

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Y. LİSANS TEZİ

**MEKANİK YÜZEY İŞLEMLERİNİN MALZEMELERİN
YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Muhammed Yaşar TURAN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM

2011

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

MEKANİK YÜZEY İŞLEMLERİNİN MALZEMELERİNİN YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

Doç.Dr.Mehmet GAVGALI danışmanlığında, Muhammed Yaşar TURAN tarafından hazırlanan bu çalışma 28/01/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç.Dr.Mehmet GAVGALI

İmza :

Üye : Doç.Dr.Recep SADELER

İmza :

Üye : Yrd.Doç.Dr.Burak DİKİCİ

İmza :

(imza)

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum
Prof.Dr.Ömer AKBULUT
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Y. Lisans Tezi

MEKANİK YÜZEY İŞLEMLERİNİN MALZEMELERİN YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

Muhammed Yaşar TURAN

Atatürk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet GAVGALI

Değişken gerilmeler altında çalışan makine parçalarının, yorulma dayanımı değerlerinin artırılması için derin haddeleme işlemleri pratikte endüstriyel anlamda yaygın olarak uygulanmaktadır. Sunulan bu çalışmada, derin haddeleme işleminin yüzey pürüzlülüğü, Vickers sertliği ve yorulma dayanımı üzerinde etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Numuneler her biri 14 adet numunedan oluşan üç farklı gruba ayrılmıştır. Bu numunelerin 14 tanesi derin haddeleme işlemine tabi tutulmamış, kalan iki farklı gruptaki 14 er numune ise 50 ve 75 bar basınç altında derin haddeleme işlemine tabi tutulmuştur. Tüm numune gruplarına dönel eğmeli yorulma deneyleri uygulanarak her bir grup için S-N eğrileri çizilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Numunelerin kırık yüzeyleri elektronik taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek yorulma deney sonuçları yorumlanmıştır.

2011, 73 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mekanik yüzey işlemleri, derin haddeleme, yorulma, pürüzlülük, sertlik

ABSTRACT

MS Thesis

EFFECT OF MECHANIC SURFACE PROCESSES ON FATIGUE BEHAVIOUR OF MATERIALS

Muhammed Yaşar TURAN

Atatürk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assoc. Prof.Dr. Mehmet GAVGALI

Deep rolling is widely used in industry in order to increase the fatigue strength of machine parts under cycling loading. Presented in this study, The effects of deep Rolling process on surface roughness, Vickers hardness and fatigue strength was aimed to investigate. The samples is divided into three different groups that each consisting of 14 pieces from the sample. 14 pieces of these samples didn't applied deep rolling process and is applied deep Rolling process under 50 bar pressure and 75 bar pressure, 14 samples in remaining two different groups. The whole parts are applied rotating bending fatigue test. They are plotted S-N curve. The fractured surfaces are examined with Scanning Electron Microscope (SEM) in order to interpret the fatigue test results.

2011, 73 pages

Keywords : Mechanical surface treatment, deep rolling, fatigue, surface roughness, hardness

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma boyunca değerli katkıları ile beni yönlendiren danışmanım Sayın Doç. Dr. Mehmet GAVGALI'ya, laboratuvar çalıŐmalarımnda yardımlarını esirgemeyen Sayın Öğr. Gör. Selçuk ATASOY'a, çalıŐmalarımnda her türlü desteği veren babam Sayın Süleyman TURAN'a, tasarladığım deney düzeneğiyle ilgili tüm imkânları sunan Karayolları 12.Bölge Müdürlüğü Merkez Atölye çalıŐanlarına ve beni daima destekleyen aileme çok teşekkür ederim. Ayrıca gerek tasarladığım deney düzeneğiyle ilgili desteğiyle gerek laboratuvar çalıŐmalarımnda göstermiş olduğu her türlü yardımıyla beni sürekli gayretlendiren, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren Sayın Doç. Dr. Recep SADELER'e teşekkür ederim.

Muhammed Yaşar TURAN

Ocak 2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	8
2.1. Malzemelerin Şekillendirilmesi.....	8
2.1.1. Klasik sınıflandırma.....	8
2.1.2. Benzeş sıcaklığa (T/T_m) göre sınıflandırma.....	9
2.2. Yüzey Şekillendirme İşlemleri.....	10
2.2.1. Talaş kaldırma işlemleriyle (frezeleme, tornalama, taşlama, delme, vb.) şekillendirme.....	10
2.2.2. Elektro-kimyasal yüzey şekillendirme.....	10
2.2.3. Mekanik yüzey işlemleri.....	11
2.2.3.a. Derin çekme işlemi.....	12
2.2.3.b. Bilyeli dövme işlemi.....	14
2.2.3.c. Haddeme işlemi.....	16
2.2.3.d. Makaralı parlatma (ezme) işlemi.....	17
2.2.3.e. Polisaj (cilalama) ve parlatma işlemi.....	20
2.3. Makaralı Parlatma ve Derin Haddeme İşlemlerinin Benzer ve Farklı Yönleri.....	22
2.4. Derin Haddemenin Tipik Uygulamaları.....	24
2.4.1. Otomotiv endüstrisi.....	25
2.4.2. Uzay ve uçak sanayi / enerji santrali endüstrisi.....	25
2.4.3. Tıbbi uygulamalar.....	26
2.4.4. Diğer uygulamalar.....	26
2.5. Yüksek Sıcaklığın Derin Haddemeye Etkisi.....	29

2.6. Makine Elemanlarında Emniyet.....	29
2.7. Kalıcı (Artık) Gerilmeler	30
2.8. Yorulma	32
2.8.1. Yorulmanın tanımı	32
2.8.2. Yorulma ömrü	33
2.8.3. Yorulma dayanımı	33
2.8.4. S-N diyagramı (wöhler diyagramı).....	34
2.8.5. Yorulma deneyi.....	35
2.8.6. Yorulma makineleri	41
2.9. Kırılma	42
2. 10.Yorulma-Kırılma İlişkisi.....	44
2.11. Sertlik.....	45
2.12. Yüzey Pürüzlülüğü.....	46
2.13. Taramalı Elektron Mikroskobu-Scanning Electron Microscope (SEM)	47
3. MATERYAL ve YÖNTEM	49
3.1. Alüminyum Hakkında Genel Bilgi	49
3.2. Derin Haddeme Deney Düzeneği.....	52
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	58
4.1. Pürüzlülük ve Sertlik Değerinin Ölçülmesi	58
4.2.Yorulma Deneyleri ve Sonuçları	59
4.3. AA2014 Alüminyum Alaşımli deney numuneleri için elde edilen yorulma S-N (Wöhler) Eğrileri	62
4.4. Kırılan Yüzeylerden Alınan SEM Görüntüleri	65
5. SONUÇLAR	68
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	74

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

μm	Mikrometre
AA	Alüminyum alaşım
Al	Alüminyum
Bar	Basınç birimi
Cu	Bakır
D	Numune çapı
d	Numunenin çapı
F	Numuneye uygulanan kuvvet
HRC	Rockwell sertlik değeri (Hardness Rockwell-C)
HV	Vickers sertlik değeri (Hardness Vickers)
K	Kelvin
kgf	kilogram kuvvet
l	Numunenin boyu
N_f	Çevrim sayısı
R	Gerilme oranı
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri (μm)
S	Gerilme genliği
S-N	Wöhler diyagramı (Gerilme-Çevrim Sayısı)
T6	Suni (yapay) yaşlandırma
T	Deformasyon sıcaklığı
T_m	Ergime sıcaklığı
T_{yk}	Yeniden kristalleşme sıcaklığı
W	Deney esnasında uygulanan yük
σ	Gerilme genliği
σ_m	Ortalama gerilme
σ_r	Gerilme aralığı

Kısaltmalar

ASA	Amerikan Standartlar Birliği (American Standart Association)
CNC	Bilgisayar Destekli Nümerik Kontrol (Computer Numerical Control)
ISO	Uluslararası Standartlar Kuruluğu (International Standart Organization)
FEM	Sonlu Elemanlar Modeli (Finite Element Model)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscope)
XRD	X-Iğını (X-ray diffraction)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Farklı Yüzey İşlemlerinin Etkilenme Derinliği	3
Şekil 2.1. Derin Çekme İşlemi a. Şematik, b. Perspektif	13
Şekil 2.2. Zımba Plakası ve Zımbaların Montajlı ve Montajsız hali	14
Şekil 2.3. Bilyeli Dövme İşlemi	15
Şekil 2.4. Haddeleme İşlemi Temel Prensibinin Şematik Gösterimi	17
Şekil 2.5. Deliklerde Ezme İşleminin Uygulanması	18
Şekil 2.6. Makaralı Parlatmanın Temel Fonksiyonları	19
Şekil 2.7. Ezme İşlemi ve Malzemede Meydana Gelen Deformasyon	20
Şekil 2.8. Polisaj İşleminin Ana Unsurları.....	21
Şekil 2.9. Derin Haddeleme İşlemi Temel Prensibi	23
Şekil 2.10. Otomotiv Endüstrisinde Derin Haddelemeye Örnek Uygulamalar	25
Şekil 2.11. Haddeleme İşlemiyle Üretilen Enerji Santrallerinin Türbin Mili ve Çarkları	26
Şekil 2.12. Derin Haddelemeyle İmal Edilen Örnekler	27
Şekil 2.13. Derin Haddelemede Kullanılan Hidrostatik Takım Örnekleri	28
Şekil 2.14. Demir ve Demir - Dışı Malzemelere Ait Tipik S - N Diyagramı	35
Şekil 2.15. Yorulma Deney Numunesi Geometrisi	36
Şekil 2.16. Ters Gerilme Çevrimi	38
Şekil 2.17. Tekrarlı Gerilme Çevrimi	38
Şekil 2.18. Düzensiz Gerilme Çevrimi	40
Şekil 2.19. R. R. Moore Döner Mil Yorulma Makinesinin Şematik Gösterimi	42
Şekil 2.20. Yorulma Hasarına Uğramış Numunede Kırılma Yüzeyi Çatlağın Başlangıç, Yayılma ve Ani Kırılma Bölgeleri	43
Şekil 2.21. Çatlak Yayılması Teorisi	45
Şekil 2.22. Pürüzlülük Parametrelerinin Hesaplanması (Örnek Grafik)	47
Şekil 3.1. Derin Haddeleme Deney Düzeneginin Şematik Gösterimi	52
Şekil 3.2. Derin Haddeleme Deney Düzeneginin Fotoğrafı	53
Şekil 3.3. Hidrolik Silindir	54
Şekil 3.4. Hidrolik Pistona Monte Edilen Tungsten-Karbür Bilyeli Uç	55

Şekil 3.5. AA2014 Alüminyum Numunesinin Şekli ve Boyutları	56
Şekil 3.6. Hidrolik Pistonla Numuneler Üzerine Kuvvet Uygulanması	57
Şekil 4.1. Mitutoyo SJ. 400 Tipi Yüzey Profilometre Cihazı	58
Şekil 4.2. Döner Eğilmeli Yorulma Test Ünitesinin Genel Görünümünün Şematik Resmi	60
Şekil 4.3. Döner Eğilmeli Yorulma Test Ünitesinin Fotoğrafi	62
Şekil 4.4. İşlemsiz Numuneler için S-N (Wöhler) Eğrileri	63
Şekil 4.5. 50 Bar Basınçla İşlem Gören Numuneler için S-N (Wöhler) Eğrileri	63
Şekil 4.6. 75 Bar Basınçla İşlem Gören Numuneler için S-N (Wöhler) Eğrileri	64
Şekil 4.7. Tüm Numuneler için S-N (Wöhler) Eğrileri (Karşılaştırma İçin)	64
Şekil 4.8. İşlemsiz Numune için SEM görüntüsü [$\sigma=129,2$ MPa ve $N_f=1070 \times 10^3$]	66
Şekil 4.9. 50 Bar Yüzey İşlemi Uygulanmış Numune için SEM görüntüsü [$\sigma=129,2$ MPa ve $N_f=150 \times 10^3$]	66
Şekil 4.10. 75 Bar Yüzey İşlemi Uygulanmış Numune için SEM görüntüsü [$\sigma=165,4$ Mpa ve $N_f=3921 \times 10^3$]	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. AA2014 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi (% Ağırlık)	56
Çizelge 4.1. Yüzey İşlem Durumuna göre AA2014 Alüminyum Numunelerin Sertlik ve Yüzey Pürüzlülük Değerleri	59

1. GİRİŞ

İnsan, akli ve yetenekleriyle diğer canlılardan üstünlük arz etmektedir. Bu özelliği ile çevresinde ve tüm evrende olup biten tüm hareketleri algılayabilmiş, algıladıkları üzerinde sürekli araştırmalar yaparak yenilikler keşfetmiştir. Keşfedilen yenilikler kullanılarak insanlığın karşılaştığı problemlere bir daha tekrarlanmayacak şekilde çözümler üretilmiş, karmaşık sistem ve cihazların tasarımı gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan tasarımların gerçekleştirilebilmesi için değişik özelliklerde malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. İhtiyaç duyulan malzemelerin temin edilmesinde her bir mühendislik dalı için farklı özellikteki malzemeler ön plana çıkmakta ve önem kazanmaktadır. İnsan bu araştırma sürecinde, doğada var olan tüm maddeleri kullanabilmiş, doğadan üretilen ham maddeler yine insanın geliştirdiği üretim metotlarıyla insanlığın hizmetine sunulmuştur. İnsanlar hedeflerine ulaşabilmek için yaşamlarını kolaylaştıracak aletleri icat etmişlerdir. Mühendislikte kullanılan malzemeler, malzemelerin mikro yapıları ve kimyasal bağları göz önüne alınarak:

1. Metaller ve alaşımları,
2. Polimerler,
3. Seramikler ve camlar,
4. Kompozitler,
5. Yarı iletkenler

olmak üzere beş ana başlık altında gruplandırılabilir (Bülbül 2007). İhtiyaç duyulan malzemeler arasında ağırlıklı olarak metalik malzemeler ön plana çıkmakta ve her alanda kullanılmaktadır. Tarihi çağlar içerisinde madenler taş devri, bakır devri, tunç devri gibi birçok döneme damgasını vurmuştur. İlk çağlarda, savunma, avlanma, parçalama, korunma gibi hayati konularda insan, madenleri kullanmaya, şekillendirmeye çalışmıştır. Madenler, insanlığın var oluşundan başlayarak günümüze kadar devamlı insan yaşamında önemli bir yer işgal etmiştir. Bu kaynakları iyi kullanan, değerlendiren ve hizmete sunan ülkeler ekonomik ve siyasi alanda başarılı olmuşlardır. Başta bakır, kurşun, demir, çinko, kalay, krom ve alüminyum gibi metaller ve bunlardan

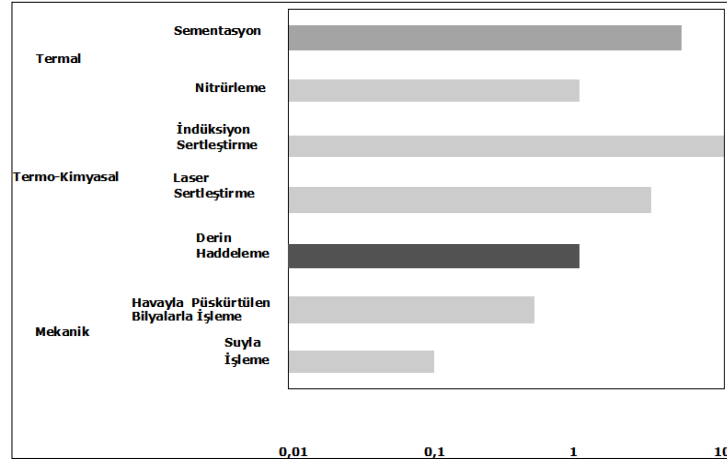
elde edilen alaşımlar teknolojik gelişmelerde çok etkili olmuştur. Metallerin kendilerine özgü birtakım özellikleri vardır. Civa dışındaki tüm metaller oda sıcaklığında katı halde bulunurlar, kendi aralarında bileşik yapamazlar, fiziksel bir karışım olan alaşımları oluştururlar. Isı ve elektriği iyi iletirler. Işığı geçirmeyen fakat parlak bir yzeeye sahip olan metaller dövülebilir, şekil verilebilir, tel ve levha haline getirilebilirler. Metallerin plastik deformasyonla şekillendirilebilmesi bilinen özelliklerinde iyileştirme sağlamakta ve geniş bir kullanım alanına sahip olmaktadır (Aran 2008).

Yüzey iyileştirme işlemleri malzemede istenen özellikleri elde etmek ve mevcut ürünün de işlevliğini geliştirmek için, bir malzeme ya da elemanın yüzey özelliklerini, metalürjik, mekanik, kimyasal olarak ya da bir kaplama ilavesi sağlayarak yapılmaktadır. Yüzey bitirme işlemleri (son işlem) makine üretiminde her geçen gün daha önemli hale gelmektedir. İyi bir bitirme yüzey kalitesi makine parçalarının aşınma dirençlerini, yük taşıma kapasitelerini, takım ömrünü ve yorulma özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Diğer taraftan kaba bir bitirme yüzeyi ise aşınmayı artırır, yorulma dayanımın azalmasına ve verilen tolerans değerlerinde parça üretimini zorlaştırır (Hassan and Bsharat 1996 ; Hassan and Abdel-Wahhab 1996).

Derin Haddeleme de malzemeye mekanik olarak şekil verilebilen yüzey işlemlerinden biridir. Teknolojik gelişmeler doğrultusunda endüstride görülen yenilikler haddelemenin tanımını oldukça çarpıcı hale getirmiştir. Klasik tanımlamada kullanılan dönen metal merdanelerin yerini yeni işleme takımları almıştır. Derin haddeleme terminolojisinde noktasal temaslı takımların veya bilyelerin kullanımı söz konusudur. Bu takımlarla yapılan işlemlerden makaralı parlatma olarak bahsedilmektedir. Bu takımların kullanımıyla yakın yüzey tabakalarında renk değişikliğine neden olan derin plastik deformasyonların ve kalıcı gerilmelerle meydana gelebilecek olumsuzlukların giderilmesi amaçlanmıştır. Bunlar daha düşük kuvvet veya basınçlarda kullanılabilir, daha ziyade pürüzlülük açısından belli bir yüzey kalitesi elde edilmesi bakımından önemlidirler (Altenberger 2006).

Diğer yüzey işlemleriyle karşılaştırıldığında derin haddelemenin bilinen en iyi faydalarından birisi işlem sonunda yüzey sertliğinin artması, kalıcı basınç

gerilmelerinden etkilenen tabaka derinliğinin büyük olması ve basınçlı havayla püskürtülen bilyeli dövme işlemine nazaran pürüzlüğü daha düşük, düz ve parlak yüzeylerin elde edilmesidir. Bu üç etki özellikle periyodik kararlı bir yükleme altında metalik malzemelerin mekanik davranışını önemli derecede iyileştirebilir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Farklı Yüzey İşlemlerinin Etkilenme Derinliği (Altenberger 2006)

Metalik malzemeler üzerinde uygulanan mekanik yüzey işlemleri binlerce yıldan beri kullanılmaktadır. Mesela insanlığın ilk silahlarından olan kılıç ham demirin çekiçle dövülmesinden sonra kullanılmıştır. Ancak son yüzyılın ilk yarısına kadar kullanılan derin haddeme yâda basınçlı havayla püskürtülerek yapılan bilyeli dövme gibi işlemler endüstride, seri üretimlerde yaygın biçimde kullanılmamaktadır. Amerika Birleşik Devletlerinde derin haddeme son yüzyılın yirmili ve otuzlu yıllarında Ford T' nin akslarının mukavemetini arttırmak amacıyla yüzeysel işlem olarak uygulanmış, trenlerin dingilleri de haddelenmiştir (Altenberger 2006).

ABD'de bu alanda önemli bulunan ilk çalışmalar Horger tarafından yapıldı. Almanya'da Foppl ve Thum yağ endüstrisinde muhtemelen malzeme hatalarından kaynaklanan olumsuz sonuçları irdeledi, meydana gelen malzeme yorulmasının derin haddemeyle iyileştirilebileceği üzerinde tartıştı (Altenberger 2006).

1970'li yıllarda derin haddemenin yorulma davranışı üzerindeki temel etkileri iyice araştırıldı, çentik etkisi ve malzeme sertliği göz önünde bulundurularak derin haddeme

bileşenlerinin yorulma mukavemetinin iyileştirilmesi üzerindeki etkisi açıklığa kavuşturuldu (Altenberger 2006).

1980'li yıllarda derin haddeleme özellikle otomotiv endüstrisinde induksiyon sertleştirilmesi gibi termal yüzey işlemleriyle birlikte kullanılmıştır.

Kuşkusuz bugün, derin haddeleme uygulamalarının bilinen en mükemmel örneği krankların sertleştirilmesidir ancak diğer teknik alanlarda derin haddeleme uygulamalarına örnek teşkil eden cerrahi implantların yanı sıra elektrik santralleri ve uçak endüstrisinde kullanılan türbin kanatları da bu olağanüstü yüzey işleminin diğer uygulama örnekleri arasında yer almıştır (Altenberger 2006).

Derin haddeleme ve Bilyeli Dövme işlemlerinin 7075-T6 Alüminyumun sürtünme yorulma direnci üzerinde etkilerini araştırmış, düşük devirli işlemlerde bilyeli dövme işleminin yorulma ömrü üzerindeki etkisinin derin haddelemeye göre daha iyi olduğunu, ancak yüksek devirli işlemlerde ise derin haddeleme işleminin yorulma direnci üzerinde etkisinin bilyeli dövme işlemine göre daha fazla olduğunu gözlemlemiştir (Majzooobi *et al.* 2009).

Mekanik yüzey işleme temel bir anlayış sağlayacak güvenilir sonlu elemanlar modeli geliştirmiş (Finite Element Model-FEM), yapılan bu çalışma ile mekanik yüzey işlemlerinin yüzeyleri düzgünleştirmekle beraber kalıcı basma gerilmelerinin yorulma ömrünü arttırdığı işlem gören yüzeylerde sertliğin arttığını göstermiştir (Yen *et al.* 2000).

2003 yılında "Ortam ve yükselen sıcaklıklarda Derin haddeleme ve lazer şok püskürtme lazerli şok dövme gibi mekanik yüzey işlemlerinin Ti-6Al-4V alaşımının yorulma davranışı üzerinde etkisi" üzerine çalışılmıştır. Derin haddeleme, bilyeli dövme ve lazer şok püskürtme gibi mekanik yüzey işlemleriyle oldukça yüksek gerilmeli metal bileşenlerinin yorulma davranışı üzerinde önemli derecede iyileştirmeler sağlandığı, derin haddelemeyle pürüzsüz bitirme yüzeyi elde edildiği, yakın yüzeylerde derin kalıcı

basma gerilmelerinin oluştuğu, iş yzeyinin sertleştirilmesi bakımından iyi sonuçlar elde edildiği vurgulanmıştır (Nalla *et al.* 2003).

1999’da yzrztlen bir çalışmada AISI 304 ostenitik paslanmaz çeliğin silindirik numuneleri farklı puskrtme yoğunluğunda bilyeli puskrtme ve farklı yuvarlanma basınçlarıyla derin haddelemeye tabi tutulmuş, yakın yzeyin mikro yapısındaki değişiklikler Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM) ile yapılan olmlerle izlenmiştir. Yzeyde bzyk olde dislokasyon deformasyonu teşekkul ederken çatlak yayılmasının önlendiği gsterilmiştir (Altenberger *et al.* 1999).

2005 yılında ‘‘Turbo Uçak Motorlarında Kullanılan Kompresr Kanatlarının Derin Haddeleme Esasları’’ isimli çalışmada yabancı nesnelere neden olduğu bglgesel darbe hasarlarından dolayı trbin kanatlarının yorulma dayanımının zayıfladığı ve bu problemin modern havacılık alanında önemli bir gvnenlik riski oluşturduğuna vurgu yapılmıştır. Yaptıkları çalışmada hidrostatik tahrik sistemiyle çalışan işleme takımlarıyla derin haddeleme işlemine tabi tutulan trbin kanatlarında bu riskin ortadan kalktığını ve derin haddeleme işleminin etkili bir ozm olduğunu ortaya koymuş ve haddeleme işlemi için kompleks deformasyon mekanizmalarının faydalı olabileceğini gstermiştir (Mader and Klocke 2005).

2005 yılında yzrztlen bir çalışmada AAGI 110 (Al-Mg-Si-Cu) alaşımlı dvmme alminyumu malzemedenden elde edilen silindirik numuneler kullanılmıştır. Bu çalışmada numuneler ilk önce oda sıcaklığında farklı yaşlandırma işlemlerine tabi tutulmuş daha sonra derin haddelenme ve polisaj işlemleri uygulanmıştır. Derin haddelenmiş bglgelerin özellikleri, kalıcı gerilmeler ve sertleşmenin etkileri X-ışını kırınım yntemleri (XRD) uygulanarak karakterize edilmiş, S-N eğrileri alınmış ve çevrimsel deformasyon davranışı tanımlanmıştır. Çalışma ile alaşımın mukavemetinde ve sertliğinde meydana gelen azalmanın yaşlandırma işlemi neticesinde tekrar yukseltilebileceği, buna mukabil yorulma testi sırasında yakın yzeydeki sertleşmede bir kararsızlık grrlmesi durumunda derin haddelemenin yorulma mrzr üzerinde olumlu bir etkisinin olmayacağını ifade etmiştir (Juijerm *et al.* 2005).

2004 yılında yürütülen bir çalışmada “Çentikli Orta Karbon Çubuk Çelikler Üzerinde Derin Haddelenenin Etkisi” araştırılmıştır. Bu çalışmada krank mili ve diğer otomotiv parçalarının imalatında kullanılan dövme çeliklerin mikro yapısal sınıflarını karakterize eden üç orta karbonlu (%0,4C) çubuk çelikleri Derin Haddeme işlemine tabi tutulmuş, derin haddelenenin etkileri elde edilen yorgunluk performansının gözden geçirilmesiyle değerlendirilmiştir. Derin haddelenenin uygulanmasıyla radyal simetrik iş parçalarında yüzey deformasyonu meydana gelmektedir. Derin haddeme uygulaması sonucunda:

- Su verilmiş ve temperlenmiş (4140) alaşımlı çeliğin dâhil olduğu çelik sınıfı üzerinde yüksek akma gerilmesi ve düşük pekleşme hızı,
- Yüksek miktarda östenit içeren ve metalografik yapılarına göre geleneksel olmayan bey nitik çelikler (1,2 Mn, 0,72 Si) düşük akma gerilmesiyle yüksek pekleşme hızı,
- Metalografik yapılarına göre ferritik / perlitik sınıf çeliklerde (1,3 Mn ve 0,56 Si) düşük akma gerilimi ve orta pekleşme hızı sağlanmıştır (Richards *et al.* 2004).

2009 yılında “Yorgunluk Önleyici İmalat için Ultrasonik Derin Haddeme ve Parlatma Teknolojisinin Birleştirilmesi” konulu bir çalışma yapılmıştır. Yorgunluk önleyici imalat için yorgunluk deneyine tabi tutulan titanyum alaşımlı numunelerde yüzey iyileştirmesi sağlamak amacıyla birleştirilmiş ultrasonik derin haddeme ve cilalama teknolojisi kullanılmıştır. Birleştirilmiş ultrasonik derin haddeme ve cilalama teknolojisi uygulanan ve uygulanmayan numuneler üzerinde döner eğilmeli yorulma makinesiyle yorulma testleri yapılmıştır. Kırık numunelerin yüzeyindeki yorulma kırılması gözlenmiş ve elektron taramalı mikroskop ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ultrasonik derin haddelenenin uygulandığı titanyum alaşımı numunelerinin yorulma dayanımının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Numunelerin mikro yapısı üzerinde işlenmiş yüzeyde yorulma çatlağının oluşumunu önleyen ve ilerlemesini durduran ince bir tabaka oluşturulmuştur. Yorgunluk çizgilerinin karşılaştırılmasından ultrasonik derin haddeme uygulanan numunelerin işlenmemiş numunelerinkinden daha belirgin ince yorgunluk çizgileri taşıdığı görülmüştür (Youli *et al.* 2009).

Malzemelerin şekillendirilmesi, yüzeylerinin işlenmesi mühendislikte önemli bir alanı işgal etmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar çok geniş bir yelpazede yer almasına rağmen, derin haddeleme ile yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi yakın tarihte gündeme gelmiş ve bu alanda yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Malzeme yüzeyinin bölgesel olarak sertleştirilebilmesi, malzeme yüzeyinde bası artık gerilmeleri oluşturması ve yüzey pürüzlülüğünün azalması nedeniyle yorulma ömrü üzerinde artışa neden olması derin haddelemenin en büyük avantajlarındanıdır. Gerek diğler ÷lkelerde, gerekse ÷lkemizde bu alanda yapılan çalışmaların sınırlı olması, bizi derin haddeleme konusunda çalışmaya yönlendirmiştir.

Öncelikle bu çalışmada, mekanik atölyede bulunan Tez-San marka torna ile uyumlu ve derin haddeleme işlemleri yapabilecek uygun bir sistem tasarlanmış, tasarlanan parçalar üretilmiş ve bahsi geçen torna üzerine monte edilmiştir. Tasarlanan derin haddeleme ünitesinin çalışabilirliğinin kontrol edilmesi amacıyla AA2014 alaşımından üretilen numuneler üzerinde test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Test çalışmaları için AA2014 numuneler 50 ve 75 bar basınç altında derin haddeleme (deep rolling) işlemine tabi tutulmuş, bu iki numune ve işlemsiz numuneye ait malzeme özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada yüzey pürüzlülüğü, sertlik, yorulma dayanımı ve kırılma yüzeyi parametre olarak seçilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Malzemelerin Şekillendirilmesi

Malzemeye uygulanan bir kuvvet sebebiyle oluşan şekil değişimine deformasyon, deformasyonun geçici olması elastik ve kalıcı olması durumu plastik deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Malzemelerin şekillendirilmesi, şekil verme işleminin uygulandığı sıcaklığa bağlı olarak;

1. Klasik şekillendirme
2. Benzeş sıcaklığa göre şekillendirme

olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Malzeme davranışı bakımından temel farklılıklar gösteren bu iki grup arasındaki sınır, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı belirlemektedir.

2.1.1. Klasik sınıflandırma

Klasik sınıflandırmaya göre, mekanik işlemler sıcak ve soğuk işlem olmak üzere iki gruba ayrılmıştır (Ensari ve Kayalı 2000). Sıcak İşlem, deformasyon şartlarında, malzemede uygulanan deformasyonla aynı zamanda yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği işlemdir. Soğuk İşlem ise deformasyon sırasında yeniden kristalleşmenin gerçekleşmediği işleme verilen isimdir. Yani malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı (T_{yk}) ile deformasyon sıcaklığının (T) kıyaslanmasına göre yapılan bu gruplandırmada;

- a) $T > T_{yk}$ ise Sıcak İşlem,
- b) $T < T_{yk}$ ise Soğuk İşlem

olarak isimlendirilmektedir. Metalik malzemelerin yeniden kristalleşme sıcaklığı yaklaşık olarak ergime sıcaklığının 1/3'ü ile 1/2'si arasındadır.

Sıcak şekil verme işleminde, şekil verme sıcaklığı yeniden kristalleşme için gerekli olan en düşük sıcaklık değerinden oldukça yüksektir. Soğuk şekillendirme işleminde ise, şekil verme sıcaklığı malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığından oldukça düşüktür (Bargel and Schulze 1987). Soğuk şekil verme işlemi; "Başlangıçta düz olan çelik sac veya levha elemanlarının hadde silindirleri veya kalıpları kullanılarak arzu edilen nihai kesit elde edilinceye kadar sürekli deformasyona uğratılması" işleminden ibaret olan bir imalat sürecidir (Tama 2004).

2.1.2. Benzeş sıcaklığa (T/T_m) göre sınıflandırma

Mekanik işlem sırasındaki deformasyon sıcaklığının (T K), malzemenin ergime sıcaklığına (T_m) (T K) oranı benzeş sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. Bu sıcaklığa göre deformasyon işlemleri üç gruba ayrılır. Benzeş sıcaklığa göre gruplandırmada;

- a) $T/T_m > 0,5$ ise Sıcak İşlem,
- b) $0,5 > T/T_m > 0,3$ ise Ilık İşlem,
- c) $T/T_m < 0,3$ ise Soğuk İşlem

olarak isimlendirilir. Katı malzemelerde yapılan deformasyon işlemlerinde her zaman $(T/T_m) < 1$ 'dir.

Soğuk şekillendirilme yöntemleri de kendi arasında soğuk haddeleme (sürekli formda şekil verme) ve soğuk bükme (presle şekil verme) olmak üzere iki guruba ayrılır (Uzgider ve Arda 1987).

Malzemenin bir yönünde bulunan baskı (zımbalama) tezgâhı, diğer yönünde bulunan kalıplar arasından bazı yardımcı aparatların yardımıyla geçirilirken eğme ve bükme işlemine tabi tutulmasıyla uğradığı deformasyondur.

2.2. Yüzey Şekillendirme İşlemleri

Malzemelerde istenen özellikleri elde etmek ve mevcut ürünün işlevliğini geliştirmek için, malzemenin yüzey özelliklerini değiştirmeye yönelik her türlü işleme “yüzey işlemleri” ve bu amaçla kullanılan teknolojilere de “yüzey teknolojileri” denilmektedir (Özel vd. 2006). Yüzey işleme şekline göre genel olarak üç başlıkta toplanabilir:

1. Talaş kaldırma işlemleriyle (frezeleme, tornalama, taşlama, delme, vb.) yüzey şekillendirme
2. Elektro-kimyasal yüzey şekillendirme
3. Mekanik yüzey işlemleri

2.2.1. Talaş kaldırma işlemleriyle (frezeleme, tornalama, taşlama, delme, vb.) şekillendirme

Yaptığı işlemin adına göre isimlendirilen işleme tezgâhlarında kesici takımların kullanılmasıyla yapılan şekillendirmedir. Bütün talaş kaldırma işlemlerindeki temel amaç iş parçalarında istenilen geometride hassas bir bitirme yüzeyi oluşturmaktır. Modern talaş kaldırma yöntemlerinde teknolojinin gelişmesi ile birlikte boyutsal tamlığın yanı sıra yüzey kalitesi de önemli bir unsur olarak ortaya çıkmıştır. Talaş kaldırma işleminin amacı, parçalara sadece bir şekil vermek değil, bunları geometri, boyut ve yüzey bakımından parçanın teknik resminde gösterilen belirli bir doğruluk derecesine göre imal etmektir. Kesme hızı, kesici takımların aşınma durumu ve geometrisi ile ilerleme miktarı yüzey pürüzlülüğüne etki etmektedir (Acır 2003).

2.2.2. Elektro-kimyasal yüzey şekillendirme

Elektroliz bir elektrik akımı tarafından aşılacak bir elektrolitin uğradığı ayrışmadır (Zeren 1999). İstenen yüzey geometrisi ve boyutu elde etmek için metalin elektrokimyasal çözünmesine elektrokimyasal metal işleme adı verilir. Metaller üzerinde herhangi bir basınç ve gerilim oluşturmadan istenilen şekli kazandıran kadar sürekli olarak metal erozyonu gerçekleştiğinden sıfır kuvvet ile metal işleme olarak ta

anılır. Bu proses ilk kez uçak endüstrisinde kullanılmıştır. Bugün yüksek sertlik ve mukavemete sahip süper alaşımlar ve refrakter malzemelerin ekonomik, seri ve karmaşık şekillerde işlenmesinde etkin bir şekilde kullanılan birkaç yöntemden biridir. Bu işlem geleneksel işleme metotları ile zaman alıcı ve üretimi imkânsız veya zor olan parçaların özellikle de sertleştirilmiş çelik veya ısıya dirençli alaşımların işlenmesinde kullanılmaktadır.

2.2.3. Mekanik yüzey işlemleri

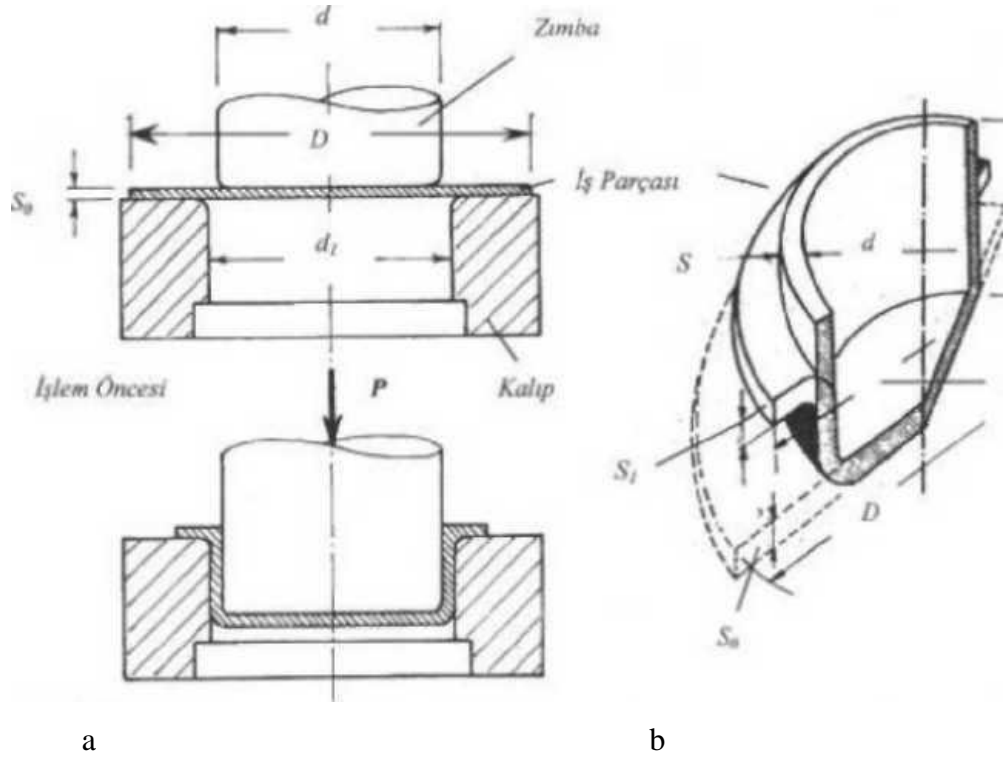
Mekanik yüzey işlemleri genellikle malzemenin yüzeyleri, işleme takımlarla dışarıdan müdahil olunarak plastik deformasyon oluşturulması ve nihai şekil verilmesi işlemidir. Mekanik yüzey işlemlerinde malzemenin dış yüzeylerinde yüksek yoğunlukta dislokasyon meydana gelmekte, yüzey topografyası değiştirilmektedir (Wagner 1999). Mekanik yüzey işlemleriyle mühendislik uygulamalarında kullanılan değişik malzemelerin, estetik görünümünün iyileştirilmesi, korozyon ve aşınmaya karşı direncinin artırılması, yorulma dayanımının geliştirmesi amaçlanmaktadır. Mekanik yüzey işlemleri malzemelerde kalıcı gerilmeler oluşturabilmekte, yorulma dayanımları üzerinde olumlu veya olumsuz etkiler yapabilmektedir. Mekanik yüzey işlemlerinde yüzey aşınması, yüzeyin pütürlü veya çizgili hale gelmesi, istenmeyen küçük parçacıkların yüzeye gömülmesi gibi olaylardan dolayı yüzey kalitesi düşük olabilmektedir. Bilinen mekanik yüzey işlemleri beş grupta özetlenebilir:

- a. Derin Çekme İşlemi**
- b. Bilyeli Dövme İşlemi**
- c. Haddeleme İşlemi**
- d. Makaralı Parlatma (Ezme) İşlemi**
- e. Polisaj (cilalama) ve Parlatma İşlemi**

2.2.3.a. Derin çekme işlemi

İki boyutlu, düzlemsel geometriye sahip iş parçasının çekme kalıbı denilen elemanlar yardımıyla ve bir zımba vasıtasıyla preste çökertilmesi ya da, iş parçasının çekme kalıbı içine sıvanması sonucunda belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçalar elde edilmesi işlemine presleme tekniğinde çekme adı verilmektedir. Çekme yardımıyla elde edilmesi öngörülen parçalar, birden fazla operasyon ile oluşturuluyorsa, birbirini takip eden çok sayıda çekme işleminden oluşan bu imal usulüne derin çekme adı verilmektedir. Şekil 2.1’de, çekme sacı olarak adlandırılan dairesel iş parçasından d çapına sahip silindirik bir kabın çekme işlemiyle elde edilmesi şematik olarak verilmektedir (Topaç 2003). Şekil 2.1’de görüldüğü gibi başlangıçta S_0 kalınlığı ve D başlangıç çapına sahip düzlemsel, metalik ve şekillenebilir bir levha, d çapındaki bir zımba yardımıyla kalıp içine çekilmek suretiyle, altı düz, silindirik bir parça haline getirilmektedir. Bu işlem, basitliğinin yanı sıra diğer derin çekme işlemleri içerisinde sanayide en geniş uygulamaya sahip olan silindirik çekme işlemidir.

Sac metallere üç boyutlu karmaşık parçaların optimum miktarda malzeme kullanılarak derin çekme yöntemiyle imal edilmesi etkili bir üretim yöntemi olarak tercih edilmektedir. Bu konvansiyonel yöntemde, zımba ve kalıp tek parçalı olarak yapılmakta ve sac malzeme kalıp boşluğunda şekillendirilmektedir. Bu işlemde bazen bir parçanın üretimi birden fazla kalıp setini gerektirdiğinden kalıp maliyeti, dolayısıyla parça maliyeti artmaktadır. Konu üzerinde çalışan imalat sektörü “Çok Noktalı Derin Çekme Sistemi” adıyla yeni bir metot geliştirmiş, sac metallere kap şeklindeki parçaların üretiminde kullanmıştır (Korkmaz ve Gavas 2005).



Şekil 2.1. Derin çekme işlemi *a. Şematik, b. Perspektif (Gök vd 2009)

Çok noktalı derin çekme yöntemi çok sayıdaki zımbalardan meydana gelen zımba ve kalıp sisteminden oluşmaktadır. Bu sistemde, sadece zımba çok noktalı yapılabileceği gibi kalıp da aynı sistemle üretilebilir ve her bir zımbanın hareketi bilgisayarlı kontrol sistemleri ile ayrı ayrı kontrol edilebilir. Zımbaların olabildiği kadar küçük çaplı olması, zımbalar arasındaki mesafenin olabildiği kadar az olması, o derecede kusursuz şekillendirilmiş bir yüzey elde edilmesini sağlar (Şekil 2.2). Ayrıca, bu sistemde kısmi şekillendirme tekniği uygulanarak büyük parçalar küçük preslerle ve kalıplarla kolayca şekillendirilebilir. Değişken şekilli zımba ve kalıp üretimi kalıp maliyetlerinin azaltılması, her bir zımba hareketinin ayrı ayrı kontrol edilebilmesi ve zımbaların daha kolayca değiştirilebilmesi açısından daima cazip bir üretim yöntemi olmuştur. Metallerin çok noktalı yöntemle şekillendirilmesi konusunda birçok çalışmalar yapılmıştır ve son yıllarda bu konuda ciddi gelişmeler kaydedilmiştir (Korkmaz ve Gavas 2005). Bu yöntemde zımba konfigürasyonlarının yeniden yapılabilmesi parça maliyetini düşürür, üretim zamanını önemli ölçüde azaltır. Bu metot özellikle gemilerin dış sacları ve büyük hacimli depolama yapılarının parçaları gibi büyük boyutlu

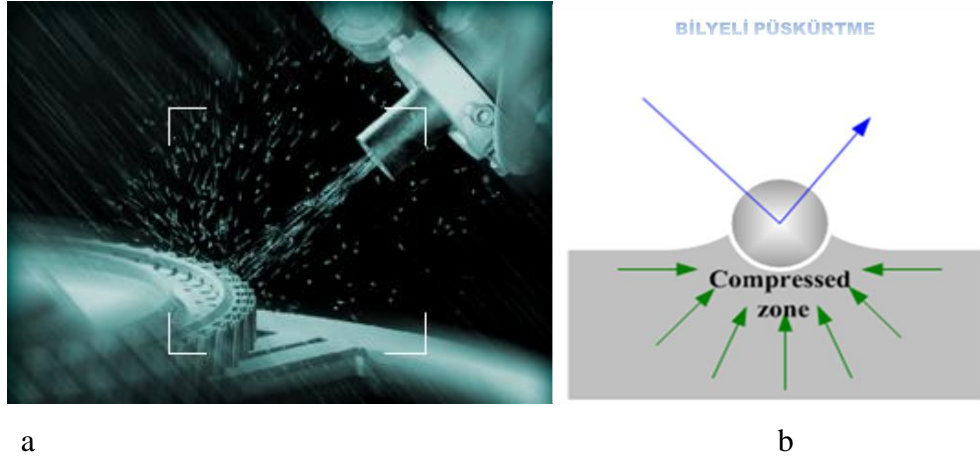
karmaşık şekilli ve fazla derin olmayan parçaların üretimi için oldukça uygun bir yöntemdir.



Şekil 2.2. Zımba plakası ve zımbaların montajlı ve montajsız hali *(a) Zımba plakasına zımba montaj deliklerinin delinmesi (b) Zımbaların yerlerine montaj edilmesi (Korkmaz 2005)

2.2.3.b. Bilyeli dövme işlemi

Bilyeli dövme işlemi; çok sayıda bilyeden meydana gelen bir bilye jetinin, işlem görececek makine parçası veya elemanının yüzeyine kontrollü şartlar altında uygulanması işlemidir. Şekil 2.3'te Bilyeli Dövme İşlemi örneklendirilmiştir. Bilye jetine maruz bırakılan metal malzemenin yüzeyinde homojen olmayan plastik deformasyon meydana gelir, bası gerilmesine maruz kalan bir tabaka oluşur. Bu işlem yöntem olarak dökümden sonra kum püskürtülerek yapılan yüzey temizleme işlemine benzemektedir. Ancak işlemin yapılış gayesi tamamen farklıdır. Bilyeli dövme işleminin yapılış gayesi metal parçaların yorulma, korozyonlu yorulma ve gerilmeli korozyon gibi hasar türüne karşı direnci arttırmaktır. Bununla birlikte dövme işlemleri sonucu dövülmüş parçaların yüzeyleri de temizlenmiş olmaktadır (Varol 1990). Bilyeli dövme işleminde, dövülmesi istenen malzemeye göre daha sert, genellikle küre şekilli dökme demir, çelik, cam, seramik gibi malzemelerden yapılmış bilyeleri dövülecek malzeme üzerine batmasını sağlayacak bir hızla fırlatılması esastır. Çok fazla sayıdaki bilyelerin akışı bir su jetine benzetilebilir (Varol ve Meric 1992).



Şekil 2.3. Bilyeli Dövme İşlemi (Varol 1990)

Makine elemanları bu işlemle genellikle yönü ve şiddeti zamanla değişen gerilme ve kuvvetlere maruz kaldıkları için bu tür makine parçalarının tasarımında yorulma özellikleri ön planda tutulmak zorundadır. Bu alanda yapılan çalışmalarda güvenilirliğin esas alınarak yorulma dayanımının artırılması, spesifik mukavemet oranının (mukavemet/ağırlık oranı) tanımlanması konularına ağırlık verilmektedir. Bilyeli dövme işlemiyle parçalar üzerinde kalıcı gerilme kolayca oluşturulabildiğinden yorulma hasarlarını önlemek veya yorulma ömrünü arttırmak için tercih edilmektedir. Bilyeli dövmenin bir avantajı da parçanın üretim yöntemine ve metalin cinsine bakılmadan her türlü makine parçasına uygulanabilir olmasıdır. Bilyeli dövme işlemi ince metal plakaların istenilen formlarda şekillendirilmesi, yüzeyin sertleştirilmesi, yüzeydeki gözeneklerin giderilerek yüzey kalitesinin artırılması amacıyla kullanılan ucuz ve etkili bir yüzey işlemidir (Orman 1999).

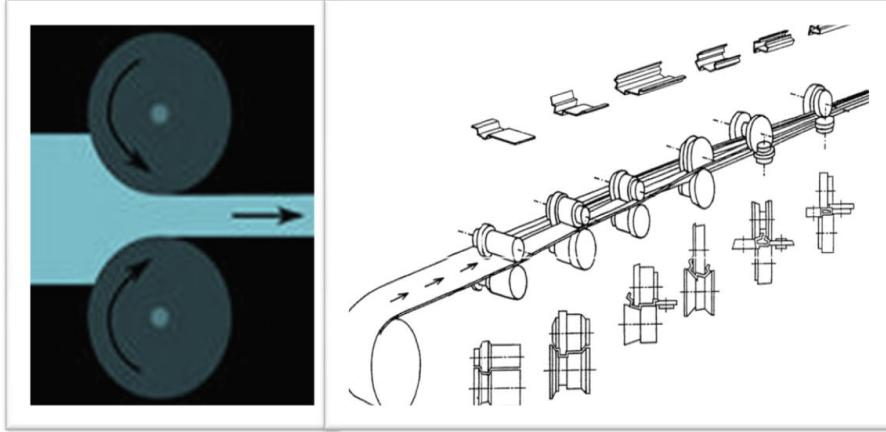
Yüksek hızla püskürtülen bilyeler metal yüzeyine çarptığı zaman, metalin yüzeyinde keskin olmayan kubbe şeklinde yuvarlak bir çökme oluşur (Şekil 2.3.b). Bilyenin ani olarak metal yüzeyine temas ettiği yerde, malzeme plastik şekil değişimine uğrar. Etki derinliği genellikle 0,13 ile 0,25 mm arasında değişir. Ancak bu derinlik, uygulanan bilyenin şiddetine bağlı olarak 0,5 mm'ye kadar çıkabilir. Malzemede bu derinliğin altında kalan kısımda plastik şekil değişimi olmaz (Varol 1990).

Malzemenin yüzeyinde gerilme dağılımının bir sonucu olarak yüzeye paralel yayılan kalıcı bir bası gerilmesi oluşur. Bu bası gerilmesine karşılık olarak metal malzeme yüzeyinin altında bir çekme gerilmesi meydana gelir. Yüzeydeki bası gerilmesi, yüzeyin altındaki çekme gerilmesinden değer olarak iki-üç kat büyük olabilir. Bu bası gerilmesi, çekme gerilmesi altında çalışan parçaların, yorulma dayanımını arttırdığı için, sistemlerin çalışma ömürlerinin açık bir şekilde uzamasına neden olur (Kostilnik 1994).

Dövme işlemi; taşlama, tornalama veya ısıl işlem ile malzemelerde oluşan istenmeyen gerilmelerin malzeme yüzeyindeki dağılımını düzenler. Özellikle, tornalanmış veya taşlanmış yüzeylerde etkilidir. Çünkü bu işlemler ile malzeme yüzeyinde meydana gelen istenmeyen çekme gerilmeleri, dövme işlemi ile faydalı bası gerilme şartlarına dönüştürülür. Bilyeli dövme, özellikle istenmeyen gerilme birikimlerine neden olan çap değişimlerinde, keskin kenarlarda, yüzey hatalarında, düşük mukavemetli malzemelerin karbon kayıpları etkilerine ve kaynaklı parçaların ısı etkisi altındaki bölgelerinde etkilidir (Başaran 2003).

2.2.3.c. Haddeleme işlemi

Haddeleme; eksenleri etrafında dönen iki adet metal merdanelerin (hadde) basma kuvvetinin etkisiyle araya giren malzemeye soğuk ya da sıcak olarak plastik şekil verme işlemidir (Levon 1989). Haddeleme işleminin temel prensibi şematik olarak Şekil 2.4'te verilmiştir. Merdaneler aynı hızda fakat birbirine ters yönde dönmektedir. Merdaneler aralarındaki mesafe malzemenin kalınlığından biraz daha az olmalıdır. Merdaneler düz yüzeyli olabileceği gibi, belli şekil profilinde oluklu da olabilirler. Haddeleme yoluyla; kare, yuvarlak, yassı, çokgen kesit, köşebent, T, I, U profilleri veya ray gibi mamuller üretilmektedir. Haddeleme işlemiyle, malzemeye biçim vermekle birlikte, malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi de sağlanır. Haddelemede malzeme olarak dökümle standart boyutlarda üretilen ilk ürün olan büyük ingotlar kullanılmaktadır (Tama 2004).

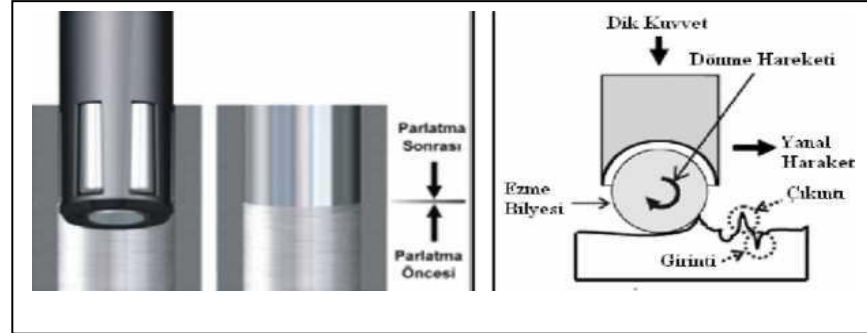


Şekil 2.4. Haddeme İşlemi Temel Prensibinin Şematik GÖsterimi (Tama 2004)

İşlem sonucunda malzemenin kalınlığında meydana gelecek değişimin derecesi malzemenin sıcaklığına bağlıdır (Tama 2004). Sıcaklık arttıķa çeliğin plastiklik özelliği de artar. Soğuk haddemede levha, çubuk veya şerit biçimindeki malzeme merdanelere ısıtılmadan verilir ve istenilen biçim elde edilinceye kadar defalarca haddeden geçirilir. Ekseriya sıcak haddemeden sonra uygulanan soğuk haddeme işlemi, malzemenin mekanik işlenebilir özelliklerini geliştirir, yüzeyini parlatır. Günümüzde kullanılmakta olan haddeme tezgâhlarında üst üste veya ard arda yerleştirilmiş birden fazla merdane çifti bulunmaktadır. Böyle bir sistem ‘Haddeme’ olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemde malzeme merdanelere kesintisiz olarak verilir ve haddeme işlemi amaçlanan belli bir son biçimi alıncaya kadar defalarca yapılır. Derin haddeme bu çalışmanın konusu olarak aşağıdaki bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir.

2.2.3.d. Makaralı parlatma (ezme) işlemi

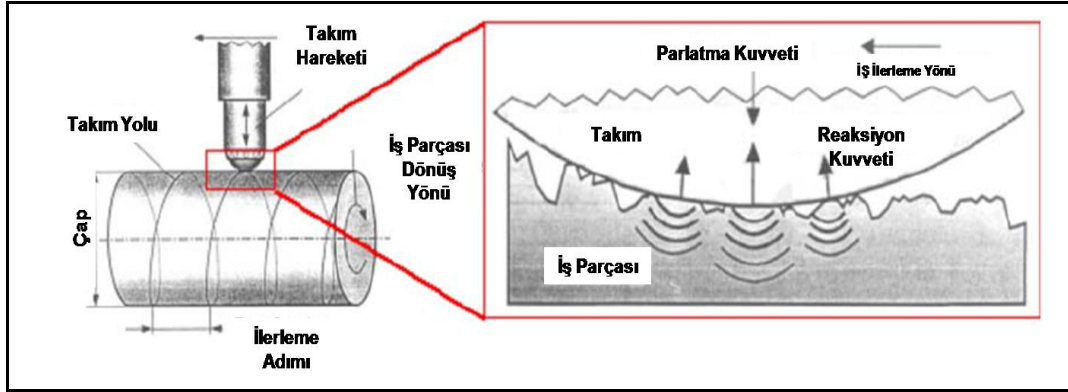
Makaralı parlatma (ezme) işlemi, malzemelerin bitirme yüzeylerini ezerek, yüzey prznllğn ve sertliğini mükemmel hale getirme teknolojisidir (Kukielka 1989). İlk olarak 1930’lu yıllarda demir yolu endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. Sağladığı birçok avantajdan dolayı yüzey bitirme işlemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bugün bu işlem, imalat sektöründe yüzeyin nihai işlenmesiyle ilgili uygulanan honlama, taşlama, lepleme gibi yöntemlerin yerine kullanılmaktadır (Şekil 2.5) (Loh *et al.* 1989).



Şekil 2.5. Deliklerde Ezme İşleminin Uygulanması (Loh *et al.* 1989)

Makaralı parlatmanın temeli, belirli bir yolu takip eden yuvarlanma elamanının, kendisine uygulanan kuvveti metal yüzeyine aktarmasıdır. Bu kuvvetin büyüklüğü kullanılan malzemenin türüne göre genelde 25-45 kgf arasında değişmektedir. Bu işlemde; yüzeydeki çıkıntılar ezici bilyenin etkisi ile plastik deformasyona uğrayarak, yüzeydeki girintileri doldurmaktadır (Şekil 2.6). Ancak işlemin sürdürülebilirliği için ileri doğru hareket ettirilmesi de gerekmektedir. Bu deformasyonun etkisi ile yüzeydeki düzensizlikler giderilir ve yüzey pürüzlülüğünde azalma görülür. Malzeme yüzeyinde sert olan bir katman oluşur. Yüzeyde oluşan bu sert katman aşınma direncinde pozitif yönde bir iyileşme sağlamaktadır (El-Tayeb *et al.* 2006). Bu işlem sırasında parça yüzeyi sertleşmektedir.

Hareket sırasında yuvarlanma elamanları ile metal yüzeyi arasında temas alanları çok küçük olduğundan, bu yüzeylerde bilyeli yataklar ve rulmanlarda olduğu gibi Hertz tipi yüzey basınçları oluşmaktadır (Yen *et al.* 2000).



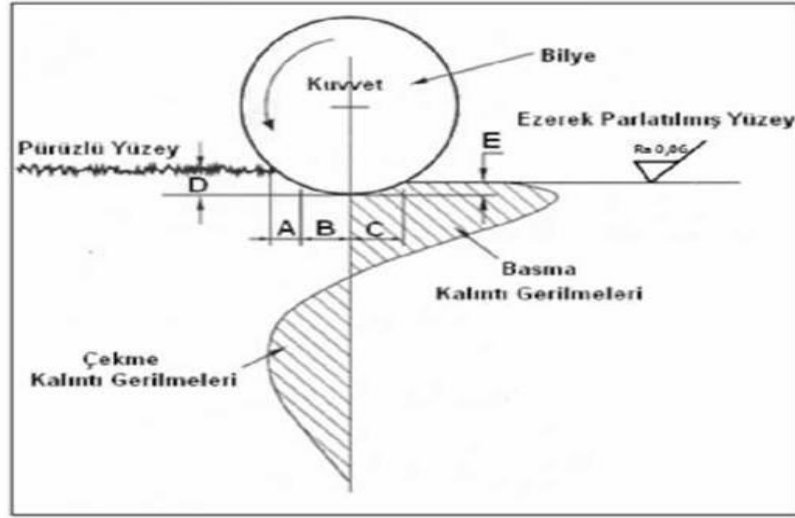
Şekil 2.6. Makaralı Parlatmanın Temel Fonksiyonları (Yen *et al.* 2000)

Bu işlemin gerçekleşmesi için yukarıda tarif edilen yuvarlanma ve ilerleme hareketi her koşul altında mümkün olmayabilir. Bunun için işleyici takımlar özel kombinasyonla dizayn edilerek parlatma işlemi için özel bilye veya mil-bilye yapısı tasarlanmaktadır. Şekil 2.7'de küresel yuvarlanma elamanı için ezme işlemi gösterilmiştir.

Uygun ön işlemi yapılmış olan (tornalama, delme, raybalama vb.) metal yüzeyine ilk temas (A) bölgesinde olmakta ve (B) bölgesinde, metalin akma noktası geçilmektedir. Bu bölgede plastik deformasyon meydana gelmekte ve malzeme çok küçük boyutlarda ezilmektedir (D). C bölgesinde plastik deformasyonun ardından bir miktar elastik dönüşüm (E) gerçekleşir. Bu bölgede yuvarlanma elamanı malzemeye son kez temas ederek, yüzeyin pürüzsüz ve parlak olmasını sağlar. Ezme işlemi sırasında iş parçasında oluşturulan gerilim yüzeyden eksene doğru azalır. Bu gerilim, malzemeye, ezme miktarına ve çalışma şekline bağlı olarak 1mm derinliğe kadar nüfuz eder. Ezme kuvveti kalktıktan sonra, dislokasyon artışı ve pekleşmeye bağlı sertleşen yüzey tabakasının altında gerilim yığılmasından dolayı kalıntı gerilmeleri oluşur (Akkurt ve Ovalı 2009).

Yüzey pürüzlüğünün artması parça üzerinde çentik etkisi doğurduğundan çatlak başlangıcına sebep olmaktadır. Bölgede oluşan çekme artık gerilmelerinin etkisi ile çatlak ilerleme hızı artmaktadır, buna mukabil yüzeyde oluşan basma artık gerilmeleri ile çatlak ilerleme hızında yavaşlama meydana gelir. Bu iki etkinin bileşiminden malzemenin mekanik özellikleri de etkilenir. Artık gerilmeler silindirik bir parçanın

yüzey bölgesinde basma gerilmesi ve iç bölgelerde ise çekme iç gerilmelerinin bulunması halinde tam kesitinde denge halinde bulunurlar ve herhangi bir eksene göre momentleri toplamı sıfır olur. Makaralı parlatma yöntemi ile işlenmiş parçalarda özellikle kalıntı gerilmeler yüzey doğruluğunu etkileyen en önemli faktördür (El-Axir 2000).



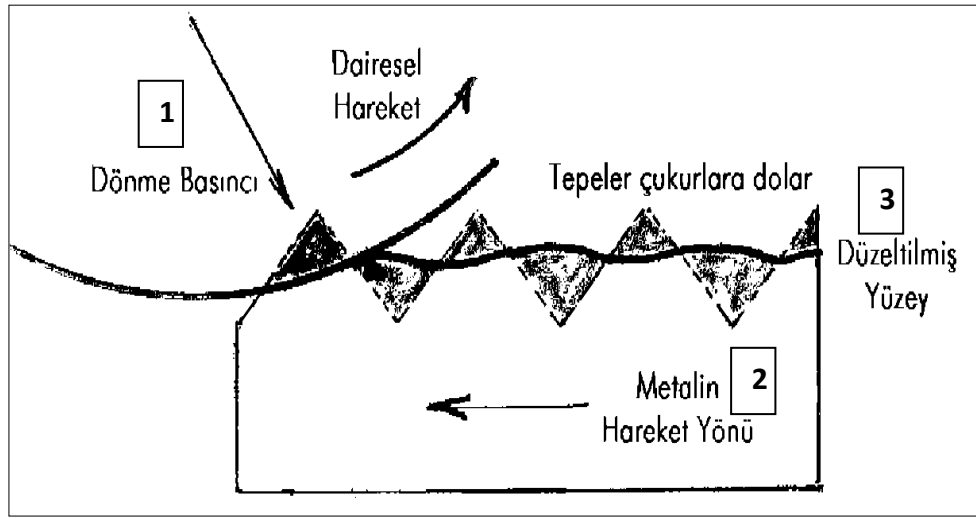
Şekil 2.7. Ezme işlemi ve malzemede meydana gelen deformasyon (Akkurt ve Ovalı 2009)

Geleneksel yüzey işleme yöntemleriyle işlenmiş yüzeylerde işlemeden kaynaklanan düzensiz enerji dağılımı etkisi görülmektedir. Bu durum yüzey bozukluğuna sebep olmakta ve parçaların dayanma ömrünü olumsuz etkilemektedir. Makaralı parlatma işlemi bu olumsuzluklara karşı yüzeylerin aşınmaya, oksitlenmeye ve korozyona karşı yüzey dayanımını artırmada alternatif bir çözüm sunmaktadır (Anantha and Krishnamurthy 1978).

2.2.3.e. Polisaj (cilalama) ve parlatma işlemi

İmalattan çıkan metallerin yüzeylerinde çapaklar, kalıp artıkları ve tırtıklar olması tabiidir. Kaplama yapılması durumunda kaplamadan önce parça yüzeyinin bunlardan arındırılması gerekmektedir. Metal yüzeyindeki çapak ve parçacıkların aşındırıcı olarak adlandırılan ve bu metalden daha sert olan parçacıklar ile temizleme işlemine

‘Aşındırma İşlemi’ denilmektedir. Yapılmaması durumunda kaplamanın istenen kalitede olması mümkün değildir. Polisaj ve parlatma, aşındırma işleminin yüzey pürüzsüzleştirme için kullanılan kısmıdır. Polisaj işlemiyle malzeme yüzeyi, çıplak gözle görünemeyecek kadar küçük çizgiler kalıncaya kadar aşındırıcı tozlarla işlenmektedir. İşleme belli bir devirle dönen polisaj kesici mekanizmalara yapıştırılmış aşındırıcı parçalarla sağlanmaktadır. Polisaj işleminin ana unsurları Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Polisaj İşleminin Ana Unsurları:

*(1. Aşındırıcı- Dönme Hareketi, 2. Ana Malzeme-Doğrusal Hareket, 3. Düzeltilmiş Yüzey)

(<http://www.yuzeyislemler.com/03kitap/polisaj-cilalama-parlatma.htm>)

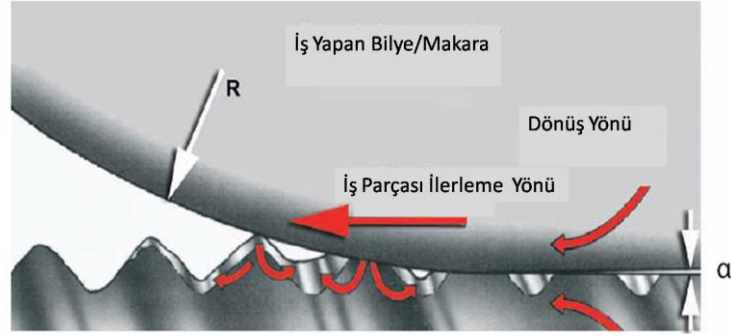
Aşındırma sertliğe bağlıdır ve bu sertliğin bir derecesi bulunmaktadır. Yıllarca önce Friedrich Mohs adında bir mineralog sertlik özelliklerini sınıflandırarak sistemli hale getirilmiştir. Bütün maddeler içinde en sert olan elmasın sertlik derecesini skalasında 10 olarak kabul etmiş diğerlerini ona göre sıralamıştır. İkinci en sert madde olarak elmadan başka her şeyi çizebilen safiri (korindon veya alüminyum oksit) bulmuş ve skalasında 9 olarak değerlendirilmiştir. Bu şekilde daha yumuşak malzemelere doğru giderek skalasını oluşturmuş, en yumuşak malzeme olarak sertlik skalasında 1. Derece olarak gruplandığı Talkı koymuştur. Bugün, çok daha bilimsel olan Rockwell metodu ve elmas piramit sayısı yöntemleri olmasına rağmen, eski Mohs skalası halen günümüzde kullanılan aşındırıcıların sertliklerinin derecelendirilmesini sağlamaktadır.

Kendi içerisinde bölümlere ayrılan polisaj işlemi kaba işçilik, parçalama, parlatma gibi kısımları vardır. Yüzey temizleme işlerinde son işlem olarak adlandırılan kum püskürtme, fırçalama, buhar püskürtme, honlama, satine işlemi, turlama, süper son işlem gibi evreler de uygulanmaktadır (<http://www.yuzeyislemler.com/03kitap/polisaj-cilalama-parlatma.htm>).

2.3. Makaralı Parlatma ve Derin Haddeme İşlemlerinin Benzer ve Farklı Yönleri

Her iki işlemde de temel fonksiyon malzemenin dış yüzeyinin düzgünlüğünü arttırmak amacıyla bir veya birden fazla makara veya bilyelerle iş parçasının yüzeyine baskı uygulanmaktadır. Bilye yâda makaraların malzemeyle temas ettiği noktalarda yuvarlanma kuvvetinin etkisiyle belli bir frekansta gerilmeler olmaktadır. Bu gerilmelerin malzemenin akma dayanımından daha yüksek değerde olması halinde malzeme yüzeyinde belli kalınlıkta malzeme akışı meydana getirmektedir. Makara veya bilyelerin iş parçasının yüzeyinde bastırarak hareket etmesiyle sıkışma bölgelerinde deformasyona uğrayan malzeme sürüklenir, işlemin özelliğine göre takım yâda iş parçası dönerken iş parçası yüzeyindeki çukurlara doğru yayılır ve şekillendirme işlemi tamamlanır. Her iki işlemin sonucunda iş parçasının yüzeyinde meydana gelen plastik deformasyonla malzeme yüzeyinde bulunan dikeye yakın çıkıntılar, çıkıntıların hemen bitişiğindeki çukurlara dolar ve oldukça düzgün halde son yüzey elde edilmiş olur.

Düzgün yüzey elde edilmesinin çıkıntıların yüzey içine yayılmasından kaynaklandığı şeklinde yaygın ancak yanlış bir yaklaşım vardır. Ancak yüzey düzgünlüğü iş parçasının yüzeyinde meydana gelen malzemenin plastik deformasyonu ile diğer bir deyişle malzemenin akmasıyla oluşmaktadır. Şekil 2.9'da verilen resimde görülen eğri kırmızı oklar malzemenin çıkıntılardan çukurlara yayılma yönünü göstermektedir.



Şekil 2.9. Derin Haddelme İşlemi Temel Prensipli (Ecoroll 2006)

Plastik deformasyon yüzeye temas eden bilye veya makaraların akma gerilmesinin üzerindeki gerilmeler ile artmaktadır. Silindir başlığı yüzeye yuvarlanma basıncı uygularken temas noktasındaki çıkıntılar bu basınçtan etkilenmekte ve malzeme akışına sebep olmaktadır. Şekilde "dönme yönü" olarak belirtilen oklar arasında bulunan bölgenin malzemenin yüzey parlatma veya derin haddelme işlemi sırasında nasıl şekillendiğini göstermektedir. Makaralar yüzeyin aşırı derecede parlatılmasını önlemek için α açısı kadar bir boşluk sağlarken plastik bölgedeki malzemeyi besleme yönünün tersine geriye doğru akışını önlemek için bastırır. Her iki silindir parlatma ve derin haddelme işlemleri tornalama, delme, raybalama, frezeleme ya da broşlama gibi bir ilk kesme işleminden hemen sonra aynı ortamda doğru yer alabilir. Takımlar, konvensiyonel ve CNC kontrollü torna, matkap, frezeleme makineleri ve diğer işleme merkezleriyle uyumludur. Ayrıca, bu araçlar hem tornalama - delme gibi düzenli hem de frezeleme veya preslenmiş düzensiz bileşenleri işleyebilmektedir.

Bazen her iki işlem için de "makaralı parlatma" ifadesi kullanılır. Kullanıldığı yer ve alınan sonuçları itibarıyla teknolojik anlamları benzer olmakla birlikte her bir işlem için kullanılan takımlar farklıdır.

Bitirme yüzeyinin iyileştirilmesi ve işleyici takımla işlenen yüzeyin temas alanının artırılması amaçlandığında makaralı parlatma önerilmektedir. Yorulma dayanımının artırılması istenildiğinde ise yandan derin haddelme tercih edilmektedir. Derin haddelmenin yüzey kalitesini arttırdığı söylene bile makaralı parlatma kadar değildir. Derin haddelme, parlatma işlemine benzemektedir. Parlatma işleminde, parlatma,

soğuk şekil verme ve işlenen bölgelerin dış kısmında basma gerilmesinin meydana gelmesi birlikte gerçekleşir. Bu üç fiziksel etki malzemenin yorulma dayanımı arttırır, korozyon çatlamaşının azalmasını hatta önlenmesini sağlar. Önceden de açıklandığı gibi işleyici takım üzerinde bulunan veya bilyeler parça yüzeyine uyguladığı basınçla baskı bölgesinde malzeme akışkan haline gelmesini sağlar.

Bu plastik deformasyon oda sıcaklığında veya daha da altında gerçekleştiğinden, "soğuk şekil verme grubunda değerlendirilen işlemler sonucunda yüzeyin mikro yapısında değişiklik meydana gelir. Soğuk iş miktarı ve malzemenin özelliklerine bağılı olarak malzeme karakteristikleri elde edildi. Aynı anda, derin haddeleme işlemiyle bası artık gerilmeleri meydana gelir.

Yüzey işlemede kullanılan takımların bilinen olumsuzlukları yapılan yeniliklerle giderilmiş, geliştirilen son modelleri tornalama ve makaralı parlatmayı aynı anda bir arada yapabilecek şekilde imal edilmiştir. Ortaya çıkan kombinasyonlar bu sektör için ekonomik bir alternatif olarak tercih edilmektedir. Birleşik takımın kullanılmasıyla silindirin iç yüzeyi nihai boyutunda tornalanırken, dış yüzeyi de takımın çevresinde yerleştirilen makaralarla parlatılmaktadır. Bir işlemle elde edilen yüzey profili düzgünleştirilmekte ve nihai şekli elde edilmiş olmaktadır. Yüzey işleme sonucunda dinamik yüke maruz kalan yüzeylerin aşınma ve yorulma direnci iyileştirilmekte ve yüzey sertliği de arttırılmış olmaktadır (Ecoroll 2006).

2.4. Derin Haddelemenin Tipik uygulamaları

Günümüzde haddeleme işlemleri birçok teknik alanda uygulanmaktadır. Makaralı parlatma (düşük güç yâda basınç ile derin haddeleme) yüzey topografyasını geliştirmek amacıyla kullanılırken, derin haddeleme öncelikle malzeme mukavemetini arttırmak için kullanılmaktadır. Aşağıdaki bölümde derin haddelemeyle ilgili tipik örnekler verildi.

2.4.1. Otomotiv endüstrisi

Otomotiv endüstrisinde akslar, şaftlar ve özellikle direksiyon bağlantıları gibi çoğunlukla dönen birkaç simetrik bileşenler ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Bunların üretimi derin haddeleme işlemiyle sağlanmaktadır. Derin haddeleme işlemi direksiyon simidi veya araç kumanda sistemi parçalarının imalatında ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Araçların ağırlığını azaltmak bakımından tercih edilen bir yöntemdir. Hafif tonajlı binek araçlarından nakliye grubu araçlarına kadar geniş bir uygulama alanı mevcuttur (Şekil 2.10).

Sertleştirilmiş parçaların işlenmesine imkân sağlayan gelişmiş haddeleme, aşınma sınırında yüklenen merdane taşıyıcı çelikleri için örnek teşkil etmektedir.

Isıl ve mekanik yüzey işlemlerinin birlikte uygulanması, parçaların ağırlığının belirgin bir şekilde azalmasını sağlarken yorulma dayanımını da önemli derecede arttırmaktadır.

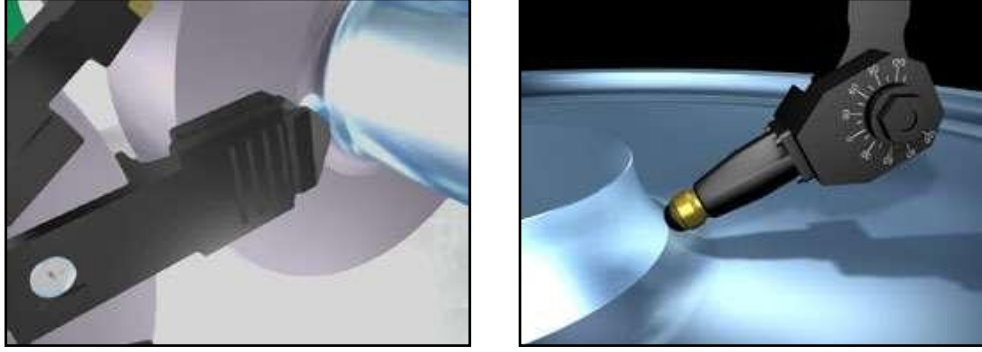


Şekil 2.10. Otomotiv Endüstrisinde Derin Haddelemeye Örnek Uygulamalar
*1. Aks 2. Direksiyon mafsalı 3. Diferansiyel Dişlisi (Ecoroll 2006)

2.4.2. Uzay ve uçak sanayi / enerji santrali endüstrisi

Özellikle uzay ve uçak sanayinde ağırlığın azaltılması parça tasarımcılarının başlıca hedefleri arasındadır. Tasarımcılar harici işleyiciler kullanarak yakın yüzey özelliklerinin optimizasyonunu amaçlamıştır. Makalede örneklendirilerek bahsedilen uygulamalardan birkaçı derin haddelemenin sağladığı ekonomik ve teknolojik

avantajlarının çeşitliliğini ortaya koymaktadır. Askeri uçakların teker jantları, yüksek torkla kullanılan cıvata ve somunlar ile türbin diskleri ve kompresör fanı kanatları gibi tahrik parçaları tipik uygulama örnekleridir (Altenberger 2006). (Şekil 2.11)



Şekil 2.11. Haddemeleme İşlemiyle Üretilen Enerji Santrallerinin Türbin Mili ve Çarkları (Ecoroll 2006)

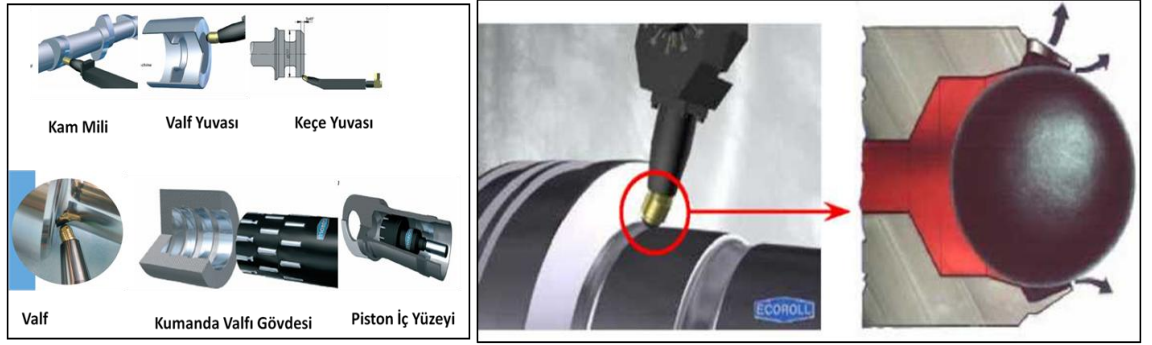
2.4.3. Tıbbi uygulamalar

Tıbbi uygulamalarda özellikle iç protez alanında ağırlıklı olarak kullanılan ve yüksek seviyede performans sergileyen birkaç örnek mevcuttur. Yapay kalça eklem ve omurga kortları olarak uygulanan implantlar bu alanda görülebilecek tipik uygulama örnekleridir. Uzun süreli kullanım amaçlandığından yüzey optimizasyonu mutlak surette yapılmalıdır. Bununla beraber asitli ve korozif ortamlarda kullanılan cerrahi aletlerin parçalarının korozyona karşı hassasiyetleri derin haddemelemeyle mükemmelleştirilebilir.

2.4.4. Diğer uygulamalar

Derin haddemelemenin ilk büyük uygulamaları teker aksları gibi geometrik yapı olarak basit ve dönen simetrik parçaların elde edilmesinde kullanılmıştır. Derin haddemeleme işlemleri genelde mekanik olarak çalıştırılan araçlarla yapıldı. Krank milleri gibi kritik parçaların işlenmesi için son derece özel uygulamalarla yapılabilir. İlerleyen zaman içerisinde derin haddemeleme uygulamaları türbin şaftları, türbin kanatları, valfler, silindir gömlekleri, vidalar, pistonlar ve küçük kelepçeler gibi kendine özel dönesel simetrik geometrik yapısı olan parçaların imal edilmesinde uygulanmıştır (Şekil 2.12) .

Teknolojinin son gelişmiş ürünleri olan derin haddeme aletleri daha karmaşık yapıya sahiptir. Simetrik geometrik yapıya sahip parçaların işlenmesi için dizayn edilmektedir. Özellikle Tamamen Bilgisayarlı Nümerik Kontrol ile (Computer Numerical Control-CNC) çalışan hidrostatik aletler düzgün olmayan topoğrafik yüzeylerin derin haddelenmesi sırasında sabit basınç ve işleme kuvveti sağlamaktadır. Modern hidrostatik işleme aletleri standart makine aletlerine uyumlu olarak dizayn edilir ve derin haddeme proseslerini bir takım halinde üretim işlemlerine uygun şekilde bilgisayar programlarıyla otomatik olarak çalıştırılabilecek entegre devrelerle donatılır. Derin haddeme proseslerinde elde edilmek istenen son adım hayal gücüyle tasarlanan geometriye sahip parçaların öğütme, son işleme ve honlama gibi diğer geleneksel yüzey işleme proseslerinin yerini alabilecek bir uygulamaların tasarlanmasıdır.



Şekil 2.12. Derin Haddemeyle İmal Edilen Örnekler (Ecoroll 2006)

Bilgisayarlı Sayısal Kontrol; (CNC), takım tezgâhlarının sayı harf vb. sembollerden meydana gelen ve ISO (Uluslararası Standartlar Kuruluşu) tarafından belirli bir mantığa göre belli kodlarla standartlaştırılmış komutlarla işletilmesinin bilgisayar yardımıyla kontrol edilmesidir. Komutlar veri blokları şeklinde CNC tezgâhlarına yüklenmiştir. CNC tezgâhları tornalama, frezeleme, delme, taşlama, alevle kesme, bükme, derin haddeme, form verme, polisaj üç boyutlu ölçme, elektro erozyon ve robot uygulamaları gibi alanlarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tezgâhlarda sık olarak kullanılan parça programları kontrol ünitesine kaydedilebilmekte ve her ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilir. Bu programlarda değişiklik veya ilaveler yapılabilmesi yâda oluşan hataların düzeltilebilmesi mümkün olabilmektedir. Kesici yâda işleyici takım özellikleri de kontrol ünitesine kaydedilerek işleme göre takım

seçilebilmekte ve işin teknik resminde tarif edildiği üzere işlenmesi sağlanmaktadır. Parça ve işin özelliğine göre işleme şartları da kontrol ünitesinde takip edilerek gerekli ayarlamalar yapılabilmektedir. İşleme tezgâhında meydana gelebilecek arızaların takip edilmesi bunun neticesi olarak anında müdahale edilebilmesi de mümkün olmaktadır (Özek ve Savaş 2003).

Karmaşık geometriye sahip parçalar için tipik bir örnek kısmen kenarlar boyunca veya tamamen derin haddelenebilen türbin kanat yüzeyleridir. Şekil.2.13’de türbin kanatlarının derin haddelenmesinde kullanılan çift yönlü hidrostatik derin haddeme takımları görülmektedir. Derin haddeme takımları uzunlamasına veya çapraz yönde hem doğrusal, hem de kavisli şeklindeki bir yörünge üzerinde hareket edebilir. Çift yönlü olmasıyla yüksek kesme kuvvetinin uygulandığı kenar bölgelerde meydana gelebilecek kırılmalar önlenmiş olmaktadır.

Diğer bir örnek türbin kanadı ve diskler arasına bağlantıyı sağlayan kırlangıç yuvasının derin haddelenmesidir. Bu gibi kırlangıç yuvaları yüksek döngü yorgunluğuna maruz kalırlar ve metal yüzeylerin optimizasyonu için sürtünmeyle meydana gelen yorgunluğu bertaraf edebilecek ideal şartları taşırlar. Kırlangıç yuvaları çift yönlü hidrostatik cihazlarla veya hidrostatik çarpmalı küresel aletlerle derin haddeme yapılabilir.



Şekil 2.13. Derin Haddemede Kullanılan Hidrostatik Takım Örnekleri (Ecoroll 2006)

Hidrostatik takımlar, en karmaşık geometrisi olan şekillerin ve serbest biçimli yüzeylerin son yüzey işlemleriyle parlatılmasını sağlayabilir. Bu takımlar manuel kontrol edilebilen makinelerle olduğu kadar bilgisayar nümerik kontrollü tezgâhlarla da (torna tezgâhları, delme makineleri, freze makineleri ve diğer yüzey işleme merkezlerinde) kullanılmaktadır. Bu takımlarla sertlik değeri oldukça yüksek olan (65 HRC sertlikte) malzemeler işlenebilmektedir. Bu takımlar aşınma ve darbe dayanımı oldukça yüksek olan malzemelerden imal edilmiştir. Bilyeler hidrostatik olarak basınçlı sıvıyla püskürtülmektedir. Basınçlı sıvı olarak suda çözünebilen soğutma sıvısı veya soğutucu yağ kullanılabilir. Emiş hattına yerleştirilen hidrolik pompa vasıtasıyla hidrolik depodan emilir. Kontrol edilebilen işletme basıncı sağlanarak bilyeler ile işlenecek parçanın yüzeyine nihai parlatma işlemini gerçekleştirmek üzere püskürtülür (Ecoroll 2006; Altenberger 2006).

2.5. Yüksek Sıcaklığın Derin Haddelemeye Etkisi

Değişik metalik alaşım örnekleri üzerinde yapılan son akademik çalışmalar: derin haddeme işlemine tabi tutulan parçaların derin haddeme işlemi sırasında belirli bir optimize sıcaklık aralığında ısıtılarak sıcak olarak işlenmesi halinde, malzeme yorgunluğuna karşı daha yüksek dayanım gücü ve ömrü sağlanabileceğini göstermiştir (yüksek sıcaklıklarda harici işleme). Bu uygulama çelikler, alüminyum ve magnezyum alaşımları üzerinde test edilmiştir (Altenberger 2006). Uygulama "Yüksek Sıcaklıkta Derin Haddeme" veya "Termomekanik Derin Haddeme" olarak isimlendirilmiştir. Benzeri uygulamayla elde edilen yorulma özellikleri geleneksel derin haddemeyle veya lazer uygulama şartlarıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında üstünlüğü açıkça görülebilmektedir.

2.6. Makine Elemanlarında Emniyet

Genel olarak çok özel istek ve koşullar dışında bir makine elemanı, hiçbir zaman fonksiyonu yerine getiremeyecek tehlike oluşturacak kalıcı deformasyon veya hasar doğuracak biçimde zorlanmaz. Elemandaki gerilmelerin, tehlike başlangıcı olarak değerlendirilen sınır değerleri altında kalması hedeflenir. Makine elemanın işlevini

kaybetmesi durumu, sadece elemanın kopması, kesilmesi gibi tahribattan değil, elastik veya plastik deformasyon, titreşimde rezonans hali, aşınma ve sıcaklık etkisiyle doğan gerilmeler gibi durumlardan ortaya çıkar.

Herhangi bir makine bileşeni boyutlandırılırken, dıştan gelen kuvvetlere karşı mukavemetli olabilmesi için, meydana gelen gerilmelerin kopma gerilmesinden küçük olması gerekir. Aynı zamanda gerilme elastiklik sınır üzerinde olursa, cisimde kalıcı bir şekil değişmesi de kaçınılmazdır. Elemanın yapıldığı malzemenin dayanımına esas teşkil eden kopma veya akma sınırı ile esneklik sınırına ait gerilmelerin belli bir emniyet katsayısına bölünerek o malzeme için bir emniyet gerilmesi elde edilir.

2.7. Kalıcı (Artık) Gerilmeler

Kalıcı gerilmeler, bir cisimde dış kuvvetlerden bağımsız olarak meydana gelen gerilmeler sistemidir. Artık gerilme yâda iç gerilme olarak da tanımlanan kalıcı gerilmeler, bir parçada “hapsolmuş” gerilmeler şeklinde düşünülmektedir (Akkurt ve Kent 1984). Artık gerilmeler, düzgün olmayan plastik deformasyonlardan kaynaklanmaktadır. Tekrarlı zorlamalar altında malzemenin mukavemeti azaldığından, genellikle yüzeyde yorulma çatlakları oluşabilir. Yüzeyde oluşan kalıcı gerilmeler basma gerilmesi şeklinde ise çatlak oluşumuna ve gelişimine engel olurlar ve genellikle faydalıdır. Çekme gerilmesi şeklinde ise yüzeyde çatlak oluşumuna ve gelişimine yardımcı olur ve gerilmeli korozyon çatlaklarına öncülük ettiklerinden zararlıdır (Lu 1996).

Malzemelerin iç gerilmeleri mühendislik malzemelerinin yorulmalarında önemli derecede rol oynamaktadır. Makine parçalarının yerine getireceği fonksiyona uygun olarak üretimi ve mamul parçaların yeniden işlenmesi konusunda olduğu kadar, makine ve sistemlerin teknik yorulma ömürlerinin ve yük taşıma kabiliyetlerinin önceden tayin edilmesi için de, bilinmesi gereken önemli bir faktördür. Üretim optimizasyonu ve kullanım parametrelerine göre kalıcı gerilmelerin doğru teşhis edilmesi, net bir şekilde hesaplanması ve bunların sonucunda sağlıklı yorumların yapılması iç gerilmelerin bilinmesi ile mümkün olabilir.

Kullanım sırasında söz konusu parçanın ivmeli hareketleri sonucu veya statik yüklemelerle ortaya çıkan gerilmelerin, iç gerilmelerin de eklenmesiyle beklenmedik kırılmalara ve/veya kalıcı deformasyonlara neden olabilir. İç gerilmeler her şeyden önce mekanik zorlanmalar altındaki malzeme bölgelerinde, yorulma dayanımını, aşınma mukavemetini, çatlak/çentik hassasiyetlerini olumsuz yönde etkiler.

Uygulanan mekanik yüzey işlemleri malzemenin yorulma dayanımını arttırmasına rağmen, sırasında iç gerilmelerin ortaya çıkması da kaçınılmaz olmaktadır. Malzemelerde iç gerilme oluşumunu engellemek veya en aza indirebilmek için oluşum mekanizmalarını iyi tanımlamak gerekir. Soğuk plastik şekil değişimi, faz dönüşümleri, ısı işlemler, sıcaklık değişimleri iç gerilmelerin oluşumunu tetikleyen başlıca kaynaklardır. Bunlar malzemelerde iç gerilme oluşumuna ayrı ayrı sebep olabildiği gibi birkaçı veya hepsi bir arada da olabilirler. Soğuk plastik şekil değişimi sırasında, iç gerilmeler, dış yükleme yönü aynı kalsa bile parça malzemesi içerisinde tanelerin ve ilgili kayma sistemlerinin dış zorlanmaya göre farklı yönlenmesiyle bölgesel olarak homojen olmayan plastik deformasyon oluşumuna etken olabilmektedir. Bu durum yapı içerisinde değişik iç gerilme türleri üretecektir. Teknik üretimlerde iç gerilmelerin olumlu veya olumsuzluklarının hesaba katılabilmesi, nitelik ve büyüklüklerinin hassasiyetle analizini, iç gerilmelerin ölçülebilmesini gerektirir. Bu da oldukça karmaşık bir sistemdir. Ancak bilinen odur ki açığa çıkan iç gerilmeler bası gerilmesi ve çeki gerilmesi gibi farklı etkiler yaparlar. Bası artık gerilmeleri, makine elemanlarının yorulma ömrünü uzatırken çeki gerilmeleri oluşan çatlakların tahribata sebep olacak kadar ilerlemesine neden olurlar. Malzeme üzerinde sabit bası artık gerilmelerinin oluşturulabilmesi için birkaç yöntem kullanılır. Bunlardan bazıları bilye püskürtme, indüksiyonla yüzey sertleştirme ve soğuk işlem uygulamasıdır (Demirci 2004).

Cismin içerisinde mevcut olan artık gerilme sistemi statik dengede olmak zorundadır. Bu nedenle homojen olmayan deformasyon bölgelerinde meydana gelen artık gerilmeler genel olarak meydana gelen plastik şekil değiştirmelerin tersi işaret taşımaktadır. Cismin herhangi bir düzlemi boyunca etki eden toplam kuvvet ve herhangi bir düzlemdeki kuvvetlerin toplam momenti sıfır olmalıdır. Artık gerilmeler yalnız elastik gerilmelerdir. Bir artık gerilmenin erişebileceği en büyük değer malzemenin akma

gerilmesidir. Gerilme analizlerinde artık gerilmelerin gelişi güzel uygulanan bir gerilmeyle aynı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bir bası artık gerilmesi, uygulanan çeki artık gerilmesinden cebirsel olarak çıkarılmalıdır ve bir çeki artık gerilmesi, uygulanan çeki gerilmesine ilave edilmelidir. Artık gerilmelerin analitik metotlarla kesin olarak hesaplanması zordur. Bu yüzden artık gerilmeler genellikle çeşitli deneysel tekniklerle veya yaklaşık çözüm yöntemleriyle hesaplanabilmektedir. Artık gerilmelerin hesaplanması sonlu eleman yöntemiyle yapılabilir. Sonlu eleman yöntemi nümerik bir çözüm yöntemidir. Elasto-plastik olarak meydana gelen gerilmelerden, elastik gerilmelerin çıkarılmasıyla hesaplanır. Sonlu eleman yönteminde malzemenin elasto-plastik bölgedeki davranışını ifade edebilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Yu 1977; Owen and Hinton 1980; Zienkiewicz *et al.* 1969). Bunlardan biri başlangıç gerilmesi yöntemidir. Özellikle küçük plastik deformasyonların olduğu sistemlerde çok çabuk çözüm vermektedir.

2.8. Yorulma

2.8.1. Yorulmanın tanımı

Mühendislik uygulamalarında kullanılan turbo makineler, gaz türbinleri, volanlar, kesici takımlar, otomobiller vb. makinelerin çoğu yüksek devirle dönen elemanlar içermektedir (Timoshenko and Goodier 1970). Bu gibi makine parçaları sabit yüklerden başka, tekrarlanan yüklere de maruz kalmaktadır. Çevrimsel yüklerin, toplam yükün önemli bir oranını teşkil etmesi halinde, yapılara değişken kuvvetler etkilemekte ve bunun sonucunda makine parçalarında değişik gerilmeler meydana gelmektedir (Çarboğa 2002). Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalar akma sınırının üstünde bir gerilmeye maruz kaldığında malzeme bünyesinde elastik deformasyon meydana gelir. Elastik deformasyon malzemede sürekli tekrarlandığından zamanla atomlar arasında bağların zayıflamasına neden olmakta ve bunun sonucunda belli bir süre sonra o malzemede plastik deformasyon gerçekleşmeden yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma şeklinde hasar meydana gelmektedir. Genel anlamda tekrarlı gerilmeler altında çalışan malzemelerde meydana gelen hasar o malzemenin yorulması

sonucu ortaya çıkmaktadır. Değişen yükler altında malzemenin veya parçanın mekanik özelliklerindeki azalma Yorulma olarak tanımlanmaktadır (Ün 2007).

Akma gerilmesinin altında dinamik yükler altında çalışılan malzemelerin belli bir süre sonra tahrip olması mühendislik uygulamalarında çok sık bir şekilde rastlanmaktadır. Bu tahribat uzun bir gerilme ve gerinim döngüsünden sonra gizlice ve hiç uyarı vermeden ortaya çıktığından felaketle sonuçlanabilmektedir. Metalik parçaların işletme durumundaki hasarlarının %90'ının yorulmadan kaynaklandığı kabaca hesaplanmıştır. Bu olay ilk defa 1850 - 1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve teknoloji ilerledikçe mühendislik uygulamalarında daha fazla önem kazanmıştır.

2.8.2. Yorulma ömrü

Tekrarlı yükler altında malzemenin yorulma hasarına uğramadan dayanabileceği maksimum çevrim sayısı malzemenin o yük altındaki yorulma ömrünü vermektedir. Bir malzemenin yorulma ömrü zamandan bağımsızdır. Ömür, periyodik zorlanmalara bağlı olarak ve yükün şiddeti ile değişmektedir. Çelik ve Titanyum alaşımı malzemeler belirli bir yorulma ömrü değerinin altında sonsuz çevrim sayısında bile kopmazlar. Sonsuz ömrün meydana geldiği bu gerilme değeri yorulma sınırı olarak tanımlanmaktadır. Magnezyum ve Bakır alaşımı gibi diğer alaşım malzemeleri ile beton türü malzemede ise bir yorulma sınırı söz konusu değildir. Bu tür malzemeler için yorulma dayanımı tanımı yapılır. Yük ne kadar azaltılırsa azaltılsın bu tür malzemeler muhakkak belli bir çevrim sayısından sonra yorulma hasarına uğrarlar.

2.8.3. Yorulma dayanımı

Malzemelerin tahrip olmadan, herhangi bir hasara uğramadan emniyetle çalışabileceği yüklenme sınırına Yorulma Mukavemeti veya Yorulma Dayanımı denir. Yorulma Mukavemeti; teorik olarak yük ve yük tekrar sayısına bağlıdır.

Metal malzemelerde yorulma dayanımı çok büyük bir öneme sahiptir. Günlük hayatımızda çok önemli bir yere sahip olan metal esaslı malzemelerin yorulma

dayanımlarının arttırılması için çeşitli işlemler yapılmaktadır. Bunlardan ısııl işlem, malzemenin önemli bazı mekanik özelliklerini iyileştirdiği gibi, metalik malzemenin yorulma dayanımını da arttırmaktadır. Dinamik olarak zorlanmaya maruz makine parçalarının tasarımı sırasında kullanılan klasik mukavemet hesapları yerini, yorulma dayanımını dikkate alan hesaplama yöntemine bırakmaktadır (İmrak ve Fetvacı 1993).

Makine ve yapısal parçaların büyük çoğunluğu gerçek çalışma şartlarında sabit genlikli yüklerden çok değişken genlikli yüklere maruz kalması nedeniyle yorulma hasarı gerçekleşmektedir. Değişken genlikli yükler altında çalışan parçaların yorulma ömrünün doğru tahmini oldukça karmaşık bir durumdur. Yapılan araştırmalar çekme ve basma aşırı yük oranı, aşırı yükler arasındaki çevrim sayısı ve aşırı yük sayısının çatlak ilerleme hızını etkilediğini ortaya koymaktadır (Karcı ve Turan 2009).

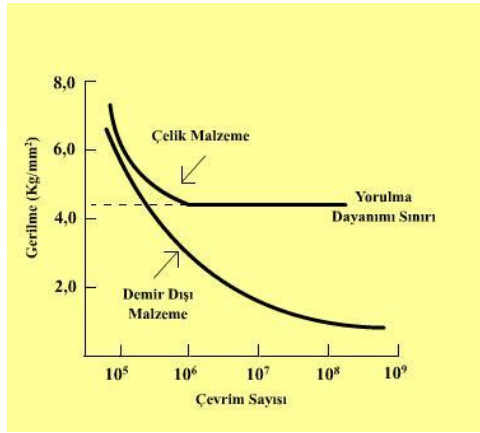
2.8.4. S-N diyagramı (wöhler diyagramı)

Bu diyagram, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlacağı veya kırılacağı gösteren bağlantıyı verir. S-N eğrisinin çizilebilmesi için genellikle 8 ila 12 benzer numune kullanılır. Ortalama gerilme (S_m) tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlmasına (veya kırılmasına) kadar geçen çevrim sayısını (N) tespit edilir. Küçük gerilmeler için çatlamanın görüleceği çevrim sayısı çok büyük olduğundan, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir. Deneylerin tümünde gerilme genliği (S_a) deney süresince sabit tutulur.

Gerilme eksenini olan ordinatta genellikle doğrusal, bazı hallerde ise logaritmik skala kullanılır ve bu ekseninde ya max. gerilme (S_{max}), ya min. gerilme (S_{min}) veya gerilme genliğinden biri kaydedilir. Çevrim sayısı eksenini olan apsiste ise genellikle logaritmik skala kullanılır.

Burada düşey eksen kopma gerilmesinin çekme gerilmesine oranının yüzdesi, yatay eksen ise logaritmik ölçekte tekrar sayısı N 'dir. Anlaşılacağı gibi tekrar sayısındaki artış dayanım sınırını aşağıya çekmektedir.

Frekans ile yorulma mukavemeti arasındaki ilişkiyi inceleyen birçok deney yapılmıştır. Bunlar içinde dakikada 3000 tekrardan 10^8 tekrara kadar yapılmış olanlar vardır. Çelik için eğri 10^6-10^7 tekrarda yatay olmaktadır ve yorulma sınırı çekme mukavemetinin yaklaşık %50'si kadardır. Demir olmayan malzemelerin yorulma sınırı olmayıp 5×10^7 çevrim sayısındaki yorulma genliği olarak kabul edilir. Alüminyum için yorulma sınırı çok belirgin olmamakla birlikte 5×10^8 tekrardaki gerilme değeri kullanılabilir ve yorulma sınırı çekme mukavemetinin yaklaşık %25'i kadardır. Hafif madenlerde 30×10^6 tekrara kadar dayanıklılık gösteren gerilme sınır değeri olarak kullanılabilir (http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/mekanik_deneyler/yorulma.htm).



Şekil 2.14. Demir ve Demir - Dışı Malzemelere Ait Tipik S - N Diyagramı (http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/mekanik_deneyler/yorulma.htm)

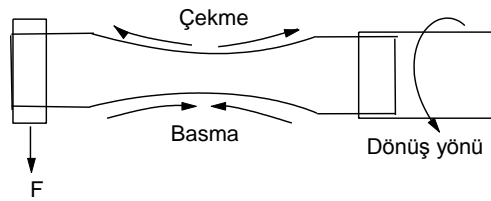
2.8.5. Yorulma deneyi

Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemeler fonksiyonlarını yerine getirirken deforme olmadan çalışması istenir. Klasik elastisite teorisine göre, akma gerilmesi altındaki yüklemeye maruz malzemelerde sadece elastik deformasyonun meydana geleceği kabul edilir. Yükleme hızının tesirli olmadığı, gerilmenin değeri maksimum çekme gerilmesini aşmadığı müddetçe malzemede tahribat beklenmez. Bunun için malzemelerin akma gerilmesi sınırının altında kullanılmaları emniyet açısından zorunludur. Ancak makine parçalarının yorulma ömrünü etkileyen diğer faktörler de

vardır. Bunlar, gerilme (yük), parçanın geometrisi ve özellikleri ve dış çevreyle ilgili parametrelerdir.

Gerilme parametreleri, gerilmenin durumu, gerilme genliği, gerilme oranı, sabit veya değişken yükleme frekansı ve maksimum gerilme olarak sayılabilir. Metal özellikleri, parçanın boyutları ve geometrisi, gerilim arttırıcılar, gerilim eğimi gerilmenin metalürjik ve mekanik parametrelerini oluşturur. Sıcaklık ve korozif ortam ise dış çevre parametreleridir (ASTM Handbook 1997).

Makine parçalarının ömrünü uzatılabilmesi, yorulma dayanımının arttırılabilmesi malzemenin yorulma davranışlarının çok iyi bilinmesine bağlıdır. Bunun için kritik malzemelerin yorulma davranışlarını izleyebilmek amacıyla malzemelerin çalıştırılacağı şartlar laboratuvar ortamlarında hızlandırılmış şekilde tekrarlanarak yorulma ömürleri ve yorulma dayanımları belirlenmeye çalışılır. Bunun için bir Mühendislik biliminde Yorulma Deneyi tanımlanmış, deney düzenekleri geliştirilmiş, yorulma makineleri tasarlanmıştır. Tanımlanan Yorulma deneylerinde üzerinde araştırma yapılan malzemeden standartlara göre hazırlanan yorulma deney numuneleri kullanılarak sonuçları irdelenmektedir. Şekil 2.15’de yorulma deney numunesinin şematik resmi verilmiştir.



Şekil 2.15. Yorulma deney numunesi geometrisi

Şekildeki gibi geometriye sahip numunenin bir ucu motora bağlanırken diğer uçtan bir F yükü uygulanmaktadır. Bu durumda numunenin üst yüzeyi çekme, alt yüzeyi ise basma gerilmesine maruz kalmaktadır. Numune 90° döndürüldüğünde ise bu gerilmeler yer değiştirmektedir. Ve numunenin ortasında sürekli çekme basma gerilmesi tekrarlanmaktadır. Uygulanan F kuvvetine bağlı olarak numuneye etki eden gerilme;

$$\sigma = 10,18 \frac{F.l}{d^3} \text{ bağıntısıyla hesaplanır.}$$

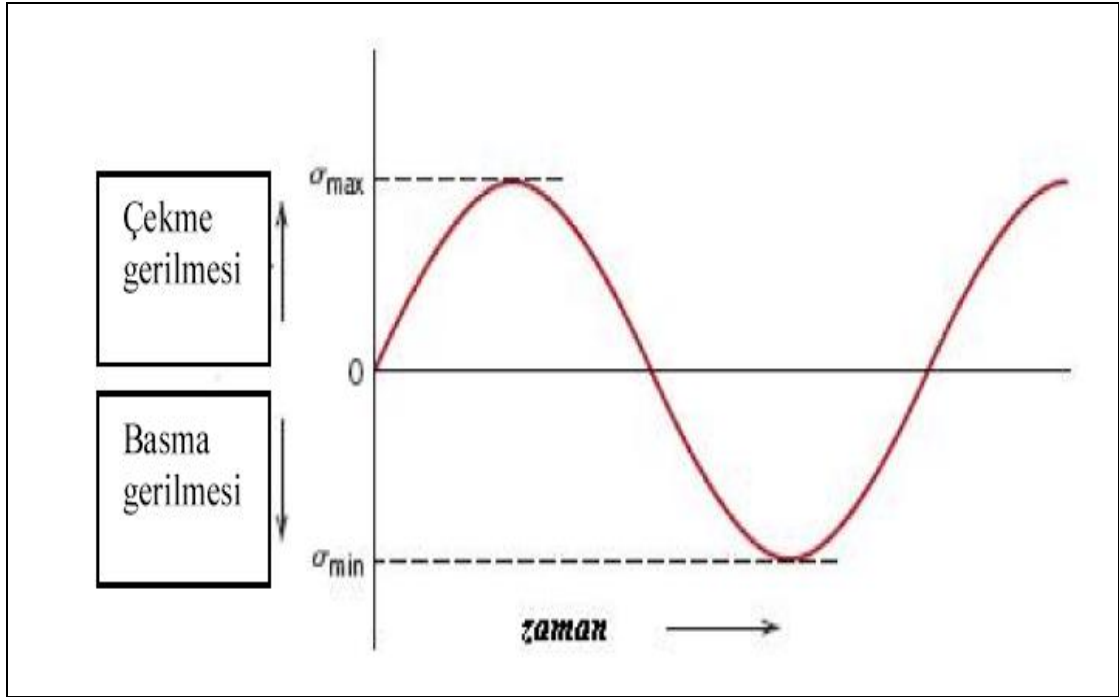
Burada:

F, numuneye uygulanan kuvvet,

l, numune boyu,

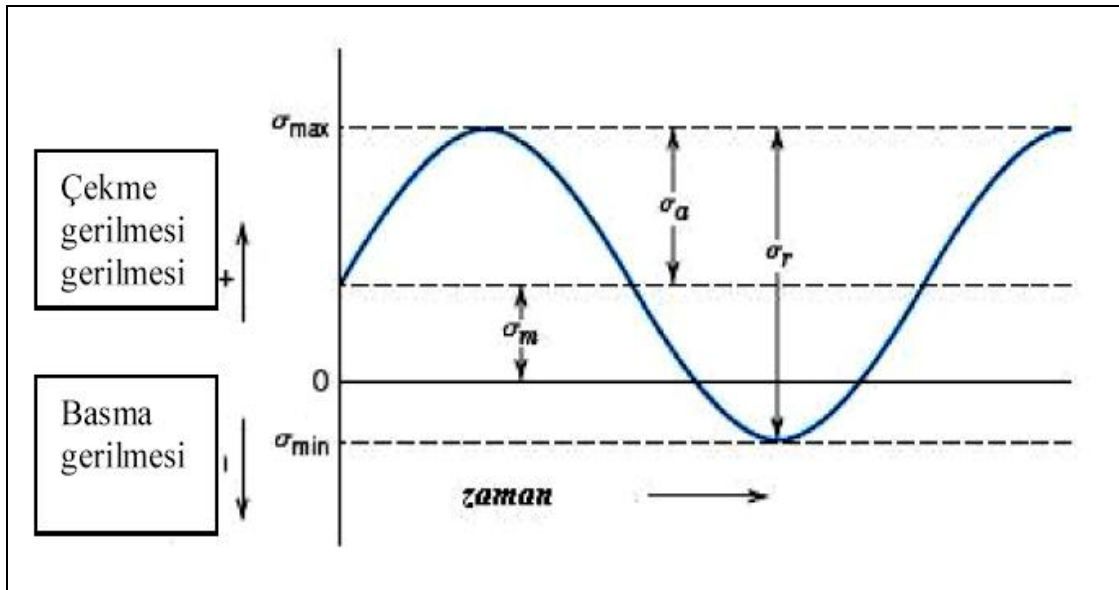
d, numunenin çapı

Malzemenin yorulma ömrünü ve yorulma sınırını sağlıklı bir şekilde tespit etmek için birkaç seri numune kullanılabilir. Uygulanan gerilmeye bağlı olarak numune kopuncaya kadar geçen dönme devir sayısı grafiği elde edilir. Bazı pratik uygulamalar ve malzemeler üzerindeki yorulma deneyleri maksimum ve minimum gerilme seviyeleri arasında çevrimler içerir. Bu tip zorlanmaya dinamik yükleme denilmektedir. Eğer dinamik zorlanmada gerilme seviyeleri sabitse buna sabit genlikli yükleme denir. Aksi durumunda ise değişken genlikli yükleme adını alır (Dowling 1999). Yorulma hasarına neden olan gerilme çevrimleri genel olarak üç farklı gerilme-zaman grafiği olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan birincisi, düzenli ve sinüs dalgasına benzeyen ters gerilme döngüsüdür (Şekil 2.16). Bu grafikte genlik zaman eksenine göre simetriktir ve çekme ile basma gerilmeleri birbirine eşittir.



Şekil 2.16. Ters Gerilme Çevrimi

Diğer bir gerilme çevrimi ise tekrarlı gerilme çevrimidir. Tekrarlı gerilme çevriminde de elde edilen grafik sinisoidal olmasına karşın zaman eksenine göre asimetriktir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Tekrarlı Gerilme Çevrimi

Şekil 2.17'deki döngü için elde edilen maksimum ve minimum gerilme değerleri (σ_{\max} ve σ_{\min}) kullanılarak birtakım hesaplamalar yapılır.

- Denklem (1)'de σ_m ortalama gerilmeyi,
- Denklem (2)'de σ_r gerilme aralığını,
- Denklem (3)'de σ_a gerilme genliğini
- Denklem (4)'de R maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki oranı veren gerilme oranını ifade etmektedir.

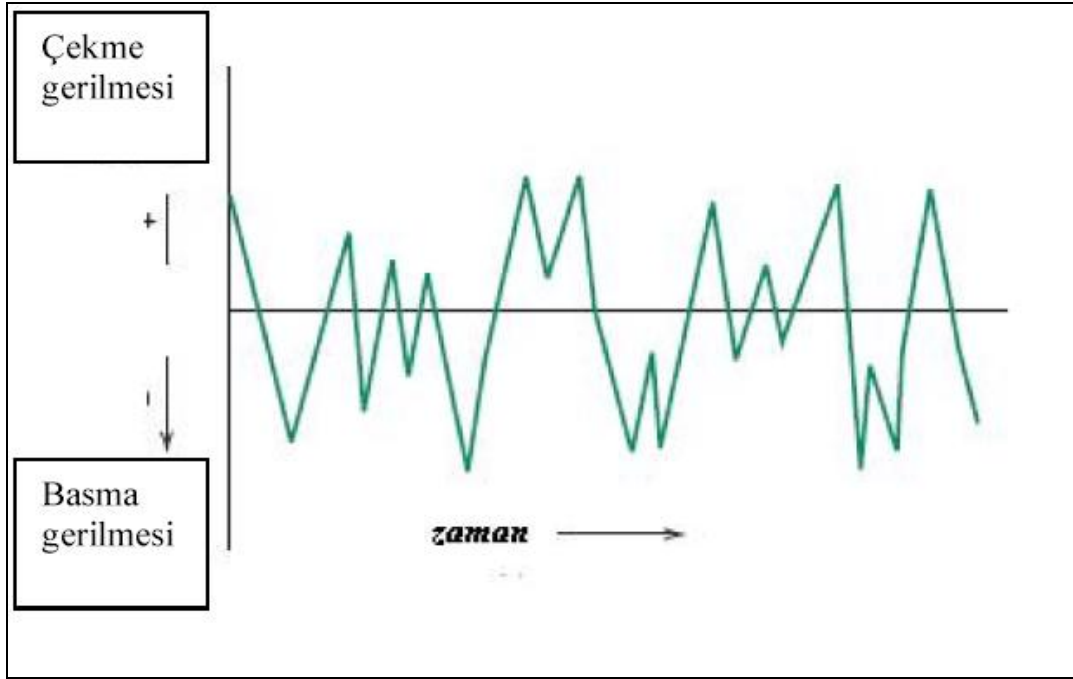
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad [1]$$

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad [2]$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} \quad [3]$$

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad [4]$$

Üçüncü durum ise düzensiz gerilme çevrimidir (Şekil 2.18). Bu döngüde gerilme belirli bir kurala bağlı olmaksızın iniş çıkış göstermektedir.



Şekil 2.18. Düzensiz Gerilme Çevrimi

Deney sonuçları baz alınarak yapılacak olan hesaplamalarda deney cihazı için özel olarak türetilmiş olan denklem kullanılarak gerilme genliği (S) hesaplanır. W deney esnasında uygulanan yükü (kg), L numunenin toplam uzunluğunu (mm), D ise numuneye ait olan iki çaptan küçük olan çapı (mm) ifade etmektedir. Deneylerde kullanılan numunelerin teknik resmi ilgili bölümde verilmiştir.

$$S = 35,681 \frac{W (kg) L (mm)}{\Pi (D (mm))^3} \quad [5]$$

2.8.6. Yorulma makineleri

Metalik malzemelerde yorulma dayanımını incelemek üzere tanımlanan yorulma deneylerini yapmak üzere yorulma makineleri geliştirilmiş ve malzeme laboratuvarlarında kullanılmaya başlanmıştır. Değişik araştırmalar yapılmasına rağmen bugüne kadar standart bir yorulma testi ve numune boyutları belirlenememiştir. Çalışmakta olan makinelerin tekrarlı yüklemeye maruz hareketli parçalarının yorulma ömrünü belirlemek için, mümkün olduğunca gerçek çalışma ortamlarının oluşturulması ve her deneysel durumda belirli bir şartın sabit tutulup diğerlerinin değiştirilmesinden dolayı, her bir duruma uyan sayısız değişik test düzeneği ortaya çıkmıştır (Kumru 2003).

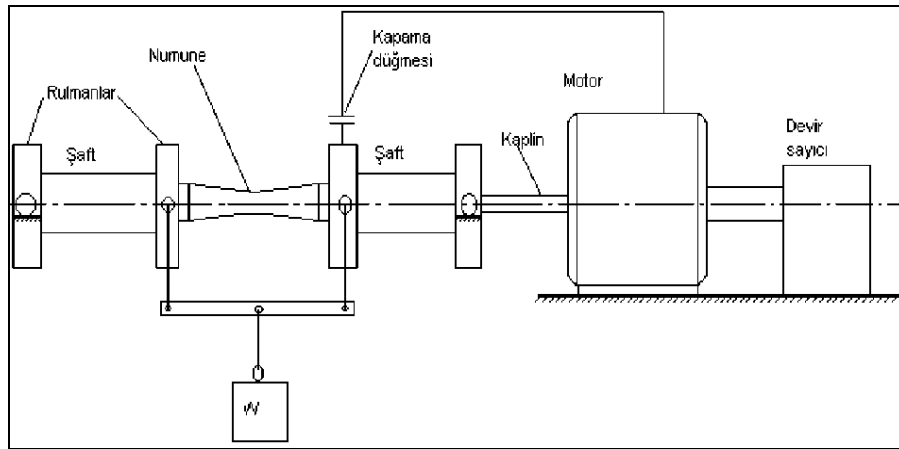
Kullanılan deney cihazlarında gerçek şartlar sağlansa bile uygulanan gerilmenin kontrol edilebilmesi ve sonucu gösterecek düzeneğin bulunması esas olmaktadır. Ayrıca bu cihazlarda bir sayaçla çevrim sayısının kaydedilmesi ve numune kırıldığı anda otomatik olarak deneyin sona erdirilebilmesi sağlanmıştır.

Günümüzde kullanılan yorulma deney makineleri çekme, çekme-basma, çevresel eğme, ileri-geri eğme ve burma yanında bileşik zorlamaları da mümkün kılmaktadır. Bu makinelerin deney frekansları, yapılarına bağlı olarak 500...15000 d/d (8...250 Hz) arasındadır (Tauscher 1983).

Yorulma deneylerinde kullanılmakta olan ve literatürde bahsedilmiş belli başlı Yorulma Deney Düzenekleri aşağıda belirtilmiştir:

1. Döner Mil Deneyi Düzeneği
2. Konsol Kiriş Titreşimi Deney Düzeneği
3. Tekrarlanan Eğilme (Repeated Bending) Deney Düzeneği
4. Dört Noktadan Eğilmeli Yorulma Deney Düzeneği
5. Sürtünme Yorulma Deney Düzeneği
6. Servo-Hidrolik Tek Eksenli Test Makinesi
7. Mekanik Osilatör

Bu deney düzeneklerinden en yaygın olarak kullanılanı Döner Mil Deneyi Düzenegidir (Şekil 2.19). Yorulma olayı ile sistematik ilgilenen R.R. Moore adıyla anılmaktadır. Bu düzenekle yapılan yorulma testleriyle yorulma özelliklerinin belirleneceği malzemeden standartlara göre imal edilmiş basit numuneler kullanılmaktadır. Bu numuneler Mil dönerken numuneler birbiri ardınca eşit genlikte çekme ve basma gerilmelerine maruz kalır (Kayalı vd 1978). Dönme sırasında ortalama gerilme sıfır değerindedir. Bu gerilme etrafında titreşen, değişen eğme gerilmeleri meydana gelir. Aynı malzemeden yapılmış ve aynı ön işlemlerden geçmiş birçok numune, gittikçe azalan gerilme genliği (σ_a) etkisinde kopmaya kadar muayene edilir ve kopma için gerekli yük tekrar sayısı tespit edilir. Devir sayısı 1000 d/d ile 10000 d/d arasındadır (1 devir=1 yük tekrarı). Sınır yük tekrar sayısı NG'ye erişen numuneler artık kopmazlar ve muayeneden çıkartılırlar (Onaran 1999).



Şekil 2.19. R. R. Moore döner mil yorulma makinesinin şematik gösterimi

2.9. Kırılma

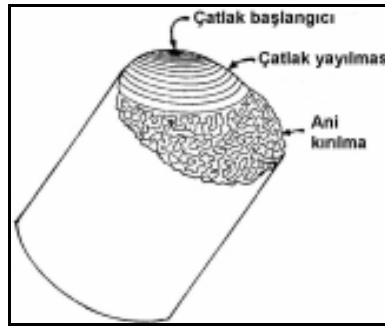
Cisimlerin içinde mevcut olan veya sonradan oluşan bir çatlakın, cisme uygulanan gerilmelerin etkisi altında, ilerleyerek cismi iki yâda daha fazla parçaya ayırmasına Kırılma denilmektedir. Kırılma sonucunda yeni yüzeyler oluşmaktadır. Kırılma genellikle uygulanan gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma olayı başlıca iki safhada gerçekleşir. Birinci safha çatlakın oluşumu ve ikinci safhada çatlakın

ilerlemesidir. Kırılmalar, malzemelerin kırılma öncesi durumuna ve kırılmaya sebep olan yükleme şartlarına bağlı olarak:

1. Sünek Kırılma,
2. Gevrek Kırılma,
3. Sürünme Kırılması,
4. Yorulma Kırılması şeklinde sınıflandırılabilir (Kayalı ve Çimenoğlu 1986).

Sünek kırılma çatlak ilerlemesi öncesinde ve sonrasında kayda değer bir plastik deformasyonla karakterize edilmektedir. Deformasyonun önemli bir kısmı kırılma yüzeyinde görülmektedir. Çatlak başlangıcını mikro-boşluklar oluşturur ve mikro boşlukların birleşmesi ile kırılma gerçekleşir. Gevrek kırılma ise düzgün yüzey ayrılması olarak tanımlanmaktadır (Dieter 1988).

Şekil 2.20 yorulma hasarına uğramış bir numunenin kırılma yüzeyini resmetmektedir. Bu tip bir hasarın ana bölümleri yorulma çatlak başlangıcı, çatlak yayılması ve çatlak boyu kritik bir değere ulaştığında yaşanan ani kırılma bölgesinden oluşur. Tipik olarak dinamik zorlanmada hasar, statik zorlanmada taşınabilecek gerilme değerlerinden çok daha düşük seviyelerde gerçekleşir (Meyers and Chawla 1999).



Şekil 2.20. Yorulma hasarına uğramış numunede kırılma yüzeyi çatlak başlangıcı, yayılma ve ani kırılma bölgeleri (Saatçı ve Tahralı 2003)

Bir malzemenin kırılma tarzı parça şekillendirilmesi ve servis şartları açısından önem arz etmektedir. Kırılma tarzı hakkındaki bilgilere kırılma yüzeyinin mikroskopik

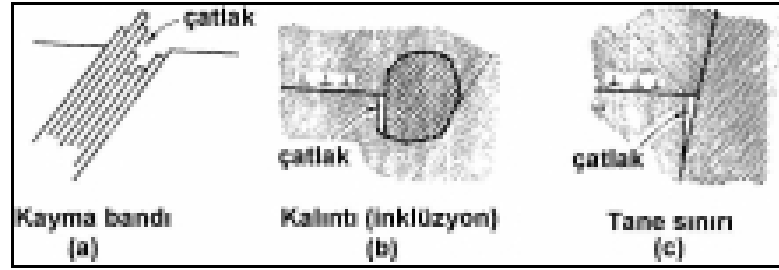
incelenmesi sonucunda ulaşılır. Bu amaçla optik mikroskop ve genellikle SEM kullanılır.

Kırılma tipleri ise; malzeme mikroskop altında incelendiğinde malzemeyi oluşturan bir tanenin kırılması, kristallografik düzlemler üzerinde veya kristalloğrafik düzlemleri kesen atomlar arası bağın kopması yani atomlar arası kohezyon kuvvetinin sıfıra inmesi sonunda olur. Malzemelerin kırılması makroskopik açıdan dört farklı Şekilde oluşur;

1. Klivaj Kırılması,
2. Kayma Kırılması,
3. Taneler Arası Kırılma,
4. Taneleri Keserek Kırılmadır.

2. 10.Yorulma-Kırılma İlişkisi

Yorulma hasarlarının tespiti çalışmalarında, parça içinde çatlağın zaten bulunduğu ve bu çatlağın parça işletmede kullanıldıkça büyüyeceği Şeklinde bir temel kabul vardır. Bir makine elemanında bir çatlağın bulunması dayanımı önemli derecede düşürür. Çatlak büyümesi dinamik yükleme nedeniyle oluşur ve buna yorulma çatlağı büyümesi davranışı denir. Yorulma atlağının yayılma olayı özel olarak lineer elastik kırılma mekaniği Şeklinde analiz edilebilir. Yorulma atlağının büyümesi çalışmaları, aynı zamanda değişken yükleme altında çalışan bir parçanın yorulma ömrünü çatlak büyümesi ile tayin etmek anlamına gelmektedir (Meyers and Chawla 1999). Çatlak yayılması ile ilgili çok az bilgi mevcuttur. Olayın izah edilmesi üç aşamalı bir teori geliştirerek yapılabilmiştir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Çatlak yayılması teorisi (Saatçı ve Tahralı 2003)

Birinci aşamasında birkaç çatlak yüzeyde çekirdeklenir ve yayılmaya başlar. İkinci aşamada yüzeydeki bir kayma bandında çatlakın oluşması, bir tane sınırına ulaşmaya kadar kayma bandı boyunca ilerler. Bu andan itibaren, gerilme eksenine dik yönde baskın bir çatlak yayılımı başlar. Son aşamada ise çatlak ucundaki gerilme birikimi bölgesel plastik deformasyona neden olur. Çatlak büyüdükçe plastik deformasyon artar ve numunenin kalınlığıyla karşılaştırılabilecek büyüklüğe gelir. Bu büyüklüğe erişildiğinde kırılma gerçekleşir (Saatçı ve Tahralı 2003).

2.11. Sertlik

Sertlik izafi bir ölçü olup sürtünmeye, çizilmeye, kesmeye ve plastik deformasyonlara karşı direnç olarak tarif edilir. Laboratuarlarda özel cihazlarla yapılan sertlik ölçümlerindeki değer, malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği dirençtir (Kayalı 1983).

Sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyleri oksitlerden, girinti ve çıkıntılardan arındırılmış olmalıdır. Vickers sertlik ölçme yöntemi, sertliği ölçülecek malzeme yüzeyine, tabanı kare olan piramit şeklindeki bir ucun belirli bir yük altında batırılması ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegenlerinin ölçülmesinden ibarettir. Bu yöntem, daha sert malzemelerin ölçümlerinde veya daha hassas ölçümler için tercih edilmektedir.

2.12. Yüzey Pürüzlülüğü

Pürüzlülük, metal yüzeylerde işlem yapan işleyici takımın, yüzeyin bir ucundan diğer ucuna gitmesiyle oluşan pek çok çizikli, düzensiz kısa dalga boyu uzunluklarıdır. Pürüzlerin uç noktasıyla çukurların alt noktası arasındaki düşey mesafe pürüzlülüğün ölçülebilecek sayısal değeridir. Bunlardan bazıları normal yönde olurken bazıları açılı çapraz yöndedir ve ölçme arasında dalga boyu uzunluğu açısından fark vardır. Yüklenmenin büyüklüğüne göre dalga boyu uzunlukları farklı olur ve dalgalanma meydana getirir.

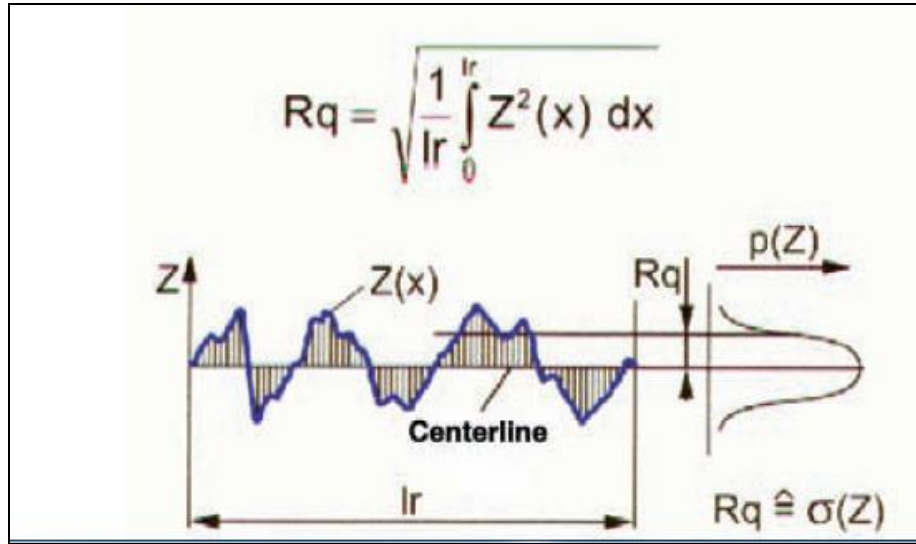
Yüzey kalitesi, mühendislik malzemelerinden üretilen makine parçalarının önemli bir kalite kriteridir. Yüzey pürüzlülüğü işlenmiş parçaların yüzey kalitesinin bir göstergesidir. Yüzey pürüzlülüğü, üretilen parçaların yüzey kalitelerinin geliştirilmesi ve belirlenmesinde, önemli bir rol oynar. Yüzey pürüzlülüğü temelde takım geometrisi (uç yarıçapı, kesme kenar geometrisi, boşluk açısı vs.) ve kesme şartları (ilerleme hızı, kesme hızı, talaş derinliği vs.) gibi işleme parametrelerinin sonucuna bağlıdır. Geliştirilmiş kalite veya iş parçası yüzey tamlığı daha uzun parça ömrü sağlamaktadır.

Ayrıca yüzey pürüzlülüğü, yorulma direnci, aşınma, ısı iletimi, sürtünme ve yağlama gibi ürünün kalitesinin artırılması için gerekli olan fonksiyonel karakteristik özellikleri etkilemektedir. Yüzey pürüzlülüğünün azalmasıyla yüzey kalitesi artmış olmaktadır.

İşlenmiş parça yüzeylerinin tribolojik özellikleri, yüzey dokusundan birinci derecede etkilenmektedir. Yüzey pürüzlülüğü sadece aşınma, sürtünme ve yağlama gibi tribolojinin geleneksel konularında değil aynı zamanda sızdırmazlık, hidrodinamik, elektrik, ısı iletimi vb. farklı alanlarda da dikkate alınması gereken önemli bir faktördür (Çoğun ve Özses 2002).

Yüzey pürüzlülüğünü kontrol etmeye bir sistem getirmek için bazı parametreler tanımlanmıştır. Bu parametrelerin hesaplanmasını izah edebilecek örnek grafik Şekil 2.22'de verilmiştir. En yüksek ve alçak değerlerin grafiğe dökülmesiyle elde edilen

Planimetri eğrisi kullanılarak pürüzlülüğün yatay ve düşey değişimleri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmakta ve elde edilen değerler kullanılarak (En yüksek ve en alçak noktaların ortalaması (Ra) aritmetik anlamda sapma hesaplanmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle tasarlanan Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazları pürüzlülük değeri doğrudan okuyabilmektedir. Yüzey İşleme Tezgâhlarında işleyici takımın ilerleme hızı ile yüzeye bastırma kuvvetinin büyüklüğü takım titreşimlerini etkilemektedir. Takım titreşimleri de imalatta son işlemede işlenen parçanın yüzey pürüzlülüğünde etkili olmaktadır. Bu konuda yapılan araştırmalarda işleyici takımdaki esneme miktarının tahmin edilerek, yüzey pürüzlülüğünün azaltılabileceği belirtilmiştir (Law and Geddam 2003).



Şekil 2.22. Pürüzlülük Parametrelerinin Hesaplanması (Örnek Grafik)

2.13. Taramalı Elektron Mikroskobu-Scanning Electron Microscope (SEM)

Taramalı Elektron mikroskobu (SEM), elektronları kullanarak örnek yüzeylerden yüksek çözünürlüklü görüntü alınmasını sağlayan sistemlerdir. Örnek yüzeyinin üç boyutlu görüntülerinin belirlenmesinde son derece kullanışlı bir yöntemdir. 1930 yılında Manfred Von Ardenne bu yöntemin bulunuşunda öncülük etmiştir. Charles Oatley SEM cihazını ilk olarak ticari hale getirmiştir.

Temel olarak Taramalı elektron mikroskobu, Tungsten, Lantan hekza borit katottan veya alan emisyonlu (FEG) gun'dan ortaya çıkan elektronların kullanımı incelenecek

malzeme yüzeyine gönderilmesi sonucu oluşan etkileşmelerden yararlanılması esasına dayanır. SEM'ler genel olarak bu elektron enerjisi 200-300 eV dan 100 keV a kadar değişebilir. Bu amaçla, yoğunlaştırıcı elektromanyetik mercekle (condenser lense) toplanan, objektif mercekle odaklanan elektron demeti, yine elektromanyetik sapıtıcı bobinlerle örnek yüzeyinde tarama işlemini (scanning) gerçekleştirir. Bir taramalı elektron mikroskopunda görüntü oluşumu temel olarak; elektron demetinin incelenen örneğin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşmelerin (elastik, elastik olmayan çarpışmalar ve diğerleri) sonucunda ortaya çıkan sinyallerin toplanması ve incelenmesi prensibine dayanır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Alüminyum bakır alaşımı olan AA2014 malzemeden imal edilmiş yorulma deney numuneleri, bu çalışma kapsamında tasarlanıp imal edilen derin haddeleme test cihazı kullanılarak farklı yüzey ezme basınçları altında mekanik yüzey işlemine tabi tutulmuştur. Söz konusu yüzey işleminin AA 2014 alaşımının yorulma özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Derin haddeleme işlemiyle mekanik yüzey işlemi uygulanmış numuneler için ayrıca, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, yüzey karakterizasyon işlemleri yapılarak, uygulanan işlem ile yorulma özelliklerinde meydana gelen değişiklikler ayrıntılı açıklanmaya çalışılmıştır.

3.1. Alüminyum Hakkında Genel Bilgi

Özgül ağırlığı $3,8 \text{ gr/cm}^3$ 'den küçük olan elemanlar hafif metaller grubu olarak sınıflandırılmaktadır. Hafif metal alaşımlarının çok iyi mekanik özelliklerinin olması, iyi dökülebilir olması, kolay işlenebilirliği, geri dönüşümünün kolay ve uygulanabilir olması nedeniyle son yıllarda otomobil, uzay ve elektronik endüstrisinde kullanımı büyük ölçüde artmıştır. Hafif metaller sınıfında alüminyum, magnezyum, potasyum, lityum ve berilyum bulunur. Bunlardan özellikle alüminyum ve magnezyum en önemlileridir. Özgül ağırlığı $2,7 \text{ gr/cm}^3$ olan Alüminyum hafif metaller grubuna girmektedir. Alüminyumun görünümü, hafifliği, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, yüksek korozyon direnciyle atmosferik olaylara dayanıklılığı, imal ve şekillendirilebilme kolaylığı ve diğer metaller ile yüksek çekme mukavemetine sahip alaşımlar oluşturabilmesi kendisini endüstriyel açıdan önemli kılmaktadır. Teknoloji ve endüstrinin gelişimiyle beraber her geçen gün teknik özelliklerindeki birçok üstünlükten dolayı alüminyumun, dünyada ve ülkemizde giderek kullanımı artmaktadır. Diğer metallerin yapısına ilave edilmesi ile alaşımlandırıldığı zaman, yoğunluğunun çok az artmasına karşılık mekanik dayanımında önemli oranlarda artışlar meydana gelmektedir. Kopma mukavemeti 600 MPa mertebelerine kadar çıkmaktadır. Genel olarak yüksek sıcaklıklar için çok uygun olmayan bazı alüminyum alaşımları 300°C 'ye varan sıcaklıklara kadar rahatlıkla kullanılabilir.

Alüminyumun mühendislik uygulamalarında kullanımı tercih edilen çok önemli özellikleri vardır. Alüminyumun; hava, su, tuzlu su ve petrokimyasallar da dahil olmak üzere ve pek çok kimyasal madde ortamında yüksek korozyon dayanımı vardır (Craig and Anderson 1995). Saf haldeki alüminyum yumuşak ve elastiktir. Alüminyumun kötü olan özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla alüminyum alaşımları geliştirilmiştir. En genel alaşım elementleri bakır, silisyum, çinko, mangan ve magnezyumdur. İlave edilen diğer elementler (krom, zirkonyum, vanadyum vb.) ince tane yapısı, yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı, ana safsızlık elementlerine karşı blok etkisi sağlamak gibi yapısal özellikleri sağlamak amacıyla kullanılırlar (Çetin 2005).

Düşük sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruması alüminyumun bir başka üstün özelliğidir. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının kaynak özellikleri iyi olmamakla beraber az sayıda da olsa kaynak yapılabilen yüksek mukavemetli alüminyum alaşımı bulunmaktadır.

Otomobil üreticileri, otomotiv endüstrisinde güvenlikten ödün vermeden, konfordan vazgeçmeden, büyük ve az yakıt tüketen otomobiller için hafif fakat mukavemeti yüksek malzemeleri geliştirmek üzere sürekli araştırma yapmışlardır. Çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak özellikle alüminyum esaslı metalik köpükler son yıllarda oldukça ilgilerini çekmiştir (Yavuz vd 2009).

Alüminyum, demirden sonra en fazla kullanılan metal olmasına rağmen tarihçesi çok yenidir. 1886 yılında, Fransa'da Paul Heroult ve Amerika Birleşik Devletleri'nde Charles Martin Hall birbirlerinden habersiz olarak ekonomik metotla üretimini başarmışlardır. Alüminyum 100 yıl içerisinde, kendisinden binlerce yıl öncesinden beri bilinen, demir ve bakır gibi metallerin kullanılma hızından çok daha büyük bir kullanılma hızı ile demir-çelik dışında en çok üretilen metal olmuştur (Salman ve Yüce 1997; Eruslu 1990). Alüminyum kullanımının bu denli büyük bir hızla yayılmasının nedenleri olarak, demir ve bakırdan üç kat daha hafif olması, ağırlık oranları dikkate alındığında bakıra nazaran daha iletken olmasıdır (Salman ve Yüce 1997).

Alaşımlandırma ile korozyona karşı dirençli, yüksek mukavemetli ve iyi işlenebilme ve biçimlendirilme kabiliyeti olan alaşımlar geliştirilmiştir (Salman ve Yüce 1997; Yılmaz ve şen 1996). Günümüzde alüminyum ve alaşımları; mimari amaçla yapı endüstrisi, elektrik motor gövdeleri, gemi güvertelerindeki bazı elemanlarda, dizel piston malzemeleri gibi taşıt araçlarının birçok parçalarında kullanılmaktadır. Ayrıca uçak ve uzay araçları, boya pigmentleri, mutfak eşyaları ve ambalaj malzemeleri gibi değişik kullanım alanları da vardır (Salman ve Yüce 1997; Kurt 1998).

Alüminyum dövme (işlenik) alaşımları için Amerikan Standartlar Birliği (ASA) tarafından belirlenen simgeleme dizisi kullanılmaktadır. Bu dizi dünyada en yaygın olarak kullanılan simgeleme dizisidir. Bu simgeleme Amerikan Alüminyum Birliği tarafından daha önceden kullanılmıştı. 1957 yılından itibaren standart haline getirilmiştir (Smith 2001). Bu simgeleme dizisine göre; dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı alüminyum alaşımının içerdiği temel alaşım elementini belirtmektedir. Alaşımlar aşağıda kısaca tarif edilmiştir:

1. 1xxx serisi alaşımlar minimum %99,0 alüminyum, empürite olarak da silisyum ve demir içerirler.
2. 2xxx serisi alaşımlarının birçoğuna bakırın yanında magnezyum ve düşük miktarda diğer elementler eklenir. 2xxx serisi alaşımları birim ağırlık dayanımının yüksek olması gereken uçak sanayi gibi alanlarda kullanılır. Bu alaşımlar katı eriyik mukavemetlenmesi ve çökelti sertleşmesiyle dayanım kazanırlar. Endüstriyel uygulama alanı bulabilmiş en önemli alaşım 2024 alaşımıdır. 2024-T6 alaşımı %4,5 bakır, %1,5 magnezyum ve %0,6 mangan bulundurur ve çekme dayanımı 442 MPa dır. Alüminyumda alaşım elementi olarak kullanılan en eski element olan bakır %3-12 oranında kullanılır. Alaşımlara sertlik kazandıran başlıca elementtir. Dövme alaşımlarında %3-5 arasında kullanılır (Turbalıoğlu, 2008). Sunulan çalışmada kullanılan numuneler de alüminyumun bu alaşımından imal edilmiştir.
3. 3xxx serisi alaşımlarının en önemli alaşımı 3003 tür. Bu alaşım 1100 alaşımına %1,25 mangan ilavesi ile oluşturulur.
4. 5xxx serisi alaşımlarının ana alaşım elementi olan magnezyum katı eriyik mukavemetlenmesi sağlar ve miktarı %5'e kadar çıkabilir.



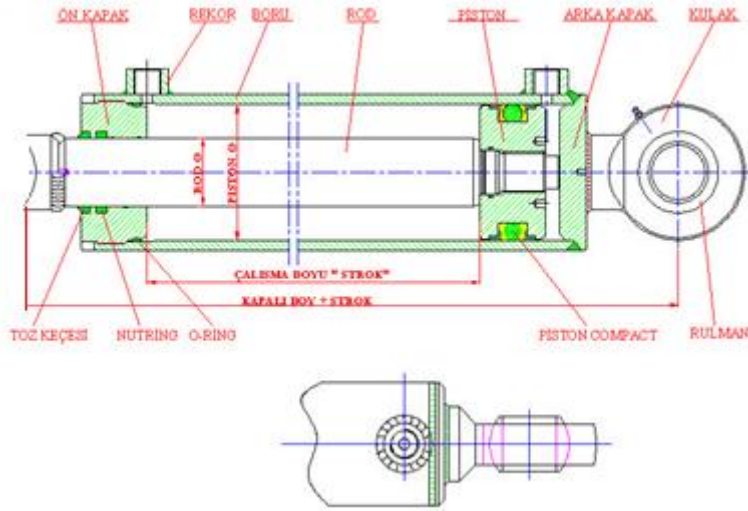
Şekil 3.2. Derin haddeleme deney düzeneğinin fotoğraf gösterimi

Numuneler üzerine stabil bir kuvvet uygulamak amacıyla sistemdeki ezici tungsten karbür ucun bağlandığı piston, hidrolik sistem ile oluşturulan yüksek basınçlı hidrolik yağ ile beslenmiştir. Hidrolik sistemi oluşturan temel elemanlar:

- Hidrolik Yağ Deposu,
- Hidrolik Pompa,
- Pompaya hareket veren elektrik motoru,
- Hidrolik yönlendirici valf ve kumanda anahtarı,
- Hidrolik akışkan hortumları,
- Hidrolik piston

Hidrolik Sistemler Pascal kanunu'ndan faydalanılarak geliştirilmiştir. Fransız Filozof ve Matematikçi Blaise Pascal adıyla anılan Pascal kanunu;

Kapalı bir kap içerisindeki sıvı yüzeyinin herhangi bir yerine uygulanan basınç, uzaklık, şekil ve hacimden bağımsız olarak her yüzeye aynı derecede ve dik açıyla iletilir. (Özcan 1982). Şekil 3.3'te hidrolik silindiri meydana getiren ana parçaları gösterilmektedir. Hidrolik Silindir ıslah çeliğinden imal edilmiş olup, rot ve piston mekanizması, bunların hareketine kılavuzluk eden kovan, bağlantıyı sağlayan kapaklar, uygun pozisyonda yerleştirilmiş sızdırmazlık elemanları, rot başı ve kovan başı gibi ana elemanlardan oluşmaktadır.

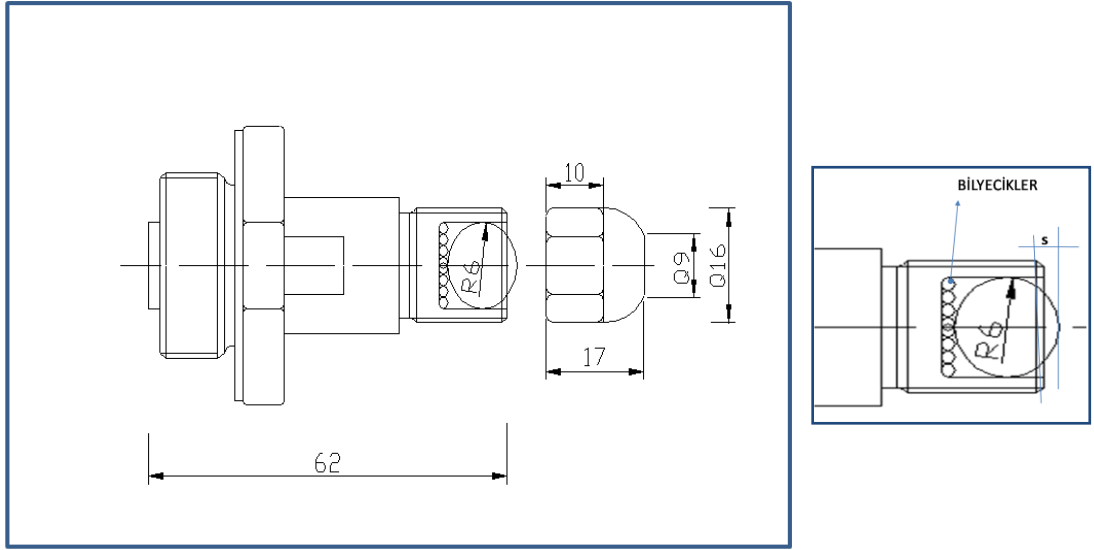


Şekil 3.3. Hidrolik Silindir

Mekanik yüzey işleme uygulanacak yorulma numuneleri, SN 50 NC Tipi Tezsan Marka tornanın ayna ve punta arasına bağlanarak, ayna hızı 2000 devir/dakika olacak şekilde döndürülmektedir. Tungsten karbürden imal edilmiş ezici küre bilyayı taşıyan bilya tutucu elemanın (adaptör) bağlı olduğu hidrolik piston ise torna tezgâhı üzerindeki kalemlige dönen deney numunelerine dik pozisyonda konumlandırılarak, sıkma vidası sabitlenmiştir.

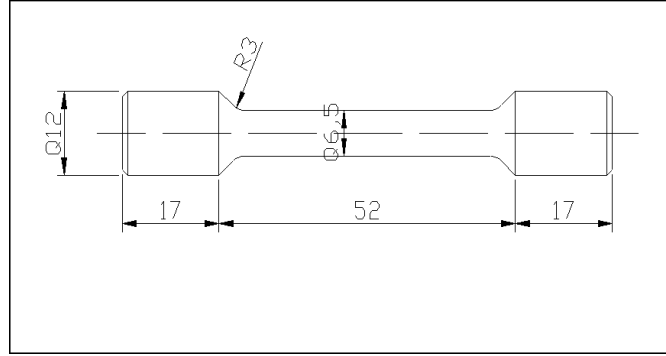
Pistonun numune üzerine uygulayacağı ezme basıncının okunabilmesi için hidrolik devreye bir manometre yerleştirilmiştir. Uygulanan basıncın istenilen değerde tutulabilmesi için de devreye basınç denetleyici valf konulmuştur. Torna miline bağlanan numuneler 2000 devir/dakika hızda dönerken, hidrolik pistonun ucuna bir adaptörle yerleştirilen sert bilye, numune üzerinde eksen doğrultusunda ilerleyerek yüzey mekanik olarak işlenmiştir. İlk önce özel bir nitelik aranmadan piyasadan temin edilen bilyeler kullanılmış, işlem sonucunda bilyenin aşırı derecede ısındığı, çalışma tamamlanmadan aşındığı ve numunenin işlem yüzeyinde düzensiz izler oluştuğu, aşırı deformasyon meydana geldiği gözlenmiştir. Burada malzeme yüzey işleme takımlarının aşınmaya dirençli, sert ve işleme esnasında iş parçası ve işleme takımının etkileşimini engellemek için kimyasal olarak kararlı bir yapıda olması gerektiği açığa çıkmaktadır. Daha sonra Tungsten-Karbür esaslı bilye temin edilerek denemeler tekrarlanmıştır (Şekil 3.4). Bilyenin pistonla bağlandığı adaptördeki bilyenin çıkıntısı (Şekil 3.4'de 's' ile

gösterilen) yapılan değişik denemelerle 3 mm. olarak ayarlanmıştır. Bu değerden az olması durumunda kapak parçası istenmediği halde tornalandı. Fazla olması halinde de numuneler deneme tamamlanmadan kırıldı. İşlem sırasında işleyici bilyenin yuvasında sürekli dönmesini sağlamak üzere tabanına küçük bilyecikler yerleştirildi. Yüzey işleyici olarak kullanılan Tungsten karbür bilyeler bileşiminde %94 Tungsten karbit, %6 Kobalt ihtiva etmektedir. Aşınma ve darbe dayanımı oldukça yüksektir.



Şekil 3.4. Hidrolik Pistona Monte Edilen Tungsten-Karbür Bilyeli Ezici Uç

Deneysel çalışmalar için, AA2014 alaşımı malzemedен, Şekil 3.5’de görülen şekil ve boyutlarda hazırlanmış yorulma deney numuneleri kullanılmıştır. Alüminyum alaşımları genel olarak yoğunluğu düşük olmasına rağmen, ağırlığı ve mukavemeti dikkate alındığında diğer birçok metal alaşımına göre üstün özellikleri sebebiyle günümüz endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. AA2014 alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir. Yorulma deney numunelerine, su zımparası kullanılarak mekanik yüzey parlatma işlemi uygulanmıştır. Numune yüzeyleri asetonla silinip temizlendikten sonra derin haddeleme işlemine hazır hale getirilmiştir. Numuneler daha önceki bölümlerde detayı verilen deney düzeneği ile derin haddeleme işlemine tabi tutulmuştur.



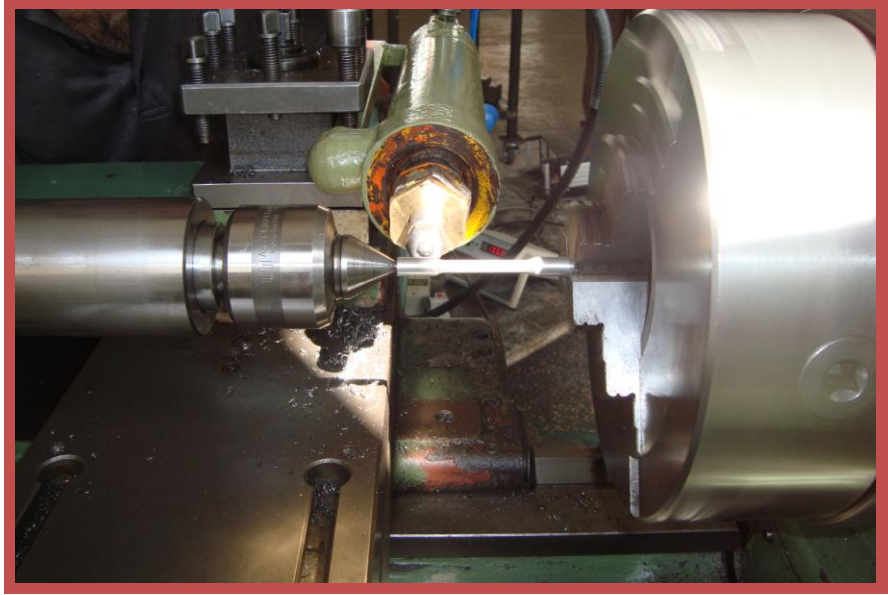
Şekil 3.5. AA2014 Alüminyum Alaşımı Yorulma Numunesinin Şekli ve Boyutları

Çizelge 3.1. AA2014 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi (% Ağırlık)

	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Sn
% Ağırlık	4,4	0,68	0,58	0,83	0,24	0,04	0,03

Farklı yüzey ezme basınçlarının yorulma özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için yorulma numuneleri iki farklı grup olarak 50 ve 75 bar basınçlarda derin haddelenmiştir.

Deneyle sırasında tornanın aşırı düşük devirle çalışması durumunda kullanılan numunelerin üzerinden talaş kalktığı, aşırı devirle çalışması durumunda ise numunelerin erken kırıldığı görülmüştür. Bu iki olumsuzluğun, torna devir hızının 2000 devir/dakika olarak seçilmesi durumunda ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. Numunelere pistonla hidrolik basınç uygulanırken kalemlik otomatik ilerleme pozisyonuna getirilerek çok düşük bir hızda hareket ettirilerek, numune yüzeyi bir uçtan diğer uca bilya teması ile seçilen basınç değerleri altında ezilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Hidrolik Pistonla Numuneler Üzerine Ezme Basıncı Uygulanması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Pürüzlülük ve Sertlik Değerinin Ölçülmesi

Deney numunelerinin mekanik yüzey işlemleri öncesi ve sonrasındaki yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 4.1’de gösterilen profilometre ile ölçülmüştür. Yüzey işlem durumuna göre AA2014 alüminyum numunelerin sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Mitutoyo SJ. 400 tipi yüzey profilometre cihazı

Bu çalışmada, "Vickers" sertlik ölçüme yöntemi kullanılmış ve TS 207 de belirtilen esaslar uygulanmıştır (TSE 1973). Dört farklı kesit şekli üzerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Çizelge değerleri incelenmesiyle, referans durum olarak kabul edilen işlem görmemiş malzeme durumu ile karşılaştırıldığında, sertlik değerinin arttığı görülmektedir.

Yüzey sertliğinin, yüzey ezme basıncından önemli oranda etkilendiği açıktır. Yüzey ezme basıncı artınca, yüzey sertliği de artmaktadır. Diğer taraftan, referans durum olarak kabul edilen işlem görmemiş malzeme ile karşılaştırıldığında, yüzey pürüzlülüğünün işleme bağlı olarak azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.1. Yüzey İşlem Durumuna göre AA2014 Alüminyum Numunelerin Sertlik ve Yüzey Pürüzlülük Değerleri

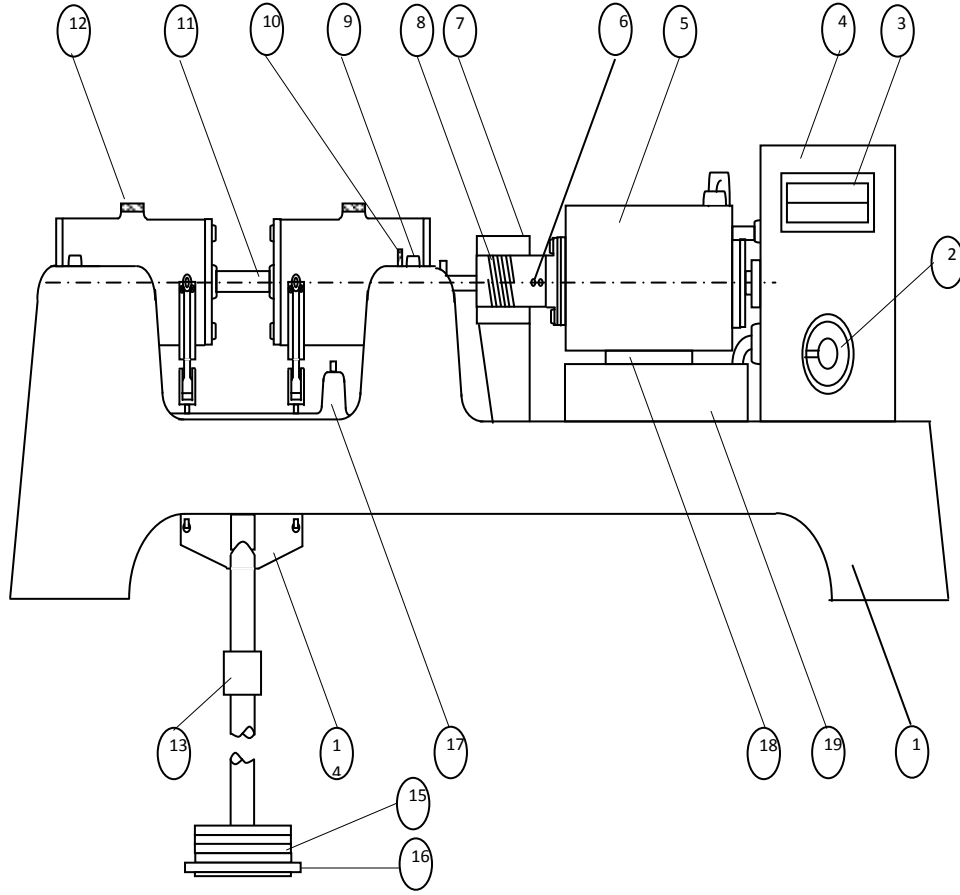
İşlem Durumu	Sertlik (HV)	Yüzey Pürüzlülük Değeri R_a (μm)
İşlemsiz	144	1,194
50 Bar Yüzey İşlemi Uygulanmış	221	1,156
75 Bar Yüzey İşlemi Uygulanmış	361	0,968

Yüzey pürüzlülüğü, yüzey basıncındaki artışa bağlı olarak azalmaktadır.

4.2.Yorulma Deneyleri ve Sonuçları

Bu çalışmada, işlemsiz ve mekanik yüzey işlemi uygulanmış silindirik numuneler için döner eğilmeli yorulma deneyleri, R.R. Moore yorulma test makinesinde ($R=-1$) gerçekleştirilmiştir. Döner eğilmeli yorulma test ünitesinin genel olarak şematik görünümü Şekil 4.2’de, fotoğraf görüntüsü ise Şekil 4.3’te verilmektedir.

Yataklar, yük uygulandığında düşey düzlemde çökmelerini sağlayacak muylular üzerinde tutulur. Her bir yatağın zıt kenarlarına bağlanmış olan bağlantı ayağına, yük ağırlıklarının konulduğu boyunduruk askısı ile asılır. Yük ağırlık askısı, üzerinde yığılmış halde bulunan ve tam olarak ayarlanabilen ağırlıklardan ibarettir.



Şekil 4.2. Döner Eğilmeli Yorulma Test Ünitesinin Genel Görünümünün Şematik Resmi

1. Taşıma gövdesi
2. Potansiyometre
3. Motor dönme hızı göstergesi
4. Kumanda panosu
5. Motor
6. Sinyal verme pimi
7. Kaplin koruyucu
8. Kaplin
9. Mesnet tekeri
10. Mesnet
11. Numune
12. Yağlama civatası

13. Ağırlık kancası
14. Zincir-kanca bağlantısı
15. Ağırlıklar
16. Ağırlık taşıyıcı tablası
17. Durdurma tertibatı
18. Tespit civatası
19. Motor tespit plakası

Gerilme çevrim sayısı, motorun arka kısmına bağlanmış dijital bir sayaçta gösterilir. Bu sayaç, numunenin her bin devrinde bir kayıt yapar. Bu yüzden gerilmenin çevrim sayısını elde etmek için sayaçtan okunan değer bin ile çarpılır. Makineye, numune kırıldığı zaman motoru hemen durduracak anahtar monte edilmiştir.

Numune uzunluğu boyunca üniform bir eğilme momentine maruz kalır. Standart yorulma test makinelerinde bu eğilme momenti, en küçük 2,4525 N.m (25 kg.cm)'den en büyük 22.563 N.m (230 kg.cm)'ye 0,02492 N.m (0.254 kg.cm)'lik artışlar ile değiştirilebilir.

Standart makine 120 Voltluk AA veya DA güç kaynağından beslenen üniversal bir motor tarafından çalıştırılır. Normal hız 10.000 dev/dak olmasına rağmen hız 1000 ile 12000 dev/dak arasında istenilen bir devire, bir kumanda düğmesi yardımıyla ayarlanabilir. Bu çalışmada, deneyler 4000- 5000 dev/dak'da yapılmıştır.

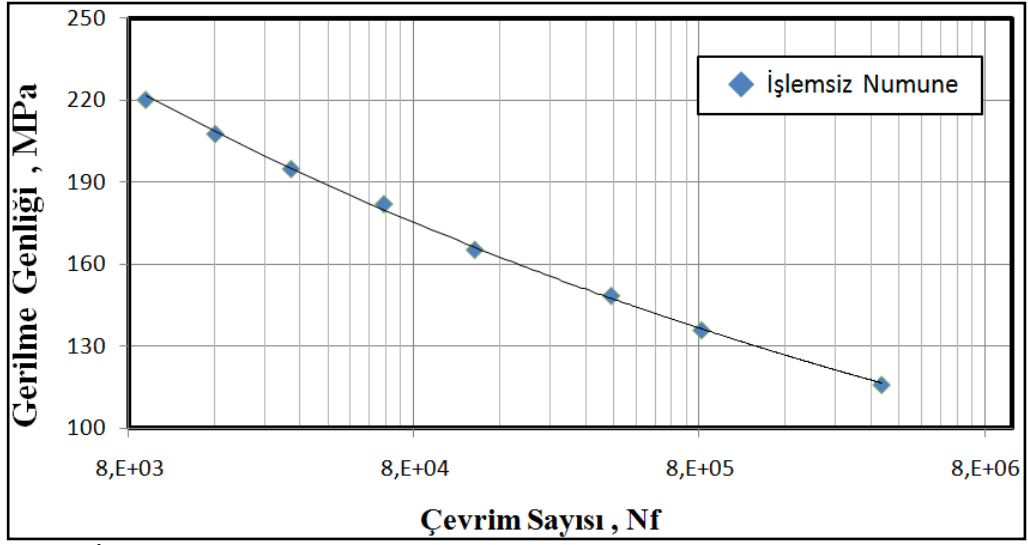


Şekil 4.3. Döner Eğilmeli Yorulma Test Ünitesinin Fotoğrafi

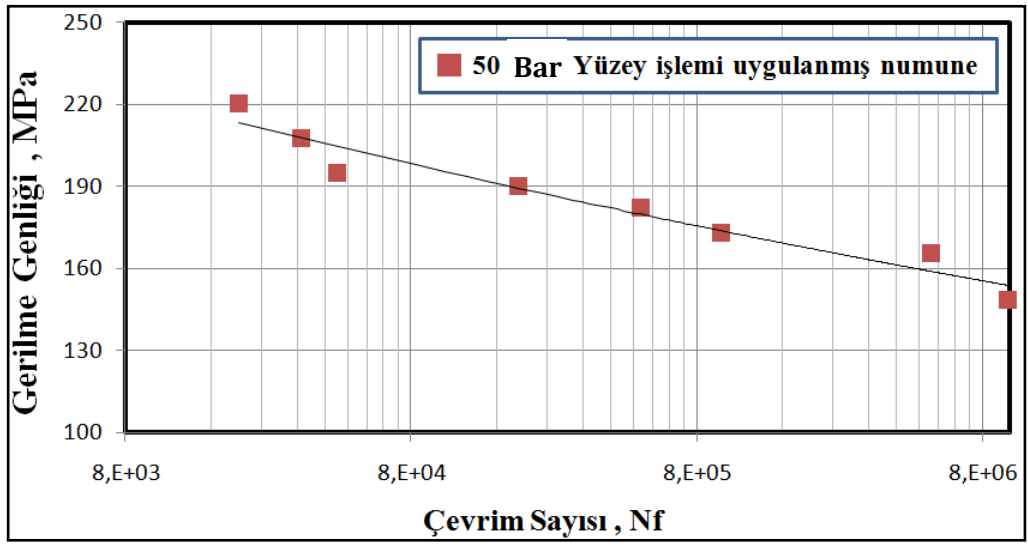
Daha sonraki adımlarda bu numuneler üzerinde oda sıcaklığında Amerikan Satec yapımı olan dört noktadan yüklemeli döner eğilmeli R.R. Moore Yorulma test cihazında ($R = -1$) yorulma testleri gerçekleştirilmiş, numunelerin yorulma dayanımı seviyeleri tespit edilerek sonuçlar irdelenmiştir.

4.3. AA2014 Alüminyum Alaşımli deney numuneleri için elde edilen yorulma S-N (Wöhler) Eğrileri

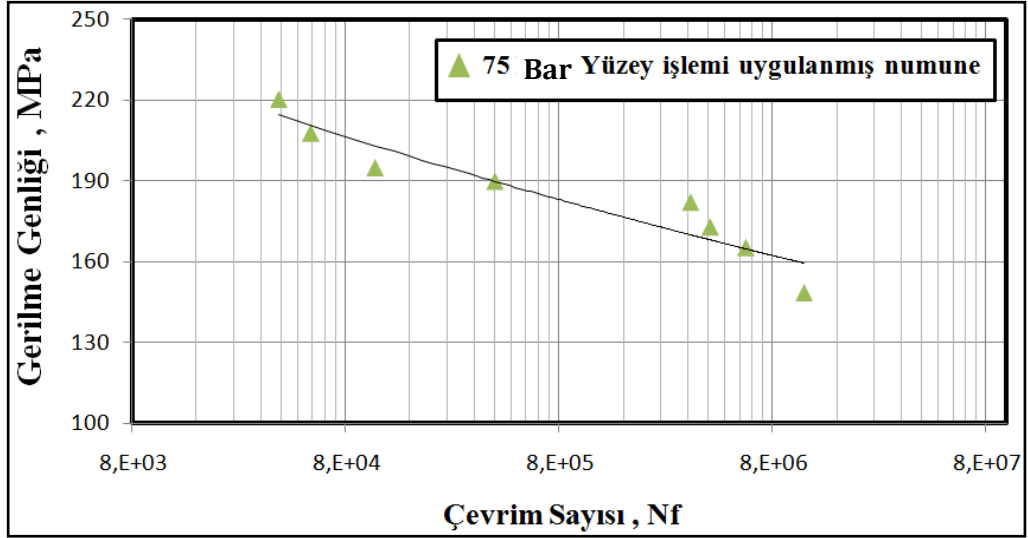
AA2014 Alüminyum alaşımli deney numuneleri için elde edilen yorulma S-N (Wöhler) eğrileri Şekil 4.4 - Şekil 4.6'da verilmiştir.



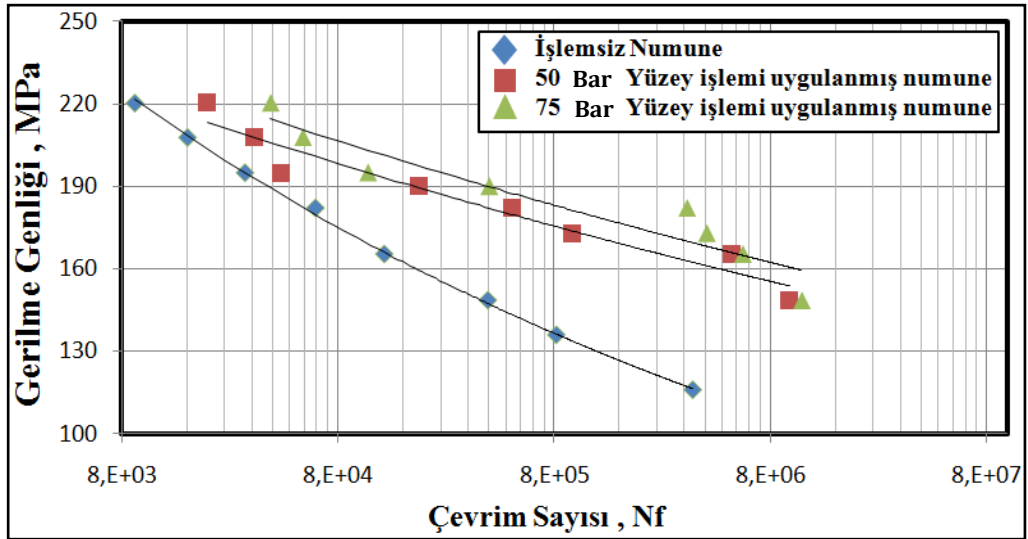
Şekil 4.4. İşlemsiz Numuneler için S-N (Wöhler) Eğrisi



Şekil 4.5. 50 Bar Basınçla İşlem Gören Numuneler için S-N (Wöhler) Eğrisi



Şekil 4.6. 75 Bar Basınçla İşlem Gören Numuneler için S-N (Wöhler) Eğrisi



Şekil 4.7. Tüm Numuneler için S-N (Wöhler) Eğrileri (Karşılaştırma İçin)

Üç farklı çalışma koşulu için, S-N eğrisi Şekil 4.7' de verilmiştir. Uygulanan mekanik yüzey işleminin, AA2014 Alüminyum alaşımının yorulma özelliklerini uygulanan ezme basıncına bağlı olarak, ciddi oranda iyileştirdiği gözükmektedir. Demir dışı malzemelerde çeliklerde olduğu gibi S-N eğrisi yatay bir asimtot ihtiva etmediğinden, belirli bir çevrim sayısına karşılık gelen gerilme genliği yorulma dayanımı olarak alınır. Şekil 4.7 incelendiğinde işlem uygulanmamış referans koşulda AA 2014 alüminyum alaşımının yorulma dayanımının 8.10^6 çevrim sayısı için yaklaşık olarak 110 MPa dır.

Aynı çevrim sayısı için 50 MPa ezme basıncında işlem görmüş numunelerde yorulma dayanımının yaklaşık olarak 155 MPa, 75 MPa için ise 165 MPa olduğu gözükmektedir. Bu sonuçlar, mekanik yüzey işleminin yorulma dayanımında ciddi bir gelişme sağlandığı açıktır. 50 ve 75 MPa için yorulma dayanımları göz önüne alındığında, yüksek ezme basıncında yorulma dayanımındaki artışın diğerine göre biraz daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu mekanik yüzey işleminin sadece yorulma dayanımını değil, bir bütün olarak yorulma ömrünü de iyileştirdiği açıktır. Yorulma ömründeki bu iyileşmeler iki ezme basıncı için yüksek ömür belgelerinde daha belirgindir.

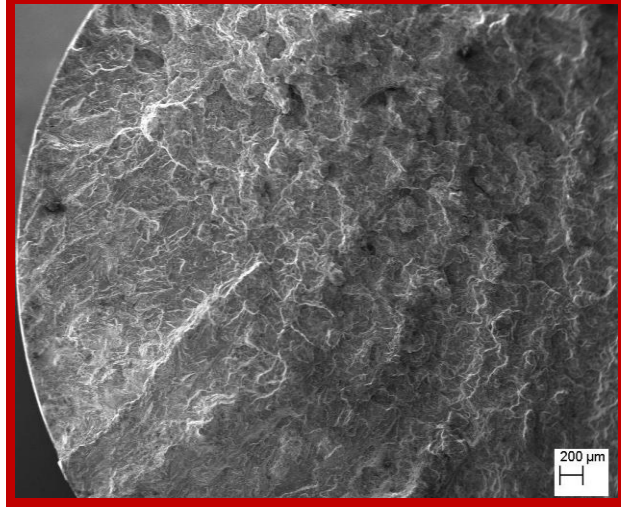
Derin haddelme işlemiyle yapılan yüzey işlemlerinden malzeme yüzeyinde pürüzlerin pik noktalarında plastik deformasyon meydana geldiği, akıcı malzemenin sürüklenerek çukurlara dolduğu, bunun sonucunda yorulma dayanımında iyileşme olduğu tahmin edilmektedir. Basınçlı uygulamalarla malzemenin akma sınırının üstünde ve altında değerlerde değişken basınca maruz kaldığı, meydana gelen deformasyonun değişken şekilde elastik-plastik deformasyon olarak gerçekleştiği, gerilme genliğinde kararsız bir değişikliğin gerçekleştiği şeklinde bir yorumla bu durum açıklanabilir.

4.4. Kırılan Yüzeylerden Alınan SEM Görüntüleri

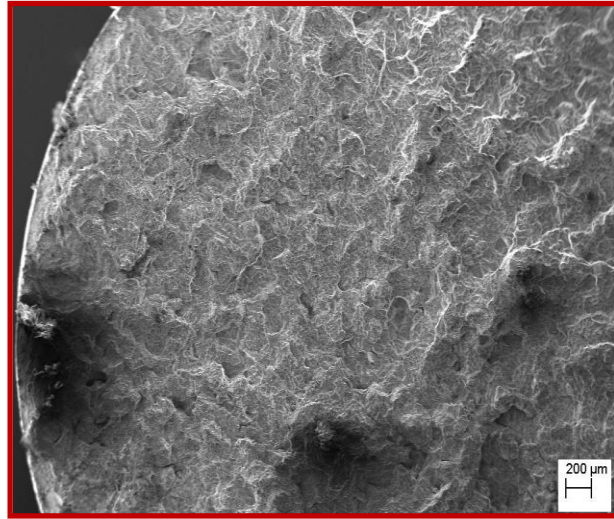
Yorulma deneyleri AA2014 alaşımından imal edilen numunelerle oda sıcaklığında yapılmış, numuneler dinamik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Numunelerin kırılan yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 4.8 - Şekil 4.10'te verilmiştir.

Şekillerde görülen yüzeyin incelenmesinden belli bölgelerde çukurcukların (dimples) oluştuğu görülmektedir. Çukur bölgelerinde başlayan çatlamanın ilerlemesiyle taneler arası ayrışma başlamış olmaktadır. Çukurlaşma numune üzerinde çentik etkisi yaparak geri kalan dolu kesit normal yükü taşıyamaz hale gelince gevrek tarzda ani kırılma meydana gelmektedir. Metallerin kristal yapıda oldukları bilinmektedir. Çukur bölgesi dışında kalan yüzeyin genelde pürüzlü olduğu, yüzey alanında düzensiz şekilde parlak renkte izlerin yayıldığı görülmektedir. Parlak izlerin AA2014 alaşımının bünyesinde

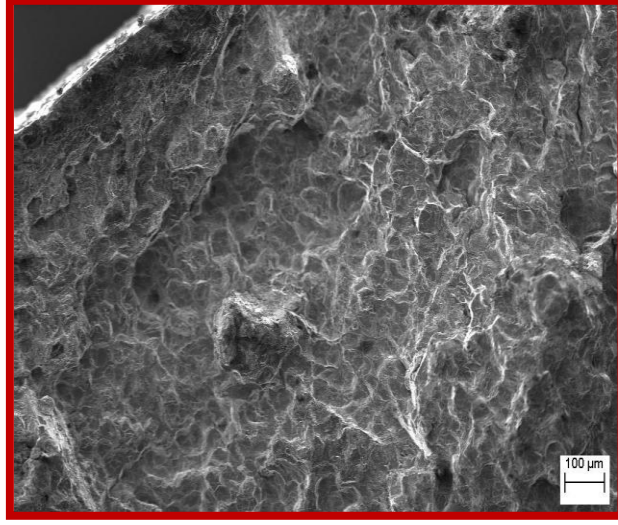
bulunan bakırdan, pürüzlülüğün ise alüminyumun kendisinden kaynaklandığı ve lifli bir kırılma sergilediği (Fibrous Fracture) söylenebilir.



Şekil 4.8. İşlemsiz Numune için SEM görüntüsü [$\sigma=129,2$ MPa ve $N_f=1070 \times 10^3$]



Şekil 4.9. 50 Bar Yüzey İşlemi Uygulanmış Numune için SEM görüntüsü [$\sigma=129,2$ MPa ve $N_f=150 \times 10^3$]



Şekil 4.10. 75 Bar Yüzey İşlemi Uygulanmış Numune için SEM görüntüsü [$\sigma=165,4\text{Mpa}$ ve $N_f=3921 \times 10^3$]

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tarafımızdan tasarlanıp imal edilen derin haddeleme cihazı kullanılarak farklı yüzey ezme basınçlarının, AA2014 Alüminyum alaşımının yorulma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir;

1. Derin haddeleme işlemi ile yüzey pürüzlülüğü seçilen yüzey ezme basıncına bağlı olarak azalmaktadır.
2. Malzeme yüzeyinde deformasyon sertleşmesi olduğundan, buna bağlı olarak yüzey sertliğinde seçilen işlem basıncına bağlı olarak artışlar elde edilmiştir.
3. Sertlik ve yüzey pürüzlülüğü yorulmayı etkileyen en önemli parametrelerdir. Bunlardaki gelişmeler AA 2014 alüminyum alaşımının yorulma özelliklerinin iyileşmesine neden olmuştur.
4. SEM görüntülerinin izlenmesiyle malzeme yüzeyinde meydana gelen gerilmelerle çatlak ilerleme hızı üzerinde etkili olmuştur.

Derin haddeleme mekanik yüzey optimizasyonu ve yorulma dayanımı geliştirmesinde etkisi büyük olan bir uygulamadır. Esasen iyi bilinen mekanik ve metalurjik etkileri, yapılan araştırmalarla hem karmaşık hem de yaygın uygulamalar elde edilmek üzere sürekli geliştirilmiş ve diğer yüzey işlemleri ile birleştirilmiştir. Klasik olarak yorulma mukavemetinin geliştirilmesinden korozyon geriliminin azaltmasına kadar aralığı aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi ve parçalara yüksek işlevsellik kazandırmak için yüzeylere son şeklinin verilmesi gibi faydaları da olmaktadır. Derin haddelemeyle üretilen ürünlerin yapısal parçaları daha kısa sürede üretilerek daha ekonomik olmakta ve ağırlık yönüyle hafif tasarımlarının yayılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Acır, A., 2003. Talaş kaldırma işlemlerinde yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörlerin incelenmesi” TMMOB Konya Şubesi II. Makine Tasarım ve İmalat Kongresi. Konya.
- Akkurt, M., Kent M., 1984. Makine Elemanları. Birsen Kitapevi Yayınlar, 453-460, İstanbul.
- Akkurt, A., Ovalı, İ., 2009. Ezme ve Geleneksel Bitirme İşlemlerinin Al 6061 Alüminyum alaşımı Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü ve Daireselliği Üzerine Etkisi.
- Altenberger, I., Scholtes B., Martin U. and Oettel H., 1999. Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304, Materials Science and Engineering A, Volume 264, Issues 1-2, Pages 1-16.
- Altenberger, I., 2006. Deep Rolling - the Past, the Present and the Future; University of Kassel, Institute of Materials Engineering, Mönchebergstrasse 3, 34125 Kassel, Germany.
- Anantha Ram, B.L., Krishnamurthy R., 1978. Surface integrity studies in burnishing, in: Proceedings of the 8th AIMTDR Conference I.I.T., Bombay, pp.487-490.
- Aran Ahmet, 2008. Malzeme Bilgisi Ders Notları, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.
- ASTM Handbook, 1997. V.19 Fatigue and Fracture.
- Bargel, J., Schulze G., 1987. Malzeme Bilgisi, Cilt I, (Çevirenler; Güleç, Ş., Aran, A.), Tübitak, Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, MBEAE Matbaası, 190 s., Gebze.
- Başaran, A., 2003. Toz Metalürjisi Parçalara Uygulanan Mekanik Yüzey İşlemlerinden Bilyeli Dövme, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Seminer Notu, Isparta.
- Bülbül, F., 2007. Sıcaklık Destekli Kimyasal (termokimyasal) Yüzey İşlemleri, Deneme Dersi, Atatürk Üniv., Mühendislik Fak., Erzurum.
- Craig D.B., Anderson D.S (ed. by), 1995. Handbook of Corrosion Data, A.S.M International, page 16-18.
- Çarboğa, C., 2002. Ç1010 Yapı Çeliğinde Soğuk Çekme İle Sağlanan Deformasyonun Malzemenin Yorulma Davranışına Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çetin, H., 2005. Alüminyum Alaşımı Hafif Metal Levhaların Prizmatik Derin Çekmede Biçimlendirilebilirlik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

- Çoğun, C., Özses B., 2002. Bilgisayar Sayısal Denetimli Takım Tazgahlarında Değişik İşleme Koşullarının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 17(1), 59 – 75, Ankara.
- Dieter, G.E., 1988. Mechanical Metallurgy, Mc Graw Hill.
- Dowling, N. E., 1999. Mechanical Behaviour of Materials, Prentice Hall, 2. Edition, ABD.
- Ecoroll, 2006. Tools & Solutions for Metal Surface Improvement.
- El-Axir, M.H., 2000. An investigation into roller burnishing, Int. J. Mach. Tool Manuf., 40, 1603-1617.
- El-Tayeb, N.S.M., Low K.O., Brevern P.V., 2006. Enhancement of surface quality and tribological properties during ball burnishing process, in: Proceedings of the Icomast, Melaka, Malaysia, GKH Press, ISBN 983-42051-1-2, pp. 335-340.
- Ensari, C., Kayalı E.S., 2000. Metallerde Plastik Şekil Verme-İlke ve Uygulamaları, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Yayını, İstanbul.
- Eruslu, N., Altmışoğlu A., Taptık Y., 1990. Alaşım Ders Notu, İTÜ, İstanbul.
- Gök, A., Demirci H.İ., Gök K., 2009. Sonlu Elemanlar Metodunun Gerçek bir Sanayi Parçası Üzerinde Uygulanması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (ATS'09), Karabük.
- Hassan, A.M., Abdel-Wahhab O.M., 1996. The effects of roller-burnishing on some properties of non-ferrous metals, MSc Thesis, Jordan University of Science and Technology.
- Hassan, A. M., AL-Bsharat A. S., 1996. Influence of burnishing process on surface roughness hardness and microstructure of some nonferrous metals, Wear, 199, 1-8.
- (http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/mekanik_denyler/yorulma.htm) (10.01.2011).
- (<http://www.yuzeyislemeler.com/03kitap/polisaj-cilalama-parlatma.htm>) (04.12.2010).
- İmrak, E.C., Fetvacı C., 1993. Makine Parçalarının Yorulma Dayanımını Artık Gerilmeler Yardımıyla Arttırma, Mühendis ve Makine, 34 (403): 26-31.
- Juijerm, P., Altenberger I., Scholtes B., 2005. Effect of Deep Rolling on The Fatigue Behavior of Under-, Peak- and over-aged AA6110 at Room Temperature, Institute of Materials Engineering, University of Kassel, Monchebergstrasse 3, 341 25 Kassel, Germany.
- Karcı A., Turan D., 2009. Periyodik Aşırı Yüklerin 2024-Al Alaşımında Yorulma Çatlak İlerleme Hızına Etkisi Üzerine Bir Alan Araştırması, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6 (6) 57-62.
- Kayalı, E. S., Çimenoğlu, H., 1986. Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, İ. T. Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.

- Kayalı, E. S., Ensari C., Dikeç F., 1983. Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu.
- Korkmaz Z., Gavas M., 2005. Sac Metallerin Çok Noktalı Derin Çekme Yöntemiyle Şekillendirilmesi, Teknoloji, Cilt 8, Sayı 3, 271-278.
- Kostilnik, T., 1994. Wheelabrator Corporation, Surface Engineering, ASM Handbook Vol. 5.
- Kukielka, L., 1989. Designating the field areas for the contact of a rotary burnishing element with the rough surface of a part, providing a highquality product, J. Mech. Technol., 19, 319-356.
- Kumru, N., 2003. Metalik Malzemelerde Yorulma Dayanımını İncelemek için Kullanılan Yorulma Makineleri.
- Law, K.M.Y., Gedam A., 2003. Error Compensation in The End Milling of Pockets: A Methodology, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 139, 21–27.
- Levon Ç., 1989. Metallerde Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- Loh, N.H., Tam S.C., Miyazawa S., 1989. A study of the effects of ballburnishing parameters on surface roughness using factorial design, J. Mech. Working Technol., 18, 53-61.
- Lu, J., 1996. Handbook of Measurement of Residual Stresses, Society For Experimental Mechanics, Prentice-Hall Inc., 342-411.
- Mader, S., Klocke F., 2005. Fundamentals of the Deep Rolling of Compressor Blades for Turbo Aircraft Engines, Laboratory of Machine Tools and Production Engineering, WZL RWTH Aachc Chair of Manufacturing Technologies, SteinbachstraBe 53, 52074 Aachen, Germany.
- Majzoobi, G.H., Azadikhah K., Nematı J., 2009. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6., Materials Science and Engineering A 516, 235–247.
- Meyers, M. A., Chawla K. K., 1999. Mechanical Behavior of Materials, Prentice Hall.
- Nalla, R.K., Altenberger I., Noster U., Liu G.Y., Scholtes B., Ritchie R.O., 2003. On the influence of mechanical surface treatments deep rolling and laser shock peening on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures, Materials Science and Engineering A355, 216 - 230.
- Onaran, K., 1999. Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Orman, S., 1999. Bilyeli Dövme Parametrelerinin 1020 Çeliğinin Yorulma Davranışına Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Owen, D. R. J., Hinton E., 1980. Finite Element in Plasticity, Pineridge Press Limited, Swansea.
- Özcan, F., 1982. Hidrolik-Akışkan Gücü, Mert Eğitim Yayınları, İstanbul.
- Özek, C., Savaş V., 2003. Dikey İşleme Merkezli CNC Freze Tezgahlarında Kramayer Düz Dişlilerin Açılması, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi, 3.

- Özel, S., Somunkıran İ., Kurt B., 2006. Düşük Karbonlu Çelik Yüzeyine FeCr+Mo Tozunun PTA Yöntemi İle Alaşımlandırılması, 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, 329-332, Denizli.
- Richards, M., Matlock D., Speer J., 2004. Deep Rolling Response of Notched Medium Carbon Bar Steels, SAE World Congress & Exhibition Technical Papers, Paper Number:15-28, Colorado School of Mines, ABD.
- Saatçı G. E., Tahralı N., 2003. Birikimli Hasar Teorileri ve Hareket İletim Elemanına Uygulanması, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Cilt 1, Sayı 1, 21-30.
- Salman, S., Yüce H., 1997. Alaşımlar Ders Notları, Marmara Ün., İstanbul.
- Smith, W.S., 2001. Çeviri: Mehmet Erdoğan. Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri. Cilt:2, Nobel Yayın Dağıtım, 318, 602s. Ankara.
- Tama, Y. S., 2004 Çelik Yapılarda İnce Cidarlı Elemanların Kullanımı, TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, Denizli Şubesi Bülteni, Sayı: 40, Denizli.
- Tauscher, H., 1983.Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı, Malzeme Davranışı, Biçim Etkisi ve Hesaplama Yöntemleri, (Çevirenler; Güleç, Ş., Aran, A.), MBEAE Matbaası, Gebze.
- Timoshenko, S.P., Goodier J.N., 1970. Theory of Elasticity, 3rd Edition, McGraw Hill, New York.
- Topaç, M.M., 2003. Karbonlu Çeliklerde Derin Çekmeye Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi.Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Turbaloğlu, K., 2008. 6063 Alüminyum Alaşımının Düşey Sürekli Döküm Yönteminde Üretim Parametrelerinin Geliştirilmesi. Karabük Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131s, Karabük.
- Türk Standartları Enstitüsü, 1973. Metalik Malzemenin Vickers Sertlik Deneyi, TS 207, Ankara.
- Uzgider, E., Arda T. S., 1987. Soğukta Şekil Verilmiş İnce Cidarlı Elemanlar, III. Çelik Yapılar Seminer Notları, Cilt 1, İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı, İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Ün, H., 2007.Malzeme Bilgisi, Pamukkale Üniversitesi, Bölüm 7, Denizli.
- Varol, R.,Meric C., 1992. Bilyeli Dövme: Teori ve Uygulamaları, Mühendis ve Makine, 34(405), 15-22.
- Varol, R., 1990. 2024 Alüminyum Alaşımının Yorulma Ömrü Üzerine Farklı Bilyeli Dövme Parametrelerinin Etkisi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Wagner L., 1999. Mechanical Surface Treatments on Titanium, Aluminum and Magnesium Alloys, Materials Science and Engineering A263,210–216.
- Yen, Y.C., Sartkulvanich P., Altan T., 2000. Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing (ERC/NSM), The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.

- Yavuz İ., Başpınar S., Bayrakçeken H., 2009. Metalik Köpük Malzemelerin Taşıtlarda Kullanımı, Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi, 3, 43-51
- Yılmaz, F., Şen U., 1996. Alaşımların Yapı ve Özellikleri, Sakarya Ün., Sakarya.
- Youli, L., Kan W., Yuanlin, H., 2009. An Integrated Ultrasonic Deep Rolling and Burnishing Technology for Anti-fatigue Manufacturing, 1.Faculty of Remanufacturing Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072; 2.Department of Scientific Research, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072.
- Yu, H. J., 1977. Berechnung von Abkühlungs-Umwandlungs-, Schweiss-, Sowie Verformung-seigendpannungen mit Hilfe de Method der Finiten Elemente, Ph. D. Thesis, Universität Karlsruhe (TH).
- Zeren, A., 1999. Elektro-Kimya, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Zienkiewicz, O. C., Valliapan S., King I. P., 1969. Elasto-Plastic Solutions of Engineering Problems 'Initial Stress', Finite Element Approach, Int. J. for Numerical Methods in Engineering, v. 1, pp. 75-100.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Erzurum ilinde doğdu. İlkokul, Orta ve Lise Öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 2001 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Üniversite öğrenim hayatına başladı ve 2005 yılında Makine Mühendisi unvanı ile mezun oldu. 2007 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı.