

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR AĞIR TİCARİ ARAÇ MOTORU BİYEL KOLUNUN BÜYÜK UÇ KIRMA
PARAMETRELERİ OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melih BAYRAM

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR AĞIR TİCARİ ARAÇ MOTORU BİYEL KOLUNUN BÜYÜK UÇ KIRMA
PARAMETRELERİ OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Melih BAYRAM
(503111731)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Osman Akın KUTLAR

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503111731 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Melih BAYRAM**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BİR AĞIR TİCARİ ARAÇ MOTORU BİYEL KOLUNUN BÜYÜK UÇ KIRMA PARAMETRELERİ OPTİMİZASYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Osman Akın KUTLAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Ali GÖKŞENLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **29 Nisan 2015**
Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2015**

Aileme ve hocalarıma,

ÖNSÖZ

Günümüzün artan rekabet koşulları, firmaları farklı ve yeni ürünleri daha az maliyetli şartlar altında tüketiciye sunmaya zorlamaktadır. Maliyetle birlikte ortaya çıkan ürünlerin kaliteli ve dayanıklı olması da diğer vazgeçilmez unsurları meydana getirmektedir. Bu anlamda Ar-Ge faaliyetleri üretimle iç içe geçmiş ve birbirlerinden ayrı düşünülmesi imkansız bir vaziyettir. Faaliyetlerin bir kısmı yeni tasarımlar yaratmak amaçlı iken diğer önemli kısmı da hal-i hazırda var olan tasarımların iyileştirilmesi ile ilgilidir. Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında bir ağır ticari araç motoru biyel kolunun büyük uç kebi kırma parametreleri yapılan deneysel çalışmalarla optimize edilmiştir ve tespit edilen parametrelerle üretim yapılarak biyel kolları testlerle doğrulanmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmada direk ya da dolaylı olarak bir çok kişi ve kurumun emeği geçmiştir. Bu anlamda çalışmayı yapmak istediğimi anlattığım ilk günden beri destek ve yardımlarını esirgemeyen, sabır ve sürekli anlayışıyla her şeyin sorunsuz ilerlemesini sağlayan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman Akın Kutlar'a, üzerinde çalışılan konuda beni yüreklendiren ve yönlendirmelerini hiç bir zaman eksik etmeyen Ford Otomotiv Sanayi A.Ş. Baz Motor Müdürlüğü yöneticileri Yük. Müh. Göktan Kurnaz ve Yük. Müh. Erhan Doğruyol'a, vermiş oldukları karşılıksız destekten ötürü Ford Otomotiv Sanayi A.Ş. İnönü fabrikası takım-kalıp atelyesi, biyel kolu imalat hattı, kalite-güvence ekip liderliği ve ürün geliştirme Ar-Ge test merkezi çalışanlarına, zor anlarda küçük dokunuşlarıyla desteklerini esirgemeyen Dr. Ersin Korkmaz ve Yük. Müh. Mümin Tutar'a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, manevi desteğini her zaman hissettiğim ve bugünlere gelmemde üzerimde sonsuz emeği olan sevgili Anne'me ve gerek vermiş olduğu teknik destek, gerek yapılan çalışmaların yönlendirilmesi, gerekse de tez çalışmasının ortaya çıkmasında göstermiş olduğu özveri, başka bir deyişle teknik, maddi ve manevi olarak çalışmanın her noktasında emeği ve katkısı bulunan sevgili Baba'm, Uludağ Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Ali Bayram'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. İyi ki varsınız.

Nisan 2015

Melih Bayram

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	4
2. TEORİ.....	15
2.1 Kırılma Mekaniği	15
2.2 Isıl İşlemler.....	18
3. BİYEL KOLU İMALAT ADIMLARI.....	23
3.1 Geleneksel Biyel Kolu	23
3.2 Kebi Kırılarak Ayrılan Biyel Kolu.....	24
4. MALZEME VE METOD	29
4.1 Biyel Kolu Malzemesi.....	29
4.2 Biyel Kolu Üretimi ve Büyük Uç Üzerinde Çentik Açma.....	29
4.2.1 Çentik açma ve kırma tezgahı	30
4.3 Biyel Kollarına Uygulanan Isıl İşlemler	37
4.4 Biyel Kolu Kırılma Kesit Alanı Değişimi.....	39
4.5 Uygulanan Tasarım Parametreleri Sonrası Biyel Kolu Parça Listesi	40
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI	43
5.1 Mikro Yapı İncelemeleri	43
5.2 Mikro Sertlik Ölçümleri	47
5.3 Çekme Deneyleri.....	49
5.4 Kırık Yüzey SEM Görüntüleri (Fractography)	51
5.5 Charpy Çentik Darbe Testleri.....	56
5.6 Kırılma Yüzeyi Parça Fotoğrafları	58
5.7 Kırılma Sonrası Biyel Kolu Büyük Ucu Yuvarlaklık Ölçümleri	66
5.8 Sonuçların Yorumlanması ve Yöntemin Seçimi	84
5.8.1 Biyel kolu büyük ucu yataklı yuvarlaklık ölçümleri.....	86
5.8.2 Biyel kollarının motor testlerinde doğrulanması	93
5.8.3 Kırma metodu ile imal edilen biyel kolunun maliyet analizi.....	99
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	103
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ.....	109

KISALTMALAR

DoE	: Design of Experiments
RMS	: Root Mean Square
SEM	: Scannig Electron Microscope

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Kıyaslanan çeliklerin kimyasal bileşimleri [1].....	4
Çizelge 1.2 : Optimum lazer işletme şartları [1].....	8
Çizelge 4.1 : C70S6 çeliği kimyasal bileşimi.....	29
Çizelge 4.2 : Deneylerde kullanılan biyel kolları listesi.....	41
Çizelge 5.1 : Numunelerin sertlik ölçüm sonuçları	48
Çizelge 5.2 : Numunelerin akma – çekme mukavemeti ve kopma uzamaları.....	50
Çizelge 5.3 : Çentik darbe testi enerji sonuçları	57
Çizelge 5.4 : 24 adet yuvarlaklık deneme ölçümü sonuçları	69
Çizelge 5.5 : Biyel kollarının yuvarlaklık ölçüm sonuçları	82
Çizelge 5.6 : Seçilen metod ile üretilen 24 adet biyel kolu yataklı yuvarlaklık ölçümü sonuçları	90
Çizelge 5.7 : Ömür testinden çıkan biyel kollarının test öncesi ve test sonrası yataksız yuvarlaklık ölçümleri	99
Çizelge 5.8 : Geleneksel yöntem ile imalatın süresi.....	100
Çizelge 5.9 : Kırma yöntemi ile imalatın süresi	100
Çizelge 5.10 : Biyel kolları birim fiyatları	100

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Çentik dip radyusunun hatalı parça oranı üzerindeki etkisi [3].....	8
Şekil 1.2 : Kama hızı ve sünek kırılma arasındaki ilişki [6].....	9
Şekil 1.3 : Kırma tezgahı şematik görünümü [6].....	10
Şekil 1.4 : Kırma yüzeyinde kalmış ve ardından sıkılmış örnek parçacık resmi [4].	10
Şekil 1.5 : Biyel kolu büyük ucundaki kırılma sonrası sapmanın ölçüm şekli [9]....	11
Şekil 1.6 : Sıkılma sonrası kırılma yüzeyinde temas etmeyen bölgeler [4].....	12
Şekil 2.1 : Atomlararası uzaklık ile bağları koparmak için gereken enerji [12].....	16
Şekil 2.2 : Isıl işlemlerle birlikte demir - karbon denge diyagramı	19
Şekil 2.3 : Gerilim giderme tavlama sıcaklık - zaman grafiği [13].....	20
Şekil 2.4 : Örnek martenzitik yapı [14]	20
Şekil 2.5 : Isıl işlemler sonucu çeliğin oluşabilecek farklı mikro yapıları [13].....	21
Şekil 2.6 : Temperleme işleminin şematik gösterimi [14].....	22
Şekil 3.1 : Kep ve biyel kolu ayrı dövülmüş biyel kolu	23
Şekil 3.2 : Yekpare dövülmüş biyel kolu.....	25
Şekil 3.3 : Geleneksel yöntemle biyel kolu imalat adımları.....	26
Şekil 3.4 : Kırılarak kebi ayrılan biyel kolu imalat adımları	26
Şekil 4.1 : Tek parça üretilen ve üzerinde çalışılan biyel kolu	30
Şekil 4.2 : Kullanılan broş takımı	31
Şekil 4.3 : Broşla açılan çentiklerin geometrisi	32
Şekil 4.4 : Optik gölge ölçüm ekipmanı	32
Şekil 4.5 : Optik gölge ölçüm ekipmanında biyel kolu çentik ölçümü	33
Şekil 4.6 : Çentik görüntüsü yansıması ve derinlik ölçümü	33
Şekil 4.7 : Sırasıyla 0,6 mm, 0,8 mm, ve 1,0 mm'lik çentiklerin derinlik ve dip radyus ölçümleri.....	34
Şekil 4.8 : Lazer çentik derinliği.....	35
Şekil 4.9 : Kırma tezgahı	36
Şekil 4.10 : Biyel kolu ve fıkstürü ile kırma tezgahı	37
Şekil 4.11 : Gerilim giderme uygulanmış biyel kolu.....	37
Şekil 4.12 : 180 °C'de temperlenen biyel kolu.....	38
Şekil 4.13 : 450 °C'de temperlenen biyel kolu.....	38
Şekil 4.14 : 620 °C'de temperlenen biyel kolu.....	39
Şekil 4.15 : Biyel kollarında kırılma kesit alanı değişimi	39
Şekil 4.16 : Sayısal olarak kesit alanı değişimi	40
Şekil 4.17 : Dövme sonrası kırılmaya hazır kalın kesitli biyel kolu.....	40
Şekil 5.1 : O grubu malzeme mikro yapı görüntüsü.....	43
Şekil 5.2 : O-K grubu malzeme mikro yapı görüntüsü.....	44
Şekil 5.3 : G grubu malzeme mikro yapı görüntüsü.....	44
Şekil 5.4 : T1 grubu malzeme mikro yapı görüntüsü	45
Şekil 5.5 : T2 grubu malzeme mikro yapı görüntüsü	45
Şekil 5.6 : T3 grubu malzeme mikro yapı görüntüsü	46

Şekil 5.7 : Numune sertlik ölçümleri ortalaması sonuçları.....	47
Şekil 5.8 : Çekme test numunesi teknik resmi.....	49
Şekil 5.9 : Numunelerin gerilme - birim uzama sonuçları.....	49
Şekil 5.10 : Numunelerin akma - çekme mukavemeti ve kopma uzamaları	50
Şekil 5.11 : Elektron mikroskobu görüntüsü için çıkartılan numune örneği	51
Şekil 5.12 : O grubu malzeme SEM görüntüsü	52
Şekil 5.13 : O-K grubu malzeme SEM görüntüsü	52
Şekil 5.14 : G grubu malzeme SEM görüntüsü	53
Şekil 5.15 : T1 grubu malzeme SEM görüntüsü.....	53
Şekil 5.16 : T2 grubu malzeme SEM görüntüsü.....	54
Şekil 5.17 : T3 grubu malzeme SEM görüntüsü.....	54
Şekil 5.18 : Çentik darbe testi numunesi teknik resmi	56
Şekil 5.19 : Hazırlanan çentik darbe test numuneleri	56
Şekil 5.20 : Alşa çentik darbe test cihazı	57
Şekil 5.21 : Çentik darbe testi sonuçları	58
Şekil 5.22 : B6O kırılma sonrası yüzey fotoğrafı	59
Şekil 5.23 : B8O kırılma sonrası yüzey fotoğrafı	59
Şekil 5.24 : B10O kırılma sonrası yüzey fotoğrafı	59
Şekil 5.25 : L6O kırılma sonrası yüzey fotoğrafı	60
Şekil 5.26 : L6O-K kırılma sonrası yüzey fotoğrafı	60
Şekil 5.27 : B6G kırılma sonrası yüzey fotoğrafı	60
Şekil 5.28 : B8G kırılma sonrası yüzey fotoğrafı	61
Şekil 5.29 : B10G kırılma sonrası yüzey fotoğrafı	61
Şekil 5.30 : L6G kırılma sonrası yüzey fotoğrafı	61
Şekil 5.31 : B6T1 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	62
Şekil 5.32 : B8T1 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	62
Şekil 5.33 : B10T1 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	62
Şekil 5.34 : L6T1 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	63
Şekil 5.35 : B6T2 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	63
Şekil 5.36 : B8T2 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	63
Şekil 5.37 : B10T2 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	64
Şekil 5.38 : L6T2 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	64
Şekil 5.39 : B6T3 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	64
Şekil 5.40 : B8T3 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	65
Şekil 5.41 : B10T3 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	65
Şekil 5.42 : L6T3 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.....	65
Şekil 5.43 : Yuvarlaklık ölçüm ekipmanı	67
Şekil 5.44 : Yuvarlaklık ölçümündeki örnek biyel kolu.....	68
Şekil 5.45 : Örnek yuvarlaklık ölçüm ekranı	69
Şekil 5.46 : Örnek yuvarlaklık ölçüm sonucu.....	70
Şekil 5.47 : B6O biyel kolu yuvarlaklık ölçümü	71
Şekil 5.48 : B8O biyel kolu yuvarlaklık ölçümü	71
Şekil 5.49 : B10O biyel kolu yuvarlaklık ölçümü	72
Şekil 5.50 : L6O biyel kolu yuvarlaklık ölçümü	72
Şekil 5.51 : L6O-K biyel kolu yuvarlaklık ölçümü	73
Şekil 5.52 : B6G biyel kolu yuvarlaklık ölçümü	74
Şekil 5.53 : B8G biyel kolu yuvarlaklık ölçümü	74
Şekil 5.54 : B10G biyel kolu yuvarlaklık ölçümü	75
Şekil 5.55 : L6G biyel kolu yuvarlaklık ölçümü	75
Şekil 5.56 : B6T1 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	76

Şekil 5.57 : B8T1 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	76
Şekil 5.58 : B10T1 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	77
Şekil 5.59 : L6T1 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	77
Şekil 5.60 : B6T2 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	78
Şekil 5.61 : B8T2 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	78
Şekil 5.62 : B10T2 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	79
Şekil 5.63 : L6T2 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	79
Şekil 5.64 : B6T3 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	80
Şekil 5.65 : B8T3 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	80
Şekil 5.66 : B10T3 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	81
Şekil 5.67 : L6T3 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.....	81
Şekil 5.68 : Biyel kollarının yuvarlaklık ölçüm sonuçları	82
Şekil 5.69 : Yataklı yuvarlaklık kırışma örneği.....	87
Şekil 5.70 : Yataklı yuvarlaklık kapanma örneği	88
Şekil 5.71 : Yataklı yuvarlaklık kep oturmaması ve kayması örneği	89
Şekil 5.72 : Seçilen metodla hazırlanan ilk 12 adet biyel kolunun yataklı yuvarlaklık ölçümleri	91
Şekil 5.73 : Seçilen metodla hazırlanan son 12 adet biyel kolunun yataklı yuvarlaklık ölçümleri	92
Şekil 5.74 : Seçilen yöntemle imal edilmiş biyel kolu ile koşulan dinamometre motoru ömür testi	93
Şekil 5.75 : Ömür testinden çıkan biyel kollarının test öncesi ve sonrası yataksız yuvarlaklık ölçümleri (#1 - #3)	95
Şekil 5.76 : Ömür testinden çıkan biyel kollarının test öncesi ve sonrası yataksız yuvarlaklık ölçümleri (#3 - #6)	96
Şekil 5.77 : Ömür testinden çıkan biyel kollarının test öncesi ve sonrası yataksız yuvarlaklık ölçümleri (#7 - #9)	97
Şekil 5.78 : Ömür testinden çıkan biyel kollarının test öncesi ve sonrası yataksız yuvarlaklık ölçümleri (#9 - #12)	98

BİR AĞIR TİCARİ ARAÇ MOTORU BİYEL KOLUNUN BÜYÜK UÇ KIRMA PARAMETRELERİ OPTİMİZASYONU

ÖZET

Yekpare olarak imal edilen araç biyel kolunun kırma metodu ile büyük uç kebinin ayrılması ve tekrar birleştirilerek işlenmesi son yıllarda yaygınca kullanılmaya başlanan modern bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde biyel kolunun imalatında ciddi maliyet ve ağırlık azaltmalarına erişilebilmektedir ve işleme sonrası krank muylu yatakları için beklenen yuvarlaklık ve deformasyon hedefleri önceki imalat yöntemlerine göre rahatlıkla sağlanabilmektedir. Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında da bir ağır ticari araç motoru biyel kolu büyük uç kebi kırma parametreleri incelenmiş olup, aynı zamanda ham biyel kolu malzemesi olan C70S6 çeliğine ısıtılma işlemleri uygulanarak optimum kırma koşullarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Yapılan incelemelerin ardından parametreler tespit edilmiş ve dinamometrede ömür testleriyle parçalar doğrulanmıştır.

İlk etapta parametrelerden çentik açma tipi değerlendirilmiştir. Kırarak kebi ayırma yöntemi ilk kullanılmaya başladığında broş metodu çentiğin açılmasında öncü olmuştur. Ancak takımın zamanla aşınması, kesme sıvısı kullanımı gereksinimi ve hassasiyet sürekliliği gibi problemlerinden ötürü yeni yöntemler aranmaya başlanmıştır. Bu sebeple de lazer, tel erezyon ve su jeti gibi yeni çentik açma tiplerine yönelim gerçekleşmiştir. Bunların içerisinde gerek hassas bir işlem olması, gerek tekrarlanabilirliğin yüksek olması ve gerekse de çentik dibi gerilme yoğunluğunu istenen seviye çıkarabilmesinden ötürü lazer bir adım öne geçmiştir. Çalışma kapsamında da broş ve lazer yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Devamında optimum ya da başka bir deyişle minimum deformasyonda kırılmanın gerçekleşmesi için açılan çentiğin derinliği üzerinde çalışılmıştır. Bu sebeple 0,6 mm, 0,8 mm ve 1,0 mm derinliğinde üç farklı çentik çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Kırılma mekaniği esasları gereği çentiğin derinliği arttırıldığında kırılmanın gevrek olması beklenirken çalışmada 0,6 mm derinlik minimum deformasyonda kırılmanın gerçekleşmesinde en iyi sonuçları ortaya koymuştur.

Kırma kesit alanı değerlendirilen başka bir parametre olmuştur. Daraltılmış yüzey kırılmanın mekaniği gereği düşük deformasyonlu ayrılmanın gerçekleşmesine olanak tanıyacaktır fakat bir taraftan da motor çalışma şartları altındaki mukavemet gereksinimleri tasarım bakımından göz önünde bulundurulmuştur. Dolayısıyla iki tip dövme biyel kolları hazırlanıp çalışmalarda kullanılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Son olarak sıcak dövme yöntemi ile imal edilen biyel koluna daha iyi kırılma özellikleri sağlayabilmek adına gerilim giderme ve üç farklı sıcaklıkta su verme sonrası temperleme ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Bu noktada amaç dövmeden kalan iç gerilmeleri yok etmek ve yapıyı mukavemet değerlerini de gözeterek daha sert hale getirebilmek olmuştur.

Deney tasarımı mantığıyla hazırlanan tüm numuneler kırıldıktan sonra ilk etapta mikroyapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Böylece ısıt işlemler sonucu numunelerdeki değişimler gözlemlenebilmiştir.

Tüm numunelerden on noktada sertlik ölçümleri alınarak yine baz malzemeye kıyasla değişimler ve ısıt işlemlerin etkileri irdelenmiştir. Paralelinde biyel kollarının sap bölgelerinden alınan numunler çekme ve çentik darbe testlerine tabi tutulmuşlardır ve tüm sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Başka bir ifadeyle ısıt işlemin deformasyon ölçümleri öncesinde biyel kolları üzerinde oluşturduğu etkiler metalurjik incelemelerle ortaya konmuştur.

Bunların ötesinde kırılan yüzeylerin elektron mikroskobu altında kırılmanın sünek ya da kolvaj olup olmadığı tespiti için incelemesi gerçekleştirilmiştir. Yüzeyler fotoğraflanarak kırılmanın mikro ölçüde oluşturduğu formlar irdelenmiş ve diğer sonuçlar ile tutarlılığı gözlemlenmiştir.

Tüm bu muayenelerin ardından hazırlanan ve kırılan numuneler tekrar civatalar yardımıyla birleştirilerek büyük uç yuvarlaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler parçaların ne kadar deforme olduğu hakkında bilgi verirken öncesinde yapılan incelemelerle de birleştirilerek optimum parametrelerin tespiti yapılmıştır. Buna göre 0,6 mm derinliğinde lazerle çentik açılmış, ısıt işlem görmemiş ve ince kestili numuneler biyel kolu imalatı için etkin parametreler olarak seçilmiştir.

Seçilen parametrelerle birlikte yirmi dört adet biyel kolu imal edilmiş ve büyük uçları yataklanarak ulaşılmaya çalışılan minimum deformasyonun nihai olarak etkin olduğu nokta parçalar üzerinde ölçümlerle gözlemlenmiştir. Akabinde bu parçalardan on iki tanesiyle iki adet test motoru toplanarak dinamometrede ömür testi koşulmuş ve parçaların doğrulaması yapılmıştır.

Son olarak ise devreye alınan yeni yöntemin geleneksel imalat metodu ile maliyet açısından karşılaştırılması yapılmış ve çalışma tamamlanmıştır.

FRACTURE SPLITTING PROCESS PARAMETERS OPTMIZATION OF HEAVY DUTY ENGINE CONNECTING ROD BIG END

SUMMARY

Technology of fracture splitting is a modern method which has been developed recently and applied on single piece forged connecting rods. This method allows significant cost gain of manufacturing and weight reduction opportunities on connecting rod itself. Also, demanded roundness and deformation targets can be achieved easily after the manufacturing with the help of that method. This master thesis study contains the fracture splitting process parameters optimization of an heavy duty engine connecting rod also applying heat treatments to raw material of C70S6. After all inspections and measurements, new connecting rods were produced and validated on dynamometer engines. In the end, manufacturing cost comparison showed for both traiditional and new fracture splitting method.

Studies have been started to be discussed with notching method first. Since the new method needs brittle fracture, stress concentration of notch and accuracy carry huge importance. For this reason, first manufacturing method of notching was broaching all over the world. Broaching could be a good method but it should be stated tools would be worn in time resulting in worsen notch deep radius which causes ductile fracture. Then, it needs cutting fluid always to protect the warming up and accelerated worn condition concluding new requirements and environmental considerations. Moreover, since the broaching tool works in contact condition with connecting rods, accuracy and repeatability of process are questioned always which may conclude in piece to piece variation frequently. In other words, quality requirements are always taken into account by manufactureres. Considering all these reasons, laser, wire erosion and water jet methods have been started to be tried by manufacturers. Reasons of non-contact process, repeatability, accuracy and high achievable notch end stress concentration drive the laser method to be useful compared to other methods. For this reason, during the study of master thesis, broaching and laser method were compared firstly.

Second questioned process parameter was notch depth. If the fracture mechanic principals are considered, it can be seen obviously notch depth carries significant importance in regard to brittle fracture. So, 0,6 mm, 0,8 mm and 1,0 mm notch depths were tried on connecting rods for the best deformation results. Against the expectation of the deepest would be the best, 0,6 mm depth delivered the minimum deformation for connecting rod big ends after the fracture. All the details were explained in related section of thesis however, deeper notch was effected by huge amount of plastic deformation which concludes in worsen stress concentration result could be stated briefly for now.

Later on fracture spilting area was another questioned parameter for better fracture also considering strength requirements of connecting rod during the working condition in the engine. Since the connecting rod transmits the vertical movement of piston to rotated crankshaft, it has to be durable under the pressure which is up to 220

– 240 bars. In other words, despite the fact of smaller fracture splitting area would be resulted in brittle fracture, there are other constraints for connecting rod working condition that restricts the geometry. For this reason, two types of connecting rods were prepared for both designs of smaller and larger sections. These designs were delivered directly from forging by changing the tools. Also, larger sectioned design was heavier than other one for sure. In the end, two types of design were inspected in regard to possible effects on fracture splitting process.

The last questioned parameter was heat treatment. Actually this is not the step of manufacturing directly but considering possible effects on fracture splitting, it was decided to implement heat treatments to thesis to inspect the effects beyond just hot forged parts. For this reason, stress relieving treatment and tempering in three different temperature just after the quenching were taken into account for connecting rods. The intention was to remove the internal stresses after forging applying stress relieving treatment and achieving more brittle material applying tempering also considering the strength requirements. The intention was placed successfully and improvements were achieved especially with low temperature tempering compared to base material which has broaching notch. But since the laser notching and heat treatments did not work properly together and also the best deformation results were achieved with laser notch on base material, treatments were applied no more for serial production. However, significant improvement could be delivered compared to base material with broaching.

Questioned parameters are summarized as above. Using all these parameters, connecting rods were prepared in accordance with DoE method (Design of Experiments).

Firstly, all parts were fractured with the help special bench and metallurgical inspections were started with micro structure inspection. For observation of forging and heat treatment effects, specimens were prepared and inspected under microscope.

Later on, hardness measurements were completed on ten different locations for each part. Results were evaluated considering the intention of heat treatments.

Moreover, special specimens were prepared through connecting rods in accordance with ASTM standards to make the tensile and Charpy impact testings. All these studies were compatible with each others. In other words, for example while the low temperature tempering samples give the highest hardness, fracture energy or breaking elongation are the lowest compared to other samples.

In parallel to all these studies, fracture surfaces were inspected under scanning electron microscope. The aim was to observe whether brittle or ductile fractures could be detected or not in micro scale and the micro mechanics of fracturing for all samples. Almost all samples showed the cleavage fracture properties with detectable differences. All details were explained in related sections.

After the completion of all these studies, the most valuable inspection parameter which is roundness measurement showing physical and real deformation on components, was completed. All samples were measured to see the best deformed method and all results were shared in thesis.

In the end, the sample which has 0,6 mm laser notch without any heat treatment and smaller fracture section, was chosen as the best. This is not only related with the best deformation and also related with reduced manufacturing complexity, achievable

quality metrics and repeatable process. After the chosen parameters, twenty four connecting rods were produced with same properties to inspect the final roundness measurements with bearings since the most important step is that. Because, it represents the final deliverable during the assembly of connecting rod to engine.

As final step of study, twelve od connecting rods were assembled to two engines for dynamometer durability testing. The parts completed the tests successfully and all after test measurements showed good results. Thus, the validation of process has been completed. In the end, the thesis study was finalized with cost comparison calculation for both traditional and new method of connecting rod.

1. GİRİŞ

İçten yanmalı bir motorda biyel kolu ilk modern motor imal edildiğinden bu yana kullanılan motorun en önemli sayılabilecek parçalarından bir tanesidir. Küçük ucuna bağlı piston üzerinde yanma sonucu oluşan hareketi büyük ucuna bağlı krank miline ileterek bir anlamda motorda üretilen kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye çevirmeye yarayan önemli bir görevi yerine getirmektedir. Mikron mertebesindeki toleransları ile de üzerinde tasarım anlamında üzerinde titizlikle çalışılması ve imalat esnasında tüm ayrıntılarına gerekli hassasiyetlerin verilmesi gereken bir parçadır. Maruz kaldığı yükler bakımından da çekme ve burkulmaya karşı mukavim olması gerekirken, tüm bunları ağır ticari bir araç motoru için 2000 devirlere ulaşan motor hızlarında gerçekleştirmesi tasarımı zor kılan parametrelerin başında gelmektedir. Dizayn anlamında bir diğer önemli kriter ise krank milinin motor çalışması esnasında oluşan yağ filmi içerisinde çalışmasıyla alakalıdır. Birkaç mikron mertebesinde oluşacak yağ filmi için biyel kolu gerekli yataklama özelliklerini rijitliğe ile ortaya koymak durumundadır. Tüm bunlar düşünüldüğünde biyel kolunun krank miline bağlanacak olan büyük ucu yükler ve işlev bakımından ön plana çıkmata, kuramsal ve deneysel çalışmaların temelini oluşturmaktadır.

Biyel büyük ucu krank miline bağlanmadan önce kep olarak adlandırılan kısmı açılarak yataklanmaktadır ve böylece tribolojik anlamda milin yağ filmi içerisinde sorunsuzca çalışması sağlanmaktadır. Bunu verebilmek içinse önceleri biyel kolu ve kebin imalatı ham olarak ayrı yapılır, ardından ise birleşme yüzeyleri broş ve merkezleme pimleri vasıtasıyla farklı tezgahlarda ayrı ayrı olarak gerçekleştirilirdi. 90'lı yılların başında ise yeni bir metod olarak biyel kolu tek parça imal edilmeye başlanmıştır ve bu sayede üretim adımları yaklaşık % 30 azaltılarak ciddi bir iyileşme gerçekleştirilmiştir. Bu azalmanın altında yatan sebep de büyük ucun kırma yöntemi ile ayrılarak tekrar birleştirilmesi ve takip eden işlemlere bu şekilde devam edilmesidir.

İlk başlarda ağırlıkla dövme ve bunun yanında döküm yöntemleri ile imal edilen biyel kolları teknolojinin gelişmesi ile toz metalurjisi ile de üretilmeye başlanmıştır. Toz

metalurjisi kırılma anlamında iyi sonuçlar veriyor olsa da günümüz motorlarında 230 – 240 barlara yaklaşan silindir içi basınçlara mukavemet anlamında cevap veremediklerinden dövme yöntemi tekrardan ilk sırayı almıştır. İleriki kısımlarda kapsamlı olarak bahsedilecek olsa da tokluğu görece düşük ancak mukavemet anlamında sonsuz ömür tasarım hedeflerine cevap verebilecek C70S6 çeliği biyel kolu imalatı için tüm dünyada en çok kullanılan biyel malzemesi tipi olmuştur ve bu durum yoğun rekabet şartları altında halen devam etmektedir. Bu çeliğin temel özelliği mikron mertebesinde beklenen deformasyon ve büyük uç yuvarlaklık hedeflerine en uyumlu kırılma sonrası özelliklere sahip olmasıdır. Aksi halde motorlarda yatak sarma, biyel kolu çıkarma gibi problemler gözlenebilmektedir.

Kırma operasyonunu etkileyen birçok parametre mevcuttur. Bunların bir kısmı kolay erişilebilecek ve sağlanabilecek parametreler olmakla birlikte yanlarında günümüz rekabet ortamında araç üreticilerine ciddi avantajlar sağlayacak ve optimize edilmesi güç şartlar da söz konusudur. Bu şartların doğru yerine getirilmesi sonucunda ise tüketici açısından mükemmel olarak adlandırılabilir, başka bir deyişle gücü dönüştüren parçaları sonsuz ömürlü motorlar üretilebilmektedir.

Sonuç itibarıyla biyel kolu büyük ucunu kırma operasyonu tasarım ve imalat anlamında büyük kolaylıklar sağlayan ancak bunun yanında olası optimizasyon eksiklikleri ile motor problemlerine sebebiyet verebilecek akılcı bir çözümdür. Gerek kep ve biyel kolunun birbiriyle mükemmel uyumu gerekse maliyet ve ekipman gereksinimlerini minimuma indirmesi sebebiyle önümüzdeki yıllarda da vazgeçilemeyecek imalat operasyonlarından biri olmayı sürdürmeye devam edecektir.

1.1 Tezin Amacı

Giriş bölümünde özet olarak bahsedildiği gibi tek parça dövme olarak imal edilen biyel kolu büyük ucunu kırarak ayırma yöntemi gerek operasyonların azaltılması gerekse de kaliteli ürün çıktısı anlamında son yıllarda otomotiv endüstrisinde sıkça kullanılan bir yöntem halini almıştır. Yöntemin mühendislik anlamında irdelenip sürecin optimizasyonu ise tezin ana çıkış noktasını oluşturmaktadır. Bunun yanında çıktılar gözönünde bulundurularak geleneksel imalat yönteminden yeni yönetime geçişin gerek maliyet gerekse süreler bakımından değerlendirmeleri yapılmıştır.

Türkiye’de motor üretim tesisleri sayısı ve üretim hacimleri dünyayla kıyaslandığında yeni yeni rekabet edilebilir seviyeye gelindiğini ortaya koymaktadır. Bunun yanında kamyon pazarı gibi yüksek dayanıklılık ve ömür beklentisi olan bir pazar düşünüldüğünde ise rekabet ortamının çetin şartları daha da açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın ağır ticari araç biyel kolu üzerinde yapılmış olması tezin özgün ve motive edici yanını oluşturmaktadır. Kaynaklar detaylıca incelendiğinde Türkiye’de konuyla ilgili tek bir doktora tezinin hazırlanmış olduğu görülmektedir ve bu çalışma küçük hacimli bir motor için yapılmıştır. Bunun dışında başka bir kaynağa rastlanmamıştır.

Dünyada ise yine çalışmaların binek araç biyel kolları üzerinde yoğunlaştığı ve geniş kesitli bir ağır ticari araç biyel kolu düşünüldüğünde kıyas yapılamayacağı açıkça görülmektedir.

Motor üreticilerinin geçmiş tecrübeleri irdelendiğinde, biyel kolunun özellikle deformasyona bağlı yataklama ve kırma operasyonu esnasında ortaya çıkan ve ardından motor yağına karışan yabancı maddeler bakımından bir çok motor problemiyle karşılaştığı sonucuna varılmıştır. Bu nokta da tezin motive edici ve mühendislik anlamında üstesinden gelinmesi gereken diğer bir parçasını oluşturmuştur. Ayrıca devreye alınacak yöntemle ortaya çıkacak maliyet kazanımları tezin son araştırma konusunu oluşturmuştur.

Sonuç itibariyle, tez kapsamında yekpare üretilen bir ağır ticari araç motoru biyel kolunun kırarak ayırma parametrelerinden çentik açma tipi, çentik derinliği ve kesit kalınlığı C70S6 ham çelik malzemesine ayrıca ısıtma işlemleri uygulanarak irdelenmiştir. Bu irdeleme, malzeme mikro yapısı, kırma yüzeyi SEM incelemesi (klevaj – sünek kırılma muayenesi), sertlik ölçümü, çentik darbe deneyleri (Charpy darbe deneyi) ve tezin özgün yanını oluşturan kırma sonrası büyük uç yuvarlaklık ölçümleri yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Sonuç itibariyle 0,6 mm derinliğinde lazer yöntemi ile ısıtma işlem görmemiş malzemeye açılan çentik en iyi sonucu vermiştir ve biyel kolunun imalatı için seçilen parametreleri oluşturmuştur.

1.2 Literatür Araştırması

Park ve diğ. (2003), “Development of Fracture Split Steel Connecting Rods” çalışmalarında, bir binek araç dizel motoru biyel kolu için iki farklı önemli yaklaşım ile kırma operasyonu optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir [1].

İlk adım olarak yüksek karbon oranlı mikro alaşımlı çeliği orta karbon oranlı geleneksel mikro alaşımlı çelik ve standard karbon çeliği ile karşılaştırmışlardır. Çizelge 1.1’de çeliklerin kimyasal bileşimleri görülebilmektedir. S1 çeliği önerilen yeni çelik bileşimidir.

Çizelge 1.1 : Kıyaslanan çeliklerin kimyasal bileşimleri [1].

	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
S1	0.7	0.2	0.5	0.01	0.07	0.15	0.04
S2	0.45	0.2	1.1	0.02	0.04	0.16	0.1
S3	0.48	0.2	0.7	0.02	0.03	0.2↓	-

Yapılan malzeme analizinde üç temel elementin etkileri göz önünde bulundurularak yeni malzeme öngörüler altında geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu öngörülerden ilki yüksek karbon oranının sünek kırılma olmaksızın temiz bir kırılma yüzeyine sebebiyet vereceğidir. Bu anlamda % 0,48 olan karbon oranı % 0,7’ye çıkartılmıştır. İkinci değişim olarak artan karbo miktarının mekanik dayanımı belli seviyede tutacağı öngörüsüyle mangan değeri % 0,7’den % 0,5’e azaltılmıştır ve son olarak gevrek bir kırılma için vanadyum kompozisyona eklenmiştir.

Yapılan malzeme muayenelerinde geliştirilen yüksek karbonlu mikro alaşımlı çeliğin diğerlerine kıyasla daha yüksek akma ve kompa mukavemeti gösterdiği tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra ise her üç malzeme tipinden de üretilen biyeler yorulma testine tabi tutulmuşlardır ve geliştirilen malzemenin daha yüksek çevrimli yükler altında sonsuz ömre sahip olduğu ortaya çıkartılmıştır.

Malzeme kompozisyonunun belirlenmesinin ardından çalışmanın devamında sıcak dövme sonucu imal edilen biyel kolunun hızlı ve yavaş soğutulması ile mikroyapı değişimi iredelenmiştir. Buna göre hızlı soğutulmuş parçada ince perlit taneciklerinin yüksek sertlik ile birlikte daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kırma operasyonuna

olumlu etkileri bakımından da sıcak dövme ardından kontrollü hızlı soğutmanın gerçekleştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Malzeme ile ilgili yapılan bu çalışmaların ardından direk kırılmaya etkiyen faktörler üzerinde durulmuştur. Buna göre ilk etapta üç farklı çentik açma tipi olan broş, lazer ve tel erezyon farklı derinliklerde biyel kollarına uygulanmış ve sonuçları gerek deformasyon miktarları gerekse kırma kuvvetleri bakımından irdelenmiştir. Buna göre 0,5 – 0,6 mm derinliğindeki lazerle çentik açılmış biyel kollarının deformasyon anlamında en iyi sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

Bu ve buna benzer çalışmalar düşünüldüğünde ilk etapta biyel kolu malzemesinden beklenen özellikler sıralanmalıdır. Tahmin edileceği üzere ilk etapta kullanılacak çeliğin kırma sonrası çok fazla deforme olmaması beklenmektedir. Başka bir deyişle malzeme sünek bir yapı göstermemelidir. Beklenen az deformasyona karşılık ise malzemenin yüksek yorulma dayanımı ile uygulanan tekrarlı yükler altında sonsuz ömre sahip olması bir binek veya ağır ticari araç motoru biyel kolu için beklenen diğer önemli özelliklerdendir. Tüm bunların yanında sıcak dövme ile yekpare imal edilen ham parçanın talaşlı imalat esnasında işlenebilirlik özelliklerinin takım ömürleri ve istenen toleranslar bakımından üst seviyede olması gerekmektedir. Son olarak ise artan pazar ve rekabet koşulları düşünüldüğünde ürün ve ham malzeme maliyetinin rekabet edebilir mertebelerde olması malzemenin diğer vazgeçilmez özelliklerinden birini oluşturmaktadır [2, 3].

Bahsi geçen bu özellikler toz metalurjisi yoluyla ya da dökümle üretilmiş parçalarda bulunsa da yüksek tekrarlı yükler altındaki sonsuz ömür beklentisiyle dövme yöntemi ön plana çıkmaktadır. Bu da ancak özel geliştirilmiş mikro alaşımlı çelikler vasıtasıyla olabilmektedir. Çünkü geleneksel mikro alaşımlı çelik yüksek süneklik değeri ile kırma operasyonu esnasında fazla plastik şekil değişimi gösterecektir ve ilerleyen aşamalarda özellikle biten talaşlı imalat sonrasında kalıcı plastik şekil değişimi etkilerini üzerinde taşıyacaktır. Oluşacak bu klevaj olmayan kırılma tipi kep ve biyel kolunun birbirlerine karşılıklı oturmamasıyla sonuçlanacaktır [3].

Bu sebeple dünyada farklı ülkelerdeki çelik üreticileri tarafından çeşitli çelikler geliştirilmiştir. Özet olarak Fransızlar tarafından SPLITASCO50 ve SPLITASCO70, Japonlar tarafından S53CVFS ve S50CVS1 ve Almanlar tarafından C70S6BY çelik tipleri geliştirilmiştir. Bu çeliklerin genel olarak sertlikleri 250 ve

300 Brinell arasında olup çekme mukavemetleri 900 – 1000 MPa mertebelerindedir [3].

Bu malzemelerin yanında özellikle ağırlık azaltma çalışmaları gibi faktörler devreye girdiğinde ise ilave olarak ısıtıl işlem gerektiren yüksek mukavemetli mikro alaşımlı 36MnVS4 ve 34CrNiMo6 gibi çelikler ham biyel kolu malzemesi olarak kullanılabilir [4].

Düşük süneklik ve yüksek mukavemet elde edebilmek içinse geleneksel mikro alaşımlı karbon çeliğine ilave elementler eklenmektedir. Bunların başında silisyum ve vanadyum gelmektedir. Bu iki element çeliğin düşük süneklik ve iyi işlenebilirliğe sahip olmasını sağlarken yaklaşık % 10 mertebelerinde bulunan ferritin kırma üzerindeki tokluk etkisini azaltır [3]. Başka bir deyişle kırma operasyonu esnasında çatlak ilerlemesinin taneler arasında sorunsuzca gerçekleşmesi beklenir. Silisyum ve vanadyum da ferrit matrislerini kendi içlerinde güçlendirerek taneler arası bağların nispeten zayıflamasına ve çatlak ilerlemesinin düzgün gelişmesine sebep olur. İçine bu elementler eklenmemiş çelikle kıyaslandığında da güçlenen ferrit matrisleri sayesinde akma mukavemeti ve yorulma direncinin yeni çeliklerde arttığı gözlemlenmektedir [5].

Malzeme kısmında mangan ve kükürtün etkisinden de bahsedilmelidir. Yüksek yorulma dayanımı beklenen çeliklerde silisyum ve vandyumun yanına mangan eklenerek dayanım artırılabilir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus çok fazla mangan miktarlarında malzemenin sünekliğinin artacağı ve kırma operasyonunun zorlaşacağıdır. Kükürt miktarının görece artırılması ise iyi işlenebilirlik özellikleri anlamına gelmektedir [5].

Son olarak azaltılan azot miktarının düşük süneklik üzerinde etkili olabileceği belirtilmiştir. Ancak östenitik tane boyutunun azalan VN bileşiği sonucu kabalaşacağından azot miktarının azaltılmasının belirli bir mertebede tutulması gerektiği ortaya konmuştur [6].

Çentik açma tipi biyel kolu kırma operasyonu için en önemli parametrelerin başında gelmektedir. Temel olarak dünyada ağırlıkla kullanılan iki yöntem vardır. Bunlardan ilki broş, ikincisi ise lazer ile çentik açma yöntemidir [2]. Çok sık kullanılmamakla birlikte bir üçüncü yöntem olarak da tel erezyon yöntemi çentik açmada kullanılmaktadır [1].

Çentik açma yönteminin yanında çentiğin kalitesi de kırma operasyonu için büyük önem arz etmektedir. Bu kalite parametreleri çentik derinliği, çentik dip yarıçapı ve karşılıklı olarak iki çentiğin birbirine göre konumu olarak düşünülebilir. Eğer bunlardan biri istenilen değerlerin dışında gelirse çatlak başlangıcı, ilerlemesi ve buna bağlı olarak kırma operasyonunun kalitesi büyük ölçüde etkilenir ve sonuç motor yatak sarma ve biyel kolu kırma gibi ciddi motor hasarlarına kadar ilerleyebilir.

90'lı yılların başlarında kırma operasyonu kullanılmaya başladığında ilk kullanılan çentik açma yöntemi de broş olmuştur. Uygun bir tezgah içine konulan biyel koluna, karşılıklı olarak hareket eden broş takımları vasıtasıyla açılan çentikler neticesinde devam eden operasyonlara geçilebilmiştir. Ancak bu yöntemin dikkat edilmesi gereken çeşitli mahzurları vardır. İlki broş uçlarının arkasına konulan kalınlık şimlari yardımıyla ayarlanan çentik derinliğidir. Bu derinlik tüm takım, fişör ve tezgah toleransları düşünüldüğünde toleransı yüksek olabilecek bir çıktıdır. İkincisi broş uçlarının zamanla aşınarak beklenen çentik dip yarıçapı değerinden uzaklaşmasıdır. Çok sık takım değiştirilerek geri kazanılabilecek bu özellik üretim maliyet ve hızlarının düşmesine neden olacaktır. Son olarak ise broşun uygulandığı esnada bor yağı gibi bir kesme sıvısına ihtiyaç duymasıdır. Bu süreçte gerek maliyet gerekse doğal çevreye verilen tahribat nedeniyle yöntemin bir diğer olumsuz özelliğini oluşturmaktadır [7].

Ancak tüm bu üstte sayılan mahzurlara rağmen broş yöntemi dünyada sıkça kullanılmaya devam edilmektedir. Alınan önlemler sürecin kararlı ve hassas olması bakımından yeterli olduğu sürece yapılan kontrollerle süreçler devam ettirilmektedir.

Lazerle çentik açma yöntemi ise gelişen teknoloji ile son yıllarda yaygınlaşmaya başlayan bir süreç halini almıştır.

Zheng ve diğ. (2010), "A Study of Process Parameters During Pulsed Nd: YAG Laser Notching of C70S6 Fracture Splitting Connecting Rod" isimli çalışmada lazer çentik parametreleri hakkında detaylıca bir inceleme gerçekleştirmiştir. Buna göre ilk etapta broşa kıyasla lazerin temassız operasyon, yüksek kaliteli ürün çıktısı ve tekrarlanabilirlikle birlikte hassasiyet bakımından broşa kıyasla üstün olabileceğini ortaya koymuşlardır. Bunları yaparken lazerin gücü, sinyal genişliği, tarama hızı gibi parametreler üzerinde çalışmışlar ve optimum işletme şartlarını

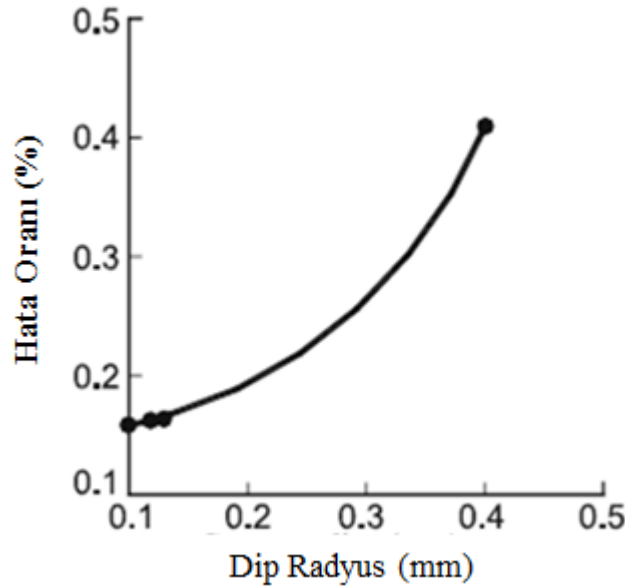
tespit etmişlerdir. Buna göre optimum lazer kaynağı çalışma şartları aşağıdaki çizelge 1.2’de gösterilmiştir [2].

Çizelge 1.2 : Optimum lazer işletme şartları [1].

Paremeterler	Tepe Enerjisi (kW)	Frekans (Hz)	Pals Genişliği (ms)	Çentik Derinliği (mm)
Binek araç biyeli	2.2-2.6	45-55	0.3	0.45-0.55
Ağır ticari araç biyeli	2.7-3.2	20-45	0.3~0.4	0.6-0.7

Ayrıca çentik derinliği olarak da binek araç motorları için optimum 0,45 – 0,55 mm, ağır ticari araç motorları için de 0,6 – 0,7 mm değerleri tespit edilmiştir [2].

Çentik dip radyusu açısından da optimum değerler olarak 0,1 – 0,4 mm değerleri yapılan çalışmalarca ön plana çıkartılmıştır [3]. Broşun açacağı simetrik ve V şeklindeki çentiğin işe yarayacağı ancak operasyon sonrası çapak temizliği gibi etmenlerin de göz ardı edilmemesi gerektiği vurgulanmıştır. Şekil 1.1’de dip radyusunun üretilen biyel kollarında çıkan hatalı parça oranına etkisi gösterilmiştir.



Şekil 1.1 : Çentik dip radyusunun hatalı parça oranı üzerindeki etkisi [3].

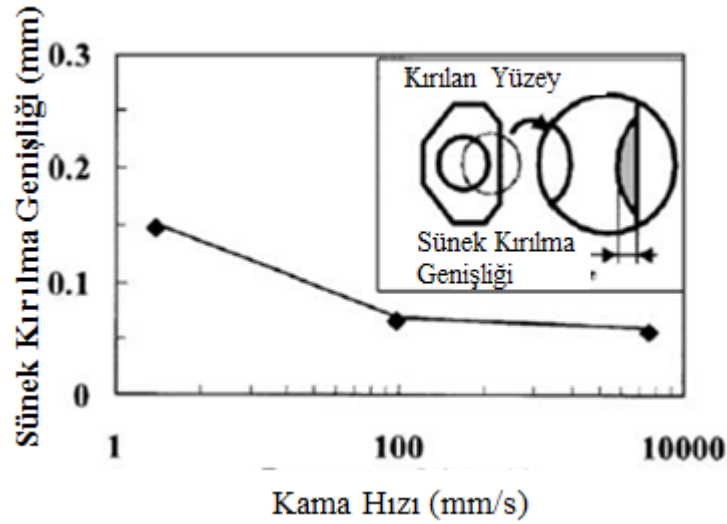
Yine aynı makalede optimum çentik derinliğinin üzerinde çalışılan binek araç biyel kolu için 0,4 – 0,6 mm mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir. Kısıt olarak da daha fazla derine gidilmesi durumunda ardından yapılacak olan nihai işlemlerle birlikte civata deliğine çok fazla yaklaşılmaması gösterilmiştir [3].

Sonuç itibariyle lazerin takım aşınmama, hassasiyet, temiz süreç ve kararlılık faktörlerinden dolayı broşa kıyasla daha üstün bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Son olarak Alman Mauser ve Alfing gibi firmalar su jeti ile çentik açma yöntemini denemişlerdir ve olumlu sonuçlar almışlardır ancak çalışmaların operasyon detaylarına literatürde rastlanmamıştır.

Biyel kolu kırma operasyonunda bir diğer önemli parametre de darbeli kırma esnasında kullanılan ekipmandır. Yüksek hız ve basınçta çalışan bir kama yardımıyla büyük ucu çentik bölgelerinden ayırmaya yarayan tezgah gerek toleranslar gerekse de kama hızı sebebiyle irdelenmesi gereken adımlardandır.

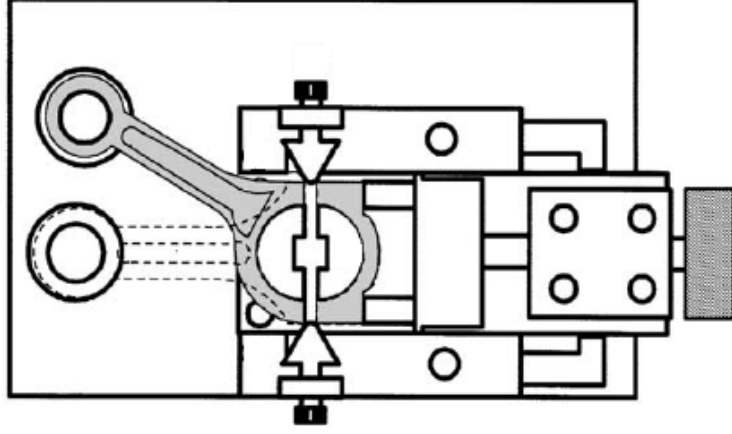
Fukuda ve Eto (2001) “Development of Fracture Splitting Connecting Rod” çalışmasında kama hızının hangi mertebelerde olması gerektiğini ve hangi değerden sonra limit değere ulaşarak öte etkilerin ortadan kalktığını tespit etmişlerdir. Buna göre artan kama hızı sünek kırılma yani deformasyonu azaltmaktadır ancak 100 mm/s’nin ötesindeki kama hızlarında bu etki ortadan kalkıp deformasyon miktarı şekil 1.2’de görülebileceği gibi limite oturmaktadır [6].



Şekil 1.2 : Kama hızı ve sünek kırılma arasındaki ilişki [6].

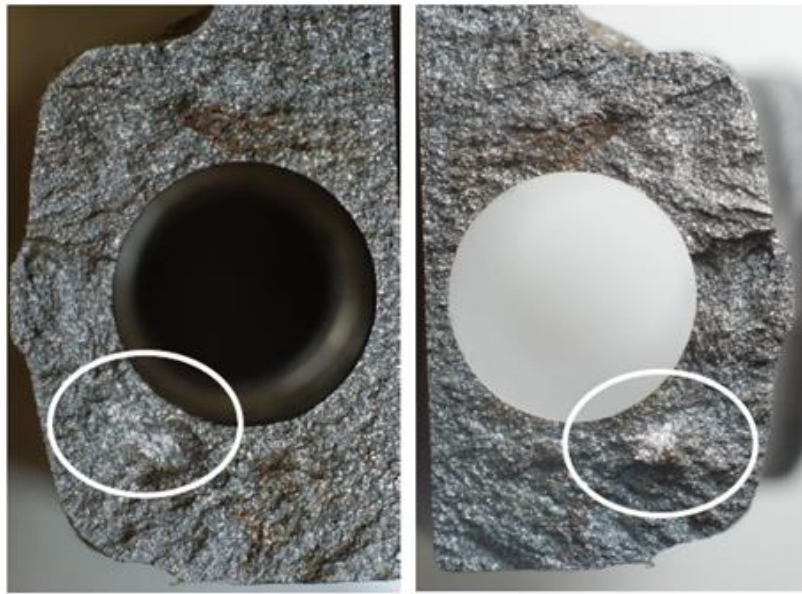
Diğer önemli husus ise kama vasıtasıyla açılan ve biyel kolu büyük ucuna kuvvet uygulayan kırma çekiçlerinin zamanla aşınarak biyel kolu büyük ucu ile arasında çap farkı oluşturmalarıdır. Bu büyük uç üzerindeki deformasyonu arttırırken harcanan enerjinin de boşa gitmesine sebep olacaktır [7].

Kırma tezgahının şematik bir görünümü şekil 1.3’te verilmiştir.



Şekil 1.3 : Kırma tezgahı şematik görünümü [6].

Tüm bu etmenlerin yanında biyel kolu kırma operasyonu için operasyon sonrası oluşabilecek negatif etkilerden de bahsedilmelidir. Bunlardan ilki kırma yüzeyinde hemen kırma sonrası oluşan metal parçacıklardır. Bu metal parçacıkların biyel kolunun devam eden işlemleri ve motorun çalışma şartları açısından iki temel mahzuru vardır. İlk olarak yüzeyden kopan parçaların yüzeyde kalarak -karşılıklı oturan yüzeyler düşünüldüğünde arada kalması- civata ile sıkma sonrası gerekli sıkma kuvvetinin biyel koluna verilememesidir. Biyel kolu eğer bu şekilde işlenmeye devam edilirse motora montajı sonrası maruz kalacağı tekrarlı yüklerde görevini yerine getiremeyecektir. Bu durum da motor hasarı ile sonuçlanacaktır [4]. Şekil 1.4'te kırma yüzeyinde kalmış ve ardından sıkılmış bir parçanın fotoğrafı görülebilmektedir.



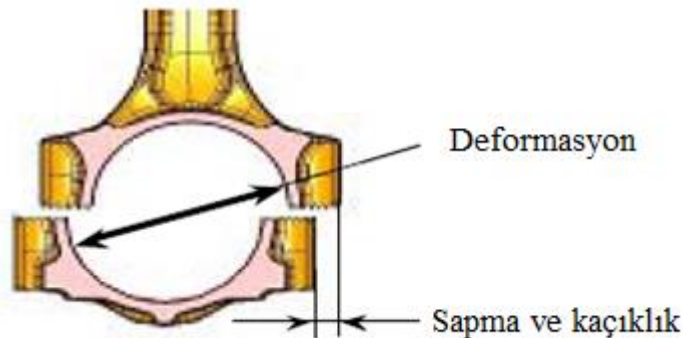
Şekil 1.4 : Kırma yüzeyinde kalmış ve ardından sıkılmış örnek parçacık resmi [4].

Ayrıca yüzeyden kopan bu parçacıklar karşılıklı oturan yüzeyler düşünüldüğünde mükemmel birleşme anlamında bir kayıp olarak nitelendirileceklerdir.

Kopan parçaların bir diğer yarattığı problem ise biyel kolunun motora montajı esnasında düşerek motor yağına karışmasıdır. Her ne kadar yağ pompası öncesi filtreler kullanılsa da bu parçalar boyutlarına bağlı olarak filtrelerden geçebilmekte ve özellikle kayar yataklarda çiziklere sebebiyet verip motorun düzgün çalışmasını engellemektedir. Ayrıca montaj esnasında bu parçalar yağa karışmanın ötesinde direk motor parçalarının üzerine düşerek daha ilk çalışmada parçaların hasarlanmasına sebebiyet verebilmektedir [8].

Aşırı deformasyona bağlı ve görece gevrek olmayan kırılmanın yaratacağı bir diğer problem de kep ve biyel kolunun birbirini karşılamamasıdır. Eksenel anlamda kırılma kuvvetine bağlı kaçınılmaz deformasyona maruz kalan biyel kolu, tekrar birleştirildiğinde amacı gereği sanki hiç kırılmamış gibi bir davranış sergilemek durumundadır. Ancak deformasyon miktarı çok fazla olduğunda gerek şekil gerekse civataların uygulayacağı kuvvet anlamında kayıplar olacaktır. Hatta karşılıklı olarak parçalar birbirleriyle montaj dahi edilemeyeceklerdir [9].

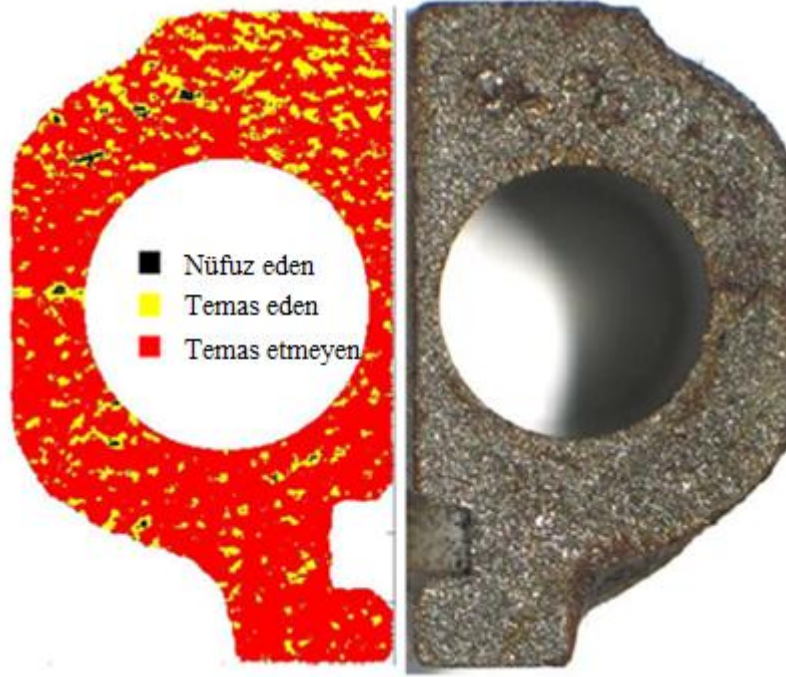
Buna benzer bir çalışmanın örneği olarak Kato ve diğ. (2007), “Development of Microalloyed Steel for Fracture Split Connecting Rod” adlı çalışmalarında karşılıklı olarak parçaların ne kadar birbirleriyle uyumlu oturduğunu tespit edebilmek amaçlı bir ölçüm ekipmanı hazırlamışlar ve şekil 1.5’te görüldüğü gibi kep ve biyel kolu arasındaki mesafeyi ölçmüşlerdir. Yapılan ölçümler neticesinde de minimum deformasyona sahip çelik tipi tespit edilmeye çalışılmıştır [9].



Şekil 1.5 : Biyel kolu büyük ucundaki kırılma sonrası sapmanın ölçüm şekli [9].

Benzer şekilde Peter Lyszczan (2012), “Shear Load Transfer and Relaxation in Bolted Joints with Fractured Surfaces” çalışmasında civata ile sıkma sonrasında

tekrardan parçaları açarak yüzeyleri lazer tarama metodu ile incelemiştir. Tarama sonrasında ise yüzeylerin hangi ölçüde birbirleriyle temas halinde olduğunu tespit etmeye çalışmıştır. Örnek bir tarama sonucu şekil 1.6’da görülebilmektedir [4].



Şekil 1.6 : Sıkılma sonrası kırılma yüzeyinde temas etmeyen bölgelerin [4].

Tüm bu sonuçlar ve biyel kolunun motor çalışma şartları üzerindeki etkileri düşünüldüğünde kırma parametreleri ve optimum kırılma şartları tespitinin önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır.

Yapılan kapsamlı literatür çalışmasında ısıtma işlemi ilgili tek bir makaleye rastlanmıştır. Bunun dışında malzemeye yönelik çalışmalar çoğunlukla alaşım elementleri üzerinde gerçekleştirilmiş olup, elementlerin kırma üzerindeki tekil etkileri tartışılmıştır.

Zafer Özdemir (2013), C70S6 malzemesinden sıcak dövme yolu ile imal edilen hafif ticari araç biyel kolunu kırma öncesinde bir çok ısıtma işlemi maruz bırakarak, işlemlerin kırma operasyonu üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Yapılan çalışma kapsamında gevrek bir kırılma için perlit miktarının önemi vurgulanmış, ne çok sert olan martenzitik ne de çok yumuşak olan ferritik yapının kırma için ideal olmadığı sonucuna varılmıştır [10].

Isıl işlemler de kırma yüzeyi değerlendirmeleri yapıldığında bey nitik ve temperlenmiş martenzitik yapının mevcut biyel malzemesine önemli bir alternatif olacağı sonucuna varılmıştır [10].

Sonuç olarak, kırarak biyel kolu imal etme teknolojinin maliyet anlamında verimli olması, verimli olmasının yanında kalite anlamında bir çok metriğe ihtiyaç duyup, bu metriklerin detaylı incelenme ihtiyacı olduğu görülmekle birlikte biyel koluna dövme sonrası uygulanan ısı işlemlerle incelenemesinin anlamlı olduğu anlaşılmaktadır.

2. TEORİ

2.1 Kırılma Mekanikliği

Kırılma katı bir cismin gerilmeler altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması şeklinde tanımlanır. Genellikle de sünek ve gevrek adıyla iki tip olarak ele alınır [11].

Sünek kırılma çatlağın oluşması ve büyümesi anlamında kalıcı şekil değişiminin görüldüğü kırılma türü iken, gevrek tipte çatlağın büyük bir hızla ilerlemesi ve şekil değişiminin süneğe kıyasla önemsiz hale gelmesi söz konusudur [11].

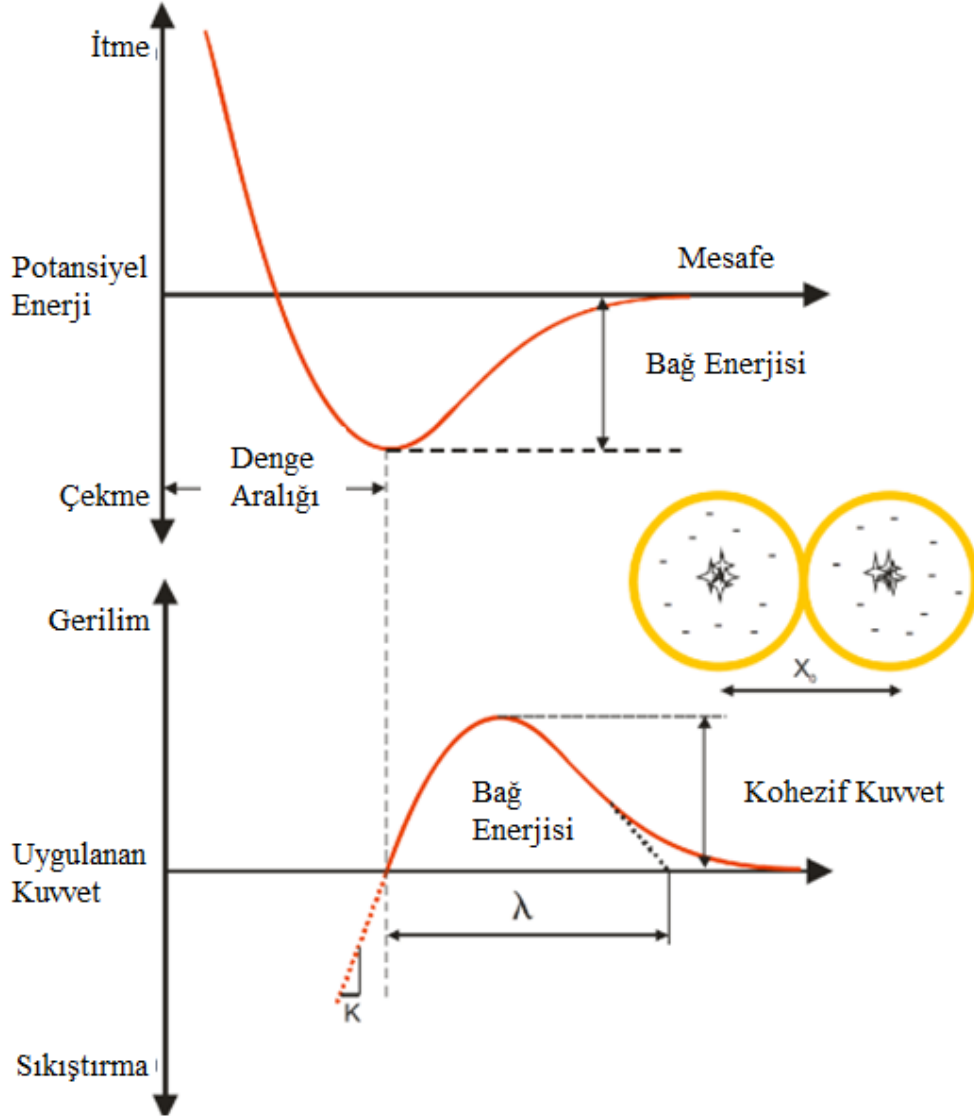
Biyel kolu üzerindeki gevrek kırılma tarzda kırılma arzulandığından, gevrek tarzda kırılma üzerinde detaylıca durulmuştur.

Gevrek kırılmayı doğurabilecek önemli üç faktör de; çok eksenli gerilme durumları (çentik), hızlı zorlamalar (darbe) ve düşük sıcaklıklar olarak tanımlanmaktadır [11].

Kırılmanın oluşabilmesi için ilk etapta bahsedilmesi gereken konu atomlararası kohezif dayanımdır. Malzeme mukavemetini direk ilgilendiren bir olgu olan kohezif dayanım, atomlar arasındaki bağları koparmak için gerekli kuvvet olarak özetle tanımlanabilir. Bu bağlar kuvvetli ise malzeme kuvvetli, elastisite modülü yüksek ve ergime sıcaklığı yüksek olur [12]. Şekil 2.1’de ise atomlararası uzaklık ile bağları koparma için gereken enerjinin bağlantısı görülebilmektedir.

Atomlararası bağın uzaklıkla ilgisi bu şekilde ortaya konurken bir kristaldeki iki düzlem arasındaki gerilmelerin düzlemlerarası uzaklıkla değişiminin de benzer şekilde olacağı söylenebilir [11].

Bahsi geçen eğrinin üst kısmı büyük bir yaklaşımla sinüs eğrisi olarak kabul edildiğinde teorik kohezif mukavemet aşağıdaki bağıntı şeklinde bulunur.



Şekil 2.1 : Atomlararası uzaklık ile bağları koparmak için gereken enerji [12].

$$\sigma_{\max.} = \left(\frac{E \cdot \gamma_{\max.}}{a_0} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

Burada $\gamma_{\max.}$ yüzey enerjisini, a_0 ise atomlar arası denge uzaklığını temsil etmektedir.

Bu noktadan sonra ise Griffith'in 1920'li yıllarda ortaya koyduğu enerji dengesi fikri devreye girmektedir. Özetle fikir teorik kohezif mukavemet ile kırılma mukavemeti arasındaki farkın enerjisi dengesi ile açıklanmasına dayanmaktadır. Başka bir deyişle savunulan düşünce bir çatlağın büyümesi ancak bu sırada serbest kalan elastik

enerjinin yeni yüzey yaratmak için gerekli yüzey enerjisine eşit veya daha fazla olması halinde gerçekleşebilir şeklinde açıklanabilir [11].

Bu fikir aşağıda 2.2 denklemindeki matematiksel bağıntı ile ifade edilebilir.

$$\frac{\partial(\Delta U_E)}{\partial(2c)} \geq \frac{\partial(\Delta U_Y)}{\partial(2c)} \quad (2.2)$$

Alınan türevler neticesinde ise çatlakın ilerlemesi için gerekli gerilme 2.3 denklemi ile ifade edilebilir.

$$\sigma \geq \left(\frac{2E\gamma_Y}{\pi c} \right)^{1/2} = \sigma_K \quad (2.3)$$

Bu fikir sonucu oluşturulan matematiksel bağıntılar cam ve benzeri ideal gevrek malzemeler için gerçeğe yakın sonuçlar vermiştir ancak mühendislik malzemelerinde kırılma öncesi ve sonrasında önemli şekil değiştirmeler olduğundan Griffith'in ortaya koyduğu bağıntıdaki serbest kalan enerjinin bir kısmı da kalıcı şekil değişimi için harcanacaktır. Kalıcı şekil değişimi malzemeye özgü bir kavram olup, denklemlere bir sabit ya da matematiksel ifade olarak giremeyeceğinden enerji ifadesi direk mühendislik malzemeleri için kullanılamamıştır. Bundan sonrası ise Irwin tarafından geliştirilmiştir [11].

Sonsuz büyüklükte ve birim kalınlıkta levha yaklaşımı ile çatlak büyümesi kuvveti aşağıdaki 2.4 denklemi ile ifade edilmiştir.

$$\xi = -\frac{\partial(\Delta U_E)}{\partial(2c)} \quad (2.4)$$

Düzlem gerilme kabülü ile türevler alındığında ise denklem 2.5'teki matematiksel ifadeler ortaya çıkar.

$$K = \sigma\sqrt{\pi c}, \xi = \frac{K^2}{E} \quad (2.5)$$

K değeri artık gerilme şiddeti çarpanı olarak adlandırılır ve kırılma mekaniğinde ciddi bir önem taşır. K değeri belli bir değer üzerine çıktığında ise çatlak büyümeye başlar ve tam bu değere K_{1c} yani kırılma tokluğu denir.

Tezin önemli bir kısmını oluşturan çatlak derinlikleri bu ifade ile paralel olarak çalışılmıştır.

2.2 Isıl İşlemler

Isıl işlemler malzemelerin iç yapılarının ve iç yapılarına bağlı olarak özelliklerinin ayarlanması amacıyla yapılan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tanımlanabilirler. Faz diyagramlarında malzemeler yavaş soğumaya bağlı olarak fazlarına göre değerlendirilirken ısıtma işlemler devreye girdiğinde zamana bağlı olarak faz dönüşümleri kavramı ortaya çıkmaktadır.

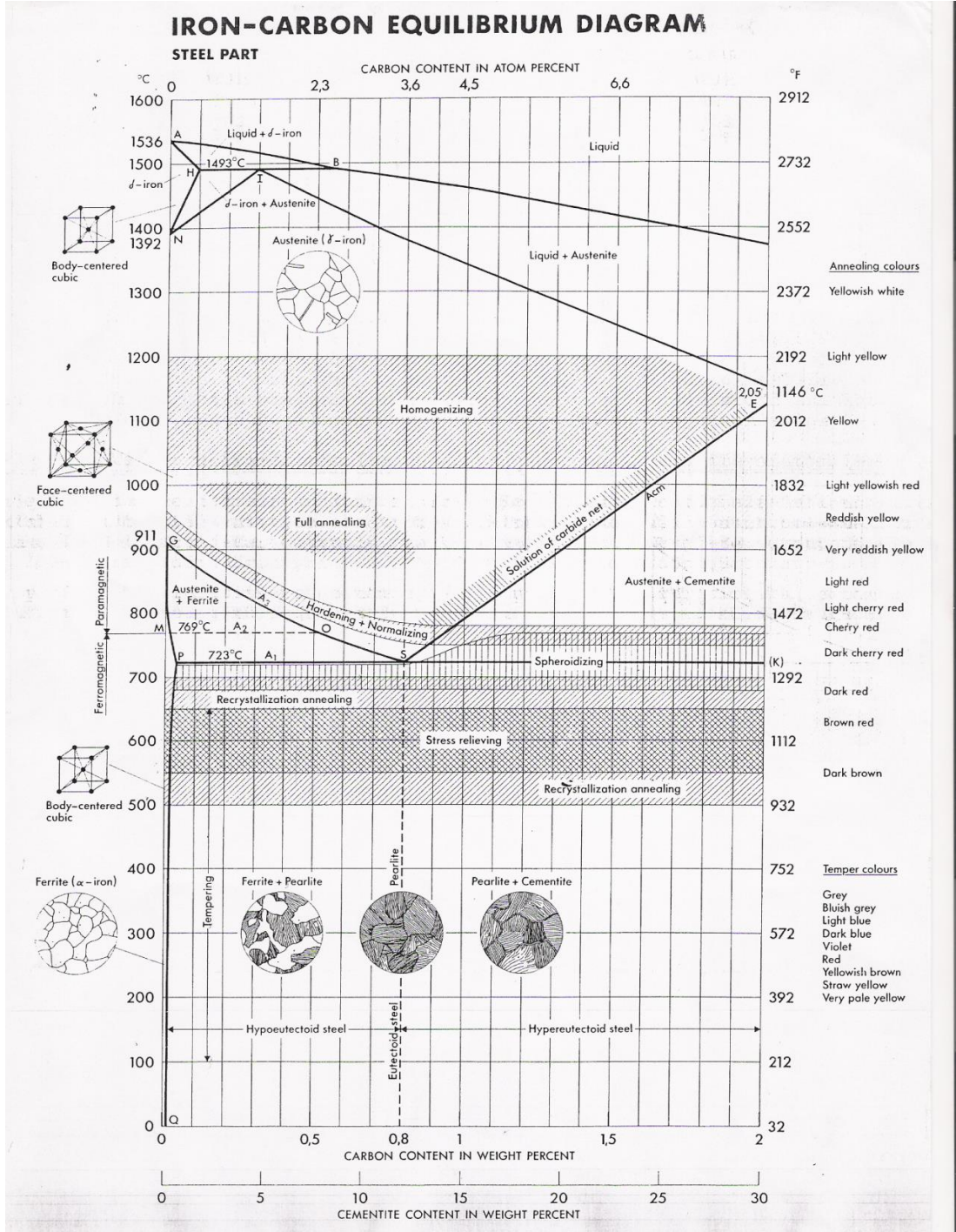
Faz diyagramları herhangi bir sıcaklıkta denge durumundaki iç yapıları ortaya koyar. Başka bir deyişle fazın oluşumu için gerekli yayınma süresinin olduğu varsayılır, soğumanın yavaş gerçekleştiği kabul edilir. Gerçek durumda ise soğumalar hızlı gerçekleşebilir ve bu durumda zaman önemli bir fonksiyon haline gelir. Artık gerekli yayınma süresi var olamayacağından ötürü de kararsız yapılar ortaya çıkabilir. Bu da faz diyagramlarına zaman kavramının eklenmesiyle zaman – sıcaklık – dönüşüm diyagramları kavramını ortaya çıkartacaktır [11].

Çeliklere uygulanan ısıtma işlemleri tavlama ve sertleştirme olarak iki ana grup altında incelenebilir. Tavlama sonucu kararlı bir iç yapı durumuna ulaşılırken, sertleştirmede yarı kararlı bir iç yapı elde edilir. Başka bir ifadeyle östenit minimum yayınma hızının altına inilmeyecek şekilde soğutulur ve yarı kararlı iç yapı oluşur [13].

Tavlama ise kendi aralarında aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadırlar.

- Homojenleştirme tavlama
- Tane irileştirme tavlama
- Yumuşatma tavlama
- Gerilim giderme tavlama
- Yeniden kristalleştirme tavlama
- Normalizasyon tavlama

Şekil 2.2 demir – karbon denge diyagramında ısıtma işlemlerinin yerlerini göstermektedir.

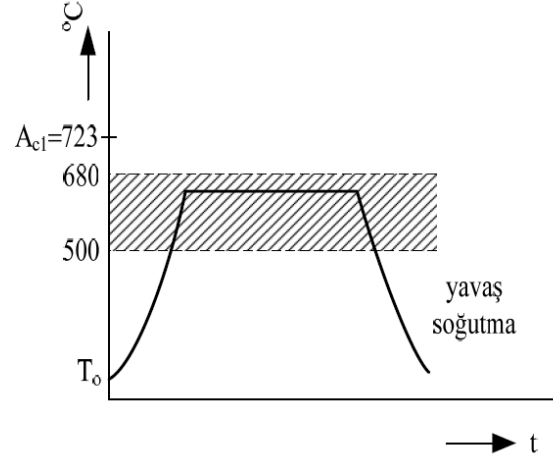


Şekil 2.2 : Isıl işlemlerle birlikte demir – karbon denge diyagramı.

Yapılan tez çalışmasının kapsamı itibarıyla de bahse konu ısıl işlemlerden gerilme giderme tavlaması ve sertleştirmeden bahsedilecektir.

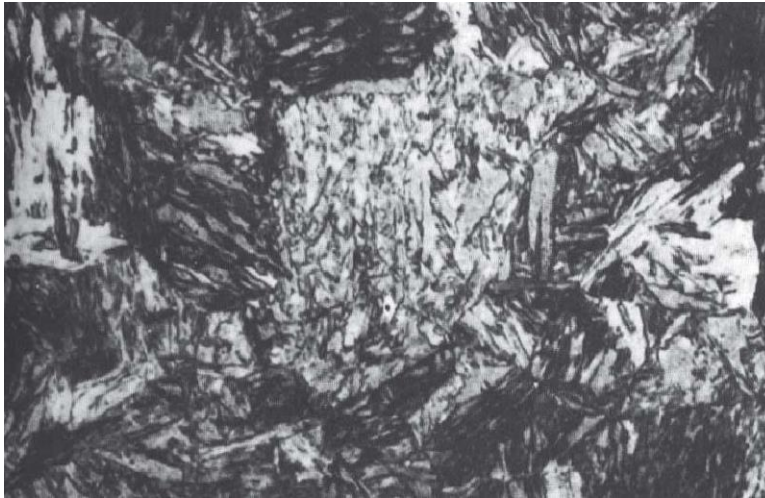
Gerilme giderme tavlaması üniform olmayan ısıtma – soğutma işlemleri veya üniform olmayan şekil değişimi sırasında parça içinde oluşan gerilmelerin giderilmesi amacıyla kullanılır. İşlem sıcaklığı malzemenin kimyasal yapısına göre 500 ve 680 derece arasında değişirken tavlama süresi de 0,5 ila 1 saat arasında

gerçekleşecektir. Başarılı bir işlem için soğumanın yavaş yapılması gerekir. Hızlı soğuma durumunda malzeme içerisinde tekrar iç gerilmeler oluşabilir. Şekil 2.3 işlemi zaman ve sıcaklığa bağlı olarak şematik göstermektedir [13].



Şekil 2.3 : Gerilim giderme tavlaması sıcaklık – zaman grafiği [13].

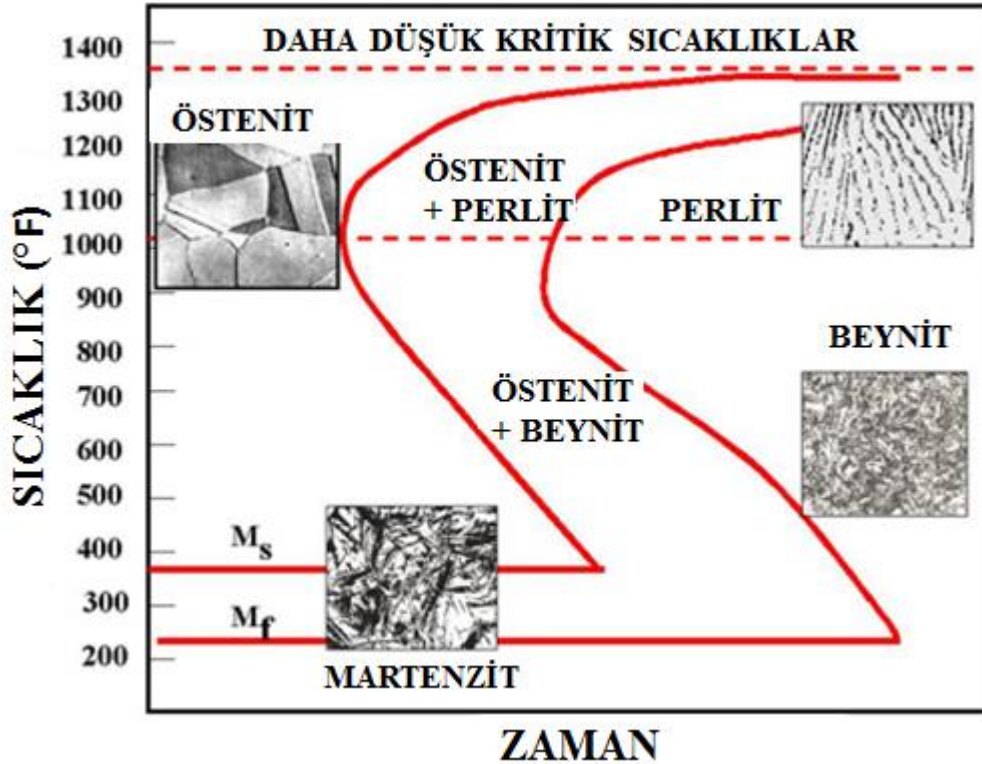
Sertleştirme ile metastabil yani başka bir deyişle yarı kararlı bir yapı elde edilir. Östenit sıcaklığına ulaştırılan çelik bileşimine de bağlı olarak yüksek hızda soğutulur ve yarı kararlı tetragonal hacim merkezli martenzit yapısı oluşur. Altında yatan sebep karbon atomlarının yayınma için zaman bulamaması ve ferrit içerisinde hapsolmesidir. Martenzitik yapı çok serttir ve iğnemsî bir görünüme sahiptir. Bu da çeliklerin mümkün olan en yüksek sertlik ve aşınma dayanımına sahip olmasına sebebiyet verir. Şekil 2.4 optik mikroskop altında örnek bir martenzitik yapının fotoğrafını göstermektedir.



Şekil 2.4 : Örnek martenzitik yapı [14].

Martenzitik yapı oluşturma amaçlı soğutma işlemi de su verme ile gerçekleştirilir. Çelik östenit bölgesinde en az 1 saat ısıtılır, su verilerek hızla soğutulur ve martenzitik yapı elde edilir. Bu işlem sonucunda sertleşen çelikte şekil değiştirme kabiliyeti azalır ve süneklik düşer [13].

Su verme dışında yağda, havada, fırında soğutma gibi yöntemler de mevcuttur ancak tez kapsamında bu tiplere değinilmeyecektir. Ancak bu farklı soğuma tipi ve hızı kavramları ile ilk kısımda bahsi geçen zaman – sıcaklık – dönüşüm eğrileri tekrar gündeme gelecektir. Farklı soğuma hızlarına bağlı olarak östenitten beynit, perlit gibi farklı mikro yapılar elde edilebilecektir. Şekil 2.5 zaman – sıcaklık – dönüşüm diyagramında çeliğin oluşabilecek farklı mikro yapıları görülebilmektedir.

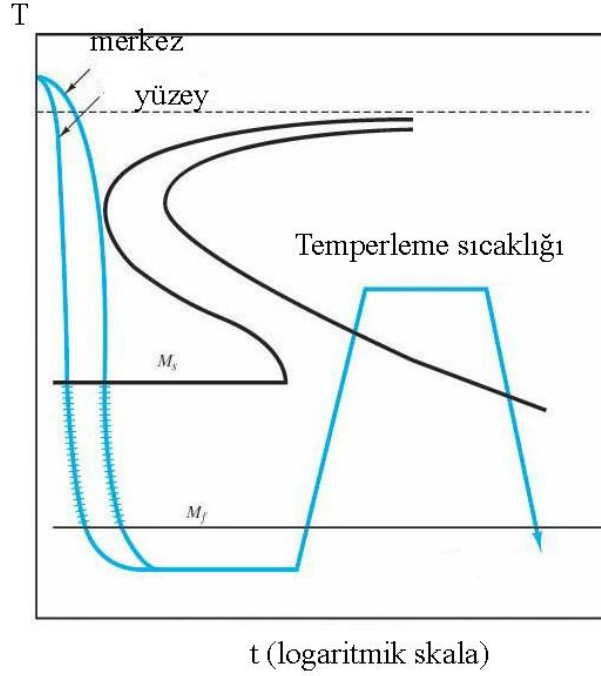


Şekil 2.5 : Isıl işlemler sonucu çeliğin oluşabilecek farklı mikro yapıları [13].

Bu aşamada ise temperleme işleminden bahsedilecektir. İlk etapta östenit sıcaklığına kadar ısıtılıp, yeterli süre bekletilen çelikte hızla suda soğutulurak martenzitik yapı elde edilmiştir. Akabinde ötektoid dönüşüm sıcaklığına ulaşmadan çeliğin tekrardan ısıtılmasına temperleme adı verilir [13].

Temperleme esnasında martenzitin yarı kararlı kafes yapısı içinde sıkışmış bulunan karbon atomları ısıl aktivasyon ile kafesi terketmeye başlar yapı daha kararlı ve ince dağılımlı ferritik – perlitik şeklini alır. Bu sayede kafes çarpılması azalır ve yapı

tavlama sıcaklığına ve süresine bağlı olarak yumuşar. Dolayısıyla çelikte istenilen sertlik değerlerine kontrollü olarak ulaşılabilir. Şekil 2.6 temperleme işleminin şematik gösterimini içemektedir [14].



Şekil 2.6 : Temperleme işleminin şematik gösterimi [14].

Sonuç itibariyle kırılğan martenzitik yapı temperleme sayesinde daha tok ve hala yüksek dayanımlı iç yapıya dönüşebilir. Bu da dayanım anlamında malzemenin iyileşmesi anlamında gelmektedir.

Teori bölümünün ısı işlemler kısmı altında ilk etapta belirtildiği gibi; tez çalışması kapsamında sıcak dövme yöntemi ile imal edilmiş biyel koluna gerilme giderme tavlama ve sertleştirme sonrası üç farklı sıcaklıkta temperleme uygulanmıştır. Ardından bu ısı işlemlerin malzeme özellikleri incelenerek kırma operasyonu üzerindeki olumlu ve olumsuz özellikleri irdelenmiştir.

3. BİYEL KOLU İMALAT ADIMLARI

3.1 Geleneksel Biyel Kolu

Dövme, döküm, toz metalurjisi gibi farklı üretim metodları ile ham olarak imal edilen biyel kolları hangi metodla imal edilirse edilsin ilk etapta motor montajına hazır olmazlar. Mikron mertebelerinde toleranslar ve yüzey pürüzlülükleri gerektirdiğinden tüm biyeler delik delme, çap işleme, taşlama, honlama gibi talaşlı imalat adımlarından geçerler. Tezin bu kısmında ise geleneksek biyel kolu ile kırma operasyonu teknolojisine sahip biyel kolu operasyon adımlarından bahsedilip, süreçler karşılaştırılacaktır.

İlk etapta geleneksel yani kep ve biyel tarafı ayrı ayrı dövülüp ardından birleştirilerek motor montajına hazır edilen süreç iredelenecektir.



Şekil 3.1 : Kep ve biyel kolu ayrı dövülmüş biyel kolu.

Dövme imalatçısından alınan kep ve biyel kollarının ilk etapta birleşme yüzeyleri ayrı ayrı broş tezgahlarında kaba olarak işlenir. Ardından kaba olarak işlenen bu yüzeylere taşlama uygulanarak yüzeylerin birleşme esnasında birbirlerine oturma

hassasiyetleri arttırılır. Bu esnada başka bir tezgahda kep tarafının civata oturma yüzeyi freze yardımıyla işlenir. Artık hassas olarak işlenmiş yüzeylere sahip kep ve biyel koluna matkap ve kılavuz yardımıyla civata delikleri açılır. Bu aşamada kep ve biyel kolu birleşmeye hazırdır ancak taşlanan parçaların birleşme esnasında birbirlerine göre yani başka bir deyişle birleşme yüzeylerine paralel ekseninde kaymalarını engellemek için merkezleme pimi delikleri açılır ve ardından sıkı geçme toleransları gözetilecek şekilde merkezleme pimleri çakılır. Merkezeleme pimleri de çakılmış olan kep ve biyel kolları civata sıkma tezgahına alınır ve parçalar birleştirilerek civatları sıkılır.

Bu operasyonun sonunda kep ve biyel kolu birleştirilmiş olur ve çap işleme, yan yüzey taşlama gibi operasyonlarla imalata devam edilir.

Birincil olarak küçük ve büyük ucun ilk kademe çap pasoları alınır. Gerekli tribolojik özellikleri yerine getirmesi için küçük uca çelik üzerine bakır bazlı malzeme ile kaplanmış burç çakılır ve biyel ikinci yani son kademe çap işlemesi için tekrardan çap işleme tezgahına alınır. Ardından küçük ve büyük uç çapları işlenen biyel kolları yan yüzey taşlamaları için taşlama tezgahına geçirilir ve hassas olarak kep ve biyelin birleşik halde genişlikleri istenen seviyeye getirilir. Devamında ise motor yataklarının çalışma esnasında dönmemesi için büyük uç çapına honlama yapılır ve biyel işleme operasyonları tamamlanmış olur. İşlemeleri tamamlanan biyel gerekli temizlik şartlarını sağlayabilmek adına paslanmayı önleyici yağ ile yıkanır ve parça motor montajına hazır hale gelir.

Kep ve biyel tarafı ayrı ayrı dövülerek imal edilmiş biyel kolu toplamda on sekiz farklı operasyondan geçirilerek motor montajına hazır hale getirilmektedir. Bir sonraki bölümde ise kırarak ayırma teknolojisine sahip biyel kolunun operasyon adımları tanıtılacaktır.

3.2 Kebe Kırılarak Ayrılan Biyel Kolu

Bu yöntemde biyel kolu dövme imalatçısından yekpare olarak alınır ve talaşlı imalatlara başlanır. Yöntemin avantajlarından bir tanesi henüz ham parçanın tedarik aşamasında başlar. Seri imalat şartları bakımından gerek lojistik gerekse parça saklama anlamında az parça sayısı üreticiler için her zaman tercih edilmiştir.

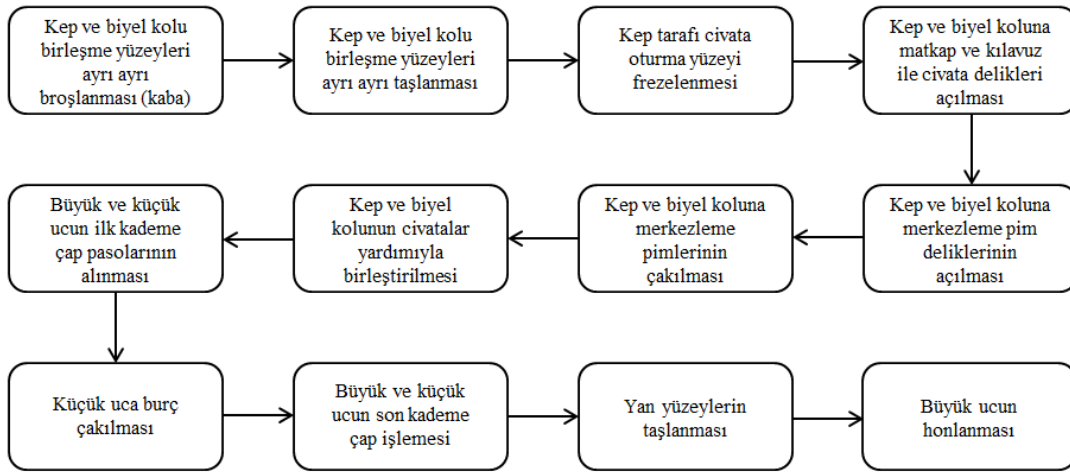


Şekil 3.2 : Yekpare dövülmüş biyel kolu.

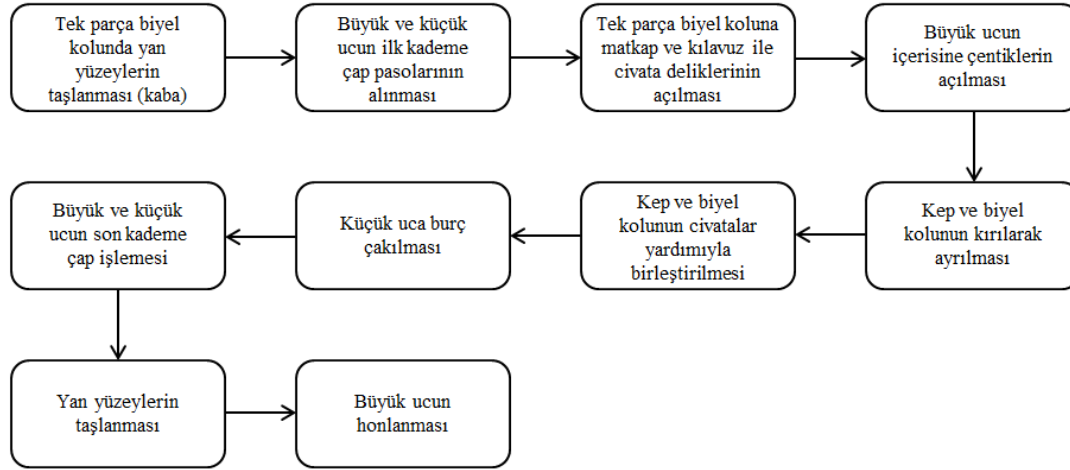
İmalat adımlarından ilki yan yüzeylerin kaba olarak taşlanmasıdır. Yan yüzeyle başlamanın avantajı sonraki adımlarda parçayı fiktürlere doğru şekilde bağlayabilmektir. Yan yüzeyi taşlanan biyel kolunun küçük ve büyük uç kaba çapları işlenmesi için parça bir sonraki operasyona alınır. Çapları da belli bir seviyeye getirilen biyel koluna kırma operasyonu öncesi son olarak civata delikleri ve çentikleri açılır. Böylece parça kırılmaya hazır hale getirilir. Ardından bu iş için özel olarak tasarlanmış kırma tezgahına alınan parçanın kırılarak kebi biyel tarafından ayrılır.

Bundan sonraki operasyon adımları geleneksel yöntemle imal edilmiş biyel kolu adımları ile benzerlik gösterecektir. Yani kırma sonrası ayrılmış kep ve biyelin civatalar yardımıyla tekrardan birleşmesi sağlanır. Ardından küçük uç burcu çakılır ve hassas olarak her iki çap da işlenir. Bitirilen çap işlemlerinin devamında yan yüzeylerin nihai taşlaması yapılır ve yatakların dönmesini engellemek için büyük uçta honlama gerçekleştirilir. Son adım olarak da parça yıkanarak tüm çapaklarından temizlenir ve motor montajına hazır hale getirilir.

Tek tek adımları tanıtilan kırılarak kebi ayrılma teknolojisine sahip biyel kolu toplamda on iki adımda motor montajına hazır hale getirilmektedir. Aşağıda şekil 3.3 ve 3.4'te bir kez daha adımların karşılaştırılması görülebilmektedir.



Şekil 3.3 : Geleneksel yöntemle biyel kolu imalat adımları.



Şekil 3.4 : Kırılarak kebi ayrılan biyel kolu imalat adımları.

Geleneksel biyel kolu imalatına kıyasla kırarak kebi ayırma imalat yöntemi sadece operasyon adımları sayısı bakımından yaklaşık % 30 avantaj sağlamıştır. Bunun yanında süre ve maliyet detayları tezin sonuçlar kısmında ayrıca iredelencektir. İmalat adımları ötsinde biyel kolu büyük ucu motora montajı sonrasında içerisindeki yataklarla birlikte çalışmaktadır. Çalışma esnasında hidrodinamik yağlama prensibi ile oluşan yağ filmi kalınlığı ise 0,4 – 0,5 mikron mertebelerine kadar düşebilmektedir. Bunun anlamı gerek şekilsel gerekse sayısal değer anlamında biyel büyük ucunda mükemmele yakın yuvarlaklık değerleri beklentisidir. Aksi halde yüzeyde oluşabilecek bir kaç mikron değerindeki düzgünsüzlükler yağ filminin kolayca kırılmasına ve motorun yatak sarmasına sebebiyet verebilecektir.

Anlatılan bu hata tipi kırma operasyonunun avantajları yanında ne kadar önemli ve dikkatle gerçekleştirilmesi gereken bir operasyon olduğunu ortaya koymaktadır.

Darbeyle kırma sonrası kırma yüzeyleri sanki parça hiç ayrılmamış gibi mikro ölçekte birleşme eğiliminde olacaklardır ancak büyük uç kırma esnasında kaçınılmaz olarak plastik şekil değiştirecek ve bu etkiyi üzerinde taşıyacaktır. Hatırlanacağı üzere kırma operasyonu sonrası kep ve biyel kolu birleştirilmesinin akabinde nihai çap işlemesi gerçekleştirilmişti. Ancak montaj esnasında kep yataklanmak üzere bir kez daha açılacağından kalıcı deformasyonlar tekrardan etkisini gösterecektir ve yuvarlaklık değerleri 4 – 5 mikronların üzerine çıkarak yağ filminin bozulmasına sebebiyet verecektir.

Bu süreçler ışığında ilk olarak kırma operasyonun maliyet ve imalat kolaylığı açısından devreye alınması, ardından kırma operasyonun optimize edilmesi tezin ana motivasyon kaynaklarını oluşturmuştur.

Kırma operasyonu özelinde ise çentik açma tipi, çentik derinliği, kırma yüzey kesit alanı parametreleri ve C70S6 çeliğine uygulanan ısıtma işlemleri detaylıca incelenerek minimum deformasyon ile kebin biyelden ayrılması hedeflenmiştir.

4. MALZEME VE METOD

Tezin bu aşamasında ilk etapta çalışılan malzeme ve ardından biyel kolu üzerinde gerçekleştirilen çalışmaların detayları üzerinde durulacaktır. Giriş kısmında özet olarak anlatıldığı gibi; biyel kolu kırma operasyonunu optimize edebilmek maksadıyla yarı mamul parça üzerinde açılan çentiklerin derinliği, çentik açma tipi ve kesit genişliği üzerinde çalışılmıştır. Ardından malzeme yönüyle de sıcak dövme metodu ile üretilmiş ham biyel koluna gerilme giderme ve su vermenin akabinde üç farklı sıcaklıkta temperleme işlemi uygulanmıştır.

Hazırlanan numuneler mikroyapı, sertlik, çentik darbe ve çekme testi yönünden incelenmiş, ardından kırma yüzeyleri elektron mikroskobu altında kırılma özellikleri bakımından değerlendirilmiştir. Devamında ise kırılmış kepler tekrardan biyel koluyla birleştirilerek deformasyon yani yuvarlaklık ölçümleri yapılmıştır. Tüm bu çalışmaların birbirleriyle olan bağlantıları ortaya konup optimum çözüme ulaşmaya çalışılmıştır.

4.1 Biyel Kolu Malzemesi

Ağır ticari araç motoru biyel kolu olarak kullanılan parça C70S6 çeliğinden imal edilmiştir. Kimyasal bileşimi çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : C70S6 çeliği kimyasal bileşimi.

C70S6	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Al	%Cu	%V
İstenen	0.67	0.15	0.45	-	0.055	-	-	-	-	-	0.030
	0.73	0.25	0.55	0.020	0.075	0.20	0.05	0.20	0.01	0.30	0.060
Bulunan	0.69	0.23	0.53	0.008	0.063	0.12	0.01	0.06	0.005	0.13	0.048

4.2 Biyel Kolu Üretimi ve Büyük Uç Üzerinde Çentik Açma

Biyel kolu şekil 4.1’de görüldüğü gibi tek parça sıcak dövme yöntemi ile üretilmiştir. İki uç kısmında büyük uç ve küçük uç olarak adlandırılan dairesel boşluklar bulunmaktadır. Bu dairesel boşluklardan büyük olanı tezin ilk kısmında da anlatıldığı gibi krank miline bağlanırken, küçük uç bir pim yardımıyla pistonla bağlanır ve

böylece düşey ekseninde patlama ile alınan gaz kuvveti krank miline aktarılırak tork oluşturulmuş olur.



Şekil 4.1 : Tek parça üretilen ve üzerinde çalışılan biyel kolu.

Tezin de ana çalışma noktasını oluşturan biyel kolu büyük ucu kırma operasyonu ve operasyonun devreye alınması biyel kolunun krank miline bağlanabilmesi için kep kısmının ayrılması esasına dayanır. Operasyon adımları detaylıca tartışılan geleneksel biyel kolu imalatında kep ve biyel kısmı ayrı ayrı imal edilirken, yüzeyler yapılan bir çok operasyon sonrasında birbirlerine bağlanabiliyordu. Kırma yönteminde ise büyük uca açılan simetrik çentikler ve ardından özel bir tezgahta yapılan darbeli kırma operasyonu ile kep kolayca biyel tarafından ayrılabilir.

4.2.1 Çentik açma ve kırma tezgahı

Kırılarak kebi ayrılan biyelerde çentik özellikleri, tipi ve açma yöntemi büyük önem arz etmektedir. Bunun yanında karşılıklı açılan çentiklerin birbirlerine göre konumu darbe sonrası çatlağın ilerlemesi ve deformasyon bakımından diğer önemli faktörleri oluşturmaktadır.

Tezin literatür kısmında bahsedildiği üzere 90'lı yılların başında devreye alınmaya başlanan kırılarak kep ayırma yönteminde ilk etapta broş yöntemi ile çentikler açılmaya başlanmıştır. Ardından gelişen teknoloji ile yüksek frekanslı lazerler ve tel erezyon yöntemi diğer kullanılan metodlar haline almıştır.

Broşla açılan çentiklerde üç ana çentik ölçüsü söz konusudur. Bu ölçüler broş takımının geometrisinden gelmekte olup aşağıdaki gibi sıralanmaktadır. Şekil 4.2 de kullanılan broş takımını göstermektedir.

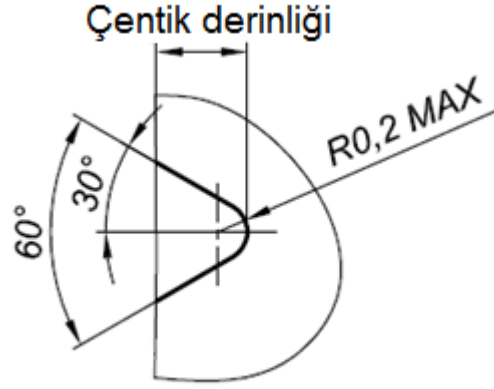
- Çentik derinliği
- Çentik dibi yarı çapı
- Çentik açısı



Şekil 4.2 : Kullanılan broş takımı.

Her üç parametre de istenen çentiğin özelliklerine bağlı olarak değiştirilebilmektedir. Ancak azalan çentik dip yarı çapı ve artan derinlik seri imalat şartları altında hızlı takım aşınması ile sonuçlanmaktadır.

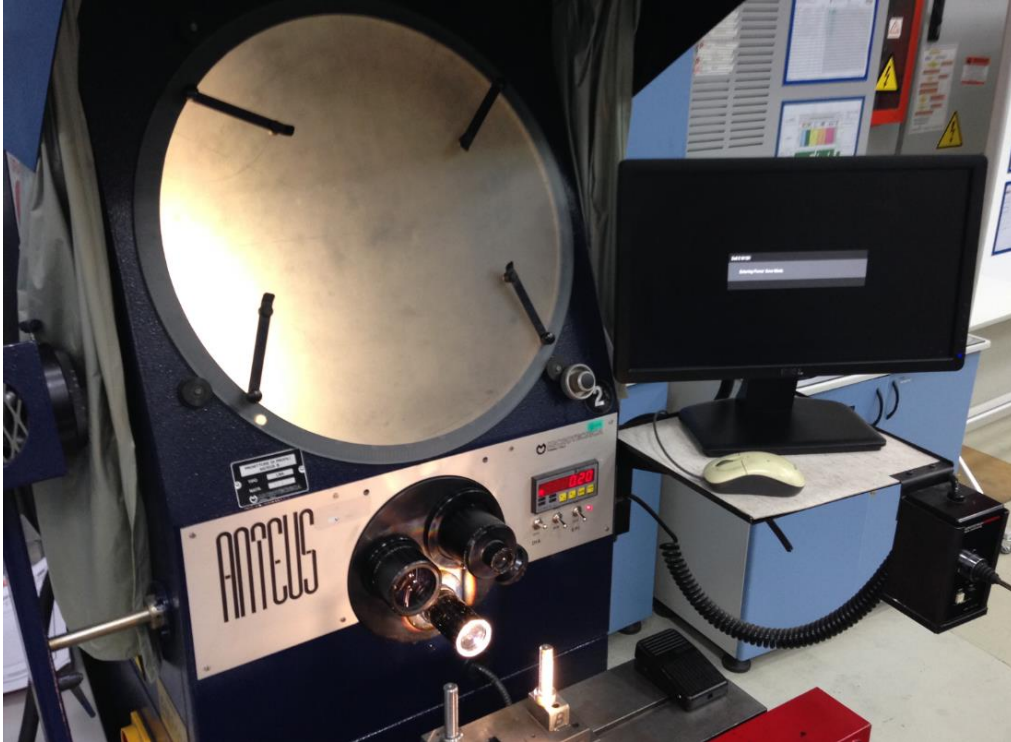
Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda 0,6 mm, 0,8 mm ve 1,0 mm olarak çentikler üç farklı derinlikte şekil 4.3'teki gibi açılmıştır.



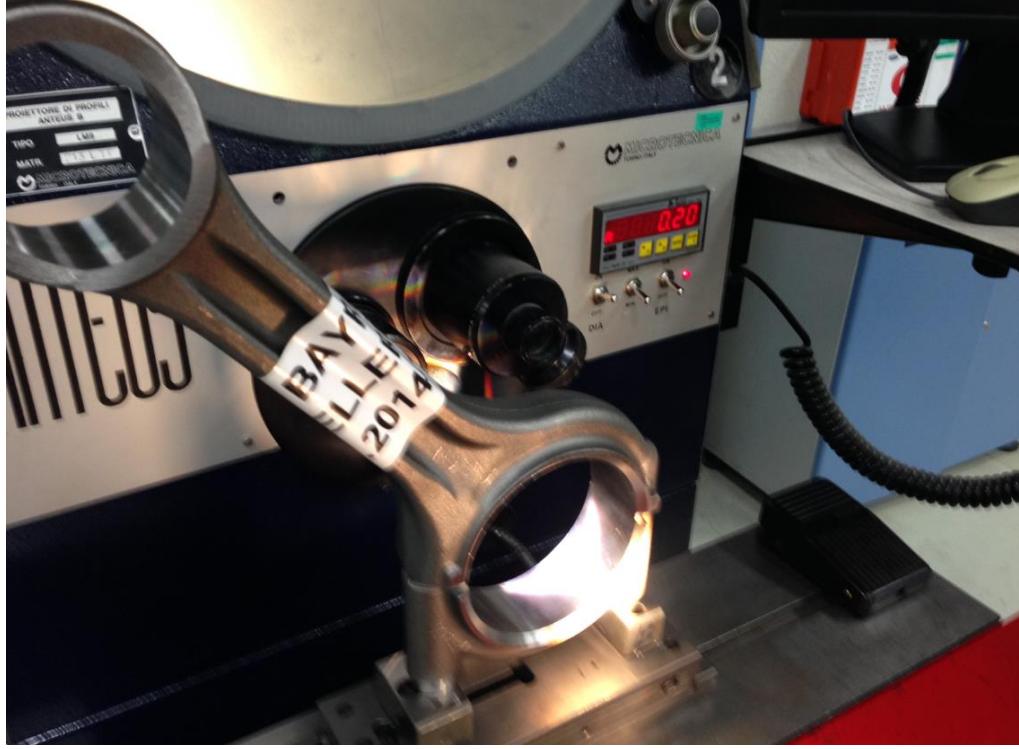
Şekil 4.3 : Broşla açılan çentiklerin geometrisi

Yukarıda bahsedildiği üzere çentik açısı takımın geometrisinden gelmekte olup, kırma operasyonu üzerinde etkisi yoktur. Dip radius ise yapılan literatür çalışmalarına göre optimum olarak en fazla 0,2 mm tespit edildiğinden daha düşük değerler üzerinde çalışılmamıştır.

Açılan çentiklerin derinlikleri her parça üzerinde Sigmascope marka optik gölge ölçümü (*Shadowgraph*) cihazı ile ölçülmüştür. Ayrıca çentik dip yarıçaplarının 0,2 mm'yi aşmadığı tespit edilmiştir. Şekil 4.4 ve 4.5 ölçüm ekipmanının ve biyel kolunun ölçülürkenki fotoğraflarını göstermektedir.

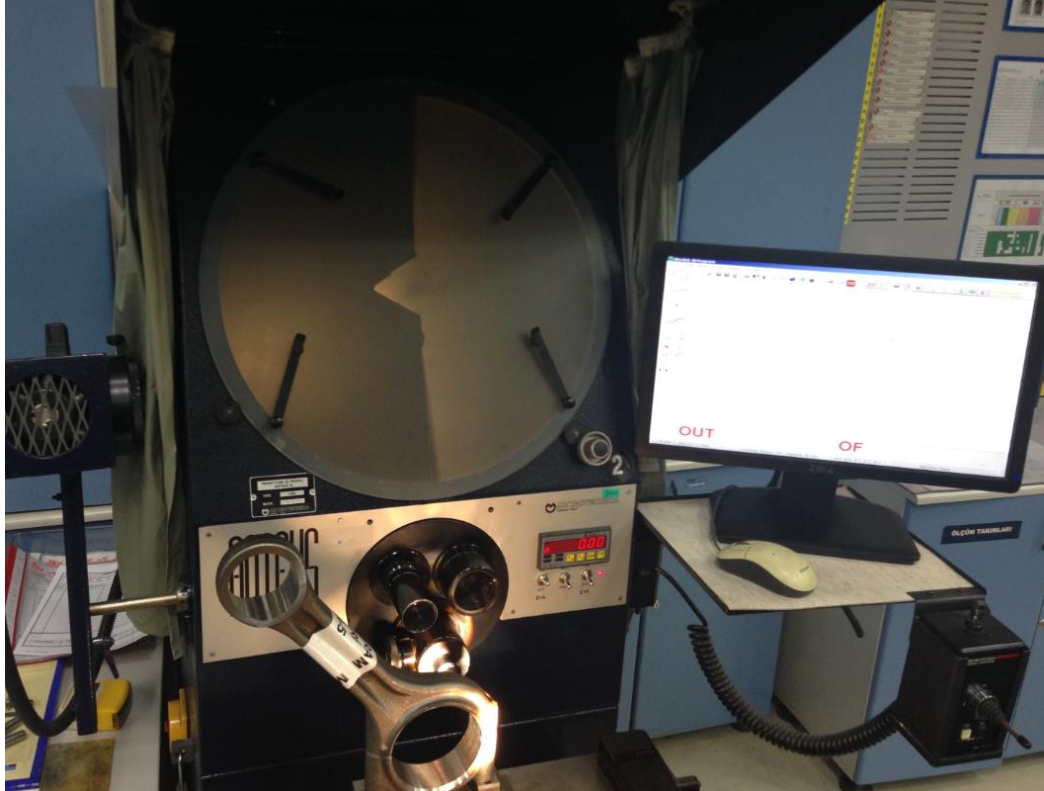


Şekil 4.4 : Optik gölge ölçüm ekipmanı.



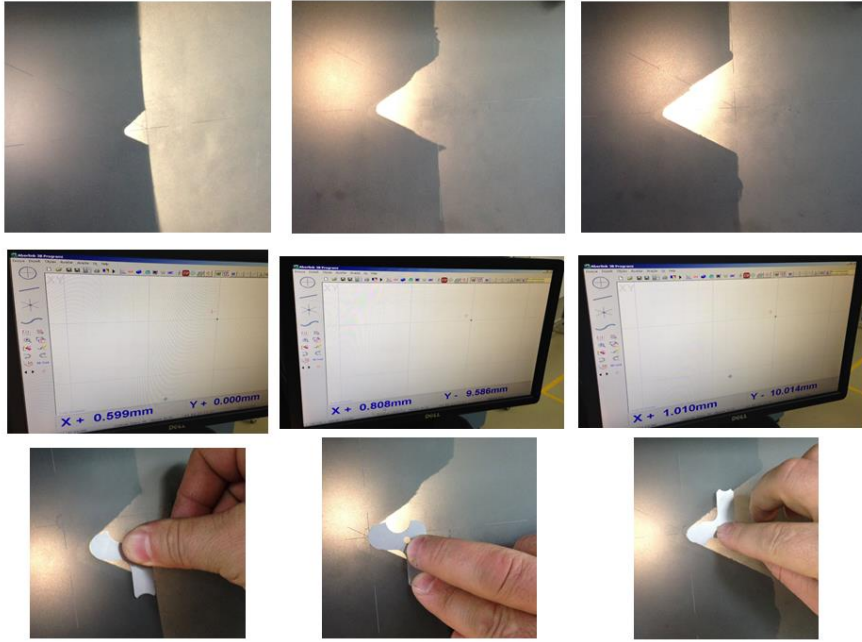
Şekil 4.5 : Optik gölge ölçüm ekipmanında biyel kolu çentik ölçümü.

Ölçülen çentikler ise şekil 4.6'daki gibi gölge ölçüm ekipmanının ekranına yansımaktadır ve mesafe kontrolü ile derinlikler ölçülmüştür.



Şekil 4.6 : Çentik görünütüsü yansımaları ve derinlik ölçümü.

Çalışma kapsamında hazırlanan üç farklı derinlikteki çentiklerin örnek derinlik ve dip radyus ölçümleri ise şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 : Sırasıyla 0,6 mm, 0,8 mm ve 1,0 mm’lik çentiklerin derinlik ve dip radyus ölçümleri.

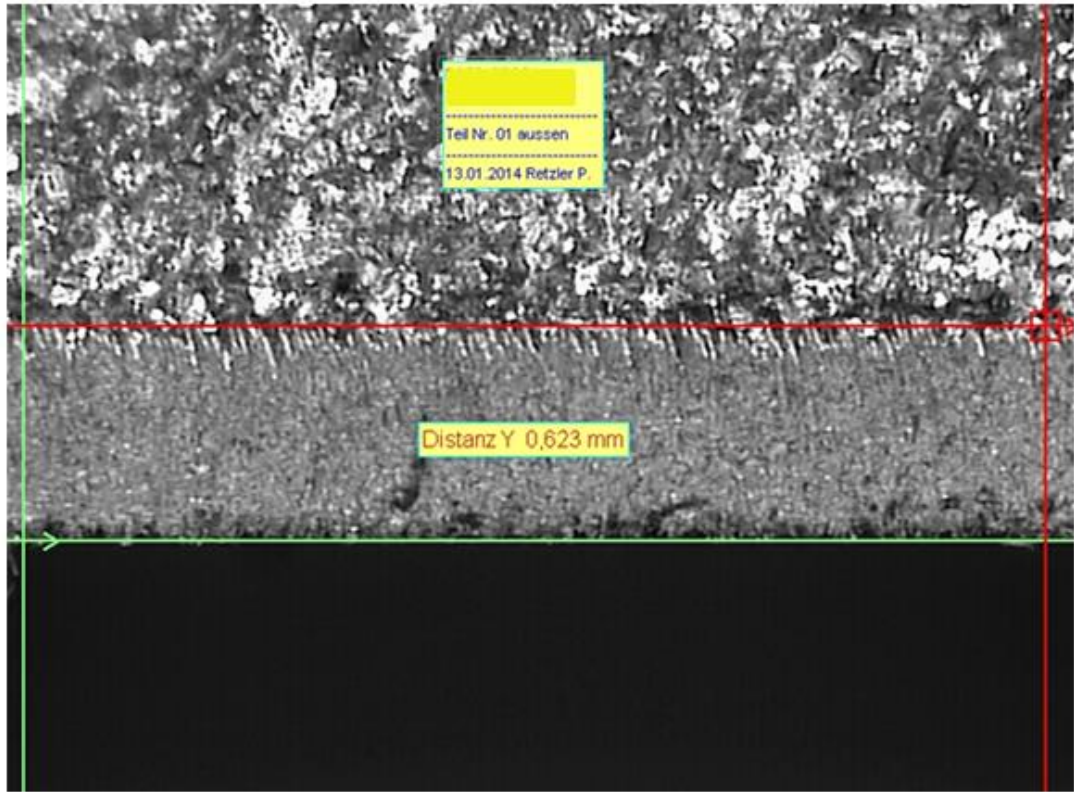
Üç farklı derinlikte broş yöntemi ile açılan çentiklerin ardından deneysel çalışmalara lazer yöntemi ile devam edilmiştir. Lazerin çentik açmadaki avantajı literatür kısmında da belirtildiği gibi temassız bir operasyon olması, yüksek kaliteli üretim kabiliyeti vermesi ve yüksek hassasiyetle tekrarlanabilir olması olarak sıralanmaktadır. Tüm bunların ötesinde kullanılan yüksek frekanslı kaynak neticesinde çentik dibinde yarı çaptan bahsedilemeyecek şekilde yüksek stres konsantrasyonu oluşturması operasyonun diğer önemli yanını oluşturmaktadır. Bu özellik de kırma operasyonu esnasında oluşacak kalıcı şekil değişimi ve deformasyonlar bakımından biyel kolunun imlatını önemli ölçüde etkileyebilecektir.

Bu kapsamda Alman Alfing Kessler Sondermaschinen GmbH firmasında biyel kollarına lazer metodu ile çentik açma operasyonu uygulanmıştır. 0,6 mm tek derinlikte açılan çentiklerde aşağıdaki teknik özelliklere sahip lazer kaynağı kullanılmıştır.

- Ortalama güç: 50 kW
- Puls zirve gücü: 8 kW
- Puls frekansı: 200 Hz

- Güç yoğunluğu: 800 MW/cm²
- Puls enerjisi: 0,001 J

Broşla açılan çentiklere kıyasla lazerde çentik açısı ve dip yarı çapı ölçüleri ortadan kalkmaktadır. Bunun sebebi bir ışın kaynağı olduğundan dolayı lazerin açısal anlamda yüzeyden talaş kaldırmaması ve yüksek frekans ile yüzeyi dağladığından dipte bir yarı çap oluşturmamasıdır. Bu anlamda çentik ölçümleri sadece derinlik ile sınırlandırılmıştır. Ancak açısal anlamda yüzeyde bir form oluşturmadığından derinlikler gölge ölçüm ekipmanında ölçülmemiştir. Bunun yerine Nikon SMZ800N Stereo mikroskop derinlik ölçümleri için kullanılmıştır. Şekil 4.8 deneysel çalışmalarda kullanılan lazer çentiğinin derinlik ölçümünü göstermektedir.



Şekil 4.8 : Lazer çentik derinliği.

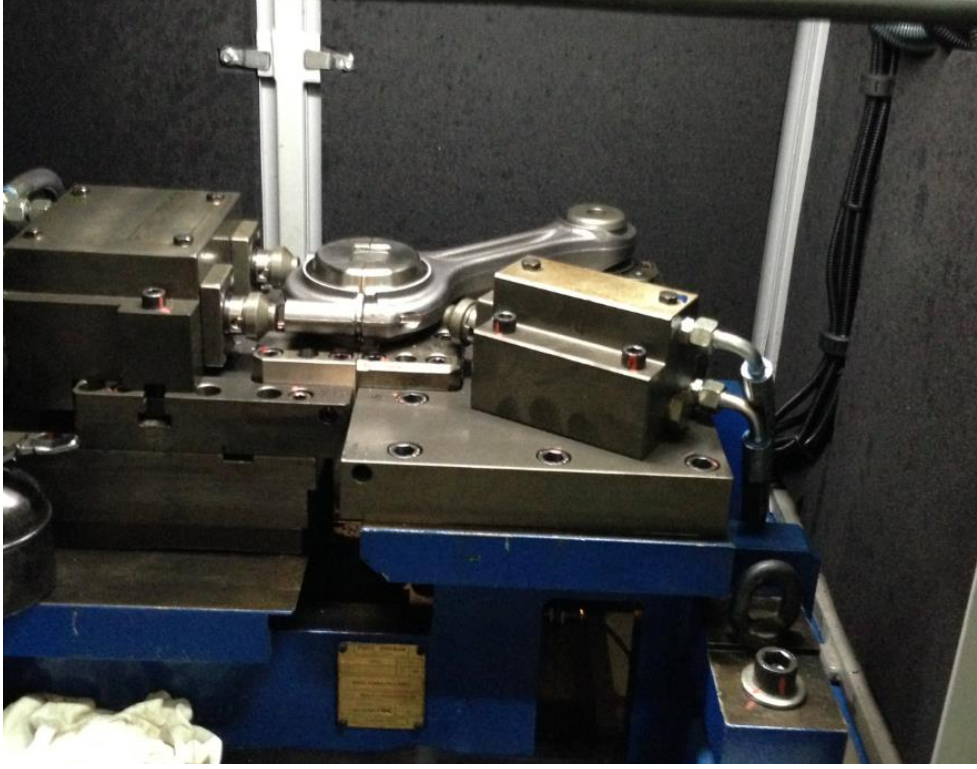
Kırma operasyonu bu işlem için özel olarak tasarlanmış tezgahta gerçekleştirilmiştir. Hidrolik basınç prensibiyle çalışan tezgahta 6 derecelik bir açığa sahip kama büyük ucu içerisindeki çekiçleri hareket ettirerek kebin biyel kolundan ayrılmasını sağlamıştır. Hidrolik bir pompa yardımıyla 130 – 140 bar arası sabit olarak basınçlanan tezgahta kırılma darbe şeklinde gerçekleşmiştir. Literatür özetinde hatırlanacağı üzere 0,1 m/s ve üzerindeki kama hızlarında sünek kırılma etkisi

ortadan kalmakta ve parçalar darbeye kırılmaktaydı. Kullanılan tezgahın ise kama hızı kataloğunda 5 m/s olarak verilmiştir. Bu da darbeli kırılma için gerekli hızın sağlandığını göstermektedir. Dolayısıyla hidrolik hat basıncı ya da kama hızı ile ilgili parametreler üzerinde çalışılmamıştır.

Şekil 4.9 ve 4.10’da tezgahın fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.9 : Kırma tezgahı.



Şekil 4.10 : Biyel kolu ve fikstürü ile kırma tezgahı.

4.3 Biyel Kollarına Uygulanan Isıl İşlemler

Sıcak dövme metodu ile imal edilen biyel kollarına kırılma ve şekil değişimi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla iki farklı ısı işlem uygulanmıştır.

Bunlardan ilki gerilim gidermedir. Bu işlemle parçada dövme sonucu olası iç gerilmelerin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla biyel kolları ısı işlem fırınında A1 sıcaklığının altında 650°C 'de iki saat tutulmuş ve müteakiben yavaş bir şekilde soğutulmuştur. Şekil 4.11'de gerilim giderme işlemine maruz kalmış biyel kolunun fotoğrafı görülebilmektedir.



Şekil 4.11 : Gerilim giderme uygulanmış biyel kolu.

İkinci işlem ise su verme ve temperlemedir. Uygulanan ısı işlem ile su verme sonucu daha sert bir yapı elde edilip, müteakiben parçaların temperlenerek daha kararlı içyapıya ulaşılması hedeflenmiştir. Bu maksatla biyel kolları ilk etapta östenit bölgesi olan 850 °C’de %70 potansiyelinde 1 saat tutulmuştur. Ardından 60 °C’de yağda 30 dakika su verilmiştir. Böylece martensitik yapı elde edilmiştir. Su verilip sertleştirilen biyel kolları üç farklı şartta temperlemiştir. Temperleme detayları aşağıdaki gibidir.

- 180 °C’de 1,5 saat temperleme
- 450 °C’de 1,5 saat temperleme
- 620 °C’de 1,5 saat temperleme

Resim 4.12, 4.13 ve 4.14’te farklı sıcaklıklarda temperleme tavlaması uygulanmış biyel kollarının fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.12 : 180 °C’de temperlenen biyel kolu.



Şekil 4.13 : 450 °C’de temperlenen biyel kolu.

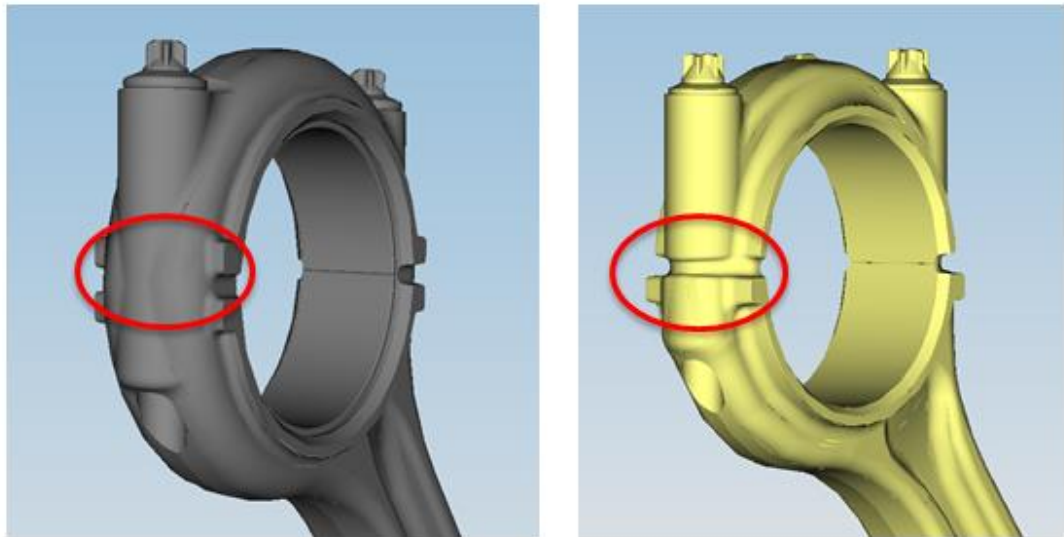


Şekil 4.14 : 620 °C’de temperlenen biyel kolu.

4.4 Biyel Kolu Kırılma Kesit Alanı Değişimi

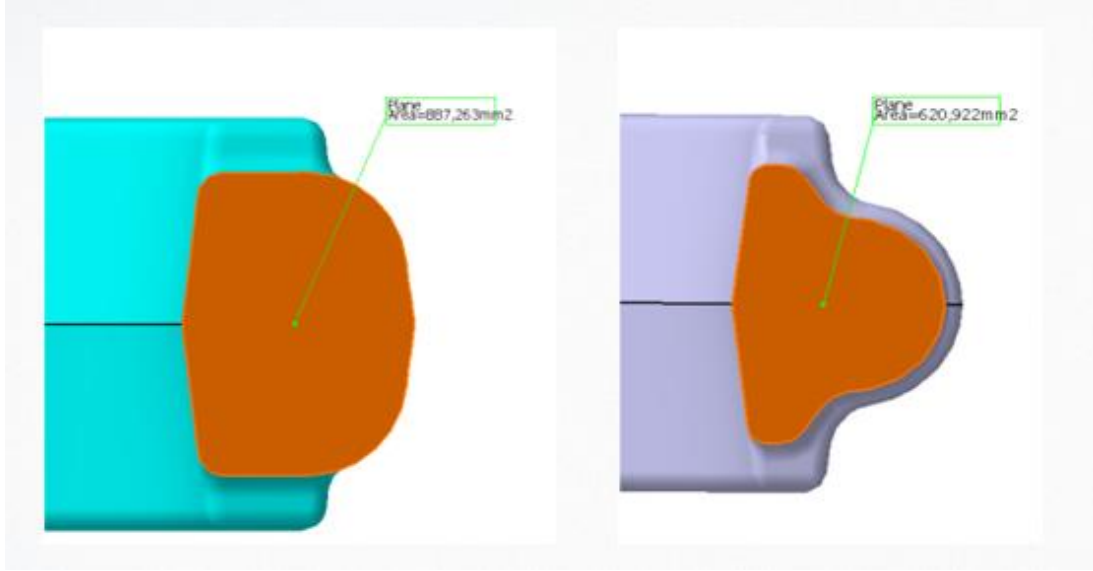
Tez çalışmasının deneysel malzeme hazırlığının son bölümünde kırılma alanının deformasyon üzerindeki etkisi incelenmiştir. Motor çalışma şartları altında biyel kolunun olası dayanım problemlerini engelleyebilmek ve destek planı hazırlayabilmek için özellikle kırılma bölgesinde kesiti kalın biyel kolları hazırlanmıştır. Bu parçalara da Almanya’daki Alfing firmasında lazer metodu ile çentik açılmıştır ve tez çalışması kapsamına dahil edilmiştir. Kesit kalınlığının kırılma operasyonu esnasında sünek ve gevrek kırılma davranışı açısından etkileri değerlendirilmiştir.

Şekil 4.15’te kırılma alanının değişimi verilmiştir.



Şekil 4.15 : Biyel kollarında kırılma kesit alanı değişimi.

İlk durumdaki alan 620,922 mm² iken kesit arttırılmış durumda toplam kırılma alanı 887,263 mm²'ye yükseltilmiştir. Şekil 4.16 üç boyutlu çizim programı yardımıyla toplam değişimi göstermektedir.



Şekil 4.16 : Sayısal olarak kesit alanı değişimi.

Dövülmüş teste hazır kalın kesitli biyel kolunun kırılma öncesindeki fotoğrafı da şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17 : Dövme sonrası kırılmaya hazır kalın kesitli biyel kolu.

4.5 Uygulanan Tasarım Parametreleri Sonrası Biyel Kolu Parça Listesi

Yukarıdaki kısımlarda detaylıca bahsedilen çentik derinliği, çentik açma tipi, ısıtım işlem ve kırılma alanı tasarım parametreleri biyel kolları üzerinde deney tasarımı mantığıyla tek tek uygulanmıştır. Ayrıca parçaların her birine ayrı isim atamaları yapılmıştır. Çizelge 4.2’de biyel kolları tipleri ve uygulanan parametreler parça isimleriyle birlikte gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Deneylerde kullanılan biyel kolları listesi.

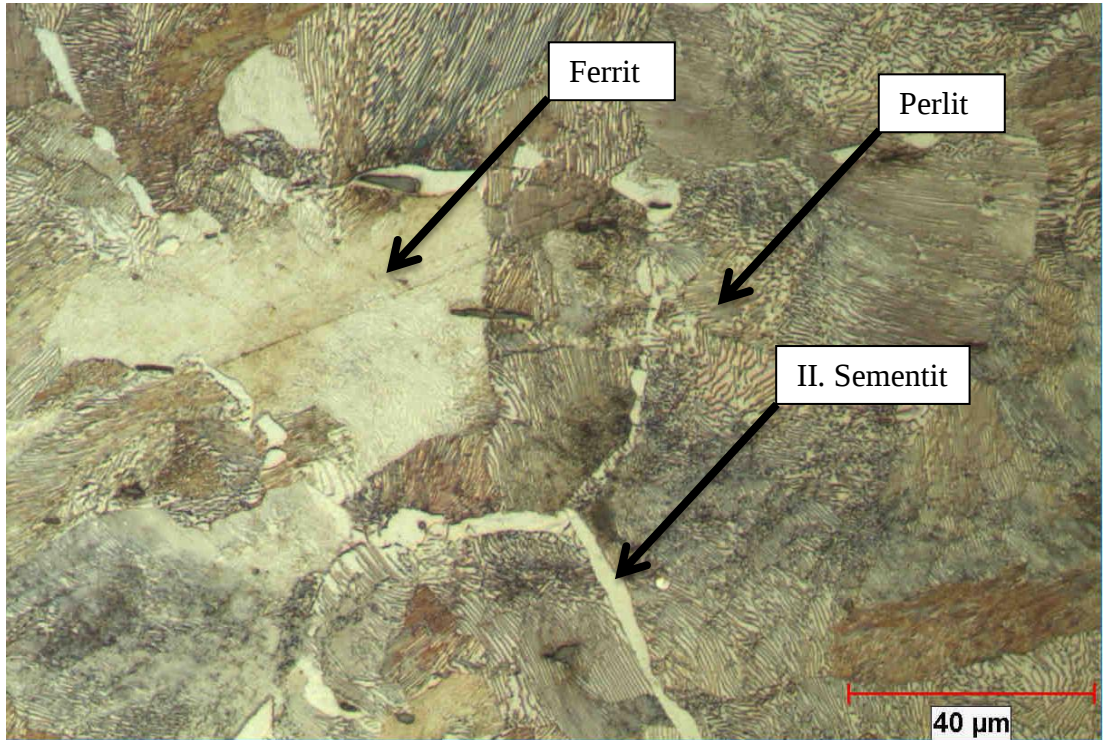
Isıl İşlem Tipi	Çentik Derinliği (mm) ve Yöntemi	Sembolik Gösterimi
Isıl İşlem Uygulanmamış	0.6 Broş	B6O
Isıl İşlem Uygulanmamış	0.8 Broş	B8O
Isıl İşlem Uygulanmamış	1.0 Broş	B10O
Isıl İşlem Uygulanmamış	0.6 Lazer	L6O
Gerilim Giderme	0.6 Broş	B6G
Gerilim Giderme	0.8 Broş	B8G
Gerilim Giderme	1.0 Broş	B10G
Gerilim Giderme	0.6 Lazer	L6G
Su Verme+Temperleme 1 (180 °C)	0.6 Broş	B6T1
Su Verme+Temperleme 1 (180 °C)	0.8 Broş	B8T1
Su Verme+Temperleme 1 (180 °C)	1.0 Broş	B10T1
Su Verme+Temperleme 1 (180 °C)	0.6 Lazer	L6T1
Su Verme+Temperleme 2 (450 °C)	0.6 Broş	B6T2
Su Verme+Temperleme 2 (450 °C)	0.8 Broş	B8T2
Su Verme+Temperleme 2 (450 °C)	1.0 Broş	B10T2
Su Verme+Temperleme 2 (450 °C)	0.6 Lazer	L6T2
Su Verme+Temperleme 3 (620 °C)	0.6 Broş	B6T3
Su Verme+Temperleme 3 (620 °C)	0.8 Broş	B8T3
Su Verme+Temperleme 3 (620 °C)	1.0 Broş	B10T3
Su Verme+Temperleme 3 (620 °C)	0.6 Lazer	L6T3
Isıl İşlem Uygulanmamış Kalın Kesitli	0.6 Lazer	L6O-K

Bu noktadan sonra deney tasarımı mantığıyla hazırlanan parçalar üzerinde optimizasyon amaçlı hangi kontrol yöntemleri uygulandığından bahsedilecektir.

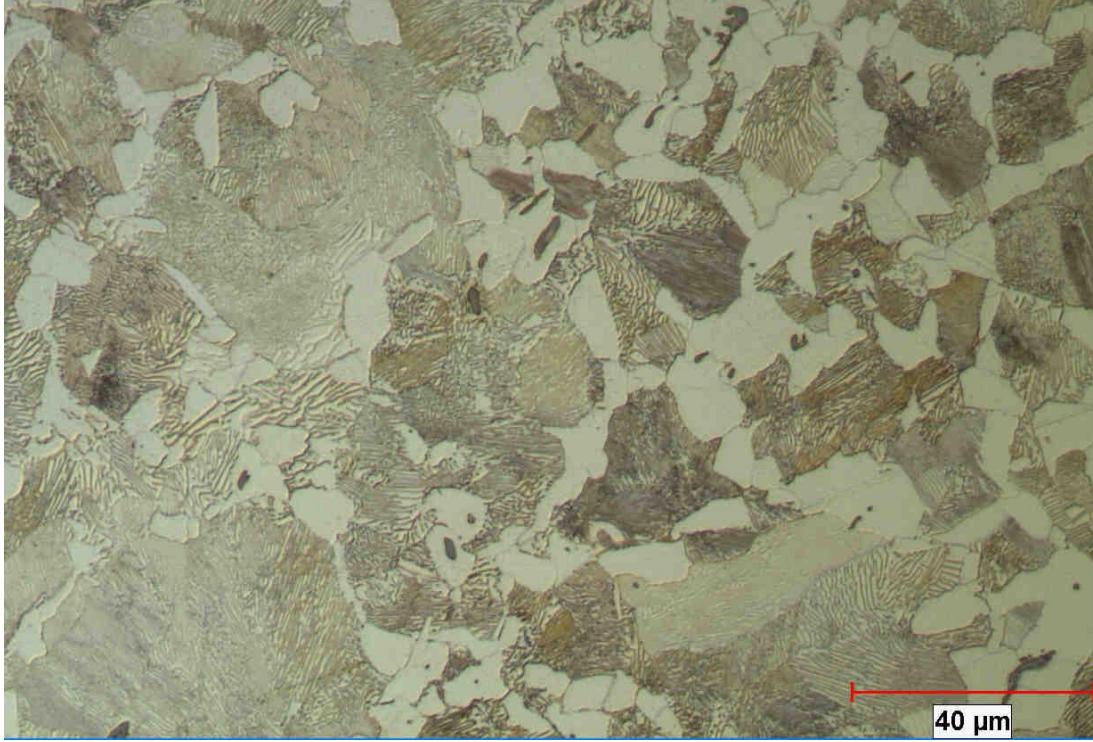
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

5.1 Mikro Yapı İncelemeleri

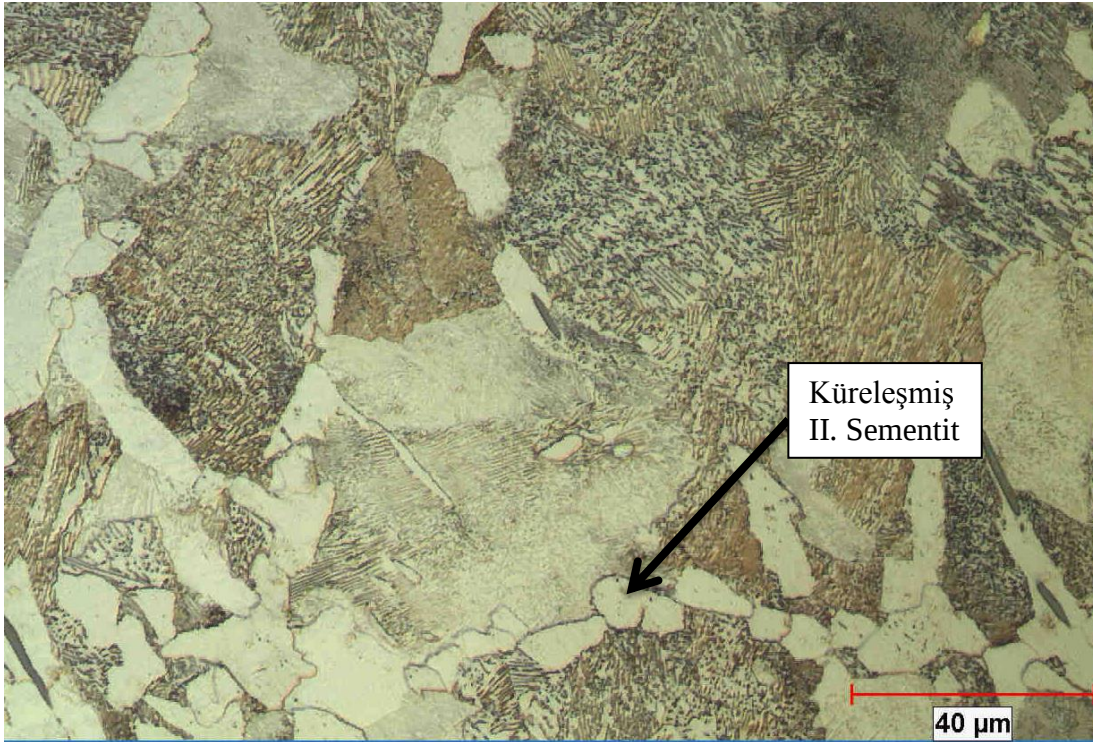
Biyel kolları kırıldıktan sonra, kırılmış biyel kolları yüzeyine dik yönde numuneler çıkartılmış ve metalik parçalar mikro yapı incelemeleri için bakalite alınmıştır. Metalografik parlatma usulleri gereğince 180, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 nolu su zımparası ile numunelerin yüzey pürüzlüğü azaltılmıştır. Bu işlemler sonrası, 1 mikron ve 0,3 mikronluk alümina parlatma solüsyonları kullanarak numuneler parlatılmıştır. Parlatılan numuneler mikroskobik inceleme için %3'lük Nital ile dağlanmıştır ve Nikon LE150 marka optik mikroskop kullanılarak içyapı görüntüleri alınmıştır. Isıl işlem uygulanmış ve uygulanmamış biyel kollarına ait mikroyapı görüntüleri şekil 5.1 ve 5.6 arasında verilmiştir.



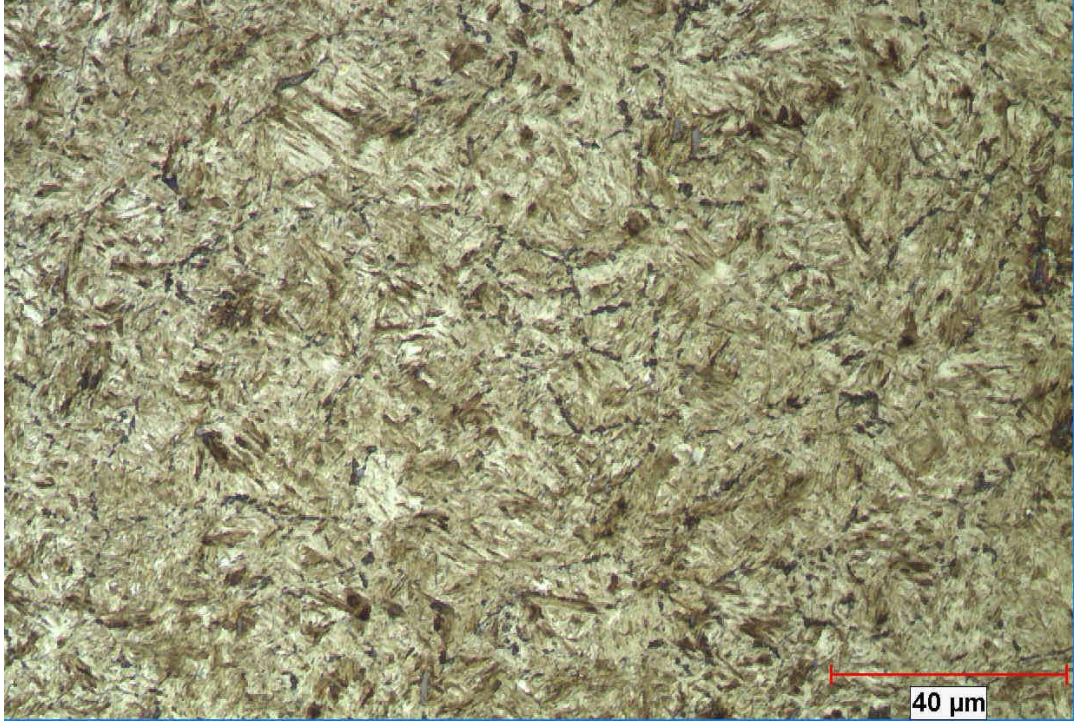
Şekil 5.1 : O grubu malzeme mikro yapı görüntüsü.



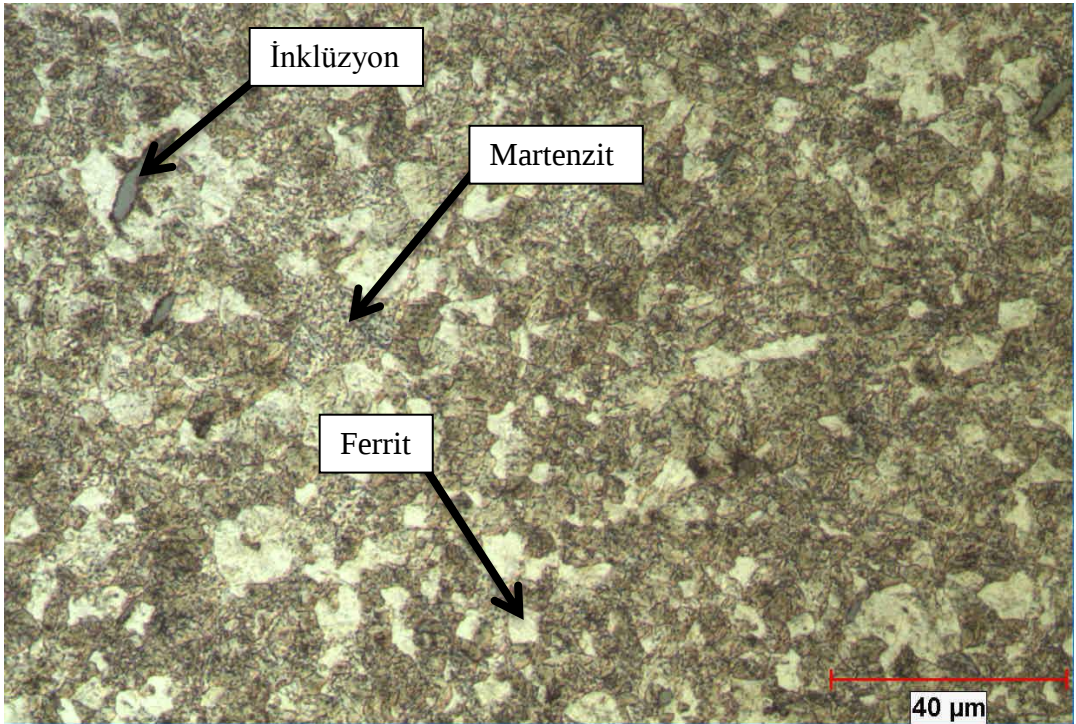
Şekil 5.2 : O-K grubu malzeme mikro yapı görüntüsü.



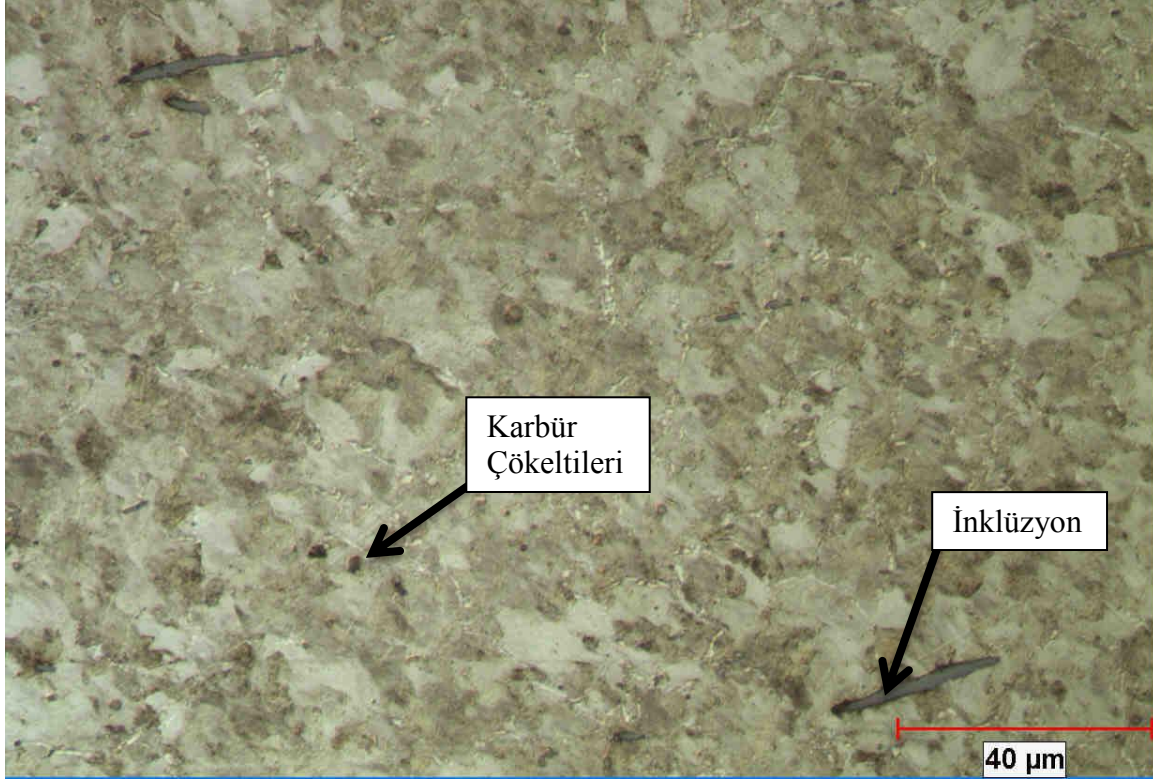
Şekil 5.3 : G grubu malzeme mikro yapı görüntüsü.



Şekil 5.4 : T1 grubu malzeme mikro yapı görüntüsü.



Şekil 5.5 : T2 grubu malzeme mikro yapı görüntüsü.



Şekil 5.6 : T3 grubu malzeme mikro yapı görüntüsü.

Mikro yapı yorumlarına sıcak dövme sonrası ısıtılma işlemi görmemiş O grubu biyel malzemesi ile başlanmıştır. Bu grupta iç yapının yüksek oranda perlit, az miktarda ferrit ve bazı tane sınırlarında II. sementit fazının çökelmesi şekil 5.1’den görülmektedir. O-K grubu (kalın kesitli biyel kolu) parçaları O grubu parçalarla farklı zamanlarda dövülmüştür ancak aynı kimyasal bileşime sahip olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla şekil 5.2’de görüldüğü gibi O-K grubu biyel kolunun iç yapısında doğal olarak ferrit ve perlit fazları gözlenmektedir. O grubuna göre daha fazla ferrit gözlenirken, II. sementit fazı görülmemektedir.

Gerilim giderme tavlama uygulanmış G grubu numunelerin iç yapısına ısıtılma işlemi görmemiş malzeme yapısına hemen hemen benzemekle birlikte II. sementit fazının daha kaba olduğu görülmektedir.

T1, T2 ve T3 grubu malzemelerde O ve G grubu malzemelerden farklı iç yapıların olduğu görülmektedir. Şekil 5.4’te T1 grubu malzemesi iç yapısının çok yüksek oranda martenzitik olduğu görülmektedir. Martenzitik yapıyla birlikte küçük küçük ferritik alanlar ve de matriks içinde kaba çökeltiler görülmektedir. Su verme sonrası temperleme yapılmasına rağmen martenzitik yapının korunduğu aynı zamanda

gözlenmektedir. Martenzitik yapının korunmasının nedeni olarak da temperleme süresinin kısa ve sıcaklığın düşük olması söylenebilir.

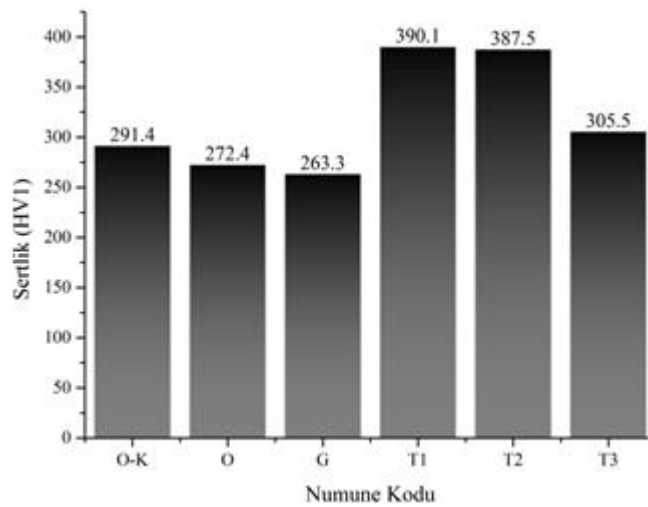
T2 grubu malzemenin içyapısına bakıldığında temperleme sonrası ferrit fazının oluştuğu ve kısmi olarak martenzitik alanların gözlemlendiği söylenebilmektedir. T1 grubunda olduğu gibi matriks içine hapsolmuş kaba çökeltiler görülmektedir. Bu malzemede temperleme sıcaklığının 450 °C olması ve sürenin 1,5 saat olmasından dolayı tetragonal kafes içerisinde zorunlu olarak bulunan karbon atomlarının yayınması için şartlar uygun olduğundan ferrit fazı oluşmuştur.

Şekil 5,6'ya bakıldığında ise T3 grubu malzeme içyapısında ferritik alanlar gözlenmektedir. Martenzit fazı yapıdan kaybolmuştur ve sıcaklığının (620 °C) yüksek oluşu hacim merkezli martenzit fazının ferrite dönüşümünü sağlamıştır.

5.2 Mikro Sertlik Ölçümleri

Sağlıklı bir iz yüzeyi görüntüsü elde edebilmek amacıyla ilk etapta sertlik ölçümlerinin gerçekleştirileceği numuneler metalografik yöntemler ile parlatılmıştır. Uygulanan metalografik yöntemlerini ise detayı mikro yapı kısmında verilmiştir.

Ölçümler Tronic marka sertlik test cihazı ile numunelere 1 kg'lık yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune üzerinde on farklı bölgeden ölçümler alınmıştır. Malzeme gruplarına göre sınıflandırılmış sertlik ölçüm ortalamaları ve sonuçları sırasıyla şekil 5.7 ve çizelge 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.7 : Numune sertlik ölçümleri ortalaması sonuçları.

Çizelge 5.1 : Numunelerin sertlik ölçüm sonuçları.

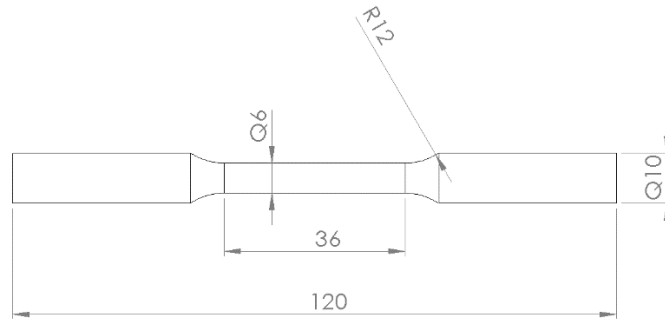
HV1	Numune					
Ölçüm No	O-K	G	O	T1	T2	T3
1	286,5	259,1	270,2	388,9	382,8	310,0
2	275,8	261,3	273,4	394,1	377,4	304,0
3	285,1	270,2	266,9	395,8	392,3	302,5
4	301,7	255,5	271,1	384,0	390,6	303,6
5	296,0	263,8	270,8	387,8	397,5	304,8
6	290,8	268,5	266,3	385,0	385,0	309,5
7	297,1	269,8	281,9	388,4	386,1	305,2
8	293,8	258,2	278,5	393,1	381,2	303,0
9	297,5	260,0	275,1	398,2	390,0	305,0
10	290,0	266,6	269,8	385,6	391,7	307,2
Ort.	291,4	263,3	272,4	390,1	387,5	305,5

Bu sonuçlara göre en yüksek sertlik değeri T1 grubu malzemelerde tespit edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise G grubu malzemelerde görülmüştür. O ve O-K gurubu malzemeler de ısıtıl işlem görmemiş olmalarına rağmen birbirlerine kıyasla aralarında % 7 oranında sertlik farkı gözlemlenmektedir. Farkın dövme ve soğutma şartlarından kaynaklandığı söylenebilir. G grubu malzemelerde ise en düşük sertlik değeri elde edilmesinin nedeni gerilim giderme tavlamaının yeniden kristalleşme etkisi yapması olarak düşünülmektedir. Çünkü dövme yani plastik deformasyon yöntemi ile üretilen biyel kollarında malzemeye 2 saat süreyle 650 °C’de ısıtıl işlem uygulanması yeniden kristalleşme sürecinin devam edeceğinin göstergesidir.

T1, T2 ve T3 grubu malzemelerin sertlik değerlerinin O, O-K ve G grubu malzemelerden yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni su verme sonucu oluşan martenzitik yapıdan kaynaklanmaktadır. Kendi aralarındaki sertlik değişimi ise temperleme sıcaklığı ile ilgilidir. Temperleme sıcaklığı arttıkça sertliğin düştüğü Şekil 5.7’den görülmektedir. Bunun altında yatan sebep temperleme sıcaklığı arttıkça martenzit fazının teragonalitesinin (c/a , burada c ve a kristalin kafes parametresidir) düşmesi ile ilgilidir. Tetragonalite düştükçe sertlik değerinin düştüğü bilinmektedir [15, 16].

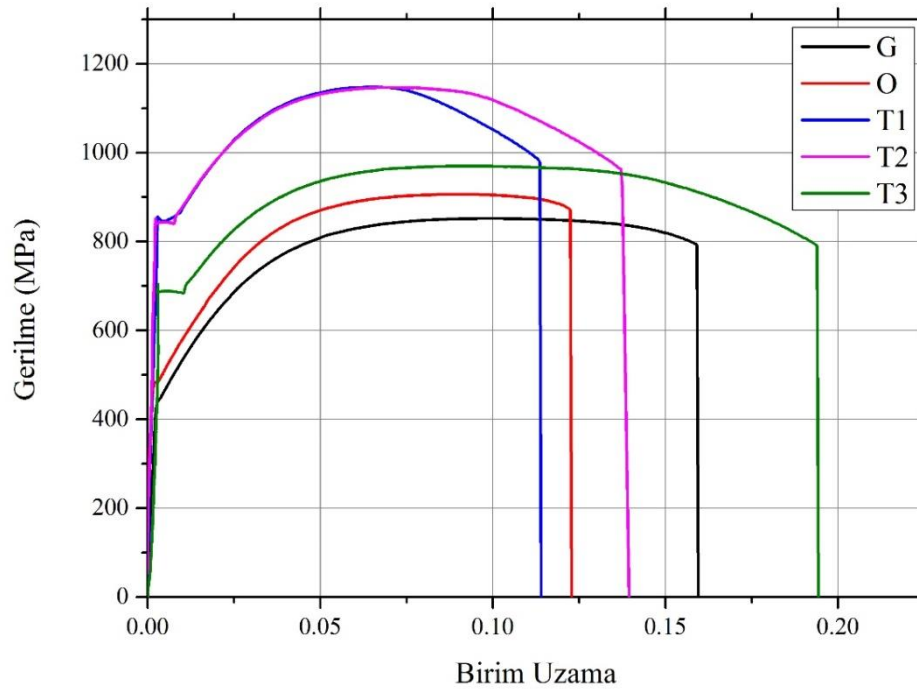
5.3 Çekme Deneyleri

Uygulanan ısıt işlemlerin mukavemet üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla çekme deneyleri yapılmıştır. Testler ise UTEST marka 250 kN kapasiteli universal çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi esnasında numune boyunda meydana gelen değişimler de ekstansometre ile ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan test numuneleri biyel kolları üzerinden ASTM E8 / E8M standardına uygun olarak hazırlanmıştır ve şekil 5,8’de detayları verilmiştir.



Şekil 5.8 : Çekme test numunesi teknik resmi.

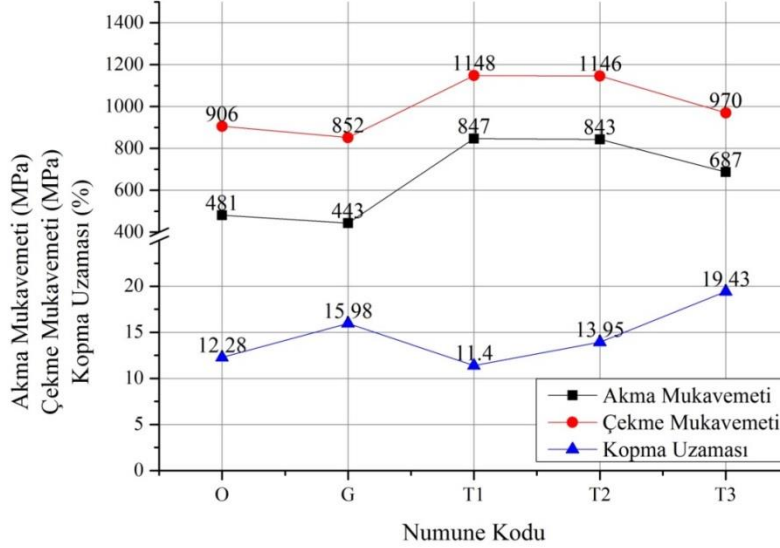
Çekme deneyleri sonucunda elde edilen gerilme – birim uzama grafikleri şekil 5.9’da ve de bu eğrilerden hesaplanan akma ve çekme mukavemetleri ile kopma uzamaları çizelge 5.2 ve şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.9 : Numunelerin gerilme – birim uzama sonuçları.

Çizelge 5.2 : Numunelerin akma – çekme mukavemeti ve kopma uzamaları.

	O	G	T1	T2	T3
Akma Mukavemeti (MPa)	481	443	847	843	687
Çekme Mukavemeti (MPa)	906	852	1148	1146	970
Kopma uzaması (%)	12.28	15.98	11.40	13.95	19.43



Şekil 5.10 : Numunelerin akma – çekme mukavemeti ve kopma uzamaları.

Bu sonuçlara göre en yüksek akma ve çekme mukavemet değerleri T1 grubu malzemelerde elde edilmiştir. En düşük mukavemet değerleri ise G grubu malzemelerde gözlemlenmiştir. Tüm gruplarda tespit edilen mukavemet değerleri tüm gruplardaki elde edilen sertlik değerleri ile aynı karakteri göstermiştir. Diğer bir ifadeyle sertlik artarken mukavemetin de arttığı gözlemlenmiştir.

T1, T2 ve T3 grubu malzemelerin mukavemet değerlerinin O grubu malzemeden yüksek oluşu, su verme sonrası martenzitik fazın oluşumundan kaynaklanmaktadır. T1, T2 ve T3 grubu malzemelerin mukavemet değerlerinin kendi içinde değişmesi ise su verme sonrası temperleme ısı işlemi ile ilgilidir. Temperleme sıcaklığı arttıkça mukavemetin düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni ise sertlik kısmında açıklanan tetragonalite ile ilgilidir.

G grubu malzemelerde en düşük akma ve çekme mukavemet değerleri çıkmasının nedeni ise bu grup malzemelere uygulanan gerilim giderme ısı işlem sürecidir. Sertlik kısmında açıklandığı gibi bu işlem yeniden kristalleşme etkisi göstermektedir.

Çekme deneyine tabi tutulan malzemelerin kopma uzaması değerleri incelendiğinde en yüksek kopma uzaması T3 grubu malzemelerde elde edilirken, en düşük değer T1 grubu malzemelerde görülmüştür. T1 grubu malzemelerde sünekliğin düşük çıkmasının nedeni 180 °C’de 1,5 saat yapılan temperleme işlemi sonrası yapıda sert ve gevrek martenzit fazının hala korunuyor olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuçta biyel kollarına uygulanan su verme ve temperleme sonrasında temperleme sıcaklığının artması ile malzemelerin sünekliklerinin arttığı gözlemlenmektedir.

Ayrıca G grubu malzemelerde O grubu malzemelere göre kopma uzamasının arttığı gözlemlenmektedir. G grubundaki bu kopma uzaması değerlerinin artması mukavemet değerinin düşmesi ile ilgilidir.

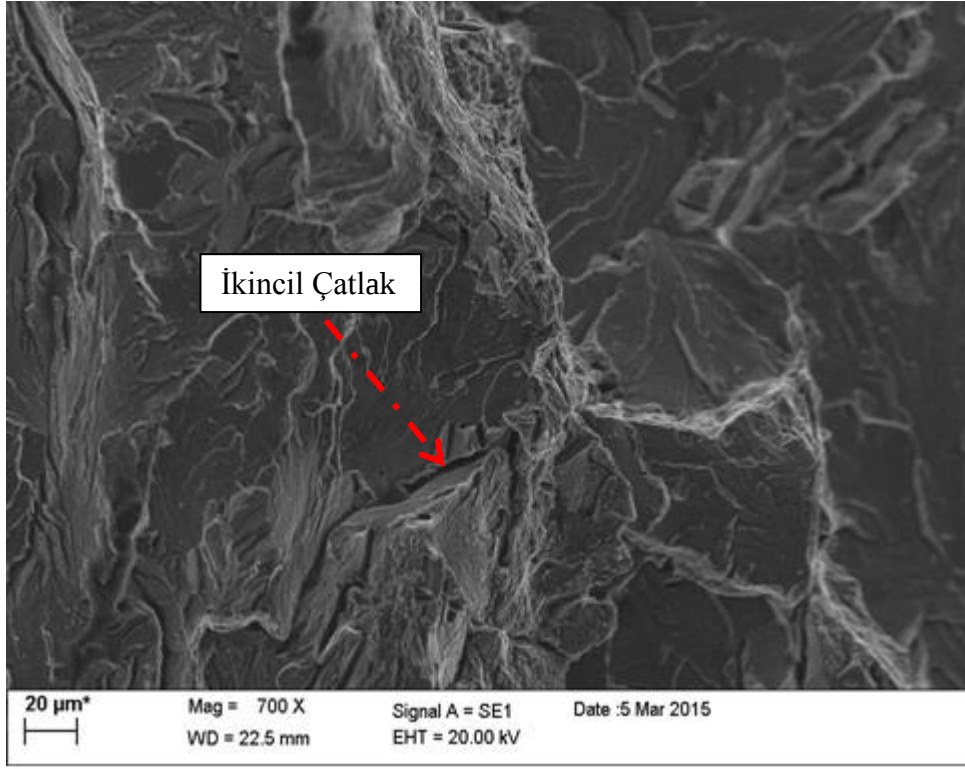
5.4 Kırık Yüzey SEM Görüntüleri (Fractography)

Kırık yüzeylerin daha iyi irdelenmesi için alınan numunler elektron mikroskobu altında incelenmiştir. Kırılma yüzeyinin 1,5 mm altından kesilen numunelerden örnek bir görüntü şekil 5.11’de verilmiştir.

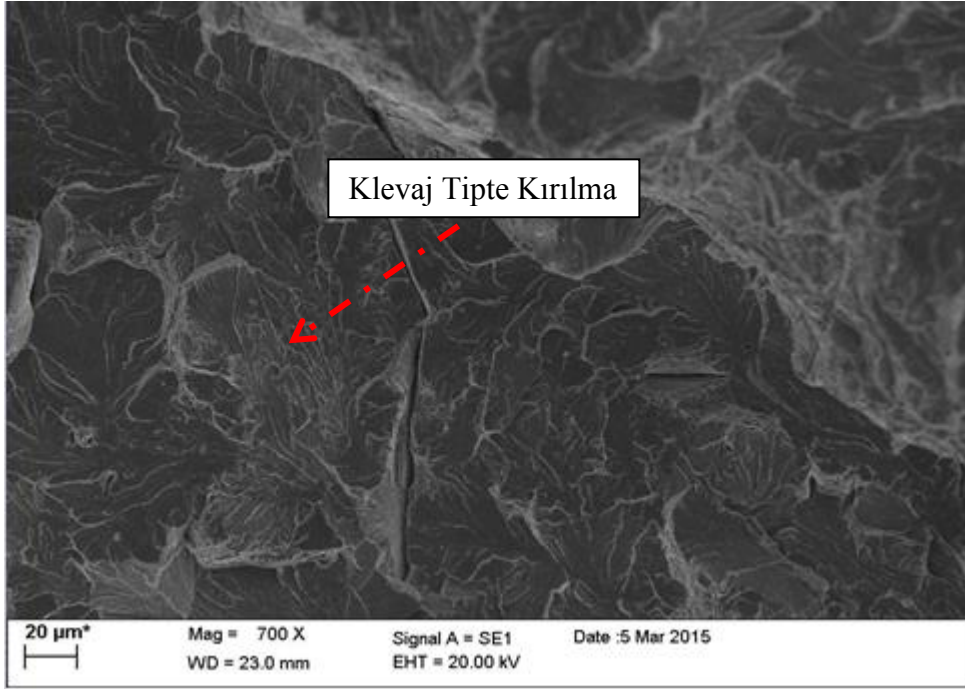


Şekil 5.11 : Elektron mikroskobu görüntüsü için çıkartılan numune örneği.

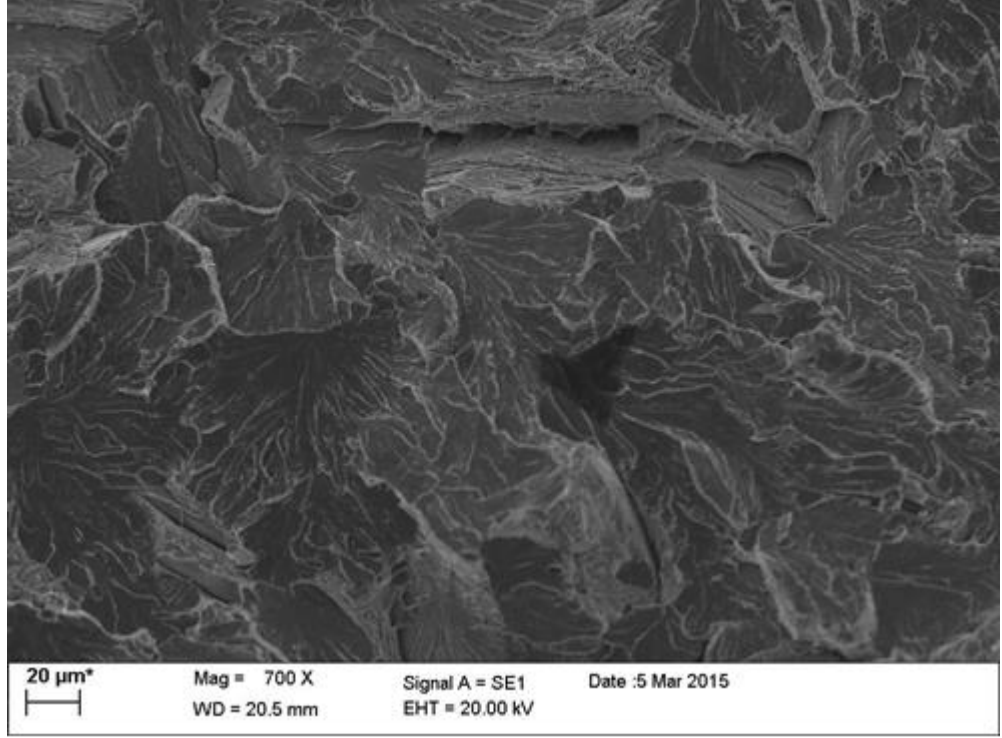
Hazırlanan numuneler Zeiss EVO 40 XVP marka scanning elektron mikroskobu ile görüntülenmişlerdir. Kırılma yüzey şekilleri aşağıdaki resimlerde verilmiştir.



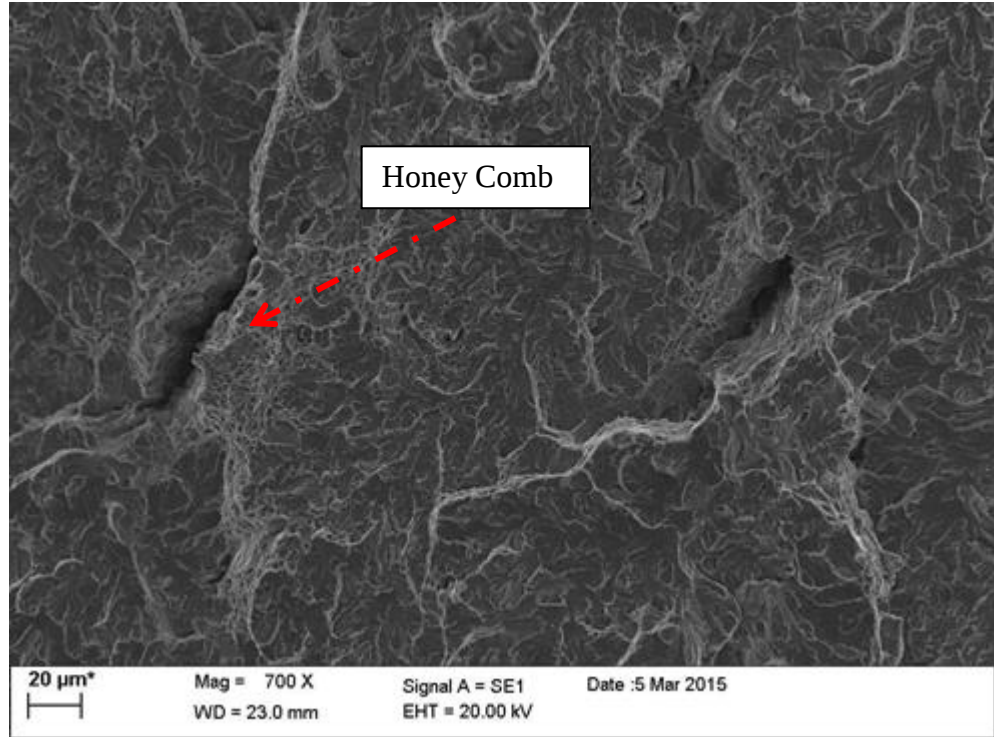
Şekil 5.12 : O gurubu malzeme SEM görüntüsü.



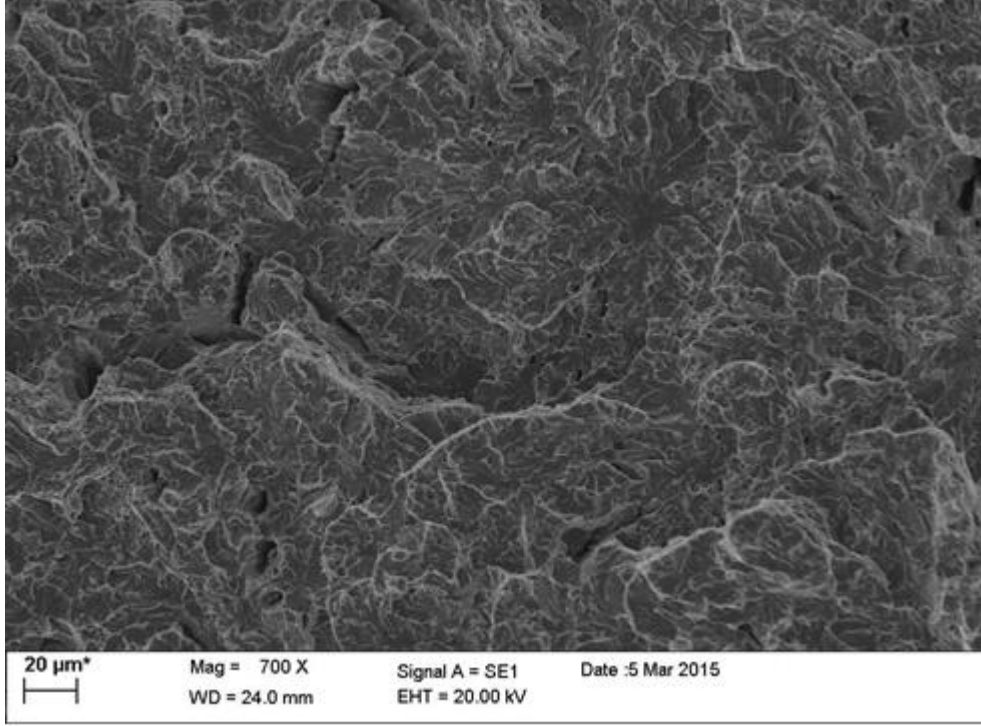
Şekil 5.13 : O-K grubu malzeme SEM görüntüsü.



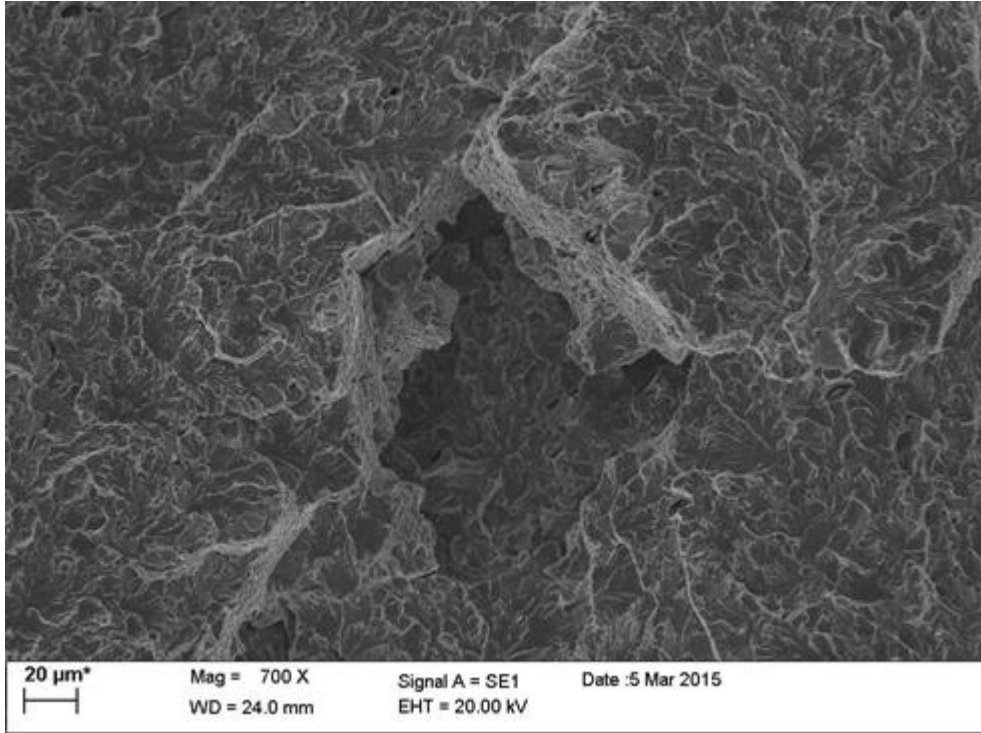
Şekil 5.14 : G grubu malzeme SEM görüntüsü.



Şekil 5.15 : T1 grubu malzeme SEM görüntüsü.



Şekil 5.16 : T2 grubu malzeme SEM görüntüsü.



Şekil 5.17 : T3 grubu malzeme SEM görüntüsü.

Elektron mikroskobu altındaki yüzey şekilleri incelendiğinde ilk etapta O ve O-K grubu biyel kollarının gevrek tarzda kırılma gösterdikleri söylenebilmektedir. Kırılma atom düzeninin birbirinden ayrılması yani klevaj şeklinde gerçekleşmiştir.

Yine aynı malzeme grubunun resimlerine bakıldığında kırılma yüzeyine dik yönde ikincil çatlakların oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu durum baz malzemenin oldukça gevrek olduğunun bir diğer kanıtıdır. Bu tarz kırılmalar aşırı yüklemekten ziyade darbeli yüklemelerde görülmektedir [17]. Ancak biyel kolu malzemesinin karbon oranı yüksek oluşu (% 0,73) ve de bölgesel olarak tane sınırlarında II. sementitin gözlemlenmesi bu tip kırılmaya sebep gösterilebilir.

G grubu malzemelerdeki kırılma davranışı O ve O-K grubu malzemelere benzemektedir ve gevrek kırılma davranışı gözlemlenmektedir.

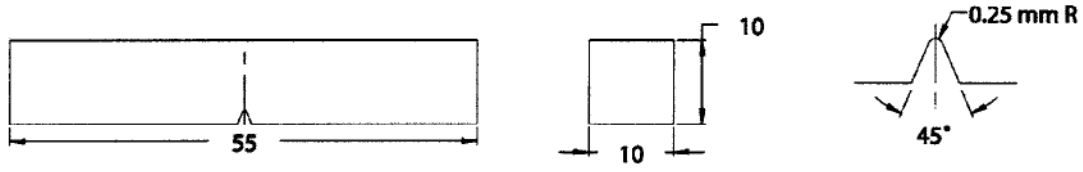
T1 grubu malzemelerin de kırılma davranışının gevrek kırılma olduğu gözlemlenmektedir. Ancak ikincil çatlak kenarlarında honey comb olarak tabir edilen kırılma davranışı görülmektedir. Temperleme neticesinde böyle bir davranış görülmesine rağmen kırılma hala gevrek olarak nitelendirilmektedir. T2 grubu malzemeler ise hemen hemen T1 grubuna yakın, yine aynı şekilde gevrek kırılma davranışı içerisindedir.

T3 grubu malzemelerin kırılma davranışı diğer grup malzemelerden biraz farklılık göstermektedir. Gevrek tarzda kırılma görülmekle birlikte çatlakların küçüldüğü, bazı tanelerin yerinden çıktığı görülmektedir. Bu farklı durumun yüksek temperleme sıcaklığı nedeniyle malzemenin sünekliğinin artması ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

5.5 Charpy Çentik Darbe Testleri

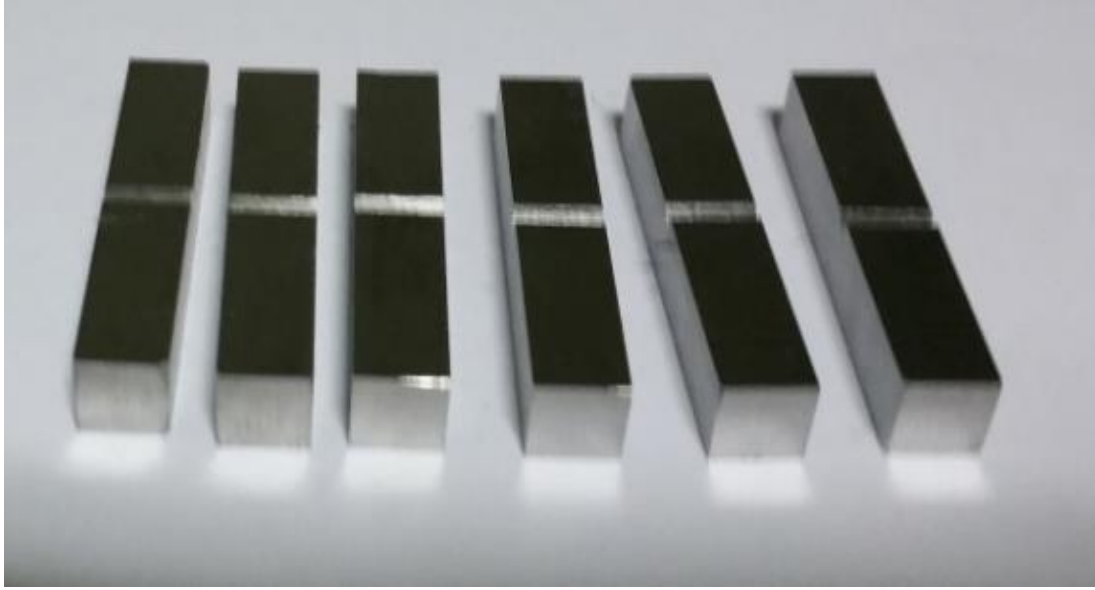
Biyel kollarına uygulanan ısıtma işlemleri neticesinde ısıtılmamış malzeme ile birlikte ısıtma işlemi uygulanan malzeme gruplarının kırılma tokluğu değişimlerini karşılaştırmak amacıyla Charpy darbe testi yapılmıştır. Bu çalışmanın neticesinde biyel kollarında meydana gelen deformasyon miktarları, sertlik, kopma uzaması sonuçları ve kırılma yüzey incelemelerini destekleyici sonuçlar ortaya konmuştur.

Çalışma esnasında biyel kolları üzerinden ASTM E23 – 12C standardına bağlı kalınarak numuneler çıkartılmıştır. Çalışmanın tutarlı ve tekrarlanabilir sonuçlar ortaya koyması amacıyla da her bir malzeme grubundan altışar numune teste tabi tutulmuştur. Çıkartılan numuneler 10x10x55 ebatlarına sahip olup şekil 5.18'deki resme bağlı kalınarak hazırlanmıştır.



Şekil 5.18 : Çentik darbe testi numunesi teknik resmi.

Hazırlanan numunlerden örnek bir fotoğraf şekil 5.19’da verilmiştir.



Şekil 5.19 : Hazırlanan çentik darbe test numuneleri.

Her bir malzeme grubundan altışar adet hazırlanmış numunler 0 – 300 J aralığında enerji kapasitesine sahip şekil 5.20’de görülen Alşa çentik darbe test cihazında kırılmıştır ve kırılma enerjileri her bir numune için tek tek kaydedilmiştir.

Çalışma neticesinde ortaya çıkan enerji değerleri standart sapmaları ile birlikte çizelge 5.3’te verilmiştir.

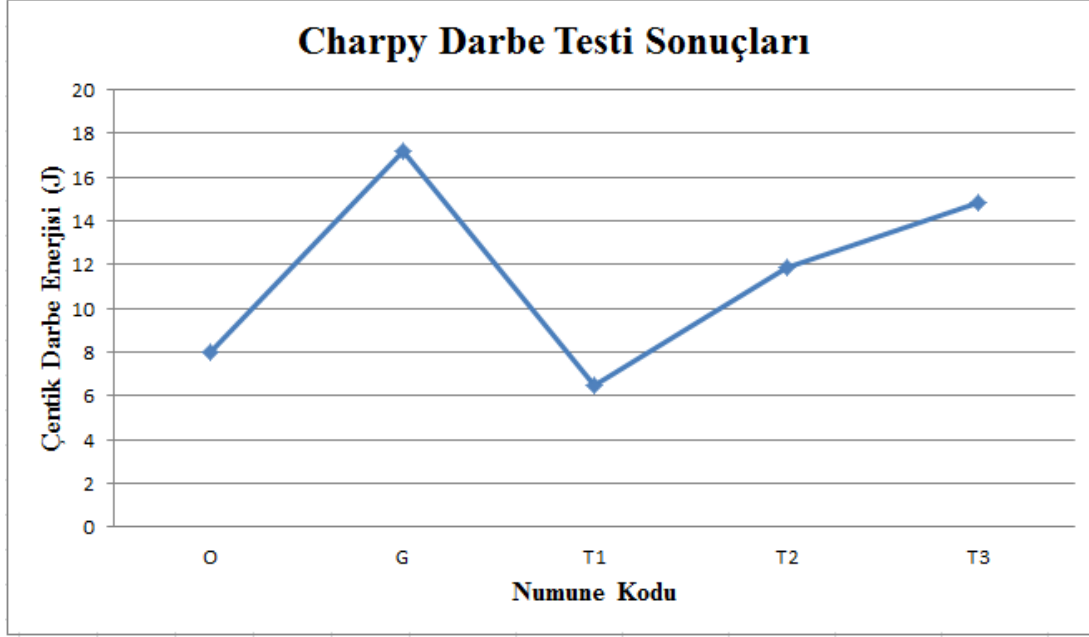


Şekil 5.20 : Alşa çentik darbe test cihazı.

Çizelge 5.3 : Çentik darbe testi enerji sonuçları.

Numune Numarası	Malzeme Grubu				
	O	G	T1	T2	T3
#1 (J)	8,19	14,20	7,14	10,62	14,91
#2 (J)	8,35	18,96	6,52	11,89	16,27
#3 (J)	7,81	18,54	5,31	13,55	13,22
#4 (J)	8,63	15,64	7,81	11,17	13,17
#5 (J)	6,98	18,13	5,67	13,68	15,98
#6 (J)	8,21	17,77	6,38	10,39	15,63
Ortalama (J)	8,028	17,21	6,472	11,88	14,86
Standart Sapma	0,528	1,709	0,841	1,313	1,251

Çizelgedeki sonuçlara göre numuneler ölçülen sertlik ve kopma uzamaları ile paralellik göstermişlerdir. Su verilmesinin ardından 180 °C’de temperlenen T1 grubu malzemeler en düşük kırılma enerjisini verirken, devamında ısıtılmış O grubu malzemeler gelmiştir. En yüksek darbe enerjisi ile gerilim giderme uygulanmış G grubu malzemelerde görülmüştür. Sonuç itibarıyla sertlik ve çekme testi kısmında malzeme grupları için yapılan değerlendirmeler darbe testi sonuçları için de geçerli olmuştur.



Şekil 5.21 : Çentik darbe testi sonuçları.

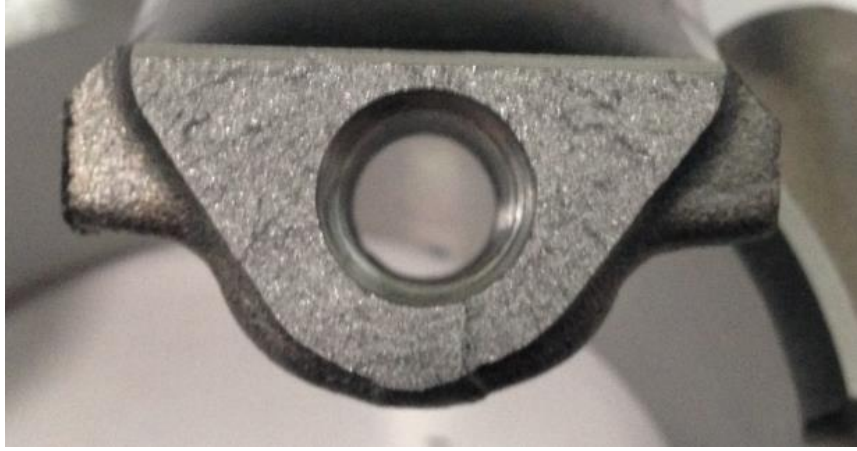
5.6 Kırılma Yüzeyi Parça Fotoğrafları

Tezin bu kısmında bütün parçaların kırılma sonrasındaki yüzey fotoğraflarına yer verilecektir. Fotoğraflar direk olarak objektif bir değerlendirmeye tabi tutulamayacak olsalar da parçaların kırılma davranışları hakkında yapılan deneysel çalışmalara katkıda bulunacaklardır. Bunun yanında kırılma eğilimleri ve operasyon sonrasında ortaya çıkan diğer faktörler bu kısımda değerlendirilmeye çalışılmıştır.

İlk etapta ısıtılmış işlem uygulanmamış ince kesitli parçaların hemen kırılma sonrası fotoğrafları şekil 5.22 ve 5.25 arasında verilmiştir.



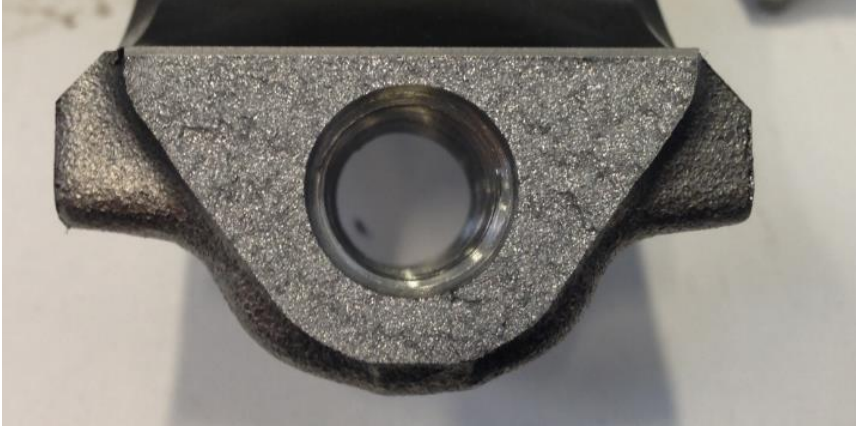
Şekil 5.22 : B6O kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.



Şekil 5.23 : B8O kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

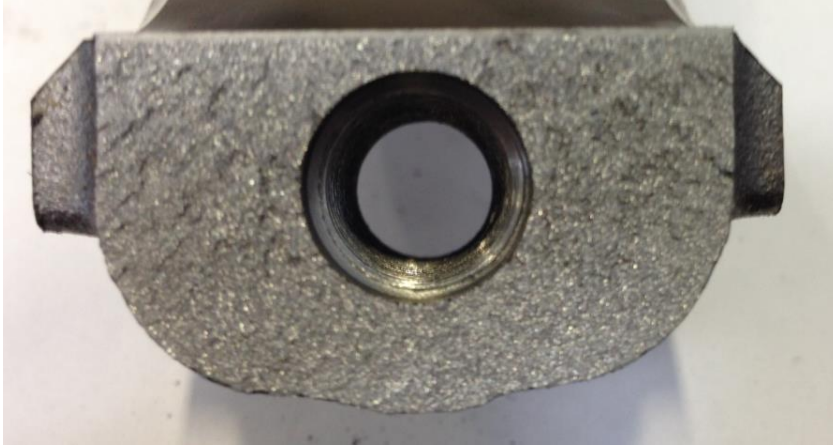


Şekil 5.24 : B10O kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.



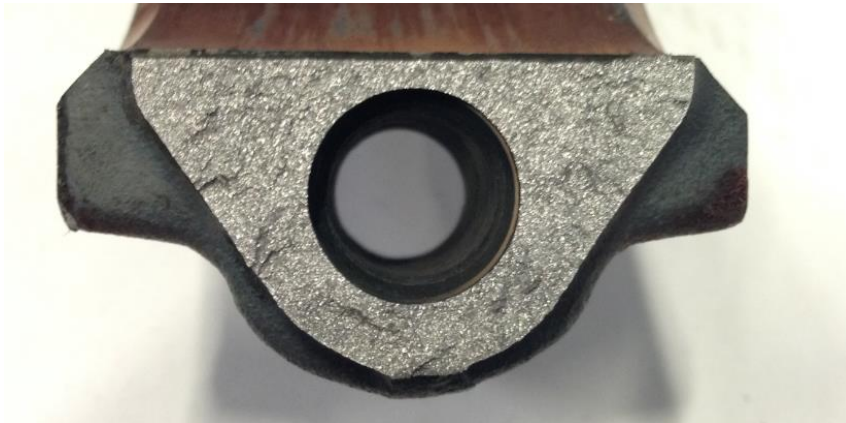
Şekil 5.25 : L6O kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

Isıl işlem uygulanmamış parçaların devamında yine ısıl işlem uygulanmamış fakat kalın kesitli parçanın fotoğrafı şekil 5.26’da verilmiştir.

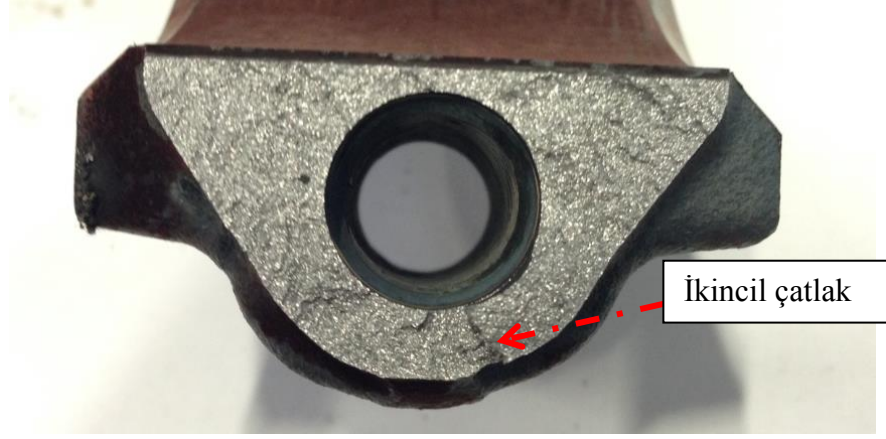


Şekil 5.26 : L6O-K kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

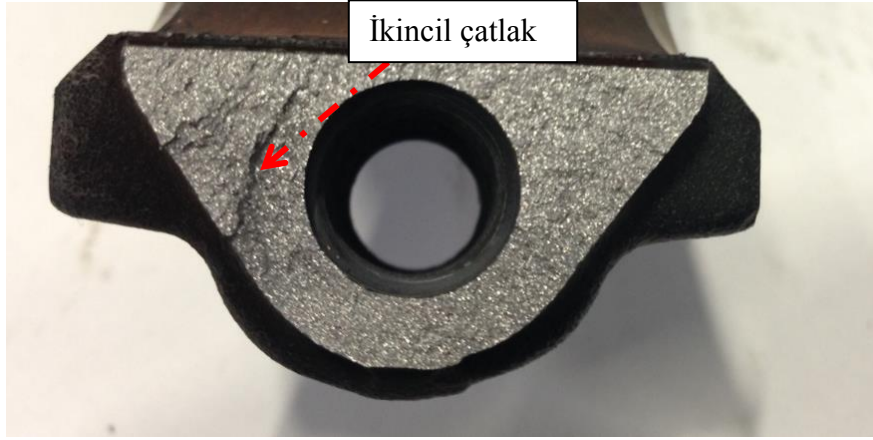
Isıl işlem uygulanmamış parçaların devamında gerilim gidermeye tabi tutulmuş parçaların fotoğrafları şekil 5.27 ve 5.30 arasında verilmiştir.



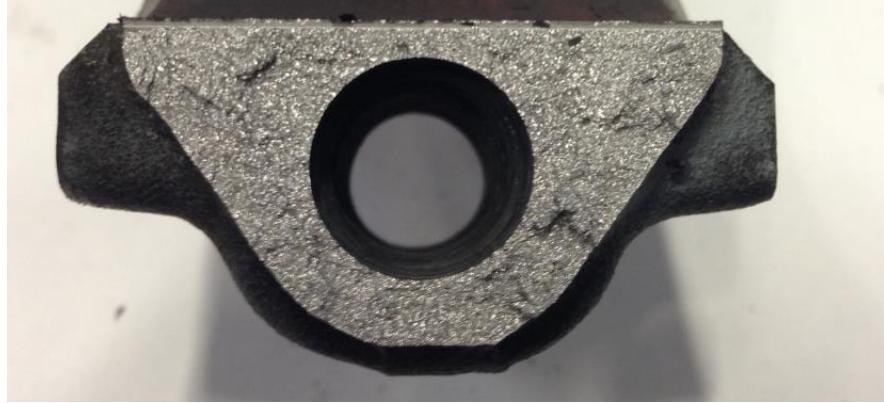
Şekil 5.27 : B6G kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.



Şekil 5.28 : B8G kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

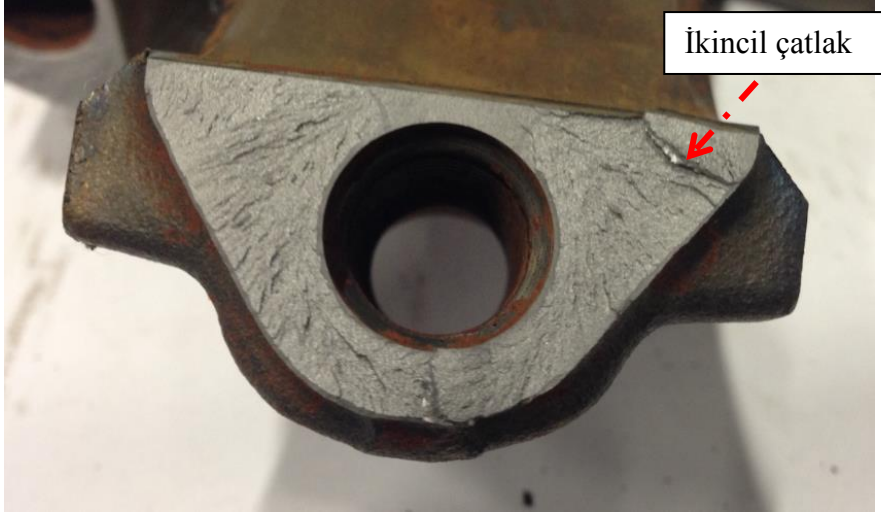


Şekil 5.29 : B10G kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

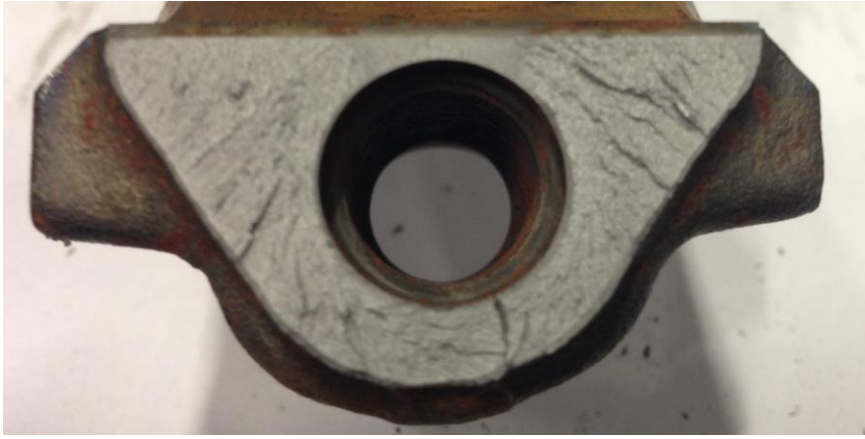


Şekil 5.30 : L6G kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

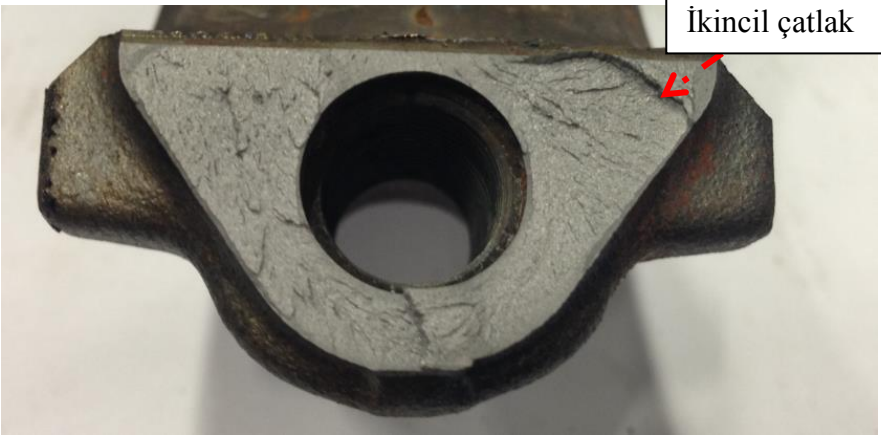
Gerilim giderme uygulanmış parçaların ardından temperleme 1 yani T1 grubu parçaların kırılma yüzey fotoğrafları şekil 5.31 ve 5.34 arasında verilmiştir.



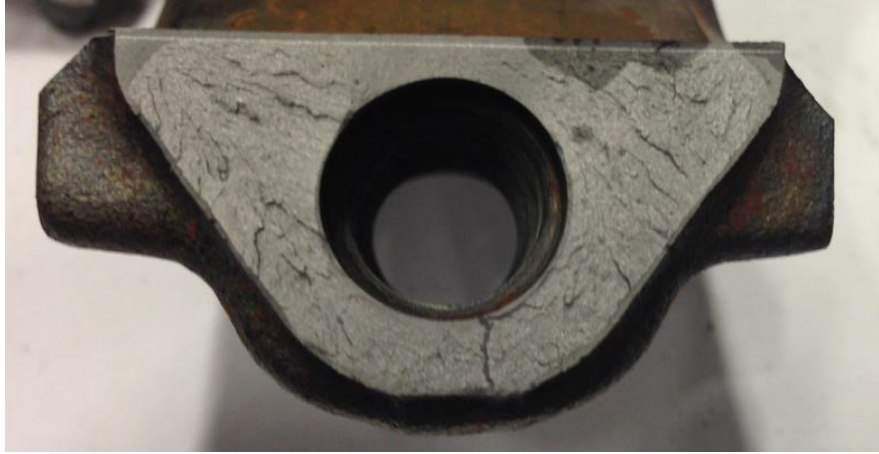
Şekil 5.31 : B6T1 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.



Şekil 5.32 : B8T1 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

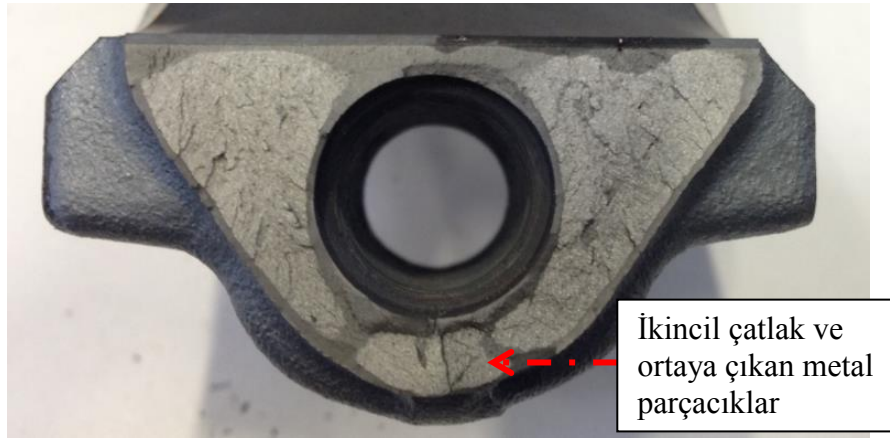


Şekil 5.33 : B10T1 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

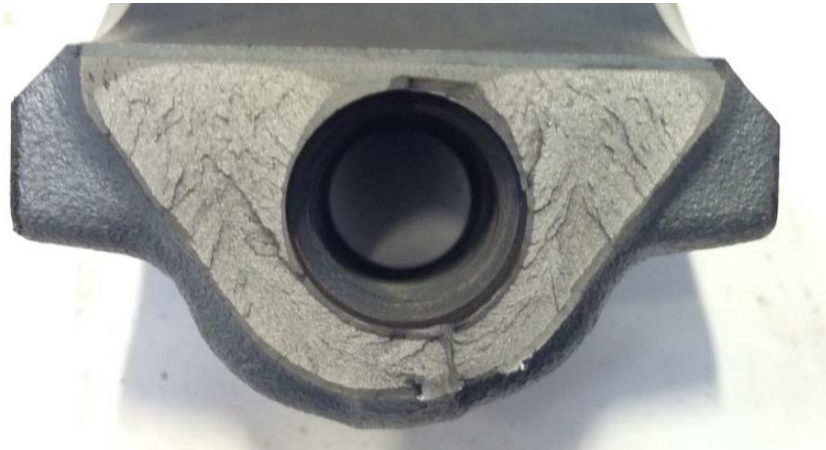


Şekil 5.34 : L6T1 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

T1 grubu parçaları kırılma yüzey fotoğraflarının ardından T2 grubu parçaların fotoğrafları şekil 5.35 ve 5.38 arasınd verilmiştir.



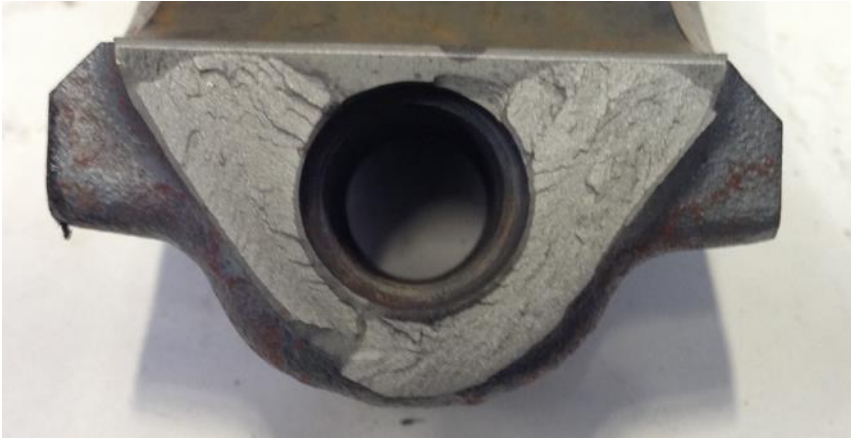
Şekil 5.35 : B6T2 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.



Şekil 5.36 : B8T2 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

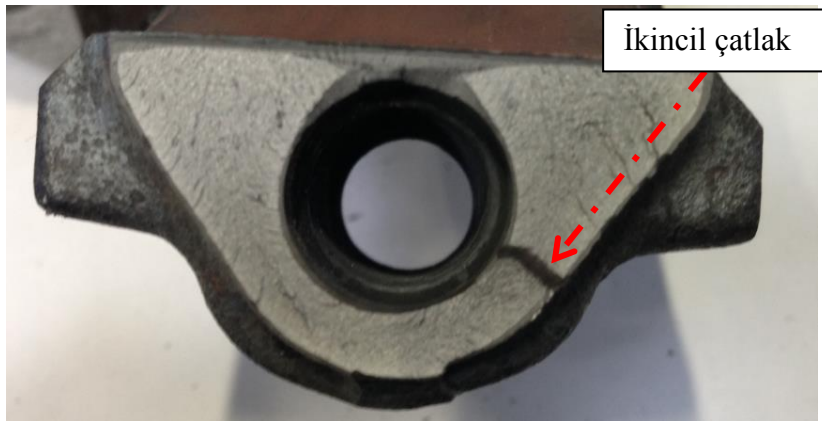


Şekil 5.37 : B10T2 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.



Şekil 5.38 : L6T2 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

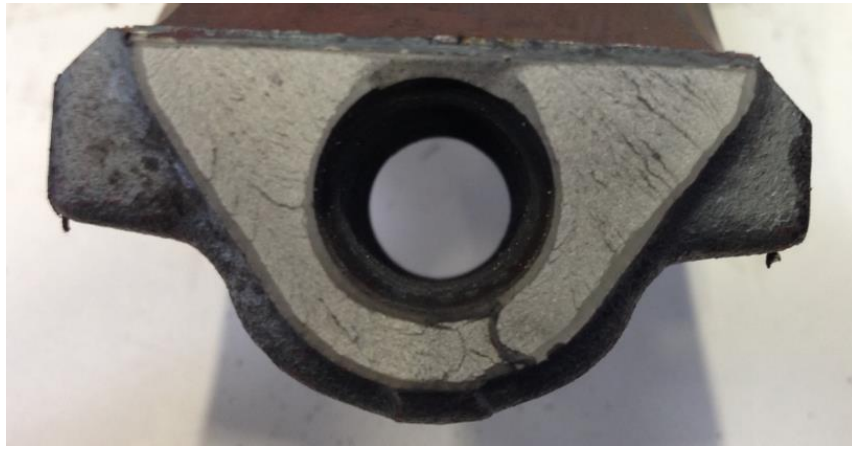
Son olarak da T3 grubu parçaların kırılma yüzey fotoğrafları şekil 5.39 ve 5.42 arasında verilmiştir.



Şekil 5.39 : B6T3 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.



Şekil 5.40 : B8T3 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.



Şekil 5.41 : B10T3 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.



Şekil 5.42 : L6T3 kırılma sonrası yüzey fotoğrafı.

Şekil 5.22 – 5.25 incelendiğinde ilk etapta ısıtıl işlem görmemiş O grubu parçaların SEM sonuçlarıyla paralel şekilde büyük taneler halinde gevrek kırıldığı gözlemlenmiştir. Yine gevrek tarzda kırılma görüntülerine sahip olmalarına rağmen bu fotoğraflardan detaylı olarak çentik derinliği ya da çentik açma tipinin etkisi gözlemlenememiştir. Bu kısım ve parametrelerin etkileri yuvarlaklık ölçümleri

başlığı altında tartışılacaktır. Fakat hiç bir parça üzerinde daha sonra parçaların birleşmesini etkileyecek ve sıkma kuvvetini azaltacak büyük ölçekte ikincil çatlak yüzeyleri gözlemlenmemiştir.

Çentik derinliği ve çentik açma tipine benzer şekilde O-K gurubu parçaların yüzey fotoğraflarından ince kesitli parçayla farkı tespit edilememiştir ancak büyük taneler kırılmanın gevrek tarzda gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

G grubu malzemelere gelindiğinde ısıtma işlemi görmemiş O ve O-K gurubu malzemelere benzer şekilde gevrek kırılmanın gerçekleştiği görülmüştür. Ancak özellikle şekil B8G ve B10G’de görülebileceği gibi büyük ölçekte ikincil çatlak yüzeylerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum gerek parçaların geri birleştirildiğinde örtüşmesi gerekse kırma sonrası oluşan metal parçacıkların temizlik anlamında motora zarar verebilmesi bakımından istenen bir durum değildir.

Su verme yöntemi ile sertleştirilip ardından belirli temperleme sıcaklıklarında ısıtma işlemi gören T1, T2 ve T3 grubu parçaların mikro yapılarının değişmesinden kaynaklı ilk grup parçalardan farklı görüntüler ortaya koyduğu söylenebilmektedir. Tüm temperleme gurubu parçalarının yine gevrek tarzda kırılma sergilediği gözlemlenirken kırılmanın daha küçük ölçekli taneler halinde gerçekleştiği de değerlendirilmiştir. Bunun yanında özellikle civata deliği yanlarında ikincil çatlak yüzeylerinin oluştuğu ve kırılma sonrası çok fazla miktarda metal parçacığın ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu durum motorun sorunsuz çalışmasını ciddi şekilde etkileyebilecek ve montaj öncesi parçaların temizliğini zor hale getirecektir.

Kırılma yüzeyi parça fotoğrafları kısmının en başında bahsedildiği gibi fotoğraflar açık bir değerlendirmeden çok kırılma yönelimleri ve kırılma esnasında gözlemler hakkında bilgi verici olmuştur. Parçaların esas baz alınması gereken kırılma sonrası deformasyon miktarları ise bir sonraki kısım olan yuvarlaklık ölçümleri bölümünde detaylıca irdelenecektir.

5.7 Kırılma Sonrası Biyel Kolu Büyük Ucu Yuvarlaklık Ölçümleri

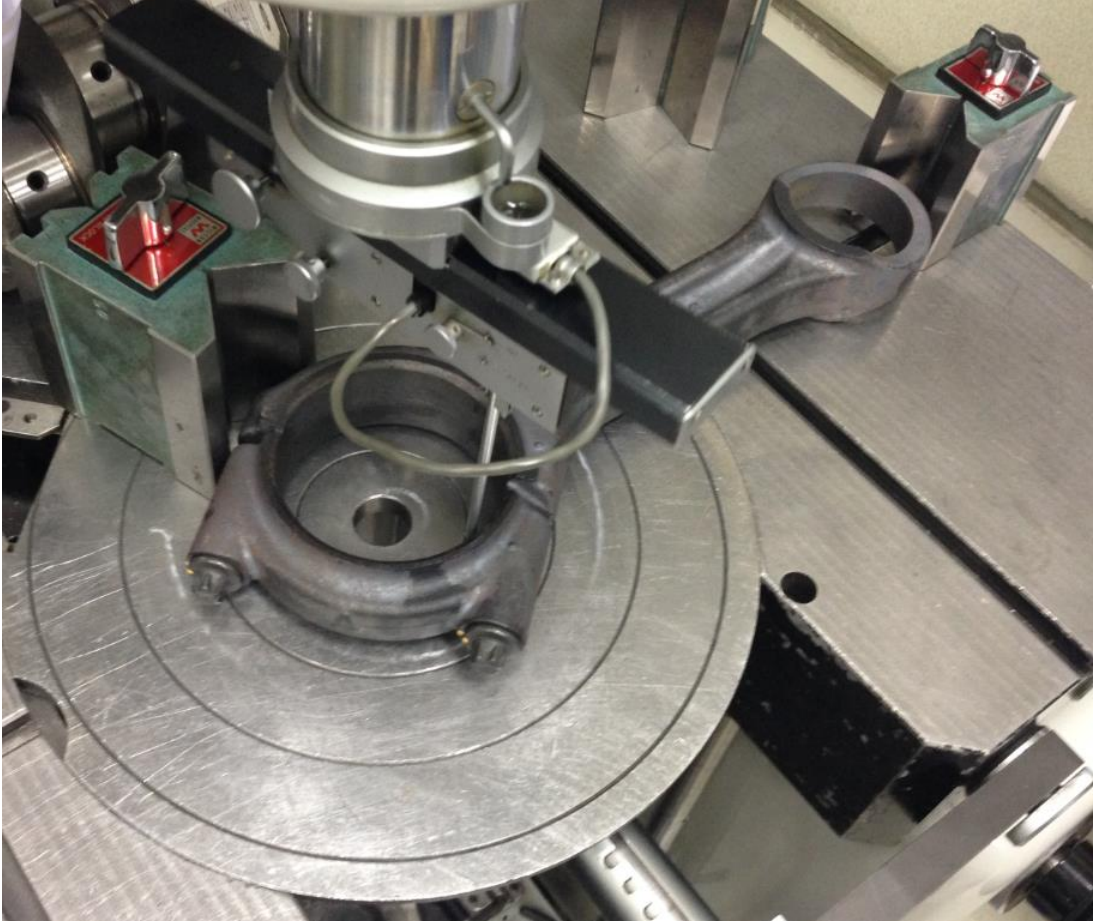
Biyel kolu imalat adımları kısmında detaylıca verildiği üzere kırma operasyonundan sonra ayrılmış olan kep ve biyel kısmı civatalar yardımıyla tekrardan birleştirilerek imalat operasyonlarına devam edilmektedir. Tezin bu kısmı civatalar yardımıyla sıkılmış parçaların ölçülmüş yuvarlaklık değerleri hakkında olacaktır. Başka bir

deyişle yuvarlaklık ölçümleri parçanın kırılma esnasında ne kadar deforme olduğunu ortaya koyacaktır.

Ölçümler Taylor Hobson Talyrond marka yuvarlaklık ölçüm ekipmaları ile alınmıştır. Şekil 5.43 ve 5.44 ekipman ve parçaların ölçüm esnasındaki fotoğraflarını göstermektedir.



Şekil 5.43 : Yuvarlaklık ölçüm ekipmanı.

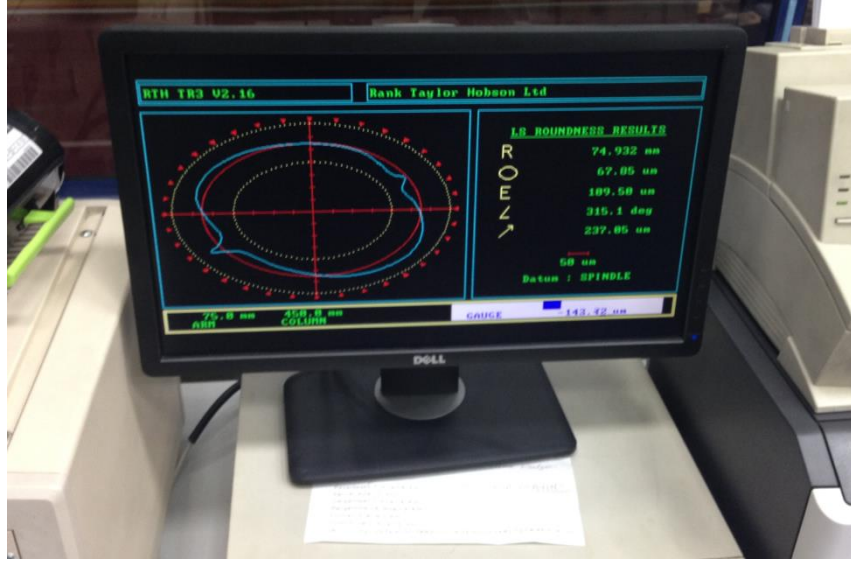


Şekil 5.44 : Yuvarlaklık ölçümündeki örnek biyel kolu.

Ucunda 2 mm’lik bir probu bulunan cihaz magnetize edilmiş fikstürler ile sabitlenen biyel büyük ucunda sabit hızda 360° derece dönmektedir. Her 360°’lik dönüşünde yaklaşık 1000 noktayı karekök ortalama yöntemi ile hesaplayan cihaz ölçümünü tamamladığında ölçtüğü parçanın mükemmel yuvarlaktan olan sapma değerini vermektedir. Başka bir deyişle artan ya da azalan 1000 noktanın birbirlerine göre değişimlerinin ortalama karekök yöntemiyle hesaplanmasıyla ölçüm tamamlanmış olur. Yöntemin İngilizce adı “*Root Mean Square*” olup kısaltılması RMS’tir. Denklem 5.1 ölçümün matematiksel ifadesini vermektedir.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (5.1)$$

Ölçülen parçalar ise şekil 5.45’te örnek olarak verildiği şekilde bir ekrana yansıtılmaktadır.



Şekil 5.45 : Örnek yuvarlaklık ölçüm ekranı.

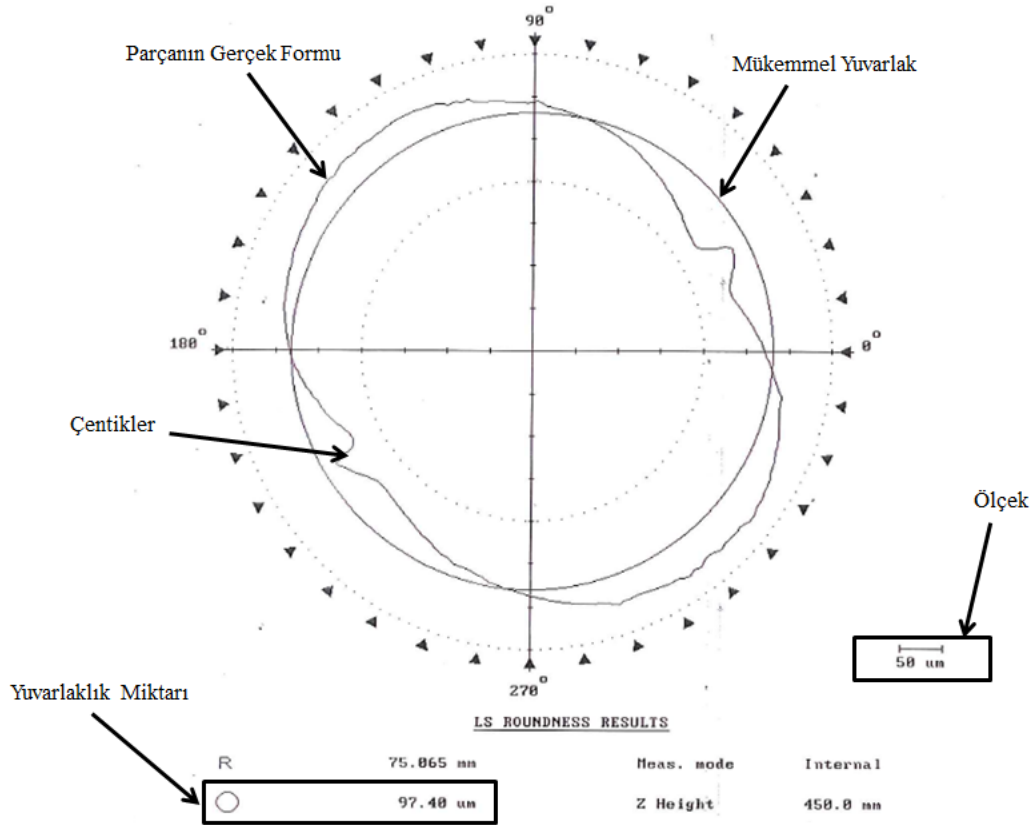
Yapılacak parça ölçümleri öncesinde tezgahın alacağı ölçümlerin tekrarlanabilirliğini ve hassasiyetini kontrol etmek amacıyla 24 adet son çapı işlenmiş parça tezgahta ölçüme tabi tutulmuştur. Maksimum yuvarlaklık toleransı 5 mikron olan ve imalat hattından kabul görerek çıkan parçaların alınan ölçüm sonuçları ve standart sapma değerleri çizelge 5.4’te verilmiştir.

Çizelge 5.4 : 24 adet yuvarlaklık deneme ölçümü sonuçları.

Parça Sıra No	Yuvarlaklık Değerleri (Mikron)	Parça Sıra No	Yuvarlaklık Değerleri (Mikron)
1	2	13	2,25
2	2,2	14	1,75
3	2,4	15	2,85
4	2,45	16	2,55
5	2,85	17	2,55
6	2	18	1,8
7	3,25	19	2,6
8	3,9	20	1,65
9	2,5	21	2,9
10	2,95	22	4,7
11	2,2	23	2,95
12	2,95	24	3,55
Ortalama (Mikron)	2,66		
Standart Sapma (Mikron)	0,71		

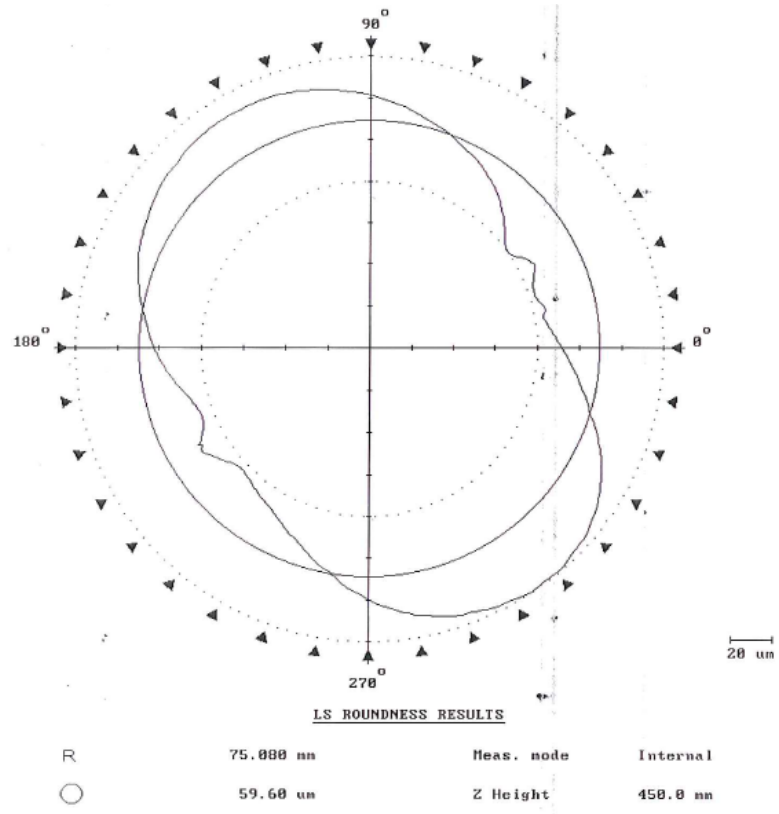
Görüldüğü üzere tezgah 5 mikronluk toleransa göre kabul gören parçaları 0,7 mikron gibi küçük bir standart sapma değeri ile ölçmüştür. Bu da tezgahın tez kapsamındaki parça ölçümleri boyunca kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

Alınan parça ölçümlerine geçilmeden önce son olarak ise örnek bir yuvarlaklık ölçümü tanıtılmıştır. Şekil 5.46'da görüleceği üzere parçanın formu, mükemmel yuvarlak ve alınan ölçüm verilmiştir.

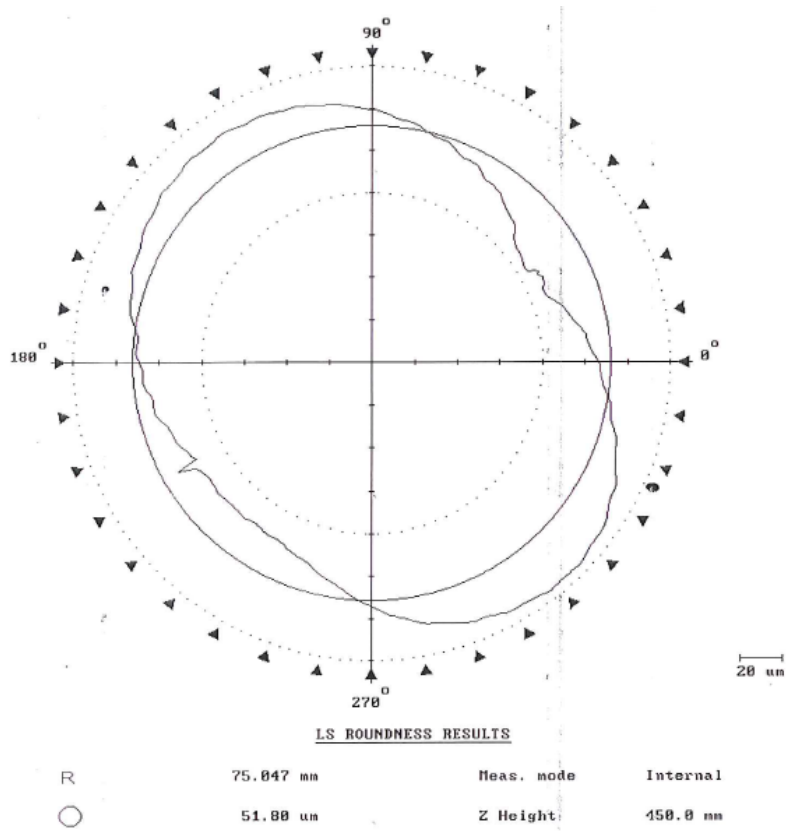


Şekil 5.46 : Örnek yuvarlaklık ölçüm sonucu

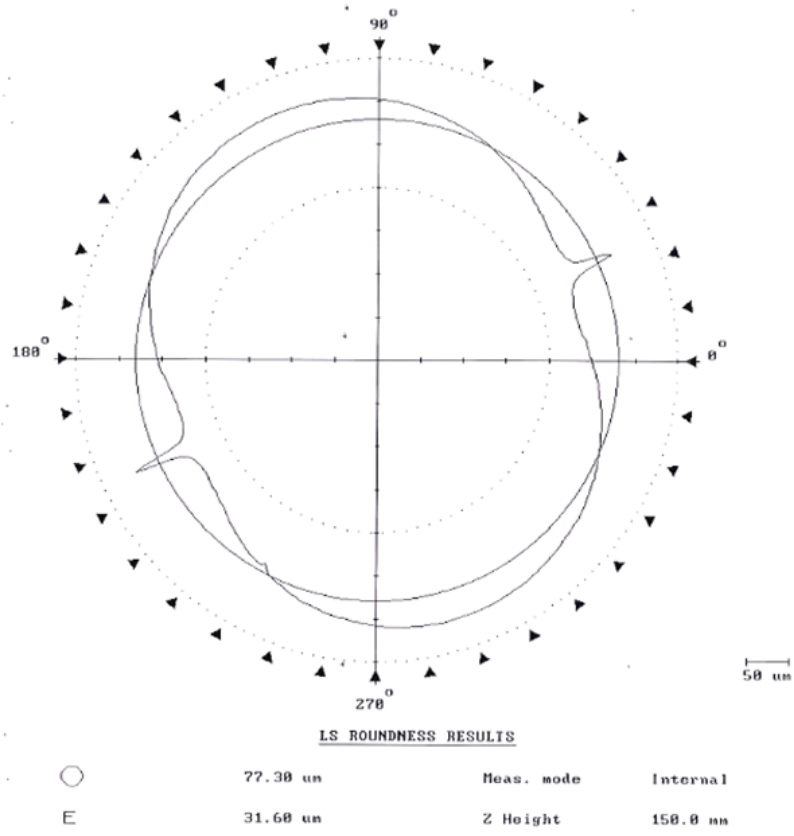
Ekipmanın ve örnek bir ölçümün tanıtımından sonra tez kapsamında çalışılan biyel kollarının yuvarlaklık ölçümlerine geçilecektir. İlk etapta ısıtılmış işlem görmemiş ince kesitli parçaların yuvarlaklık ölçümleri şekil 5.47 ve 5.50 arasında verilmiştir.



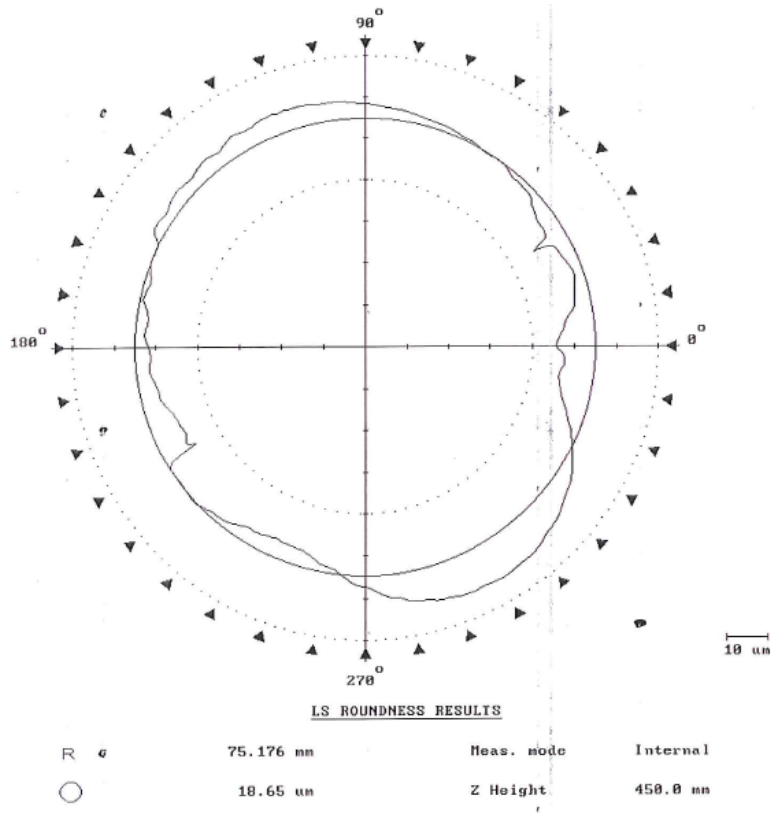
Şekil 5.47 : B6O biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.



Şekil 5.48 : B8O biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

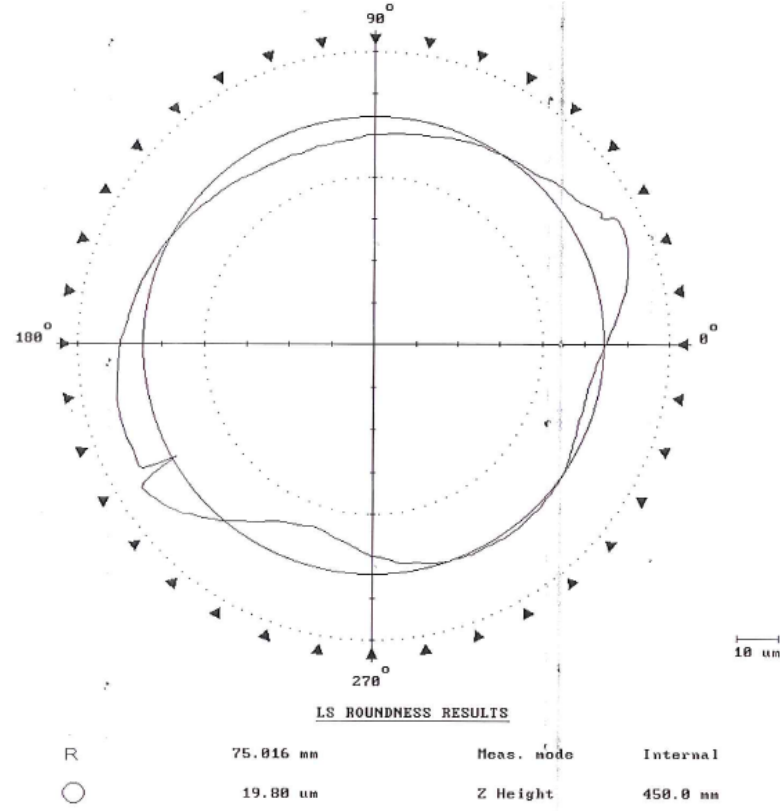


Şekil 5.49 : B100 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.



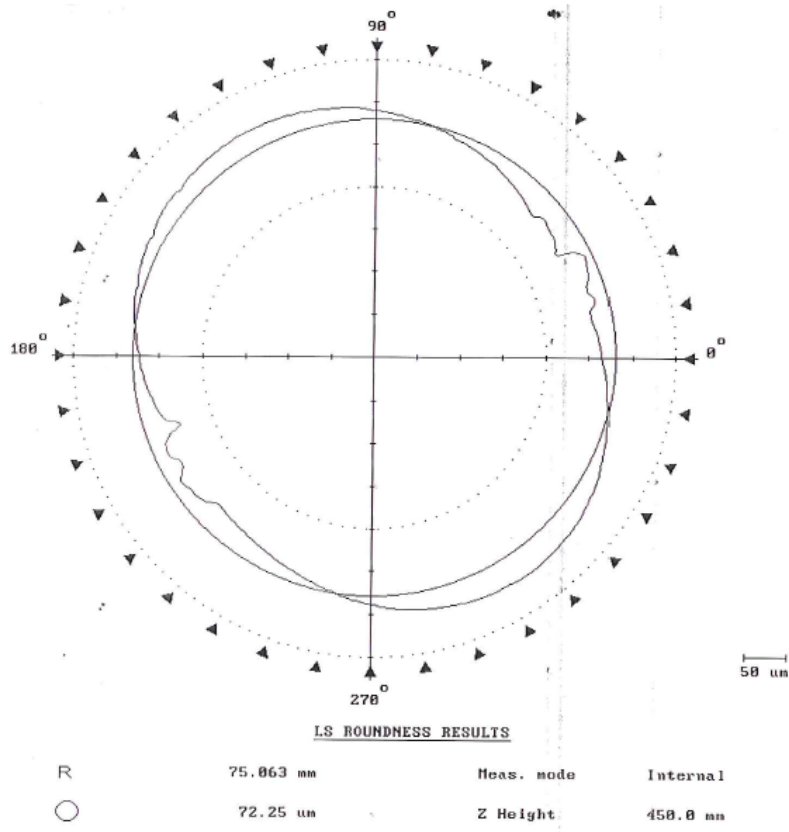
Şekil 5.50 : L60 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

Isıl işlem görmemiş O grubu parçaların ölçümünün devamında yine ısıtıl işlem görmemiş ancak kalın kırma kestili O-K grubu parçanın ölçümü şekil 5.51’de verilmiştir.

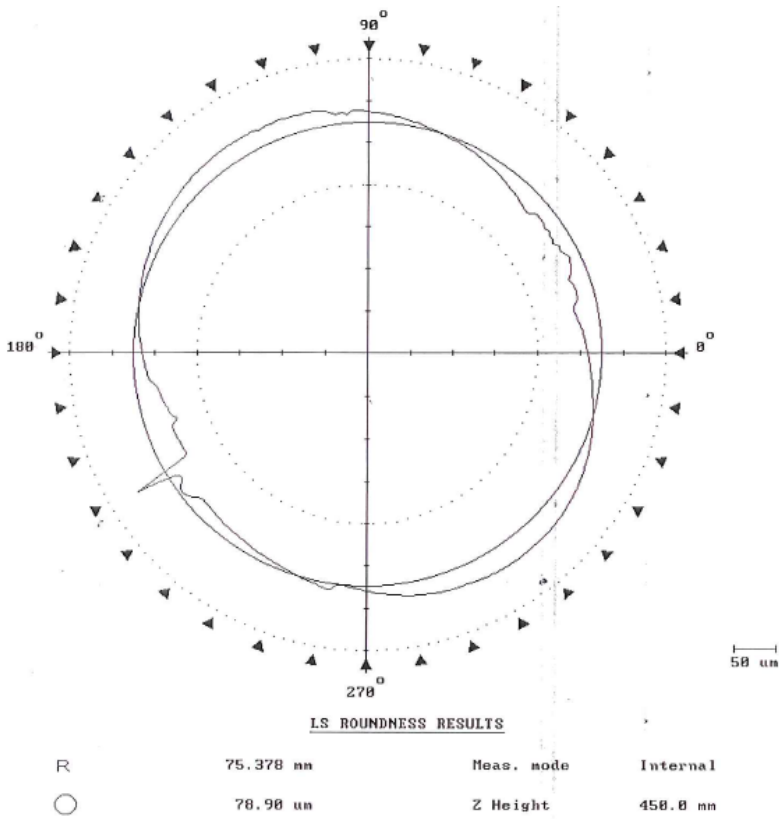


Şekil 5.51 : L6O-K biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

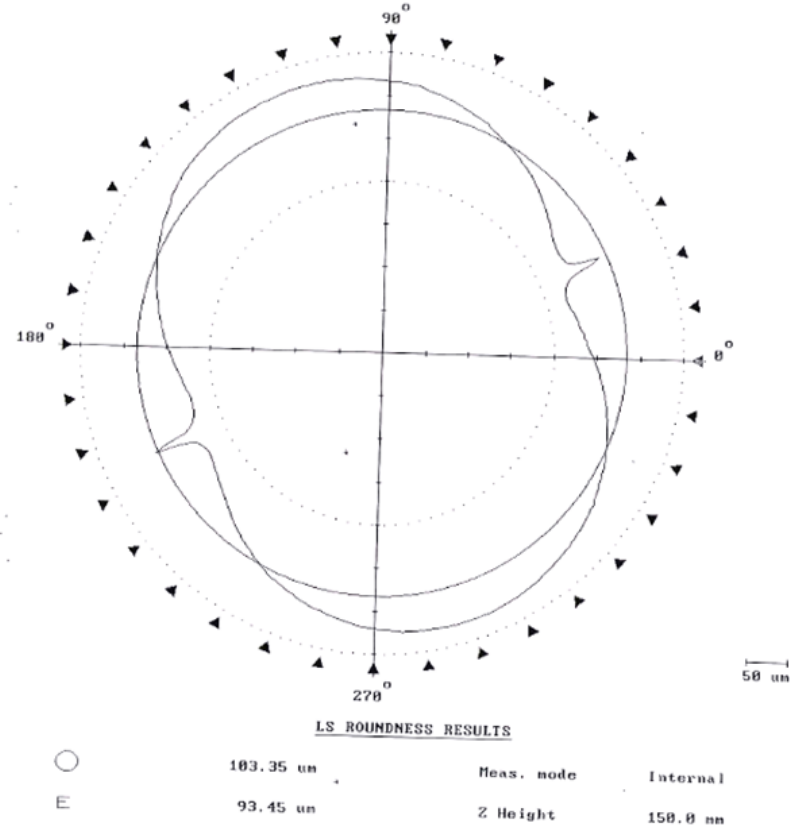
Gerilim giderme işlemine tabi tutulmuş parçaların yuvarlaklık ölçümleri şekil 5.52 ve 5.54 arasında verilmiştir.



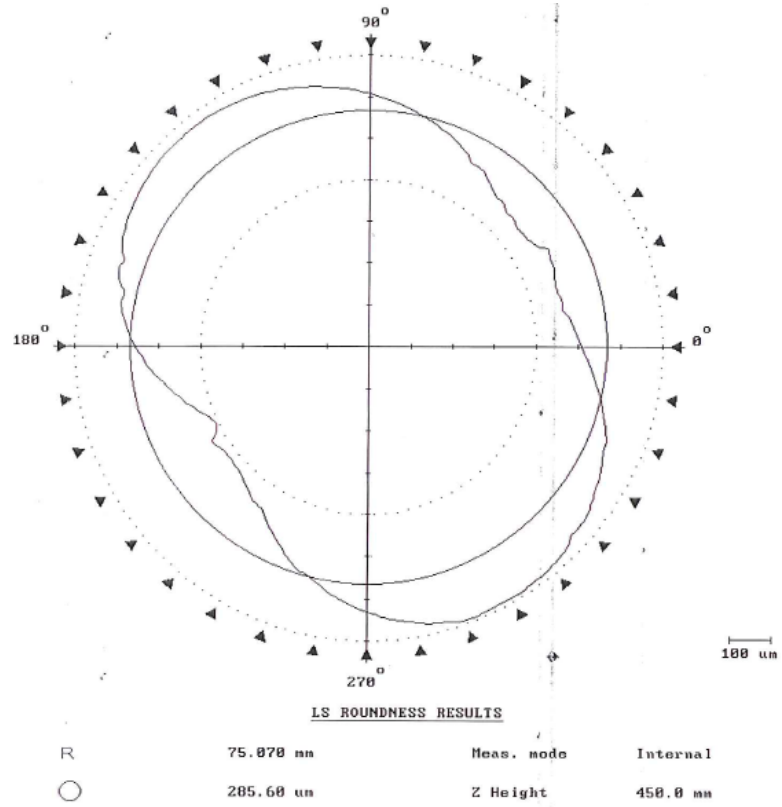
Şekil 5.52 : B6G biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.



Şekil 5.53 : B8G biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

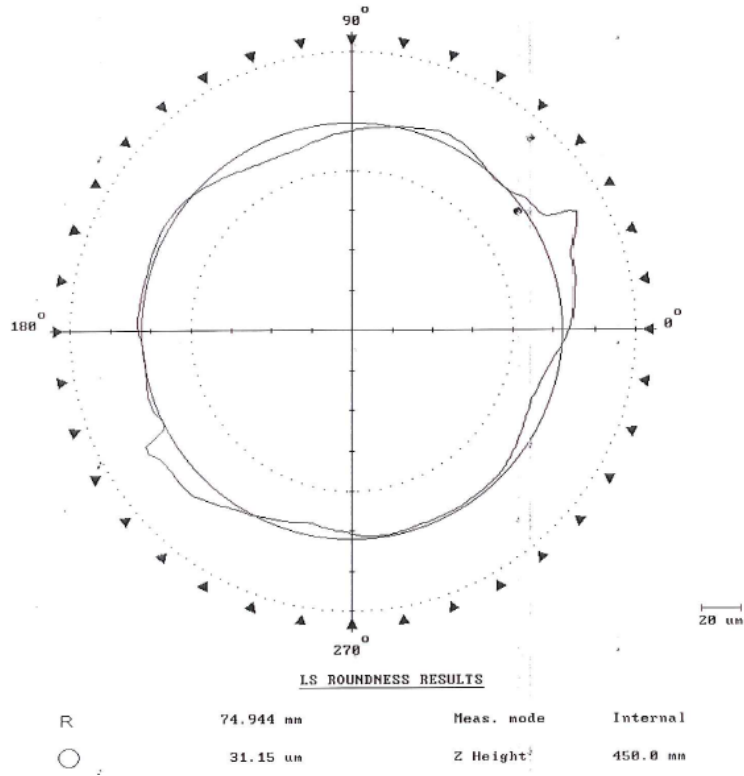


Şekil 5.54 : B10G biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

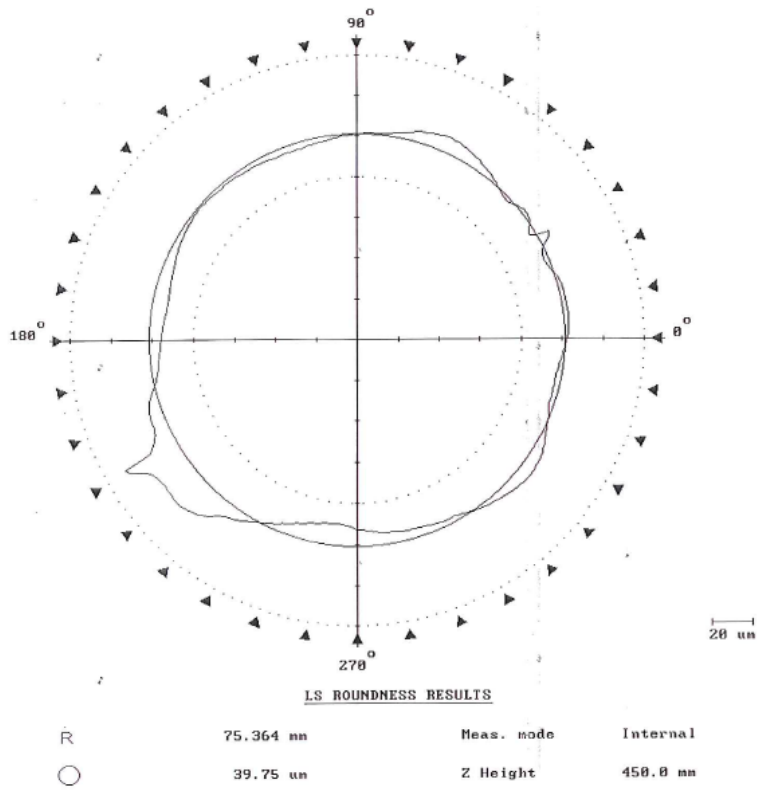


Şekil 5.55 : L6G biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

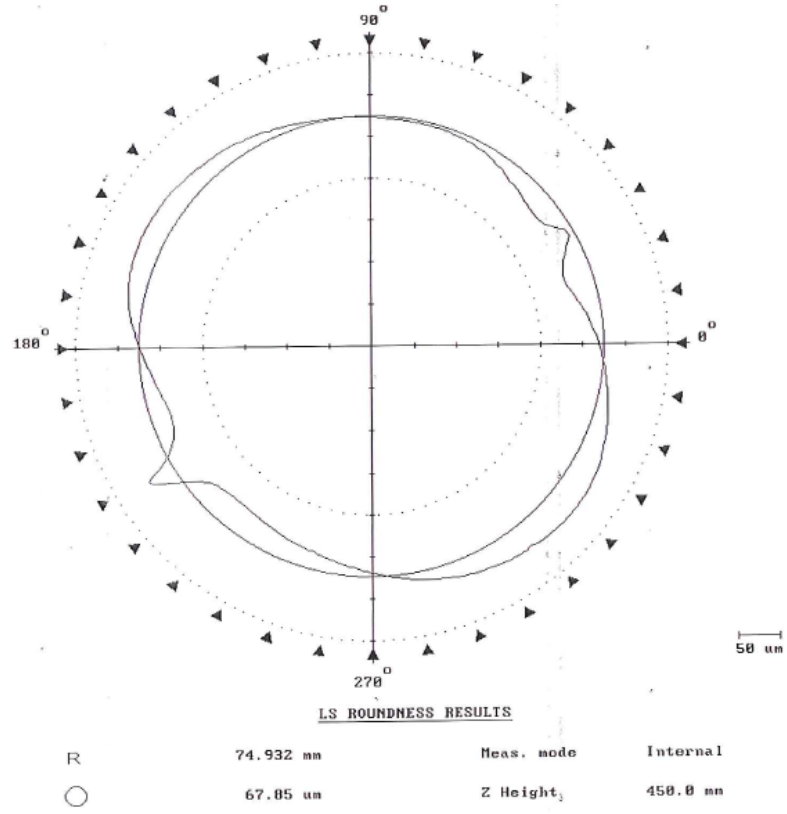
Ardından T1 grubu parçaların yuvarlaklık ölçümleri aşağıdaki şekil 5.56 ve 5.59 arasında verilmiştir.



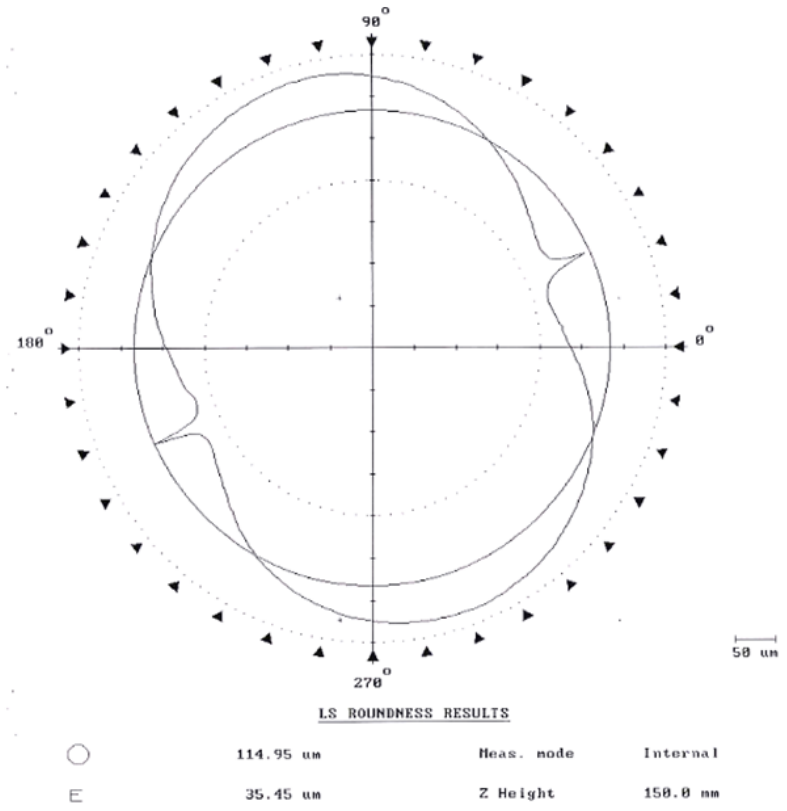
Şekil 5.56 : B6T1 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.



Şekil 5.57 : B8T1 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

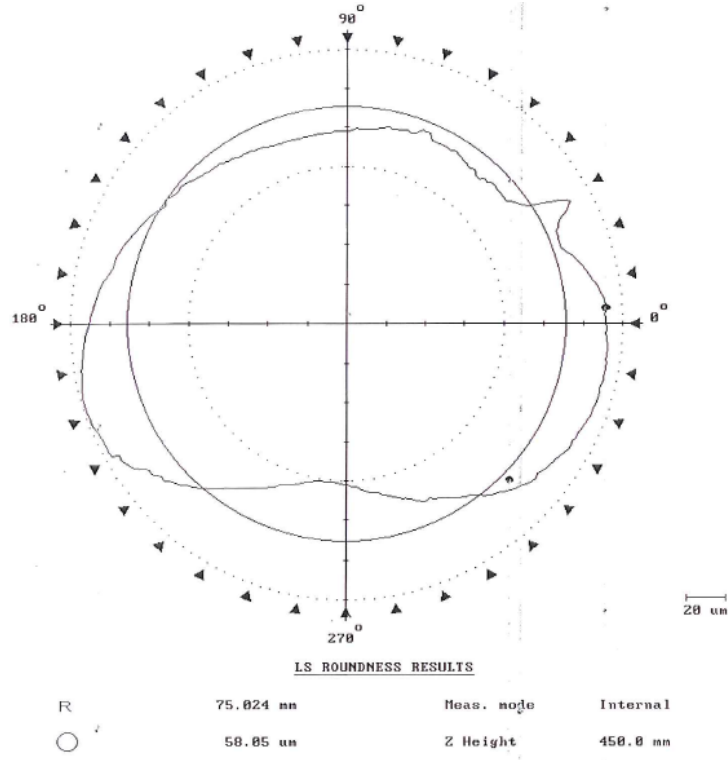


Şekil 5.58 : B10T1 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

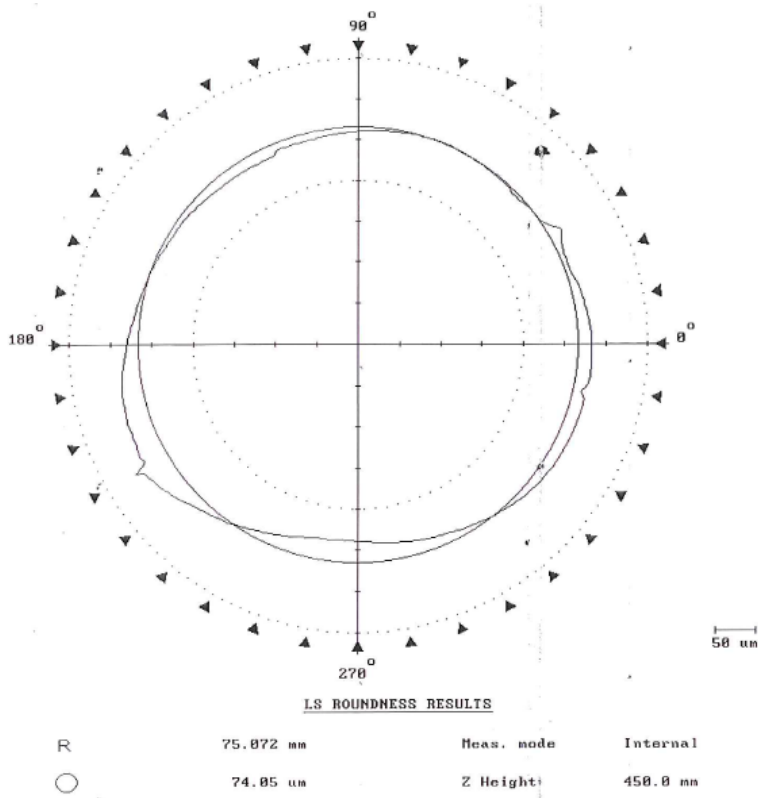


Şekil 5.59 : L6T1 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

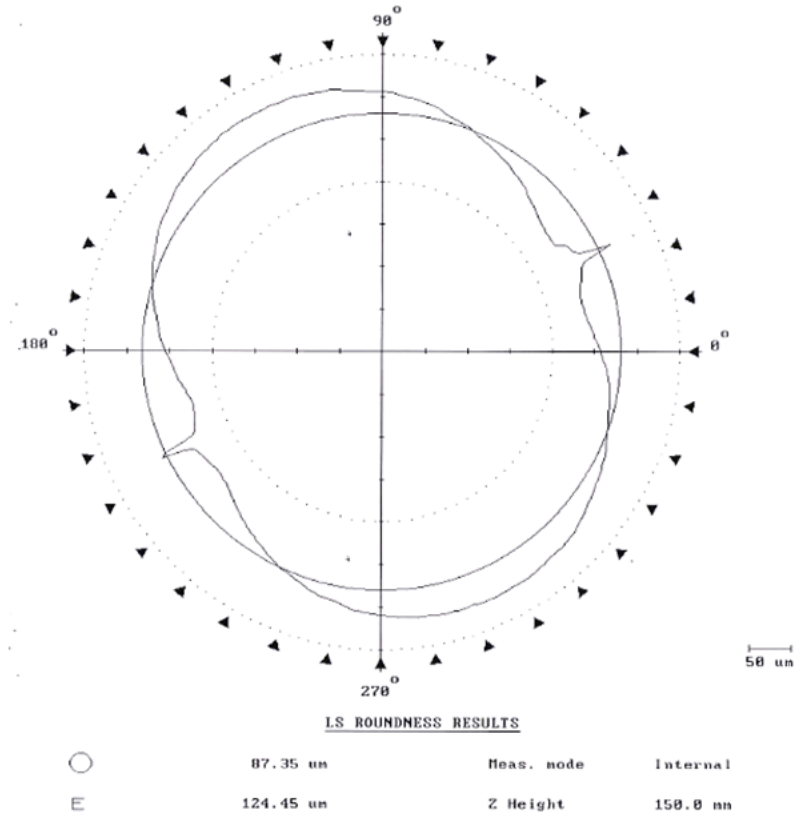
Aşağıdaki resimlerde T2 grubu parçaların ölçümleri şekil 5.60 ve 5.63 arasında verilmiştir.



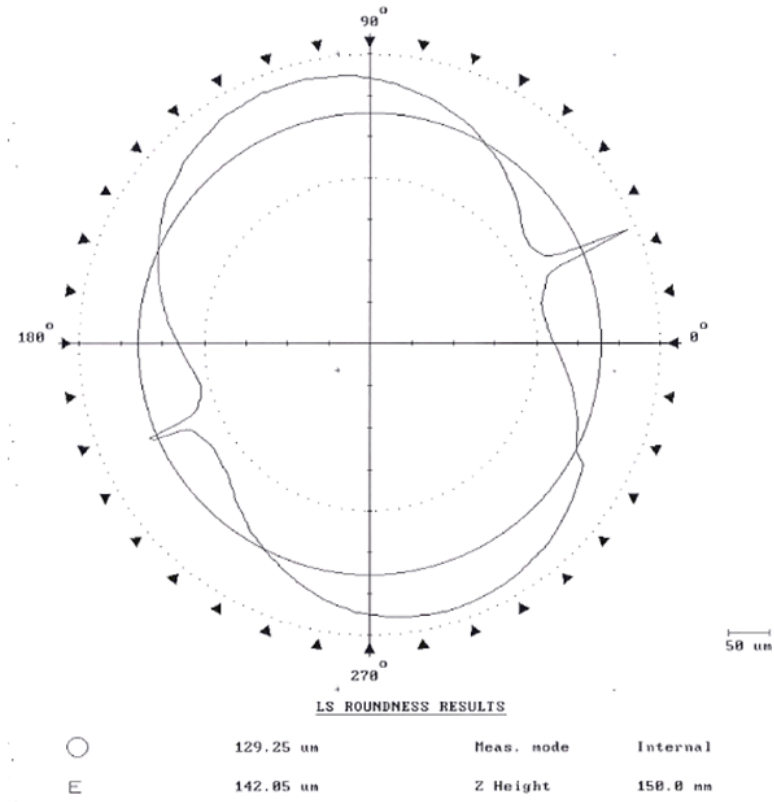
Şekil 5.60 : B6T2 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.



Şekil 5.61 : B8T2 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

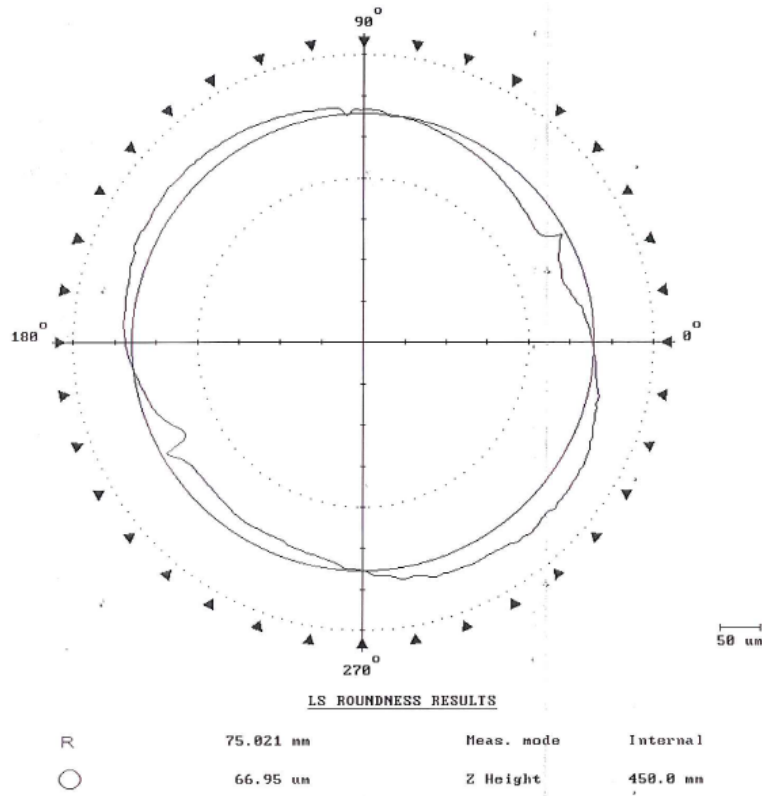


Şekil 5.62 : B10T2 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

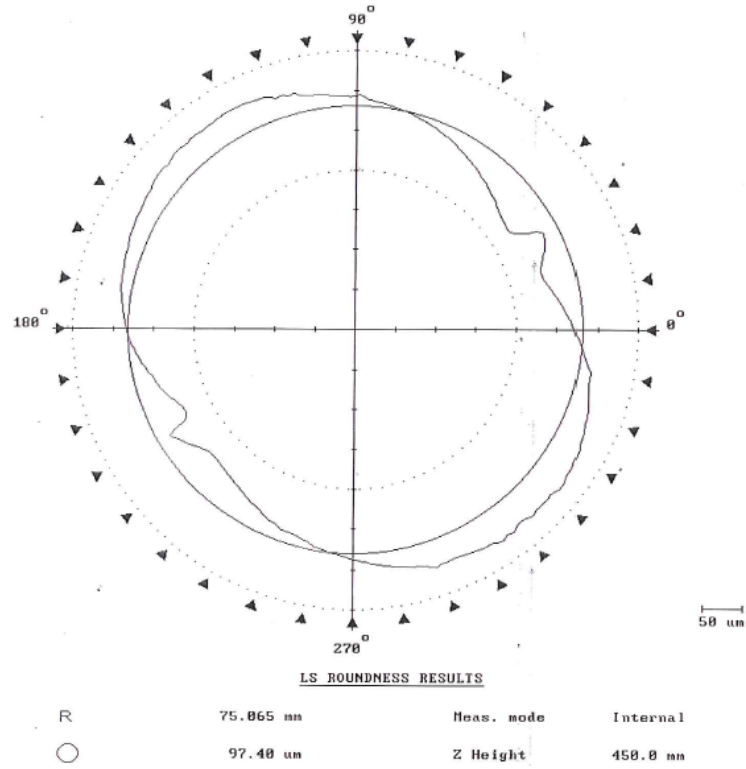


Şekil 5.63 : L6T2 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

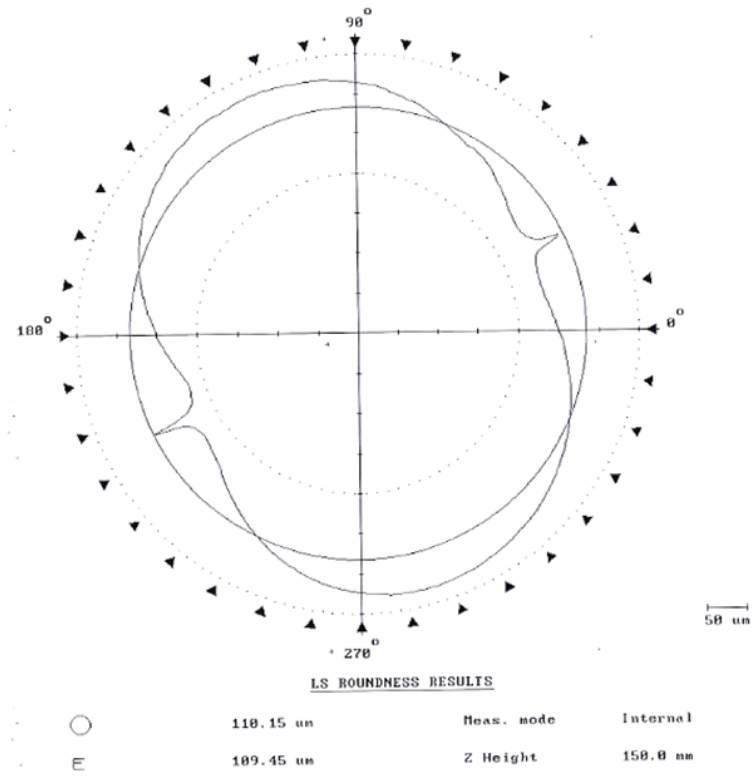
Son olarak ise T3 grubu parçaların yuvarlaklık ölçümleri şekil 5.64 ve 5.67 arasında verilmiştir.



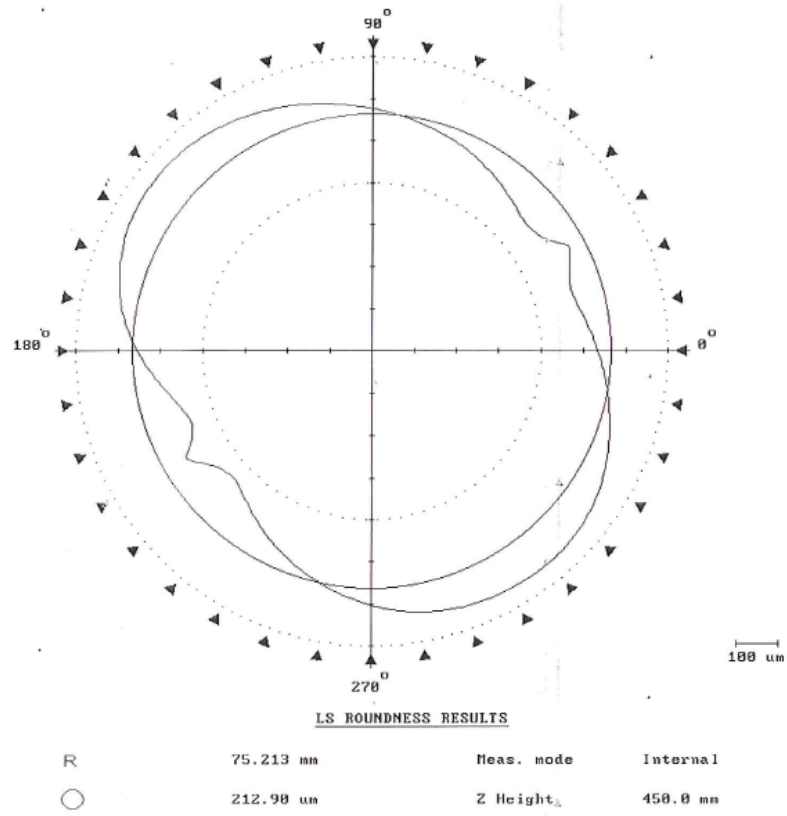
Şekil 5.64 : B6T3 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.



Şekil 5.65 : B8T3 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.



Şekil 5.66 : B10T3 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

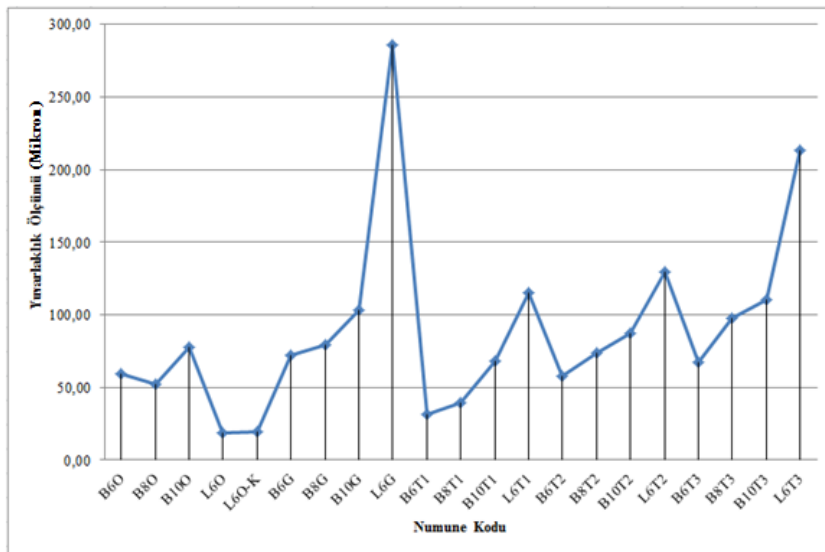


Şekil 5.67 : L6T3 biyel kolu yuvarlaklık ölçümü.

Tek tek verilen yuvarlaklık değerlerinin ardından bütün sonuçlar çizelge 5.5'te tablo ve şekil 5.68'de grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 : Biyel kollarının yuvarlaklık ölçüm sonuçları.

Numune Kodu	Yuvarlaklık Ölçümü (Mikron)
B6O	59,60
B8O	51,80
B10O	77,30
L6O	18,65
L6O-K	19,80
B6G	72,25
B8G	78,90
B10G	103,35
L6G	285,60
B6T1	31,15
B8T1	39,75
B10T1	67,85
L6T1	114,95
B6T2	58,05
B8T2	74,05
B10T2	87,35
L6T2	129,25
B6T3	66,95
B8T3	97,40
B10T3	110,15
L6T3	212,90



Şekil 5.68 : Biyel kollarının yuvarlaklık ölçüm sonuçları.

Sonuçlar irdelendiğinde ilk etapta lazerle 0,6 mm derinlikte çentik açılmış O ve O-K grubu biyel kollarının en az deformasyonla kırıldığı görülmektedir. Altında yatan sebep olarak lazerle çentik açılmış parçaların broşa kıyasla çentik dibinde daha yüksek stres konsantrasyonuna ve düşük dip yarı çapına sahip olması düşünülmektedir. Yüksek stres konsantrasyonu ise malzemenin gevrek kırılma yatkınlığını arttıracaktır [18]. Keza bu durum literatür kısmında bahsedilen çalışmalarla da örtüşmektedir.

Ancak ısıtıl işlem görüp de broşla çentik açılmış biyel kollarında, ısıtıl işlem görüp lazerle çentik açılmış biyel kollarına göre daha küçük değerler gözlemlenmektedir. Bunun nedeni olarak çentiklerin ısıtıl işlemler öncesinde açılmış olması düşünülmektedir. Başka bir ifadeyle ısıtıl işlem süresince çentik dibi hassasiyetinin değişmesi söz konusudur. Bu çerçevede lazer işlemi sonucunda çentik dibinde yığılan gerilemelerin uygulanan ısıtıl işlemler neticesinde gevşemiş oldukları düşünülmektedir. Bu sebeple lazerle çentik açılmış fakat ısıtıl işlem görmüş biyel kollarında ısıtıl işlem görmemiş numunelerdeki davranış sergilenmemiştir.

Broş ile çentik açılan biyel kollarında çentik derinliği arttıkça yuvarlaklık ölçüsünde ve deformasyonda artma gözlemlenmektedir. Bunun nedeninin çentik derinliği arttıkça çentik dibindeki plastik deformasyon bölgesindeki artma olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla biyel kolunun kırılması esnasındaki deformasyonun artması beklenir [18, 19].

Deformasyonda en yüksek değerler L6G ve L6T3 kodlu biyel kollarında görülmüştür. Bunun yanında gerilim giderme uygulanmış tüm biyel kollarında diğer gruplara kıyasla daha yüksek yuvarlaklıklar ölçülmüştür. Bunun nedeni gerilim giderme uygulanmış numunelerde dövmeden gelen kalıntı gerilemelerin minimize edilmesidir [15]. Gerilim giderme uygulanmış malzemelerde minimum düzeyde kalıntı gerilmelerin oluşu, biyel kolunun kırılması esnasında göreceli plastik deformasyon miktarını arttırdığı ve buna bağlı olarak yuvarlaklık ölçümünde yani deformasyonda artmanın en büyük değerde olduğu düşünülmektedir.

Temperleme sıcaklığı arttıkça yuvarlaklık ölçümünün arttığı görülmektedir. Deformasyonun artmasının açıklaması, artan temperleme sıcaklığına bağlı numunelerin sünekliklerinin artmasıyla ilgilidir. Ortaya çıkan bu sonuç, biyel kollarının sertlik, kopma uzaması ve darbeli kırılma enerjisi sonuçları ile de

uyumludur. Başka bir ifadeyle temperlenen numuneler için sünekliğin artmasının çentik dibindeki göreceli plastik şekil değişimi eğilimi doğurduğu düşünülmektedir ki bu da deformasyonu arttıracaktır.

5.8 Sonuçların Yorumlanması ve Yöntemin Seçimi

Deney tasarımı yaklaşımı ile biyel kolları üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar tamalanmıştır. Bu deneysel çalışmaların içerisinde optimum imalat sürecini seçmedeki en önemli kriter parçaların kırılma operasyonu sonrasında alınan yuvarlaklık ölçümleri olmuştur. Bahse konu yuvarlaklık ölçümleri parçaların sonraki imalat operasyonlarına devam etmeden önce ne kadar deformasyona uğradığını ortaya koymuştur. Bunun yanında biyel kolları üzerinde yapılan sertlik, çekme deneyi, kırılma enerjisi ölçümleri ve mikro yapı, SEM görüntülemeleri ortaya konacak sonuçları metalurjik anlamda destekleyen çalışmalar olmuştur.

Net bir hedef olmamakla birlikte literatür araştırmalarında hedeflenen deformasyon miktarlarının yuvarlaklık ölçümü bazında binek araç motorlarında 20 – 30 mikron seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir [1, 5]. Boyutlar sebebiyle bu değer ağır ticari araç motorlarında daha fazla olabileceği beklenir. Bunun yanında devam edecek operasyonlar ve biyel kolunun motora montajı sırasında yataklanması düşünüldüğünde ulaşılabilecek minimum deformasyonun süreç açısından en başarılısı olacağı açıktır. Bu sebeple irdelenen yöntemler ve değiştirilen parametreler içerisinde deformasyon açısından en düşük değere sahip, en yalın ve imalat kararlılığı açısından da en güvenilir yöntem seçilmeye çalışılmıştır. Ayrıca seçilen yöntemle imalatına devam edilen biyel kolunda büyük ucun yataklandıktan sonraki davranışı ölçümlerle ve motor testleriyle doğrulanmaya çalışılmıştır.

Sonuçlar ilk etapta biyel kollarına uygulanan ısı işlemler bakımından değerlendirilmiştir. Çizelge 5.5'te verildiği üzere aynı çentik derinliği ve broşla çentik açma tipine sahip numunelerde T1 grubu yani su verilip ardından 180 °C'de 1,5 saat temperlenen parçalar en düşük deformasyon sonuçlarını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar da numunelerin sertlik, kopma uzaması ve darbe enerji ölçüm sonuçları ile paraleldir. T1 grubu malzemeler en yüksek sertlik değerlerine ulaşırken, en düşük kopma mukavemeti ve kırılma enerjisine sahiptir. Bunlar da malzeme grubunun diğer numunelerle kıyaslandığında en düşük sünekliğe sahip olduğunu belirtmektedir. Bu sebeple eğer çalışma aynı çentik derinliği ve broşla çentik açma yöntemleri

altında değerlendirilseydi T1 grubu malzemeler optimum operasyon olarak seçilebilirdi.

Ancak çalışma kapsamında lazer metoduyla çentik açma da irdelenmiştir. Bu açıdan sonuçlar yorumlandığında öncesinde lazerle çentik açılmış ve sonrasında ısıtıl işlem uygulanmış parçaların tümünde çok yüksek deformasyonlar gözlemlenmiştir. Yuvarlaklık ölçümleri kısmında bahsedildiği gibi çentik dibinde lazer işlemi sonucunda yığılan gerilmelerin geveşemesinin bu duruma sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Dolayısıyla lazerle çentik açma ve ısıtıl işlemin birlikte uygulanması operasyonu daha kötü duruma götürmektedir.

Sonuç itibariyle ısıtıl işlemli parçalar tümünden birlikte değerlendirildiğinde ne iyi sonucu 31 mikronla B6T1 kodlu parça vermiştir.

Isıtıl işlemlerin devamında parçalar çentik derinliklerinin etkisi bakımından değerlendirilmiştir. Diğer faktörlerin elemine edilebilmesi içinse biyel kolları kendi malzeme grupları içerisinde deformasyon miktarlarına göre irdelenmiştir. Bu açıdan bakıldığında tüm gruplarda artan çentik derinliği ile deformasyonun da arttığı gözlemlenmiştir. Artan derinlikle birlikte çentik dibindeki plastik şekil değiştiren bölgenin artışının sebep olduğu düşünülen durum neticesinde liteartür araştırmasındaki bilgilerle de paralel olarak optimum çentik derinliğinin 0,6 mm olduğu tespit edilmiştir.

Tespit edilen çentik derinliğinin devamında çentik açma tipleri irdelenmiştir. Bölümün ilk kısımda belirtildiği gibi lazerle çentik açılmış ve ardından ısıtıl işlem uygulanmış parçaların hepsi yüksek sonuçlar verdiğiinden kıyaslamaya tabi tutulmamışlardır. Bu sebeple geriye 0,6 mm çentik derinliğinde broş ve lazerle metoduyla çentik açılmış B6O, L6O ve L6O-K kodlu üç parça geriye kalmıştır. Bu üç parçanın yuvarlaklık değerleri sırayla 59,60 mikron, 18,65 mikron ve 19,80 mikrondur. Açık bir şekilde görülebileceği üzere lazerle çentik açılmış parçalar broşa kıyasla yaklaşık % 70’lik bir iyileşme sağlamıştır. Bunun da ötesinde literatürde 20 – 30 mikron bandında hedeflenen deformasyon miktarının çalışılan biyel kolunun ağır ticari araçta kullanılır olmasına rağmen altına düşülmüştür. Dolayısıyla lazerle çentik açma yöntemi broşa kıyasla ciddi bir iyileşme göstererek optimum operasyon parameterleri arasına dahil edilmiştir.

Son olarak ise biyel kolunun motor çalışma şartları altında olası dayanım problemleri düşünülerek kırılma kesit alanı artırılmış hali çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Kırılma bölgesi ve etrafına malzeme eklenmesi biyel kolunun yorulma ve emniyet katsayısı bakımından performansını iyileştirirken dönen kütleyi arttırması ve dolayısıyla motorun yakıt ekonomisi performansını kötüleştirir. Bunun bakımından bir tasarım dengesi halinin gözetilmesini gerektirmektedir. Bunun yanında kesitin daraltılabilmesi ise kırılma operasyonu ve deformasyon bakımından olumlu sonuçlar doğurabilecek bir etmendir. Çünkü yüzeyin küçülmesi kırılmanın aynı yükte daha az deformasyonla olması anlamına gelecektir. Bu sebeple L6O ve L6O-K kodlu biyel kolları kıyaslamaya tabi tutulmuştur. Sonuçlar bakımından birbirlerine çok yakın yuvarlaklık değerleri ortaya koyan parçalarda yüzey incelemeleri de yuvarlaklık sonuçlarına paralel gevrek kırılma özellikleri sergilemiştir. Bu bağlamda deformasyon her iki parçada da istenen düzeyde gerçekleşmiştir. Kama hızı ve uygulanan kuvvetlerin gereken seviyenin çok üzerinde olması parçalar arasında farkın oluşmamasının temelini oluşturmuştur. Motor üzerindeki yakıt ekonomisi hedefleri gözetildiğinde ise ince kestili parça optimizasyonda bir adım öne geçerek seçilmiştir.

Yapılan tüm deneysel çalışmalar ve ölçümler değerlendirildiğinde L6O kodlu biyel kolu diğer tüm seçeneklerin önüne geçmiştir. Vermiş olduğu 18,65 mikronluk yuvarlaklık ölçümünün yanında, ısıtma işlemi ihtiyacı duymaması, broşa kıyasla çok daha güvenilir ve tekrarlanabilir lazer metodu ile çentiklerinin açılması ve motor yakıt ekonomisi performansı açısından dönen kütleyi arttırmaması seçimin diğer önemli kriterlerini oluşturmuştur. Sonuç itibarıyla ağır ticari araç motorunda kullanılmak üzere seçilen biyel kolu aşağıdaki özelliklere sahip olmuştur.

- 0,6 mm çentik derinliği
- Lazer kaynağı ile çentik açılma
- Isıl işlem görmeme
- İnce kırılma kesiti

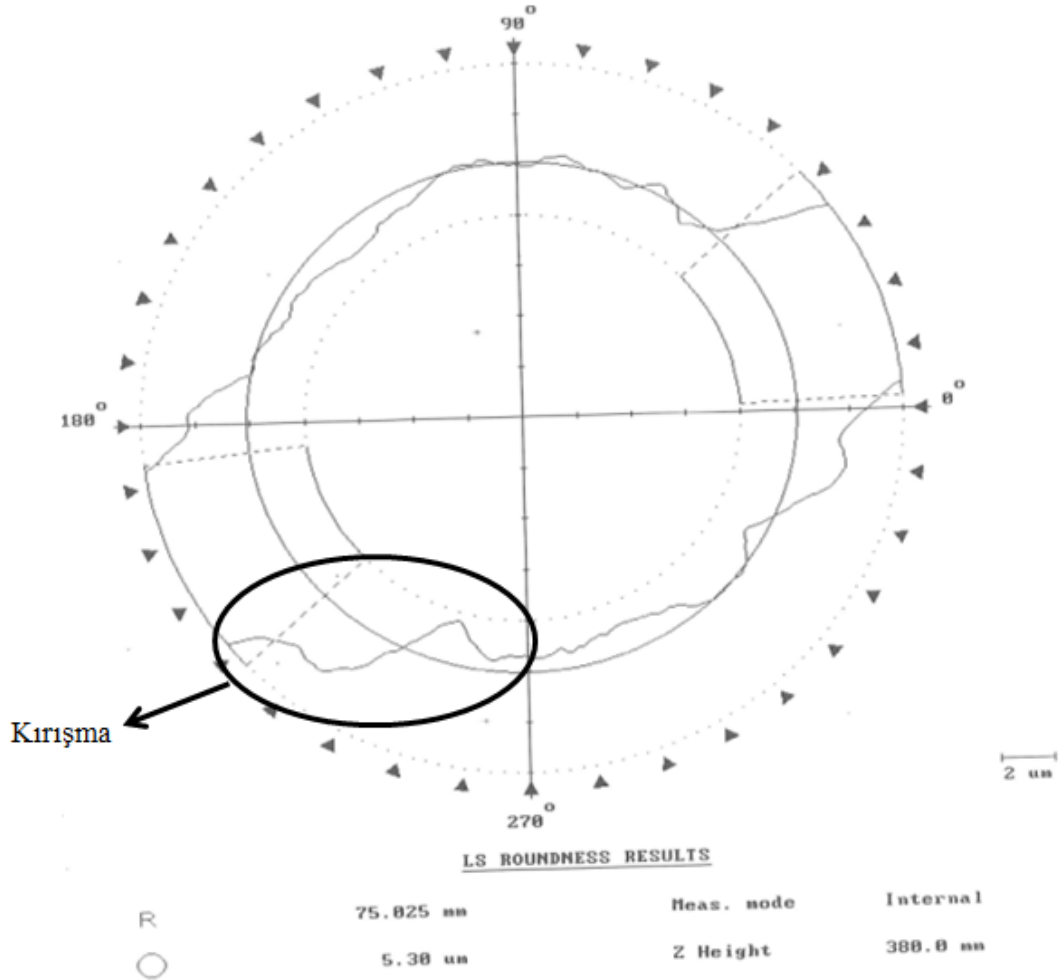
5.8.1 Biyel kolu büyük ucu yataklı yuvarlaklık ölçümleri

Seçilen parametreler neticesinde L6O kodlu biyel kollarından 24 adet son imalat kontrolleri ve motor testleri için hazırlanmıştır. Son imalat adımı olan yıkama

işlemden geçirilen biyel kolları ilk etapta yataklı yuvarlaklık ölçümlerinin alınması için büyük uçları kepler tekrardan açılarak yataklanmıştır.

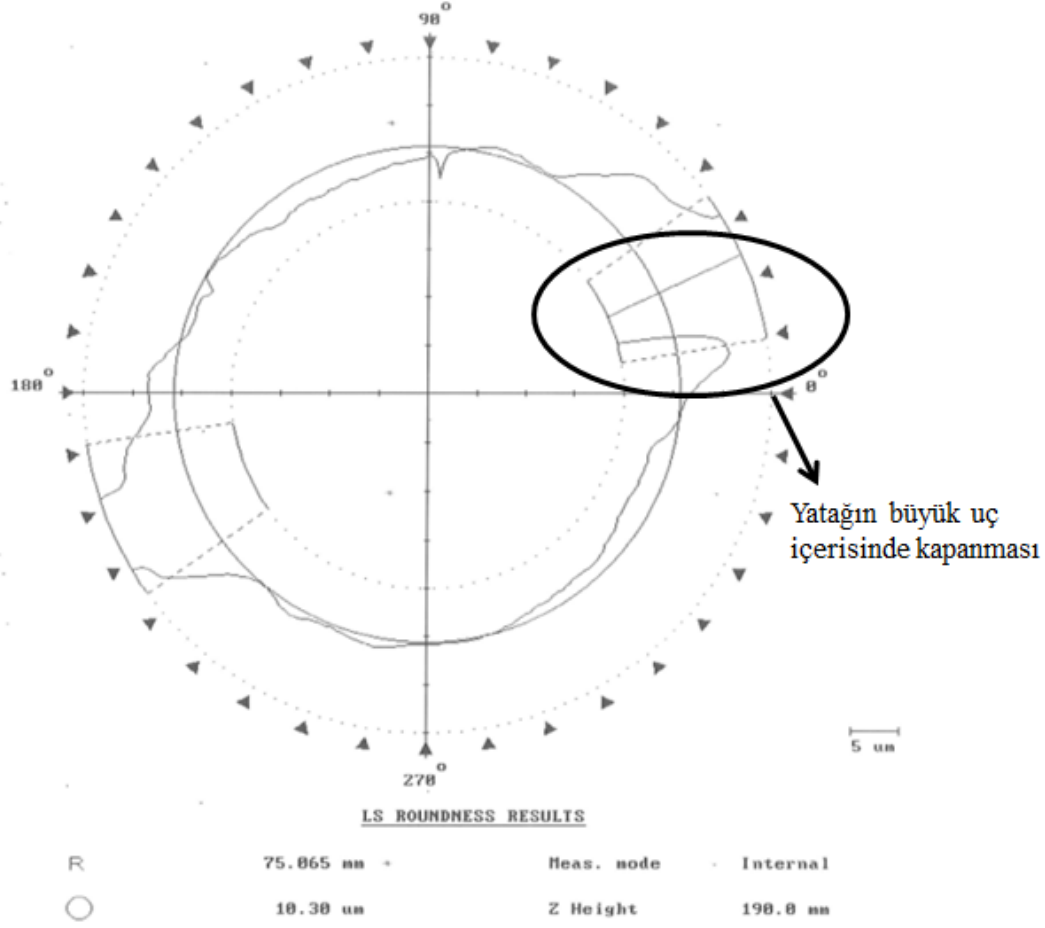
Büyük ucun yataklanmasının ardından ortaya çıkacak nihai şekil ve yuvarlaklık miktarı motorun sorunsuz çalışması açısından en önemli noktayı oluşturmaktadır. Başka bir ifadeyle gerçekleştirilen tüm çalışmaların sonucu bu noktada istenen özellikleri yakalayabilmek içindir. Aksi halde oluşabilecek düzgünsüzlükler, şekil bozuklukları ya da keple biyelin karşılıklı örtüşmemesi krank mili muylusu ve yataklar arasında oluşan yağ filminin kolayca bozulmasına ve motorun yatak sarmasına sebebiyet verebilecektir.

Bu anlamda aşağıdaki şekillerde örnek olarak biyel kolu büyük ucu problemli yataklı yuvarlaklık ölçümleri verilmiştir.



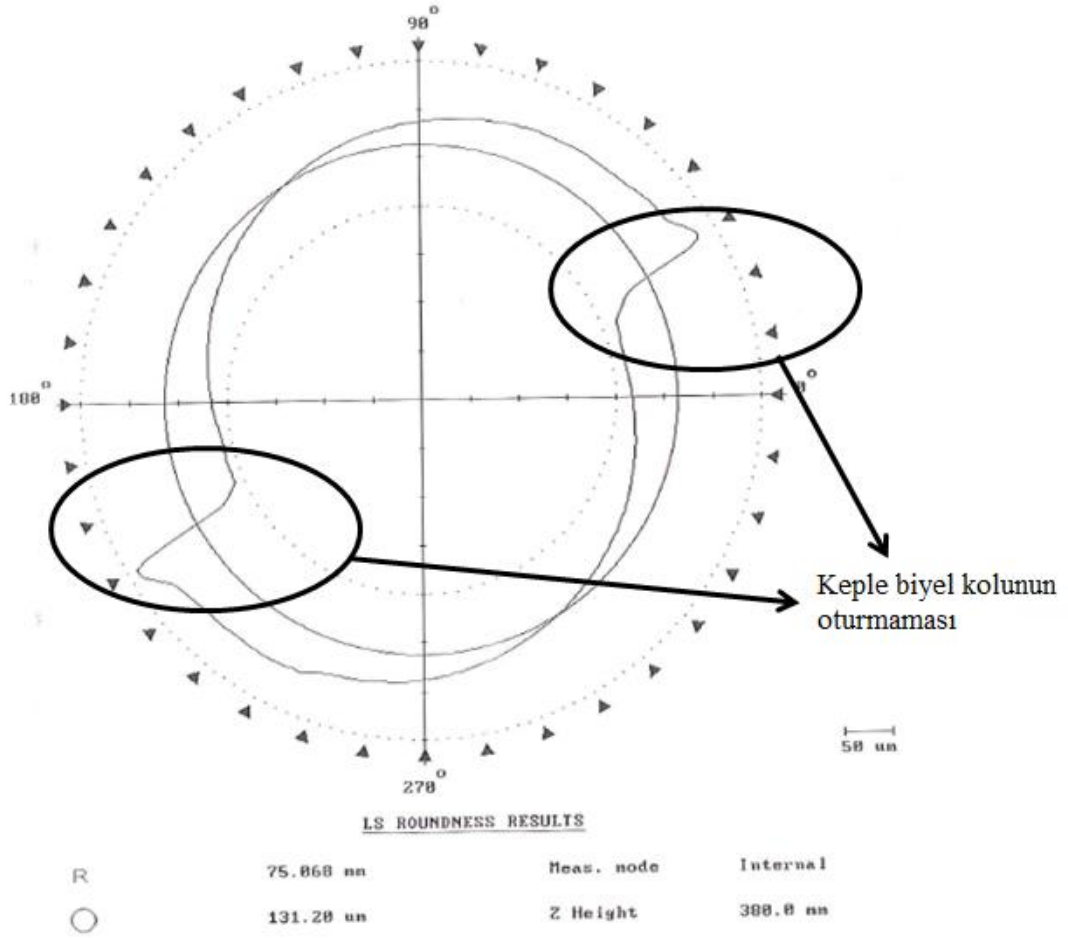
Şekil 5.69 : Yataklı yuvarlaklık kırışma örneği.

Şekil 5.69’da görülebileceği üzere biyel kolu biten imalat operasyonlarının ardından yataklandığında yatağın büyük uç içerisinde kırışarak düzgün olmayan ve yağ filmini bozabilecek şekilde bir hal aldığı görülmektedir.



Şekil 5.70 : Yataklı yuvarlaklık kapanma örneği.

Şekil 5.70’te ise biyel kolunun kırılma operasyonu esnasında aşırı deformasyona uğraması sonucu yatağı içe doğru itmesi gösterilmiştir. Kırışmaya benzer şekilde bu durum da krank mili kol muylusu ve yatak arasında oluşacak ve 1 mikrona kadar düşebilecek yağ filminin bozulup, muylu ve yatağın motor çalışırken temas haline geçmesine sebebiyet verebilecektir.



Şekil 5.71 : Yataklı yuvarlaklık kep oturmaması ve kayması örneği.

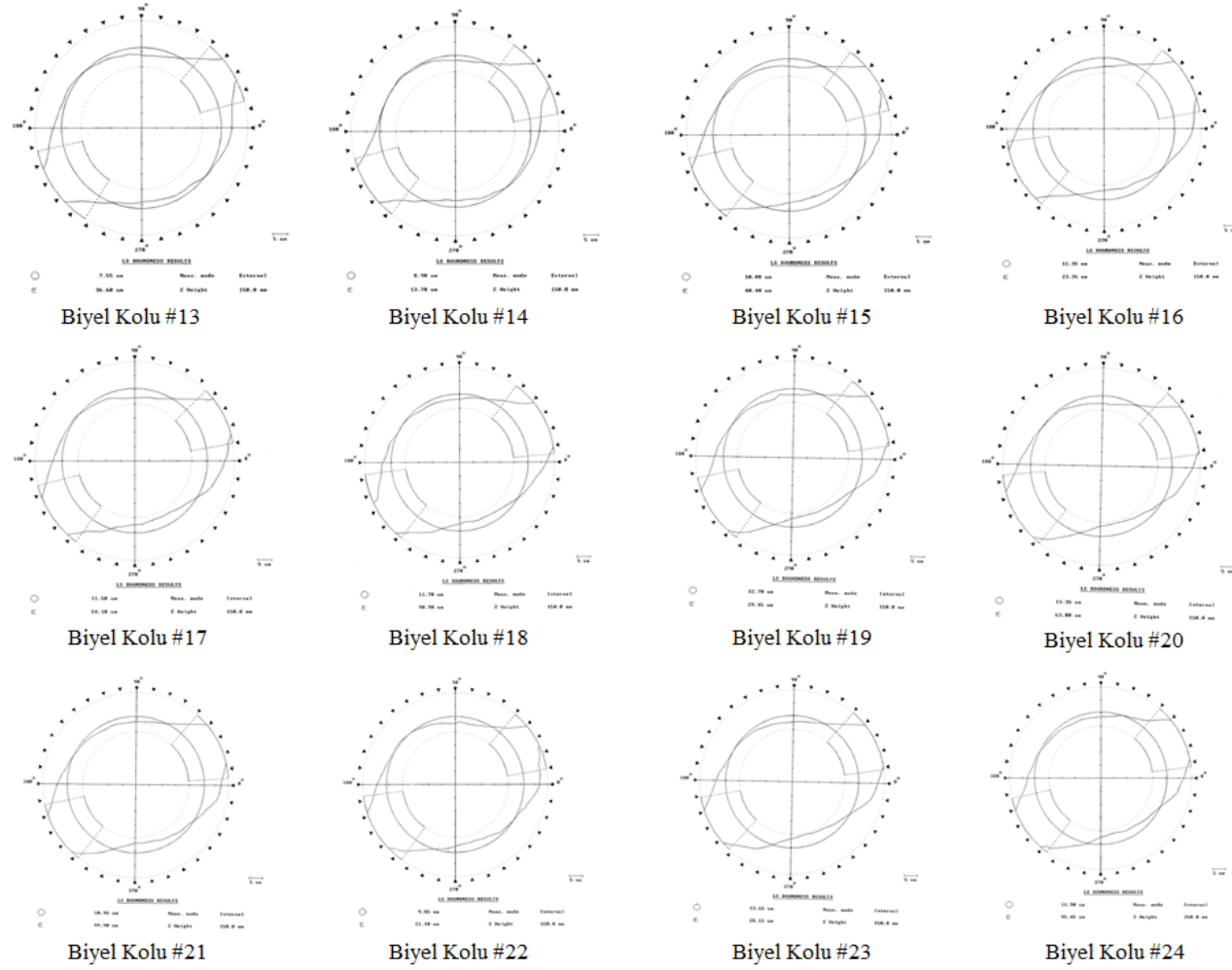
Son olarak ise yine aşırı deformasyon ve sünek kırılma sonucu keple biyel kolunun karşılıklı olarak birbirleriyle örtüşmemesi sonucu ortaya çıkabilecek durum şekil 5.71’de verimiştir. Bu durumun iki mazhuru söz konusudur. İlki, önceki örneklerde de bahsedildiği gibi oluşan yağ filminin bozulması. İkincisi ise örtüşmeyen yüzeyler sonucu civataların oluşturacağı sıkma kuvvetinin oluşturulamaması. İkinci durum motor çalışma şartları altında biyel kolunun görevi bakımından oldukça ciddi öneme sahiptir. Aksi halde biyel kolu oluşan patlama kuvvetini taşıyamaz ve motor çalışamaz hale gelir.

Bu olası problemler göz önünde bulundurularak çentikleri lazerle 0,6 mm açılan 24 adet biyel kolu ölçülmüştür ve sonuçlar çizelge 5.6’da listelenmiştir.

Çizelge 5.6 : Seçilen metod ile üretilen 24 adet biyel kolu yataklı yuvarlaklık ölçümü sonuçları.

Parça Numarası	Yataklı Yuvarlaklık Ölçümü (Mikron)
Biyel Kolu #1	10,80
Biyel Kolu #2	9,10
Biyel Kolu #3	6,30
Biyel Kolu #4	8,10
Biyel Kolu #5	10,50
Biyel Kolu #6	9,10
Biyel Kolu #7	10,15
Biyel Kolu #8	8,10
Biyel Kolu #9	8,75
Biyel Kolu #10	9,50
Biyel Kolu #11	10,65
Biyel Kolu #12	9,40
Biyel Kolu #13	7,55
Biyel Kolu #14	8,90
Biyel Kolu #15	10,00
Biyel Kolu #16	11,35
Biyel Kolu #17	11,50
Biyel Kolu #18	11,70
Biyel Kolu #19	12,70
Biyel Kolu #20	13,35
Biyel Kolu #21	10,95
Biyel Kolu #22	9,85
Biyel Kolu #23	13,65
Biyel Kolu #24	11,90

Ölçülen değerler incelendiğinde biyel kolları maksimum 15 mikronluk tolerans bandının içerisinde girmektedirler. Bu sayısal değerlerin de ötesinde ortaya çıkan şekiller önem kazanmaktadır. Şekil 5.72 ve 5.73'te 24 adet kolun yataklandıktan sonraki ölçülmüş şekilleri verilmiştir.



Şekil 5.73 : Seçilen metodla hazırlanan son 12 adet biyel kolunun yataklı yuvarlaklık ölçümleri.

Yuvarlaklık şekillerinden de görülebileceği üzere yeni yöntemle imal edilmiş biyel kollarında büyük uçlar yataklandıktan sonra yataklarda kırışma, kapanma ya da keple biyelin oturmaması gibi sorunlar gözlemlenmemiştir. Biyel kollarında bu onaylar alındıktan sonra ilk on iki tanesi iki adet motora dinamometrelerde ömür testi koşması için montaj edilmiştir.

5.8.2 Biyel kollarının motor testlerinde doğrulanması

Biyel kollarının motor ömür testlerinde doğrulanması temel olarak iki şekilde gerçekleşmektedir. İlk etapta biyel kollarından testin durmasına mani olmayacak şekilde testi tamamlamaları beklenir. İkinci aşamada ise testten çıkan biyel kollarında dayanıklılık anlamında herhangi bir çatlak, tahribat ya da ölçüsel değişiklik olup olmadığı kontrol edilir. Eğer testi tamamlayan biyel kolları bu anlamda bir sorun ortaya koymuyorsa testler başarıyla tamamlanmış demektir.

Yukarıdaki kriterler göz önünde bulundurularak test öncesi ölçülen ilk 12 adet biyel kolu motorlara montaj edilmiştir ve 2300 saatlik hızlandırılmış ömür testleri dinamometerlerde koşulmuştur. Şekil 5.74 dinamometrede ömür testi koşan motorun fotoğrafını göstermektedir.



Şekil 5.74 : Seçilen yöntemle imal edilmiş biyel kolu ile koşulan dinamometre motoru ömür testi.

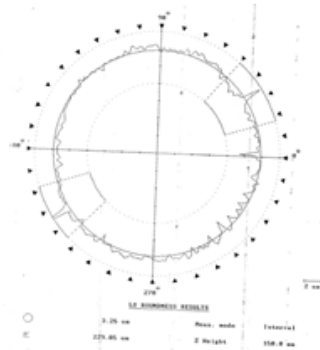
Yataklı yuvarlaklık ölçümleri dışında motora konmadan biyel kollarında büyük ve küçük uçların çapları, iki ucun merkezleri arasında mesafe, eğiklik, yüzey pürüzlülük ve kalınlık ölçümleri ölçülüp kayıt altına alınmıştır. Akabinde iki farklı tam yük çevriminde 2300 saatlik hızlandırılmış ömür testleri tamamlanmıştır.

Testleri sorunsuzca tamamlayan biyel kollarında test sonrasında yine uzunluk, kalınlık, eğiklik ve yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler neticesinde bahse konu noktalarda ölçüsel bir değişikliğe rastlanmamıştır. Ayrıca tahribatsız muayene yöntemi uygulanarak parçalar üzerinde herhangi bir çatlak olup olmadığı kontrol edilmiştir ve bir probleme rastlanmamıştır.

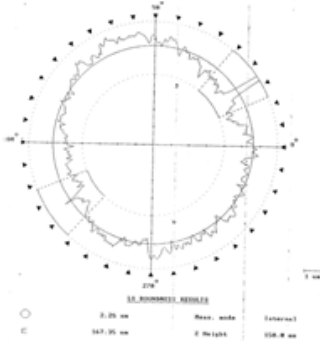
Büyük uç ve devreye alınmaya çalışılan yöntemle ilgili olarak ise büyük uçların tek tek yuvarlaklık ölçümleri tekrar alınmıştır. Test öncesinde imalat toleransı olarak maksimum 5 mikronluk yuvarlaklık toleransı ile işlenen parçalar test sonrasında içinden yatakları çıkartılarak tekrar sıkılmıştır ve yuvarlaklık ölçümleri alınmıştır. Buradaki kontrolün amacı büyük uçta ömür testi tamalandıktan sonra beklenmeyen bir deformasyonun olup olmadığının tespit edilebilmesidir.

Buna göre parçaların test öncesi ve sonrası ölçümleri şekil 5.75 ve 5.78 arasında verilmiştir. Ortaya çıkan sayısal değerler de ardından çizelge 5.7’de verilmiştir.

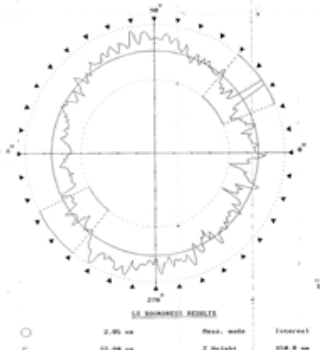
Motor #1 Test Öncesi Yataksız Ölçümler



Biyel Kolu #1 / Silindir #1

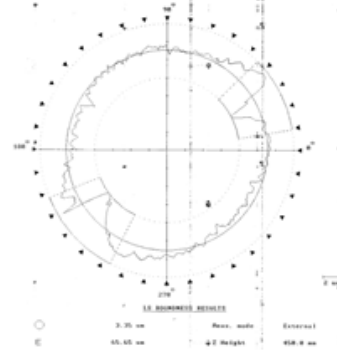


Biyel Kolu #2 / Silindir #2

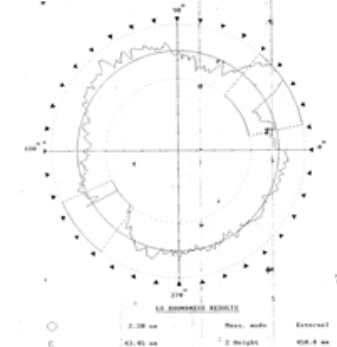


Biyel Kolu #3 / Silindir #3

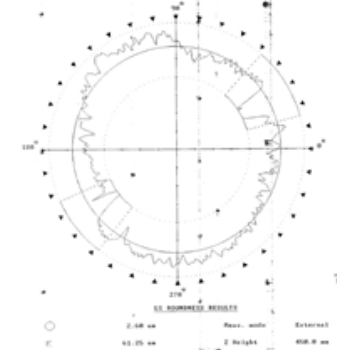
Motor #1 Test Sonrası Yataksız Ölçümler



Biyel Kolu #1 / Silindir #1



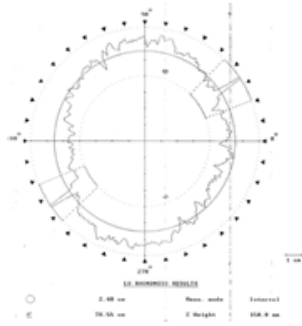
Biyel Kolu #2 / Silindir #2



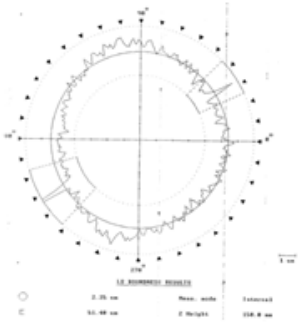
Biyel Kolu #3 / Silindir #3

Şekil 5.75 : Ömür testinden çıkan biyel kollarının test öncesi ve sonrası yataksız yuvarlaklık ölçümleri (#1 – #3).

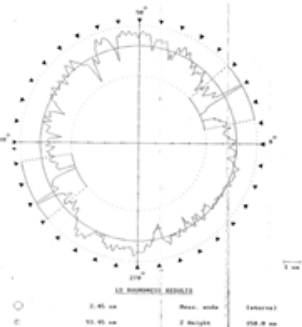
Motor #1 Test Öncesi Yataksız Ölçümler



Biyel Kolu #4 / Silindir #4

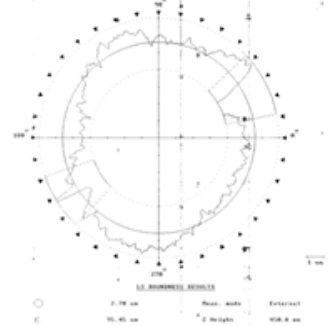


Biyel Kolu #5 / Silindir #5

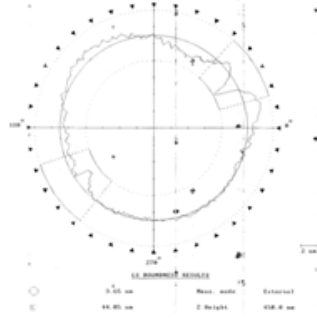


Biyel Kolu #6 / Silindir #6

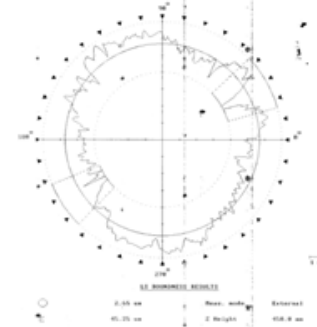
Motor #1 Test Sonrası Yataksız Ölçümler



Biyel Kolu #4 / Silindir #4



Biyel Kolu #5 / Silindir #5

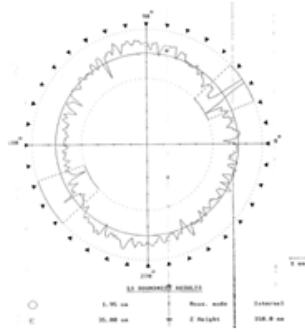


Biyel Kolu #6 / Silindir #6

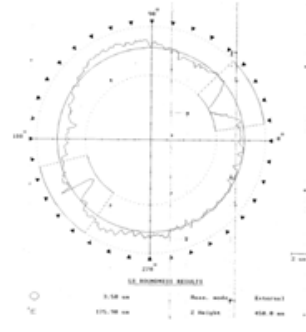
Şekil 5.76 : Ömür testinden çıkan biyel kollarının test öncesi ve sonrası yataksız yuvarlaklık ölçümleri (#3 – #6).

Motor #2 Test Öncesi Yataksız Ölçümler

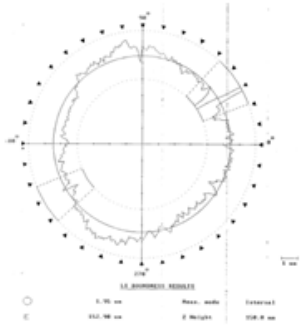
Motor #2 Test Sonrası Yataksız Ölçümler



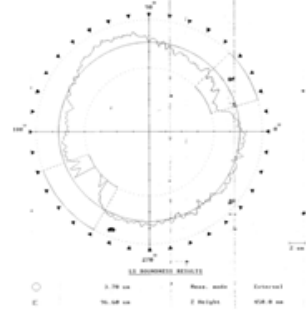
Biyel Kolu #7 / Silindir #1



Biyel Kolu #7 / Silindir #1



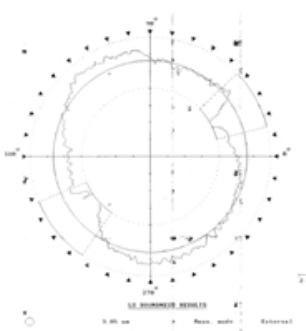
Biyel Kolu #8 / Silindir #2



Biyel Kolu #8 / Silindir #2



Biyel Kolu #9 / Silindir #3

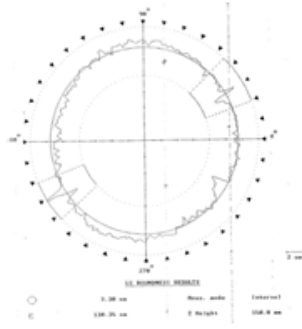


Biyel Kolu #9 / Silindir #3

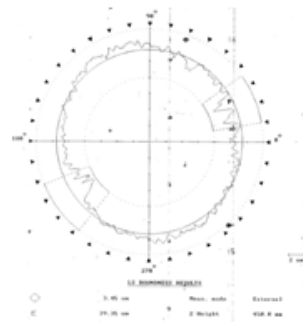
Şekil 5.77 : Ömür testinden çıkan biyel kollarının test öncesi ve sonrası yataksız yuvarlaklık ölçümleri (#7 – #9).

Motor #2 Test Öncesi Yataksız Ölçümler

Motor #2 Test Sonrası Yataksız Ölçümler



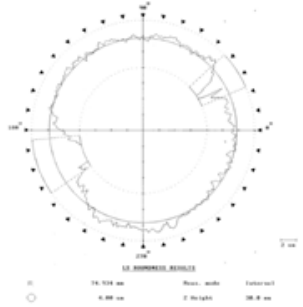
Biyel Kolu #10 / Silindir #4



Biyel Kolu #10 / Silindir #4



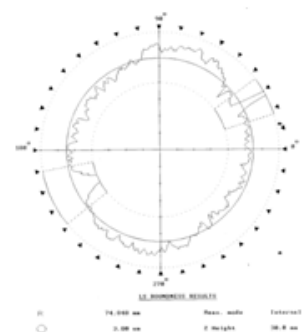
Biyel Kolu #11 / Silindir #5



Biyel Kolu #11 / Silindir #5



Biyel Kolu #12 / Silindir #6



Biyel Kolu #12 / Silindir #6

Şekil 5.78 : Ömür testinden çıkan biyel kollarının test öncesi ve sonrası yataksız yuvarlaklık ölçümleri (#9 – #12).

Sayısal değerler ise çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Ömür testinden çıkan biyel kollarının test öncesi ve sonrası yataksız yuvarlaklık ölçümleri.

Biyel Kolu Numarası	Motor #1 Test Öncesi Yataksız Ölçümler (Mikron)	Motor #1 Test Sonrası Yataksız Ölçümler (Mikron)
Biyel Kolu #1 / Silindir #1	3,25	3,35
Biyel Kolu #2 / Silindir #2	2,20	2,20
Biyel Kolu #3 / Silindir #3	2,40	2,60
Biyel Kolu #4 / Silindir #4	2,40	2,70
Biyel Kolu #5 / Silindir #5	2,25	3,65
Biyel Kolu #6 / Silindir #6	2,45	2,65
Biyel Kolu Numarası	Motor #2 Test Öncesi Yataksız Ölçümler (Mikron)	Motor #2 Test Sonrası Yataksız Ölçümler (Mikron)
Biyel Kolu #7 / Silindir #1	1,95	3,50
Biyel Kolu #8 / Silindir #2	1,95	3,70
Biyel Kolu #9 / Silindir #3	2,50	3,85
Biyel Kolu #10 / Silindir #4	3,30	3,45
Biyel Kolu #11 / Silindir #5	2,70	4,00
Biyel Kolu #12 / Silindir #6	2,95	3,80

Bu sonuçlara göre biyel kolları gerek deformasyon miktarları gerekse test sonrası ortaya koydukları büyük uç şekilleri bakımından testleri başarıyla tamamladı olarak değerlendirilmiştir.

Biyel kolları üzerinde yapılan tüm parametrik çalışmaların neticesinde L6O kodlu numunenin seri imalat için devreye alınması uygun bulunmuştur.

5.8.3 Kırma metodu ile imal edilen biyel kolunun maliyet analizi

Bu bölümde geleneksel ve kırma metodu ile imal edilen işlev ve boyut açısından aynı fakat imalat yöntemleri farklı biyel kollarının maliyet açısından değerlendirmeleri yapılacaktır.

İlk etapta tezin üçüncü kısmında detaylı şekilde verilen imalat adımlarının süreleri hatta yapılan hesaplama ve ölçümler neticesinde çizelge 5.8 ve 5.9’da iki farklı imalat tipi için verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Geleneksel yöntem ile imalatın süresi.

Geleneksel Yöntem ile İmalat	Süre (s)
Birleşme Yüzeyleri Ayrı Ayrı Broşlanması	346
Birleşme Yüzeyleri Ayrı Ayrı Taşlanması	125
Kep tarafı civata oturma yüzeyi frezelenmesi	38
Kep ve biyel koluna matkap ve kılavuz ile civata delikleri açılması	93
Kep ve biyel koluna merkezleme pim deliklerinin açılması	68
Kep ve biyel koluna merkezleme pimlerinin çakılması	28
Kep ve biyel kolunun civatalar yardımıyla birleştirilmesi	39
Büyük ve küçük ucun ilk kademe çap pasolarının alınması	183
Küçük uca burç çakılması	29
Büyük ve küçük ucun son kademe çap işlemesi	176
Yan yüzeylerin taşlanması	82
Büyük ucun honlanması	118
Toplam	1325

Çizelge 5.9 : Kıрма yöntemi ile imalatın süresi.

Kırma Yöntemi ile İmalat	Süre (s)
Tek parça biyel kolunda yan yüzeylerin taşlanması (kaba)	79
Büyük ve küçük ucun ilk kademe çap pasolarının alınması	189
Tek parça biyel koluna matkap ve kılavuz ile civata deliklerinin açılması	86
Büyük ucun içerisine çentiklerin açılması	25
Kep ve biyel kolunun kırılarak ayrılması	11
Kep ve biyel kolunun civatalar yardımıyla birleştirilmesi	39
Küçük uca burç çakılması	29
Büyük ve küçük ucun son kademe çap işlemesi	171
Yan yüzeylerin taşlanması	82
Büyük ucun honlanması	118
Toplam	829

Görüldüğü üzere geleneksel yöntemde toplam süre 1325 saniye olurken, yeni yöntemde bu süre 829 saniyeye düşebilmektedir.

Bunun yanında dövme tedarikçisinden kebi ve biyeli ayrı ayrı dövülmüş ve de yekpare imal edilmiş biyel kollarının birim fiyatları alınmıştır. Çizelge 5.10'da fiyatlar TL cinsinden verilmiştir.

Çizelge 5.10 : Biyel kolları birim fiyatları.

Tip	Fiyat (TL)
Yekpare biyel kolu	25
Biyel kolu tarafı (ayrı)	23
Kep tarafı (ayrı)	6

Yekpare biyel kolunun birim fiyatı 25 TL olurken, geleneksel yöntemle iki parça halinde dövülen ve tedarik edilen parçanın fiyatı 29 TL olmuştur.

İlk etapta maliyet analizi çalışanın asgari ücret üzerinden çalışacağı varsayımı ile yapılırsa 2015 yılı verilerine göre brüt çalışan maaşı 1201,5 TL olacaktır ve saatlik ortalama 5,34 TL'ye karşılık gelecektir. Bunun yanında yılda 10000 motor üretileceği varsayımı da yapılırsa toplam biyel kolu üretimi 60000 olacaktır. Tüm bu rakamlar düşünüldüğünde parça başına kazanç 4,74 TL olurken yıllık bazda değer 285000 TL'ye yaklaşmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir içten yanmalı motorda biyel kolunun görevi tez boyunca detaylıca anlatılmaya çalışılmıştır. Buna göre temel olarak pistonun üzerinde meydana gelen yanma sonucu oluşan dikey hareketi krank miline aktaran parçada üzerinde detaylıca çalışılması gereken tasarım noktaları ortaya konmuştur.

Yekpare dövülen biyel kolunun büyük uç kırma parametrelerini inceleyen tüm çalışmalar neticesinde özetle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Kırma operasyonu sonrasında en düşük deformasyon ve yuvarlaklık ölçüsü 0,6 mm lazerle açılmış çentik derinliğine sahip, ısıtma işlemi görmeyen ve ince kesitli parçalarda görülmüştür.
- Lazer kaynağı ile çentik açmak oluşacak deformasyonlar bakımından broşla çentik açmaya üstünlük sağlamıştır.
- Broşla çentik açılan tüm numunlerin içerisinde su verilmesinin ardından 180 °C'de 1,5 saat temperlenen numuneler ısıtma işlemi görmemiş parçalara göre daha düşük deformasyonlar ve yuvarlaklık ölçüleri vermiştir.
- Isıtma işlemi öncesinde lazerle çentik açılan numunelerde uygulanan ısıtma işlemi birlikte çentik dibine yığılan gerilmelerin gevşediği ve deformasyonlarda ciddi derecede artmalar olduğu gözlemlenmiştir.
- Yuvarlaklık ölçüleriyle paralel şekilde, en düşük çentik darbe enerjisi 180 °C temperleme sıcaklığına sahip malzeme grubunda görülürken gerilim giderme uygulanmış grup en yüksek enerjiyle kırılmıştır.
- Isıtma işlemi gören numunelerde kopma uzaması ve çentik darbe testi sonuçlarıyla paralel şekilde temperleme sıcaklığı arttıkça yuvarlaklık ölçüsü ve deformasyonlarda artma gözlemlenmiştir. Artan sıcaklığa bağlı süneklik artışı bu noktada etkilidir.
- Isıtma işlemi grupları içerisinde en yüksek yuvarlaklık ölçümü gerilim giderme uygulanmış numunelerde gözlemlenmiştir. Gerilim giderme uygulanmış

malzemelerde minimum düzeyde kalıntı gerilmelerin oluşunun kırılma esnasında göreceleri plastik deformasyonu arttırdığı düşünülmektedir.

- Malzeme grupları içerisinde en düşük sertlik değeri gerilim giderme uygulanmış malzemelerde görülmüştür. Bunun tersi olarak da 180 °C’de temperlenen numunler en sert grup olmuştur. Isıl işlem görmemiş numune sertlikleri ise bu iki grup arasında kalmıştır.
- Üç farklı çentik derinliği ile üzerinde çalışılan numunlerde çentik derinliği arttıkça deformasyon ve yuvarlaklık ölçülerinde artma gözlemlenmiştir.
- SEM ve kırma yüzeyi fotoğrafları sonuçlarına göre tüm malzeme gruplarında küçük sayılabilecek farklılıklara rağmen gevrek tarzda bir kırılma gözlemlenmiştir.
- Motor çalışma şartlarında olası mukavemet problemlerine karşı biyel kolunun saptan büyük uca geçen bölgede kesitin kalınlaştırılması kırma sonrası deformasyonlar üzerinde etkili olmamıştır. Çalışma sonunda ağırlık etkisi göz önünde bulundurularak ince kesitli tasarım imalat için seçilmiştir ancak gerekli hallerde kesit kalınlaştırılabilir.
- Devreye alınan kırma operasyonu sayesinde geleneksel imalat yöntemine kıyasla toplamda imalat adımları yaklaşık % 30 azaltılırken, imalat süresi de 1325 saniyeden 829 saniyeye düşürülmüştür. Bunlarla birlikte ham parçanın ucuzlaması ile toplamda parça başına 4,74 TL’lik maliyet azaltılmasına erişilmiştir.
- Seçilen parametreler ile devreye alınan yeni yöntemle imal edilen biyel kolları iki farklı dinamometre motorunda ömür testine tabi tutulmuştur. Testler başarıyla tamamlanarak yöntemin seri imalat için devreye alınmasında bir mahzur görülmemiştir.

Yapılan tüm bu çalışmalar boyunca konu hakkında gelecekte yapılacak diğer çalışmalara ışık tutması amacıyla iki noktada öneriler getirilecektir.

Bunlardan ilki kırma tezgahına bir kuvvet ölçerin eklenmesidir. Bu sayede parçalar kırılırken hangi özelliğe sahip olursa olsunlar kırma kuvveti ölçülebilecektir ve yapılan kuvvet ölçümleri yuvarlaklık ölçümleri öncesinde parçaların davranışları hakkında bilgi verebilecektir. Burada dikkat edilmesi gereken husus ise kırmanın çok

hızlı gerçekteşmesini yakalayabilecek *load cell*'in seçimidir. Bu sebeple yüksek akım kesme hassasiyetine sahip piezoelektrik ekipmanlar tercih edilmelidir.

Tez çalışmasında yapılan deneysel çalışmaların üzerine ek olarak ise gelecek çalışmalarda sonlu eleman analizi ile deformasyonların ve kırılmanın yorumlanabilmesi öneriler arasında yerini alacaktır. Ancak yapılacak sonlu eleman analizinde doğru sonuçların ortaya konulabilmesi için dikkat edilmesi gereken noktalar mevcuttur. Bunlardan ilki biyel kolunun tezgahla birlikte modellenmesidir. Tezgahtaki fikstürde küçük uç kısmı sabit olsa da büyük ucu kırmaya yarayan çekiçler ve kama modellenmelidir. Bunun dışında kırma için uygulanacak kuvvet önem kazanmaktadır. Konu için iki yol izlenebilir; ilki tezgahın hidrolik hattına bir basınç ölçer eklenerek anlık kırma hidrolik basıncının ölçülmesi ve buradan kuvvete geçilmesidir. Ya da bir önceki kısımda önerilen kuvvet ölçerin eklenmesiyle direk kırma kuvvetinin analize girdi olarak eklenmesidir. Ancak bu noktada da yükün çekiçlerden biyel büyük ucuna ne şekilde yayıldığına dikkat edilmelidir. Son olarak ise darbeli kırılmanın modellenmesi önem kazanmaktadır. Kullanılan biyel kolunun malzeme kartında kırılma tokluğu değeri gözönünde bulundurularak, bu değerin üzerine çıkan her gerilme değerinde o nokta (node) yok edilerek kırılma modellenebilir. Devamında civata yükleri altında deformasyon miktarları değerlendirilebilir ancak kırma yüzey şekli hakkında analizin nasıl sonuçlar göstereceği irdelenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Park, H., Ko, Y. S., Jung, S. C., Song, B. T., Jun, Y. H., Lee, B. C. ve Lim, J. D.** (2003). Development of Fracture Split Steel Connecting Rods. *SAE Technical Paper Series*, No. 2003-01-1309.
- [2] **Zheng, L., Kou, S., Yang, S., Li, L. ve Li, F.** (2010). A Study of Process Parameters During Pulsed Nd:YAG Laser Notching of C70S6 Fracture Splitting Connecting Rods. *Journal of Optics and Laser Technology*, **42**, 985-993.
- [3] **Gu, Z., Yang, S., Ku, S., Zhao, Y. ve Dai, X.** (2005). Fracture Splitting Technology of Automobile Engine Connecting Rod. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **25**, 883-887.
- [4] **Lyszczan, P.** (2012). *Shear Load Transfer and Relaxation in Bolted Joints with Fractured Surfaces* (doktora tezi), Technical University of Berlin, Berlin.
- [5] **Lee, C. K., Ko, Y. S., Kim, S. H., Park, H. S. ve Lim, J. D.** (2007). Development of High Strength, Fracture Split Steel Connecting Rods. *SAE Technical Paper Series*, No. 2007-01-1002.
- [6] **Fukuda, S. ve Eto, H.** (2002). Development of Fracture Splitting Connecting Rod. *JSAE Review*, **23**, 101-104.
- [7] **Aksoy, Z., Özdemir Z. ve Özdemir, T.** (2012). Kırılarak İki Parçaya Ayrılabilen Biyel Kollarının Ayrılma Parametreleri Üzerine Bir İnceleme. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **16 (2)**, 113-122.
- [8] **Kobota, T., Iwasaki, S., Isobe, T. ve Koike, T.** (2004). Development of Fracture Splitting Method for Case Hardened Connecting Rods. *SAE Technical Paper Series*, No. 2004-32-0064.
- [9] **Kato, S., Kano, T., Hobo, M., Yamada, Y., Miyazawa, T. ve Okada, Y.** (2007). Development of Microalloyed Steel for Fracture Split Connecting Rod. *SAE Technical Paper Series*, No. 2007-01-1004.
- [10] **Özdemir, Z.** (2013). *Biyel Kolu Başlığının Kırma Yöntemi ile İmalatında Kırma Parametrelerinin Optimizasyonu* (doktora tezi), Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- [11] **Aran, A.** (1981). Kırılma Mekanikine Giriş Seminer Notları, *TÜBİTAK Marmara Araştırmalar Merkezi*, Gebze.
- [12] **Url-1** < <http://www.nevoku.com/2a---kirilma-mekanigine-giris-kirilma-mekanigine-giris/viewdeck/a8d109bf-7704-497c-802f-e4770523a375>>, alındığı tarih: 03.04.2015.
- [13] **Eker, A. A.** (2008). Çeliğin Isıl İşlemleri, YTÜ Malzeme Dersi Ders Notları.
- [14] **Dikicioğlu, A.** (2011). Fazlar ve Demir-Sementit Diyagramı, TTT Diyagramları, Çelik Isıl İşlemleri, İTÜ Malzeme Dersi Ders Notları.

- [15] **Callister, W. D.** (1997). *Materials Science and Engineering*, John Wiley and Sons.
- [16] **Shackelford, J. F.** (2009). *Introduction to Materials Science for Engineers*, Pearson.
- [17] **Askeland, D. R. ve Phule, P. P.** (2006). *The Science and Engineering of Materials*, Thomson.
- [18] **Ewalds, H. L. ve Wanhill, R. J. H.** (1985). *Fracture Mechanics*, Edward Arnold.
- [19] **Park, Hyounsoo; Ko, Young S.; Jung, Seung C.; Song, Byung T.; Jun, Yong H.; Lee, Byung C. ve Lim, Jong D.** (2003). Development of Fracture Split Steel Connecting Rods. *SAE Technical Paper Series*, No. 2003-01-1309.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Melih Bayram

Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa, 22.02.1988

E-Posta : bayram.melih@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

4 Temmuz 2011'den beri Ford Otomotiv Sanayi A.Ş. Ürün Geliştirme Genel Müdür Yardımcılığı, Baz Motor Müdürlüğü, Piston, Silindir ve Güç Dönüşümleri Ekip Liderliği'nde parça mühendisi.