

**AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ FARKLI
TİP YÜZEY İŞLEMLERİ İLE YORULMA
DAVRANIŞLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

**2018
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Yusuf EFE

**AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ FARKLI TİP YÜZEY
İŞLEMLERİ İLE YORULMA DAVRANIŞLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

Yusuf EFE

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

KARABÜK

Eylül 2018

Yusuf EFE tarafından hazırlanan “AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ FARKLI TİP YÜZEY İŞLEMLERİ İLE YORULMA DAVRANIŞLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Okan ÜNAL

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği, Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 07/09/2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Bilge DEMİR (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. M. Sabri GÖK (BÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Okan ÜNAL (KBÜ)

.....

...../...../2018

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Yusuf EFE

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ FARKLI TİP YÜZEY İŞLEMLERİ İLE YORULMA DAVRANIŞLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Yusuf EFE

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Okan ÜNAL

Eylül 2018, 64 sayfa

Bu çalışmada, AA7075 alüminyum alaşımlarına mekanik yüzey işlemleri olarak aşırı bilyalı dövme işlemi (ABD) ve ultrasonik nanokristal yüzey modifikasyonu işlemi (UNYM) uygulanmıştır. İşlemler sırasıyla aşırı bilyalı dövme işlemi, UNYM işlemi, ABD sonrası UNYM işlemi ve UNYM işlemi sonrası ABD işlemi olarak belirlenmiştir. Mekanik yüzey işlemlerinin uygulanmasından sonra, numunelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini belirlemek için yorulma, aşınma, kalıntı gerilme, mikro sertlik, XRD ve yüzey pürüzlülüğü testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri oda sıcaklığında kuru kayma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Yorulma testleri oda sıcaklığında eksenel gerilmeli yorulma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, numunelerin yüzeyine dik kesit bölgelerinden optik mikroskop ve SEM görüntülerine bakılmıştır.

Genel olarak tüm yüzey işlemlerinin malzemelerin yüzeyinde tane boyutunu incelttiği, yüzeyde deformasyon sonrası mikroyapıda önemli değişimler meydana getirdiği, yüzeyde sertlik artışına neden olduğu ve artık basma gerilmesi oluşturduğu dikkat çekmektedir. Yorulma özellikleri UNYM sonrası en etkili sonuçlar elde edilirken çift katmanlı yüzey işlemi olan UNYM+ABD işlemi sonrası en etkili aşınma özellikleri dikkat çekmektedir.

Anahtar Sözcükler : Yorulma, aşınma, aşırı bilyalı dövme, UNYM.

Bilim Kodu : 914.1.092



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

IMPROVEMENT OF FATIGUE BEHAVIOR OF AA7075 ALUMINUM ALLOYS BY DIFFERENT TYPES OF SURFACE TREATMENTS

Yusuf EFE

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Dr. Okan ÜNAL

September 2018, 64 pages

In this study, severe shot peening (SSP) and ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) were applied to AA7075 aluminum alloys as mechanical surface treatments. The operations were designated as SSP, UNSM, UNSM subjected to SSP, vice versa, respectively. After application of the mechanical surface treatments, fatigue, wear, residual stress, microhardness, XRD and surface roughness tests were performed to determine the mechanical and tribological properties of the samples. Wear tests were carried out at room temperature under dry sliding conditions. Fatigue tests were performed at room temperature in an axial stress fatigue tester. In addition, optical microscope and SEM images were examined from the perpendicular cross-sectional areas to the surface of the samples.

In general, it is noticed that all the surface treatments have reduced the grain size on the surface of the materials, after the deformation on the surface, they cause significant reduction in the dimensions of some grains, cause increase in hardness on the surface and create residual stress. The most effective results of fatigue properties are obtained after UNSM, the most effective results of wear characteristics are obtained after UNSM + SSS process which is a double layer surface treatment.

Key Word : Fatigue, wear, severe shot peening, UNSM.

Science Code : 914.1.092



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Okan ÜNAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. UNYM işlemlerinin gerçekleşmesinde emeği olan Sun Moon Üniversitesi'nden Doç. Dr. Auezhan AMANOV'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Özellikle yorulma ve aşınma testlerindeki yönlendirmeleri için Arş. Gör. Fazıl HÜSEM'e teşekkür ederim. Ayrıca bu tezi tamamlamakta bize maddi imkan sunan Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü'ne KBÜBAP2018YL001 numaralı projeyi desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedi yanımdaydıkları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
2.1. YÜZEY İŞLEMLERİ.....	5
2.1.1. Isıl Yüzey İşlemleri.....	5
2.1.2. Mekanik Yüzey İşlemleri	6
2.1.2.1. Bilyalı Dövme İşlemi.....	6
2.1.2.2. Aşırı Bilyalı Dövme İşlemi (ABD).....	7
2.1.2.3. Lazerle Dövme (LD).....	8
2.1.2.4. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu (UNYM)	8
2.2. AŞINMA	10
2.2.1. Aşınma.....	10
2.2.2. Temel Aşınma Mekanizmaları	10
2.2.2.1. Abrazif Aşınma.....	11
2.2.2.2. Adhezif Aşınma	12
2.2.2.3. Korozyon Aşınma.....	13
2.2.2.4. Yorulma Aşınması	13

	<u>Sayfa</u>
2.3. YORULMA.....	14
2.3.1. Yorulma	14
2.3.1.1. Çatlak Başlangıcı	16
2.3.1.2. Çatlak İlerlemesi	16
2.3.1.3. Nihai Kırılma	17
2.3.2. Farklı Yükleme Koşullarında Yorulma Gerilmeleri.....	18
2.3.2.1. Tam Değişken Yükleme	19
2.3.2.2. Çekme Basma Yüklemesi	19
2.3.2.3. Tekrarlanan Gerilme	20
2.3.2.4. Alternatif Gerilme	20
2.3.3. S-N Diyagramı (Wöhler Diyagramı)	20
2.3.3.1. Yorulma Ömrü	21
2.4. ARTIK GERİLME	22
2.4.1. Artık Gerilme.....	22
 BÖLÜM 3	 24
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	24
3.1. MALZEME SEÇİMİ.....	24
3.2. NUMUNE HAZIRLAMA	24
3.2.1. Mekanik Yüzey İşlemlerinin Uygulanması	26
3.2.1.1. Aşırı Bilyalı Dövme İşlemi (ABD) parametrelerinin belirlenmesi. 26	
3.2.1.2. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu (UNYM)	
Parametrelerinin Belirlenmesi	27
3.3. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI	28
3.4. XRD ANALİZİ	29
3.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİ	30
3.6. ARTIK GERİLME ÖLÇÜMÜ.....	32
3.7. AŞINMA TESTİ	32
3.8. YORULMA TESTİ.....	33
3.9. MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	34
 BÖLÜM 4	 36

	<u>Sayfa</u>
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	36
4.1. MİKROYAPI ANALİZİ	36
4.2. XRD ANALİZİ	44
4.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ TESTİ	45
4.4. AŞINMA VE HASAR ANALİZİ	46
4.5. YORULMA.....	54
4.6. MİKROSERTLİK ANALİZİ	55
 BÖLÜM 5	57
5. SONUÇLAR	57
KAYNAKÇA.....	60
 ÖZGEÇMİŞ	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bilyalı dövme işlemi	7
Şekil 2.2. Lazerle dövme işleminin gösterimi	8
Şekil 2.3. Ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyonu işleminin gösterimi	9
Şekil 2.4. Ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyonu probu	9
Şekil 2.5. Abrazif aşınmanın farklı mekanizmaları	11
Şekil 2.6. Adhezif sert temastaki deformasyon modeli.....	12
Şekil 2.7. Yorulma ve sürtünme aşınma mekanizması.	14
Şekil 2.8. Yorulma çatlak oluşumu.	15
Şekil 2.9. Yorulma çatlak yüzeyi.	15
Şekil 2.10. Çevrimsel kayma ile çatlak başlangıcı.....	16
Şekil 2.11. Mikro ölçekte çatlak ilerlemesi.....	17
Şekil 2.12. Kırılma modları a. Mod I b. Mod II c. Mod III.	18
Şekil 2.13. Tamamen dönen yükleme.	19
Şekil 2.14. Çekme basma yüklemesi.....	19
Şekil 2.15. Tekrarlı gerilme.	20
Şekil 2.16. Alternatif gerilme.....	20
Şekil 2.17. Çelik/Demir dışı malzemelerin gerilme-çevrim sayısı grafiği.	21
Şekil 3.1. a) Yorulma ve b) aşınma numuneleri teknik resimleri.	25
Şekil 3.2. İşlem görmemiş AA7075 alüminyum alaşımı a) yorulma ve b) aşınma numuneleri	26
Şekil 3.3. Aşırı bilyalı dövülmüş AA7075 alüminyum alaşımı a) yorulma ve b) aşınma numunesi	27
Şekil 3.4. UNYM işlemi görmüş AA7075 alüminyum alaşımı a) yorulma ve b) aşınma numunesi	28
Şekil 3.5. İşlem görmüş yüzeye dik kesit bölge.....	29
Şekil 3.6. XRD cihazı.....	30
Şekil 3.7. a) Aşınma ve b) yorulma numunesi pürüzlülük ölçümleri	31
Şekil 3.8. Gerinim ve kalıntı gerilme ölçümünün deneysel kurulumu.	32
Şekil 3.9. Aşınma test ünitesi.....	33
Şekil 3.10. Yorulma test makinesi.	34

Şekil 3.11. Mikro sertlik ölçümünün yapıldığı yüzey bölgesi.	35
Şekil 4.1. a) İşlem görmemiş, b) ABD, c) UNYM, d) ABD + UNYM ve e) UNYM + ABD yorulma numuneleri fotoğrafları.	37
Şekil 4.2. a) İşlem görmemiş, b) ABD, c) UNYM, d) ABD + UNYM ve e) UNYM + ABD yorulma numuneleri fotoğrafları	38
Şekil 4.3. Aşınma numunesi yüzey sem görüntüleri a) ABD, b) UNYM ve c) ABD + UNYM	39
Şekil 4.4. ABD numunesi EDAX analizi.....	40
Şekil 4.5. 1. noktada oluşan piklerin grafiği	40
Şekil 4.6. 2. noktada oluşan piklerin grafiği	41
Şekil 4.7. 3. noktada oluşan piklerin grafiği	41
Şekil 4.8. Numunelerin kesit bölgesinden optik mikroskop görüntüleri a) ABD, b) UNYM, c) ABD + UNYM ve d) UNYM+ABD.....	42
Şekil 4.9. Numunelerin kesit bölgesinden optik mikroskop görüntüleri a) ABD, b) UNYM, c) ABD + UNYM ve d) UNYM+ABD.....	43
Şekil 4.10. ABD numunesinin kesit bölgesinden sem görüntüleri	43
Şekil 4.11. UNYM numunesinin kesit bölgesinden sem görüntüleri.....	43
Şekil 4.12. ABD + UNYM numunesinin kesit bölgesinden sem görüntüleri.....	43
Şekil 4.13. UNYM + ABD numunesinin kesit bölgesinden sem görüntüleri.....	44
Şekil 4.14. İşlem görmemiş, ABD, UNYM ve ABD+UNYM numuneleri XRD grafikleri	44
Şekil 4.15. İşlem görmemiş numune aşınma izleri sem görüntüleri: A-B) 10 N, C-D) 20 N	47
Şekil 4.16. ABD numune aşınma izleri sem görüntüleri: A-B) 10 N, C-D) 20 N	47
Şekil 4.17. UNYM numune aşınma izleri sem görüntüleri: A-B) 10 N, C-D) 20 N	48
Şekil 4.18. ABD+UNYM numune aşınma izleri sem görüntüleri: A-B) 10 N, C-D) 20 N	48
Şekil 4.19. UNYM+ABD numune aşınma izleri sem görüntüleri: A-B) 10 N, C-D) 20 N	49
Şekil 4.20. $V=0,5\text{m/s}$ kayma hızı ve 100m, 200m ve 1000m kayma mesafesi için ortalama sürtünme katsayısı-uygulanan yük sütun grafiği	50
Şekil 4.21. 10 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (100m) ...	51
Şekil 4.22. 20 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (100m) ...	51
Şekil 4.23. 10 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200m) ...	52
Şekil 4.24. 20 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200m) ...	52

Sayfa

Şekil 4.25. 10 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (1000m)	53
Şekil 4.26. 20 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (1000m)	53
Şekil 4.27. $V=0,5\text{m/s}$ kayma hızı ve 100m, 200m ve 1000m kayma mesafesi için aşınma oranı-uygulanan yük sütun grafiği	54
Şekil 4.28. Yük-çevrim sayısı grafiği	55
Şekil 4.29. Mikrosertlik grafiği.....	56



ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. AA7075-T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.....	24
Tablo 3.2. AA7075-T6 alüminyum alaşımının temperleme koşulu ve mekanik özellikleri	24
Tablo 3.3. Aşırı bilyalı dövme şartları	27
Tablo 3.4. UNYM işlem şartları	28
Tablo 4.1. EDAX analiz sonuçları	42
Tablo 4.2. Uygulanan yüzey işlemlerinin yarı yükseklikteki pik genişliği değerleri	45
Tablo 4.3. Uygulanan yüzey işlemlerine göre numunelerin yüzey pürüzlülükleri	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al : alüminyum

Si : silisyum

Cu : bakır

Mg : magnezyum

Fe : demir

Mn : mangan

Cr : krom

Zn : çinko

Ti : titanium

O : oksijen

Na : sodyum

Cl : klor

σ_a : gerilme genliği

σ_{max} : maksimum gerilme

σ_{min} : minimum gerilme

σ_m : ortalama gerilme

R : gerilme oranı

N : çevrim sayısı

Hz : frekans

KISALTMALAR

AA : Alüminyum Alaşımı

ABD : Aşırı Bilyalı Dövme

UNYM: Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Değişim

UBD : Ultrasonik Bilyalı Dövme

APD : Aşırı Plastik Deformasyon

HFUP : High-Frequency Ultrasonic Peening (yüksek frekansta ultrasonic dövme)

BD : Bilyalı Dövme

LŞD : Lazer Şok Darbesi İşlemi

DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)

ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

EDİ : Elektro-Deşarj İşleme

FWHM: Full Width at Half Maximum (Yarı Yükseklikte Pik Genişliği)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde, metalik malzeme olarak kullanılan çelik alaşımlarından sonra en çok kullanılan malzemeler alüminyum alaşımlarıdır. Alüminyum alaşımlarının endüstride bu kadar çok rağbet görmesi alüminyum alaşımlarının öneminin ne kadar çok olduğunu göstermektedir. Alüminyum alaşımları elastik olması, ısıyı ve elektriği iyi iletmesi, kolay işlenebilir olması ve kolay şekillenebilir olması alüminyum alaşımlarını makine mühendisliğin birçok alanında vazgeçilmez hale getirmektedir [1].

Alüminyum alaşımları 7xxx serisi yüksek mekanik özelliklerinden dolayı otomobil ve havacılık endüstrisinde tercih edilmektedir. AA7075 alüminyum alaşımları günümüzde sanayi uygulamalarında kullanılan en güçlü alüminyum alaşımlarındandır. AA7075 alüminyum alaşımlarının ağırlığa oranla yüksek mukavemet göstermesi ve doğal yaşlandırma özellikleri onu bir takım havacılık uygulamalarında çekici hale getirir [2,3].

Mühendislikte makine parçalarına etkiyen yükler statik ve dinamik olmak üzere iki grupta incelenir. Statik yükler genel olarak inşaat mühendisliği alanını ilgilendirmektedir. Makine mühendisliği alanında statik yüklere çok az rastlanmaktadır. Makine mühendisliği alanında özellikle kritik yük taşıyan ve hareketli parçalarda daha çok dinamik yükleme durumu söz konusudur. Dinamik yükler altında makine parçası değişken ve tekrarlı yüklere maruz kalmaktadır. Bu değişken ve tekrarlı yükleme sonucu makine parçası yorulur ve akma sınırının çok altındaki bir değerde makine parçası kırılabilir. Kırılmanın bu çeşidine yorulma kırılması denir. Yorulma kırılması, dinamik yüklemeye maruz kalan makine parçalarında en çok rastlanılan olaydır [4,5].

Uygulanan yükün değişken olması ve tekrar etmesi yani periyodik bir şekilde çok sayıda yükleme ve boşaltmanın olması makine parçası içerisinde karmaşık termal ve mekanik olaylara neden olacaktır. Bunun sonucunda da makine parçasında yıpranma çözülme ve ayrışmalar ortaya çıkacaktır. Bunun sebebi uygulanan yükün büyüklüğünden çok yükün periyodik bir şekilde uzun bir süre boyunca değişerek etki etmesidir. Yükün böyle periyodik bir şekilde uygulanması sonucu makine parçasında mikro çatlaklar oluşur ve zamanla bu mikro çatlaklar ilerleyerek parçanın çekme mukavemetinin altında bir değerde kırılmasına yol açar [6].

Metalik malzemelerin yorulma ömrünü tahmin etmek neredeyse bir yüzyıl boyunca önemli bir araştırma konusu olmuştur. Yorulma çatlak süreci üç aşamalı gerçekleşmektedir. Aşama 1, çatlak başlangıcı, aşama 2, çatlak yayılımı ve son olarak aşama 3, kırılma olarak ifade edilebilir. Çatlak yayılımı aşamasının ömür tahmini iyileştirmek için birçok çaba gösterildi. Bununla birlikte, çatlak yayılımı aşaması üzerine yapılan çok miktarda çalışma ile karşılaştırıldığında, çatlak başlangıcı aşaması daha az dikkat çekmiştir [7]. Yorulma tüm metalik kırılmaların %90'ına sebep olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle tasarım yapılırken malzemenin veya makine parçasının yorulması hesaba katılması gereken en önemli parametredir [8].

Aşınma, tribolojik çalışmanın, temas maruz kalan katıların yüzeylerinden malzemenin kademeli olarak kaldırılmasını ifade eden bir hasar türüdür. Aşınma, mekaniği malzemeleri ve kimyayı içeren disiplinler arası bir olgudur. Aşınma çoğu zaman bileşenlerin servis ömrünü etkileyen kritik bir faktördür ve aşınmanın verimli bir şekilde öngörülmesi ve optimizasyonu çoğu mekanik tasarım sürecinin önemli bir parçasıdır. Özellikle, aşınma sırasında malzeme kaybına ilişkin tahminler veya aşınan bir yüzeyin topoğrafik gelişimi pek çok endüstriyel uygulamaya büyük katkıda bulunmaktadır [9].

Malzemenin yorulma, aşınma, korozyon ve sertlik gibi mekanik özelliklerini iyileştirmek için aşırı bilyalı dövme (ABD), ultrasonik nano kristal modifikasyonu (UNYM), ultrasonik bilyalı dövme (UBD) gibi aşırı plastik deformasyon (APD) tabanlı işlemler uygulanabilir [10]. Bu teknikler, çalışma prensiplerine göre

değişiklik gösterir ve yüzey topoğrafyası, işlem tabakası derinliği ve inceltirilmiş tanelerin boyutu gibi değişen özelliklere sahip farklı katmanlar oluşturur. İşlem sonuçlarını kontrol eden anahtar parametreler olarak işlem yöntemi ve kapsama oranı ve işlem süresi dikkate alınır. Malzeme yüzeyinde plastik deformasyonun artması, yüzey sertliğinin artmasına ve daha derin bir sertleştirme tabakasına neden olur ve bunun sonucunda malzeme de daha yoğun bir yüzey oluşur. İşlem süresinin artması sonucunda, nano boyutlu taneler oluşur [11]. Wu ve arkadaşları plazma nitrürlenmiş S45 çeliğinin yorulma davranışlarını iyileştirmek için farklı çarpma sayılarında ($34,000 \text{ mm}^{-2}$ ve $69,000 \text{ mm}^{-2}$) UNYM tekniğini kullanmışlardır. UNYM işlemi uygulandıktan sonra 8 saat plazma nitrürlenmiş malzemenin yorulma davranışlarının iyileştiğini, 48 saat plazma nitrürlenmiş malzemenin yorulma davranışlarında herhangi bir değişiklik olmadığını gözlemlemişlerdir[11]. Trško ve arkadaşları Al 7075 alaşımına farklı şiddetlerde aşırı bilyalı dövme işlemi uygulamışlar ve yorulma davranışlarının nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. 9.6N Almen şiddetinde ve %650 doyurma oranında yapılan bilyalı dövme işleminin malzemenin yorulma davranışlarını %9'a kadar iyileştirdiğini gözlemlediler ve 14.9A Almen şiddetinde ve %650 doyurma oranında yapılan bilyalı dövme işleminin malzemenin yorulma davranışlarını %21'e kadar düşürdüğünü gözlemlediler [12]. Yasuoka ve arkadaşları SUS304 östenit paslanmaz çeliğin yorulma davranışlarını iyileştirmek için UNYM tekniğini kullanmışlardır. Yüksek yorulma mukavemeti elde etmek için uygulanması gereken statik yükün 90N olabileceği üzerinde durup SUS304 östenit paslanmaz çeliğin yorulma mukavemetini yaklaşık %80 oranında arttığını gözlemlemişlerdir [10]. Cho ve arkadaşları UNYM ve High-Frequency Ultrasonic Peening (HFUP) tekniklerini Al-Si alaşımına uygulayarak bu tekniklerin aşınma davranışı üzerindeki etkinliğini araştırmışlardır ve her iki tekniğinde Al-Si alaşımının aşınma davranışlarını iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir [13]. Amanov ve arkadaşları UNYM tekniğinin sinterlenmiş Cu- esaslı alaşımın mekanik ve tribolojik özelliklerini nasıl etkilediğini araştırmışlardır ve UNYM işleminin malzemenin tribolojik ve mekanik özelliklerini artırdığını vurgulamışlardır [14]. Maizoobi ve arkadaşları alüminyum alaşımı 7075-T6'nın yorulma ömrünü artırmak için bilyalı dövme işlemini uygulamış olup ve bunun sonucunda malzemenin yorulma ömrünün %350 mertebelerine kadar arttığını gözlemlemişlerdir [15]. Aşırı bilyalı dövme (ABD), işlem görmüş malzemenin yüzey tabakası üzerine uygulanan bir yöntemdir. Malzeme

geometrisinin boyutuna ve karmaşıklığına bakılmaksızın uygulanabilir. ABD işleminde, küçük küresel bilyalar malzemenin yüzeyine çarptırılır. Çarpan her bilya küçük bir çekiç gibi davranır ve çarptığı yüzeye girinti kazandırır. ABD işlemi uygulandıktan sonra malzemenin yüzey katmanında plastik deformasyon oluşur. Bu plastik deformasyon alt kısımdaki katmanın eski konumuna gelmesine müsaade etmez. Bunun sonucunda malzemede basma kalıntı gerilme, yüzey pekleşmesi ve yüzey pürüzlülüğü meydana gelir [16].

Yüzey değişim tekniği olan, ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyon (UNYM) etkili ve ekonomik bir yöntemdir. UNYM, metalik malzemelerin kimyasal bileşimini değiştirmeden kaba taneleri nanometre ölçeğine kadar inceltir ve nano yapıları bir yüzey katmanı oluşturur. Aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemi olan UNYM, malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini malzeme yüzeyinde plastik deformasyon oluşturarak iyileştirir, işlem yapılan yüzeyde oluklu bir yapı oluşturur ve istenilen sayıda mikro-çukurlar oluşturur [14]. UNYM yüzey sertliği ve basma kalıntı gerilme oluşturduğu için malzemelerin aşınma, yorulma gibi özelliklerini iyileştirebilir [11]. UNYM, nano yapıları yüzey katmanı oluşturmak için rulman çelikleri, paslanmaz çelik, titanyum ve alaşımları, alüminyum alaşımları, bakır alaşımları, vb. gibi metalik malzemelere başarıyla uygulanmıştır [14].

Bu çalışmanın amacı, AA7075 alüminyum alaşımlarının farklı tip yüzey işlemleri ile yorulma ve aşınma davranışlarını iyileştirmektir. Havacılık sanayisinde kullanılan AA7075 alüminyum alaşımına mekanik yüzey işlemleri ABD ve UNYM uygulanması, bu işlemler gerçekleştirdikten sonra numunelerin aksel yüklemeli yorulma test cihazında yorulma davranışlarının ve aşınma davranışlarının incelenmesi hedeflenmektedir. AA7075 alüminyum alaşımına mekanik yüzey işlemleri olarak aşırı bilyalı dövme ve UNYM teknikleri uygulandıktan sonra malzemenin mekanik özelliklerinin iyileşmesi düşünülmektedir. Yorulma, aşınma, korozyon gibi malzemede hasara yol açacak etkenlere karşı malzemenin dayanımının artması üzerinde durulmaktadır. Böylece yorulmaya, aşınmaya maruz kalabilecek olan kritik parçalarda AA7075 alüminyum alaşımı daha sık kullanılarak kullanımının yaygınlaşması bu tezin öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. YÜZEY İŞLEMLERİ

2.1.1. Isıl Yüzey İşlemleri

Sanayi uygulamalarında kullanılan makine parçalarının yüzeylerinin sert ve aşınmaya karşı dirençli olmaları gerekir ve de tokluğunun iyi olması gerekir. Bu tarz bir birleştirme ısıtma işlemine maruz kalmış makine parçalarında genel olarak mümkün değildir. Eğer yüzey sertliğini maksimum yapmak için ısıtma işlemi uygulanmışsa, malzeme kırılgan olacaktır ya da tokluğunun maksimum olması için ısıtma işlemi uygulanmışsa malzeme yeteri kadar sert olmayacaktır. Özellikle de yüzeyleri aşınmaya çalışan makine parçalarında, aşınmayı en düşük seviyeye düşürmek için yüzey sertleştirme işlemleri uygulanır. Yüzey sertleştirme işlemleri, makine parçalarının yüzeylerini belirli bir derinliğe kadar istenilen ölçüde sertleştirilmesidir. Makine parçasının geriye kalan iç tarafı işlem görmeden önceki sertliğinde kalır. Örneğin dişli çarklar, burulmaya çalışan miller, sürtünmenin büyük olduğu yerlerde kullanılan makine parçaları bu yöntemler ile sertleştirilmektedir. Yüzey sertleştirme işlemleri, bileşimi değiştirmeden uygulanan yüzey sertleştirme işlemleri ve bileşimi değiştirerek yapılan yüzey sertleştirme işlemleri olarak ikiye ayrılır. Alevle yüzey sertleştirme ve indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemlerinde makine parçasının bileşimi değişmez. Katı karbürizasyon, siyanürizasyon, gaz karbürizasyon, gaz nitrürasyon ve gaz karbo-nitrürasyon yüzey işlemleri ise makine parçasının bileşimini değiştirerek yapılan yüzey sertleştirme işlemlerine örnek olarak gösterilebilirler [17].

2.1.2. Mekanik Yüzey İşlemleri

Çoğu durumda, mekanik arızaların bileşenlerin dış tabakalarından kaynaklandığı gerçeği göz önüne alındığında, bileşen yüzeyindeki mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yönelik yaklaşımlar ve işlemler uygulamak oldukça etkilidir [18]. Mekanik yüzey işlemleri, genel olarak malzemelerin yüzey bölgelerine dışarıdan müdahale edilerek plastik deformasyon oluşturma ve son şekil verme işlemidir. Bu şekilde malzemenin yüzeyinde dislokasyon oluşmakta ve malzemenin yüzey topografyası değişmektedir. Mekanik yüzey işlemleri ile farklı farklı malzemelerin korozyon ve aşınma direncinin iyileştirilmesi, yorulma mukavemetinin artırılması hedeflenmektedir. Mekanik yüzey işlemi sonrasında malzemede artık gerilmeler meydana gelmektedir. Bu artık gerilmeler malzemenin yorulma mukavemetini iyi veya kötü yönde etkilemektedir [19].

Günümüzde uygulanmakta olan mekanik yüzey işlemlerinden bazıları şunlardır:

1. Geleneksel Bilyalı dövme (GBD) (Shot Peening)
2. Aşırı bilyalı dövme (ABD) (Severe Shot Peening (ABD))
3. Lazerle dövme (LD) (Laser Shock Peening)
4. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu (UNYM) (Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification) [19].

2.1.2.1. Bilyalı Dövme İşlemi

Bilyalı dövme işlemi, havacılık ve otomobil endüstrisindeki metalik bileşenlerdeki yorulma ömrünü artırmak için yaygın olarak kullanılan mekanik bir yüzey işlemidir. Bu işlem, metalik bileşenin yüzeyini yüksek hızda bilya bombardıman ederek gerçekleştirilir. Her atış metalik yüzeyi sıkıştırarak ve gererek küçük bir çekiç gibi davranır [20]. Genel olarak, bilyalı dövme işlem yüzeyi, yorulma direncine zararlı olduğuna inanılan, çatlak başlangıcı işlemini hızlandırabileceğinden, dövme işlemi ile yüzey pürüzlendirilir. Öte yandan bilyalı dövme işleminden kaynaklanan kalıcı basma gerilmesi, yüzey sertliği durumunda genellikle baskın bir rol oynayan hem

çatlak başlangıcı hem de çatlak ilerleme süreçlerini geciktirerek, yorulma direncini potansiyel olarak artırabilir. Ek olarak bilyalı dövülmüş yüzeyin yakınındaki katman sıklıkla sertleştirilir ve bu da çatlak başlangıcı ve büyüme davranışını etkiler. Bazı çalışmalar, gerinim sertleşmesinin etkilerini deneysel olarak araştırmıştır ve gerinim sertleşmesinin, sertleşmiş tabakanın artan dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak çatlak başlatmayı geciktirdiği sonucuna varmıştır, ancak çatlak yayılımındaki rolü üzerinde hala tartışmalar sürmektedir. Bilyalı dövme işlemi, esas olarak, çatlak başlatma işlemini ve kısa çatlak büyüme sürecini geciktirerek yorulma direncini arttırdığı ve hatta yayılmayan kısa çatlaklara neden olduğu bildirilmiştir [21].



Şekil 2.1. Bilyalı dövme işlemi [19].

2.1.2.2. Aşırı Bilyalı Dövme İşlemi (ABD)

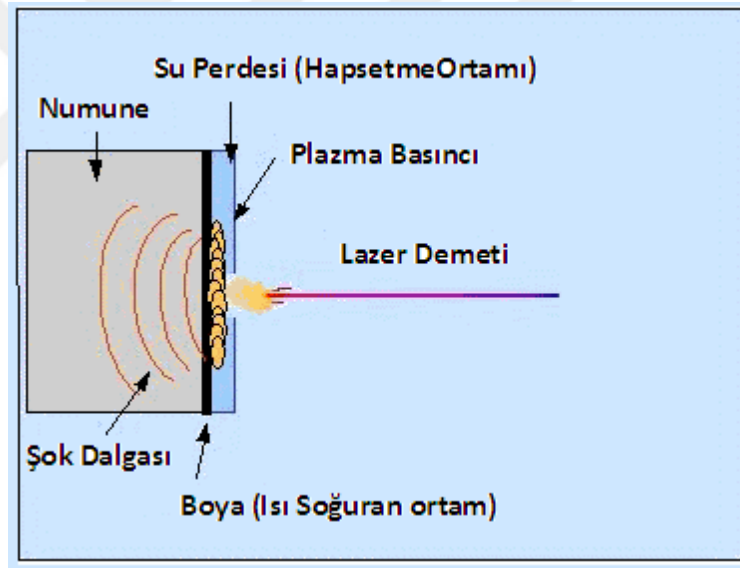
Son yıllarda ultra ince taneli yapılar veya nano kristalize yapı oluşumları bilimsel ilgiyi çekmiştir. Nano yapıları materyallerin oluşturulması için birkaç yöntem vardır. Aşırı bilyalı dövme yöntemi, daha yüksek Almen şiddeti ile geleneksel bilyalı dövme uygulaması olarak ifade edilmiştir. Almen şiddeti hava basıncını, bilya çapını ve aynı zamanda dövme süresini ayarlayarak belirlenir [5].

Son yıllardaki araştırmalar, klasik hava ile patlatılmış bilyalı dövme işlemi ile karşılaştırıldığında daha yüksek parametreler kullanan ve aşırı bilyalı dövme işlemi olarak adlandırılan belirli bilyalı dövme işlemlerinin, işlem gören parçaların yüzeyinde ultra ince veya nanotaneli malzemeler elde etmek için kullanıldığını göstermektedir. Bu yöntemin, malzemelerin yorulma özelliklerinin tane boyutuna

karşı oldukça hassas olduğu bilindiği için malzemelerin yorulma mukavemetinin artmasına neden olması beklenmektedir [18].

2.1.2.3. Lazerle Dövme (LD)

Yeni mekanik yüzey işlem yöntemlerinden biri olan LD milimetre aralığındaki kalınlıklarda malzeme yüzeyine yakın bölgelerini ve malzemenin yüzey pürüzlülüğünü etkiler, basınç patlamaları yardımıyla malzemenin yüzey katmanını değiştiren nano saniye aralığındaki lazer darbeler kullanır. Malzemenin yüzey ve yüzeyine yakın bölgelerdeki makroskopik basınçlı artık gerilmeleri oluşturarak, basınç dalgasına neden olur ve malzemenin akma dayanımı geçildiğinde plastik deformasyona neden olur.

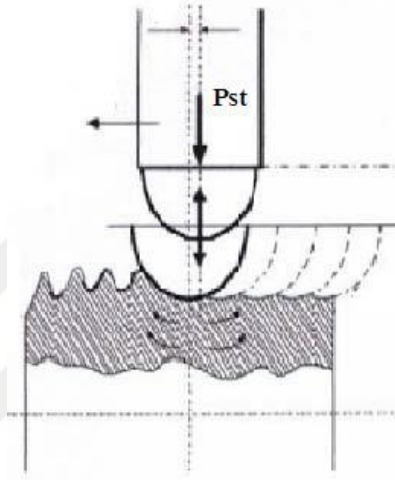


Şekil 2.2. Lazerle dövme işleminin gösterimi [19].

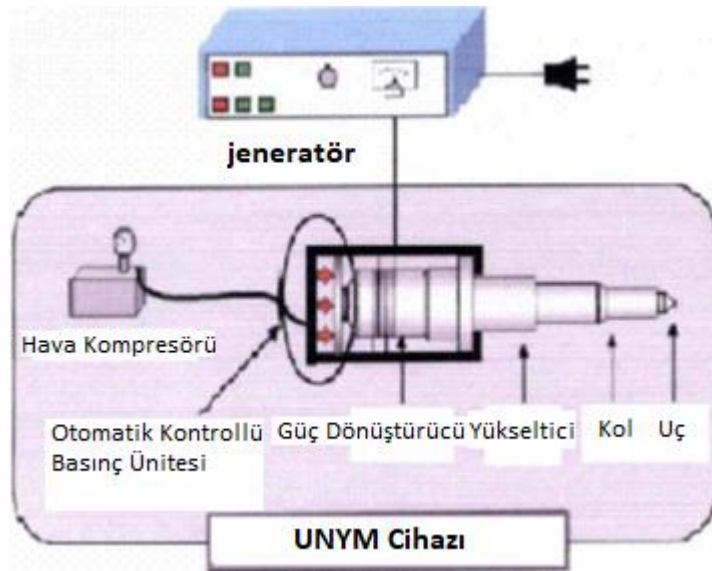
2.1.2.4. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu (UNYM)

Bir tür mekanik yüzey işlemi olan, ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyonu (UNYM) etkili ve ekonomik bir yöntemdir. UNYM metalik malzemelerin kimyasal bileşimini değiştirmeden kaba taneleri nanometre ölçeğine kadar inceltir ve nano yapıları bir yüzey katmanı oluşturur. Aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemi olan UNYM, malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini malzeme yüzeyinde plastik

deformasyon oluşturarak iyileştirir, işlem yapılan yüzeyde oluklu bir yapı oluşturur ve istenilen sayıda mikro-çukurlar oluşturur [14]. UNYM yüzey sertliği ve basınçlı artık gerilme oluşturduğu için malzemelerin aşınma, yorulma gibi özelliklerini iyileştirebilir [11]. UNYM, nano yapılı yüzey katmanını oluşturmak için rulman çelikleri, paslanmaz çelik, titanyum ve alaşımları, alüminyum alaşımları, bakır alaşımları, vb. gibi metalik malzemelere başarıyla uygulanmıştır [14].



Şekil 2.3. Ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyonu işleminin gösterimi [19].



Şekil 2.4. Ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyonu probu [19].

2.2. AŞINMA

2.2.1. Aşınma

Alman DIN 50320 normunda bir malzemenin mekanik etkilere bağlı olarak gaz, sıvı veya katı fazda bulunan başka bir malzemeye temasından kaynaklanan aşınmayı yüzeyden küçük ve istenmeyen malzeme kaybı olarak tanımlar. Benzer şekilde, ASTM G 40 standardına göre aşınma yüzey ile temas eden maddeler arasındaki göreceli hareketten ötürü genellikle katı maddenin aşamalı kaybını içeren katı bir yüzeyin hasarı olarak tanımlanır [22].

Aşınma, makine veya mekanizmalar için istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle her zaman engellenmeye çalışılmaktadır. Mekanik bileşenlerin yüzeyleri birbirine temas ettiği zaman aşınma meydana gelir. Sorgulanan soru, verilen çalışma süresi boyunca malzemenin ne kadarının kaybedileceğidir. Aşınma ve plastik deformasyon, yüzey profillerinin değişmesine neden olur [23]. Temas halinde bulunan numunelerdeki malzeme kaybı, üç farklı yolla oluşur: yerel erime, kimyasal reaksiyonlar ve yüzeydeki malzeme kırılması. Esasen, iki kayan yüzeyin doğrudan teması nedeniyle aşınma başlar. Aşınmayı arttıran başlıca faktörler aşağıda listelenmiştir.

1. Temas halinde olan malzemeler: kristal yapıları, sertliği, elastikiyet modülü, yüzey pürüzlülüğü
2. Çevresel etkiler: sıcaklık, nem, yağlayıcı
3. Yük
4. Tasarım
5. Temas alanı ve hareket derecesi [22].

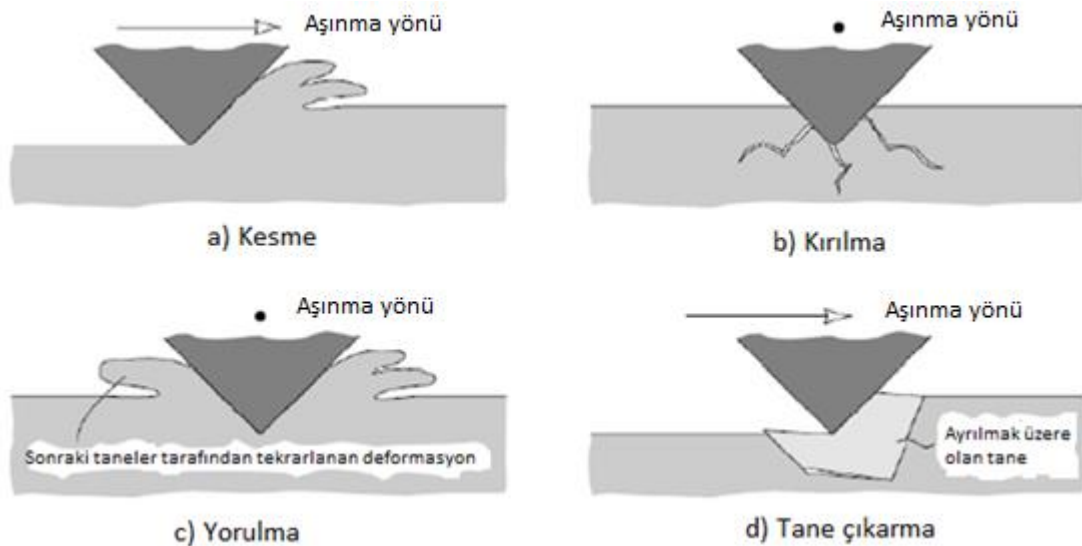
2.2.2. Temel Aşınma Mekanizmaları

Aşınma, aşınma türleri olarak adlandırılan malzeme kaldırma mekanizmaları tarafından tanımlanmaktadır. Farklı uygulamalarda farklı aşınma türleri baskın

olabilir. Bununla birlikte, genel olarak sadece bir tip aşınma yoktur, ayrıca da aşınma mekanizmaları kombinasyonu birlikte oluşmaktadır. Aşağıda temel aşınma şekillerini fiziksel mekanizmalarına göre ayırmak yaygın bir işlemdir: Abrasif aşınma, belirgin derecede farklı sertliğe sahip iki cisim birbiriyle temas halinde olursa meydana gelir. Adezif aşınma, aynı veya benzer malzemelerle olan temaslarda bile gerçekleşir. Korozyif aşınma, yüzeyin kimyasal modifikasyonlarıyla ve nihayetinde yüzey tabakasının kaldırılmasıyla ilişkilidir. Yüzey yorulması, kayma veya yuvarlama ile yüzeyin tekrar tekrar yüklenmesinden kaynaklanır, burada her bir yükleme döngüsünde, yüzey gerilmelerinde belirgin bir değişiklik görülmez [23].

2.2.2.1. Abrasif Aşınma

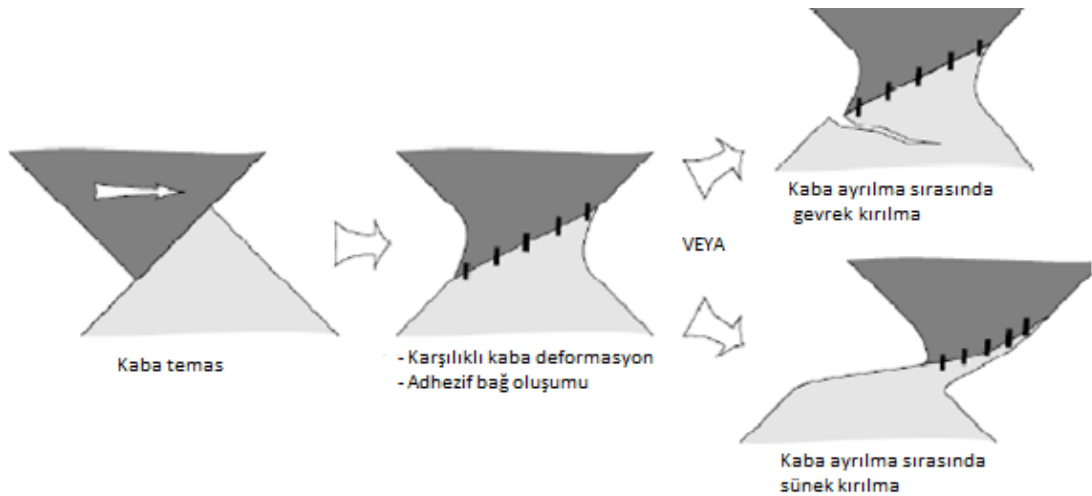
Abrasif aşınma, bir yüzey üzerine sert parçacıkların geçmesiyle malzemenin kaybedilmesidir. Bu parçacıklar ya cisimlerin sertliği ya da yüzeyler arasında sıkışan bireysel taneciklerdir. Bu durum, sert bir cisim eşit veya daha büyük bir sertliğe sahip bir maddenin parçacıklarına karşı yüklendiğinde ortaya çıkar. Genellikle farklı niteliklere sahip olan birkaç farklı aşınma mekanizması vardır. Bunlar kesme, kırılma, yorulma ve tane çıkarma işlemidir.



Şekil 2.5. Abrasif aşınmanın farklı mekanizmaları [24].

2.2.2.2. Adhezif Aşınma

Adezyon, temas halindeki iki katı cisim arasındaki malzeme aktarımıdır. Metallerin adezyonu, temas eden yüzeyler arasındaki elektron transferi ile açıklanmaktadır. Çok sayıda serbest elektronlar metallerde bulunmaktadır ve temas halindeki elektronlar bağ kurmak için iki katı cisim arasında değiştirilebilir. Elektronlar rijit bir yapı ile bağlı değildir ve temas halinde olan iki cisim arasındaki mesafenin yeterince küçük olması, yani 1 nm'den daha düşük olması koşuluyla, bir cisimden diğerine geçebilirler. Sonuç olarak, elektronlar farklı atom yapılarına sahip olmalarına rağmen iki cisim birleştirilebilirler. Bu anlamda, benzer malzemeler daha çok bağlanma eğilimindedirler. Bunlardan başka adezyon, yüzey pürüzlülüğü veya cismin sertliği arttıkça azalır. Adezyon, çalışma yüzeylerinde oluşan aşınma türü olarak kendini gösterir. Kayma hareketi büyük sürtünme katsayılarıyla bile önlenemez. Metallerin çoğu, nanometrik ölçeklerde yüzeylerinde oksit veya kirletici katmanlara sahiptir. Bu katman, normal temas durumunda katıların adezyonunu engeller. Bu nedenle, oksit tabakasının oluşmadığı temiz vakum odalarında adezyon testleri gerçekleştirilir. Bu testler adezyon veya ayırma kuvvetinin temas kuvvetinden daha büyük olduğunu ve adezyonun sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Adhezif aşınma, hareket halinde sert basınç altında yumuşak malzemenin kesilmesi ve çatlaması ile oluşur. Bağlanma gerçekleştirildikten sonra, yumuşak malzeme, Şekil 2.2'de görülebileceği gibi sünek veya gevrek bir şekilde kırılır.



Şekil 2.6. Adhezif sert temastaki deformasyon modeli [24].

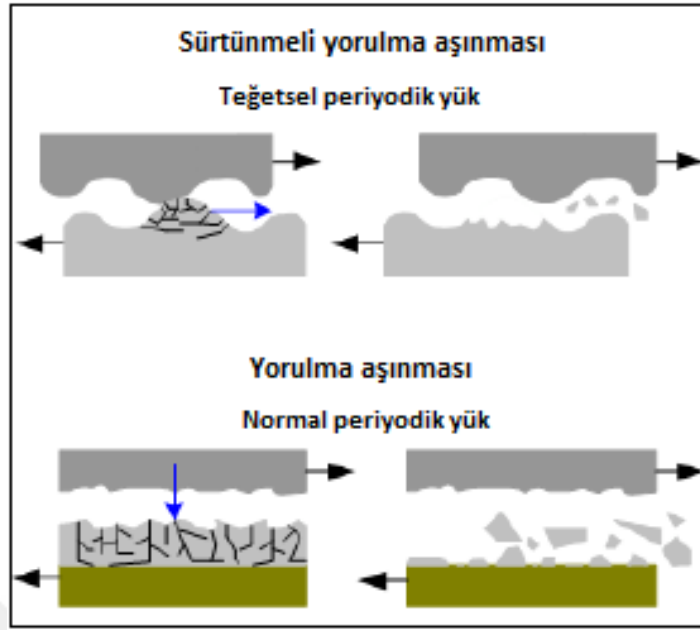
2.2.2.3. Koroziyon Aşınma

Koroziyon aşınma, aşınan bir yüzey üzerinde kimyasal bir reaksiyon sonucunda ortaya çıkar. Korozyonun en yaygın biçimi, metal ile oksijen arasındaki reaksiyondan (oksidasyon) dolaydır; ancak bununla birlikte, diğer kimyasal maddeler de katkıda bulunabilir. Genellikle oksitler olan korozyon ürünleri, oluşumları aşınan yüzey metallerinden farklı kesme mukavemetlerine sahiptir. Oksitler yırtma eğilimi gösterir, bu da paslanma sonucu çürüme yüzeyleri oluşturur [23].

2.2.2.4. Yorulma Aşınması

Birçok deney, kırılmaların çoğuna yorulmanın sebep olduğunu göstermektedir. Abrasif veya adeziv aşınma için tekrarlanan temas çevrimine gerek yoktur. Ancak bununla birlikte, şekil 2.3’de gösterilen çevrimsel yükleme koşullarında yorulma aşınması meydana gelir. Temas çevrimi sayısı yüksek olduğunda, yüksek çevrimli yorulma mekanizmasının aşınma mekanizması olması beklenir. Düşük olduğunda ise düşük çevrimsel yorulma mekanizması olması beklenir.

Yorulma aşınma tiplerinden biri, iki yüzeyin birbiri boyunca küçük gerilime (salınımlı) sahip olması nedeniyle sürtünme aşınmasıdır. Sürtünme kuvveti, yüzey yorulmasına neden olan çekme-basma gerilmelerini değiştirir.



Şekil 2.7. Yorulma ve sürtünme aşınma mekanizması [23].

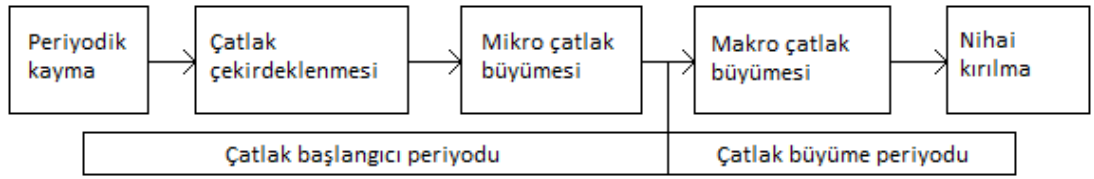
2.3. YORULMA

2.3.1. Yorulma

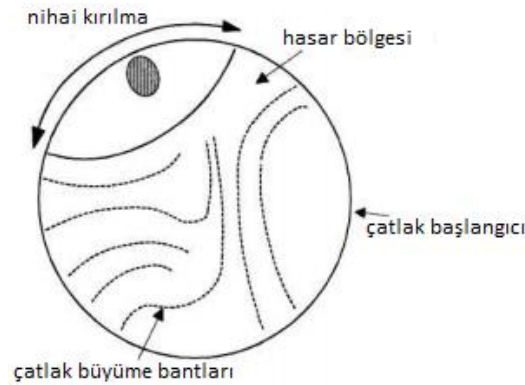
Malzemelerin yorulma ömrünü tahmin etmek yıllarca önemli bir araştırma konusu olmuştur. Yorulma çatlak süreci üç aşama, çatlak başlangıcı, çatlak yayılımı ve kırılma olarak ayrılabilir. Çatlak yayılım aşamasının ömür tahminini iyileştirmek için çok fazla araştırma yapıldı. Ancak bununla birlikte, çatlak yayılımı üzerine yapılan çok miktarda çalışma ile karşılaştırıldığında, çatlamaya başlama daha az dikkat çekmiştir. Farklı yükleme koşullarında, numune geometrilerine ve kristalografik özelliklerine göre polikristal malzemelerin yorulma davranışı kapsamlı olarak incelenmiş ve yorulma ömür tahmini için çeşitli teoriler önerilmiştir. Yorulma çatlak başlangıcı için en önemli faktörlerden biri, malzemenin mikro yapısıdır. Yorulma çatlak oluşumundaki mikro yapının temel rolü, deneyler ve hesaplama modellemesi açısından iyice gözden geçirilmiştir. Yorulma çatlak başlangıcının bireysel tane ölçeklerinde mikro yapısal heterojenlik ile yakından ilişkisi olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak, yerel deformasyonu doğru bir şekilde tahmin etmek, polikristal malzemelerdeki yorulma çatlak başlangıcı için gereklidir [7]. Yorulma, dayanıklılık sınırı altında tekrarlı dalgalanan gerilmeler tarafından sebep olunan bir kırılma

biçimidir. Yorulma durumu tekrarlanan yükleme koşullarında meydana gelir ve malzemenin nihai dayanımı altında kırılmaya neden olur [25].

Yorulma, tüm çalışma sisteminin herhangi bir parçasını veya bileşenini etkileyebilecek önemli ve kritik bir sorundur [26]. Mühendislik bileşenlerin çoğunda dalgalanan gerilmeler malzemenin akma dayanımının altında bir değere sahiptir. Hareketli çevrimsel gerilmelerin düşük değerine rağmen, hasarın birikiminden dolayı bileşenin kırılması kaçınılmazdır [27]. 1800'lü yılların başında; gözlemciler demiryolu ve köprü bileşenlerinin tekrarlanan yükleme nedeniyle bir süre kullanımdan sonra çatladığını kabul ettiler. Daha sonra; yorulma önemli bir araştırma konusu haline geldi. Ne kadar çok malzemelerin kullanımı yaygınlaştıkça ve çeşitlilik artıkça, araştırmalar da günümüzde o kadar çok derinleşiyor [26]. Yorulma çatlak ilerlemesi, üç farklı aşamada tanımlanabilir; çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve nihai kırılma Şekil 3.1'de görüldüğü gibi.



Şekil 2.8. Yorulma çatlak oluşumu [25].

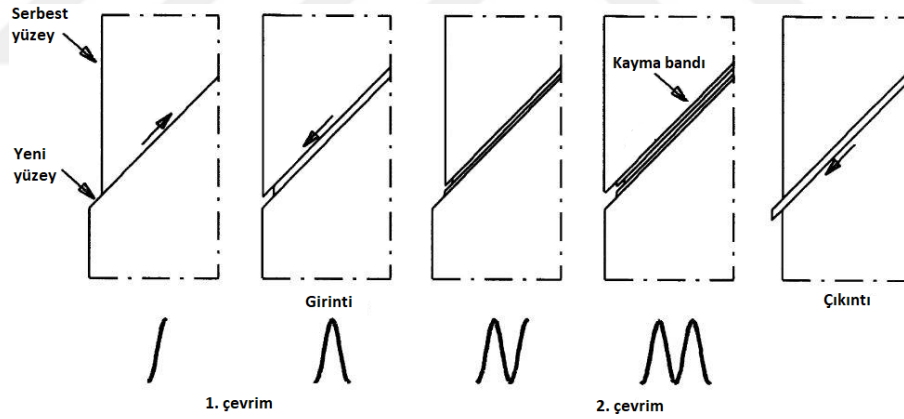


Şekil 2.9. Yorulma çatlak yüzeyi [25].

Yorulmadan kaynaklanan kırılma, tek düze kırılmalardan farklıdır. Çatlak yüzeyi bütünlüğü gevrek veya sünek kırıklarla karşılaştırıldığında farklılık göstermektedir. Makro incelemeyle, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, çatlak başlangıç aşaması, çatlak büyüme bantları ve nihai kırılmayı görmek mümkündür. Nihai kırılma yüzey durumu, malzemenin süneklik veya kırılkanlığı ile farklılık gösterebilir [25].

2.3.1.1. Çatlak Başlangıcı

Yorulmanın ilk aşaması çatlak başlangıcı olarak adlandırılabilir. Yorulma, malzemenin serbest yüzeylerinden kaynaklanır. Plastik deformasyon limitleri altındaki kuvvetler yalnızca belli sayıda tanede etkilidir. Her bir gerilme çevrimi, Şekil 3.3’te görüldüğü gibi, kayarak tanenin serbest yüzeylerinde bir plastik deformasyon çevrimine neden olur. Tekrarlanan yükleme durumu, yeni serbest yüzeylere ve yorulma çatlak başlangıcının devam etmesine neden olur. Çatlak başlangıcı periyodu malzemenin yüzey koşullarına bağlıdır.

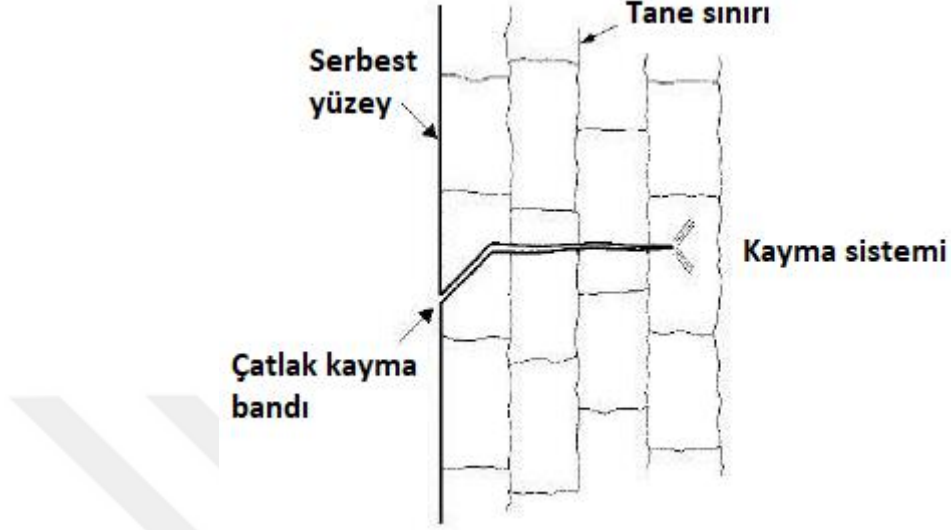


Şekil 2.10. Çevrimsel kayma ile çatlak başlangıcı [25].

2.3.1.2. Çatlak İlerlemesi

Mikro yapı ölçeğinde tane kayma bantlarının serbest yüzeylerinde başlayan yorulma çatlakları, gerilme şiddetinin yükselmesi gibi bir rol oynamakta ve bu yük koşullarında kayma düzlemi yönünde çatlaklarının büyümesine neden olmaktadır. Kayma bandı yönünde çatlak ilerlemesine birinci aşama ilerleme denir. Aşama 2, maksimum gerilme yönünde normal bir şekilde ilerlemeye başlayan kayma bantları

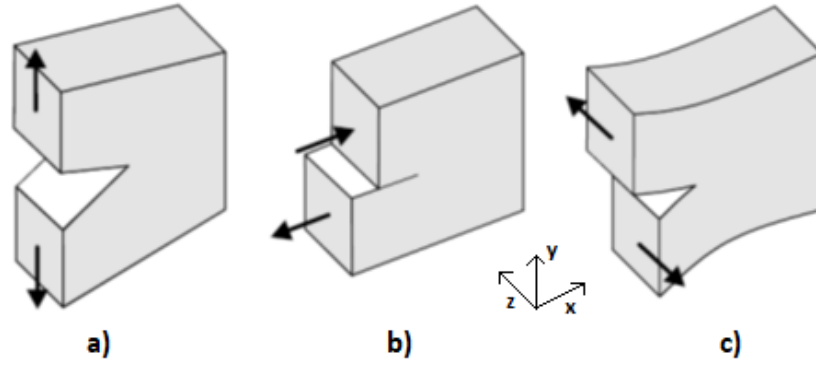
boyunca ilerlemiş çatlaklar olarak tanımlanabilir. Yorulma çatlak ilerlemesinin gösterilmesi Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Mikro ölçekte çatlak ilerlemesi [25].

2.3.1.3. Nihai Kırılma

Malzeme boyunca çatlakların ilerlemesi halinde kesit alanı azalır, çevrimsel yüklemde uygulanan kuvvet gerilme sınırlarını aşar ve sünek veya gevrek kırılma meydana gelir [25]. Kırılma modları Şekil 3.5’te şematik olarak görülebilen 3 ana gruba ayrılabilir. Yükleme yönü ve malzemenin cevabı sınıflandırmada dikkate alınmıştır. Mod I (açma modu), malzemenin y yönündeki çekme kuvvetleri ile yüklendiği ve çatlak yüzeylerinin aynı yönde çekildiği durumu gösterir. Mod II’de (kayma modu), malzeme çatlak yüzeylerine paralel olan kesme kuvvetleri ile yüklenir. Çatlak yüzeyleri x yönünde birbirinin üzerine kaymaktadır. Mod III (yırılma modu), malzeme z yönündeki kesme kuvvetleri ile yüklenir. Çatlak yüzeyleri, yükleme yönünde birbirinin üzerinden kayar.



Şekil 2.12. Kırılma modları a. Mod I b. Mod II c. Mod III. [26].

2.3.2. Farklı Yükleme Koşullarında Yorulma Gerilmeleri

Yorulma testi, farklı gerilme ve gerinim koşullarında tanımlanabilir. Yük koşullarındaki yorulma gerilmeleri, ortalama gerilme ve gerilme oranı değerlerine dayanarak sınıflandırılabilir.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.1)$$

Burada σ_a gerilme genliği, σ_{\max} maksimum çevrimsel yükleme sırasında oluşan maksimum gerilme ve σ_{\min} çevrimsel yükleme sırasında oluşan minimum gerilmedir.

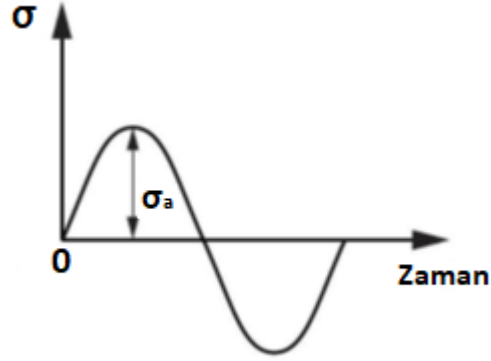
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.2)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.3)$$

Burada σ_m ortalama gerilme değeri ve R sayısı; “gerilme oranı” olarak gösterilmektedir [25].

2.3.2.1. Tam Değişken Yükleme

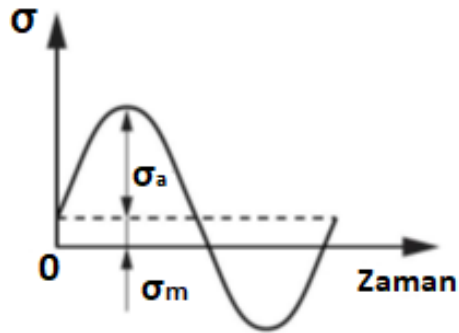
$\sigma_m = 0$ ve $R = -1$ durumu tamamen dönen yük koşulları olarak tanımlanabilir. Genellikle dönen eğme testi prosedürü deneysel inceleme için kullanılır. σ_a ve σ_m yük koşullarında gerilme genliği ve ortalama gerilme değeridir.



Şekil 2.13. Tamamen dönen yükleme [25].

2.3.2.2. Çekme Basma Yüklemesi

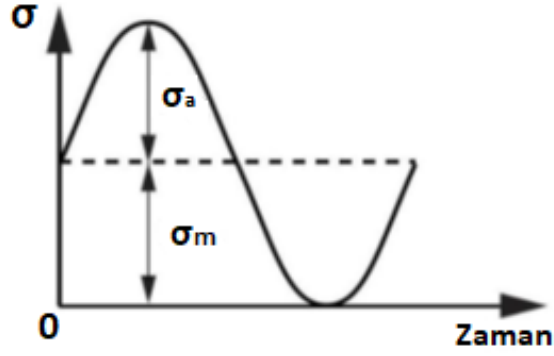
Çekme basma yükleme, ortalama gerilimin üstünde genlik gerilmeleri olarak tanımlanabilir. Ortalama gerilme değeri, yükleme esnasında pozitif bir değere karşılık gelir.



Şekil 2.14. Çekme basma yükleme [25].

2.3.2.3. Tekrarlanan Gerilme

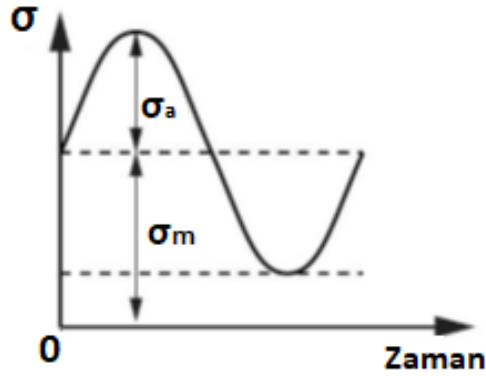
Tekrarlanan gerilme, $\sigma_{\min} = 0$ ve σ_m değeri pozitif bir aralıkta olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.15. Tekrarlı gerilme [25].

2.3.2.4. Alternatif Gerilme

σ_a ve σ_m pozitif bölgede olduğu yükleme durumudur.

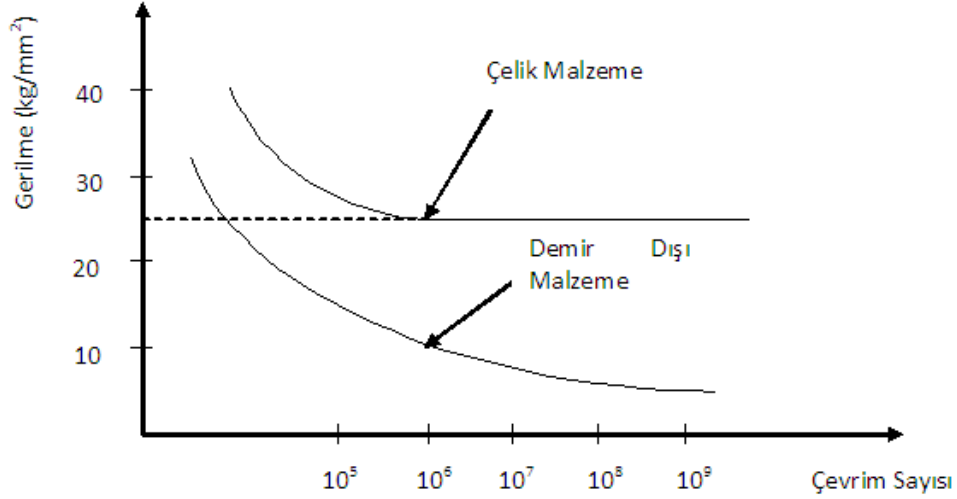


Şekil 2.16. Alternatif gerilme [25].

2.3.3. S-N Diyagramı (Wöhler Diyagramı)

S-N diyagramı, farklı sabit gerilmeler altında iş parçasının kaç çevrim de kırılacağını gösteren bağıntıyı verir. S-N eğrisinin elde edilmesi için çoğunlukla birden fazla benzer numune kullanılır. Ortalama gerilme (σ_m) sabit kalacak şekilde numunelerin

her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Gerilme genliği (σ_a) deneylerin tamamında deney süresi boyunca sabit tutulur.



Şekil 2.17. Çelik/Demir dışı malzemelerin gerilme-çevrim sayısı grafiği [19].

2.3.3.1. Yorulma Ömrü

Tekrarlı yükleme koşullarında malzemenin yorulma hasarına uğramaksızın dayanabileceği maksimum çevrim sayısı malzemenin o yükleme durumundaki yorulma ömrünü göstermektedir. Bir malzemenin yorulma ömrü zamandan bağımsızdır. Yorulma ömrü, periyodik zorlanmalara bağlı olarak ve yükün şiddeti ile değişmektedir. Çelik ve Titanyum alaşımı malzemeler belirli bir yorulma ömür değerinin altında sonsuz çevrim sayısında bile kırılmazlar. Sonsuz ömrün ortaya çıktığı bu gerilme değeri yorulma sınırı olarak ifade edilmektedir. Mg ve Bakır alaşımı gibi diğer alaşım malzemeleri ile beton türü malzemelerde ise bir yorulma sınırı söz konusu değildir. Bu tür malzemeler için yorulma dayanımı tanımı yapılır. Uygulanan yük ne kadar düşürülse de bu tür malzemeler belli bir çevrim sayısından sonra yorulma hasarına uğrarlar [19].

2.4. ARTIK GERİLME

2.4.1. Artık Gerilme

Artık gerilmeler, harici yüklerin kaldırılmasından sonra iş parçasındaki iç gerilmelerin varlığı olarak tanımlanır. Çalışmakta bulunan herhangi bir malzeme, az ya da çok artık gerilmeye sahiptir ve hiçbir zaman gerilmeden bağımsız bir durumu göstermez. Böylece artık gerilmelerin malzemenin performansı üzerinde önemli etkisi vardır.

Artık gerilmelerin oluşum mekanizması birçok farklı olaydan kaynaklanmaktadır. Yapısal uyumsuzluk ve termal ve plastik gerilmeler gibi elastik olmayan gerilmelerin tekdüze olmayan dağılımı, oluşum mekanizmasının arkasında yaygın bir durumdur. Temel olarak, uygulanan üretim yöntemi, malzemenin mikroyapısı ve aşınma gibi maruz kalınan işlem, iç gerilmelerin ortaya çıkmasının başlıca nedenleridir. Artık gerilmeler, birkaç tane arasında, tek bir tanede veya duruma bağlı olarak bir noktada oluşur. Artık gerilmelerin neden olduğu iç kuvvetler, etkilenen bölge boyunca bir dengede bulunmaktadır. Herhangi bir harici müdahale durumunda, artık gerilmelerin türüne bağlı olarak denge bozulabilir.

Talaşlı imalat sırasında, üretilen artık gerilmeler pozitif veya negatif olabilir ve iç gerilmeler, malzemenin gerilme korozyon direnci ve yorulma performansı açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, ilerleme hızı veya kesme hızı gibi işleme parametreleri, maksimum performansa ulaşmak için optimize edilmelidir [28]. Artık gerilmeler, basma veya çekme olabilir ve çatlak başlangıcını teşvik edebilir veya geciktirebilir, yorulma sırasında çatlak ilerlemesini hızlandırabilir veya yavaşlatabilir. Basma artık gerilmesinin yorulma ömrünün uzaması açısından faydalı olduğu bilinmektedir. Çekme gerilmesinin ise yıkıcı olduğu bilinir. Artık gerilmeler makro ve mikro ölçekli gerilmeler olarak alt gruplara ayrılabilir. Makro skala artık gerilmeler çok sayıda tane üzerinde etkili olurken, mikro ölçekli gerilmeler sadece tek bir tane veya kristal kafes üzerinde geçerlidir. Makro ölçek artık gerilmeler, servis sırasında bileşen üzerinde uygulanan gerilmelere eklenir. Ortaya çıkan

gerilme, çekme veya basma olabilir. Fakat eğer elastik sınır deformasyonu aşarsa, bu sayede kazanç oluşur. Artık gerilmeler, malzemenin elastik sınırıyla sınırlıdır.

Mekanik, termal, kimyasal etkiler bileşenlerde artık gerilmeler oluşturabilir. Isıl işlem, korozyon ve çeşitli yüzey işlemleri sırasında şekillendirme ve işleme, termal gradyanlar ve faz dönüşümleri sırasında homojen olmayan plastik deformasyonlar, artık gerilme dağılımında değişikliklere neden olabilir. Hemen hemen tüm üretim süreçleri ve işlemleri, bileşenlere artık gerilmeler getirmektedir [29].

Bilyalı dövme veya indüksiyonla sertleştirme, basma artık gerilmelerin oluşmasına neden olur ve çatlak oluşumunu önleyerek alternatif yükleme altında malzemenin yorulma ömrünü artırır. Bilyalı dövmede, artık gerilmenin büyüklüğü, uygulanan işlemin derinliği ile değişir. Artık gerilme büyüklüğü, bilyalı dövme işlemi sırasında malzemenin akma dayanımının yarısına kadar ölçülebilir.

Malzemenin işlem derinliği, birkaç bilyalı dövme parametresine bağlıdır. Ayrıca, bu parametrelerin etkisi malzeme özelliklerine bağlı olarak değişir.

Yüzey sertleştirme, malzemenin yüzeyinde oluşan basma artık gerilmeden dolayı yorulma ömründe artış sağlar. Benzer şekilde, honlama, parlatma gibi bazı yüzey bitirme işlemleri, malzemenin yorulma ömrünü arttıran yüzeydeki süreksizliklerden kurtulmayı sağlar. Soğuk çalışma işlemi olarak; bilyalı dövme, bileşenin yüzeyinde basma artık gerilmeyi koruduğu için faydalı bir işlemdir. Yorulma çatlağının malzemenin yüzeyinde başladığı iyi bilinmektedir. Bu nedenle, bilyalı dövme malzemenin yorulma ömrünü ciddi şekilde artırır.

Bileşenin yorulma özellikleri, EDİ (Elektro-Deşarj İşleme), taşlama, kaynaklama gibi üretim işlemlerinden büyük ölçüde etkilenir. Ayrıca, bileşenin yorulma ömrü yüzey pürüzlülüğünden de ciddi şekilde etkilenir. Örneğin, EDİ işlemi, bu tabakada gevrek ve yorulma çatlağı oluşturan ve daha sonra malzemenin içinde yayılan yeniden birleştirme tabakası üreterek malzemenin yüzeyinde çekme artık gerilmesini tutabilir; Sonuç olarak, bileşenin yorulma ömrü üzerinde zararlı etkilere neden olur [28].

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. MALZEME SEÇİMİ

Alüminyum alaşımları, yüksek mukavemet, korozyon direnci ve aşınma direnci gibi yüksek mekanik özelliklere sahiptir ve hafiftir, bu özelliklerde onu otomotiv sanayisi ve havacılık uygulamaları için yaygın olarak kullanılabilir yapmaktadır. Bu çalışmada ABD, UNYM ve çift katmanlı yüzey işlemleri için ve otomotiv ve havacılık sanayisinde kullanılan AA7075 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. İncelenen malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 3.1'de, mekanik özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. AA7075-T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,05	0,12	1,40	0,05	2,3	0,15	5,60	0,05	

Tablo 3.2. AA7075-T6 alüminyum alaşımının temperleme koşulu ve mekanik özellikleri.

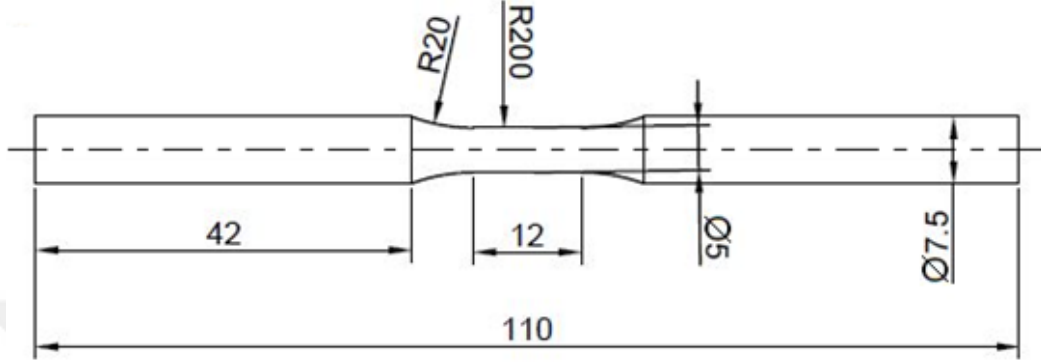
Yaşlandırma koşulu	Akma dayanımı MPa	Çekme dayanımı MPa	Uzama %	Sertlik HB
T6	490	560	10	155

3.2. NUMUNE HAZIRLAMA

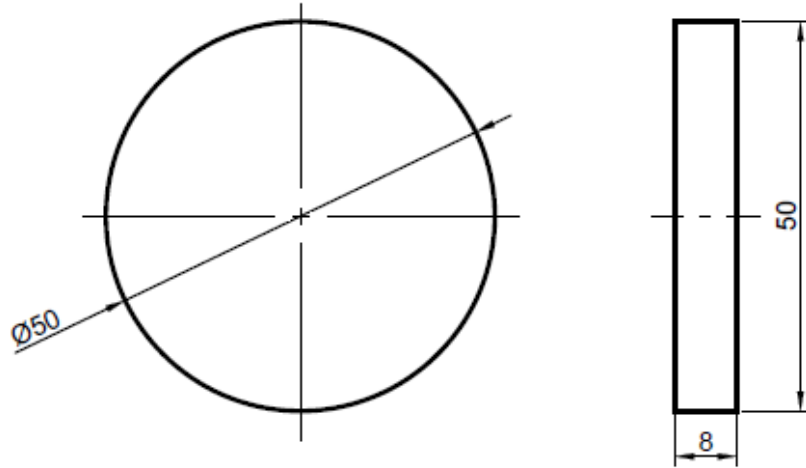
Deneysel çalışma için belirlenen AA7075 alüminyum alaşımından yorulma ve aşınma testi için sırasıyla 20 adet ve 8 adet numune hazırlanmıştır. Numunelerin teknik resimleri şekil 3.1.a ve şekil 3.1.b de gösterilmiştir. Şekil 3.2.a ve şekil 3.2.b

de sırasıyla ABD, UNYM, ABD sonrası UNYM ve UNYM sonrası ABD işlemleri öncesi AA7075 alüminyum alaşımları yorulma ve aşınma numuneleri gösterilmektedir.

a)

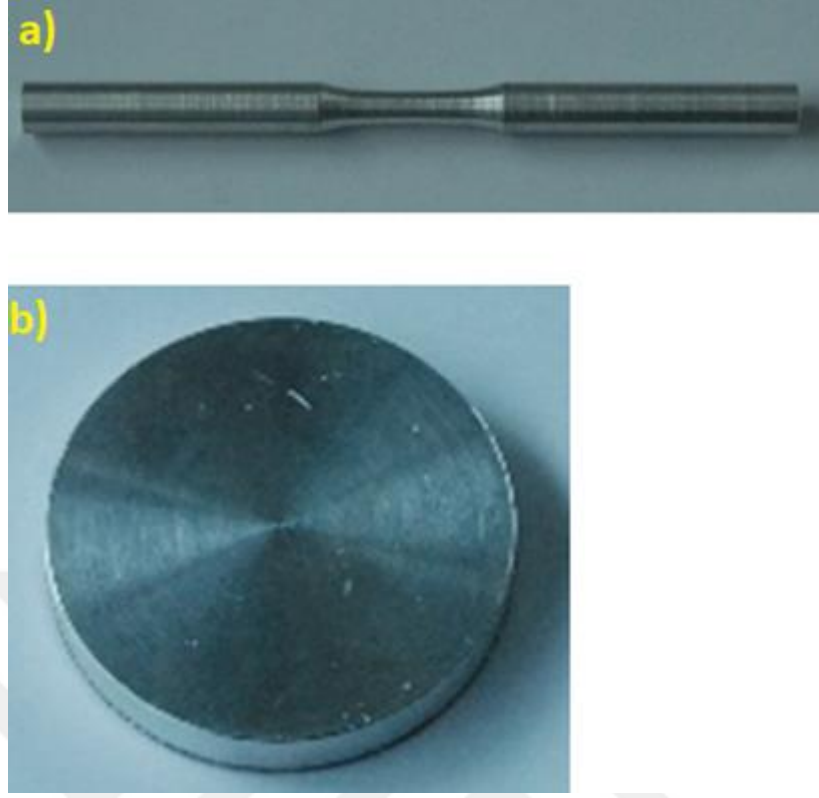


b)



Tüm ölçüler mm'dir

Şekil 3.1. a) Yorulma ve b) aşınma numuneleri teknik resimleri.



Şekil 3.2. İşlem görmemiş AA7075 alüminyum alaşımı a) yorulma ve b) aşınma numuneleri.

3.2.1. Mekanik Yüzey İşlemlerinin Uygulanması

Farklı tip mekanik yüzey işlemlerinin gerek bireysel gerekse de ardışık olarak uygulanmasının AA7075 alaşımlarının mekanik ve mikro yapı özelliklerine olan etkisi çalışmanın temel hedefini oluşturduğundan ABD, UNYM ve her ikisinin kombinasyonunun uygulanması planlanmıştır.

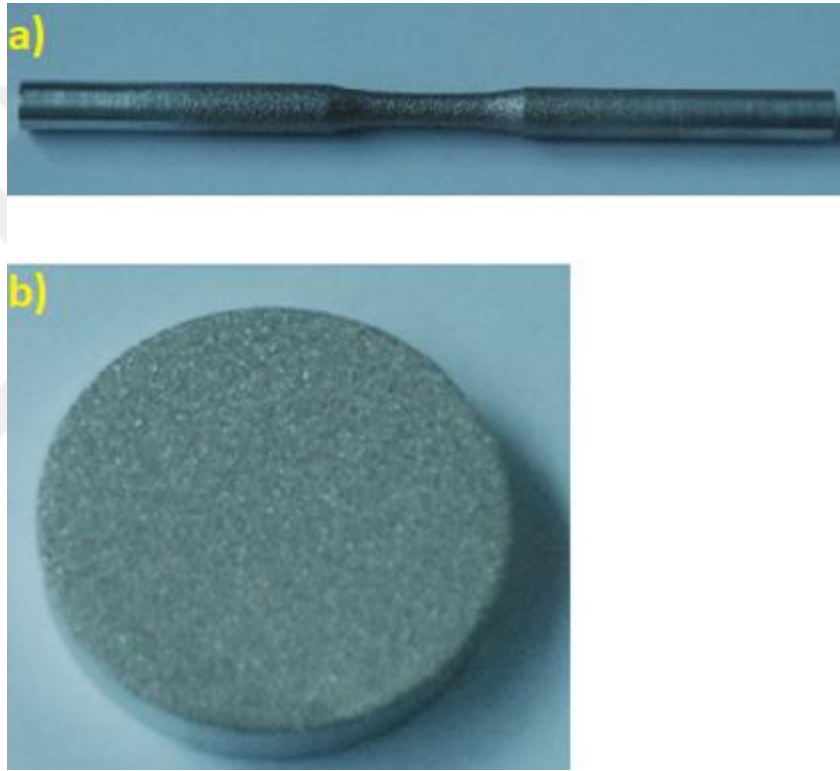
3.2.1.1. Aşırı Bilyalı Dövme İşlemi (ABD) parametrelerinin belirlenmesi

Deney malzemesinin yüzeyinde ince taneli bir yapı oluşturmak için aşırı bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Aşırı bilyalı dövme işleminde basınçlı hava ile bilya püskürten sistem kullanılmıştır. Aşırı bilyalı dövme işlemi 300 mm nozul mesafesi ve 90° nozul açısı ile kapalı bir odada gerçekleştirilmiştir. Tablo 3 de aşırı bilyalı dövme şartları gösterilmektedir. Şekil 5.5. ve şekil 5.6. da sırasıyla aşırı bilyalı

dövülmüş AA7075-T6 alüminyum alaşımı yorulma numunesi ve aşırı bilyalı dövülmüş AA7075-T6 alüminyum alaşımı aşınma numunesi gösterilmektedir.

Tablo 3.3. Aşırı bilyalı dövme şartları.

Almen yoğunluğu	Bilya çapı	Doyurma oranı (%)	Süre (sn)	Basınç kPa (psi)	Ark yüksekliği (mm)
20A	S230	200	15	45	0,20



Şekil 3.3. Aşırı bilyalı dövülmüş AA7075 alüminyum alaşımı a) yorulma ve b) aşınma numunesi.

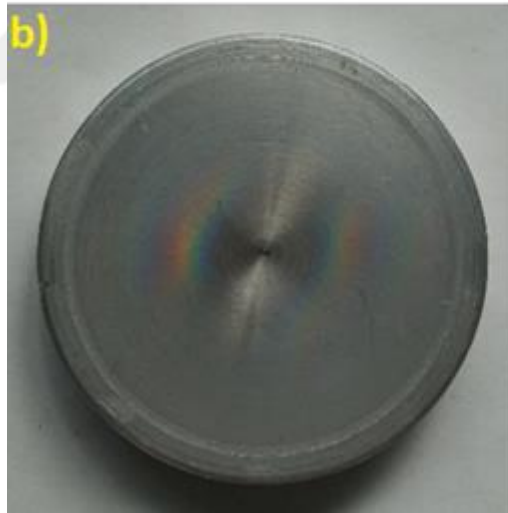
3.2.1.2. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu (UNYM) Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, UNYM tekniği, ultrasonik bir boruya bağlı olan bir WC uç ile numune yüzeyine saniyede 20.000 kez vurarak AA7075 alüminyum alaşımının üst yüzeyinde nano yapılı bir yüzey tabakası oluşturulmuştur. Her bir numune 2000 mm/dak'lık bir hızla karşılıklı olarak hareket eden esnek bir imalat sistemi taşıyıcısı üzerinde

manyetik bir levhaya yerleştirilmiştir. Tablo 3.4 de UNYM işlem şartları gösterilmektedir. Şekil 3.4 a) UNYM işlemine maruz kalmış AA7075-T6 alüminyum alaşımı yorulma numunesi ve Şekil 3.4 b) UNYM işlemine maruz kalmış AA7075-T6 alüminyum alaşımı aşınma numunesi gösterilmektedir.

Tablo 3.4. UNYM işlem şartları.

Frekans (kHz)	Genlik (μm)	Hız (mm/dak)	Yük (N)	İlerleme hızı (μm)	Bilya çapı (mm)	Bilya malzemesi
20	30	2000	30	70	2,38	WC

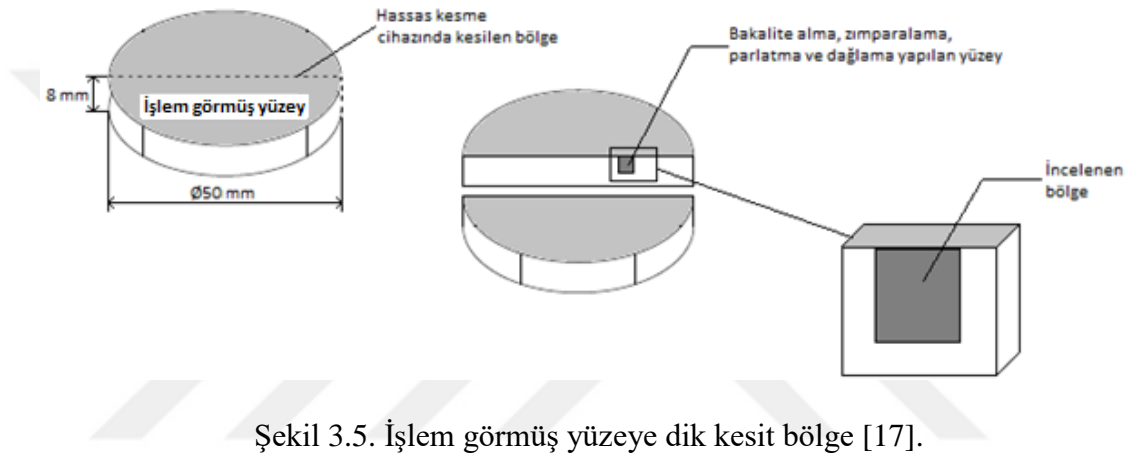


Şekil 3.4. UNYM işlemi görmüş AA7075 alüminyum alaşımı a) yorulma ve b) aşınma numunesi.

3.3. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

Bu deneysel çalışmada mikroyapısal olarak malzeme yüzeyinde ve yüzeyin altında yüzey işlemleri sonrası değişimi belirleyebilmektedir. ABD, UNYM işlemi, ABD

sonrası UNYM işlemi ve UNYM sonrası ABD işlemi uygulandıktan sonra malzeme yüzeyinde ve yüzeyin altındaki tabakada ince taneli bir yapı oluşması beklenmektedir. Mikro yapı karakterizasyonu optik mikroskop, SEM ve X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile gerçekleştirilmiştir. ABD, UNYM işlemi, ABD sonrası UNYM işlemi ve UNYM sonrası ABD işlemi yapılan AA7075 alüminyum alaşımının işlem görmüş yüzeye dik kesit bölgeden ve işlem görmüş yüzeyden optik ve sem görüntülerine bakılmıştır. İşlem görmüş AA7075 alüminyum alaşımının işlem görmüş yüzeye dik kesit bölgesi Şekil 3.5 de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.5. İşlem görmüş yüzeye dik kesit bölge [17].

ABD işlemine, UNYM işlemine, ABD sonrası UNYM işlemine ve UNYM sonrası ABD işlemine tabi tutulmuş numuneler, 120-2000 kalite SiC zımpara kağıtları ile zımparalama işlemine maruz bırakılmış ve mikroyapı analizi için 6, 3 ve 1 mikron elmas süspansiyonlarla parlatılmıştır. Mikro yapı görüntülerini elde etmede Nikon Eclipse MA 200 mikroskobundan ve Carl Zeiss Ultra Plus taramalı elektron mikroskobundan (SEM) cihazından yararlanılmıştır.

3.4. XRD ANALİZİ

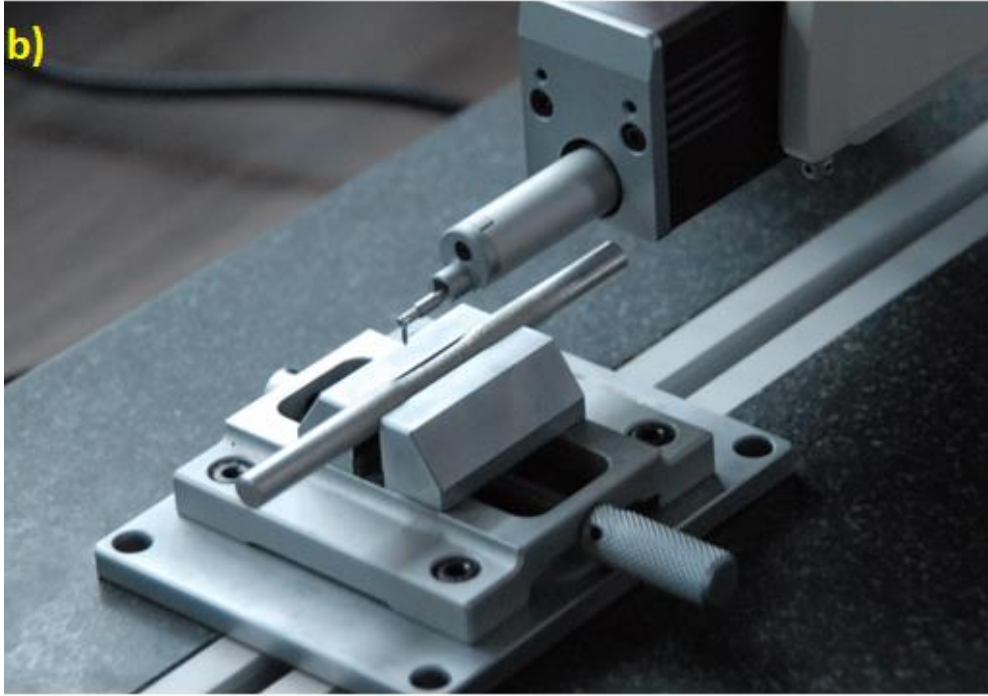
X-ışını kırınım analizi, Rigaku Ultima IV cihazı tarafından gerçekleştirilmiştir ve FWHM ölçümleri, MATLAB R2015b Yazılım programı ile ilişkilendirilmiştir. X-ışını kırınım analizi 40kV jeneratör voltajı ve 40 mA akım ile gerçekleştirilmiştir. X-ışını kırınımı, 10 ° ve 90° arasındaki açılarda, 0,02 ° 'lik bir adım tarama büyüklüğü ile dakikada 3 derece bir hızda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. XRD cihazı.

3.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİ

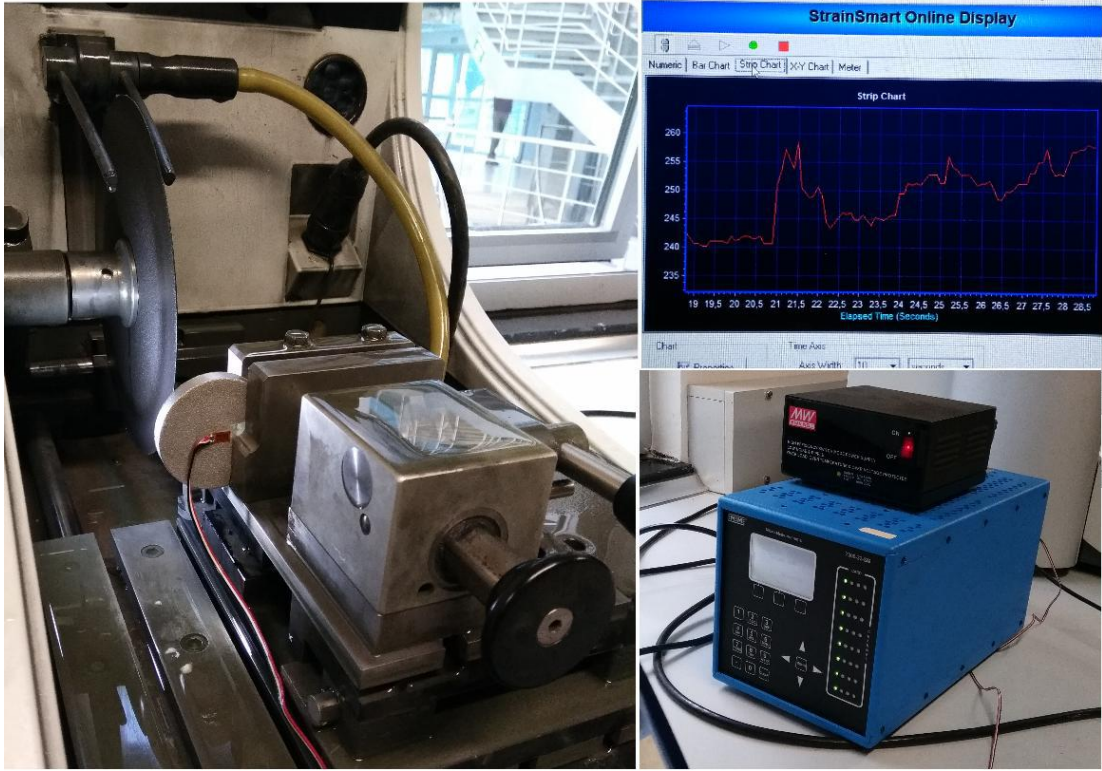
Sürtünme, aşınma ve yorulma özelliklerini ayrıntılı olarak analiz etmek için farklı testler gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Pürüzlülük testleri Mitotoyo yüzey pürüzlülük test cihazı kullanılarak yapılmış olup, Ra, Rq ve Rt, 3 farklı nokta ölçümünün aritmetik ortalaması ile değerlendirilmiştir. Şekil 3.7’de a) aşınma ve b) yorulma numunesi için pürüzlülük ölçümleri gösterilmektedir.



Şekil 3.7. a) Aşınma ve b) yorulma numunesi pürüzlülük ölçümleri.

3.6. ARTIK GERİLME ÖLÇÜMÜ

Kalıntı gerilme ölçümleri, yüksek hassasiyetli kesme yöntemi ile, sadece işlem yapılan yüzey üzerindeki gerinim ölçer eklenerek diskin ağırlığı ile gerçekleştirilmiştir. Gerinim ölçer örneklerin merkezine yerleştirilmiş olup gerinim değişimi okunması ve Hooke yasasının kullanılması ile hesaplanmıştır. Gerinim ölçüm kurulumu Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Gerinim ve kalıntı gerilme ölçümünün deneysel kurulumu.

3.7. AŞINMA TESTİ

Aşınma özelliklerini belirlemek için bir pistonlu UTS tribometre test makinesi kullanılmıştır. Şekil 3.9’da aşınma test ünitesi gösterilmektedir. İşlem görmemiş ve mekanik yüzey işlemleri yapılmış AA7075 alüminyum alaşımlarına oda sıcaklığında kuru kayma koşullarında aşınma testleri yapılmış olup aşınma testleri, numunelerin yüzeylerine 10 mm’lik bir çapa sahip Al₂O₃ ve 52100 kalite çelik bilyeleri sürterek gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri için numunelere V=0,5 m/s sabit kayma hızında iki farklı yük (10 N ve 20 N) uygulanmıştır. Kayama mesafe sırasıyla 100 m,

200 m ve 1000 m olarak belirlenmiştir. Aşınma deneyinden sonra aşınma izleri taramalı elektron mikroskobu yardımıyla detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 3.9. Aşınma test ünitesi.

3.8. YORULMA TESTİ

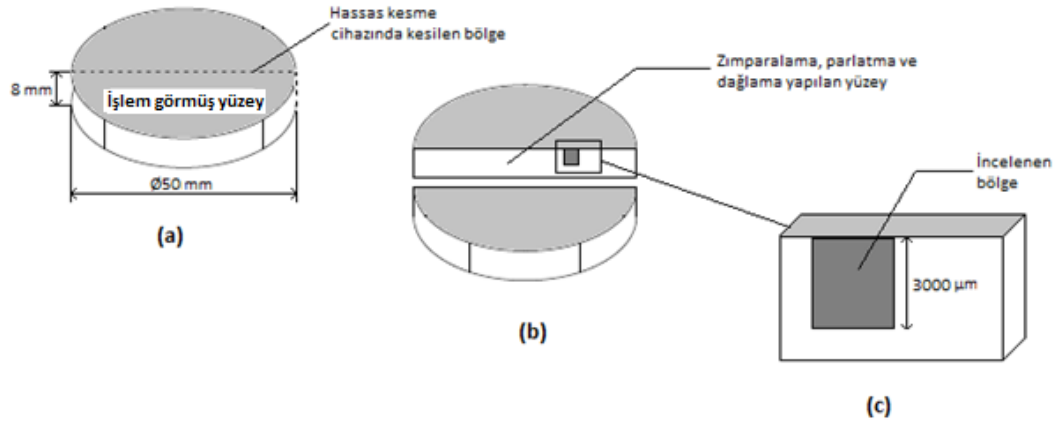
Eksenel yorulma davranışı 50 Hz frekanslı MTS Landmark Servo Hidrolik 100 kN dinamik test makinesi ve $R = -1$ gerilme oranı ile belirlenmiştir. Şekil 3.10'da yorulma test makinesi gösterilmektedir. Yorulma testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup tüm testler 10^7 çevrimde durdurulmuştur. S-N eğrileri, gerilme genliği ile çevrim sayısı (log) sayısına göre çizildi.



Şekil 3.10. Yorulma test makinesi.

3.9. MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ

ABD, UNYM, ABD sonrası UNYM ve UNYM sonrası ABD işlemi yapılan AA7075 alüminyum alaşımlarının işlem görmüş yüzey bölgesine dik kesit bölgeden, malzemenin yüzeyinden itibaren 200 μm aralıklarla 3000 μm uzaklığa kadar mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Şekil 3.11’de mikro sertlik ölçümünün yapıldığı yüzey bölgesi şematik olarak gösterilmiştir [17].



Şekil 3.11. Mikro sertlik ölçümünün yapıldığı yüzey bölgesi [17].

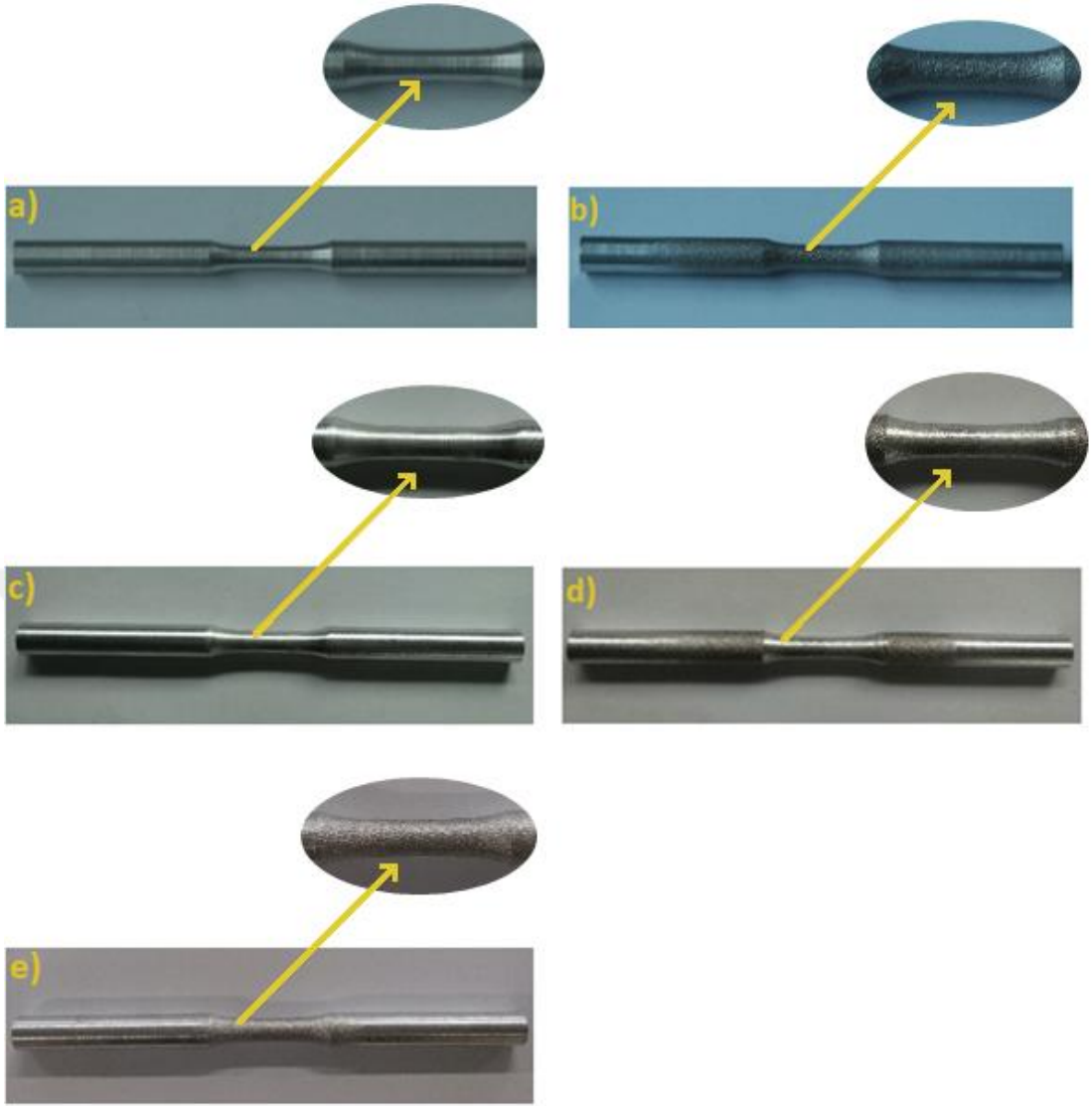
Mikro sertlik ölçümleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde, Q10 A+ QNESS Mikro sertlik cihazında yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri için uygulanan yük 5 N, uygulama zamanı 15 saniye olarak ayarlanmıştır. Mikro sertlik deneyinde Vickers uç kullanılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri, uygulanması istenen yük değerine ulaşıldığı zaman bekleme ve ardından yükü boşaltma şeklinde yapılmıştır.

BÖLÜM 4

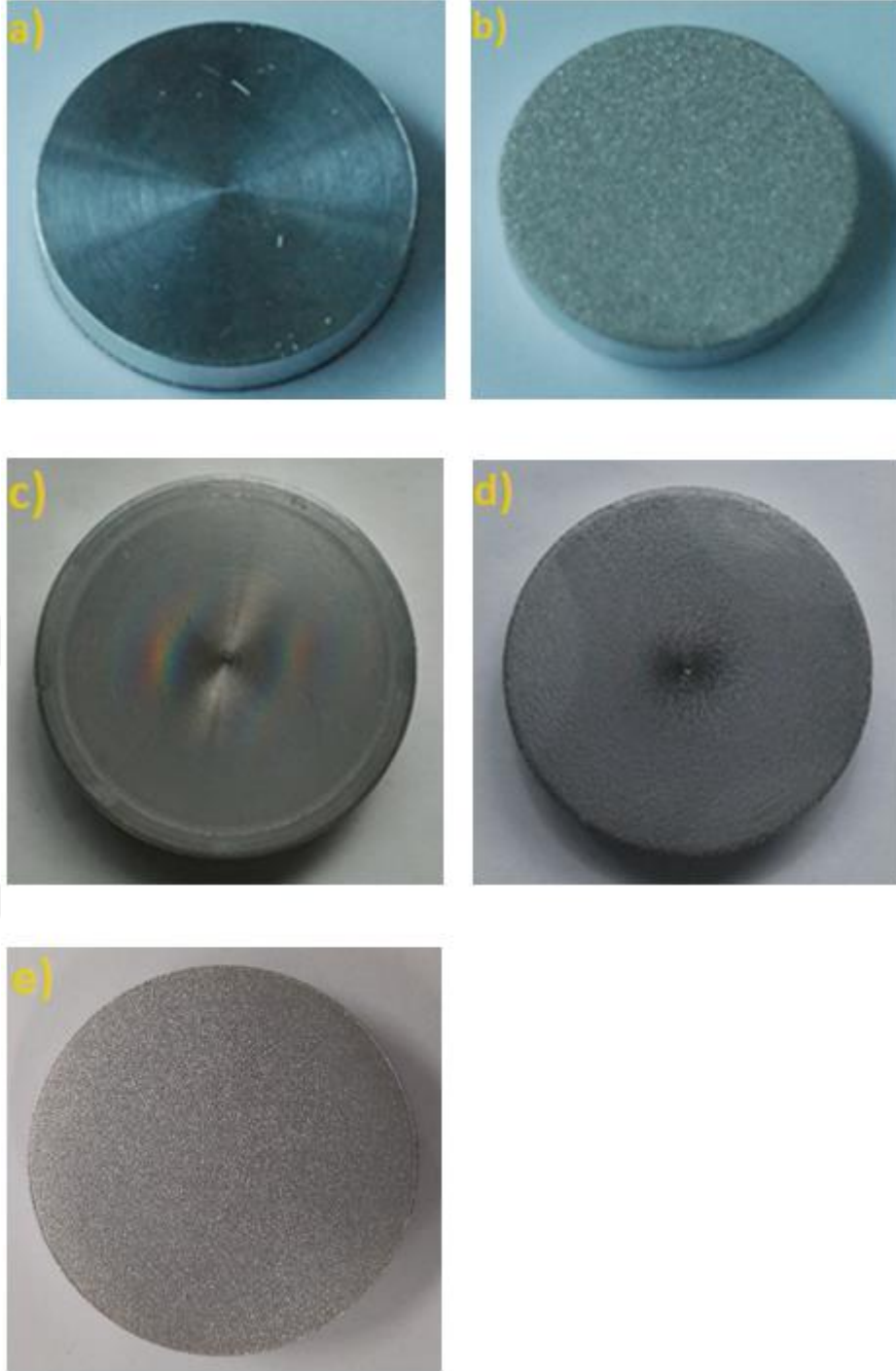
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. MİKROYAPI ANALİZİ

Mikro yapı detaylı analizlerinden önce numunelerin yüzeylerinde işlemler sonrası makro değişimler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 de verilmektedir. İşlem görmemiş numunenin talaşlı işlem sonrası takım izleri Şekil 4.1. a'da görülmektedir. Yorulma numunesi olması dolayısıyla yüzey son pasoda hassas işlenmiştir. $R_a = 0,926$ mertebesinde dir. Şekil 4.1. b'de de görüldüğü gibi ABD'de talaş izlerinin tamamıyla kaybolduğu yüzeyin bilya ile dövülmesi sonucu tümsek ve çukurcukların oluştuğu, kısmi deformasyonların varlığı dikkat çekmiştir. UNYM talaş izlerinin ultrasonik frekansla darbeleyen probun hareket izlerinin varlığı dikkat çekmiştir (Şekil 4.1.c). ABD sonrası UNYM'de (Şekil 4.1.d), ABD de meydana gelen morfoloji değişimlerinin kaybolduğu prob izlerinin baskın hale geldiği gözlemlenmektedir. UNYM sonrası ABD'de, ABD'de oluşan tümsek ve çukurcuklara göre daha düşük oranlarda tümsek ve çukurcuklar oluşmuştur (Şekil 4.1.e).



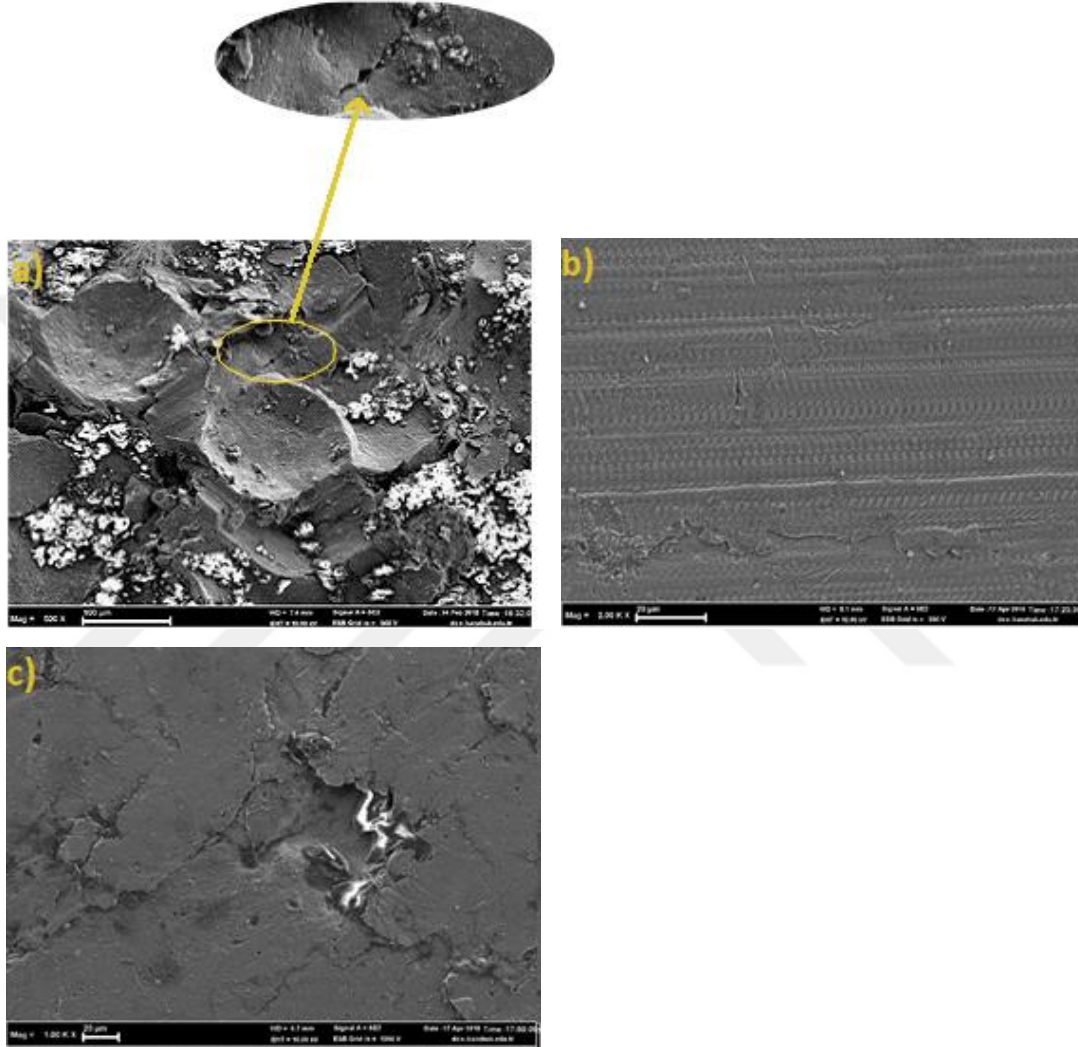
Şekil 4.1. a) İşlem görmemiş, b) ABD, c) UNYM, d) ABD + UNYM ve e) UNYM + ABD yorulma numuneleri fotoğrafları.



Şekil 4.2. a) İşlem görmemiş, b) ABD, c) UNYM, d) ABD + UNYM ve e) UNYM + ABD yorulma numuneleri fotoğrafları.

20A şiddetinde dövülmüş AA7075 alüminyum alaşımının yüzeyinde çukur, tümsek vb. oluşumların varlığı, dövme işleminin bölgesel mikro çatlakların oluşumuna sebep olduğu dikkat çekmiştir (Şekil 4.3.a). UNYM’de, ultrasonik frekansla darbeleyen probun hareket izlerinin malzemenin yüzeyinde homojen bir şekilde dağıldığı

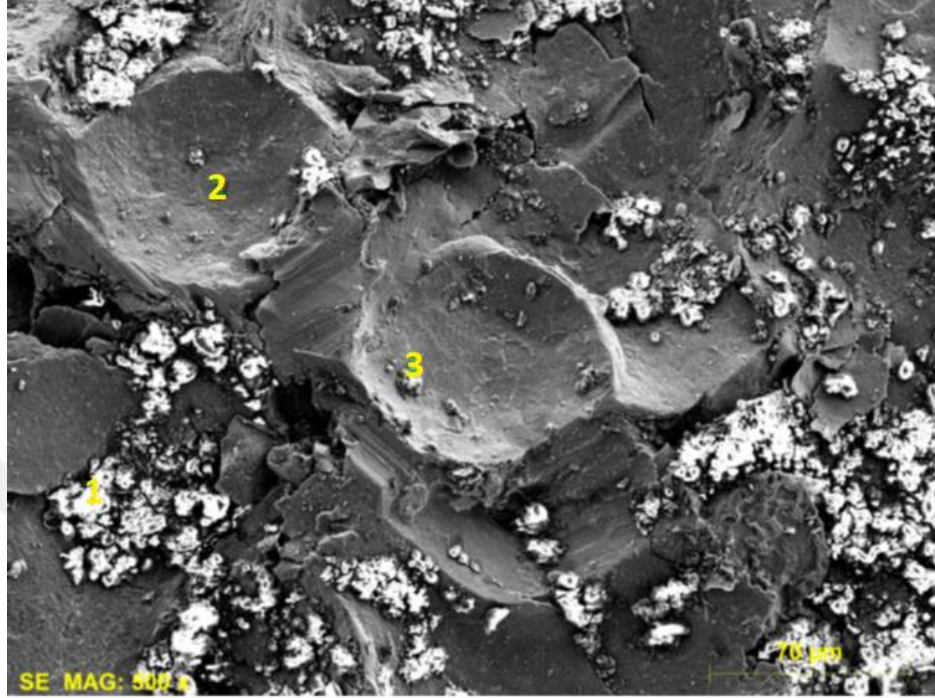
gözlemlenmektedir (Şekil 4.3.b). ABD sonrası UNYM işleminde, yüzey morfolojisinin düzeldiği yani çukur ve tümseklerin prob vasıtasıyla kapatıldığı fakat tabaka farklılıklarının halen daha kaldığı, mikron seviyelerini aşacak çatlakların halen var olduğu, görülmektedir (Şekil 4.3.c).



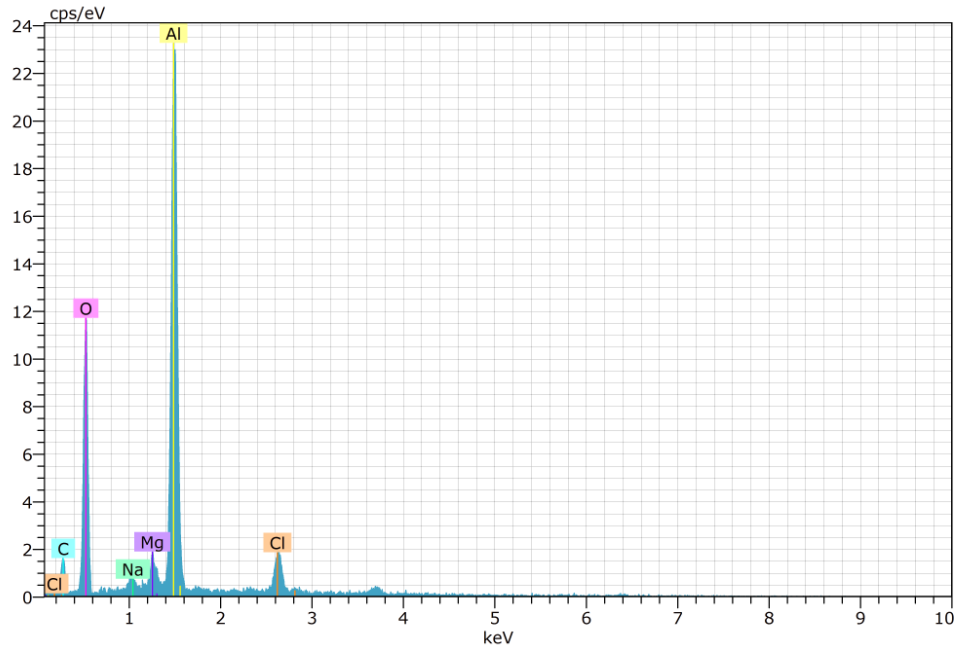
Şekil 4.3. Aşınma numunesi yüzey sem görüntüleri a) ABD, b) UNYM ve c) ABD + UNYM.

Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 sırasıyla EDAX analizinin yapıldığı yüzeyi, 1. noktada, 2. noktada ve 3. noktada oluşan pikleri göstermektedir. Malzemelerin yüzeyinden 3 farklı noktadan yapılan EDAX analizlerine göre kompozisyona uygun olarak 'Al' elementinin yoğunluğu göze çarpmakta aynı zamanda 'O' elementi de baskın pik oluşturmaktadır. Yüzeyde Al-O etkileşimi

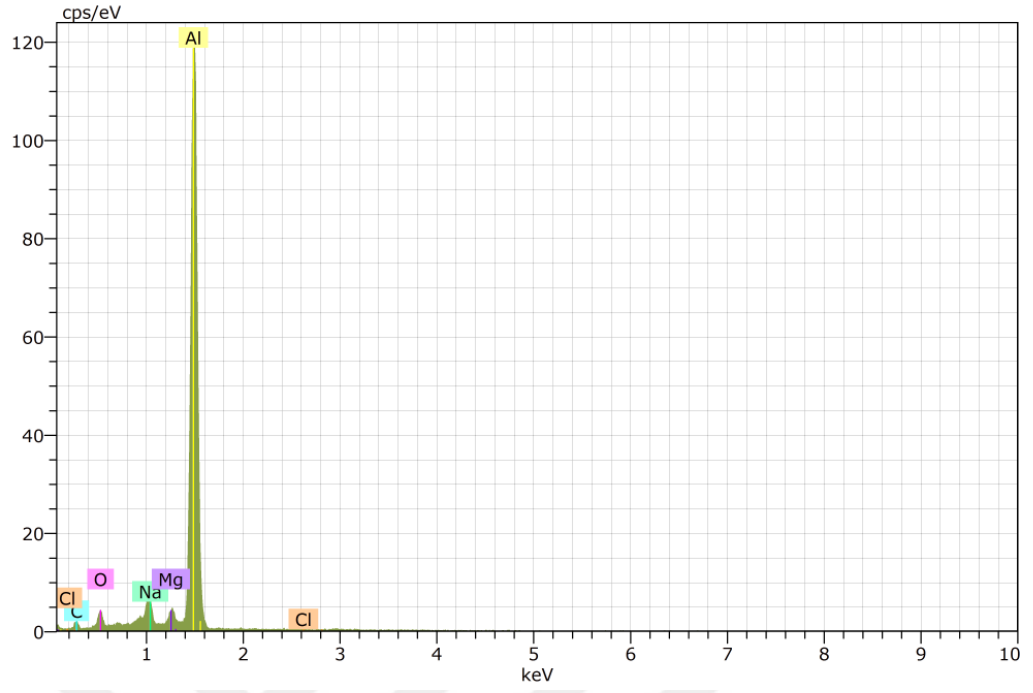
olduğu kuvvetle muhtemel olup Al_2O_3 (alüminyum oksit) bileşiği olduğu hususu üzerinde durulmaktadır.



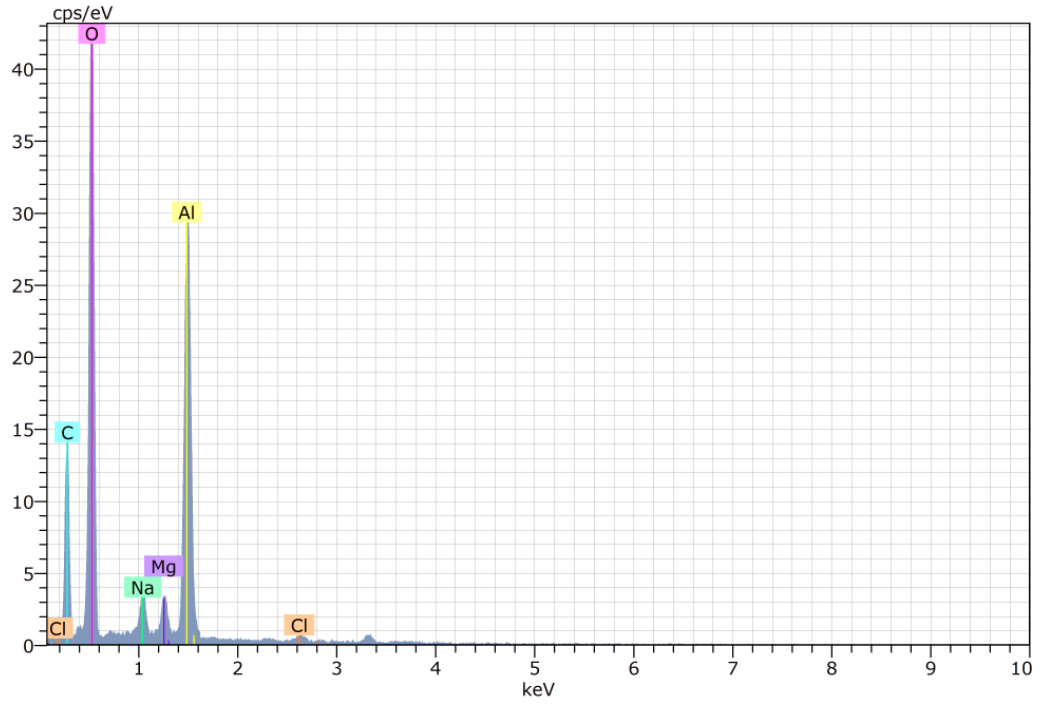
Şekil 4.4. ABD numunesi EDAX analizi.



Şekil 4.5. 1. noktada oluşan piklerin grafiği.



Şekil 4.6. 2. noktada oluşan piklerin grafiği.

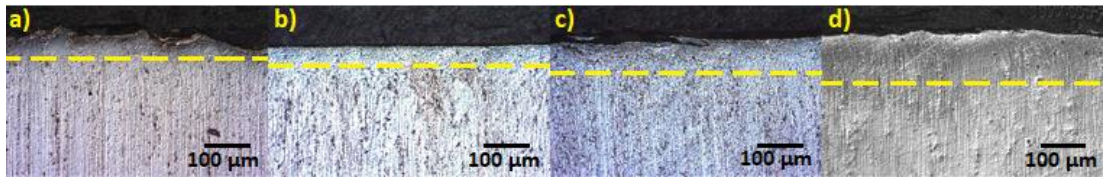


Şekil 4.7. 3. noktada oluşan piklerin grafiği.

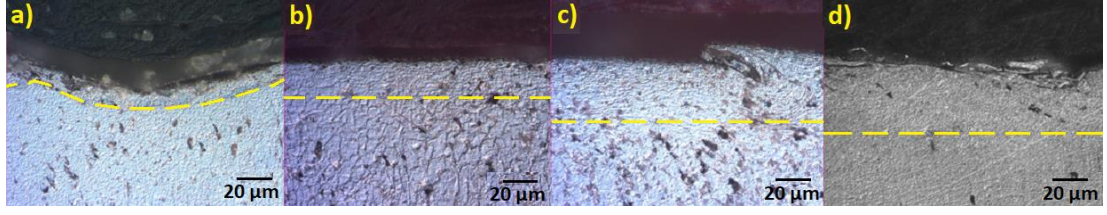
Tablo 4.1. EDAX analiz sonuçları.

Spektrum	C	O	Na	Mg	Al	Cl
1	12,05	35,02	0,58	2,03	43,19	7,13
2	7,70	4,84	3,51	2,17	81,73	0,05
3	23,24	49,88	2,39	2,01	21,92	0,55
Ortalama değer	14,33	29,92	2,16	2,07	48,94	2,58
Sigma	8,02	22,95	1,48	0,08	30,32	3,95
Sigma ortalama	4,63	13,25	0,85	0,05	17,50	2,28

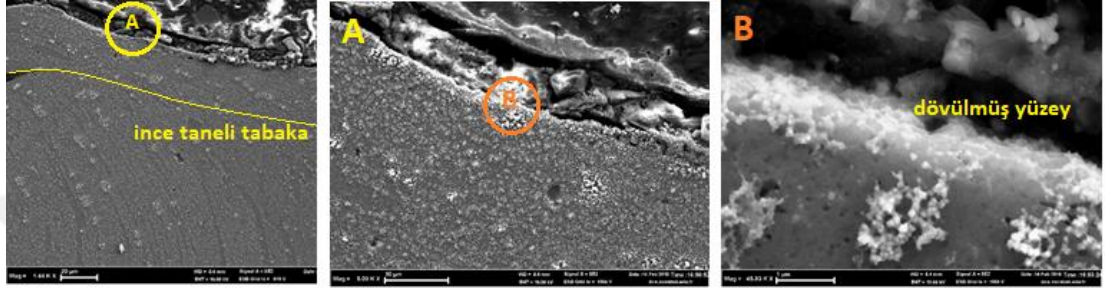
Kesit yüzeyden işlemler sonrası optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.8 de gösterilmektedir. Aşırı bilyalı dövmenin tek başına veya son işlem olarak uygulandığında malzemenin yüzey morfolojisini bozduğu, bunun aksine UNYM de yüzey bütünlüğünün korunduğu, UNYM işleminin deformasyondan etkilenen tabaka kalınlığını arttırdığı, en derin deforme edilmiş tabakanın UNYM+ABD olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.9 de deformasyondan etkilenen tabakada belirgin ikincil fazların küçüldüğü, yönelimlerin kaybolduğu dikkat çekmektedir. Bunun yanında ABD sonra belirgin mikro çatlakların oluştuğu, ABD sonrası mikro çatlakların (Şekil 4.10) SEM görüntülerinde belirginleştiği, yüzey morfolojisinin ABD işleminden olumsuz etkilendiği, UNYM de (Şekil 4.11) nispeten mikro çatlakların oluşmadığı yüzey bütünlüğünün korunduğu gözlemlenmektedir.



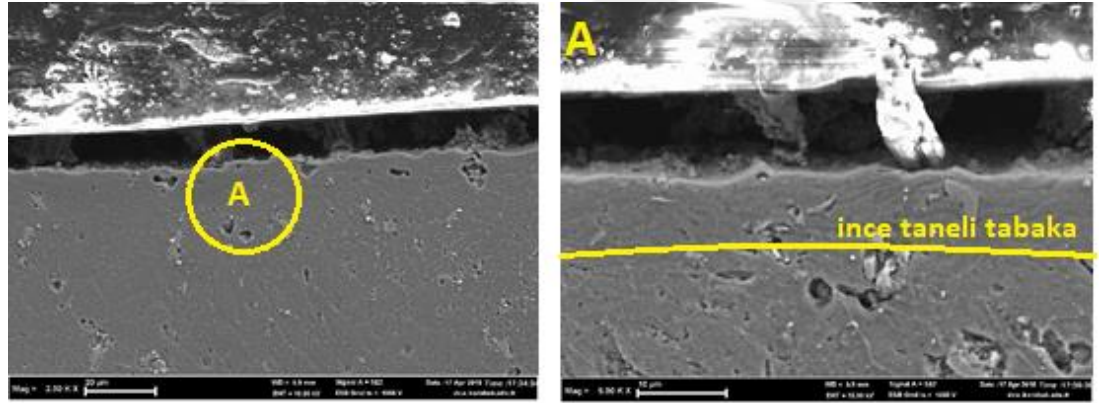
Şekil 4.8. Numunelerin kesit bölgesinden optik mikroskop görüntüleri a) ABD, b) UNYM, c) ABD + UNYM ve d) UNYM+ABD.



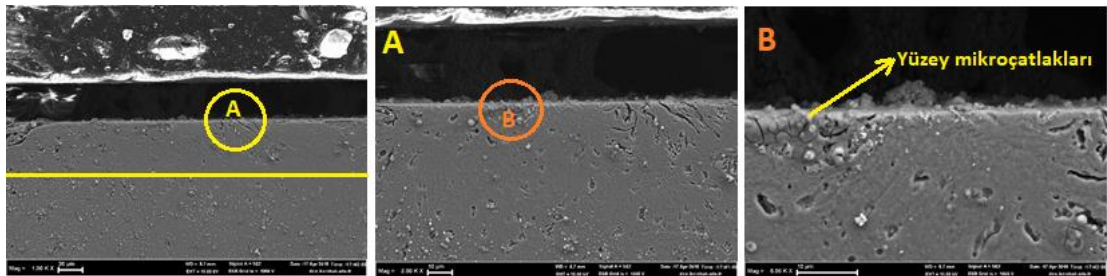
Şekil 4.9. Numunelerin kesit bölgesinden optik mikroskop görüntüleri a) ABD, b) UNYM, c) ABD + UNYM ve d) UNYM+ABD.



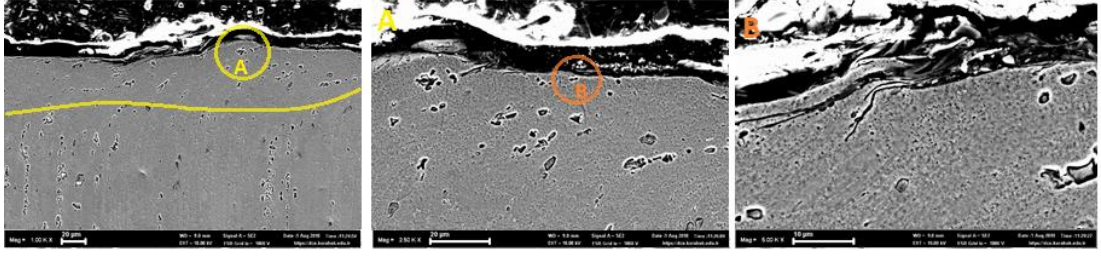
Şekil 4.10. ABD numunesinin kesit bölgesinden sem görüntüleri.



Şekil 4.11. UNYM numunesinin kesit bölgesinden sem görüntüleri.



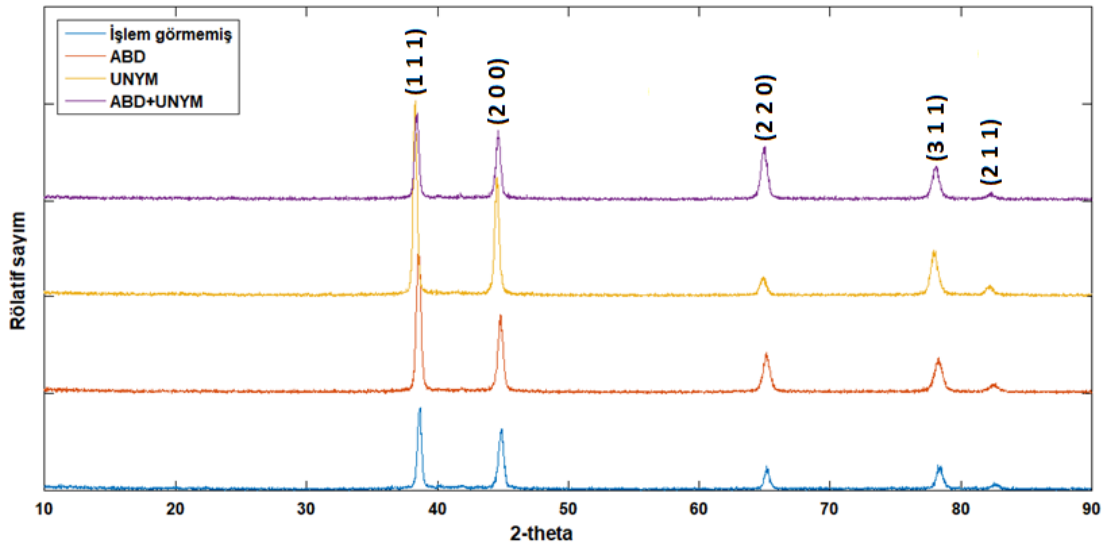
Şekil 4.12. ABD + UNYM numunesinin kesit bölgesinden sem görüntüleri.



Şekil 4.13. UNYM + ABD numunesinin kesit bölgesinden sem görüntüleri.

4.2. XRD ANALİZİ

Şekil 4.14 da farklı yüzey işlemleri sonrası X-ray difraksiyon analizleri verilmektedir. Tüm numunelerde AA7075’de elde edilen standart pikler ve elde ettikleri düzlemler eşittir. Bu durum belirtilen işlemlerin mekanik tabanlı olduğunu, herhangi yeni bir bileşiğin, kimyasal bir değişimin söz konusu olmadığını doğrular niteliktedir. Tablo 4.2 de mekanik işlemler sonrası yarı yükseklikteki pik genişliği (FWHM) değerlerinde bir değişim göze çarpmaktadır. FWHM’nin artmasıyla tane boyutunun azalmasının arasında ampirik bir ilişki olduğu, Scherer yaklaşımları [30], [31] başta olmak üzere literatürde yaygın olarak [32] FWHM değerlerinin en yüksek olduğu işlemler tek başına yapılan ABD ve UNYM sonrası elde edilmiştir.



Şekil 4.14. İşlem görmemiş, ABD, UNYM ve ABD+UNYM numuneleri XRD grafikleri.

Tablo 4.2. Uygulanan yüzey işlemlerinin yarı yükseklikteki pik genişliği değerleri.

2θ	Pik	FWHM (°)			
		İşlem görmemiş	ABD	UNYM	ABD+UNYM
38,388	111	0,338	0,381	0,317	0,358
44,622	200	0,437	0,459	0,378	0,405
64,924	220	0,4	0,565	0,53	0,5
77,99	311	0,49	0,71	0,624	0,599
82,33	211	0,51	0,77	0,5327	0,5

4.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ TESTİ

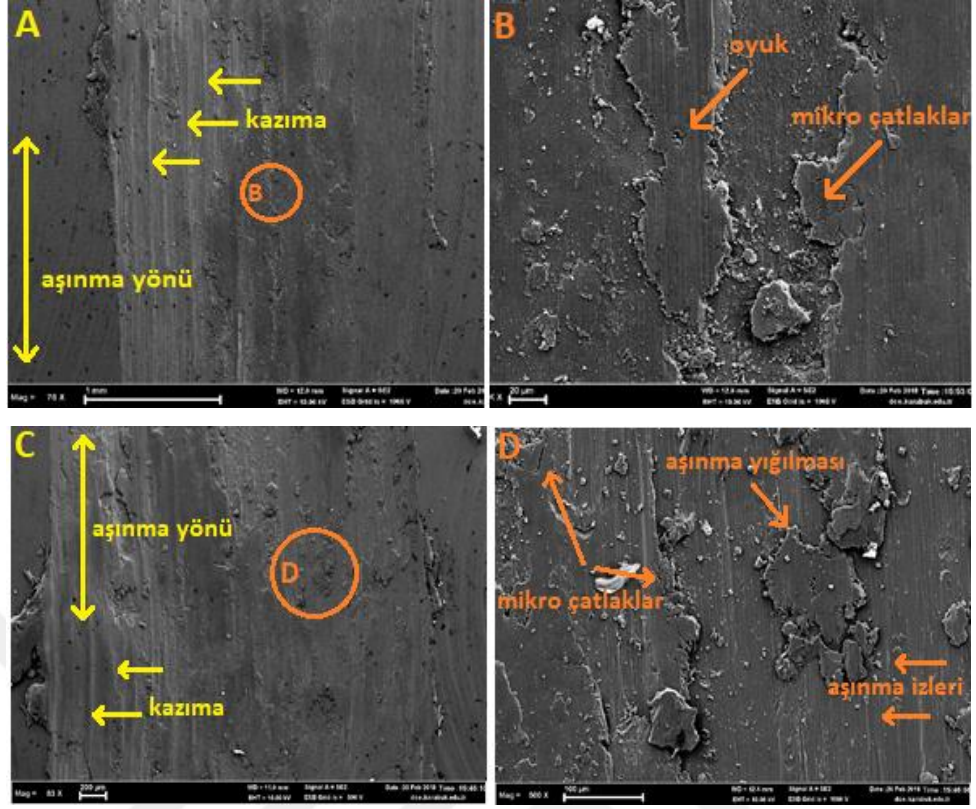
Tablo 4.3. de uygulanan yüzey işlemlerine göre yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmektedir. UNYM numunesinin yüzey pürüzlülüğü değeri işlem görmemiş ve diğer yüzey işlemlerine maruz kalmış numunelerle karşılaştırıldığında en düşük çıkmaktadır. Bo Wu ve diğerleri UNYM işleminin S45 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü değerini iyileştirdiğini gözlemlediler [11]. Yüzey pürüzlülüğü değeri en yüksek numune ise ABD numunesidir. Bilyalı dövme işlemi yüzey pürüzlülüğünü değerini önemli ölçüde arttırmakta ve bilyalı dövme yoğunluğunun artmasıyla pürüzlülük değeri de artmaktadır [33, 34]. UNYM numunesinin yorulma dayanımının diğer numunelerle karşılaştırıldığında yüksek çıkmasını yüzey pürüzlülüğü değerinin en düşük olmasına atfedebiliriz.

Tablo 4.3. Uygulanan yüzey işlemlerine göre numunelerin yüzey pürüzlülükleri.

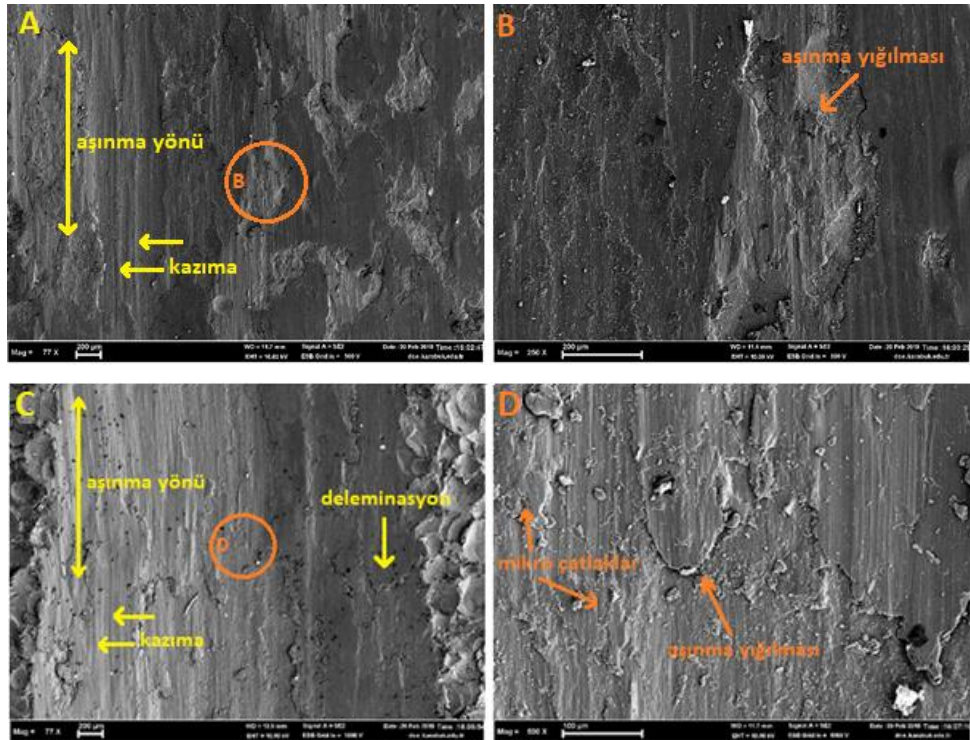
Numuneler	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
İşlem görmemiş	0,926	1,167	7,097
ABD	20,165	24,741	118,282
UNYM	0,8	1,009	5,869
ABD+UNYM	1,334	1,935	15,568
UNYM+ABD	6,972	8,538	35,632

4.4. AŞINMA VE HASAR ANALİZİ

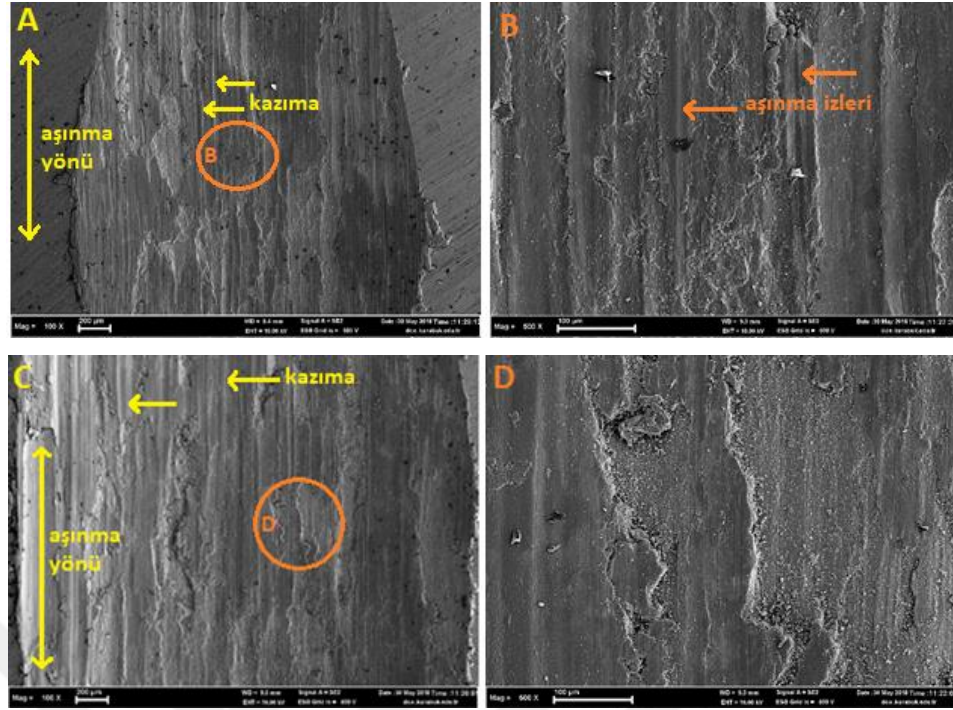
İşlem görmemiş, ABD, UNYM, ABD sonrası UNYM ve UNYM sonrası ABD işlemi görmüş AA7075 numunelerin tribolojik özelliklerini daha ayrıntılı araştırmak amacıyla, aşınma izleri ve aşınma kalıntıları gözlemlenmiştir ve SEM ile analiz edilmiştir. 10 N yük uygulandığında, tüm numunelerin aşınmış yüzeyi kayma yönüne paralel olarak kazımlar içerir (Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19) bu da tipik abrazif aşınma davranışdır [35]. İşlem görmemiş numunenin kazıma derinliği ABD numunesi ile karşılaştırıldığında daha sıgıdır (Şekil 4.15.A ve Şekil 4.16.A). Ancak bunula birlikte, UNYM işlemi uygulan numunelerde kazıma derinlikleri daha da sıgılaşır ve kazıma derinliği en sıgı numune ise UNYM sonrası ABD numunesidir (Şekil 4.17.A, Şekil 4.18.A ve Şekil 4.19.A). 20 N yük uygulandığında, aşınma izlerinin ve kazımların genişliği ve derinliği artmaktadır (Şekil 4.15.C, Şekil 4.16.C, Şekil 4.17.C, Şekil 4.18.C ve Şekil 4.19.C). İşlem görmemiş ve ABD numunelerin aşınmış yüzeylerinde yerel mikro çatlaklar gözlemlenmektedir (Şekil 4.15.B Şekil 4.16.D ve Şekil 4.17.D). Aynı şekilde işlem görmemiş ve ABD numunelerinde belirgin şekilde aşınma yığılmaları dikkat çekmektedir.



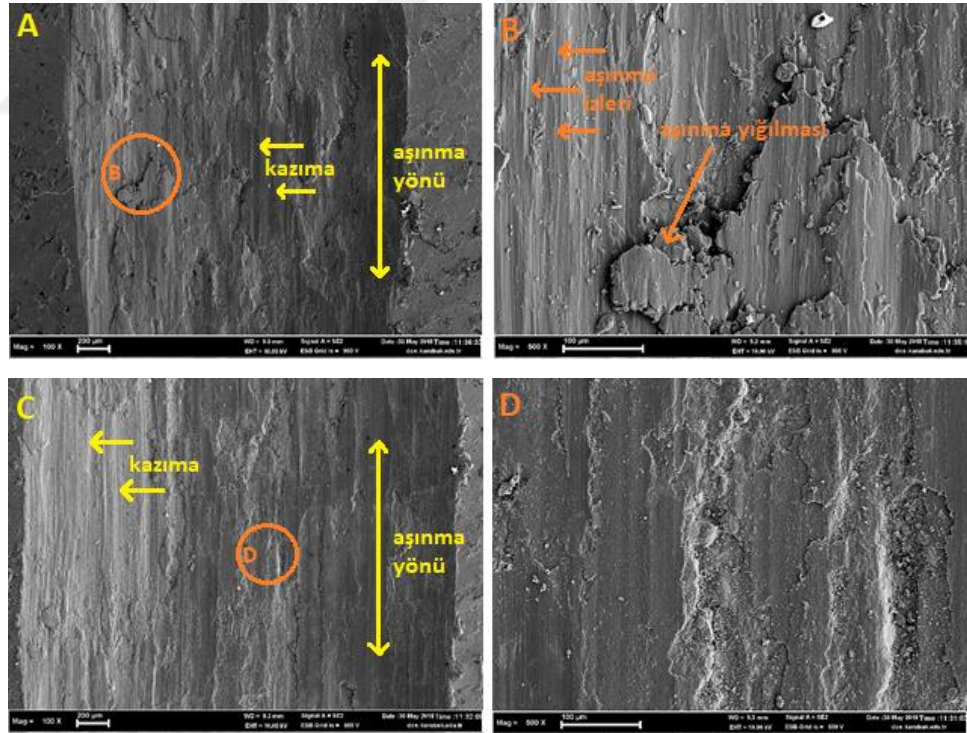
Şekil 4.15. İşlem görmemiş numune aşınma izleri sem görüntüleri: A-B) 10 N, C-D) 20 N.



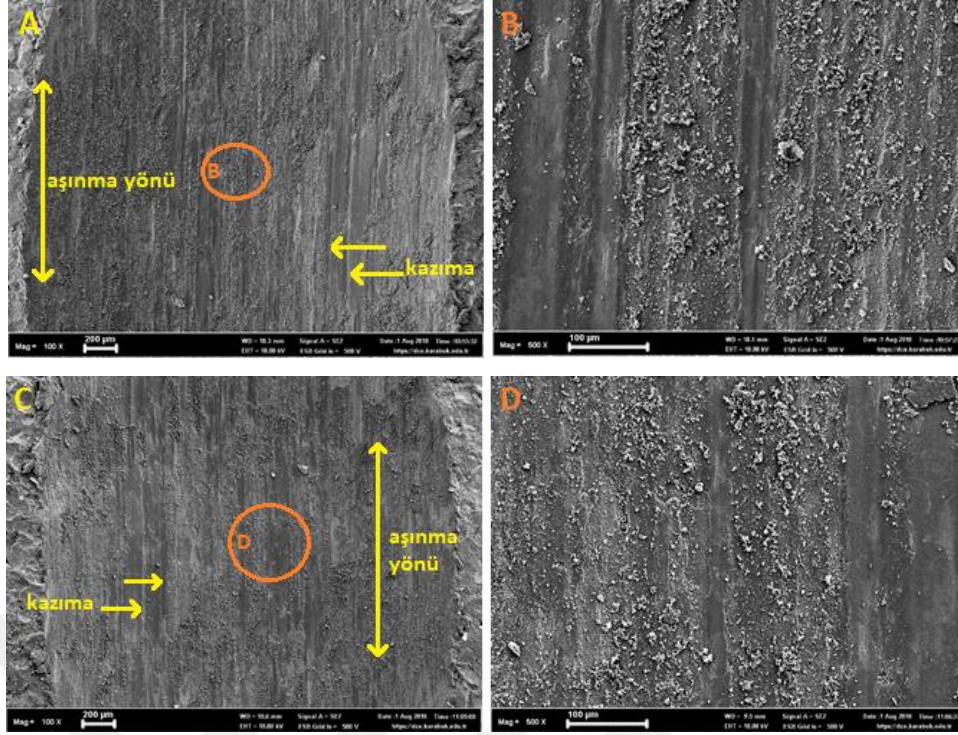
Şekil 4.16. ABD numune aşınma izleri sem görüntüleri: A-B) 10 N, C-D) 20 N.



Şekil 4.17. UNYM numune aşınma izleri sem görüntüleri: A-B) 10 N, C-D) 20 N.



Şekil 4.18. ABD+UNYM numune aşınma izleri sem görüntüleri: A-B) 10 N, C-D) 20 N.



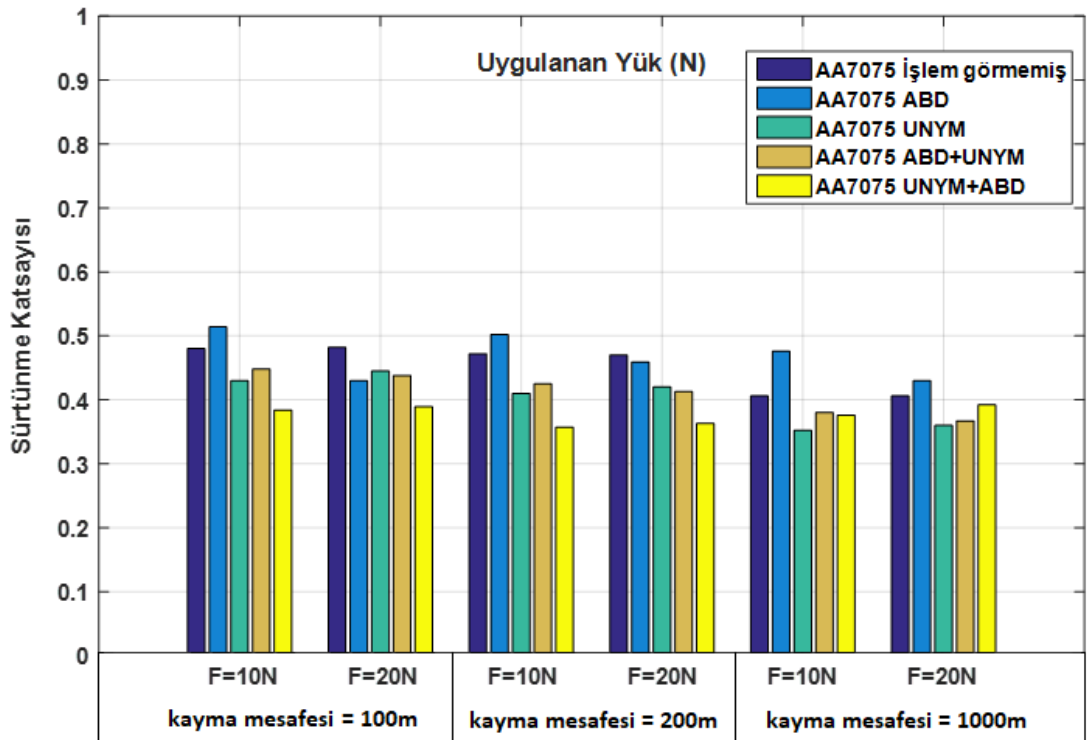
Şekil 4.19. UNYM+ABD numune aşınma izleri sem görüntüleri: A-B) 10 N, C-D) 20 N.

Malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları, özellikle aşınma, birleşme yüzeyleri arasındaki sürtünmeden dolayı bir yüzeyden malzeme kaldırma ile sonuçlandığı için yorulma ömrü açısından çok önemli bir özelliktir [36]. Şekil 4.20, işlem görmemiş, ABD, UNYM, ABD sonrası UNYM ve UNYM sonrası ABD işlemi görmüş AA7075 numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ile uygulanan yük arasındaki ilişkilerini göstermektedir. Ortalama sürtünme katsayısı en düşük değer, 10 N-20 N yük uygulandığında, sırasıyla UNYM sonrası ABD, UNYM ve ABD sonrası UNYM numunesinde gözlemlenmektedir. Böylece, UNYM işleminin AA7075 alüminyum alaşımının yüzeyinin sürtünme katsayısının azaltılmasında en etkili işlem olduğu görülmektedir. Ortalama sürtünme katsayısı kayma mesafesinin artmasıyla azalmaktadır, uygulanan yükün artmasıyla, işlem görmemiş, ABD ve ABD sonrası UNYM numunelerinde azalmakta ve UNYM ve UNYM sonrası ABD numunelerinde ise artmaktadır.

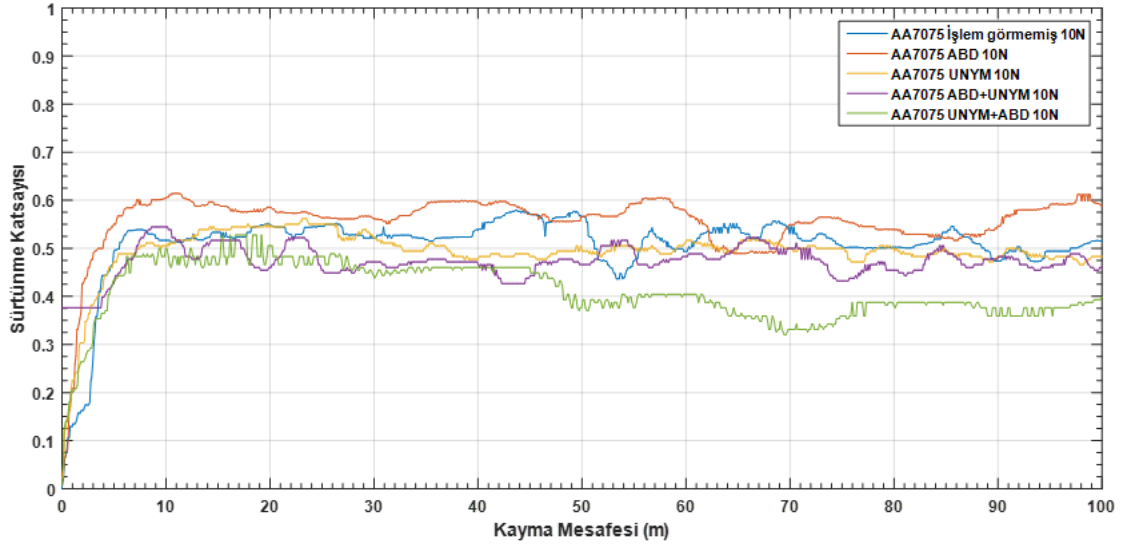
Şekil 4.21’de görüldüğü gibi sürtünme katsayısı kayma mesafesine bağlı olarak aniden artıktan sonra dalgalanmaktadır. Sürtünme katsayısının bu geçici davranışı işlem sertleşmesiyle ve/veya aşınma yığılmalarının etkileşimleriyle bağdaştırılabilir

[37]. Sürtünme katsayısının dalgalanması, transfer tabakasının yerel kırılmalarına ve parçacıkların kayan ara yüzde etkileşimine atfedilebilir [38].

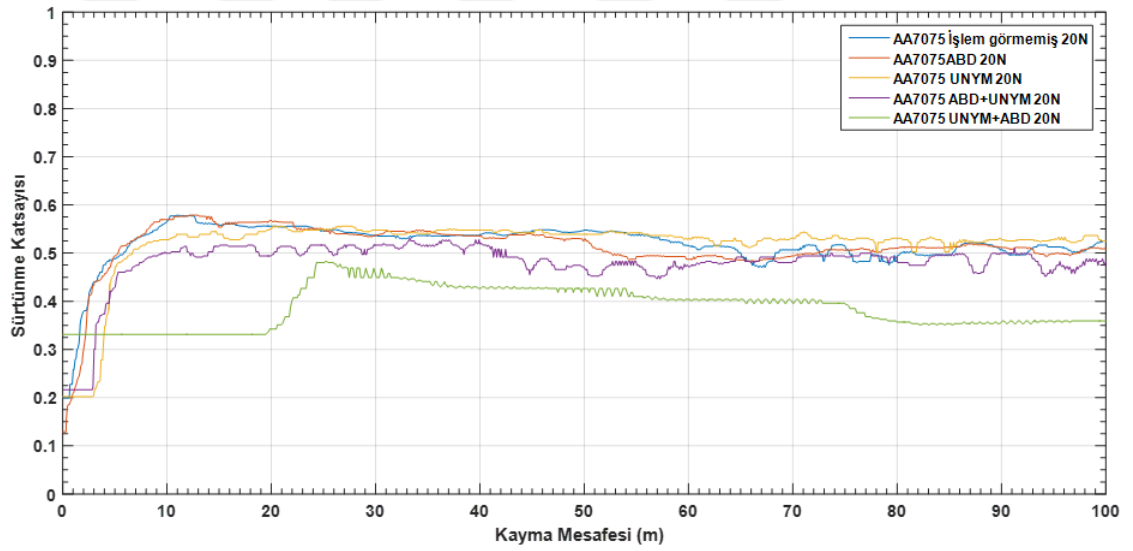
Şekil 4.27’de aşınma oranı ile uygulanan yük arasındaki ilişki gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlardan hem işlem görmemiş hem de işlem görmüş numuneler için normal yük arttıkça aşınma oranının arttığı gözlenmiştir. UNYM sonrası ABD, ABD sonrası UNYM ve UNYM numunelerinin aşınma oranları işlem görmemiş ve ABD numuneleriyle karşılaştırıldığında daha düşüktür. Aşınma direncindeki artış, aşınma direncinin iyi bir göstergesi olarak kabul edildiği için sertlikteki artışla bağdaştırılabilir ve daha yüksek sertliğe sahip malzemeler daha fazla aşınmaya karşı dirençlidir [13]. Daha yüksek sertlik sürtünme kabiliyetini ve plastik deformasyonu kanıtlar ve kalıntı gerilme durumu da aşınma ve sürtünme davranışları üzerinde önemli bir rol oynar. Aşınma sırasında eksenel gerilme, basma kalıntı gerilmeleri aşmaya çalışır. Hem yüzey sertliği hem de basma kalıntı gerilme düşük sürtünme davranışını gösterir [39, 40, 41].



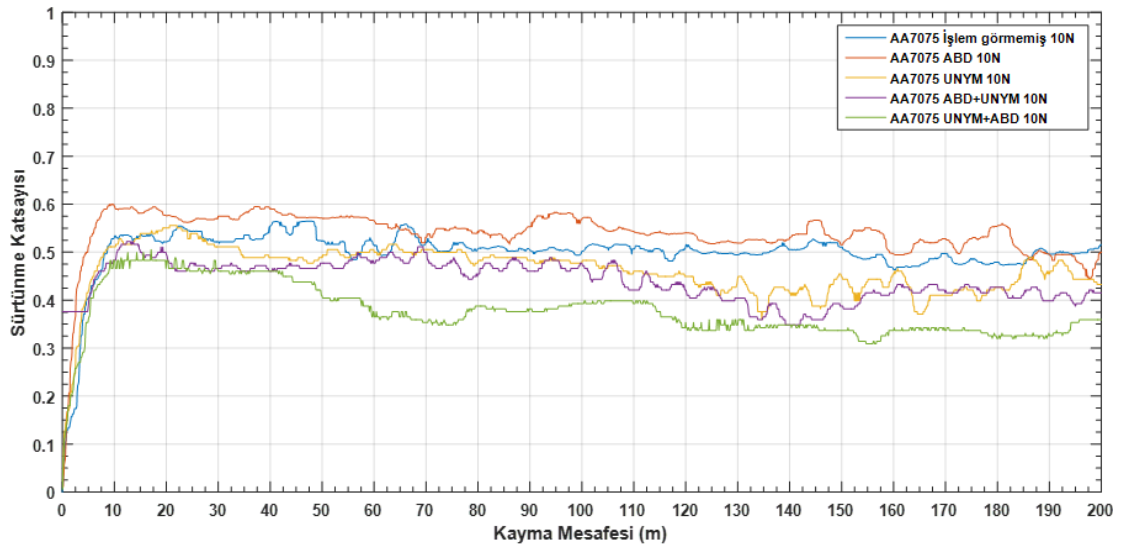
Şekil 4.20. $V=0,5\text{m/s}$ kayma hızı ve 100m, 200m ve 1000m kayma mesafesi için ortalama sürtünme katsayısı-uygulanan yük sütun grafiği.



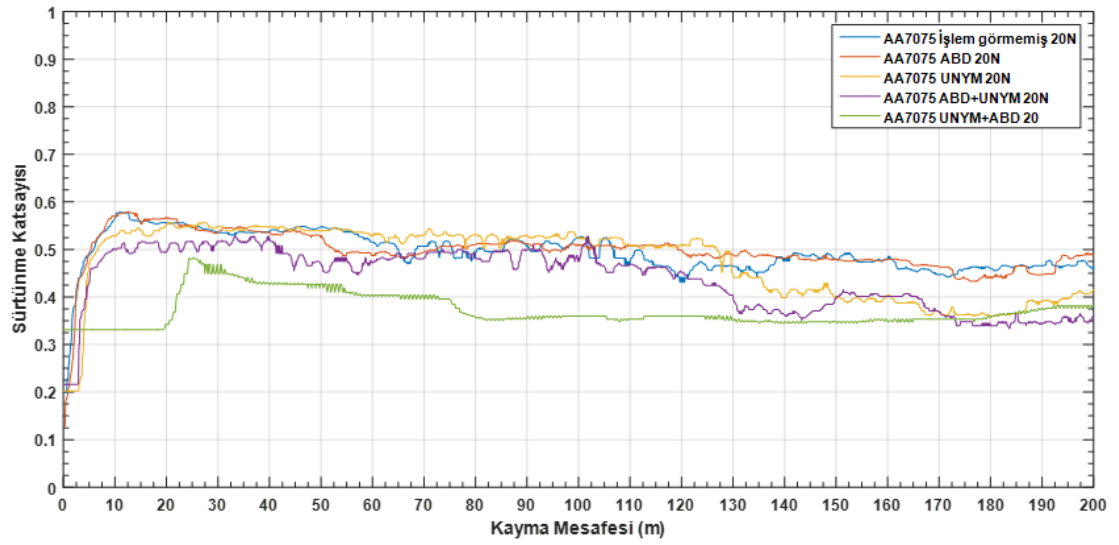
Şekil 4.21. 10 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (100m).



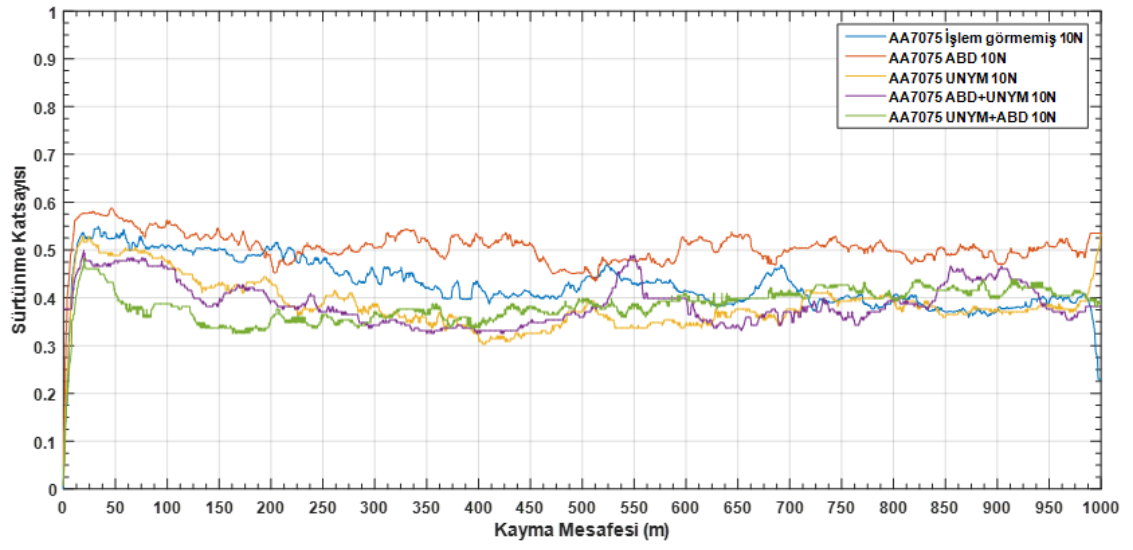
Şekil 4.22. 20 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (100m).



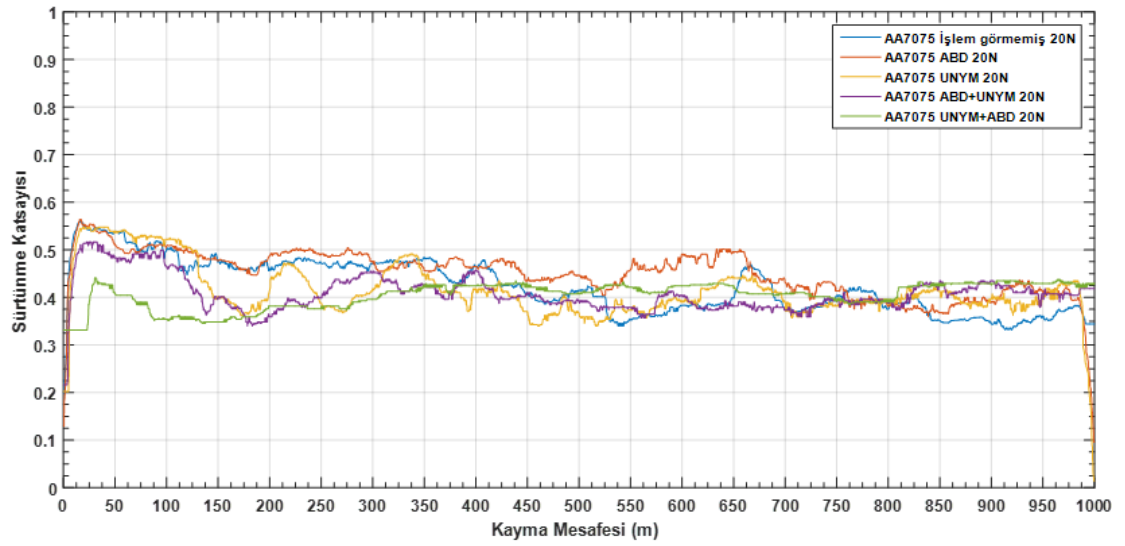
Şekil 4.23. 10 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200m).



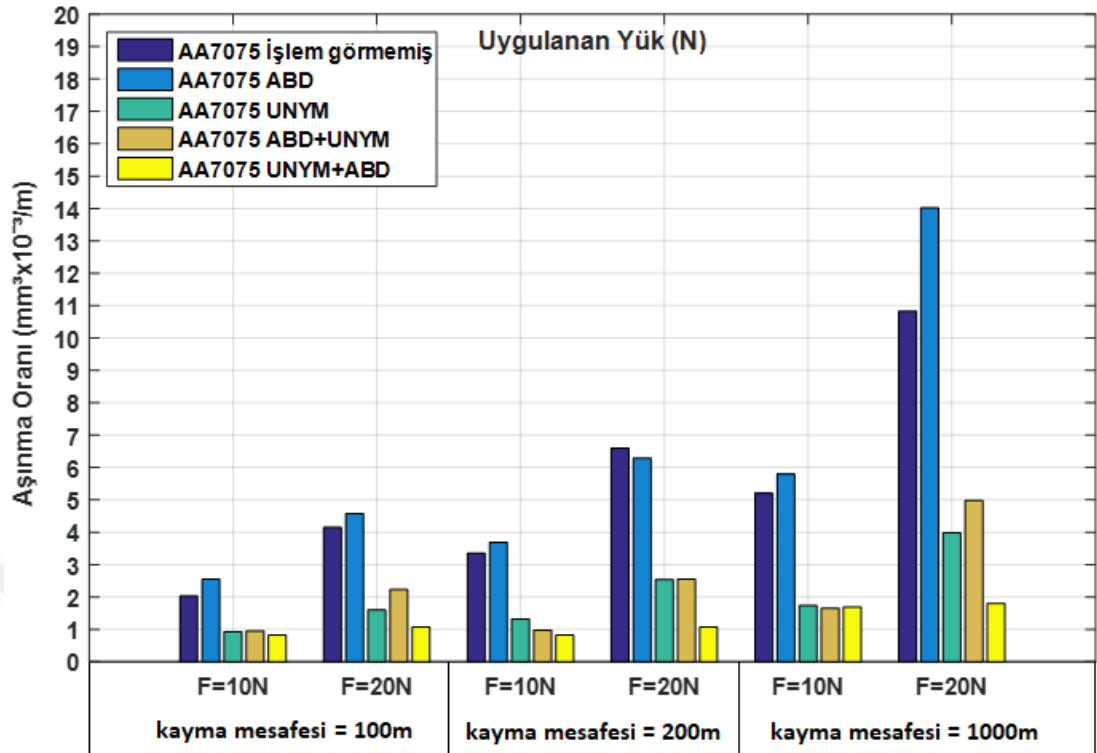
Şekil 4.24. 20 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (200m).



Şekil 4.25. 10 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (1000m).



Şekil 4.26. 20 N'luk yük için sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (1000m).

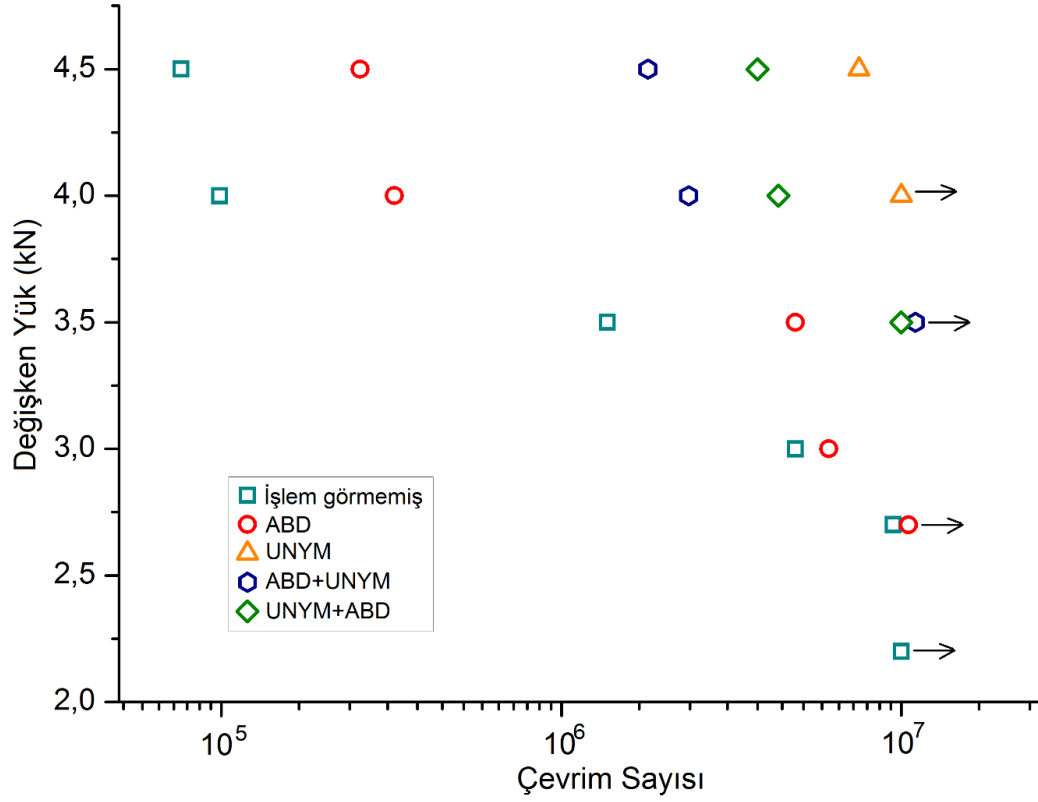


Şekil 4.27. V=0,5m/s kayma hızı ve 100m, 200m ve 1000m kayma mesafesi için aşınma oranı-uygulanan yük sütun grafiği.

4.5. YORULMA

Şekil 4.28 farklı yüzey işlemleri uygulanmış numunelerin yük-çevrim sayısı grafiklerini göstermektedir. ABD numunesinin aşınma özellikleri işlem görmemiş numuneye göre düşük olsa da yorulma ömrü işlem görmemiş numune ile karşılaştırıldığında %18,51 oranında iyileşmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla bu oran daha da artmaktadır. ABD+UNYM ve UNYM+ABD numunelerinin yorulma ömürleri işlem görmemiş numune ile karşılaştırıldığında %37,14 oranında artmaktadır. UNYM işleminde ise %45 oranında artmaktadır. Eksenel yorulma testi, ABD ve UNYM işlemlerinin AA7075 alaşımının hem yüksek çevrim hem de düşük çevrimli yorulma direncini arttırdığını göstermektedir. Artık gerilme ve sertlik, yorulma mukavemetini etkileyen baskın bir faktördür [10]. Buradan anlaşılacağı üzere mekanik yüzey işlemleri, plastik deformasyona bağlı olarak malzemenin yüzeyinde belirgin bir şekilde mikro sertliği artırmakta ve bununla ilişkili olarak malzemenin yorulma ömrünü artırmaktadır. Fakat uygulanan işleme göre malzemenin yorulma ömründeki iyileşme değişmektedir [11]. Literatürde, çeşitli

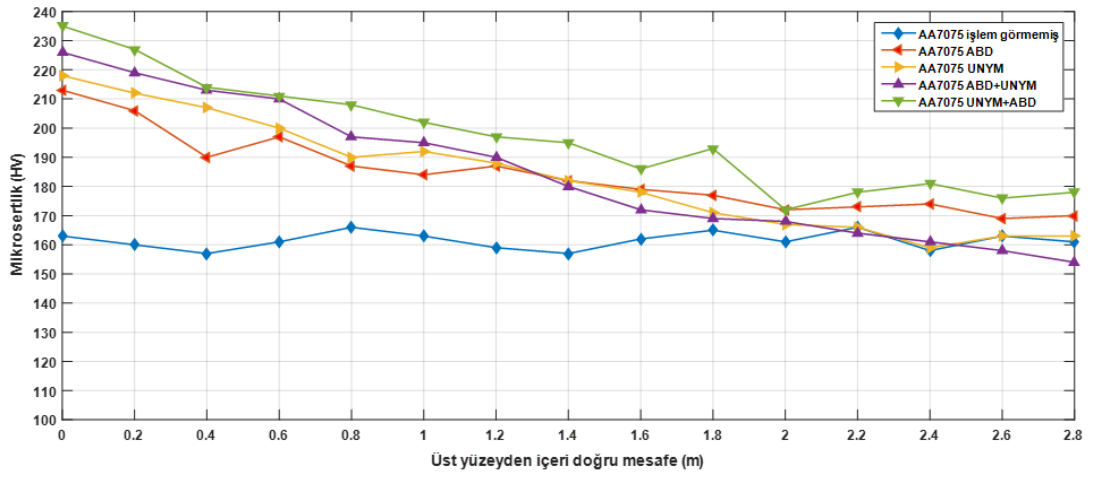
Çeliklerin, titanyum alaşımlarının yorulma davranışları üzerine alışmalar, ABD’den etkilenmemiştir, çünkü yüzey pürüzlülüğünün aşırı artışı yorulma direncinin artmasını engeller [42, 43].



şekil 4.28. Yük-evrim sayısı grafiğı.

4.6. MİKROSERTLİK ANALİZİ

UNYM+ABD işleminin sertlik değerlerini diğer uygulamalara kıyasla daha fazla olumlu etkilediğı aynı zamanda sertleşme derinliğini de arttırdığı dikkat çekmektedir. Mikroyapı alışmaları incelendiğinde plastik deformasyondan etkilenen tabaka kalınlığının çift katmanlı UNYM+ABD uygulamasında arttığı gözlemlenmektedir. Tabaka kalınlığı ve sertlik ilişkisinin doğru orantılı olarak değiştiğı söylenebilir. Genel olarak işlem görmemiş numune esas alındığında soğuk aşırı plastik deformasyon işlemlerinin yüzey bölgelerinde sertlik değerini arttırdığı gözlemlenmektedir. Sertlik bağlamında en etkin deformasyon mekanizması ABD+UNYM ve UNYM+ABD olduğu sonucuna mikrosertlik çalışmalarında varılmıştır.



Şekil 4.29. Mikrosertlik grafiği.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Aşırı bilyalı dövmenin tek başına veya son işlem olarak uygulandığında malzemenin yüzey morfolojisini bozduğu, bunun aksine UNYM de yüzey bütünlüğünün korunduğu, UNYM işleminin deformasyondan etkilenen tabaka kalınlığını arttırdığı, en derin deforme edilmiş tabakanın UNYM+ABD olduğu anlaşılmaktadır. Deformasyondan etkilenen tabakada belirgin ikincil fazların küçüldüğü, yönelimlerin kaybolduğu dikkat çekmektedir.
2. Tüm numunelerde AA7075’de elde edilen standart pikler ve elde ettikleri düzlemler eşittir. Bu durum belirtilen işlemlerin mekanik tabanlı olduğunu, herhangi yeni bir bileşiğin, kimyasal bir değişimin söz konusu olmadığını doğrular niteliktedir. FWHM değerlerinin en yüksek olduğu işlemler tek başına yapılan ABD ve UNYM sonrası elde edilmiştir.
3. UNYM numunesinin yüzey pürüzlülüğü değeri işlem görmemiş ve diğer yüzey işlemlerine maruz kalmış numunelerle karşılaştırıldığında en düşük çıkmaktadır. UNYM numunesinin yorulma dayanımının diğer numunelerle karşılaştırıldığında yüksek çıkmasını yüzey pürüzlülüğü değerinin en düşük olmasına atfedebiliriz.
4. 10 N yük uygulandığında, tüm numunelerin aşınmış yüzeyi kayma yönüne paralel olarak kazımlar içerir. İşlem görmemiş numunenin kazıma derinliği ABD numunesi ile karşılaştırıldığında daha sıgıdır. Ancak bunula birlikte, UNYM işlemi uygulan numunelerde kazıma derinlikleri daha da sıgılaşır ve kazıma derinliği en sıgı numune ise UNYM sonrası ABD numunesidir. 20 N

yük uygulandığında, aşınma izlerinin ve kazımların genişliği ve derinliği artmaktadır. İşlem görmemiş ve ABD numunelerin aşınmış yüzeylerinde yerel mikro çatlaklar gözlemlenmektedir. Aynı şekilde işlem görmemiş ve ABD numunelerinde belirgin şekilde aşınma yığılmaları dikkat çekmektedir.

5. Ortalama sürtünme katsayısı en düşük değer, 10 N-20 N yük uygulandığında, sırasıyla UNYM sonrası ABD, UNYM ve ABD sonrası UNYM numunesinde gözlemlenmektedir. Böylece, UNYM işleminin AA7075 alüminyum alaşımının yüzeyinin sürtünme katsayısının azaltılmasında en etkili işlem olduğu görülmektedir. Ortalama sürtünme katsayısı kayma mesafesinin artmasıyla azalmaktadır, uygulanan yükün artmasıyla, işlem görmemiş, ABD ve ABD sonrası UNYM numunelerinde azalmakta ve UNYM ve UNYM sonrası ABD numunelerinde ise artmaktadır.
6. Hem işlem görmemiş hem de işlem görmüş numuneler için normal yük arttıkça aşınma oranının arttığı gözlenmiştir. UNYM sonrası ABD, ABD sonrası UNYM ve UNYM numunelerinin aşınma oranları işlem görmemiş ve ABD numuneleriyle karşılaştırıldığında daha düşüktür.
7. ABD numunesinin yorulma ömrü işlem görmemiş numune ile karşılaştırıldığında %18,51 oranında iyileşmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla bu oran daha da artmaktadır. ABD+UNYM ve UNYM+ABD numunelerinin yorulma ömürleri işlem görmemiş numune ile karşılaştırıldığında %37,14 oranında artmaktadır. UNYM işleminde ise %45 oranında artmaktadır. Eksenel yorulma testi, ABD ve UNYM işlemlerinin AA7075 alaşımının hem yüksek çevrim hem de düşük çevrimli yorulma direncini arttırdığını göstermektedir.
8. UNYM+ABD işleminin sertlik değerlerini diğer uygulamalara kıyasla daha fazla olumlu etkilediği aynı zamanda sertleşme derinliğini de arttırdığı dikkat çekmektedir. Mikroyapı çalışmaları incelendiğinde plastik deformasyondan etkilenen tabaka kalınlığının çift katmanlı UNYM+ABD uygulamasında arttığı gözlemlenmektedir. Sertlik bağlamında en etkin deformasyon mekanizması ABD+UNYM ve UNYM+ABD olduğu sonucuna mikrosertlik çalışmalarında

varılmıştır. Tabaka kalınlığı ve sertlik ilişkisinin doğru orantılı olarak değiştiği söylenebilir.



KAYNAKLAR

1. Er, M., "Yüksek frekanslı, genlik ayarlı eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve 1100-H14 alüminyum levhasının eğilme yorulması davranışının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir, (2006).
2. Kaya, H. and Uçar, M., "Fatigue behaviour and mechanical properties of ECAP'ed and thixoformed AA7075", **High Temperature Materials And Processes**, 33 (3): 277–285 (2014).
3. He, C., Liu, Y., Dong, J., Wang, Q., Wagner, D., and Bathias, C., "Fatigue crack initiation behaviors throughout friction stir welded joints in AA7075-T6 in ultrasonic fatigue", **International Journal Of Fatigue**, 81: 171–178 (2015).
4. Yeşildal, R., "Dönen eğmeli bir yorulma test cihazı dizaynı, imalatı ve DÇ45 numuneler üzerinde bir uygulama", Yüksek Lisans Tezi, **Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Erzurum, (1993).
5. Unal, O. and Varol, R., "Almen intensity effect on microstructure and mechanical properties of low carbon steel subjected to severe shot peening", **Applied Surface Science**, 290: 40–47 (2014).
6. Ateş, B., "Katı çözelti sertleşmesinin küresel grafitli dökme demirin dönel eğmeli yorulma davranışına etkisi", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2013).
7. Li, L., Shen, L., and Proust, G., "Fatigue crack initiation life prediction for aluminium alloy 7075 using crystal plasticity finite element simulations", **Mechanics Of Materials**, 81: 84–93 (2015).
8. Olsson, A., "Fatigue strength of truck components in cast iron", **Chalmers University Of Technology Department Of Applied Mechanics Division Of Dynamics**, 1–12 (2011).
9. Jia, X., Grejtak, T., Krick, B., and Vermaak, N., "Design of composite systems for rotary wear applications", **Materials And Design**, 134: 281–292 (2017).
10. Yasuoka, M., Wang, P., Zhang, K., Qiu, Z., Kusaka, K., Pyoun, Y. S., and Murakami, R. ichi, "Improvement of the fatigue strength of SUS304 austenite stainless steel using ultrasonic nanocrystal surface modification", **Surface And Coatings Technology**, 218 (1): 93–98 (2013).
11. Wu, B., Zhang, J., Zhang, L., Pyoun, Y. S., and Murakami, R. I., "Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on surface and fatigue properties

- of quenching and tempering S45C steel", *Applied Surface Science*, 321: 318–330 (2014).
12. Trško, L., Guagliano, M., Bokůvka, O., and Nový, F., "Fatigue life of AW 7075 aluminium alloy after severe shot peening treatment with different intensities", *Procedia Engineering*, 74: 246–252 (2014).
 13. Cho, I. S., Amanov, A., Kwak, D. H., Jeong, B. J., and Park, I. G., "The influence of surface modification techniques on fretting wear of Al-Si alloy prepared by gravity die casting", *Materials And Design*, 65: 401–409 (2015).
 14. Amanov, A., Pyun, Y. S., and Sasaki, S., "Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy", *Tribology International*, 72: 187–197 (2014).
 15. Majzoobi, G. H. and Abbasi, F., "On the effect of shot-peening on fretting fatigue of Al7075-T6 under cyclic normal contact loading", *Surface And Coatings Technology*, 328: 292–303 (2017).
 16. González, J., Bagherifard, S., Guagliano, M., and Fernández Pariente, I., "Influence of different shot peening treatments on surface state and fatigue behaviour of Al 6063 alloy", *Engineering Fracture Mechanics*, 185: 72–81 (2017).
 17. Unal, O., "Bilyalı dövme işleminin tane boyutuna etkisinin deneysel incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bartın, (2011).
 18. Bagherifard, S., Fernandez-Pariente, I., Ghelichi, R., and Guagliano, M., "Effect of severe shot peening on microstructure and fatigue strength of cast iron", *International Journal Of Fatigue*, 65: 64–70 (2014).
 19. Akbulut, M., "AISI 1045 çeliğinin yorulma davranışı üzerinde mekanik yüzey işleminin etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (2011).
 20. Miao, H. Y., Larose, S., Perron, C., and Lévesque, M., "On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening", *Advances In Engineering Software*, 40 (10): 1023–1038 (2009).
 21. You, C., Achintha, M., He, B. Y., and Reed, P. A. S., "A numerical study of the effects of shot peening on the short crack growth behaviour in notched geometries under bending fatigue tests", *International Journal Of Fatigue*, 103: 99–111 (2017).
 22. Yaman, O., "Assessment of the nitriding process paramaters to improve the wear resistance of selected steels", Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2009).

23. Süha, O., "Experimental analysis and modelling of wear in rocket rail launchers", Yüksek Lisans Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2011).
24. Tekin, koray serdar, "Design and construction of boundary lubricated bearing test rig and wear analysis in earthmoving machinery", Yüksek Lisans Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2010).
25. Tanrıku, B., "Fatigue life of tungsten cobalt carbide used as a core material in cold forging dies", Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, (2016).
26. Şen, G., "Determination of fracture and fatigue behaviours of 4340 steel", Yüksek Lisans Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2015).
27. Tabatabaei, A. M., "Fracture and fatigue crack growth characterization of conventional and head hardened railway rail steels", Yüksek Lisans Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2014).
28. Çalışkan, S., "Determination of shot peening effect on fatigue behavior of AISI 4140 steel by non-destructive measurement of surface residual stresses", Yüksek Lisans Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2018).
29. A. Küçükylmaz, "Experimental investigation of residual stresses introduced via shot peening and their effect on fatigue life of ball bearings", Yüksek Lisans Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2010).
30. Maleki, E. and Unal, O., "Roles of surface coverage increase and re-peening on properties of AISI 1045 carbon steel in conventional and severe shot peening processes", **Surfaces And Interfaces**, 11 (March): 82–90 (2018).
31. Khakbaz, F. and Kazeminezhad, M., "Work hardening and mechanical properties of severely deformed AA3003 by constrained groove pressing", **Journal Of Manufacturing Processes**, 14: 20–25 (2012).
32. Kumar, S., Chattopadhyay, K., and Singh, V., "Effect of surface nanostructuring on corrosion behavior of Ti–6Al–4V alloy", **Materials Characterization**, 121: 23–30 (2016).
33. Yang, Q., Zhou, W., Niu, Z., Zheng, X., Wang, Q., Fu, X., Chen, G., and Li, Z., "Effect of different surface asperities and surface hardness induced by shot-peening on the fretting wear behavior of Ti-6Al-4V", **Surface And Coatings Technology**, 349 (May): 1098–1106 (2018).
34. Vrbka, M., Krupka, I., Svoboda, P., Šperka, P., Návrát, T., Hartl, M., and Nohava, J., "Effect of shot peening on rolling contact fatigue and lubricant

- film thickness within mixed lubricated non-conformal rolling/sliding contacts", *Tribology International*, 44 (12): 1726–1735 (2011).
35. Zhao, X., Zhao, B., Liu, Y., Cai, Y., and Hu, C., "Research on friction and wear behavior of gradient nano-structured 40Cr steel induced by high frequency impacting and rolling", *Engineering Failure Analysis*, 83: 167–177 (2018).
 36. Amanov, A. and Pyun, Y. S., "Local heat treatment with and without ultrasonic nanocrystal surface modification of Ti-6Al-4V alloy: Mechanical and tribological properties", *Surface And Coatings Technology*, 326: 343–354 (2017).
 37. Amanov, A., Sasaki, S., Kim, D. E., Penkov, O. V., and Pyun, Y. S., "Improvement of the tribological properties of Al6061-T6 alloy under dry sliding conditions", *Tribology International*, 64: 24–32 (2013).
 38. Amanov, A., Cho, I. S., Kim, D. E., and Pyun, Y. S., "Fretting wear and friction reduction of CP titanium and Ti-6Al-4V alloy by ultrasonic nanocrystalline surface modification", *Surface And Coatings Technology*, 207: 135–142 (2012).
 39. Mitrovic, S., Adamovic, D., Zivic, F., Dzunic, D., and Pantic, M., "Applied surface science friction and wear behavior of shot peened surfaces of 36CrNiMo4 and 36NiCrMo16 alloyed steels under dry and lubricated contact conditions", *Applied Surface Science*, 290: 223–232 (2014).
 40. Edalati, K., Ashida, M., Horita, Z., Matsui, T., and Kato, H., "Wear resistance and tribological features of pure aluminum and Al-Al₂O₃ composites consolidated by high-pressure torsion", *Wear*, 310 (1–2): 83–89 (2014).
 41. Ohue, Y. and Matsumoto, K., "Sliding – rolling contact fatigue and wear of maraging steel roller with ion-nitriding and fine particle shot-peening", *Wear*, 263: 782–789 (2007).
 42. Bagherifard, S., Fernandez-Pariente, I., Ghelichi, R., and Guagliano, M., "Fatigue behavior of notched steel specimens with nanocrystallized surface obtained by severe shot peening", *Materials And Design*, 45: 497–503 (2013).
 43. Bagherifard, S., Ghelichi, R., and Guagliano, M., "On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation: A critical review and some original developments", *Applied Surface Science*, 259: 186–194 (2012).

ÖZGEÇMİŞ

Yusuf EFE 1993 yılında Silivri’de doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Necip Sarıbekir Lisesi Fen Bölümü’nden mezun oldu. 2010 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2014 yılında mezun oldu. 2016 yılında Karabük Üniversitesi Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümüne araştırma görevlisi olarak göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi

Safranbolu Fethi Toker Güzelsanatlar ve Tasarım Fakültesi Endüstri
ürünleri Tasarımı Bölümü

Safranbolu / KARABÜK

Tel : (531) 212 35 53

E-posta : yusufefe@karabuk.edu.tr