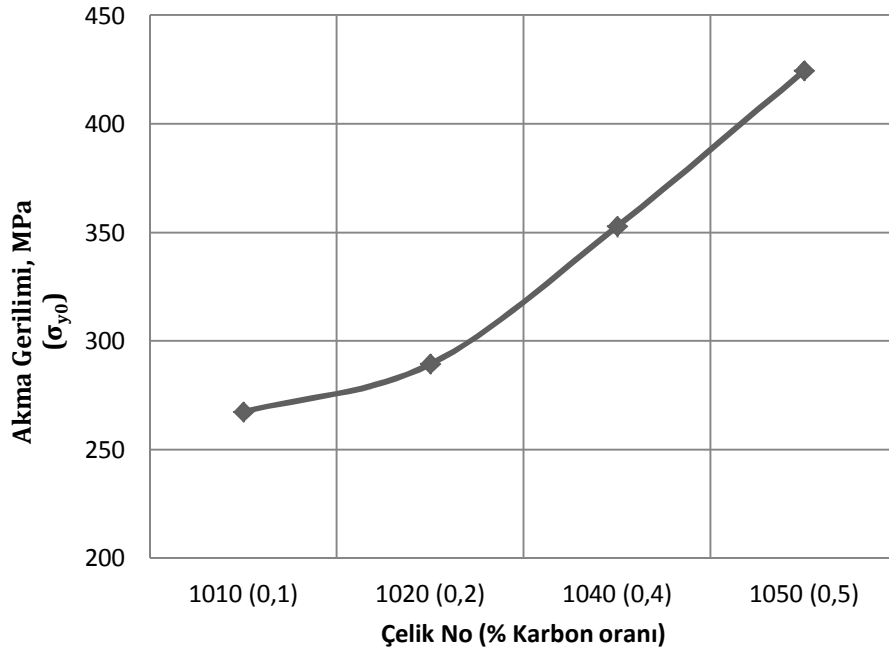
Çeliklerde karbon oranının artması ile çelikler gevrek yapıya sahip olacaktır. Gevrek yapıya sahip çeliklerde daha az şekil değiştirme gerçekleşmekte ve böylelikle numune kesit yüzeyinde daha az daralma ve daha az uzama gerçekleşir. Yani karbon oranının artması ile daha az şekil değiştirme göstererek ani kopma meydana gelir. Şekil 4.11 ve 4.12’de görüldüğü üzere karbon oranı artıkça yüzde daralma ($\% \Psi$) ve yüzde uzama ($\% \delta$) oranlarında azalma görülmektedir.



Şekil 4. 11 Yüzde daralmanın karbon oranı ile değişimi

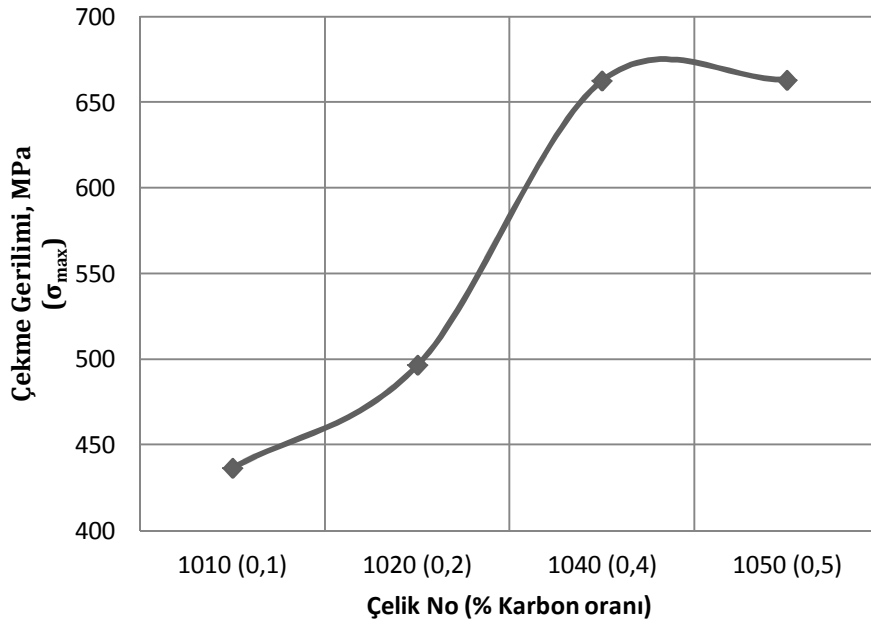


Şekil 4. 12 Yüzde uzamanın karbon oranı ile değişimi



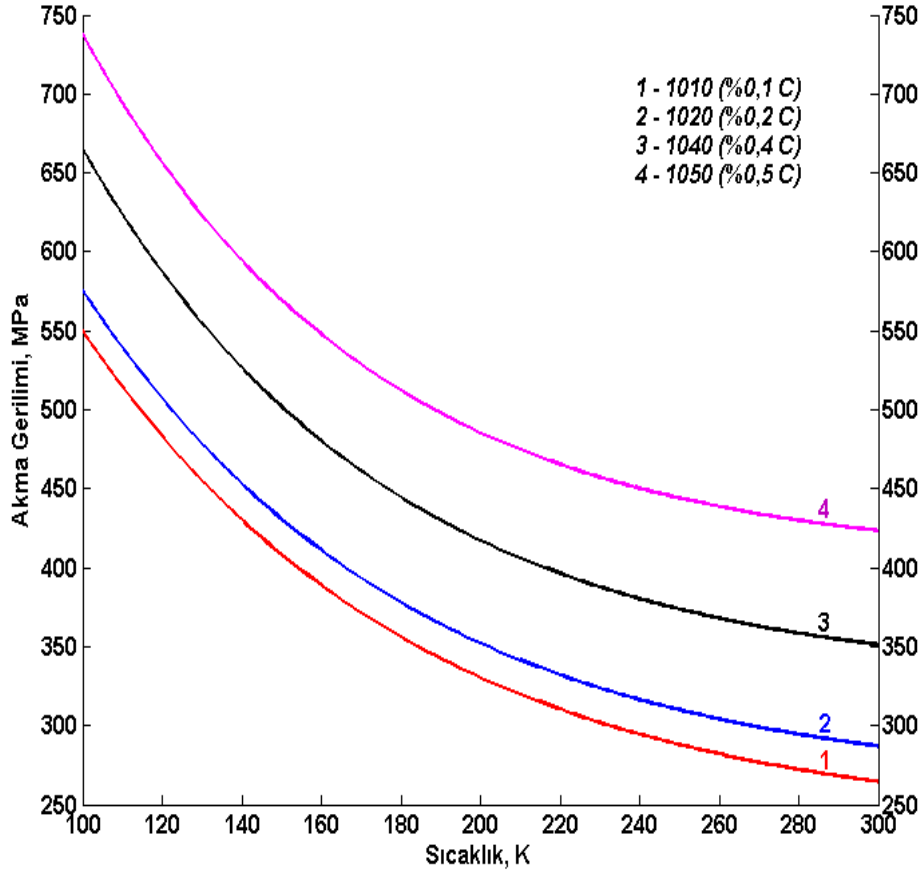
Şekil 4. 13 Akma geriliminin karbon oranı ile değişimi

Şekil 4.13’da çeliklerin karbon oranı artması ile akma geriliminin değişimini gösteren şekil verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere çeliklerin karbon oranının artması ile akma gerilimi de artmıştır.



Şekil 4. 14 Çekme geriliminin karbon oranı ile değişimi

Şekil 4.14’de karbon oranı ile çekme gerilimi arasındaki bağlantıyı göstermektedir. Şekil 4.14’de görüldüğü üzere çeliklerin karbon oranı arttıkça çekme gerilimi (σ_{max}) de artmaktadır.

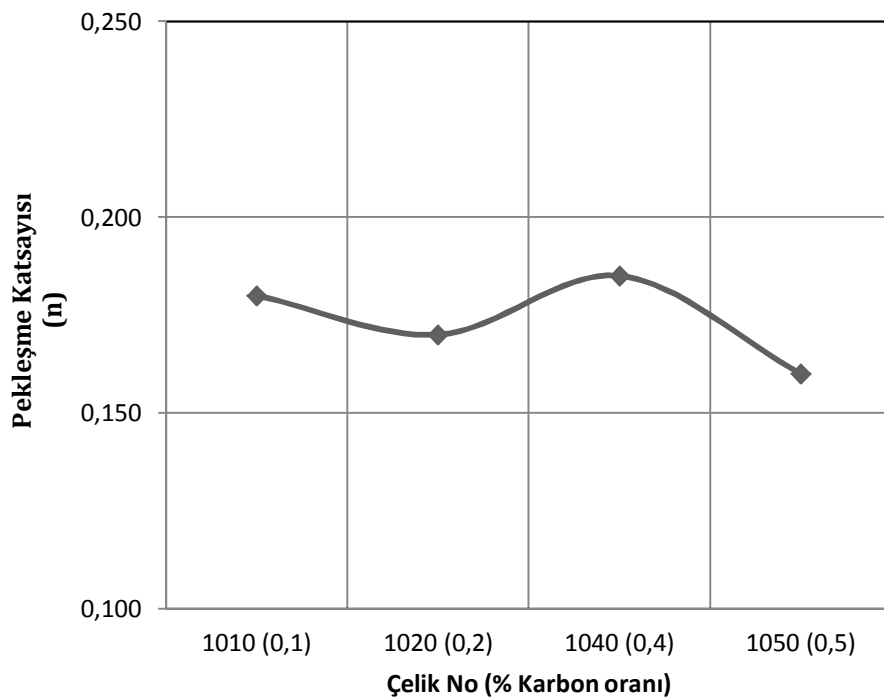


Şekil 4. 15 Akma geriliminin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.15’de çeliklerin akma dayanımının sıcaklıkla değişim grafiği verilmiştir. Aynı grafikte akma dayanımına göre çeliklerin sıralaması da görülmektedir. Sıcaklık değişimi ile bu sıralama değişmemiştir. Bu grafiğe göre, şekil 4.13’den de görüldüğü gibi, çelikteki karbon oranı arttıkça akma dayanımı artmaktadır. Grafiğin elde edilmesinde formül (3.14) kullanılmıştır.

4.5 Pekleşme Katsayısı

Çekme deneyi sonucunda elde edilen kuvvet - deformasyon grafiğinde (şekil 3.25'deki P- Δl grafiğindeki gibi) orantılı deformasyon yani pekleşme bölgesi 5 eşit bölüme ayrılarak, bu grafik gerçek gerilim-gerinim grafiğine çevrilir. Bu grafikten elde edilen veriler formül (3.47) ve (3.48) hesaplanır. Formül (3.49)'deki formülde gerçek gerilim-gerinim değerleri logaritmik doğru üzerinden pekleşme katsayısı hesaplanır. Çeliklerin pekleşme katsayıları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.



Şekil 4. 16 Pekleşme katsayısının karbon oranı ile değişimi

Şekil 4.16'de görüldüğü üzere pekleşme katsayısı, çelikteki karbon oranı ile anlamlı bir değişim göstermemiştir. Yani elde edilen verilere göre karbon oranının pekleşme katsayısına anlamlı bir etkisi görülmemiştir.

Pekleşme katsayısının kırılma tokluğuna etkisi oldukça büyüktür (formül 3.44). Ancak bu çalışmada saptanan pekleşme katsayıları birbirine yakın olduğundan, pekleşme katsayısının, çeliklerin kırılma tokluğuna etkisi önemsizdir.

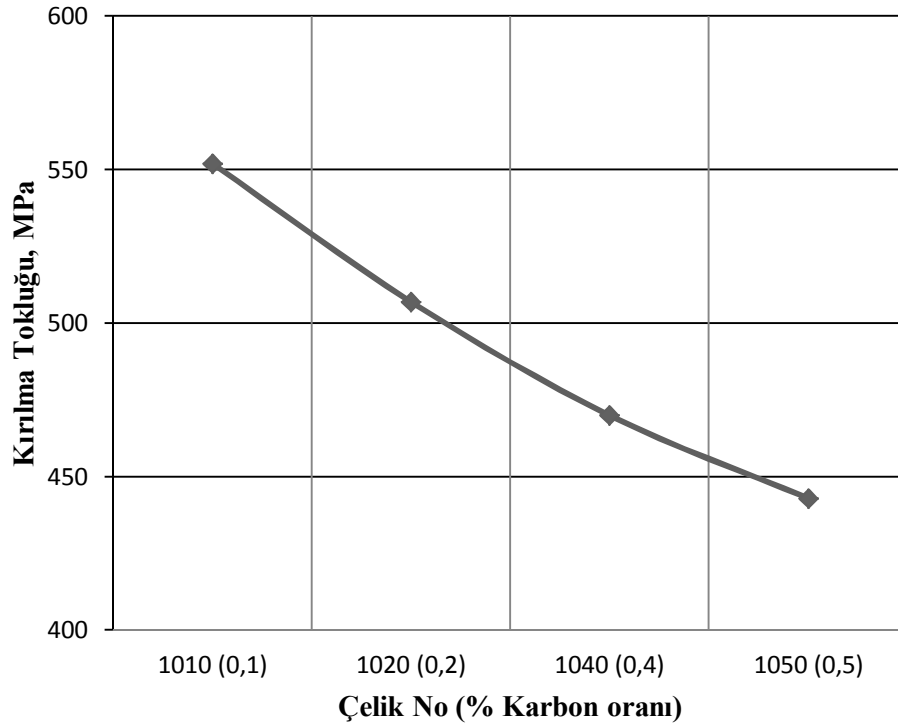
4.6 Kırılma Tokluğunun Saptanması

Kırılma tokluğunun saptanmasında kullanılan tüm parametreler çizelge 4.3’de verilmiştir.

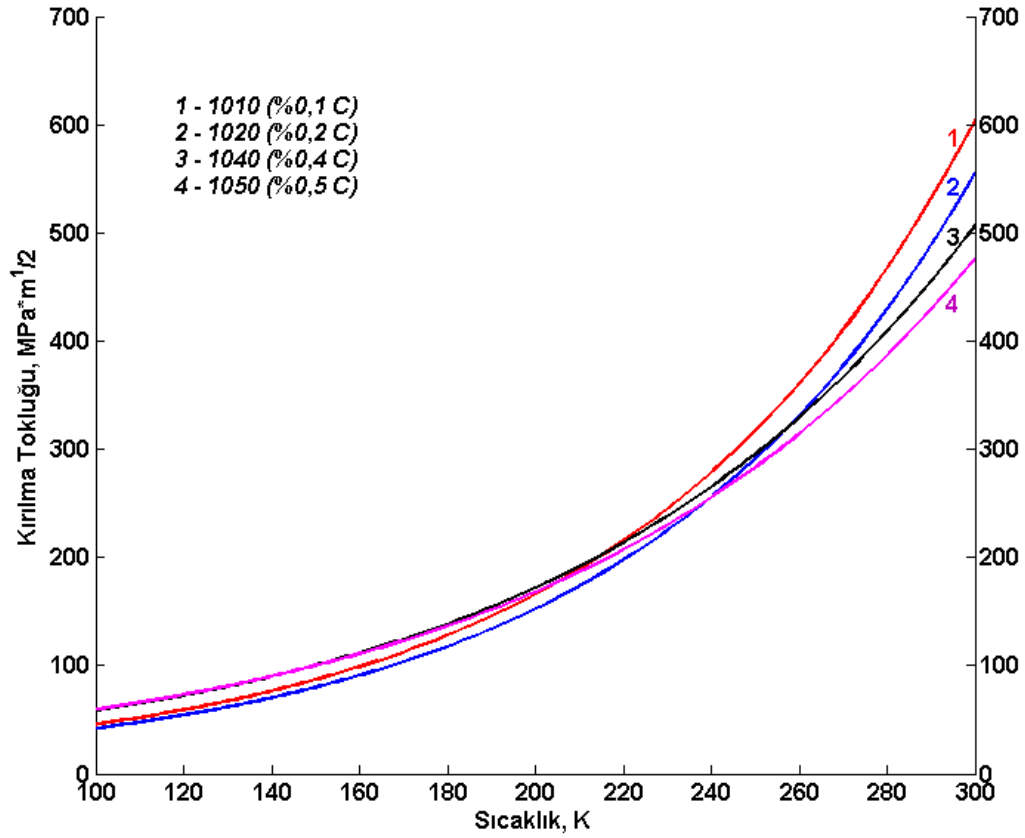
Çizelge 4.3 Kırılma tokluğunun saptanmasında kullanılan parametreler ve kırılma tokluğu

Çelik	σ_{y0}	S_{k0}	β_y	n	d	σ_0	A	α	T*	$S_{kop}=A-\sigma_0$	σ_{y*}	K_{IC}
	MPa		K		μm	MPa		K^{-1}	K	MPa		$MPa\sqrt{m}$
1010	267	862	133	0.180	46	236	1042	0.0120	207	806	322	552
1020	290	1055	122	0.170	36	260	1080	0.0123	225	820	328	507
1040	353	1109	103	0.185	78	328	1266	0.0132	248	938	375	470
1050	425	1131	84	0.160	76	403	1358	0.0140	293	955	425	443

Şekil 4.17’de oda sıcaklığında kırılma tokluğunun çelikteki karbon oranı ile değişim grafiği verilmiştir. Şekil 4.17’de görüldüğü üzere çelikteki karbon oranı arttıkça çeliklerin kırılma tokluğu azalmaktadır.



Şekil 4. 17 Kırılma tokluğunun çelikteki karbon oranı ile değişimi



Şekil 4. 18 Kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişim grafiği

Şekil 4.18’de kırılma tokluğunun değişim grafiği verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere, sıcaklığın azalması ile tüm çeliklerin kırılma tokluğu azalmış ve grafikler birbirlerine yaklaşmışlardır. Bu durum genel tokluk-sıcaklık grafiklerine benzerdir. Özellikle yaklaşık $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’den (255 K) itibaren oda sıcaklığına kadar (293 K) kırılma tokluğu değerleri nispeten belirgin bir şekilde ayrılmıştır.

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Aşağıda bu tez çalışmasında elde edilen tüm sonuçlar sıralanmıştır.

- ✓ Karbon oranı ile ortalama tane çapı değişim (Şekil 4.9) grafiğinde görüldüğü üzere, incelenen çeliklerin ortalama tane boyutu nispeten birbirine yakındır. Bu durumda tane boyutunun kırılma tokluğuna etkisi önemsizdir.
- ✓ Çelikteki karbon oranı arttıkça darbe tokluğu değeri azalmıştır (şekil 4.10). Darbe tokluğu, kırılma tokluğu ile benzer davranış sergilemiştir.
- ✓ Şekil 4.11 – 4.14’de görüldüğü üzere, çelikteki karbon oranı artıkça, yüzde daralama ($\% \square$) ve yüzde uzama ($\% \delta$) değeri azalmış, akma dayanımı ve çekme dayanımı ise artmıştır. Bu durum beklentileri karşılamaktadır.
- ✓ Pekleşme katsayısındaki değişim ise anlamlı değildir ve oldukça dar aralıkta gerçekleşmiştir (şekil 4.16). Böylece, pekleşme katsayısının kırılma tokluğuna etkisi göz ardı edilebilir.
- ✓ Söz konusu ferritik çeliklerde, çelikteki karbon oranının artmasıyla kırılma tokluğu azalmıştır (şekil 4.17).
- ✓ Çelikteki karbon oranının akma dayanımına belirgin etkisi, formül (3.44) uyarınca, kırılma tokluğuna da yansımıştır. Bu durum kırılma tokluğuna akma dayanımının etkisini de ortaya koymaktadır.
- ✓ Alaşımsız çelikler için çelikteki karbon oranının artması ile kırılma tokluğu azalmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- ASTM E-399, 2003a. Standard Test Methods for Plane-strain Fracture Toughness of Metallic Materials. Annual Book of ASTM Standards, 03.01, 451- 482.
- ASTM E-1921, 2003b. Standard Test Methods for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range, Annual Book of ASTM Standards, 03.01, 1128-1147.
- Aytekin, H., 2009, Yapı Çeliklerinin Kırılma Tokluğunun Saptanmasında Yeni Bir Yöntemin Geliştirilmesi, Doktora Tezi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Aytekin, H., 2011, Kırılma Mekaniği Yüksek Lisans Ders Notları Afyon.
- Broek, D., 1974, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Leyden: Noordhoff int. Publ. -530p.
- Kopelman, L. A., 1978, The Resistance Against Brittle Fracture in Welded Sections, Moskava.
- Krasovsky, A. Yan., 1983, Düşük Sıcaklıklarda Metallerin Gevrekliği, Naukova Dumka.
- Makhutov, N. A., 1973, Resistance of Constructional Components Against Brittle Fracture Machinostroenie. Moskova.
- McCabe, D.E., Merkle, J.G. and Wallin, K. 2000. Technical basis for the Master Curve concept of fracture toughness evaluations in the transition range. *Fatigue and Fracture Mechanics*. **30**: 21-33.
- Said, G., Aytekin, H., 2007, HMK Kafesli Metal ve Alaşımların Kırılma Tokluğu Üzerine Bir Standart Projesinin Geliştirilmesi, 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı, İstanbul, 7-9 Kasım 2007.
- Said, G., 1999, Hacim Merkezli Kübik Yapıya Sahip Metal ve Alaşımlarda Kırılma Tokluğunun Doğası. 4. Ulusal Kırılma Konferansı, İstanbul, 18-20 Ekim, 90-99.
- Said, G., Taşgetiren, S., 2004, An Express Technique for the Determination of Static and Dynamic Fracture Toughness (KIC, KId) of BCC Metals and Alloys, *Mechanics of Materials*. **36**: 1129- 1142.
- Said, G. and Taşgetiren, S. 2000. Fracture toughness determination of low-alloy steels by thermo-activation energy method. *Eng Fract Mech*, **67**: 345-356.

- Said, G. 2001. Kırılma mekaniğinin bazı problemleri. 5. Uluslar arası Kırılma Konferansı, Elazığ, 19-26.
- Saidov, G. I., 1997, A Thermal Activation Approach to The Crack Resistance of Steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. **20**: 41-47.
- Saidov, G. 1989, The Fracture Toughness of Low and Medium Strength Steels, Taşkent.
- Saidov, G.I. and Seleznyova, T.A. 1997. On the fracture toughness of low and medium strength steels (BCC metals). *Strength of Materials*, **29**: 204-207.
- Ulu, S., 2004 “Karbonlu ve Düşük Alaşımlı Çeliklerin Temel Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimler Fakültesi, Afyon.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Burak SERT
Dogum Yeri ve Tarihi : Elbistan/10.06.1986
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : (544) 4974996 / b_sert_@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurumu ve Yıl)

Lise : Elbistan Endüstri Meslek Lisesi (2000-2003)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi (2005-2010)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi (2010-)

Çalıştığı kurum/Kurumlar ve Yıl : Elbistan Şeker Fab. (2002-2003)
El-tel (2003-2004)
Asyol LTD. ŞTİ (2007-2008)