

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**BİYEL KOLU BAŞLIĞININ KIRMA YÖNTEMİ İLE İMALATINDA  
KIRMA PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

**DOKTORA TEZİ**

**ZAFER ÖZDEMİR**

**BALIKESİR, OCAK - 2013**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**BİYEL KOLU BAŞLIĞININ KIRMA YÖNTEMİ İLE İMALATINDA  
KIRMA PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

**DOKTORA TEZİ**

**ZAFER ÖZDEMİR**

**BALIKESİR, OCAK – 2013**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Zafer ÖZDEMİR** tarafından hazırlanan “**BİYEL KOLU BAŞLIĞININ KIRMA YÖNTEMİ İLE İMALATINDA KIRMA PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 14 Ocak 2013 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza


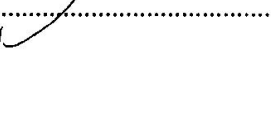

Danışman  
Yrd.Doç.Dr. Ziya Aksoy

Üye  
Prof.Dr. İrfan Ay

Üye  
Yrd.Doç.Dr. Osman Selim Türkbaş

Üye  
Yrd.Doç.Dr. Özmen Eruslu

Üye  
Yrd.Doç.Dr. İlker Eren

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Hilmi NAMLI

.....

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Bölümü tarafından 2012-51 nolu proje ile desteklenmiştir.**



## **ÖZET**

### **BİYEL KOLU BAŞLIĞININ KIRMA YÖNTEMİ İLE İMALATINDA KIRMA PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

**DOKTORA**

**ZAFER ÖZDEMİR**

**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. ZİYA AKSOY)**

**BALIKESİR, OCAK-2013**

Kırarak ayırma prosesi, otomobil motorlarında kullanılan biyel kollarının üretiminde son yıllarda geliştirilen modern bir metoddur. Bilinen yöntemlerle karşılaştırıldığı zaman bu yöntemin avantajları oldukça fazladır. Bu metod üretim proseslerini azaltır, alet ve ekipman yatırımını azaltır, daha az enerji kullanılmasını sağlar. Sonuç olarak, toplam üretim maliyetinde % 25 gibi önemli bir oranda tasarruf sağlar. Kırarak ayırma yöntemi çok ilgi çekmiş, halen teknolojik olarak bir çok modelde kullanılmaktadır. Bu tezde C70S6 çeliğinden yapılmış biyel kolunun darbeli yük ile kırılarak kırma parametreleri incelenmiş, kırılan yüzeylerin optik ve SEM analizleri yapılmış ve değişik ısıl işlemler uygulanarak iç yapı değişikliğinin darbeli kırılmaya etkisi ve kırılabilir biyel kullanımına etkisi incelenmiştir. Yük ve hız parametreleri incelenmiş olup, uniform dağılan darbeli kuvvet etkisi ile başlangıç çentiğinin gevrek-klevaj kırılma tipine neden olduğu sonucuna varılmış, iç yapının bu gevrek kırılmaya neden olduğu ve tokluğu azalttığı, ısıl işlem sonucu elde edilen temperlenmiş martenzitik ve özellikle beynitik yapının kırılabilir biyel imalatında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELEER:** biyel kolu, kırarak ayırma parametreleri, kırılabilir C70S6 çeliği, ısıl işlem, gevrek kırılma, temperlenmiş martenzit, beynit.

## **ABSTRACT**

### **OPTIMIZATION OF THE FRACTURE PARAMETERS IN MANUFACTURING CRACKABLE CONNECTING RODS**

**PH. D. THESIS**

**ZAFER ÖZDEMİR**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ZİYA AKSOY)**

**BALIKESİR, JANUARY-2013**

Fracture splitting method is an innovative processing technique in the field of automobile engine connecting rod manufacturing. Compared with traditional method, this technique has remarkable advantages. Manufacturing procedures, equipment and tools investment can be decreased and energy consumption reduced remarkably. It provides a high quality, high accuracy and low cost route for producing connecting rods. With the many advantages mentioned above, this method has attracted manufacturers attention and has been utilized in many types of con/rod manufacturing. In this thesis, the method and the advantages it provides, such as materials, notches for fracture splitting, fracture splitting conditions and fracture splitting equipment are discussed in detail. The study describes an analysis of examination of fracture splitting parameters and optical-SEM fractography of C70S6 crackable connecting rod. That uniform impact force distribution starting from the starting notch causes brittle and cleavage failure mode is obtained as a result. This induces to decrease the toughness. Furthermore; it is appraised that tempered martensite and especially bainitic microstructure can be an important alternative to the crackable C70S6 crackable connecting rod.

**KEYWORDS:** connecting rod, fracture splitting parameters, crackable C70S6 steel, heat treatment, brittle fracture, tempered martensite, bainite.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ .....	v
RESİM LİSTESİ .....	vi
ÖNSÖZ.....	viii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Doktora Tez Çalışmasının Amacı.....	3
1.2 Konu İle İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....	4
1.3 Kırılma Parametreleri .....	14
1.4 Alaşım Elementlerinin Kırılma Parametrelerine Etkisi .....	18
<b>2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>20</b>
2.1 Isıl İşlem Uygulanmayan C70S6 Çeliğinin Kırma Deneyi .....	22
2.2 Metalografik İnceleme .....	24
2.2.1 Optik Metalografi.....	25
2.2.2 SEM (Tarayıcı Elektron Mikroskopi)Metalografisi .....	26
2.2.3 Sertlik, Mekanik Özellikler ve Kimyasal Analiz .....	29
2.3 Kırılma Parametrelerinin Isıl İşlem Uygulamaları ile Değiştirilmesi.....	30
2.3.1 Martenzit, Temperlenmiş Martenzit ve Beynit Hakkında Kısa Bilgi .....	30
2.3.2 Tavlama, Kırılma Deneyi ve Optik İncelemeler .....	34
2.3.3 Sertleştirme, Kırılma Deneyi ve Optik İncelemeler-1 .....	35
2.3.4 Sertleştirme, Kırılma Deneyi ve Optik İncelemeler-2.....	37
2.3.5 Sertleştirme, Temperleme, Kırma Deneyi ve Optik İncelemeler .....	39
2.4 Temperlenmiş Martenzit ve Martenzit Yapı İçin Kırma Testleri .....	41
2.5 Östemperleme, Kırma Deneyleri, Optik ve SEM Analizleri.....	44
2.5.1 Östemperlenmiş (Beynitlenmiş) Yapının SEM Resimleri .....	50
2.6 Uygulanan Kırma Deneylerinin İç Yapılara Göre Karşılaştırılması .....	53
2.7 Deney Sonuçlarının Kırılma Tokluğu Açısından İncelenmesi .....	55
<b>3. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>57</b>
<b>4. KAYNAKLAR.....</b>	<b>61</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Biyele Etkiyen Kuvvetler. ....	1
Şekil 1.2: Motor Biyel Kolunun İmalat Sonrası Yapısı.....	2
Şekil 1.3: Biyel Kollarının İmalat ve Proses Yöntemleri. ....	5
Şekil 1.4: Kırarak Ayırma Aparatı.....	8
Şekil 1.5: Kırılma Çentiğinin Mikro-Sertlik Dağılımı. ....	13
Şekil 1.6: Başlangıç Çentiğinin Geometrik Parametreleri.....	15
Şekil 1.7: Bazı Kırılarak Ayrılabilen Çeliklerin S-N (Gerilme-Devir) Kartı. ....	17
Şekil 1.8: Karbon Oranının Mukavemet ve Sünekliğe Etkisi. ....	18
Şekil 1.9: Karbon Oranının Sertlik ve Sünekliğe Etkisi.....	19
Şekil 2.1: Örnek Bir Kırarak Ayırma Aparatının Şematik Görünümü.....	22
Şekil 2.2: Uniform Basınç Yönlenmesi.....	22
Şekil 2.3: Deneylerde Kullanılan Biyel Kolu.....	23
Şekil 2.4: Fe-C Denge Diagramının Ötektoit ve Alt-Üst Bölümleri.....	28
Şekil 2.5: Temperleme Sıcaklığına Bağlı Olarak Mukavemetin Değişimi.....	31
Şekil 2.6: Ötektoit Çeliğin İzotermal Dönüşüm Diagramı ve Isıl İşlemler. ....	32
Şekil 2.7: Dönüşüm Sıcaklığına Bağlı Olarak Beynitik ve Perlitik Yapıların Sertlik ve Mukavemet Değerleri.....	33
Şekil 2.8: Demir-Karbon Alaşımları İçin T-T-T Daigramı.....	46
Şekil 2.9: Ötektoit Demir-Karbon Alaşımı İçin İzotermal Sürekli Soğuma Dönüşüm Diagramı. ....	47
Şekil 2.10: Ötektoit Çelik İçin İzotermal Dönüşüm Diagramı.....	47
Şekil 2.11: Üst Beynit.....	48

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 1.1:</b> Kırılarak Ayrılabilen C70S6 Biyel Kolu Çeliğinin Kimyasal Yapısı....4	
<b>Tablo 1.2:</b> C70S6 ve FRACTIM Biyel Kolu Çeliklerinin Kimyasal İç Yapılarının Karşılaştırılması. ....11	11
<b>Tablo 1.3:</b> Kırılarak Ayrılabilen Biyel Kolu Çeliklerinin Mekanik Özellikleri....17	17
<b>Tablo 2.1:</b> Deneylerde Kullanılan C70S6 Biyel Kolu Çeliğinin Kimyasal Yapısı. ....29	29
<b>Tablo 2.2:</b> C70S6 Kırılabilir Biyel Kolu Çeliğinin Önemli Mekanik Özellikleri.....29	29
<b>Tablo 2.3:</b> C70S6 Kimyasal Yapısı.....34	34
<b>Tablo 2.4:</b> Isıl İşlem Uygulanıp Kırma Deneyi Yapılan C70S6 Biyel Kollarının Kullanım Açısından Karşılaştırılması-1. ....53	53
<b>Tablo 2.5:</b> Isıl İşlem Uygulanıp Kırma Deneyi Yapılan C70S6 Biyel Kollarının Kullanım Açısından Karşılaştırılması-2. ....54	54
<b>Tablo 2.6:</b> C70S6 Çeliğinin Isıl İşlem Öncesi ve Sonrası Mekanik Özellikleri. ...55	55

# RESİM LİSTESİ

## Sayfa

<b>Resim 1.1:</b> Klasik Yöntemle Üretilen Biyel ve Kırarak Ayrılabilen Biyel.....	5
<b>Resim 1.2:</b> Çentiğin a)Süreksiz b)Sürekli c)Aşınmalı yapıları-optik mikroskop .	16
<b>Resim 2.1:</b> Kırma Deneyinde Kullanılan C70S6 Biyel Kolu.....	20
<b>Resim 2.2:</b> Kırılmayı Başlatan Başlangıç Çentiği-Starting Notch:SN.....	20
<b>Resim 2.3:</b> Kırma Deneylerinde Kullanılan Eksantrik Hidrolik 160 Tonluk Pres .....	21
<b>Resim 2.4:</b> Biyel ve Yapılan Kırma Aparatı .....	21
<b>Resim 2.5:</b> Darbeli Presin Altına Yerleştirilen Biyel ve Hazırlanan Kırma Tertibatı .....	21
<b>Resim 2.6:</b> Biyel ve Hazırlanan Kırma Tertibatı.....	21
<b>Resim 2.7:</b> Kırılmış ve SEM-Optik Analiz İçin İkiye Kesilmiş Parçalar.....	23
<b>Resim 2.8:</b> Gevrek ve Klevaj Kırılma Yüzeyi.....	23
<b>Resim 2.9:</b> Tam Oturan Karşılıklı Yüzeyler.....	24
<b>Resim 2.10:</b> (a) Kırılma Yüzeyi, Gevrek ve Deformasyonsuz Kırılma (b) $\epsilon$ -karbitler:Fe <sub>2</sub> C (c) İnce taneli perlit (siyah) matrix ve ferrit (beyaz).....	25
<b>Resim 2.11:</b> Elektron Mikroskopunda Çekilmiş $\epsilon$ -Karbitler (X 50000) .....	25
<b>Resim 2.12:</b> Başlangıç Çentiği Yönlenmesi ve Gevrek Kırılma Başlangıcı .....	26
<b>Resim 2.13:</b> Çatlak Başlangıcı ve Yüzey-Çatlak Başlangıç Noktası Birleşimi ..	26
<b>Resim 2.14:</b> Dendritik İyi Perlit ve Az Miktarda Ferrit Taneleri .....	27
<b>Resim 2.15:</b> Klevaj ve Gevrek Kırılma Yüzeyi.....	27
<b>Resim 2.16:</b> Dendritik Perlitik Parçacıkları ve Gevrek Kırılma Yüzeyleri.....	27
<b>Resim 2.17:</b> İyi Perlit Taneleri .....	28
<b>Resim 2.18:</b> Spektral Analiz ve Sertlik Ölçümünde Kullanılan C70S6 Çeliği .....	29
<b>Resim 2.19:</b> TEM Mikroskopunda Görülen Beynitik Yapı. ....	32
<b>Resim 2.20:</b> Optik Mikroskop 1 .....	33
<b>Resim 2.21:</b> Optik Mikroskop 2 .....	33
<b>Resim 2.22:</b> Isıl İşlem Fırını .....	34
<b>Resim 2.23:</b> Fırının Kontrol Sıcaklık Ünitesi.....	34
<b>Resim 2.24:</b> Östenitleme Sıcaklığına Çıkarılıp Havada Su Verilen C70S6 .....	34
<b>Resim 2.25:</b> Perlitik Ferritik İç Yapı (X200).....	35
<b>Resim 2.26:</b> Perlitik Ferritik İç Yapı (X500).....	35
<b>Resim 2.27:</b> Perlitik Ferritik İç Yapı (X500).....	35
<b>Resim 2.28:</b> Perlitik Ferritik İç Yapı (X100).....	35
<b>Resim 2.29:</b> Östenitlenip Suda Su Verilen C70S6 Çeliği .....	36
<b>Resim 2.30:</b> Martenzitik İç Yapı (X50).....	36
<b>Resim 2.31:</b> Martenzitik İç Yapı (X100).....	36
<b>Resim 2.32:</b> Martenzitik İç Yapı (X200).....	36
<b>Resim 2.33:</b> Martenzitik İç Yapı (X500).....	36
<b>Resim 2.34:</b> Suda Su Verilen C70S6 Çeliğinin Gevrek Kırılması.....	37
<b>Resim 2.35:</b> % 10 luk NaCl'li Suda Su Verilen C70S6 Çeliğinin Gevrek Kırılması .....	37

<b>Resim 2.36:</b> % 10 luk NaCl'li Suda Su Verilen C70S6 Çeliği - Kırma Testi Sonrası .....	38
<b>Resim 2.37:</b> Martenzitik İç Yapı (X500).....	38
<b>Resim 2.38:</b> Martenzitik İç Yapı (X200).....	38
<b>Resim 2.39:</b> Martenzitik İç Yapı (X100).....	38
<b>Resim 2.40:</b> Martenzitik İç Yapı (X50).....	38
<b>Resim 2.41:</b> Temperleme Yapılan C70S6 Çeliği .....	39
<b>Resim 2.42:</b> Kırma Testinden Sonraki Temperlenmiş C70S6 Çeliği Kırılma Yüzeyi .....	39
<b>Resim 2.43:</b> Elektron Mikroskobunda 594°C'de Temperlenmiş Martenzit.....	40
<b>Resim 2.44:</b> Temperlenmiş Martenzit (X200).....	40
<b>Resim 2.45:</b> Temperlenmiş Martenzit (X100).....	40
<b>Resim 2.46:</b> Temperlenmiş Martenzit (X500).....	41
<b>Resim 2.47:</b> Kırılabilir C70S6 Çeliğinin Başlangıç Çentiği .....	42
<b>Resim 2.48:</b> C70S6 Biyel Kolu ve Kırma Aparatı .....	42
<b>Resim 2.49:</b> Kırma Test Aparatı ve Sabitleme Mekanizması .....	42
<b>Resim 2.50:</b> Kırma Testi - 1 .....	43
<b>Resim 2.51:</b> Kırma Testi - 2 .....	43
<b>Resim 2.52:</b> Kırma Testi Sonrası Temperlenmiş Martenzit Yapıdaki C70S6 .....	44
<b>Resim 2.53:</b> Atmosfer Kontrollü Isıl İşlem Fırını ve Tuz Banyosu .....	44
<b>Resim 2.54:</b> 800°C'de Östenitlenip 450°C'de Östemperlenen C70S6 - 1 .....	45
<b>Resim 2.55:</b> 800°C'de Östenitlenip 450°C'de Östemperlenen C70S6 - 2 .....	45
<b>Resim 2.56:</b> Östemperlemeden Sonra Kırma Testi Yapılan C70S6 - 1 .....	46
<b>Resim 2.57:</b> Östemperlemeden Sonra Kırma Testi Yapılan C70S6 - 2 .....	46
<b>Resim 2.58:</b> Beynitik İç Yapı -1 (X100) .....	48
<b>Resim 2.59:</b> Beynitik İç Yapı -1 (X200) .....	48
<b>Resim 2.60:</b> Beynitik İç Yapı -1 (X100) .....	49
<b>Resim 2.61:</b> Beynitik İç Yapı -1 (X200) .....	49
<b>Resim 2.62:</b> Beynitik İç Yapı -1 (X100) .....	49
<b>Resim 2.63:</b> Beynitik İç Yapı -1 (X200) .....	50
<b>Resim 2.64:</b> Beynitik İç Yapı -1 (X500) .....	50
<b>Resim 2.65:</b> Beynitik Yapı SEM Fotoğrafı -1- (X500).....	51
<b>Resim 2.66:</b> Beynitik Yapı SEM Fotoğrafı -1- (X1000).....	51
<b>Resim 2.67:</b> Beynitik Yapı SEM Fotoğrafı -1- (X2000).....	51
<b>Resim 2.68:</b> Beynitik Yapı SEM Fotoğrafı -1- (X3000).....	51
<b>Resim 2.69:</b> Beynitik Yapı SEM Fotoğrafı -1- (X5000).....	52
<b>Resim 2.70:</b> Beynitik Yapı SEM Fotoğrafı -1- (X10000).....	52

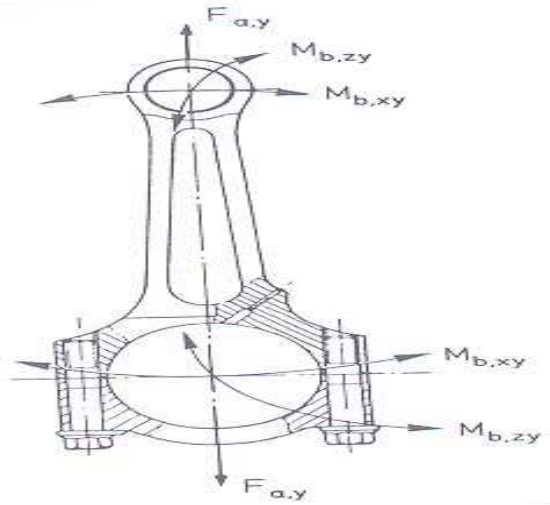
## ÖNSÖZ

Doktora tezimin hazırlanmasında verdikleri destekten ötürü öncelikle Danışman Hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Ziya AKSOY'a; verdiği destek, her daim koruduğu bilim aşkı ve şevki ile bizi de heyecanlandıran ve cesaretlendiren Sayın Hocam Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof.Dr. İrfan AY'a; yüksek lisans tezimden itibaren yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Değerli Hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Osman Selim TÜRKBAŞ'a; Kırılarak ayrılan biyel kolları imalatında gerek teknik gerekse görsel olarak verdikleri destekten dolayı FORD A.Ş. İnsan Kaynakları Müdürü Sayın Onur ŞENGÜN'e; yapmış olduğum ısıtım uygulamalarında yardım ve desteklerini esirgemeyen sırası ile CEMRE DÖKÜM A.Ş.-DİYARBAKIR Ali ve İsmail Beylere, AYZE METAL-ANKARA Gürkan Bey'e, GARANTİ ISIL İŞLEM-GEBZE Kemal Bey'e; yaptığımız kırma deneylerinde göstermiş olduğu destek ve yardımlarından dolayı Balıkesir 6'ncı Ana Bakım Merkezi Teknik Müdürü Sayın Komutanım Yarbay Can CANDAN'a; konunun diğer ayağını tez konusu haline getiren kader birliği yaptığım Komutanım Tekin ÖZDEMİR'e teşekkürlerimi sunmaktan mutluluk duyarım.



## 1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorun bir parçası olan biyelin fonksiyonu bilindiği üzere pistonun çarpazvari itme hareketini krank miline dönme hareketi olarak iletmektir. Milyonlarca tekrarlı yüke maruz kalan biyel kolu motorun bir parçası olup; yüklemelere karşı rijit olması için çok mukavim olmalı, aynı zamanda da pistonun her devrinde ve yön değiştirmelerde-durmalarda atalet kuvvetlerini azaltmak için yeterince hafif olmalıdır. Biyel kollarının tasarımında çok titiz olunmalı ve çok emniyetli olmasına önem verilmelidir; şöyle ki aksel basma, aksel çekme ve eğilme kuvvetlerine karşı yeterince mukavim olmalıdır. Burkulmadan ve eğilmeden pistonun ileri geri hareketi ile oluşan merkezkaç kuvvetlerine karşı da dayanımlı olmalıdır. Biyeler gaz ve kütle kuvvetlerine de maruz kalırlar. Üstüste binen bu kuvvetler aksel yönde olup, biyele binerler. Gaz kuvveti dönme hızından belirlenirken; kütle kuvvetleri ise piston, piston pimi ve biyelin dönen parçaları ve biyelin gövdesinden belirlenir. Biyel kolları bu faktörler ışığında sonsuz ömür için tasarlanırlar. Biyel kolu aksel çekme ve basma yükleri, çok yönlü genlikli eğilme yüklemeleri, atalet kuvvetleri ve burkulma yüklemelerine maruz kalır [1].

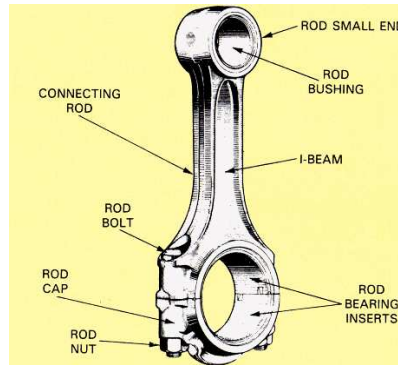


Şekil 1.1: Biyele Etkiyen Kuvvetler

Çalışma esnasında biyel kolu yanmadan dolayı basma ve çekme kuvvetlerine maruz kalır. Ancak en önemli etki biyelin baş kısmında meydana gelen eğilme yükleridir. Bu etkiyi tolere etmek ve eğilme yüklerini taşıyabilmek için biyel kolları I-kiriş şeklinde tasarlanırlar. Motor içerisindeki hareketini düşünürsek, biyelin uç kısmında;  $M_{b,xy}$  yönünde ve  $M_{b,zy}$  yönünde moment kuvvetleri etkimektedir. Biyelin baş kısmında ise  $M_{b,xy}$  yönünde ve  $M_{b,zy}$  yönünde etkiyen moment kuvvetleridir. Ayrıca biyele  $F_a$  (y yönünde) aksenal basma kuvveti etkisi oluşmaktadır. Biyel kolları çok yüksek çevrimli yüklerle maruz kaldıkları için piston ve kranka tam olarak uyacak ve yataklanacak şekilde tam toleranslı olarak işlenmelidirler [2].

Yoğun rekabet, ekonomik yönden tasarlanması ve üretilmesi gereken biyelerin yüksek performanslı süper ürünler olarak üretilmeleri yönünde motive olmalarına sebebiyet vermiştir. Bu yüzden bazı otomotiv üreticileri pahalı olmasına rağmen dövme çelik yerine toz metalden biyel üretimine geçmişlerdir. Bunun için en önemli sebep biyel ile başlık kısmının ayrılma işlemindeki talaşlı imalat sürecinin maliyeti göz önüne alındığında, birleştirilen yüzeylerin çok iyi bir uyum vermeleridir. Toz metal biyel kolları bu ilave talaşlı imalata ihtiyaç duymazlar. Ancak son zamanlarda düşük alaşımlı ayrılabilir çelikler ve C-70 çeliği cazip hale gelmiştir. Bu çelikler gövde ve kapların yüzeylerinin talaşlı imalat maliyetini en aza indirerek üretim maliyetini azaltmaktadır. Toz metallerle kıyaslandıklarında ise yüksek yorulma dayanımına sahiptirler [1]. Biyel kolu bir motorda yapısal dayanıklılık ve verimliliği gösteren anahtar bir eleman vazifesi görür [3].

Biyel kolunun imalat işlemleri sonunda oluşan yapısı Şekil 1.2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 1.2: Motor Biyel Kolunun İmalat Sonrası Yapısı [1]

Biyel kolları milyonlarca defa tekrarlı yüklere maruz kaldıkları için piston ve kranka tam uyacak şekilde ve tam toleranslı olarak işlenmelidirler.

Biyel kolları dövme, dökme ve toz metalurjisi yolu ile imal edilmektedir. Motor içerisindeki işlevi gereği önce tek parça olarak imal edilir, daha sonra talaşlı imalat ile ya da tek seferde darbeli yükü kırılarak iki parçaya ayrılır [4].

**Kırarak ayırma prosesi otomobillerin biyel kolları üretiminde yenilikçi bir tekniktir.** Geleneksel metod ile karşılaştırıldığı zaman, tekniğin önemli avantajları mevcuttur. Üretim prosedürleri azalır, alet ve ekipman yatırımı önemli ölçüde düşerken enerjiden de tasarruf sağlanır. Bu yüzden toplam üretim maliyeti önemli ölçüde azalır. Dahası bu yeni teknik aynı zamanda üretim kalitesini artırırken biyel-krank mili yataklama kapasitesini de artırır. Yüksek kalite, hassasiyet, doğruluk ve düşük maliyet sağlar. Bu yöntem geniş bir çekim alanı yaratmış ve pek çok modelde biyel kolu üretiminde kullanılmaktadır [2, 3, 4]. Bu sistemde tek parça imal edilen biyel, tek darbeli bir yük ile iki parçaya ayrılmakta, daha sonra birleştirildiği zaman malzeme kaybı yok denecek kadar az olmaktadır. İki parça birbirine tam olarak oturmaktadır.

### **1.1 Doktora Tez Çalışmasının Amacı**

Talaşlı imalat ile ikiye ayırma çok fazla zaman ve maliyet kaybına neden olurken, kırarak iki parçaya ayırma zaman, iş gücü ve maliyet açısından büyük avantajlar yaratmakta, malzeme zayıt miktarı talaşlı imalata oranla daha az olmaktadır. Biyel kolu imalat teknolojisinde özellikle darbe etkisiyle tek seferde kırma konusundaki gelişmeler, son yıllarda artan rekabetin etkisiyle iyice önem kazanmıştır.

Doktora tezinin amacı iki parçalı biyel kolu imalatında biyel kolunun kırılarak ayrılması konusunun deneysel ve metalografik olarak inceleyerek teknolojik kullanılabilirliğini mühendislik açısından incelemek ve kırma parametrelerinin optimizasyonudur. **Tezimde; tek parça olarak imal edilen biyel kolunun kırılarak iki parçaya ayrılmasının mekaniği incelenmiş ve değişik ısıl işlem uygulamalarından (tavlama, sertleştirme, su verme, temperleme, beynitleme-**

östemperleme) sonra kırma deneyleri ve metalografik incelemeleri yapılmıştır. Bunların kırma parametrelerine etkisi tek darbeli kırma deneyleri yapılarak incelenip yorumlanmıştır.

Konunun geneli ile ilgili olarak Türkiye’de akademik çalışmaya rastlanmamıştır. İç yapının ısıl işlem koşulları ile değiştirilerek kırma parametrelerinin optimizasyonu ile ilgili çalışmaya ise ne yerli ne de yabancı literatürde rastlanmamıştır. Bu da tez konusunun özgün yanını oluşturmaktadır. Biyel kollarını kırarak ikiye ayırma prosesi dünyada özellikle son yıllarda önem kazanan ve teknolojik alanda uygulanmasına başlanılan bir yöntemdir.

Sonucunda ısıl işlemlerle iç yapısı değiştirilen kırılabilen C70S6 biyel kolu çeliğinin kırma deneyleri yapılmış, metalografisi (optik ve SEM-Tarayıcı Elektron Mikroskop) incelenmiş olup; **temperlenmiş martenzit ve özellikle beynitin konvensiyonel perlitik yapıya önemli bir alternatif oluşturabileceği sonucuna varılmıştır.**

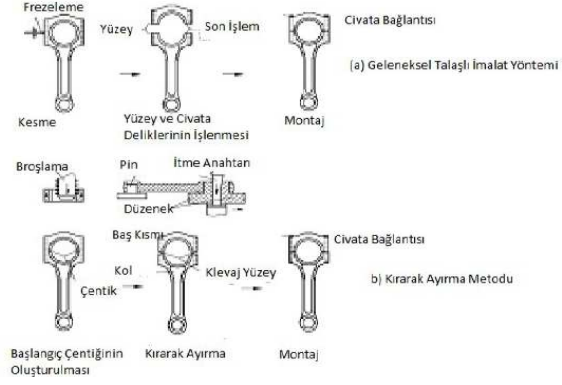
## 1.2 Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Z.Gu, S.Yang, S.Ku, Y.Zhao, X.Dai “Fracture Splitting Technology of Automobile Engine Connecting Rod” isimli makalelerinde biyel kollarının klasik yöntemle ve kırılarak ayrılmasını karşılaştırmışlardır. Öncelikle malzeme olarak C70S6 çeliği kullanılmış olup, bileşimi aşağıdadır [5].

**Tablo 1.1:** Kırılarak Ayrılabilen C70S6 Biyel Kolu Çeliğinin Kimyasal Yapısı [6]

Malzeme (%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Demir
C70S6	0,692	0,182	0,507	0,01	0,064	0,114	0,042	Kalan

Biyel iki şekilde ikiye ayrılır; talaşlı imalat ile ve kırılarak. Şekil 1.3.te bunun basit bir şeması görülmektedir.



Şekil 1.3: Biyel Kollarının İmalat ve Proses Yöntemleri [6]



(a) Talaşlı İmalat ile İkiye Ayırma Yöntemi



(b) Kırarak İkiye Ayırma Yöntemi

Resim 1.1: Klasik Yöntemle Üretilen Biyel ve Kırarak Ayrılabilen Biyel [6]

Resim 1.1.de klasik yöntemle ikiye ayrılan biyel kolu ve kırılarak ikiye ayrılan biyel kolu görülmektedir. Klasik yöntemde 14 adımda biyel son haline gelirken, kırılarak imalatla 6 adımda biyel kullanıma hazır hale gelmektedir. Üretim prosedürleri bu yolla % 60'a kadar azalmakta, maliyet % 25-35 arasında azalmakta

ve kullanılan enerji de % 40 oranında azalmaktadır. Ancak burada önemli olan malzemenin özellikleridir. Malzeme bir defa kırılarak ayrılmada minimum deformasyona uğramalıdır, çok yoğun olmalıdır, fevkalade gevrek olmalı ve işlenebilirliği iyi olmalıdır [6].

Halen kırılarak ayrılabilen biyel malzemesi olarak toz metal malzemeler, dövme demir, nodüler dökme demir ve yüksek karbonlu düşük alaşımlı çelik kullanılabilir. Ancak düşük alaşımlı çelikleri çok fazla sünek oldukları ve kırılma esnasında plastik deformasyona uğradıkları için kullanılmaları imkansızdır. Plastik deformasyon biyelin büyük parçası ile küçük parçasını tam olarak birleşmelerine engeldir. Plastik deformasyon ne kadar az olursa, kırılma yüzeyleri o kadar iyi birbirine oturur. Malzemenin kimyasal bileşimi kadar süneklik de çok önemlidir. Örneğin Mn (Manganez) ve N (Azot)'un oranını azaltıp, Si (Silisyum) ve V (Vanadyum)'un oranını artırarak sünekliğin azalması sağlanabilir. Üretimde, Fransa tarafından SPLITASCO50 ve SPLITASC070, Japonlar tarafından S53CVFS ve S50CVS1 ve Almanlar tarafından C70S6BY geliştirilmiş ve kitlesel olarak biyel imalatında kullanılmaktadır. C70S6BY Alman Wolksvagen Jetta arabalarının biyelerinin imalatında kullanılmaktadır [5, 6].

Burada düşük süneklik için Mn oranı az, V oranı yüksek, Si oranı ise işlenebilirliğin iyileştirilmesi için artırılmıştır. Mevcut uygulamada kullanılan biyelin mikro yapısı perlit ve süreksiz ferrittir. Sertlik değeri 263-310 HB, çekme mukavemeti 900 MPa, akma mukavemeti 520 MPa ve en yüksek uzama oranı ise % 10'dur [5].

Çentikler kırarak ayırma işleminde çok önemlidirler. Çünkü çatlaklar ilk önce broşlanmış çentiklerde stres konsantrasyon faktörünün etkisi ile oluşarak başlar ve radyal basınç etkisi ile çatlakların dışarıya doğru ilerleyerek sonunda büyük parçanın tamamen kırılmasına neden olur. Bu sebepten çentiğin büyüklüğü, şekli ve yeri kırılma kalitesini direkt etkiler. İki çentiğin simetrik olması ve aynı şekil ve büyüklükte olması gereklidir. Çentik derinliği istenilen kırılma basıncını etkiler, daha sonra ise büyük parçanın deformasyonunu etkiler. Artan çentik derinliği ile kırılma için gerekli basınç azalır. Tersisi de doğrudur. Jetta arabalarının biyelerinde yapılan deneysel sonuçlar göstermiştir ki, en uygun derinlik 0,4 ve 0,6 mm. arasındadır. Çentik yarıçapı ya da genişliği de 0,1 ila 0,4 mm. arasında olmalıdır. Çünkü ileri ki

proses aşamalarının uygulanabilmesi için çentik derinliği ve yarıçapı sınırlandırılmıştır [5].

Hali hazırda birkaç çeşit çentik açma yöntemi vardır. Broşlama yöntemi ile çentik açmada biyelin büyük kısmının iç tarafında V şeklinde simetrik 2 adet çentik açılır. Bu metodun birkaç dezavantajı mevcuttur. Öncelikle; çentiğin şeklini istenilen şekilde sabit olarak sağlayabilmek işleme esnasında takımların aşınmasından dolayı çok güçtür. Takımdaki aşınma ve körlükten dolayı çentik yarıçapı ve derinliği artar. Bu yüzden gerekli ayırma basıncı ve büyük kısmın deformasyonu artar, bu da malzemedeki hataların artması demektir. İkinci olarak broşlamanın maliyetinin de yüksek olduğu göz önüne alınırsa, total maliyette bir artış söz konusudur. Üçüncü olarak, işlem ömrünü artırmak ve aşınmayı azaltmak için broşlama esnasında çok büyük miktarlarda soğutucu ve yağ kullanılır ve çevre kirliliğini önlemek için kullanılan diğer ekipman maliyetleri de söz konusudur. Kırılarak ayrılan biyel kolunun bir sonraki işlem aşamasına geçmeden önce çok iyi temizlenmesi gereklidir [6].

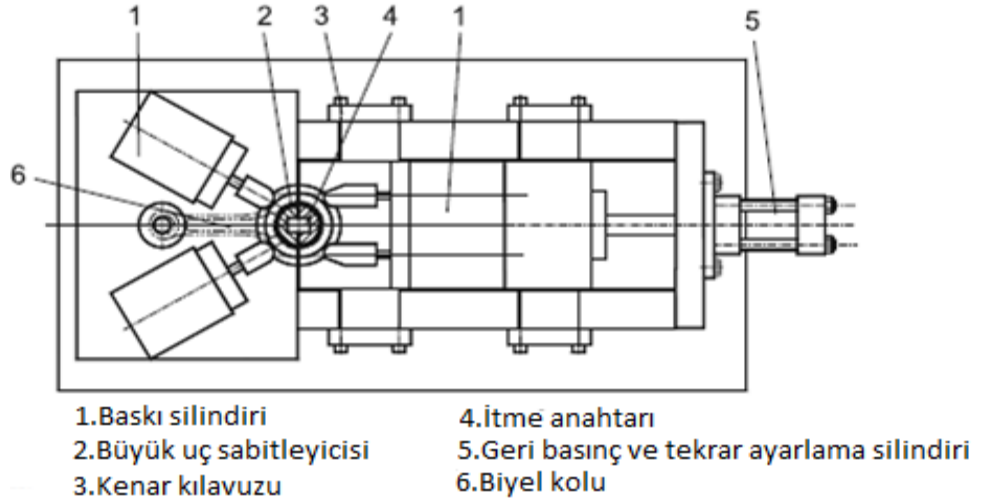
Lazer yöntemi ile çentiklerin açılması diğer bir yöntemdir ve birçok avantajı mevcuttur. Broşlama yöntemine göre çentik genişliği daha küçüktür ve 0,15 mm.nin altında kontrol edilebilmektedir. Daha küçük olan genişlik kırılarak ayrılma kalitesini geliştirmektedir. Bu daha sonraki işlem adımlarında metod kararlı çentik boyutu ve şekli vermekte ve üstelik takım aşınması gibi bir problem olmamaktadır. Bu sebepten dolayı üretimde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemin tek dezavantajı şudur, kullanılan lazer kesme takımları daha sonraki su verme aşamasında takım aşınmasını hafiften artırmaktadır [5].

ALFING ve MAUSER (Alman) gibi bazı firmalar yüksek basınçlı su jeti yöntemini kullanarak çentik açmaktadırlar ve bu yöntem çok iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca toz metalurji ile üretilen biyelerin imalat aşamasında çentikli olarak imal edildikleri ve bu sebepten broşlama, lazer veya diğer yöntemlere ihtiyaç duymadıkları bilinmektedir [5].

Kırılarak ayırma koşulları: Kırma parametreleri ana olarak kırma basıncı, geri basınç ve basınç hızı vb. dir. Kırma basıncı çentiğin şekli ve boyutları, ve malzeme özellikleri ile alakalıdır. Aşırı kırılma basıncı biyelde fazla deformasyona neden olur. Doğru geri basınç kırılma prosesinin kararlılığın geliştirir, biyelin büyük uç kısmının

deformasyonunu azaltır ve kırılma yüzeyinin uniformluğunu artırır. Basınç hızı kırılma yüzey kalitesini etkiler. Basınç hızının artırılması biyel kolunu gevrek yaparak istenmeyen şekilde tüm ayrılma yüzeyinin kırılma alanının sünekliğini azaltır. Kırılma alanı sünekliği az oldukça yüzeylerin birbirine uyması o derece doğru olur. Ancak bazı araştırmalar da şunu söylemektedir; basınç hızı 100 mm/s.den fazla oldukça sünek kırılma alanı daralır ve hemen hemen sabit olur. Bu da bize basınç hızının 100 mm/s. yi geçmesinin bir fayda sağlamayacağını söylemektedir [5].

**Kırma aleti:** Bu işlem özel olarak tasarlanmış Şekil 1.4.de görüldüğü gibi bir alet yardımı ile yapılmaktadır. Ana hatları ile alet şu parçalardan oluşur: 1.Dört kısaçlı silindir 2.Büyük uç sabitleyici 3.Kenar kılavuzu 4.Kama uçlu itme anahtarı 5.Geri basınç ve tekrar pozisyon ayarlayıcı silindir. Çalışma prensibi ise şu şekildedir: Biyelin büyük tarafı ve küçük tarafı jigın üzerinde sabitlenmiştir, ardından dört kısaçlı silindir büyük parçayı tutmak için yuvalarını iter; itme silindiri tarafından itilen büyük parça geriye doğru kaydırılır ve kama şeklindeki itme anahtarı tarafından aşağı doğru hareket ettirilir. Böylece biyel şapka ve büyük parça olmak üzere ikiye ayrılmış olur [6].



**Şekil 1.4:** Kırarak Ayırma Aparatı [6]

Daha sonra, ayrılma yüzeyleri artık ve dökülen parçaların uymayı engelleyecekleri gerekçesiyle basınçlı hava ile temizlenir, şapka ve büyük parça ters



yönlü basınç ile tekrar birleştirilir. Daha sonra silindir tekrar pozisyon alır ve iki parça birbiriyle tam olarak birbirine geçirilir. Proses esnasında, bir elektro-hidrolik orantı valfi ayrılma esnasında itme anahtarının uniform olarak aşağı inmesini sağlamak için itme silindirinin kontrolü için kullanılır. Büyük parça ve şapkanın doğru bir şekilde tam olarak birleşmesi için sarkaçın (jig) çok hassas kılavuzlaması olması gerekir. Büyük parçanın sabitleyen parçası çok önemli olup, çapı ayrılma kalitesini etkiler. Doğru bir çap minimum deformasyon ile çok iyi bir ayrılma yüzey kalitesi elde edilmesine neden olur [5].

Ancak, çap aşınmadan dolayı azalacaktır ve bu da hasar oranını çarpıcı biçimde artıracaktır. Sabitleyici çapı büyüklüğü ile hasar oranı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bazı ortak kırılma hataları şu şekildedir: Tek taraflı kırılma, büyük parça deliğinin aşırı deformasyonu, ayrılma yüzeyinde çok fazla şekil bozukluğu olması ve ayrılma yüzeyinde çatlak veya kırılmış büyük artıkların olması vb. dir. Kırılarak ayırma işlemi bittikten sonra, bir aygıt vasıtasıyla biyel parçaları sıkıca tutularak, montaj yerine nakledilir. Aygıtın yüksek hassasiyette olması gerekir [6].

"Method Of And Apparatus For Cracking Connecting Rod" [7] ve "Connecting Rod Cracking Apparatus" [8] adlı makalelerde biyel kolunu kırılarak ayırmaya yarayan düzeneklerden bahsedilmekte ve genel olarak sistem "Fracture Splitting Technology of Automobile Engine Connecting Rod" [5] adlı makaledeki düzenek ile benzerlik göstermektedir.

Liming Zheng Shuqing Kou, Shenhua Yang, Lili Li, Fei Li "A Study of Process Parameters during Pulsed Nd:YAG Laser Notching of C70S6 Fracture Splitting Connecting Rods" adlı çalışmada da başlangıç çentiğinin (SN:starting notch) öneminden bahsedilmekte olup, kırılmanın kalitesine doğrudan etkidiğinden bahsedilmektedir. Çentik derinliğinin az olması kırılma kuvvetinin fazla olmasına bu da aşırı deformasyona neden olmaktadır. Büyük derinlik ise imalatın ileriki aşamalarını olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden ideal çentik derinliği 0,4 – 0,7 mm. arasında olmalıdır [9].

Lazer yöntemi ile çentik açmada karşımıza "ablation-aşınma" kavramı çıkmaktadır. Bu şu demektir: Bölgesel bir aşırı ısıtma ve sıcaklık artışı östenit tane büyümesine yol açacaktır, soğumadan sonra da büyümüş martenzit taneleri elde edilmektedir. Bu olaya "ablation-aşınma" denir. İstenmeyen bir durumdur. Bunun

sonucunda başlangıç açısı ve eğrilik yarıçapı büyür, bu da aşırı kırılma kuvveti ve biyelin büyük kısmının deformasyonu demektir [9].

“Split Connecting Rod Engine and Vehicle” [10] adlı çalışmada da biyelin kırılarak ayrılmasında çentiğin öneminden ve malzemenin bileşiminden bahsedilmektedir.

Biyel çok yüksek bir mukavemete sahip olduğu için kırılarak ayrılması için de o kadar yüksek bir kuvvete ihtiyaç vardır. Yöntem ne olursa olsun bu kuvvetin kaynağı hep dış basınç-kuvvettir. Geline onca ilerlemeye ve farklı yöntemlere (çok düşük sıcaklıkta geçici gevrekleştirme, elektron ışını ile sertleştirme gibi) rağmen bu yöntem de kuvvet çok yüksek olduğu için (neredeyse biyelin çekme dayanımı kadar) bazı hatalar (kalitesiz ayrılma yüzeyi, plastik deformasyonun olması ve esnekli azlığı gibi) hala devam etmektedir. Bu yeni yöntemde, birkaç metod ile stres yoğunluk faktörü kırılma noktasına kadar stres yükseltici ile sürekli artırılmakta ve bu sayede kontrollü bir şekilde ve bilinen yöntemlerin hataları olmadan ayırma işlemi gerçekleştirilebilmektedir [11].

Laser ile malzemeyi lokal olarak geçici olarak gevrekleştirerek sertleştirme kırılmayı kolaylaştırmada bir yöntem olarak kullanılmaktadır [12].

Biyelde en önemli dayanım kriteri çevrimli yüklerde çalıştığı için yorulma dayanımıdır. Burada karşımıza Fretting Korozyonu tabiri çıkmaktadır. Bu şu demektir: İki temas eden yüzeyler arasında sürtünme nedeniyle oluşan bir aşınma olup, genel olarak mekanik yapıdaki malzemelerin tekrarlı ve birbirlerine göre çok az genlikte hareketleri neticesinde meydana gelir. Bu çalışmada da C70S6 ve SMA40 çeliklerinin yorulma dayanımları fretting korozyonu olduğu zaman ki durumları ile de incelenmiş olup, normalde her iki malzeme de yüksek yorulma dayanımı (432 MPa ve 437 MPa) görülmüştür, ancak fretting korozyonu oluştuğunda önemli bir düşüş olduğu görülmüştür [13].

JIS SCM420 çeliği de biyel kolu imalatında kullanılmaktadır. Bu çeliğe yöntemi ile yüzeyden 0,5 mm. derinliğe kadar karbürleme uygulanmakta ve bunun neticesinde 800 MPa' a kadar çıkan bir yorulma dayanımı görülmektedir. Sertlik yüzeyden derinliğe doğru azalmakta ve bu yüzden tam bir gevrek kırılma elde edilememektedir. Bu da ayrılma yüzeylerinin tam olarak tekrar birleşmemesi demektir. Bunun için birleşme yüzeyindeki çatlakların oluşumunun nedenleri

incelenmiş ve oluşan boşlukların önlenmesi yoluna gidilmiştir. Bu sorun sıcaklık ve birim uzama (strain) parametreleri ile çalışan düşey bir kırma makinesi modellenmesi ile aşılmıştır. Non-linear bir yöntem olarak “Explicit metod simülasyonlu çok yüksek hızda darbe fenomeni” kullanılmış olup, çözücü olarak da LS-DYNE960 modülü kullanılmıştır. Simulasyonda ilk hız olarak 650 mm/s. ve 200 kg.lık bir kütle kullanılmıştır. Yerçekimi kuvveti 9800 mm/s. alınmıştır. Değişken olarak sünek-gevrek geçiş çizgisi alınmıştır. Sonuçta çatlak başlangıç noktaları, gerilim yığılmasını önlemek için, kaldırılarak tekrar simültine edildiğinde kırılma sonrası meydana gelen küçük çatlakların ve boşlukların önlenildiği görülmüştür. Bu da istenilen bir gevrek kırılma yüzeyidir. Daha sonra aynı boyutlarda bir biyel ile deneysel olarak da işlem gerçekleştirilmiştir. Sonuçta 800 MPa değerinde yorulma dayanımı ve % 30 ağırlıkta azalma elde edilmiştir. SCM420 karbürü çeliği 2003 yılından beri Yamaha motorsikletlerinin bir modelinde kullanılmaktadır [14].

C70S6 çeliği ve yeni bir biyel malzemesi olan FRACTIM karşılaştırılması sonucunda C70S6 larda temel iki sorun görünmektedir [6]. Birincisi işlenebilirliğinin zor olması, ikincisi ise biyelin kırılmasında çarpılma (distorsiyon) problemidir. Bu FRACTIM de S (kükürt) ve Mn (manganez) oranını artırılıp, C (karbon) oranının azaltılması ile ortadan kaldırılmaktadır. Mukavemette herhangi bir düşüş olmamıştır. Malzeme bileşimleri aşağıdadır:

**Tablo 1.2:** C70S6 ve FRACTIM Biyel Kolu Çeliklerinin Kimyasal İç Yapılarının Karşılaştırılması [6]

<b>Malz. %</b>	<b>FRACTIM</b>	<b>C70S6</b>
C	0,63	0,73
Mn	0,76	0,54
P	0,042	0,015
S	0,088	0,064
V	0,030	0,030

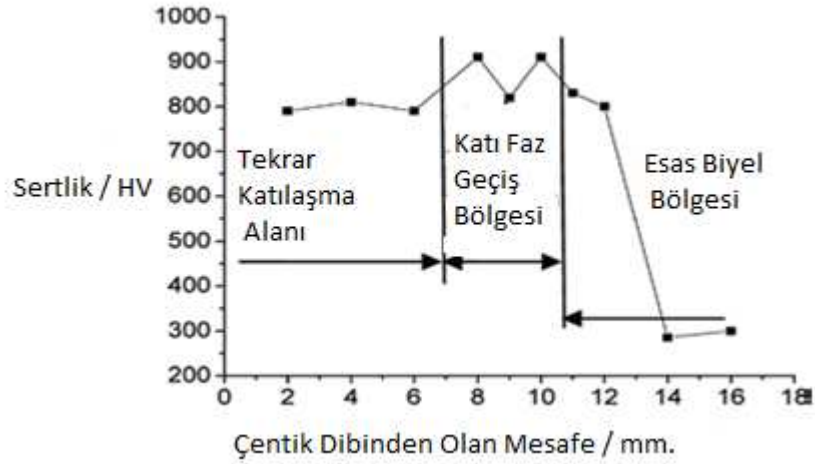
Biyelde tasarım ve imalatta en belirleyici faktör olarak yorulma dayanımı görülmüştür. Ayrıca, eğilme gerilmesi, atalet kuvvetleri ve diğer eksantriklikleri azaltmak için malzeme kesit modüllerinin (section modules) yüksek olması gerektiği sonucuna varılmıştır [15].

Japon Sumitomo firması vanadyum ve titanyum oranını artırıp, karbon oranını buna göre dengeleyerek yeni bir düşük alaşımlı biyel çeliği imal etmişler, bu sayede yorulma dayanımı % 30 artmış ve ağırlık ise % 13 azalmıştır. Halen bu malzeme Honda Civic ve Legend modellerinde kullanılmaktadır [16].

C70S6 çeliğine lazer ile çentik açılmakta, daha sonra kırılarak ayırma işlemi biyel üzerinde deneysel olarak test edilmiştir. İlk önce, çentik çevresindeki lazer etkisi ile sertleşmiş tabakanın kalınlığı, mikro yapı ve mikro sertlik ve kırılarak ayırmanın kalitesini belirleyen ana faktörler incelenmiş, ardından da kırılma çentiğinin kırılma üzerindeki etkisinin sonuçları incelenerek, kırılma yüzeyinin kalitesi incelenmiştir. Sonuç olarak ideal bir çentikte olması gereken özellikler şöyle belirlenmiştir: küçük çentik ağzı, silindirik bir merkez, küçük kök yarıçapı, yüksek sertlik ve ortalama bir derinlik. Ayrıca çentik açmada lazer yönteminin broşlamadan daha iyi bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Çentiğin etrafı üç ayrı bölgeye bölünmüştür: Ergime bölgesi, katı faz geçiş bölgesi ve ana metal. HAZ (Heat Affected Zone -Isıdan Etkilenmiş Bölge) içindeki yapı martenzit yapıya geçtiği için kırılma gevrek bir kırılma olmuştur. Mikro sertlik 790 HV ölçülmüş olup, ana metalin sertliğinden daha yüksek bir değerdir. Bu da kırılmanın gevrek kırılma olmasını etkileyen faktörlerdendir [17].

İşlem biyelin büyük deliğin orta merkezine çift taraflı olarak açılmış çentiğe dik olarak kuvvet uygulayarak kırılma işlemine dayanmakta olup, çentik açılan bölgede gerilme yığılması meydana geldiği için kırılma daha hızlı olmaktadır. Gerilme yığılması gevrek kırılma için gerek ve yeter şartı sağladığı için çok az bir plastik deformasyon ile uygun bir kırılma gerçekleşir. Sonuç olarak biyelin talaşsız bir şekilde kırılması sağlanmıştır. Yüksek karbonlu–düşük alaşımlı C70S6 çeliği küçük plastik deformasyon, yüksek mukavemet, uygun gevreklik, iyi mekanik özellikler ve mükemmel kırılarak ayrılma özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir [17].

Biyel koluna başlangıç çentiği genel olarak broşlama ve lazer yöntemi ile açılır. Lazer yöntemi hızlı olması, yüksek tekrarlı hassasiyeti, takım aşınmasının olmaması, kırılmayı kolaylaştırıcı bölgesel sertlik oluşturması gibi sebeplerden dolayı son yıllarda tercih edilmektedir. Bununla beraber lazer ışını ve C70S6 çeliği arasındaki etkileşim karmaşık olup, aynı zamanda bazı faktörler etkindir. Bunun için önemli bir proses olan lazer ile çentik açma işleminin optimum verimi elde etmek için derinlemesine incelenmesi ihtiyacı doğmuştur. Lazer ile çentik açma yönteminin iki yönü vardır; bir tarafta çentik lazer ışını ile direk kesilebilmektedir, diğer tarafta tokluk azalırken çentiğin mukavemeti ana malzemeden yüksek bir değere ulaşarak çentik yivinin sertleşmesine neden olur. Lazer işleminden sonra gevrek bir kırılma daha kolay elde edilebilir. Önemli bir tokluk değeri olan C70S6 çeliği için bu sertleşme etkisi kayda değerdir [17].



Şekil 1.5: Kırılma Çentiğinin Mikro-Sertlik Dağılımı [17]

Çentik açıldıktan sonra ısıl olarak etkilenen yiv martenzite dönüşür. Böyle bir yapı biyel formu için istenmez, ayrıca oluşan martenzit dönüşümünden sonra oluşan mikro çatlaklar biyel kullanılırken çekme mukavemetini olumsuz etkileyecektir. Bu yüzden ayırma işleminden sonra HAZ (Heat Effected Zone) ı ortadan kaldırmak için ilave prosese (talaşlı işlem) ihtiyaç duyulur [17].

Kimyasal yapıyı değiştirme yönünde Manabu Kubota, Shinya Teramoto V, Zr, Ca ve Al. ilave ederek ve oranları değiştirerek araştırmalarda bulunmuşlardır [18].

Bu araştırmada yapıdaki V, Zr (zirkonyum), Ca (kalsiyum) ve Al (aliminyum) oranlarını artırarak ve C70S6 çeliğindeki 0,7 olan karbon oranını 0,35'e çekerek ve Pb (kurşun) ilave etmeden hem tokluk ve mukavemette artış sağlanmıştır, hem de darbeli kırılma parametrelerinden taviz verilmeden kırılma elde edilmiştir. Boyece goreceli olarak duşuk mukavemetinden dolayı sınırlı kullanım alanı olan C70S6 eliğine de bir alternatif oluşmuştur [18].

Burada en önemli unsur Pb (Kurşun) oranının çok duşuk seviyede tutulması ve C (Karbon) oranının da C70S6 ya gore duşuk tutulmasıdır. Buna rağmen diğer alaşım elementleri ile takviye edilen malzeme kusursuz kırılarak ayrılmaktadır [18].

**Konu ile ilgili yerli akademik çalışmaya rastlanmamış olması konuyu cazip hale getiren en önemli etkenlerin başında gelmektedir.**

### 1.3 Kırılma Parametreleri

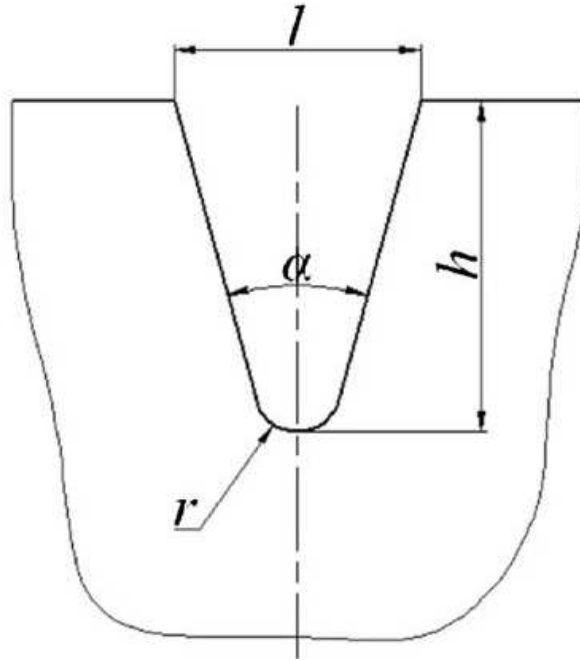
Kırarak ayırma parametreleri ana olarak **kırma basıncı, geri basınç ve basınç hızı**dır. Kırma basıncı malzeme özellikleri ile çentiğin büyüklüğü ve şekline bağlıdır. **Aşırı kırma basıncı** büyük parçada çok fazla deformasyona neden olabilir. Uygun **geri basınç** kırılarak ayrılma parametrelerinin kararlığını sağlarken, aynı zamanda büyük parçada deformasyonu azaltırken, kırılarak ayrılan klevaj yüzeyinin uniform olmasını sağlar. **Basınç hızı** klevaj yüzeyin kalitesine etki eder. Artan basınç hızı biyel kolunun gevrek kırılmasını sağlarken, tüm klevaj yüzeyin sünek kırılma alanını önemli ölçüde azaltır. Sünek kırılma alanı ne kadar az sünek olursa ayrılan iki parçanın birbirine uyması o kadar iyi olur. Ancak bazı çalışmalar [17] göstermiştir ki basınç hızı 100 mm/s.den sonra sünek kırılma alanı hemen hemen sabit kalmaktadır. Bu göstermektedir ki basınç hızını 100 mm/s.den daha fazla artırmanın bir gereği olmadığıdır [5].

Çentikler kırılarak ayrılma prosesinde çok önemlidir. Çünkü çatlaklar ilk önce broşlanmış bu iki çentikten başlarlar, stres birikimi oluştururlar ve radyal basınç ile birlikte artan çatlaklar dışarıya doğru genişleyerek büyük parçanın tamamen kırılarak ayrılma kalitesine etki ederler. Bu yüzden çentiklerin yeri, şekli ve büyüklüğü kırılarak ayrılma prosesinin kalitesini direk etkiler. İki entik simetrik olarak karşılıklı açılmalı, aynı büyüklükte ve aynı şekilde olmalıdır. entik derinliği ihtiyaç duyulan

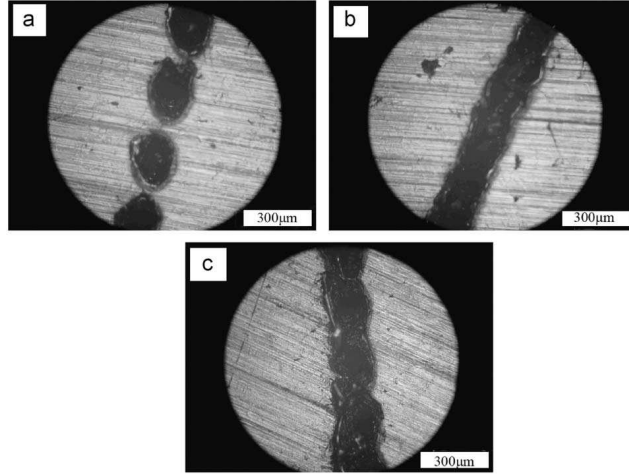
ayırma basıncını etkiler ve daha sonra büyük parçanın ayrılma deformasyonuna etki eder. Jetta araçlarında çentik derinliği ile ilgili araştırmalar yapılmış olup; çentik derinliği arttıkça ihtiyaç duyulan basınç azalmaktadır. Bunun esas sebebi çentik derinliği arttıkça stres konsantrasyonunun artmasıdır. Ancak çentik derinliği daha sonraki işlemler için sınırlandırılmıştır. Deneysel çalışmalar göstermiştir ki; en uygun çentik derinliği 0,4-0,6 mm arasındadır. Çentik genişliği ve çentik dip yarıçapı da kırılarak ayrılma prosesinde diğer önemli iki etkendir [5].

Başlangıç çentiğinin (SN: Starting Notch) işlenmesi kırılarak ayrılma prosesinde en önemli üç çalışma ayağından birisidir [19].

Broşlama ve lazer ile açma iki ana yöntem olup, broşlama yöntemi geleneksel olan yöntemdir. Lazer yönteminin temel avantajları; malzemeye temas olmadan çentiğin açılması, yüksek kalite ve hassasiyet olarak sıralanabilir. Diğer taraftan, broşlama yönteminin lazere göre daha kötü işleme ve takım ömrünün daha az olması ve sık bakım ihtiyacı gibi dezavantajları vardır. Sonuç olarak, zamanla lazer yöntemi broşlama yönteminin yerini almaya başlamıştır. Alfing Kessler Sondermaschi- nen GmbH and Mauser Group (Germany), Honda Co. (Japan), Lasag Co. (Switzerland) firmaları başarılı şekilde farklı çeşitlerde lazer işleme makineleri geliştirmektedirler. Genelde Nd-YAG lazerler (dalga boyu 1064 nm-nanometre) bu makinelerde kullanılmaktadır [9].



**Şekil 1.6:** Başlangıç Çentiğinin Geometrik Parametreleri [9]



**Resim 1.2:** Çentiğin a) süreksiz b) sürekli c) aşınmalı yapıları (optik mikroskop) [8]

Kırılarak ayrılma prosesinde kullanılacak **malzeme** aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır: Kırılarak ayrılmada minimum deformasyon, yüksek yoğunluk, uygun gevreklik, yüksek işlenebilirlik [20].

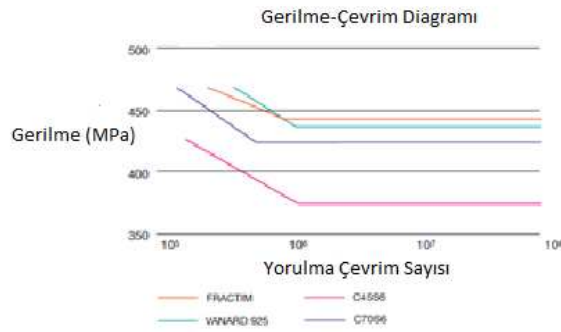
Halihazırda, biyel kollarının kırılarak ayrılma prosesinde toz metalurji malzemeleri, dövme demir, nodüler dökme demir ve yüksek karbonlu düşük alaşımlı çeliklerdir [21]. Ancak pratikte bildiğimiz anlamda düşük alaşımlı karbon çeliklerini kırılarak ayrılma prosesinde kullanmak için üretmek mümkün değildir, çünkü bu malzeme çok fazla süneklik ve kırılma esnasında fazla deformasyon gösterir. Plastik deformasyon biyel başlık ve gövdesinin tam olarak birleşmesine izin vermez. Deformasyon ne kadar az olursa klevaj kırılma yüzeylerinin birbirlerine oturması (uyması) o kadar iyi olur. Malzemenin kimyasal yapısı süneklikte çok önemlidir. Örneğin Mn ve N oranının azaltılması ve Si ve V oranının artırılması sünekliğin azalmasına sebep olur. SPLITASCO70 ve SPLITASCO50 (Fransa), S53CVFS ve S50CVS1 (Japonya) ve C70S6BY (Almanya) gibi malzemeler kırılarak ayrılan biyel kolu prosesinde geliştirilmiş olup, kitlesel olarak başarılı bir şekilde imal edilmektedir. C70S6BY (Almanya) Jetta-Volkswagen (Çin'de) arabalarının biyel kolu imalatında kullanılmaktadır (bkz. Tablo 1.2.). Bu çelikte Mn oranı azken, V sünekliğin azaltılması için ve S ise işlenebilirliğin artırılması için eklenmiştir. Yapı perlit ve süreksiz ferrittir. Sertlik 263-310 HB, çekme mukavemeti 900+150 MPa, akma mukavemeti 520 MPa ve en yüksek uzama oranı ise 10% dur [21].



**Tablo 1.3:** Kırılarak ayrılabilen biyel kolu çeliklerinin mekanik özellikleri [6]

Malzeme	0,2 % Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)		Uzama %	Havada Su Verme	Kırılarak Ayrılabilme
	Min	Min.	Max.	Min.		
C45S6	370	630	780	17	+	
VANARD 925	560	850	1000	12	+	
38MnVS5	580	850	1000	12	+	
C70S6	560	850	1010	10	+	+
70 MnVS4	580	880	1050	9	+	+
FRACTIM	580	850	1000	12	+	+

Aşağıda Şekil 1.7.de CORUS marka çelikler (FRACTIM ve VANARD 925) ile diğer endüstriyel çeliklerin (C70S6 ve C45S6) S-N (Gerilme-Devir) kartında yorulma testleri görülmektedir. Yorulma dayanımı yatay çizgi ile gösterilmektedir. FRACTIM ve VANARD 925 gibi yüksek yorulma dayanımına sahip çelikler biyel kollarında daha fazla yüke maruz kalacak şekilde kullanılmaktadır [6].



**Şekil 1.7:** Bazı Kırılarak Ayrılabilen Çeliklerin S-N (Gerilme-Devir) Kartı [6]

Biyel kolu üretiminde kontrollü olarak havada su verilen çelikler normal ısı işleme tabii tutulan çeliklerin yerlerini almaktadır. Dizel motorları ve yüksek performanslı benzinli otomobiller için yüksek mukavemet değerli çeliklere gereksinim vardır. Ağırlık ve ambalaj kısıtlamaları nedeniyle yüksek mukavemetli

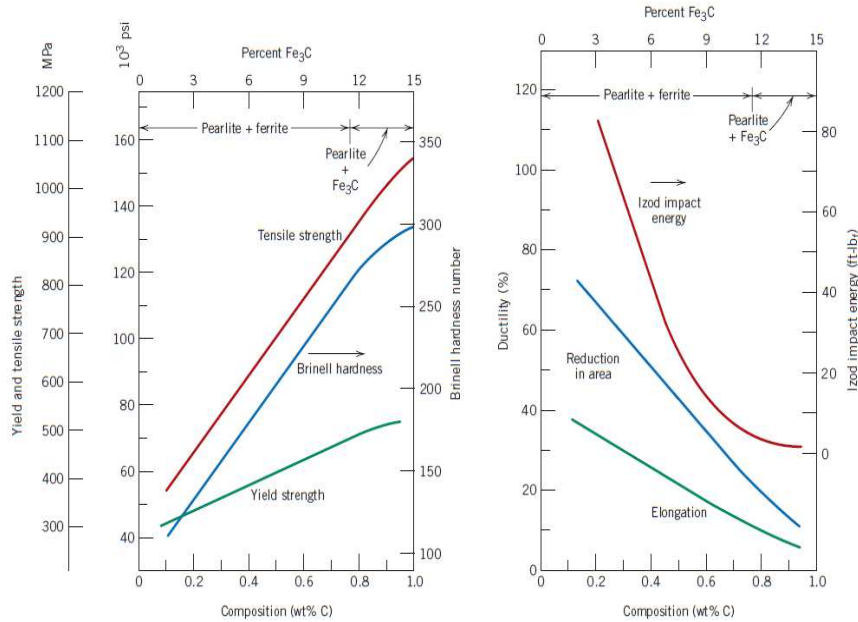
çeliklere olan ihtiyaç büyümektedir. Corus Firması tarafından geliştirilen VANARD 925®, çeliği çoğunlukla kullanılan C45S6 çeliğine göre çok daha yüksek mukavemetlidir ve 38MnVS5 çeliğine göre de işlenebilirliği daha iyidir. Yine Corus Firması tarafından geliştirilen FRACTIM çeliği de C70S6 çeliğine göre hem maliyet olarak hem de işlenebilirlik olarak daha iyidir [6].

#### 1.4 Alaşım Elementlerinin Kırılma Parametrelerine Etkisi

Mangan (Mn): Darbe tokluğunu artırmaya yarar ve kırılabilir biyel malzemeleri için fazla arzu edilmeyen bir malzemedir.

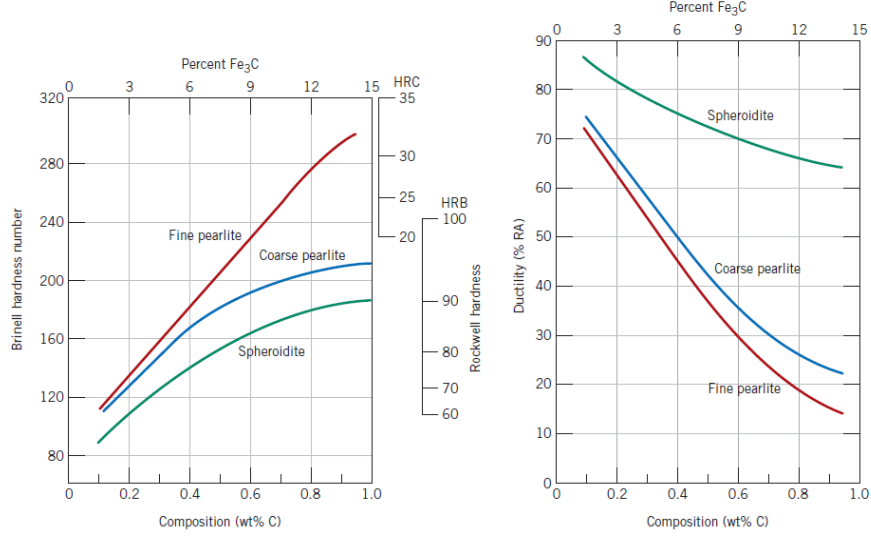
Kükürt-Sülfür (S): İşlenebilirlik ve gevrekliği artırdığından kırılabilir biyel malzemeleri için bilinen çeliklere göre oranı bir miktar yüksek tutulur.

Karbon (C): Karbon esas belirleyici element olarak sertlik ve gevreklik üzerinde önemli etkisi olduğu zaten bilinmektedir. Darbe enerjisi ve tokluk karbon oranı ile ters orantılıdır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8: Karbon Oranının Mukavemet ve Sünekliliğe Etkisi [22]

Şekil 1.8.de de görüldüğü üzere, karbon oranındaki artış iyi perlit tanelerinden dolayı sertlik önemli ölçüde artarken darbe enerjisi de o oranda azalır. Bu tür bir yapı kırılabilir bilyeller için uygun bir yapıdır.



Şekil 1.9: Karbon Oranının Sertlik ve Süneklığe Etkisi [22]

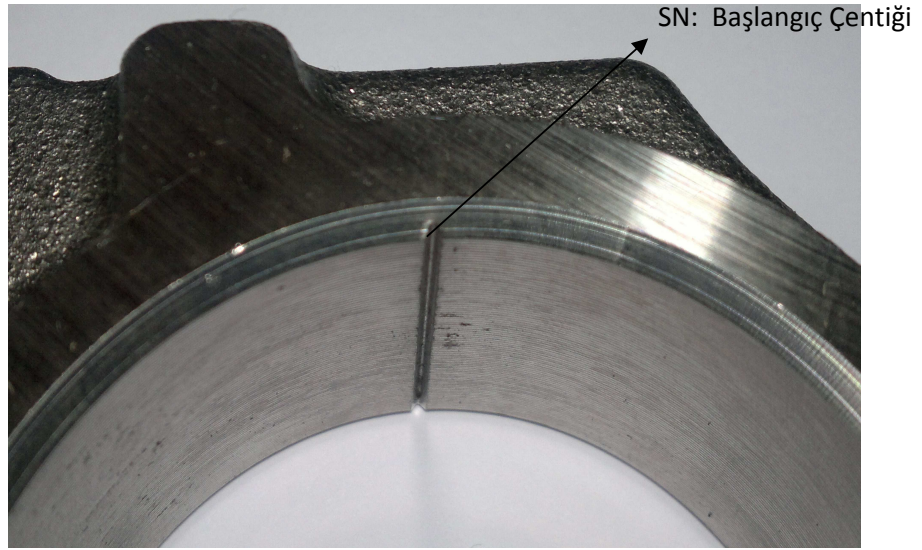
Şekil 1.9.dan anlaşılacağı üzere karbon ve perlit oranı arttıkça süneklilik oranı azalır. Perlit için %0,7-0,8 karbon oranı şekil 1.9.dan da anlaşılacağı gibi optimum seviyededir [22].

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kırılarak ayrılabilen C70S6 çeliğine (Resim 2.1) başlangıç çentiklerinden (Resim 2.2) tek darbeli yük ile kırma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan eksantrik hidrolik pres Resim 2.3.te görülmektedir. Kırılma aparatlarının resimleri ise Şekil 2.4-2.6'da görülmektedir.



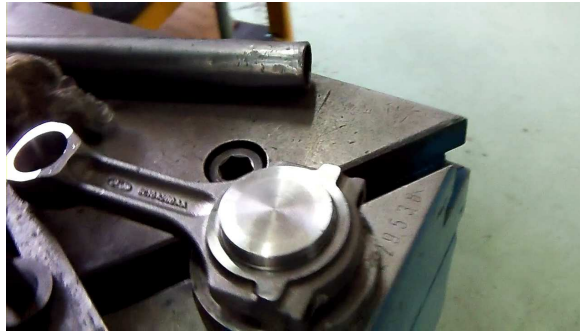
**Resim 2.1:** Kırma Deneyinde Kullanılan C70S6 Biyel Kolu



**Resim 2.2:** Kırılmayı Başlatan Başlangıç Çentiği-Starting Notch:SN



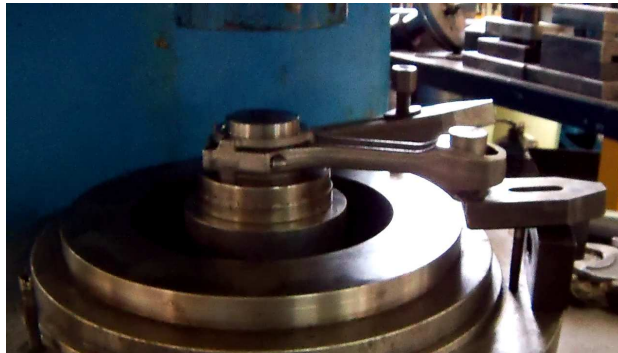
**Resim 2.3:** Kırma Deneplerinde Kullanılan Eksantrik Hidrolik 160 Tonluk Pres



**Resim 2.4:** Biyel ve Yapılan Kırma Aparatı



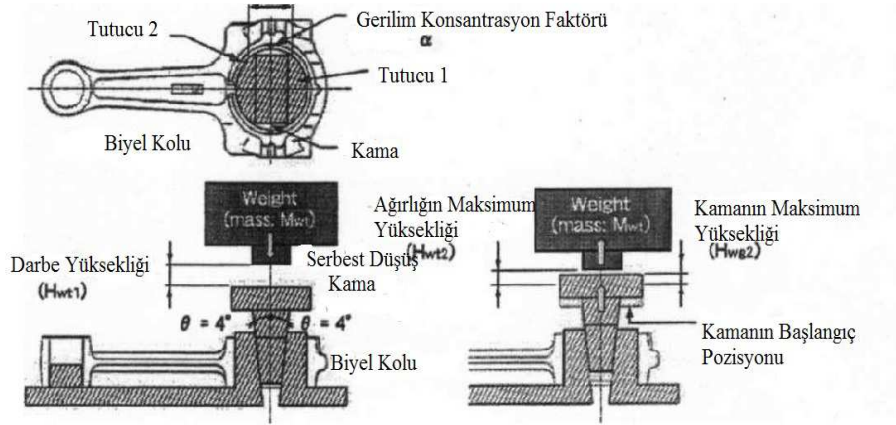
**Resim 2.5:** Darbeli Presin Altına Yerleştirilen Biyel ve Hazırlanan Kırma Tertibatı



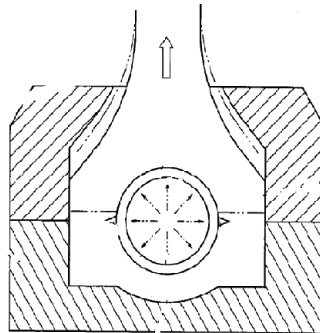
**Resim 2.6:** Biyel ve Hazırlanan Kırma Tertibatı

## 2.1 Isıl İşlem Uygulanmayan C70S6 Çeliğinin Kırma Deneyi

Deneylerde kullandığımız ekzantrik milli hidrolik pres (Resim 2.3.) 160 ton kapasitelidir. Kırılma hızı ortalama 300 mm/saniye olarak ölçülmüştür. Bu genel olarak çok yüksek bir hız olup, tek darbede biyelin deformasyonsuz iki parçaya ayrılmasını sağlamıştır. Deneylerde kullandığımız biyel kolu Resim 2.1.de görülmektedir. Kırma aparatımızın şematik bir görünümü Şekil 2.1.de ve tek darbeli kırılma ile elde ettiğimiz uniform kuvvet dağılımı ve basınç yönlenmesi de Şekil 2.2.de görülmektedir. Çentik derinliği arttıkça kırılma basıncı azalmaktadır. Optimum çentik derinliği 0,1-0,4 mm. arasındadır [2]. Deneylerde kullanılan çentik derinliği Şekil 2.3.de görüldüğü gibi maksimum 0,4 mm.dir.

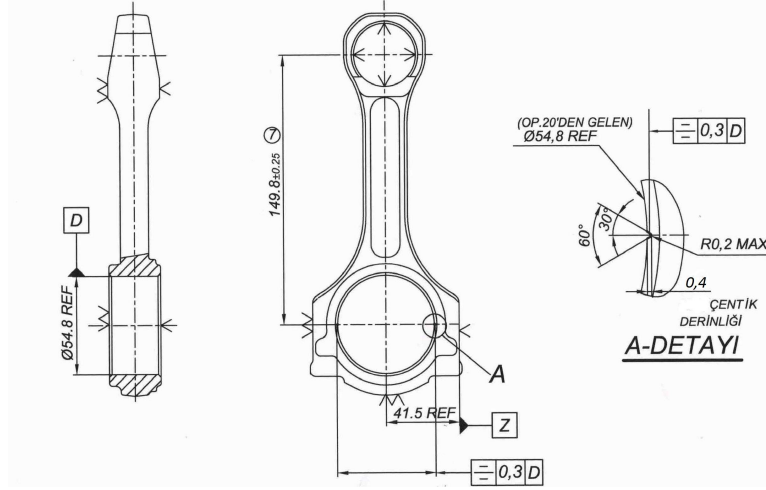


Şekil 2.1: Örnek Bir Kırarak Ayırma Aparatının Şematik Görünümü [6]



Şekil 2.2: Uniform Basınç Yönlenmesi [6]





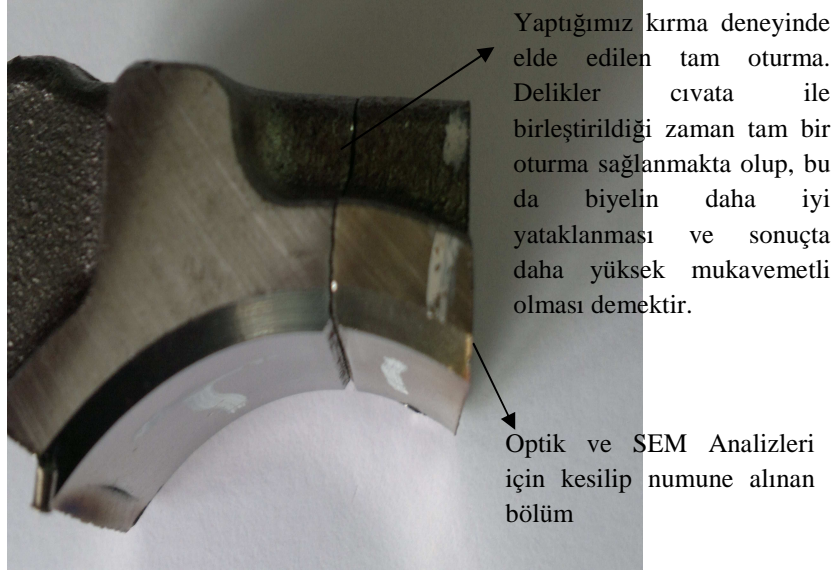
**Şekil 2.3:** Deneylerde Kullanılan Biyel Kolu [6]



**Resim 2.7:** Kırılmış ve SEM-Optik Analiz İçin İkiye Kesilmiş Parçalar



**Resim 2.8:** Gevrek ve Klevaj Kırılma Yüzeyi



**Resim 2.9:** Tam Oturan Karşılıklı Yüzeyler

Kırarak ayırma deneyi sonucunda klevaj-gevrek kırılma yüzeyi elde edilmiştir (Resim 2.7-2.9). Bu uniform kuvvet dağılımının ve malzemenin sert ve gevrek olmasının sonucudur.

Yaptığımız kırma deneyinde ortalama kırma hızı 300 mm/s. [Darbe Yüksekliği: 150 mm., Darbe Süresi: 0,5 s.] olarak ölçülmüştür. Resim 2.7-2.9.den de görüldüğü üzere kırılma gevrek kırılma olup, sünek kırılma genişliği ortalama 0,05 mm.dir. Deneyler sonucunda tek parçalı ve deformasyonsuz bir kırılma yüzeyi elde edilmiştir. Bu yöntem sayesinde maliyet ve işçilik önemli ölçüde azalırken, biyelin büyük parça ve şapka diye tabir edilen kısımlarının mükemmel bir şekilde birbirine oturması da bu yeni yöntem ile sağlanmaktadır. Teknolojik olarak üretim sektöründe kullanılmaktadır. İşleme hassasiyeti, mükemmel yataklama kapasitesi de yöntemin diğer avantajlarındandır. Ayrıca son bitirme (hassas talaşlı işleme) işleminden sonra motorun kalitesi ve ömründe de gelişim kaydedilmiştir [6].

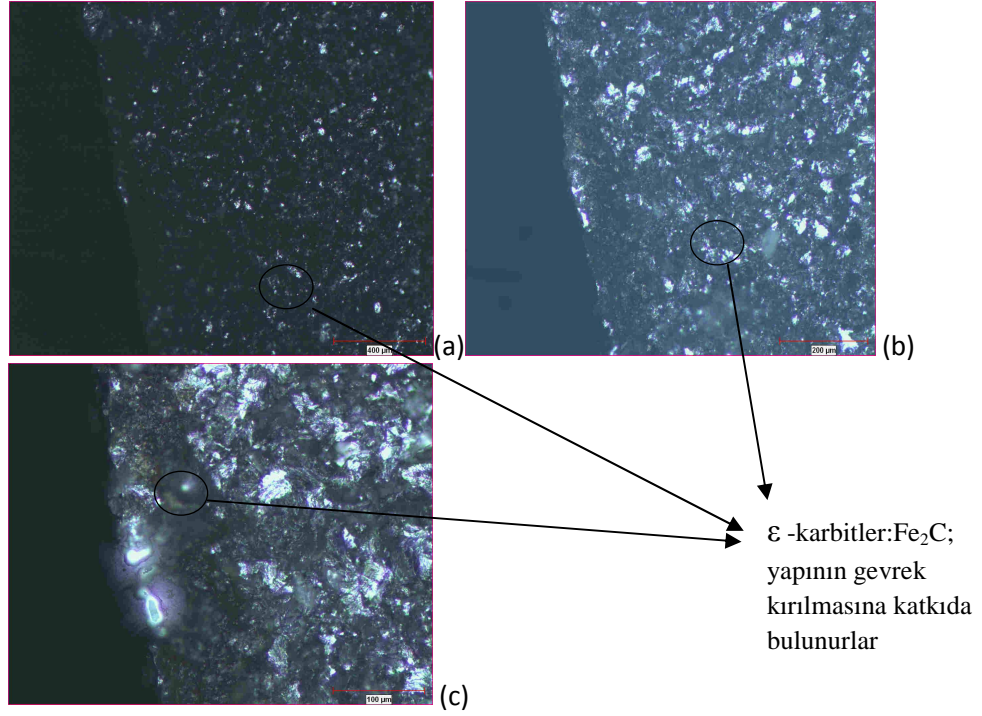
## 2.2 Metalografik İnceleme

Kırılarak ayrılan yüzeylerin hem optik hem de SEM analizleri yapılmış olup, sonuçları ve yorumları kırılma parametreleri açısından yorumlanmıştır.



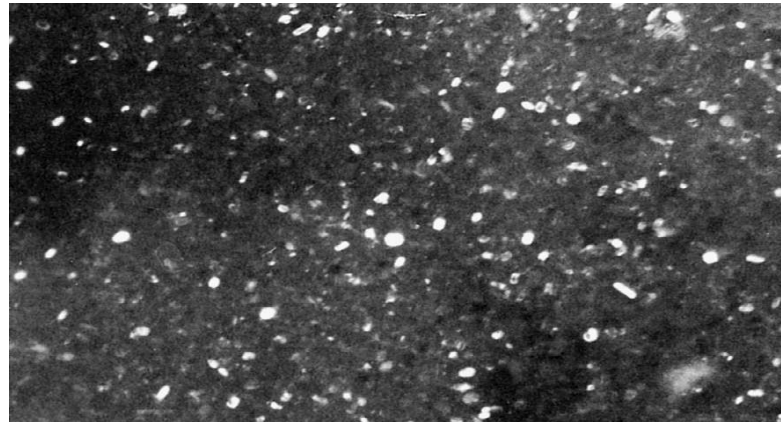
## 2.2.1 Optik Metalografi

Biyel kolunun kırılma yüzeyi Nikon MA 100 Metal Mikroskopi tarafından incelenmiş olup, spektral analiz ise BAIRD DVG Spektrometre ile yapılmıştır. Sertlik ölçümleri brinel cinsinden ölçülmüştür.



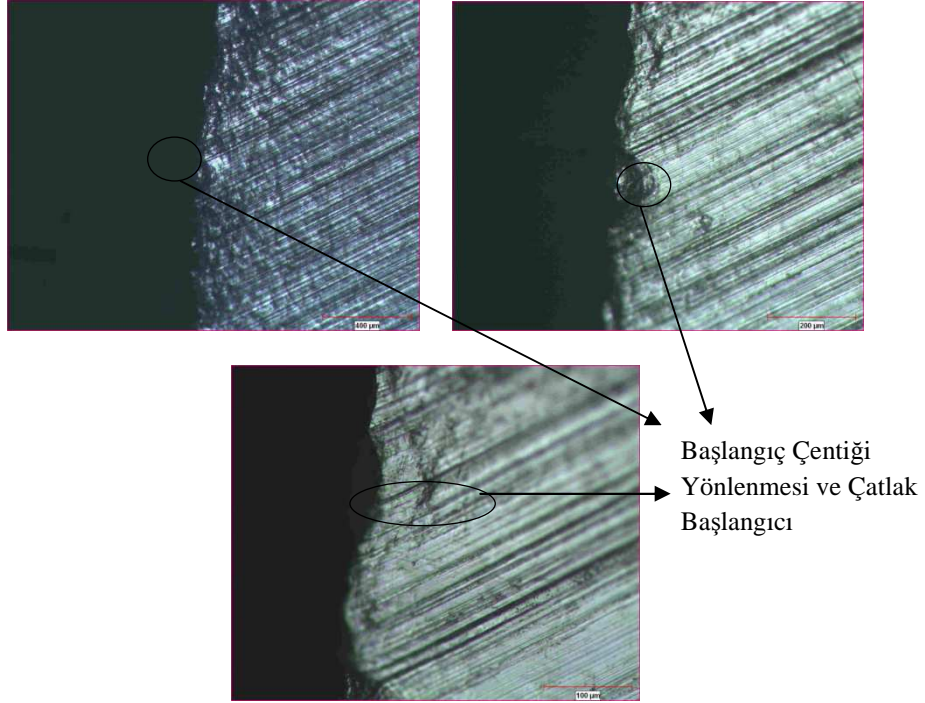
**Resim 2.10:** (a) Kırılma Yüzeyi, Gevrek ve Deformasyonsuz Kırılma  
(b) ε-karbitler:Fe<sub>2</sub>C  
(c) İnce taneli perlit (siyah) matrix ve ferrit (beyaz)

Mikroyapı tipik ince lamelar perlit matriksli yüksek karbonlu çeliktir. Ortalama % 90 perlit ihtiva etmekte olup, ε karbitler (Fe<sub>2</sub>C ) görülmektedir.



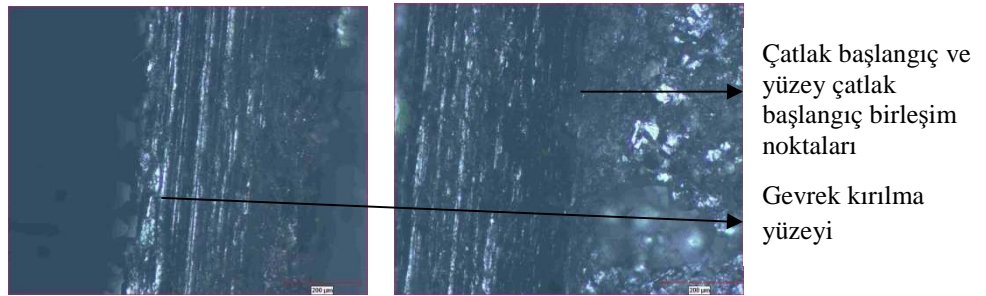
**Resim 2.11:** Elektron Mikroskopunda Çekilmiş ε-Karbitler (X 50000) [23]

$\epsilon$  karbitlerin hem sertliği artırmakta, hem de kırılma parametrelerinde ön koşul olan çentiklerden gevrek ve deformasyonsuz kırılmayı sağlamada büyük kolaylık sağladıkları deneysel olarak gözlemlenmiştir [23].



**Resim 2.12:** Başlangıç Çentiği Yönlenmesi ve Gevrek Kırılma Başlangıcı

Kırılma aniden meydana gelmekte olup, tipik gevrek kırılmadır. Açıkça görülmektedir ki; deformasyon ve herhangi bir malzeme kaybı söz konusu olmamıştır.

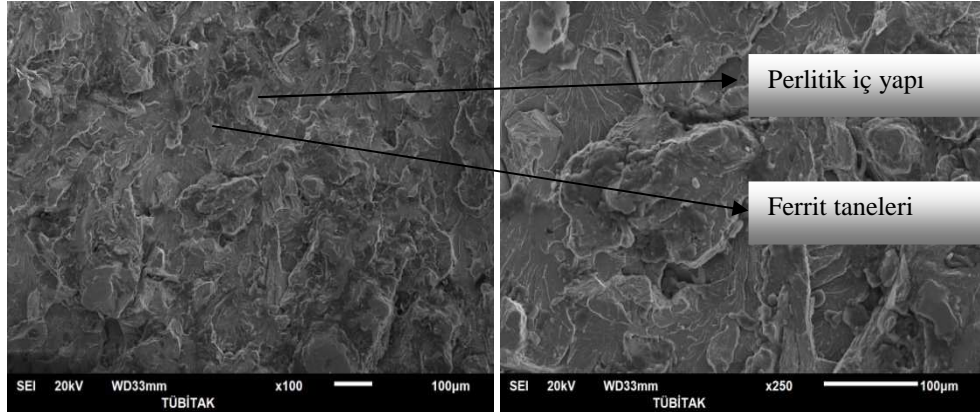


**Resim 2.13:** Çatlak Başlangıcı ve Yüzey-Çatlak Başlangıç Noktası Birleşimi

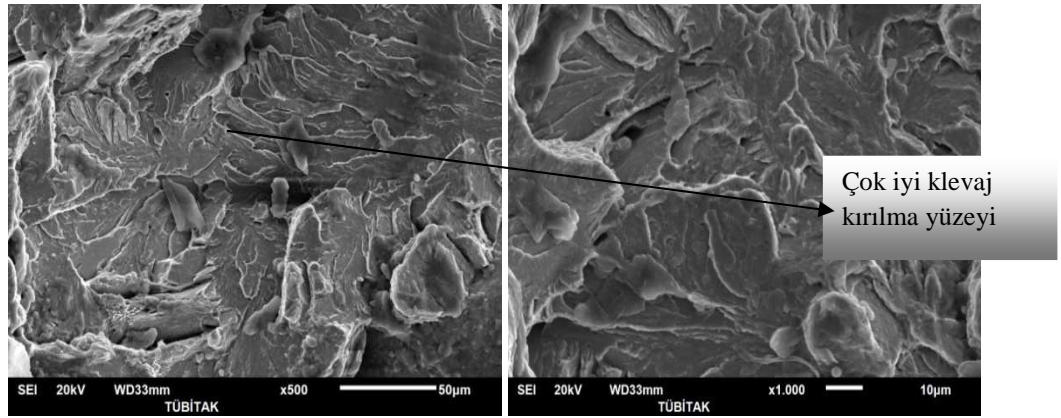
## 2.2.2 SEM (Tarayıcı Elektron Mikroskopu) Metalografisi

SEM analizi "JEOL/JSM-6510 LV scanning electron microscopy" kullanılarak TUBİTAK-MAM'da gerçekleştirilmiştir. Resim 2.14-2.17'den görüldüğü üzere

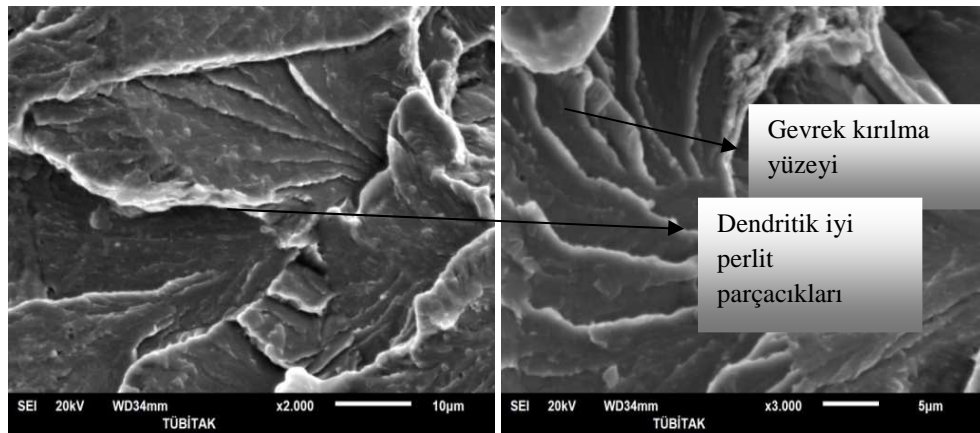
kırılma gevrek-klevaj bir kırılma olup, deformasyonsuz bir kırılma gerçekleşmiştir. Dendritik yapıdaki iç yapı perlitik olup, az miktarda ferrit içermektedir.



**Resim 2.14:** Dendritik İyi Perlit ve Az Miktarda Ferrit Taneleri

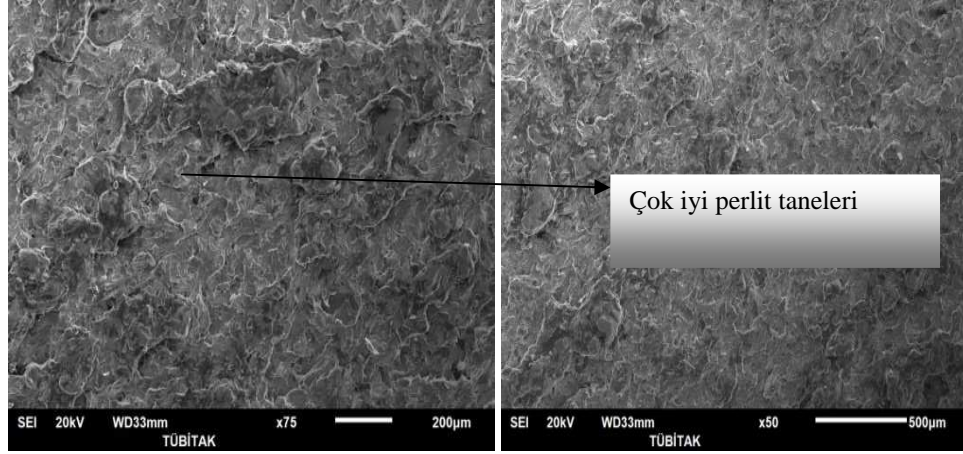


**Resim 2.15:** Klevaj ve Gevrek Kırılma Yüzeyi



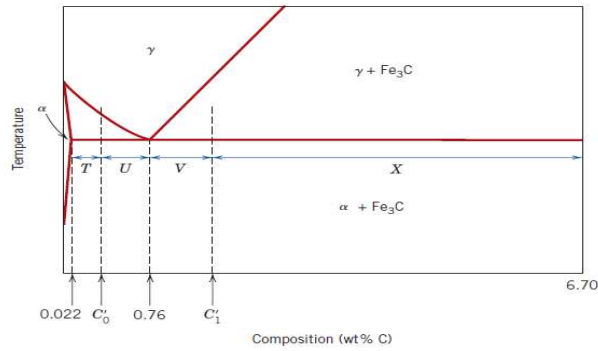
**Resim 2.16:** Dendritik Perlitik Parçacıkları ve Gevrek Kırılma Yüzeyleri





**Resim 2.17:** İyi Perlit Taneleri

SEM analizleri göstermiştir ki; iç yapı çoğunlukla iyi taneli perlit ve az miktarda ferrittir. İç yapı homojen ve süreklidir (Resim 2.16). Perlit ve ferrit oranı Denklem 2.1. ve 2.2.ye göre çıkartılırsa;



**Şekil 2.4:** Fe-C Denge Diagramının Ötektoit ve Alt-Üst Bölümleri [22]

Proötektoit ferrit ve perlitin oranları Şekil 2.4. ve denklem 2.1. ve 2.2. ye göre hesaplanırsa;  $C'_0 = \% 0,692$  (C70S6'daki karbon oranı), cetvel kuralı uygulanırsa; kütlelesel yüzde olarak perlit oranı bulunur;

$$W_p = \frac{T}{T + U} = \frac{0,692 - 0,022}{0,76 - 0,022} = 0,90786 \quad (2.1)$$

Cetvel kuralı ile aynı şekilde proötektoit ferrit de bulunur;

$$W_\alpha = \frac{U}{T + U} = \frac{0,76 - 0,692}{0,76 - 0,022} = 0,09214 \quad (2.2)$$

Burada 0,76 Demir-Karbon Denge Diagramına göre ötektoit nokta; 0,022 ise % 100 ferritin bulunduğu noktadır. Buradan yaklaşık olarak % perlit oranı 0,91 ve % ferrit oranı ise 0,09 olarak bulunur [22].

### 2.2.3 Sertlik, Mekanik Özellikler ve Kimyasal Analiz

Sertlik değeri 280-310 HB. aralığında ölçülmüştür (Resim 2.18.).



**Resim 2.18:** Spektral Analiz ve Sertlik Ölçümünde Kullanılan C70S6 Çeliği

C70S6 çeliğinin kimyasal yapısı (Tablo 2.1) ve bazı önemli mekanik özellikleri (Tablo 2.2) aşağıdadır:

**Tablo 2.1:** Deneylerde Kullanılan C70S6 Biyel Kolu Çeliğinin Kimyasal Yapısı [6]

Bileşen	C	P	Mo	Si	S	Ni	Mn	Cr	Al	V	Fe
%	0,692	0,01	0,015	0,182	0,064	0,072	0,507	0,114	0,003	0,042	Kalan

**Tablo 2.2:** C70S6 Kırılabilir Biyel Kolu Çeliğinin Önemli Mekanik Özellikleri [6]

$\sigma_{akma}$ (MPa)	$\sigma_{çekme}$ (MPa)	Sertlik (Brinell-HB)	% $\epsilon$ Yüzde Uzama
560	850-1100	280-310	10

## 2.3 Kırılma Parametrelerinin Isıl İşlem Uygulamaları İle Değiştirilmesi

Kırılma parametrelerini optimizasyon yöntemlerinden birisi de kimyasal yapıya dokunmadan iç yapının çeşitli ısıl işlem yöntemleri ile değiştirilmesidir. Literatürde bu konu ile ilgili herhangi bir yayına rastlanmamıştır. Özellikle temperlenmiş martenzit ve beynitik iç yapının kırılma yeteneği konvansiyonel perlitik iç yapı C70S6 çeliğinin kırılma parametreleri ile karşılaştırılarak incelenmiştir.

Bazı ısıl işlem uygulamalarının (östenitleme-tavlama, su verme-sertleştirme, su verme-temperleme, beynitleme-östemperleme) darbeli kırılmaya etkisi, ısıl işlem uygulamalarından sonra iç yapı özellikleri incelenmiştir. Tek darbeli kırma deneyleri yapılmış, her kırma deneyinden sonra ısıl işlemden sonra oluşan iç yapının ani darbeli kırılma parametrelerine etkileri yorumlanmıştır. Kırılma yüzeylerinin iç yapı metalografisi kaba perlit-ferrit, martenzit, temperlenmiş martenzit ve üst beynit gibi tipik mikro yapılar göstermiştir. **Özellikle temperlenmiş martenzit ve beynitik yapının kırılmaları üzerinde durulmuştur.**

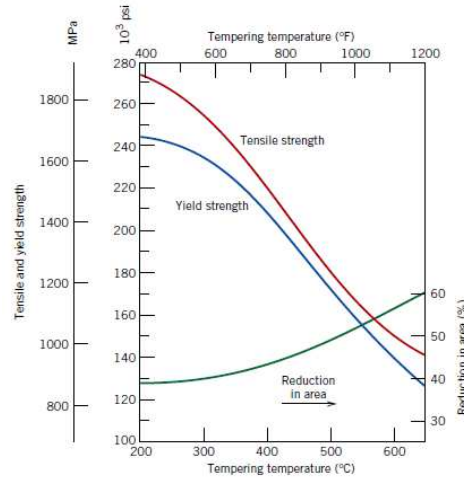
### 2.3.1 Martenzit, Temperlenmiş Martenzit ve Beynit Hakkında Kısa Bilgi

**Martenzit:** Östenitleme sıcaklığına gelen (700-800°C) demir-karbon alaşımlarının daha ziyade çok daha düşük sıcaklıklara (ortamın hemen yanında) çok hızlı biçimde soğutulması (su verme) ile oluşan dengesiz ve yarı stabil (kararsız) yapıya denir. Perlit ve beynitik yapıların bir bileşimi şeklinde de düşünülebilir. Martenzit yapı; karbonun demir içerisine difüze olmasını engelleyecek ölçüde su vermenin hızlı olması durumunda meydana gelir. Herhangi bir difüzyon ( karbonun difüze olması) ferrit ve sementit fazlarının oluşması ile sonuçlanacaktır. Martenzit dönüşümünde difüzyon olmadığı için, dönüşüm birdenbire meydana gelir [24].

Su verilmiş hali ile martenzit çok sert ve kırılğan olduğu için çoğu uygulamada kullanılamaz. Bunun yanında iç gerilmeler de bir diğer zayıflık sebebi olarak karşımıza çıkar. Bu sebeplerden dolayı teknolojik olarak martenzitin kullanılabilmesi için bu çok sert ve kırılğan yapısının toklaştırılmasına ve iç gerilmelerin azaltılıp yok edilmesine gerek duyulur. **Temperleme (menevişleme)** denilen yöntemle

martenzitin tokluğu ve süneklığı artırılırken, iç gerilmelerden de kurtulunur. Temperleme martenzit yapıdaki parçaya genellikle 250 – 650°C arasında bir sıcaklıkta belirli bir süre (her 25 mm. parça kalınlığı için 1 saat kadar) uygulanır. Mamafih 200°C sıcaklıkta dahi iç gerilmelerden kurtulmak mümkündür. Bu temperleme ısıl işlemi difüzyon ile gerçekleşir; **temperlenmiş martenzit** [BCT: Body Centered Tetragonal (Hacim merkezli tetragonal) tek faz]→temperlenmiş martenzit [ $\alpha$  (ferrit) +  $Fe_3C$  (sementit) fazları] şeklinde meydana gelir. [24]. BCT (kübik hacim merkezli) martenzit temperleme ile tam doymuş karbonlu kararlı ferrit ve sementite dönüşür. Temperlenmiş martenzit; sürekli ferrit matrisinde son derece küçük uniform dağılmış  $Fe_3C$ 'den (sementit) ibarettir.

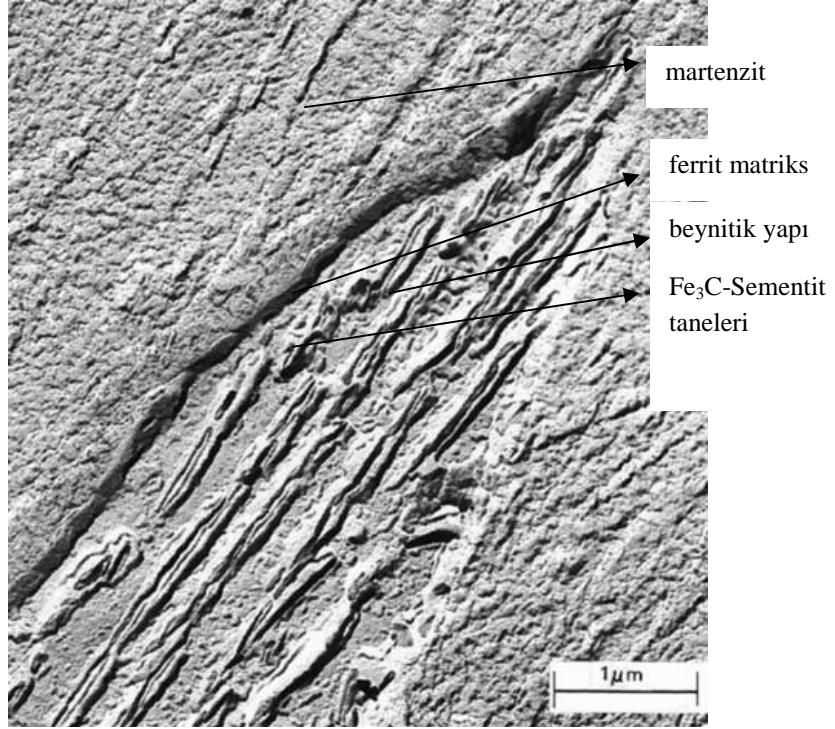
Temperlenmiş martenzit hemen hemen martenzit ile aynı sertlik ve mukavemete sahip olup, ilaveten artırılmış tokluk ve süneklığe sahiptir [24].



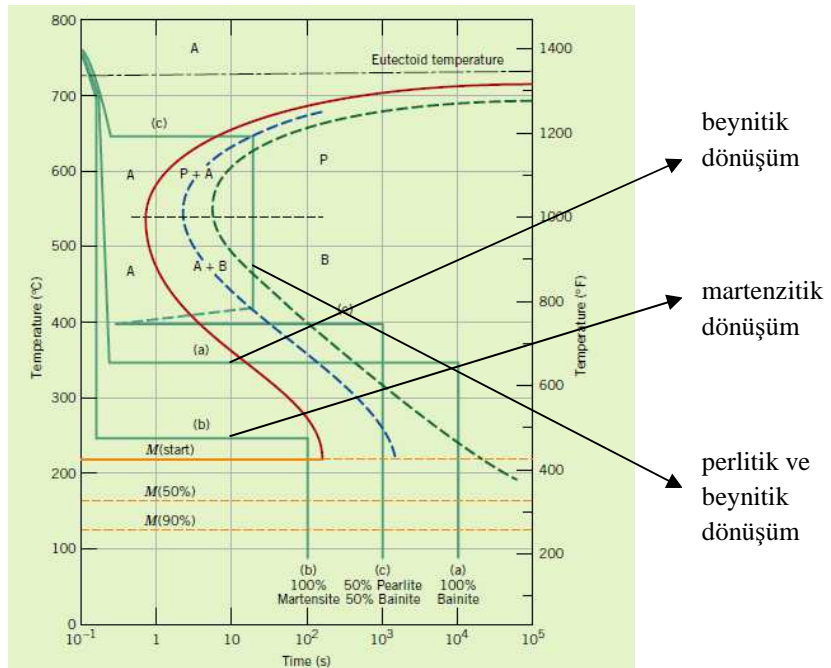
Şekil 2.5: Temperleme Sıcaklığına Bağlı Olarak Mukavemetin Değişimi [24]

**Beynit;** östenitten dönüşüm yapan bileşenlerden birisi olup, perlitin yanında diğer bileşenleri de ihtiva eden bir yapıdır. **Beynit ferrit ve sementit fazlarını ihtiva eder; bu dönüşümde difüzyon meydana gelmektedir (martenzit dönüşümünde difüzyon olayı mevcut değildir).** Beynit dönüşüm sıcaklığına bağlı olarak tabaka veya iğnesel yapı halinde bulunur. Beynitin iç yapısı o kadar hassas ve düzgündür ki sadece elektorn mikroskoplarında detaylı olarak teşhis edilebilir. Resim 2.19. da TEM (Transmission Electron Microscopy - Geçirmeli Elektron Mikroskopu) ile çekilen ve ferrit, martenzit ve sementit tanelerinin mevcut olduğu beynitik yapı

görülmektedir. İzotermal zaman-sıcaklık dönüşüm diagramı da Şekil 2.6. da görülmektedir. İzotermal bir dönüşüm olup, östenitleme sıcaklığına çıkartılan ötektoit demir-karbon alaşımı 540-727°C sıcaklık değerleri arasında perlitik dönüşüme uğrarken, 215-540°C sıcaklık değerleri arasında beynitik dönüşüm başlar.

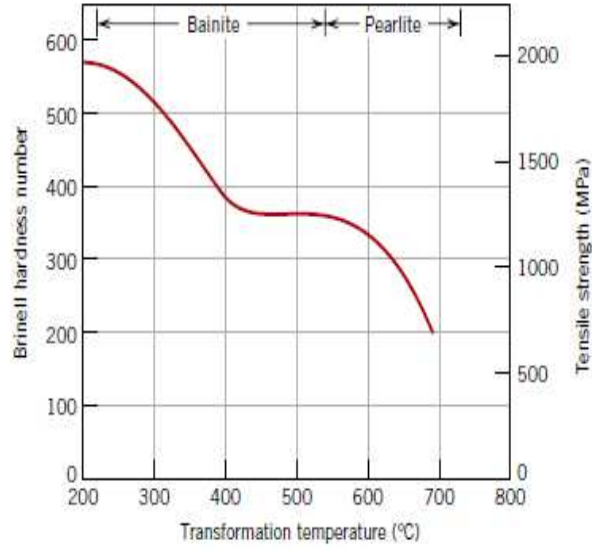


**Resim 2.19:** TEM Mikroskopunda Görülen Beynitik Yapı.



**Şekil 2.6:** Ötektoit Çeliğin İzotermal Dönüşüm Diagramı ve Isıl İşlemler





**Şekil 2.7:** Dönüşüm Sıcaklığına Bağlı Olarak Beynitik ve Perlitik Yapıları Sertlik ve Mukavemet Değerleri [24]

Şekil 2.7.de de görüldüğü üzere 450°C sıcaklıkta dönüşen beynitik yapının ortalama sertliği 300-400 HB. arasındadır.

İnceleme; ısıl işlem uygulamaları (sertleştirme, tavlama, temperleme ve östemperleme-beynitleme), kırma deneyleri, metalografik iç yapı incelemeleri ve bunların yorumlanmasını içermektedir. Uygulanan ısıl işleme göre sertlik değerleri ölçülmüş ve kırılma parametrelerine uygunluğu yorumlanmıştır. Optik fotoğraflar Nikon MA 100 Metal Mikroskopunda incelenmiş, sertlikler de brinell cinsinden ölçülmüştür (Resim 2.20-2.21.).



**Resim 2.20:** Optik Mikroskop 1



**Resim 2.21:** Optik Mikroskop 2



**Resim 2.22:** Isıl İşlem Fırını



**Resim 2.23:** Fırının Sıcaklık Kontrol Ünitesi

C70S6 çeliğine uygulanan ısıl işlemlerde kullanılan fırın ve kontrol ünitesi Resim 2.22-2.23'te görülmektedir. C70S6 çeliğinin kimyasal yapısı da Tablo 2.3'te görülmektedir.

**Tablo 2.3:** C70S6 Kimyasal Yapısı

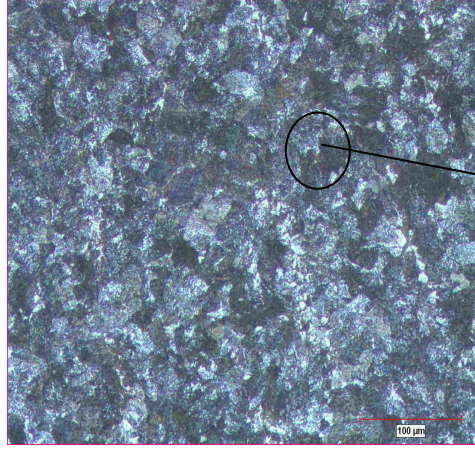
% Miktar	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ni	Fe
C70S6	0.692	0.182	0.507	0.02	0.064	0.114	0.042	0,060	Kalan

### 2.3.2 Tavlama, Kırılma Deneyi ve Optik İncelemeler

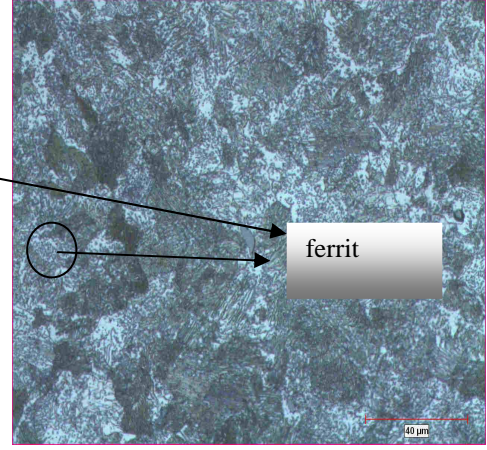
C70S6 biyel kolu 800°C'ye ısıtılmış, 45 dakika bekletildikten sonra sakin havada su verilmiştir.



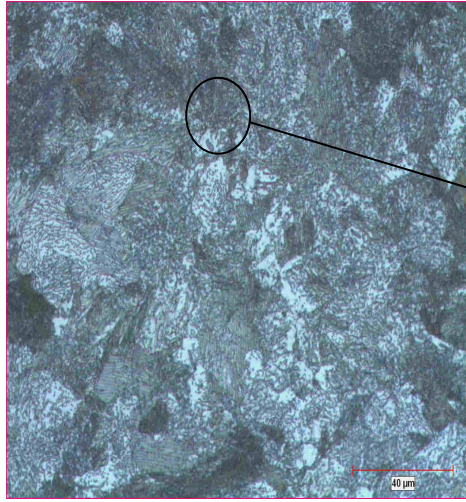
**Resim 2.24:** Östenitleme Sıcaklığına Çıkartılıp Havada Su Verilen C70S6



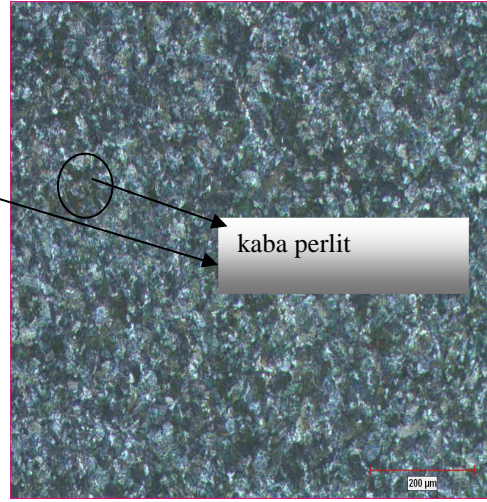
**Resim 2.25:** Perlitik Ferritik İç Yapı (X 200)



**Resim 2.26:** Perlitik Ferritik İç Yapı (X 500)



**Resim 2.27:** Perlitik Ferritik İç Yapı (X 500)



**Resim 2.28:** Perlitik Ferritik İç Yapı (X 100)

İç yapı çoğunlukla küresel kaba perlittir ve kalıntı ferrit taneleri de görülmektedir (Resim 2.25-2.28). Yapı çok yumuşak (190 HB.) olduğu için kırma deneyi için yeterli sertlik ve gevreklikte değildir. Kırma deneyi yapılmaya çalışılmış ancak yapı kendini deformasyona ve ezilmeye bıraktığı için tek darbeli kırma deneyi başarısız olmuştur.

### 2.3.3 Sertleştirme, Su Verme, Kırma Deneyi ve Optik İncelemeler-1

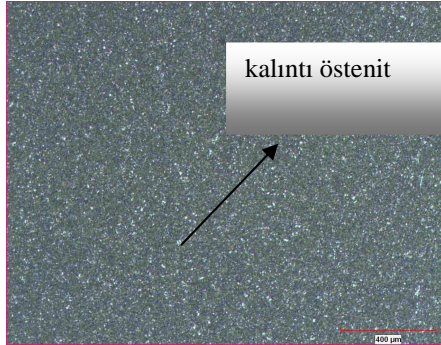
C70S6 biyel kolu çeliği 800°C'de 45 dakika süre ile östenitlemeye tabii tutulmuş, ardından suda su verilmiştir.





**Resim 2.29:** Östenitlenip Suda Su Verilen C70S6 Çeliği

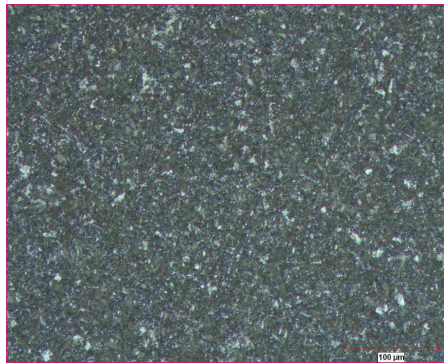
Resim 2.30-2.33 den de görüldüğü üzere yapıda martenzitik iç yapı özellikleri görülmektedir. Ayrıca dönüşmemiş östenit taneleri de iç yapıda görülmektedir. Sertlik 352 HB. olarak ölçülmüştür. Temperleme yapılmadığı halde iç yapının temperlenmiş martenzite benzemesi şaşırtıcı olup, ayrı bir inceleme konusu olabileceği değerlendirilmektedir.



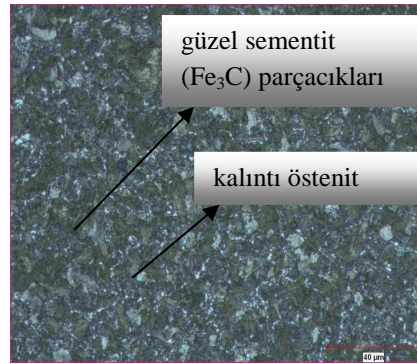
**Resim 2.30:** Martenzitik İç Yapı (X 50)



**Resim 2.31:** Martenzitik İç Yapı X 100



**Resim 2.32:** Martenzitik İç Yapı (X 200)



**Resim 2.33:** Martenzitik İç Yapı (X 500)



**Resim 2.34:** Suda Su Verilen C70S6 Çeliğinin Gevrek Kırılması

Kırılma testinden sonra gevrek bir kırılma elde edilmiştir. Yapı 352 HB: sertliğinde olup, bilinen kırılabilir perlitik C70S6 çeliğin sertliğinden (280 HB.) daha sert ve kırılğan bir yapıdadır.

#### 2.3.4 Sertleştirme, Su Verme, Kıрма Deneyi ve Optik İncelemeler-2

C70S6 biyel kolu çeliği 800°C'de 45 dakika süre ile östenitlemeye tabii tutulmuş, ardından % 10 NaCl'li suda su verilmiştir.

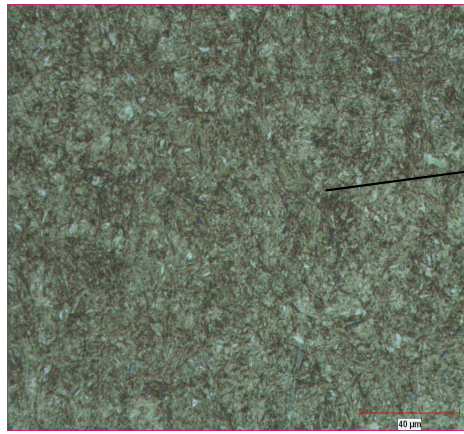


**Resim 2.35:** % 10 luk NaCl'li Suda Su Verilen C70S6 Çeliğinin Gevrek Kırılması

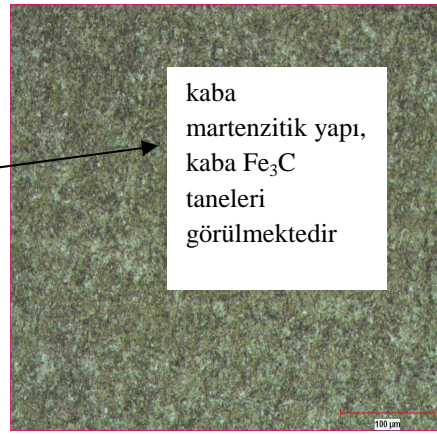




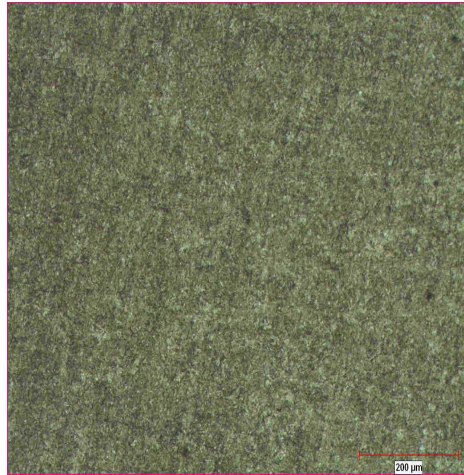
**Resim 2.36:** % 10 NaCl'li Suda Su Verilen C70S6 Çeliği - Kırma Testi Sonrası



**Resim 2.37:** Martenzitik İç Yapı (X 500)



**Resim 2.38:** Martenzitik İç Yapı (X 200)



**Resim 2.39:** Martenzitik İç Yapı (X 100)



**Resim 2.40:** Martenzitik İç Yapı (X 50)

Martenzitik bir iç yapı Resim 2.37-2.40. da görülmektedir. Sertlik 612 HB. olarak ölçülmüş olup, yapı kırma testleri sonucunda da görüldüğü üzere çok sert ve gevrek, aynı zamanda kırılığandır.

### 2.3.5 Sertleştirme, Temperleme, Kırma Deneyi ve Optik İncelemeler

C70S6 biyel kolu çeliği 800°C'de 45 dakika süre ile östenitlemeye tabii tutulmuş, ardından suda su verilmiş ve 450°C'de 30 dakika süre ile temperlemeye tabii tutulduktan sonra sakın havada soğumaya bırakılmıştır.



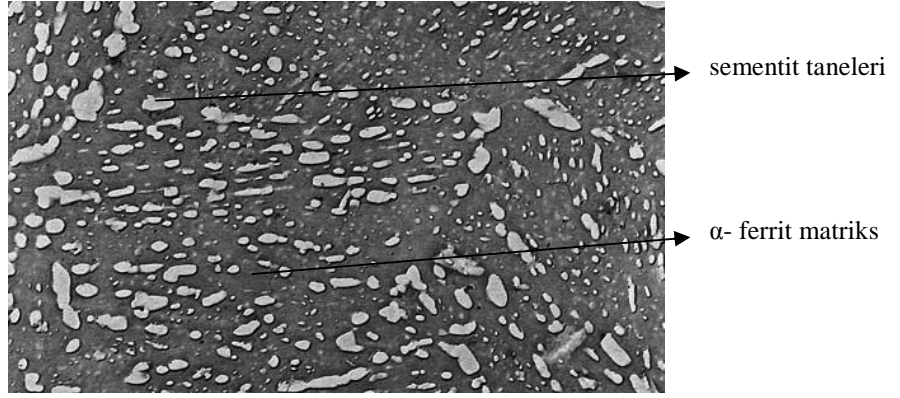
**Resim 2.41:** Temperleme Yapılan C70S6 Çeliği



**Resim 2.42:** Kırma Testinden Sonraki Temperlenmiş C70S6 Çeliği Kırılma Yüzeyi

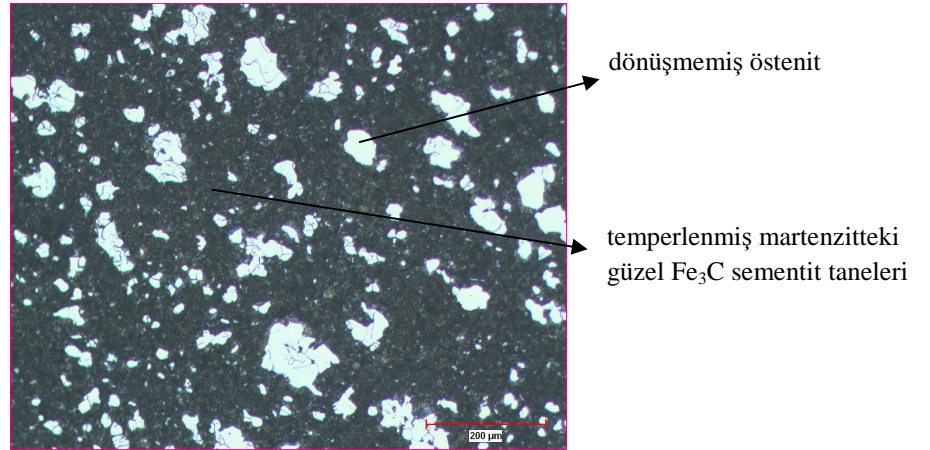
Temperlenmiş martenzitin kırma testi sonrası Resim 2.42.den de görüldüğü üzere çok düzgün bir gevrek kırılma yüzeyi görülmektedir.



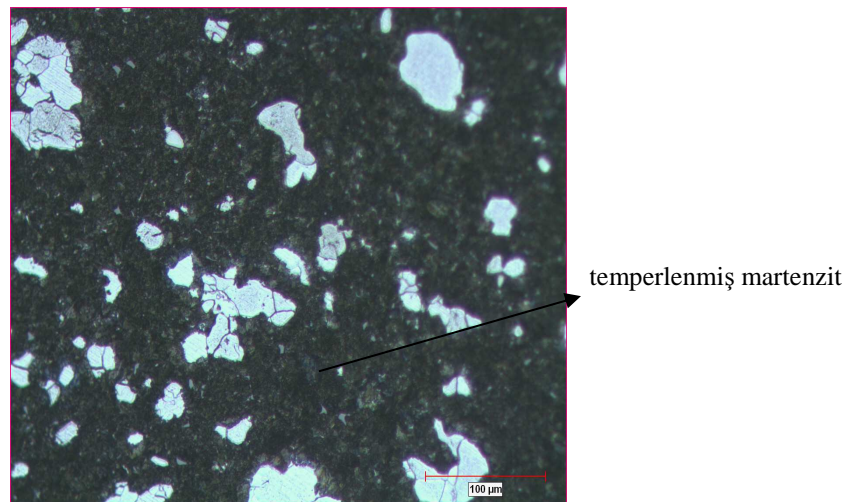


**Resim 2.43:** Elektron Mikroskobunda 594°C'de Temperlenmiş Martenzit [24]

Isıl işleme tabii tutulan (bkz. Resim 2.41.) temperlenmiş martenzitin optik resimleri (Resim 2.44.-2.46) Nikon MA 100 Metal Mikroskobu tarafından çekilmiştir.

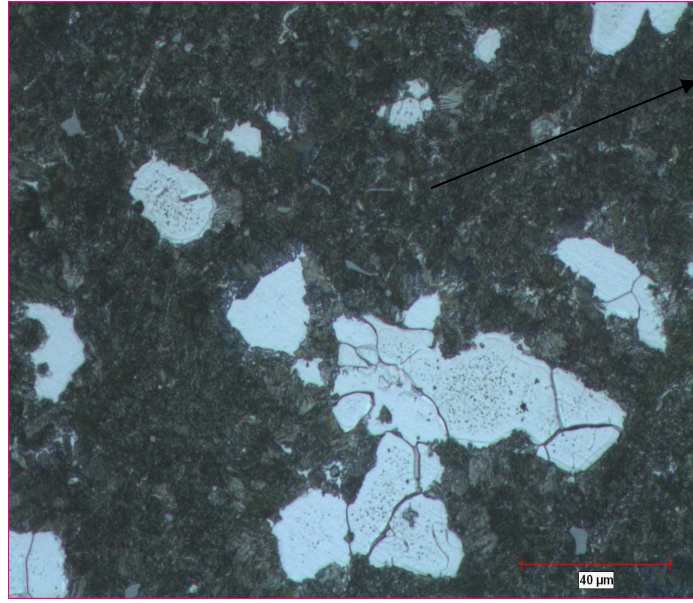


**Resim 2.44:** Temperlenmiş Martenzit (X 200)



**Resim 2.45:** Temperlenmiş Martenzit (X 100)





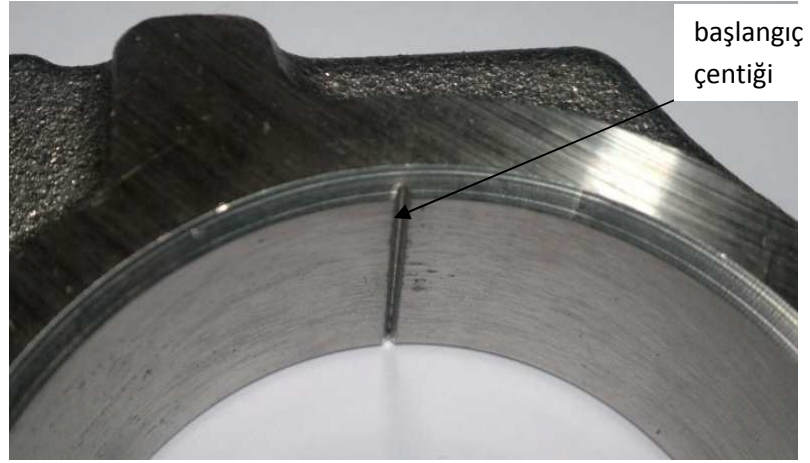
**Resim 2.46:** Temperlenmiş Martenzit (X 500)

İç yapı Resim 2.44-2.46 vasıtasıyla incelenmiş olup, iç yapıda güzel sementit taneleri ve dönüşmemiş östenit gözükmemektedir. Sertlik 306 HB. olarak ölçülmüş olup, yapıdaki temperlenmiş martenzit açık olarak gözükmemekte, yapılan kırma testi neticesinde başlangıç çentiğinden gevrek ve düzgün bir kırılma elde edilmiştir. Sertlik değeri kırılarak ayrılma parametreleri (280 - 310 HB.) sınırları içerisinde. Yapının bu hali ile kırılabilir C70S6 biyel kolu çeliği imalatı için çeliği için uygun bir yapı olabileceği değerlendirilmektedir.

**Yapıdaki güzel sementit Fe<sub>3</sub>C tanelerinin gevrek kırılmaya sebep olup, dönüşmemiş östenit tanelerinin ise aşırı kırılabilirliği azaltıp, toklukta bir miktar artışa neden oldukları değerlendirilmektedir.** Bu da değişik zorlanmalara maruz biyel kolu çeliği için istenilen bir mekanik durumdur denilebilir.

## **2.4 Temperlenmiş Martenzit ve Martenzit Yapı İçin Kırma Testleri**

Test aparatı 100 Tonluk hidrolik-ekzantrik pres ve kalıp malzemelerinden oluşmaktadır. Kırılma Resim 2.47. de görülen başlangıç çentiklerinden başlamakta ve düzgün bir kırılma görülmektedir. Kırma aparatına tam biyel kolunun büyük kısmının orta deliğine gelecek şekilde kama (Resim 2.48) yerleştirilmiştir. Biyel kolu iki taraftan sabitlenmiştir. Kırılma prosesi adım adım Resim 2.49-2.51.de görülmektedir.



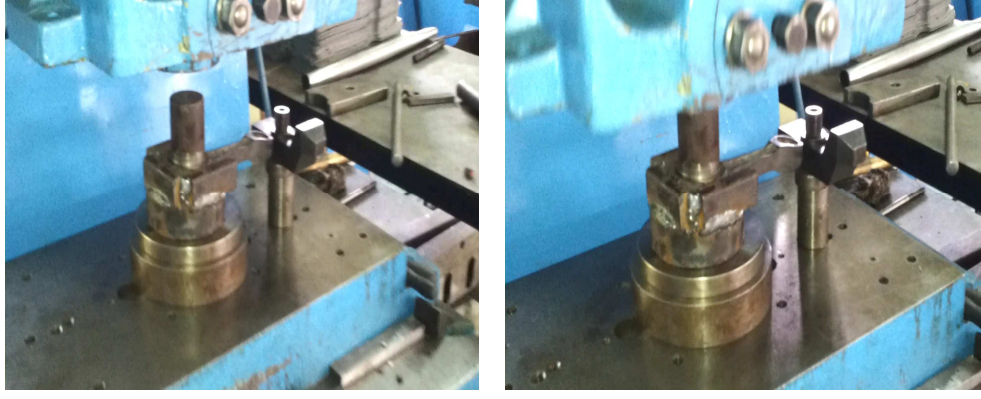
**Resim 2.47:** Kırılabilir C70S6 Çeliğinin Başlangıç Çentiği [6]



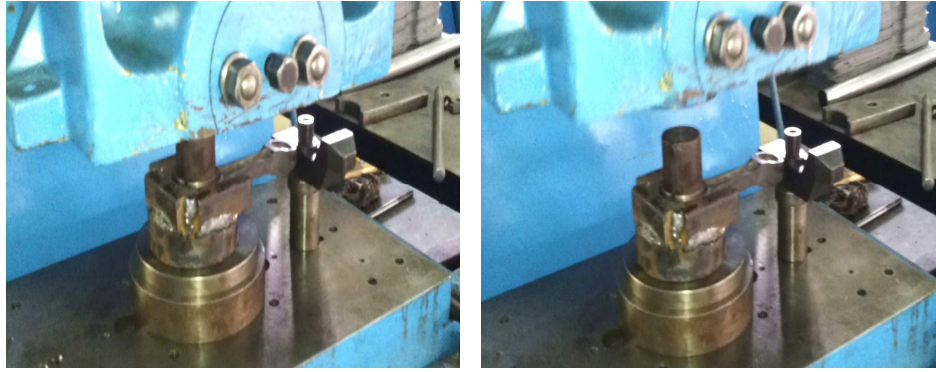
**Resim 2.48:** C70S6 Biyel Kolu ve Kırma Aparatı



**Resim 2.49:** Kırma Test Aparatı ve Sabitleme Mekanizması



**Resim 2.50:** Kırma Testi -1



**Resim 2.51:** Kırma Testi -2

Kırma deneyleri her üç ısıl işlem (martenzit-suda su verme, martenzit %10'luk NaCl'de su verme ve suda su verme-temperleme) için ayrı ayrı yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Östenitleme işlemine tabii tutulan, daha sonra da sakin havada soğutulan perlitik ve ferritik yapı yumuşak ve çok fazla sert olmadığı (190 HB.) için kırma deneyi tatbik edilmemiştir. Bu sertlik kırma parametreleri için uygun değildir.

2. Suda su verilen martenzitik yapı sert ve kırılındır. Sertlik değeri 352 HB. olarak ölçülmüştür. Gevrek bir kırılma elde edilmiştir, ancak bu kırılma çok düzgün bir kırılma değildir. Yapı aynı zamanda temperlenmiş martenzite benzer bir yapı olduğu için kırılarak ayrılabilen biyel kolu kullanımı için çok iyi değerlendirilip düşünülmesi gereklidir.

3. %10 NaCl luk su çözeltisinde su verilen martenzitik yapı çok fazla sert (612 HB.) ve kırılğan bir yapı olup, kırma testinde de çok kırılğan bir davranış göstermiştir. Sadece başlangıç çentiğinden kırılma olmamış, aynı zamanda deformasyon ve parçalanmalar da gözlemlenmiştir. Bu sebepten dolayı kırılarak



ayrılabilen biyel kolu imalatında bu hali kullanımının mümkün olmadığı değerlendirilmektedir.

4. Temperlenmiş martenzit kırma testinde başlangıç çentiklerinden çok düzgün bir kırılma meydan getirmiş olup (Resim 2.52.), tam bir gevrek kırılma gözlemlenmiştir. Sertlik 306 HB. olarak ölçülmüştür.



Resim 2.52: Kırma Testi Sonrası Temperlenmiş Martenzitik Yapıdaki C70S6

## 2.5 Östemperleme, Kırma Deneyleri, Optik ve SEM Analizleri



Resim 2.53: Atmosfer Kontrollü Isıl İşlem Fırını ve Tuz Banyosu



**Resim 2.54:** 800°C'de Östenitlenip 450°C'de Östemperlenen C70S6 -1



**Resim 2.55:** 800°C'de Östenitlenip 450°C'de Östemperlenen C70S6 -2

İki adet C70S6 kırılabilir biyel kolu çeliği ayrı ayrı atmosfer kontrollü ısıtım fırınlarında 800°C de 1 saat süre ile östenitleme işlemine tabii tutulduktan sonra hızlıca 450°C deki tuz banyosuna alınıp burada 3 saat süre ile tutulup, ardından sakin havada soğutulmaya bırakılarak östemperleme işlemi yapılmıştır.

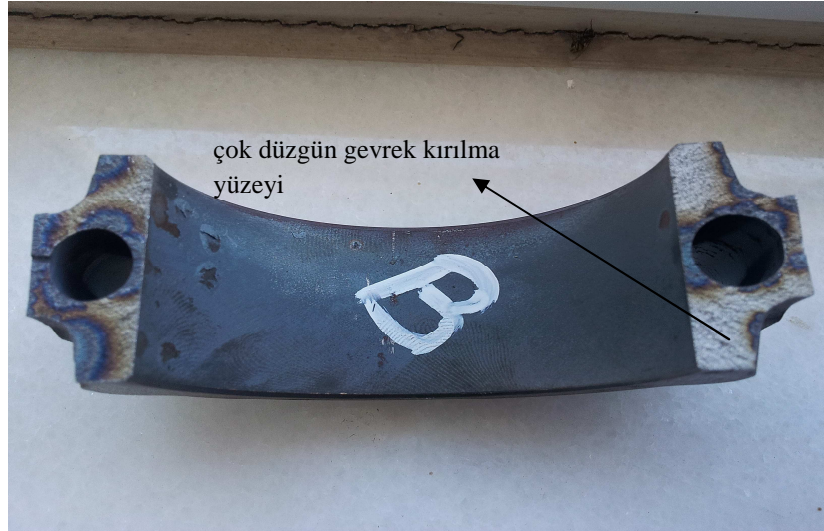
Kırma testleri (bkz. 2.4) temperlenmiş martenzitle beraber eş zamanlı olarak 100 tonluk hidrolik-eksantrik preste uygulanmış (bkz. Resim 2.47-2.52.) olup, sonuçta çentiklerden deformasyonsuz çok düzgün bir kırılma elde edilmiştir.



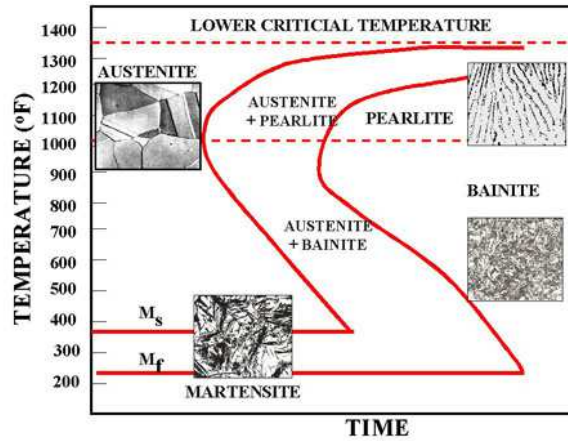


Resim 2.56: Östempirlemeden Sonra Kırma Testi Yapılan C70S6 - 1

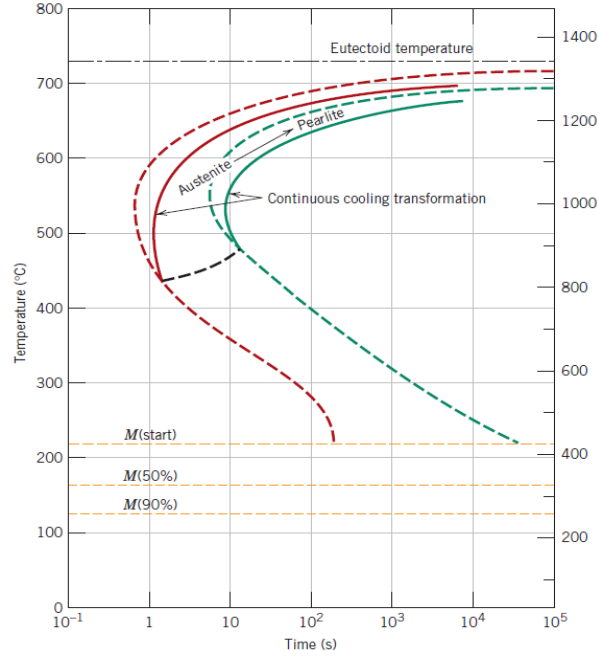
Mükemmel kırılma yüzeyleri görülmekte (Resim 2.56, 2.57) olup, SEM analizi için bir miktar parça alınmıştır.



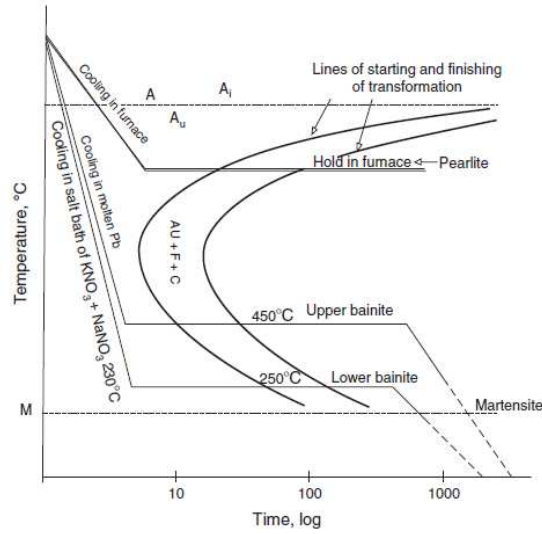
Resim 2.57: Östempirlemeden Sonra Kırma Testi Yapılan C70S6 - 2



Şekil 2.8: Demir-Karbon Alaşımları İçin T-T-T Diyagramı [9]



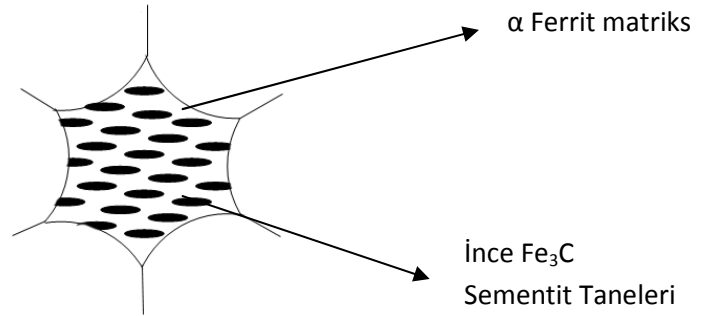
Şekil 2.9: Ötektoit Demir-Karbon Alaşımı İçin İzotermal Sürekli Soğuma Dönüşüm Diagramı [22]



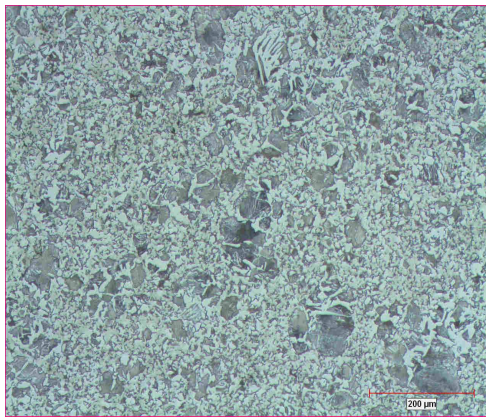
Şekil 2.10: Ötektoit Çelik İçin İzotermal Dönüşüm Diagramı [23]

Şekil 2.8-2.10 da görüldüğü üzere beynit oluşumu için gerekli ve yeterli şart izotermal dönüşümün sağlanmasıdır. Şekil 2.10 da A:kararlı östenit, Au:Alt östenit, F:ferrit ve C:karbürdür. **Deneylerde izotermal dönüşüm için 450°C sıcaklığın östemperleme sıcaklığı olarak seçilmesinin nedeni şudur: Bu sıcaklıktaki dönüşümde sementit ( $Fe_3C$ ) taneleri incedir (çok ince değil) bu da üst beynit**

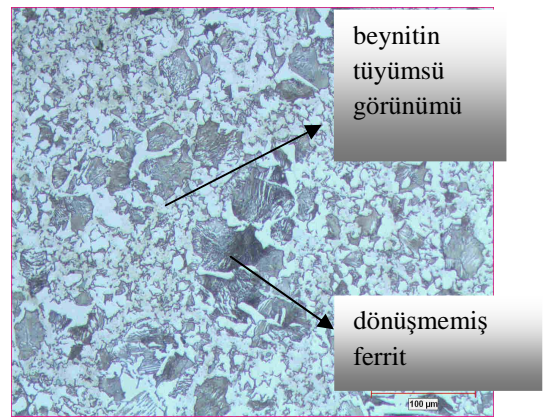
(Şekil 2.11) denilen yapıyı oluşturur ki; bu yapının kırılma parametreleri açısından uygun sertlikte, yeter gevreklik ve toklukta olduğu değerlendirilmektedir. Bu sebepten istenilen tek darbeli kırılmayı elde etmek ve kırılabilir biyel kolu imalatında kullanılmasının sağlanması için bu yapının elde edilmesi ısl işlemler sonucunda arzu edilmiştir. Arzu edilen yapının ne martenzit gibi çok sert ve kırılğan ne de perlit gibi mukavemetinin düşük olması istenmiştir. Alt beynit de bir diğer inceleme konusu olabileceği gibi, alt beynitin çok daha ince sementit taneleri içerdiği için daha kırılğan ve sert bir yapıya sahip olabileceği bu sebepten istenilen tek darbeli deformasyonsuz kırılmayı sağlayamayabileceği düşünülmektedir, ancak bu diğer bir araştırma konusu olabilir. Biz çalışmamızda üst beynit elde edip tek darbeli gevrek deformasyonsuz kırılmayı elde etmiş bulunuyoruz. Ölçülen sertlik değeri birinci beynitik numune için 278 HB., ikinci beynitik numune için ise ortalama 306 HB. dir. Bu da kırılma parametreleri açısından istenilen bir durumdur.



Şekil 2.11: Üst Beynit [9]



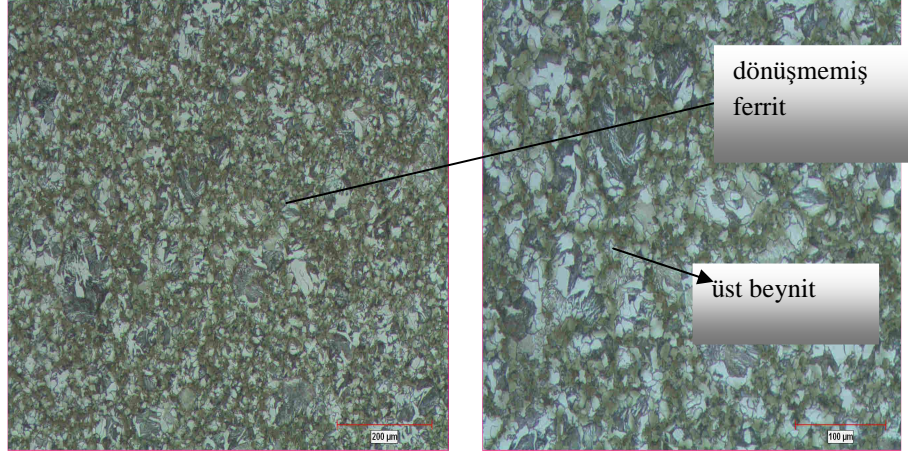
Resim 2.58: Beynitik İç Yapı-1 (X 100)



Resim 2.59: Beynitik İç Yapı-1 (X 200)



İç yapıda beynit ve dönüşmemiş ferrit görülmektedir. Optik analiz numune % 2 pikral ile dağlanıp yapılmıştır. Sertlik değeri 278 HB. olarak ölçülmüş olup, bu değeri perlitik C70S6 nın sertlik değeri (280 HB.) ile hemen hemen aynıdır.



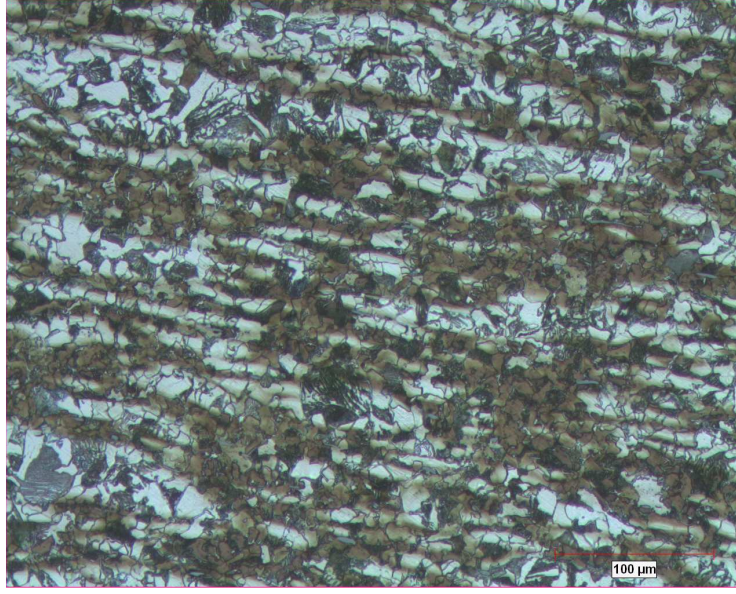
**Resim 2.60:** Beynitik İç Yapı-1 (X 100)

**Resim 2.61:** Beynitik İç Yapı-1 (X 200)

İç yapıda beynit ve dönüşmemiş ferrit görülmektedir. Optik analiz numune % 3 nital dağlanıp yapılmıştır. Sertlik değeri 278 HB. olarak ölçülmüş olup, bu değeri perlitik C70S6 nın sertlik değeri ile (280-310 HB.) ile hemen hemen aynıdır.



**Resim 2.62:** Beynitik İç Yapı -2 (X100)



**Resim 2.63:** Beynitik İç Yapı -2 (X200)



**Resim 2.64:** Beynitik İç Yapı -2 (X500)

İkinci beynitik numunenin sertlik değeri 306 HB. olarak ölçülmüştür.

### 2.5.1 Östemperlenmiş (Beynitlenmiş) Yapının SEM Resimleri

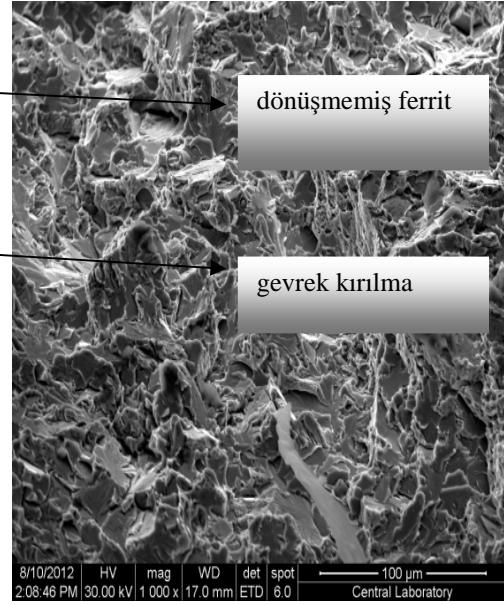
Kırma deneyine tabii tutulan östemperlenmiş C70S6 kırılabilir biyel kolları SEM LEO Gemini Elektron Mikroskobu FEI/QUANTA 400 FEG (25 kV) analizcisinde OIMTM yazılımı ile ODTÜ Merkez Laboratuvarları Araştırma ve



Geliştirme Merkezi-Ankara'da fotoğraflanmıştır. Beynitik iç yapı SEM fotoğraflarında (Resim 2.65-2.70) daha açık ve net görülmektedir.

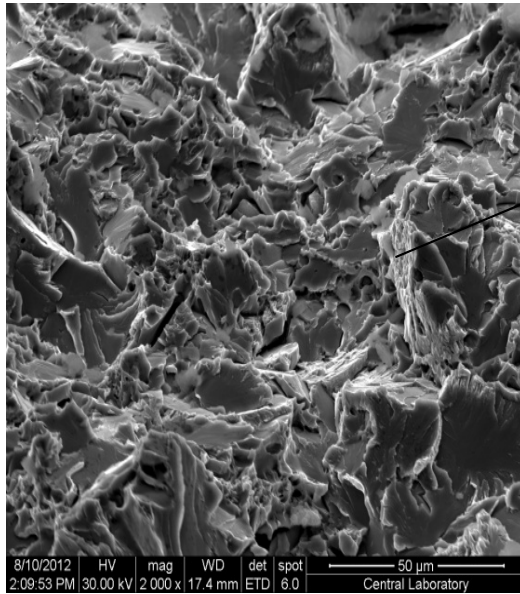


**Resim 2.65:** Beynitik Yapı SEM Fotoğrafi-1 (X500)

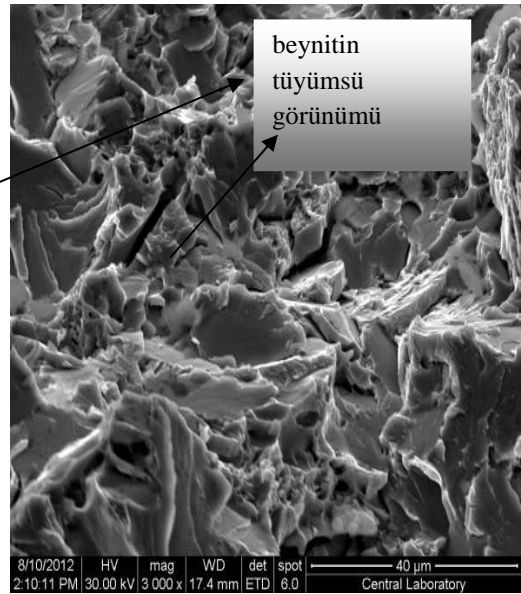


**Resim 2.66:** Beynitik Yapı SEM Fotoğrafi-2 (X1000)

Mikroyapıda beynit ve kalıntı ferrit görülmektedir. Kırılma yüzeylerinde tanesal klevaj kırılma belirtileri görülmektedir.

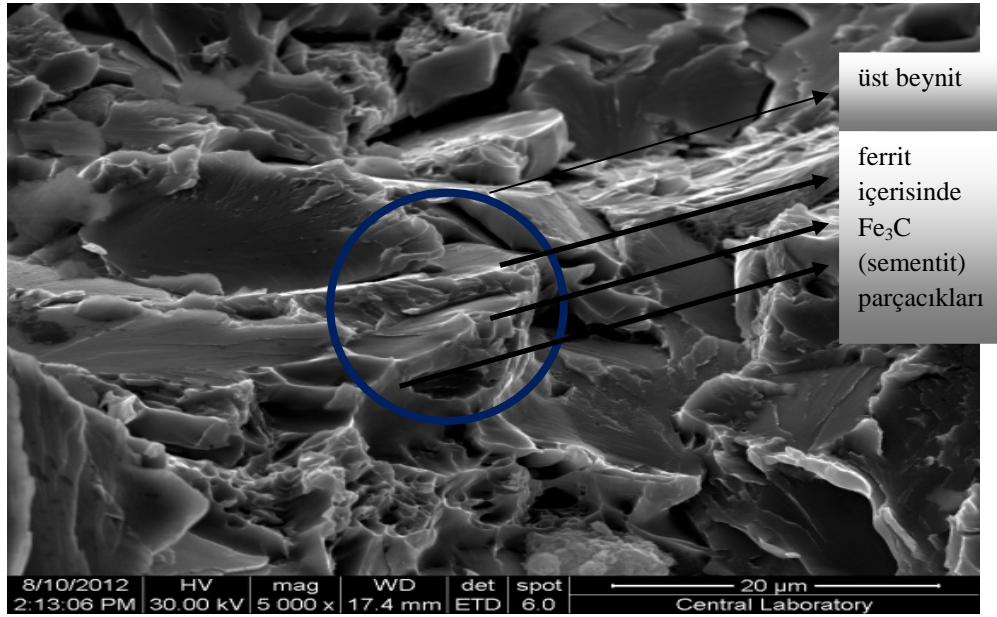


**Resim 2.67:** Beynitik Yapı SEM Fotoğrafi-3 (X2000)

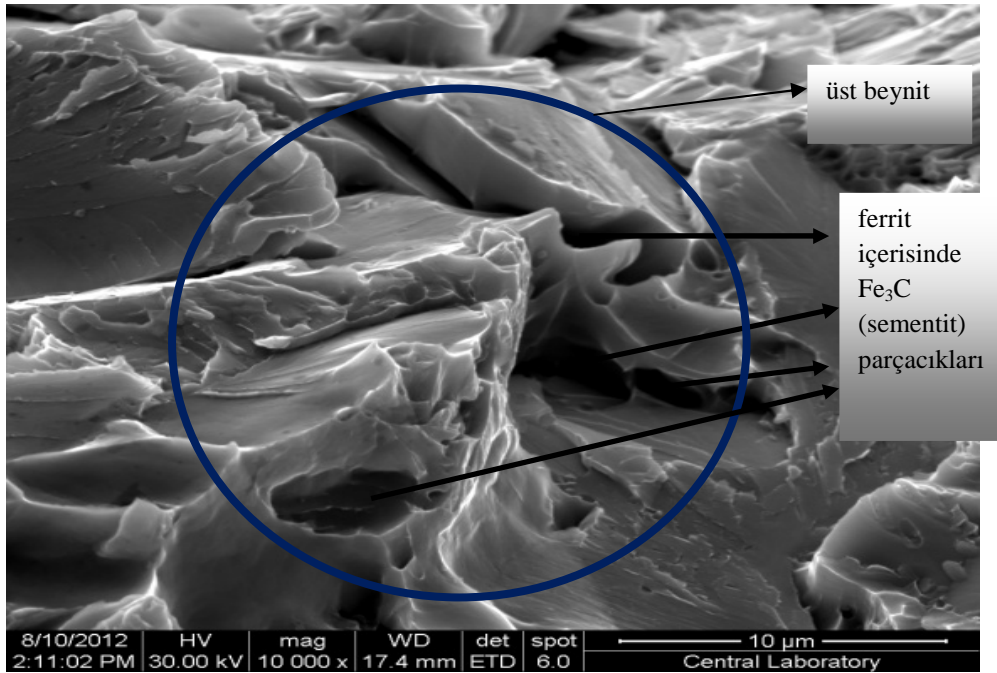


**Resim 2.68:** Beynitik Yapı SEM Fotoğrafi-4 (X3000)

İç yapı östenitten üst beynite dönüşmüştür. Beyniten tipik tüyümsü görünümü de açık bir şekilde gözükmektedir.



**Resim 2.69:** Beynitik Yapı SEM Fotoğrafi-5 (X5000)



**Resim 2.70:** Beynitik Yapı SEM Fotoğrafi-6 (X10000)

Yüzey tipik gevrek ve klevaj kırılma yüzeyidir. Tüyümsü beynitik görünüm ve Fe<sub>3</sub>C sementit parçacıkları gözükmektedir (bkz. Resim 2.65-2-70). Metalografi üst beynitik yapıdır. Üst Beynit (Upper bainite): Ferrit matris içinde dağılmış sementit

tanelerinden ibarettir, düşük dönüşüm sıcaklıklarında olduğundan tabakalı yapı oluşturulamaz, perlitte aynı kimyasal bileşime sahip fakat daha serttir.

## 2.6 Uygulanan Kırma Deneylerinin İç Yapılara Göre Karşılaştırılması

**Tablo 2.4:** Isıl İşlem Uygulanıp Kırma Deneyi Yapılan C70S6 Biyel Kollarının Kullanım Açısından Karşılaştırılması -1

MALZEME	UYGULANAN ISIL İŞLEM	SERTLİK (HB.)	UYGUN/ DEĞİL(+/-)	AÇIKLAMA
PERLİT %90, %10 FERRİT	-	278 HB	+	Bilinen konvensiyonel ve teknolojik olarak halen kullanılan yapı. Kırılabilir biyel kolu imalatı için uygun bir yapı .
KABA PERLİT, FERRİT	Tavlama, sakin havada su verme	190 HB.	-	Çok yumuşak bir yapı, kırma deneyi tatbik edilemedi. Kırılabilir biyel kolu imalatı için uygun bir yapı değil.
MARTENZİT SUDA SU VERİLMİŞ	780° C'de Östenitlenip, 18°C'lik suda su verme	352 HB.	-	Yapı çok sert ve kırılğan, kalıntı gerilmeler mevcut. Kırılabilir biyel kolu imalatı için uygun bir yapı olabilir. Detaylı şekilde ayrı bir tez konusu olarak araştırılabilir.
MARTENZİT % 10 LUK ÇÖZELTİDE SU VERİLMİŞ	780° C'de Östenitlenip, 18°C'lik % 10'luk NaCl'lik çözeltide su verme	612 HB.	-	Yapı aşırı sert ve kırılğan ve seramik gevrekliğinde. Uygun bir yapı değil. Kırılabilir biyel kolu için uygun bir yapı değil.

**Tablo 2.5:** Isıl İşlem Uygulanıp Kırma Deneyi Yapılan C70S6 Biyel Kollarının Kullanım Açısından Karşılaştırılması -2

MALZEME	UYGULANAN ISIL İŞLEM	SERTLİK (HB.)	UYGUN / DEĞİL (+/-)	AÇIKLAMA
TEMPERLENMİŞ MARTENZİT	780° C'de Östenitlenip, 18°C'lik suda su verme, daha sonra 450°C'de 30 dakika temperlenip, sakın havada soğutulma.	306 HB.	+	Sertlik değeri uygun, temperleme sonucu kalıntı iç gerilmeler alınmış, ferrit matriks içerisinde güzel Fe <sub>3</sub> C (sementit) taneleri gözükmektedir. Darbeli kırma deneyi sonucunda gevrek ve deformasyonsuz kırılma elde edilmiş olup, kırılabilir biyel kolu imalatında kullanılabileceği değerlendirilmektedir.
BEYNİT 1	800° C'de Östenitlenip, 18°C'lik suda su verme, daha sonra 450°C'de 3 saat östenitlenip, sakın havada soğutulma	278 HB.	+	Sertlik değeri uygun, östemperleme sonucu ferrit matriks içerisinde ince Fe <sub>3</sub> C (sementit) taneleri gözükmektedir. Darbeli kırma deneyi sonucunda gevrek ve deformasyonsuz kırılma elde edilmiş olup, kırılabilir biyel kolu imalatında kullanılabileceği değerlendirilmektedir.
BEYNİT 2	Farklı bir atmosfer kontrollü ısıl işlem fırınında 780°C'de östenitlenip, 18°C'lik suda su verme, daha sonra 450°C'de 3 saat östemperlenip, sakın havada soğutulma.	306 HB.	+	Sertlik değeri uygun, temperleme sonucu kalıntı iç gerilmeler alınmış, ferrit matriks içerisinde güzel Fe <sub>3</sub> C (sementit) taneleri gözükmektedir. Darbeli kırma deneyi sonucunda gevrek ve deformasyonsuz kırılma elde edilmiş olup, kırılabilir biyel kolu imalatında kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

**Tablo 2.4. ve 2.5'den görüleceği üzere kırılabilir biyel kolu imalatı için en uygun yapının beynitik (üst beynit) yapı olduğu, alternatif olarak da temperlenmiş martenzitik yapının kullanılabilceği değerdendirilmektedir.**

**Tablo 2.6:** C70S6 Çeliğinin Isıl İşlem Öncesi ve Sonrası Mekanik Özellikleri [25, 26]

Deney Parçası Türü	σ akma [MPa] Ortalama	σ çekme [MPa] Ortalama	Sertlik [HRB]	% ε Uzama Ortalama
C70S6 (Isıl İşlemden Önce)	560	850	280	10
C70S6 (Yumuşak Perlit - Ferrit) Östenitlenip Havada Su Verilmiş	380	608	190	15
C70S6 (Beynit) 450°C de östemperlenmiş	590	944	278	10
C70S6 (Temperlenmiş Martenzit) Suda su verilmiş	612	980	306	9
C70S6 (Martenzit) Suda su verilmiş	892	1190	352	6
C70S6 (Martenzit) %10 NaCl çözeltilisinde su verilmiş	1624	2030	612	5

## 2.7 Deney Sonuçlarının Kırılma Tokluğu Açısından İncelenmesi

Yapmış olduğum kırma deneylerini kırılma tokluğu açısından incelersek; aşağıdaki formülasyonu yazarak malzemenin kırılma tokluğunu bulabiliriz [27].

$$K_{Ic} = \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2}$$

Burada;

$K_{Ic}$  : Malzemenin Kırılma Tokluğu (Pa.m<sup>-3/2</sup>)

$\sigma$  : Uygulanan Gerilme (N/m<sup>2</sup>)



a : Çatlak Uzunluğunun yarısı (m)

Elimizdeki verilerden;

a: 4 mm. (bkz. Şekil 2.3)

Deneyle Uygulanan Kuvvet F= 100 Ton=1000 kN (bkz. 2.4)

Uygulanan Basıncı:  $P=F/A$

A: Biyelin Kuvvet Uygulanan Büyük Kısmının Yüzey Alanı (bkz. Şekil 2.3)

$$A= H.L=28 .( \pi.d) = 28. \pi. 58 = 5099,36 \text{ mm}^2 = 0,0051 \text{ m}^2$$

$$P = F/A = 1000 \text{ kN} / 0,0051 \text{ m}^2 = 196078 \text{ kN/m}^2 = 196 \text{ MPa}$$

Bulunan değerleri  $K_{Ic} = \sigma. (\pi.a)^{1/2}$  bağıntısında yerine koyarsak;

$$K_{Ic} = 196.(3,14.0,004)^{1/2} = \mathbf{21,96 \text{ MPa.m}^{-3/2}}$$
 elde edilir.

Bu değer akma mukavemeti 580 MPa ve çekme mukavemeti 860 MPa olan bir yüksek karbonlu ve düşük alaşımlı çelik ( C70S6 ) için uygun bir değer olup, gevrek kırılmanın kolaylıkla gerçekleştiği kırma deneyi parametrelerini de uygunluk sağlamaktadır.

### 3. SONUÇ VE ÖNERİLER

C70S6 biyel kolu çeliklerine **ısıl işlem yapılmadan** uygulanan kırma deneylerinden şu sonuçlar çıkarılmıştır;

1. Tek darbeli kırılma deformasyonsuz elde edilmiştir
2. Biyelin iki parçasının mükemmel bir şekilde birbirine oturması sağlanmıştır
3. Malzeme özelliklerinden dolayı kırılma, klevaj yüzeyde arzu edilen şekilde gevrek olarak gerçekleşmiştir.

4. Optimum sınırlar içerisinde kesme hızı ve basınç-kuvvet değerleri elde edilmiştir.

5. Kuvvet uniform dağıldığı için gevrek bir kırılma ve kırılma sonrası yüzeylerin birbirine mükemmel oturması (biyelin iki parçasının) sağlanmıştır. Kuvvet ne kadar homojen dağılırsa tam bir klevaj kırılma o kadar ideale yakın gerçekleşir ve yüzeyler birbirine tam oturur; bu bir sonuçtur, çünkü SN (başlangıç çentiğinden) başlayan kırılma başlangıcı C70S6 çeliğinin bileşiminden dolayı gevrek ve deformasyonsuz bir kırılma elde edilmektedir. Bu optik ve SEM analizlerinde de açık bir şekilde görülmektedir. Bu sonuç iç yapının ağırlıklı olarak perlitik yapıda olması ve S (kükürt) oranının konvensiyonel yüksek karbonlu düşük alaşımli çeliklere göre daha fazla olmasından ileri gelmektedir.

6. **Yaptığımız kırma deneylerinin en önemli özgün yönlerinden birisi de şudur ki; bugüne kadar literatürde kırılmadan sonra iç yapı incelemesine (gerek optik gerekse SEM analizi) rastlanmamıştır.**

7. Isıl işlem yapılmamış C70S6 kırılabilir biyel kolu çeliğinin iç yapısı % 90 perlit ve %10 ferrit içermektedir. **Ayrıca iç yapıdaki ε-karbitler (Fe<sub>2</sub>C) ler yapının daha gevrek bir şekilde tek darbeli yük ile kırılmasına neden olmaktadır.** Ancak darbeli kırılmadaki en büyük etki yapının büyük oranda perlitik olmasından ileri gelmektedir. ε-karbitler yapının daha kompakt ve tok olmasına neden olmaktadır.

8. Kırma deneylerinde taneseli ve klevaj bir kırılma elde edilmiştir. SEM fotoğraflarında da kırılma yüzeyinin dendritik ve klevaj olduğu gözlemlenmektedir.

9. İç yapının çoğunlukla perlit olması daha az sünek ve gevrek bir yapı demektir. Kırılabilir biyel kolları için bu arzu edilen bir durumdur.

10. Optik ve SEM resimlerinden görüldüğü üzere yüksek karbonlu-düşük alaşımlı C70S6 kırılabilir biyel kolu çeliğinde iç yapının homojen ve sürekli olması da çok değişik yüklere maruz biyel kolları için arzu edilen bir durumdur.

11. İç yapıda konvensiyonel yüksek karbonlu-düşük alaşımlı çeliklerde Mn oranı daha yüksektir. Kırılabilir C70S6 biyel kolu çeliğinde ise gevrek darbeli kırılmayı sağlamak için oran düşük tutulmuştur. Ayrıca N oranını düşük tutup, Si ve V oranlarını artırarak da düşük süneklik ve yüksek gevreklik elde ederiz.

**12. İç yapı ne çok sert olan martenzit ne de çok yumuşak olan ferritdir. Perlitik yapı hem tokluk hem de gevrek kırılma olarak uygun bir bileşendir.** Sertlik değeri (280-300 HB.) ve çekme mukavemet değeri de ( $\sigma_{max.}=850-1000$  MPa) aralığındadır.

13. Kırılabilir biyel kolu çelikleri hem tek darbeli yükte kırılabilme yeteğine sahip olmalı, hem de işleme yeteneği yüksek olmalıdır. Sertlik ve mukavemet yükseldikçe işlenebilirlik azalır. Ancak C70S6 çeliği yapısındaki yüksek karbon oranı nedeniyle serttir. Bu zıt durmadan kurtulmak için S (kükürt) oranı (%0,06 > 0,04) normal yüksek karbon-düşük alaşımlı çeliklerden bir miktar fazla tutulmuştur. Bu sayede hem işlenebilirlik iyileşir hem de tek darbeli yük ile kırma yeteneği artar.

14. Kırılma yüzeyinin yapısı kırılmanın aniden ve birden olduğunu göstermektedir.

15. Yapıdaki MnS ve diğer karbitler ile karbonitrürlerin klevaj kırılmaya katkıda bulunan diğer unsurlar olduğu değerlendirilmektedir.

16. İyi taneli perlit için optimum karbon oranı % 0,7 – 0,8 arasında olup, bu kırılma parametreleri açısından istenilen bir durumdur.

C70S6 biyel kolu çeliklerine **ısıtma işlemi yapıldıktan sonra** uygulanan kırma deneylerinden şu sonuçlar çıkarılmıştır;

1. Temperlenmiş martenzit ve beynitik yapılı C70S6 biyel kolu çeliğinin darbeli kırma testinde başlangıç çentiklerinden ani, deformasyonsuz gevrek kırılma elde edilmiştir.

**2. Bunların içerisinde en önemlisi beynitik yapı olup, kusursuz düzgün bir kırılma elde edilmiştir.**

3. %10'luk NaCl'lik sulu çözeltilerde su verilen martenzitik yapı çok sert (612 HB.) ve kırılma parametreleri ile birlikte kırılma sadece başlangıç çentiklerinden değil aynı zamanda biyelin diğer bölümlerinden de başladığı için kırılma parametreleri ve kullanılabilirlik açısından bir değeri yoktur. Çünkü yapı seramik kırılma parametresindedir.

4. Suda su verilen martenzitik yapı da sert ve kırılmandır (352 HB.). Kırılma parametreleri için gerekli olan sertlik değerleri arasında (280-310 HB.) bulunmadığı için kullanılabilirlik açısından tekrar değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

5. Tavlamaya tabii tutulan ve sakin havada su verilen perlitik-ferritik yapı çok yumuşak (190 HB.) olduğu için kırma testine tabii tutulmamış olup, teknolojik olarak da biyeler için kullanılabilirliği mevcut değildir.

**6. Beynitik yapının C70S6 kırılabilir biyel kolları için uygun yapıda olduğu ve kullanılabilirliğinin mevcut olduğu gözlemlenmiştir. Şöyle ki; sertlik değerleri 278 ve 306 HB. olarak ölçülen, iç yapısı üst beynit olan ve çok düzgün bir şekilde kırma testinde başlangıç çentiklerinden kırılan bu yapının teknolojik olarak kullanılabilirliği değerlendirilmektedir. Kırma testlerinde ve metalografik incelemelerde bilinen konvansiyonel perlitik C70S6 çeliğinin kırılma parametrelerine yakın değerler gözlemlenmiştir. Beynitik yapının bilinen perlitik yapıya önemli bir alternatif oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Değişik ısı işleme koşullarında alt beynitik yapı oluşturularak uygulanacak kırma deneylerinde farklı sonuçlar gözlemlenebileceği değerlendirilmektedir. Tezin esas özgül yanını bu husus oluşturmaktadır.**

**7. Temperlenmiş martenzitin kırma testinden de olumlu sonuçlar alınmış olup, çok düzgün tek darbeli kırılma elde edilmiştir. Sertlik değeri de uygun (306 HB.) olup, bu yapının teknolojik olarak kullanılabilirliği değerlendirilmektedir.**

8. Beynitik yapı önemli bir metalografik yapıdır. Şöyle ki temperlenmiş martenzite göre daha yüksek tokluktur. Perlitik yapının tokluğu ile martenzit yapının sertliğinin bir bileşimi olarak düşünülebilir. temperlenmiş martenzit kadar serttir, aynı zamanda daha toktur. **Darbeleri absorbe etme yeteneğine sahiptir. Isıl işleme sonucu iç yapıda bulunan kalıntı ferritler bir miktar sertliği düşürmekte olup, kırılma parametresi azaltırken tokluğu artırmaktadır. Elde edilen bu sonuçta teze ayrı bir özgül katmaktadır. Bu da kırılma parametreleri açısından avantajlı bir durum olup, darbeli düzgün kırılma elde edilmiştir.**

**9. Beynitik yapı için temperlemeye ihtiyaç duyulmaz, bu da maliyet açısından önemli bir faktördür.**

10. Uygulamış olduğumuz ısıtım işlem uygulamalarında sonuç olarak iç yapının metalografisinin değiştiğini, bunun da sertlikte değişmelere neden olduğu gözlemlendi. Bu ise kırma testlerinde farklı sonuçlar elde edilmesine neden oldu. **Özellikle beynitik yapının ve temperlenmiş martenzitin konvansiyonel perlitik yapıya önemli bir alternatif olabileceği sonucuna varıldı. Beynitik yapıda ve temperlenmiş martenzitik yapıda mevcut olan kalıntı ferritin de aşırı kırılabilirliği önlediği, tokluğu artırdığı gözlemlenmiştir. Bu kırılma parametrelerinin optimizasyonu açısından artı bir durumdur. Eğer yapı tamamen temperlenmiş martenzit olsa ya da tamamen beynitik yapı olsa idi sertlik değerleri çok daha yüksek (<310 HB.) olacağından düzgün deformasyonsuz tek darbeli kırılma elde edilemeyeceği değerlendirilmektedir.**

Konu özgünlük açısından ısıtım işlemin kırılma parametrelerine etkisi açısından incelenmiş olup, bilinen yöntemle yeni bir uygulama alanı getirilmiş ve ısıtım işlem uygulanarak da yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Özellikle beynitik yapının gerek tokluk gerekse sertlik ve mukavemet değerleri açısından kırılabilir biyel kolu imalatında kullanılabileceği, özellikle kırma testlerindeki elde edilen çok düzgün kırılma ve iç yapı incelemelerinde görülen çok düzgün yapının da bunun bir kanıtı olduğu görülmekte ve değerlendirilmektedir.

İleride yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından yapılan ısıtım işlemleri iç yapıların yorulma deneylerinin yapılarak ayrı bir tez konusu olabileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Afzal, A., Fatigue behavior and life predictions of forged steel and powder metal connecting rods. MSc Thesis, *University of Toledo*, Toledo, (2004).
- [2] Roman, C., Boris, A. ve Dimitrij, K., "A metallographic examination of a fractured connecting rod". *Institute of Metals and Technology*, 42, 93-95, (2007).
- [3] James, R. D., "Connecting rod evaluation". *Metal Powder Industries Federation*, Princeton, 1, 1-6, (2005).
- [4] Shenoy, P, S. ve Fatemi, A., "Dynamic analysis of loads and stresses in connecting rods". *Journal of Mechanical Engineering Science, University of Toledo*, 220, 615-623, (2006).
- [5] Z, Gu., Yang, S., Ku, S., Zhao, Y., ve Dai, X., "Fracture splitting technology of automobile engine connecting rod". *Journal of Advanced manufacturing Technology*, 25, 883-887, (2005).
- [6] Aksoy, Z., Özdemir, Z. ve Özdemir, T., "Kırılarak iki parçaya ayrılabilen biyel kollarının ayrılma parametreleri üzerine bir inceleme". *Fen Bilimleri Dergisi, Sakarya Üniversitesi*, 16 (2), 113-122, (2012).
- [7] Momose, Y., Ota, S., ve Yamamoto, T., "Method of and apparatus for cracking connecting rod". *United States Patent Application Publication*, 225,1-13, (2005).
- [8] Orrin, P, B., "Connecting Rod Cracking Apparatus". *United States Patent Beggs*, 217,1-12, (2004).

- [9] Liming, Z., Shuqing, K., Shenhua, Y., Lili, Li. ve Fei. Li., "A study of process parameters during pulsed Nd:YAG laser notching of C70S6 fracture splitting connecting rods". *Optics and Laser Technology*, 42, 985-993, (2009)
- [10] Iwazaki, S., Isobe, T. ve Kubato, T., "Split connecting rod and engine". *United States Patent*, 159, 1-31, (2007).
- [11] Guirgos, S., "Process to fracture connecting rods and the like with resonance fatigue". *United States Patent Application Publication*, 225,1-13, (2004).
- [12] Deen, Z., Harris, S.J., McCartney, D.G., Pashby, I.R., Towell, J., Shipway P.H., et al., "The effect of laser transformation notching on the controlled fracture of a high carbon (C70S6) steel". *Material Science and Engineering*, 489, 273-284, (2008).
- [13] Hye, K., Tae, K., Tai-Joo, C., Hyun, Kim. ve Soon-Jik, H., "Fatigue Characteristics of High Strength C70S6 and SMA40 Steels". *Materials Science and Engineering*, 527, 2813–2818, (2010).
- [14] Tsuyoshi, K., Shinya I., Tsuneo, I. ve Toshikatsu. K., "Development of fracture splitting method for case hardened connecting rods". *Yamaha Motor Technical Review*, 4, 1-10, (2007).
- [15] Pravardhan, S. ve Fatemi, A., "Connecting rod optimization for weight and cost reduction". *SAE International, University of Toledo*, 987, 1-8, (2005).
- [16] Sumitomo Metal Industries, "Development of special forging steel for high-strength fracture splitting connecting rods". *Japonya*, (2007).
- [17] Kou, S.Q., Wang, J.W., ve Gao, Y., "Microstructure and fracture splitting properties of a fracture splitting notch produced in a connecting rod (C70S6) using pulsed laser grooving". *Lasers In Engineering*, 20, 381–395, (2010).



- [18] Manabu, K. ve Shinya, T., "Hot-forging micro-alloyed steel and hot-rolled steel excellent in fracture-splitability and machinability, and component made of hot-forged microalloyed steel". *United States Patent Application*, 12,1-9, (2010).
- [19] Aksoy, Z., Özdemir, Z. ve Özdemir, T., "A metallographic examination of fracture splitting C70S6 steel used in connecting rods". *Fen Bilimleri Dergisi, Marmara Üniversitesi*, 24(2), 45-58, (2012).
- [20] Fukuda, S. ve Eto, H., "Development of fracture splitting connecting rod". *JSAE, Rev 23(1):101–104*, (2002).
- [21] Yu, R., "The fracture splitting process of connecting rods". *Process Mater Autoob*, 9, 9-11, (1998).
- [22] Callister, W, D., JR., *Material Science and Engineering*. vol 2, The University of Utah, 335-350, (2006).
- [23] George, H. T., *Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies*, Second Edition, Portland State University, Portland, 148-150, (2006).
- [24] Callister, W, D., JR., *Material Science and Engineering*. vol 2, The University of Utah, The University of Iowa, 435-450, (2007).
- [25] Cahoon, J. R., Broughten, W. H., Kutzak, A. R., "The determination of yield strength from hardness measurements". *Material Transactions*, Volume 2, University of Manitoba, Manitoba, 1971-1975, (1970).
- [26] CALCE., *Material Hardness*, University of Maryland. 1-25, [http://www.calce.umd.edu/TSFA/Hardness\\_ad .htm#rf02](http://www.calce.umd.edu/TSFA/Hardness_ad.htm#rf02), (2001).
- [27] Broek, D., *Elementary engineering fracture mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 13, (1982).