

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ni₃Al+B METALLER ARASI BİLEŞİĞİNİN DEĞİŞKEN
SICAKLIK ŞARTLARINDA AŞINMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ

Murat Yavuz SOLMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

116601

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ELAZIĞ

2002

116601

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ni₃Al+B METALLER ARASI BİLEŞİĞİNİN YÜKSEK
SICAKLIKLARDA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Murat Yavuz SOLMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Bu Tez, Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından Oybirliği /Oyçokluğu ile Başarılı / Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

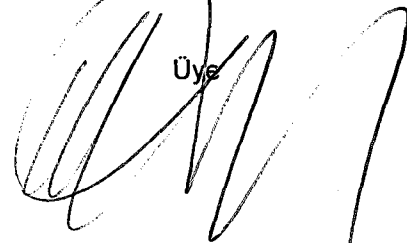
Danışman



Üye



Üye



Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15..01..2003 tarih ve 3/1 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Ni₃Al+B METALLER ARASI BİLEŞİĞİNİN DEĞİŞKEN SICAKLIK
ŞARTLARINDA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Murat Yavuz SOLMAZ

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

2002, Sayfa : 80

Ni₃Al+B metallerarası bileşiğinin değişik sıcaklık şartlarında aşınma davranışı üzerine farklı yük, hız ve kayma mesafelerinin etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla hazırlanan numunelere ve aşındırılmış deney numunelerine aşınma davranışlarının karakterizasyonu için SEM, EDS ve XRD analizleri uygulanmıştır.

Bu çalışmanın birinci ve ikinci bölümünde metallerarası bileşiklerin yapıları ve mekanik özellikleri hakkında genel bir bilgi verilmiş ve bu konuda yapılan literatür çalışmaları özetlenmiştir. Üçüncü bölümde aşınma, aşınmaya etki eden faktörler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise metallerarası bileşiklerin aşınması hakkında literatür çalışması verilmiştir. Beşinci bölümde deneysel çalışmanın esasları anlatılmış, altıncı bölümde de deney sonuçları ve irdelemeleri yapılmış, yedinci bölümde ise genel sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

Deneylerde aşınma sırasında, oksitlenme, karşı malzemeden ana malzeme yüzeyine malzeme transferi ve aşınma yüzeylerinde plastik deformasyon oluşup oluşmaması, ağırlık kaybı açısından önemli olan faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Oda sıcaklığında, yük, hız ve kayma mesafesi değişkenlerinin kullanıldığı bütün deneylerde, ağırlık kaybı değerleri benzer sonuçlar vermiştir. Bu sıcaklıkta kullanılan parametrelerin artırılması ile ağırlık kaybı değerleri artış göstermiştir.

100°C’de, yük, hız ve kayma mesafesinin kullanıldığı bütün deneylerde meydana gelen ağırlık kaybı değerleri, oda sıcaklığında ki değerlerden yaklaşık olarak 10-15 kat daha fazladır. Düşük sıcaklıklarda, yüzeyde plastik deformasyon oluşumu; 100°C’den daha yüksek sıcaklıklarda ise oksit oluşumu, aşınma esnasında meydana gelen mekanizmalar olarak karşılaşılmıştır. 100°C’de, bu mekanizmaların ikisi de diğer sıcaklıklara göre daha az etkili olduğundan ağırlık kaybı miktarı bu sıcaklıkta maksimum değerlere ulaşmaktadır.

300 ve 450°C’de gerçekleştirilen aşınma deneylerinde de aşınma miktarları; yük, hız ve kayma mesafesi parametrelerinin tamamı için paralel sonuçlar vermektedir. Sıcaklığın 450°C’ye çıkarılmasıyla aşınmada iki mekanizma gözlenmiştir. Bunlardan birincisi, artan sıcaklıklarla birlikte aşınma yüzeylerinde meydana gelen oksitler, ikincisi ise karşı malzemeden kopan parçacıkların ana malzeme yüzeyine yapışmasıdır. Artan sıcaklıklarla aşınma yüzeylerinde meydana gelen oksitlerin tür ve yoğunluklarında ve karşı malzemeden ana malzemeye geçen malzeme miktarlarında artış olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı yüksek sıcaklıklarda ağırlık kaybı değerleri oda sıcaklığındaki ve 100°C’deki değerlerin altına düşmektedir.

Anahatar Kelimeler : Metallerarası Bileşikler, Ni₃Al, Aşınma, Yüksek Sıcaklık.

ABSTRACT

Master Thesis

AN INVESTIGATION ON THE WEAR BEHAVIOUR OF $\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$
INTERMETALIC COMPOUND AT VARIOUS TEMPERATURES

Murat Yavuz SOLMAZ

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

2002, Pages: 80

From the view point of abrasive wear, the effects of load, sliding speed and distance on the weight loss of Ni_3Al intermetallic alloys were investigated for various temperatures, 25, 100, 300 and 450°C. SEM, EDS and XRD analysis were performed to identify the worn surfaces to explain the wear mechanisms.

In the first and second chapters of this study, structures and mechanical properties of Ni_3Al intermetallic alloys were presented and literature about this topic were reviewed. In the third chapter, wear and wear affecting factors were presented. In the fourth chapter, experimental studies collected from the literature on the abrasive wear of intermetallic-based alloys and composites were presented. In the fifth chapter, experimental procedures were given. And, results and discussion were presented in the sixth chapter. Finally, in the seventh chapter, conclusions and suggestions for the future studies were presented.

During the wear experiments; oxidation, mass transfer from counturface material to the test material and plastic deformation occurred on the wear surface were appeared as important factors on the weight loss mechanisms.

The weight loss values of wear tests in the room temperature gave similar results in all experiment in terms of loading, sliding speed and distance parameters. Increase in values of these parameters resulted more weight loss.

In 100°C, the weight loss for various loading, sliding speed and distance parameters are higher about 10-15 times than weight loss values in the experiments done in the room temperature. The plastic deformation on the test material surface occurred at the low temperature, and much more oxide layer formed at the higher temperature than that of 100°C and these factors mainly affected the wear results.

The weight loss reached to the maximum values at 100°C. Because, both of these mechanisms in this temperature are less effective than mechanisms in the other temperatures.

The weight loss for wear experiments performed at 300 and 450°C gave similar results for all loadings, sliding speeds and distance parameters. Wear progressed by two mechanisms when the temperature was increased to 450°C. In the first mechanism, oxide layers occurred on the wear surfaces with increasing temperature; in the second mechanism, some particles transferred from counterface surface to the main material. The types and densities of oxides occurred during the wear tests on the sliding surfaces increased with increasing temperatures and parallelly the mass values transferred from counterface material to major test material increased. Therefore, the weight loss values at the high temperature are less than at the lower temperatures.

Keywords : Intermetallic Compound, Ni₃Al, Wear, High Temperature.

TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesinde ve yönlendirilmesinde sağladığı büyük katkılardan dolayı yüksek lisans danışman hocam Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. M. Halidun KELEŞTEMUR'a, çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen başta Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Mustafa AKSOY'a ve diğer bütün bölüm hocalarına teşekkürü bir borç bilirim.

Pin-on-disk aşınma deneylerinin yapıldığı Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölüm hocalarından Sayın Yrd. Doç. Dr. Eyüp GERÇEKÇİOĞLU'na da yardımları ve desteklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

Projenin başarılı ve verimli olması açısından maddi destek sağlayan başta sayın rektörümüz Prof. Dr. A. Fevzi BİNGÖL ve FÜBAP (Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi) Müdürü Doç. Dr. Bilal ÜSTÜNDAĞ'a da teşekkürlerimi arz ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	III
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	XI
TABLolar LİSTESİ.....	XIII
FOTOĞRAFLAR LİSTESİ.....	XIV
1. GİRİŞ.....	1
2. METALLER ARASI BİLEŞİKLER.....	2
2.1. Normal Değerlikli Bileşikler.....	4
2.2. Elektron Bileşikleri.....	4
2.3. Süper Örgüler.....	5
2.4. Süper Örgülerin Yaygın Türleri.....	5
2.4.1. (L ₁₂) Cu ₃ Au Tipi Süperlatisler.....	5
2.4.2. B2 (Beta Brass) Tipi Süperlatisler.....	6
2.4.3. L ₁₀ veya CuAu Tipi Süperlatisler.....	6
2.4.4. L ₁₁ Tipi Süperlatisler.....	7
2.4.5. D ₀₃ ve L ₂₁ Süperlatisleri.....	8
2.4.6. D ₀₁₉ veya Mg ₃ Cd Tipi Süperlatisler.....	9
2.5. Düzenli Yapıdaki İntermetalik Bileşiklere Tarihi Bir Bakış.....	9
2.6. Metallerarası Bileşiklerin Mekanik Özellikleri.....	12
2.6.1. Ni ₃ Al Metallerarası Bileşiği.....	13
3. SÜRTÜNME VE AŞINMA	14
3.1. Sürtünme.....	14
3.2. Aşınmanın Tarifi.....	16
3.3. Aşınma Sistemleri.....	17
3.4. Aşınmaya Etki Eden Faktörler.....	18
3.4.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler	18
3.4.1.1. Malzemeni Kristal Yapısı.....	18

3.4.1.2. Malzemenin Sertliği.....	18
3.4.1.3. Isıl İşlemin Etkisi.....	19
3.4.1.4. Yüzey Pürüzlülüğü.....	19
3.4.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler ve Aşındırıcının Etkisi.....	19
3.4.3. İşletme Koşulları (Basınç, Hız, Kayma Yolu)	20
3.4.4. Aşınma Direncine Karbürlerin Etkisi	21
3.4.5. Matrisin Etkisi.....	21
3.5. Aşınmanın Sınıflandırılması.....	22
3.6. Aşınma Mekanizmalarına Göre Aşınma Türleri.....	22
3.6.1. Adhesiv Aşınma.....	23
3.6.2. Tabaka Aşınması.....	24
3.6.3. Yorulma Aşınması.....	25
3.6.4. Ablativ Aşınma.....	25
3.6.5. Abrasiv Aşınma.....	26
3.6.5.1. Çizme veya Düşük Yüklemeli Abrasyon.....	28
3.7. Aşınmanın Ölçülmesi ve Birimleri.....	30
3.7.1. Ağırlık Farkı Yoluyla Ölçme.....	30
3.7.2. Kalınlık Ölçme Metodu	30
3.7.3. İz Değişiminin Ölçülmesi Metodu.....	30
3.7.4. Radyoizotoplarla Ölçme Metodu	31
4.METALLERARASI BİLEŞİKLER VE KOMPOZİTLERİN	
ABRASİV AŞINMA DAVRANIŞLARI.....	32
4.1. Metallerarası Bileşikler ve Kompozitler.....	34
4.2. Metallerarası Bileşikler, Metalik Alaşımlar ve Seramik Malzemeler	
için Abrasiv Aşınma Davranışları.....	34
4.3. Metalurjik Faktörler Yolu ile (Alaşım Bileşeni ve Isıl İşlemler)	
Aşınma Direncinin İyileştirilmesi.....	37
4.4. Kompozit Muk. Yolu ile Aşınma Direncinin İyileştirilmesi.....	38
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	41
5.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	41
5.2. Aşınma Deneyleri.....	41
5.3. Metalografik Muayeneler	45

5.4. EDS Analizi.....	45
5.5. XRD Analizi.....	46
5.6. Sertlik Ölçümleri.....	46
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	47
6.1. Oda Sıcaklığında Farklı Yükler Altında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri.....	47
6.1.1 Farklı Yüklerde Gerçekleştirilen Aşınma Deney Sonuçları ve Değer.....	47
6.1.2. Deney Numunelerinin SEM, EDS ve XRD Sonuçları ve Değerlendirme....	49
6.2. 100°C’de Farklı Yükler Altında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri.....	53
6.2.1 Deney Numunelerinin SEM, EDS ve XRD Sonuçları ve Değerlendirme...	53
6.3. 300°C’de Farklı Yükler Altında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri.....	55
6.3.1 Deney Numunelerinin SEM, EDS ve XRD Sonuçları ve Değerlendirme...	55
6.4. 450°C’de Farklı Yükler Altında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri.....	58
6.4.1 Deney Numunelerinin SEM, EDS ve XRD Sonuçları ve Değerlendirme....	58
6.5. Oda Sıcaklığında Farklı Aşınma Mesafeleri için Yapılan Aşınma Deneyleri.	61
6.5.1. Aşınma Deney Sonuçları ve Değerlendirme.....	61
6.5.2. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları ve Değerlendirme.....	63
6.6 100°C’de Farklı Aşınma Mesafeleri için Yapılan Aşınma Deneyleri.....	64
6.6.1. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları ve Değerlendirme.....	64
6.7. 300°C’de Farklı Aşınma Mesafeleri için Yapılan Aşınma Deneyleri.....	66
6.7.1. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları ve Değerlendirme.....	66
6.8. 450°C’de Farklı Aşınma Mesafeleri için Yapılan Aşınma Deneyleri.....	67
6.8.1. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları ve Değerlendirme.....	67
6.9. Oda Sıcaklığında Farklı Hızlarda Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri.....	70
6.9.1. Aşınma Deney Sonuçları ve Değerlendirme.....	70
6.9.2. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları	72
6.10. 100°C’de Farklı Hızlarda Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri.....	73
6.10.1. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları.....	73
6.11. 300 ve 450°C’de Farklı Hızlarda Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri.....	74
6.11.1. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları.....	74
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	76
KAYNAKLAR	78

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1a. Yer alan katı çözelti oluşumu	2
Şekil 2.1b. Ara yer katı çözelti oluşumu	2
Şekil 2.2. A_mB_n metallerarası bileşiği için faz diyagramı	3
Şekil 2.3. $L1_2$ yapısının süper örgüsü.....	5
Şekil 2.4. Beta brass yapısının süper örgüleri.....	6
Şekil 2.5. $L1_0$ yapısının süper örgüleri.....	7
Şekil 2.6. $L1_1$ yapısının süper örgüleri.....	7
Şekil 2.7. $D0_3$ ve $L2_1$ yapısının süper örgüleri	8
Şekil 3.1. Metal-metal temasında adhezyon ve kopma bölgeleri.....	15
Şekil 3.2. Tribolojik Sistem ve Elemanları	17
Şekil 3.3. Adhesiv aşınma oluşum safhalarının şematik gösterilişi	24
Şekil 3.4. İki cisimli abrasiv aşınma.....	27
Şekil 3.5. Üç cisimli abrasiv aşınma	27
Şekil 3.6. Toprakta iki cisimli abrasiv aşınma.....	28
Şekil 3.7. Toprakta üç cisimli abrasiv aşınma	29
Şekil 4.1. Metaller, Metallerarası bileşikler ve seramik malzemelerin Özgül aşınma oranları üzerine abrasiv aşınma ortamının etkisi.....	35
Şekil 4.2. 100 μm 'lik garnet taşı parçacıklarına karşı aşınan Fe-Al alaşımlarının Özgül aşınma oranların üzerinde atomik fraksiyonun ve kristal yapının etkisi	37
Şekil 4.3. NiAl-TiB ₂ kompozitlerinin özgül aşınma oranları ve sertlikleri	38
Şekil 4.4. MoSi ₂ -SiC kompozitlerinin özgül aşınma oranları	39
Şekil 4.5. MoSi ₂ -Nb kompozitinin özgül aşınma oranları.....	39
Şekil 5.1. TE53/80004 marka çok amaçlı sürtünme ve aşınma makinesi.....	39
Şekil 5.2. Aşınma deneyinde kullanılan aşındırıcı diskler.	42
Şekil 5.3. Numune tutucu.....	44
Şekil 6.1. Numunelerin yük ve sıcaklık değ. bağlı olarak ağırlık kayıpları.....	48
Şekil 6.2. Yük ve sıcaklığa bağlı olarak, sürtünme katsayısı değişim.....	48
Şekil 6.3. Yük ve sıcaklık ile aşınma yüzeylerinin sertliğinin değişim.	49

Şekil 6.4. Ni_3Al+B metaller arası bileşiğinden alınan EDS analizi.....	50
Şekil 6.5. Oda sıcaklığında, 50N yük altında aşındırılan numuneden alınan EDS analizi.....	51
Şekil 6.6. Oda sıcak. 100N yük altında aşındırılan numuneden alınan XRD analizi.....	52
Şekil 6.7. 100°C’de, 50N yük altında aşındırılan numuneden alınan EDS analizi.....	54
Şekil 6.8. 100°C’de, 100N yük altında aşındırılan numuneden alınan XRD analizi.....	54
Şekil 6.9. 300°C’de, 50N yük altında aşındırılan numuneden alınan EDS analizi.....	56
Şekil 6.10. 300°C’de, 100N yük altında aşındırılan numuneden alınan XRD analizi.....	57
Şekil 6.11. 500°C’de, 125N yük altında aşındırılan numuneden alınan EDS analizi.....	58
Şekil 6.12. Şekil 6.20b’de işaretlenen bölgeden alınan EDS analizi.	59
Şekil 6.13. 500°C’de, 100N yük altında aşındırılan numuneden alınan XRD analizi.....	60
Şekil 6.14. Numunelerin, kayma mesafesi-sıcaklık değişimine göre ağırlık kayıpları.....	62
Şekil 6.15. Kayma mesafesi ve sıcaklığa bağlı olarak, sürtünme katsayısı değ.....	62
Şekil 6.16. Kayma mes. ve sıcaklık ile aşınma yüzeylerinin sertliğindeki değ.....	63
Şekil 6.17. Numunelerin hız-sıcaklık değ. bağlı olarak ağırlık kayıpları.....	71
Şekil 6.18. Hız ve sıcaklığa bağlı olarak, sürtünme katsayısı değişim.....	71
Şekil 6.19. Hız ve sıcaklık değişimi ile aşınma yüzeylerinin sertliğindeki değ.....	72

TABLOLAR

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Aşındırıcı malzemelerin mertlik değerleri.....	20
Tablo 3.2. Aşınma şekilleri ve mekanizmaları.....	23
Tablo 4.1. İntermetalik bileşikler, alaşımlar ve kompozitler için işleme metodları.....	33
Tablo 4.2. 100 µm'lik lal taşı parçacıklarına karşı aşınan metaller, intermetalikler ve seramiklerin özgül aşınma oranları.....	36
Tablo 4.3. Nb parçacık takviyeli MoSi ₂ için özgül aşınma oranları	39
Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan Ni ₃ Al+B metaller arası bileşiğinin kimyasal analizi.....	41
Tablo 5.2. Deneyde kullanılan disklerin (100 Cr 6) % ağırlıklı kimyasal kompozisyonu.....	42
Tablo 5.3. Aşınma deneyi sırasında uyg. yük, yol, kayma hızı ve sıcaklıklar.....	44
Tablo 6.1. Yük ve sıcaklık değişimine göre ağırlık kaybı değerleri.	47
Tablo 6.2. Kayma mesafesi -sıcaklık değişimine göre ağırlık kaybı değerleri.....	61
Tablo 6.3. Kayma hızı - sıcaklık değişimine göre ağırlık kaybı değerleri.	70

FOTOĞRAFLAR

Sayfa No

Fotoğraf 5.1. TE53/80004 marka çok amaçlı sürtünme ve aşınma makinesi.....	42
Fotoğraf 5.2. Numune tutucu.....	44
Fotoğraf 5.3. 10^{-4} gr ağırlığa duyarlı hassas terazi.....	44
Fotoğraf 5.4. Çizici.....	45
Fotoğraf 6.1. Ni_3Al+B metaller arası bileşiğinin orijinal mikroyapısı.....	49
Fotoğraf 6.2. Oda sıcak. gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğ.....	50
Fotoğraf 6.3. Oda sıcak. gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğ.....	51
Fotoğraf 6.4. $100^{\circ}C$ gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.....	53
Fotoğraf 6.5. $100^{\circ}C$ gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.....	53
Fotoğraf 6.6. $300^{\circ}C$ gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.....	55
Fotoğraf 6.7. $300^{\circ}C$ gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.....	56
Fotoğraf 6.8. $500^{\circ}C$ gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.....	58
Fotoğraf 6.9. $500^{\circ}C$ gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.....	59
Fotoğraf 6.10. Oda sıc. gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğ.....	63
Fotoğraf 6.11. Oda sıc. gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğ.....	64
Fotoğraf 6.12. $100^{\circ}C$ 'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğ.....	65
Fotoğraf 6.13. $100^{\circ}C$ 'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğ.....	65
Fotoğraf 6.14. $300^{\circ}C$ 'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğ.....	66
Fotoğraf 6.15. $300^{\circ}C$ 'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğ.....	67
Fotoğraf 6.16. $500^{\circ}C$ 'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğ.....	68
Fotoğraf 6.17. $500^{\circ}C$ 'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğ.....	68
Fotoğraf 6.18. Oda sıc. gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğ.....	72
Fotoğraf 6.19. $100^{\circ}C$ gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.....	73
Fotoğraf 6.20. $500^{\circ}C$ gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları. ...	74

1. GİRİŞ

İleri teknoloji malzemeleri genel itibari ile özel uygulamaları temin maksadıyla tasarlanmaktadır. Bu malzemelerin ilgi duyulan bir sınıfı metallerarası bileşikler olarak günümüzde büyük önem kazanmıştır. Bir çok metallerarası bileşiklerde mevcut bulunan düzenli yapılar, değişik özelliklere (yüksek mukavemet, sertlik ve çevre direnci gibi) sahip malzeme tasarımına yardımcı olur. Yüksek mukavemet ve kırılma tokluğu özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında, makine tasarımı açısından büyük önem arz eder. Bu çalışmanın konusu olan Ni_3Al+B da son yıllarda üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı yüksek sıcaklıkta kullanılan bir metallerarası bileşik olarak karşılaşılmaktadır.

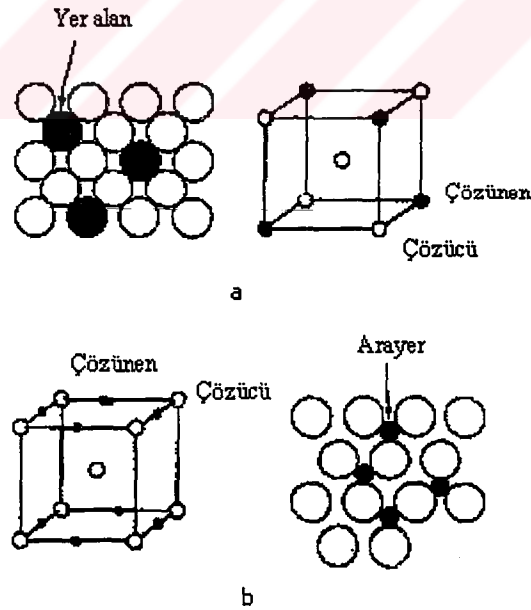
Sanayinin gelişmesi, son yıllarda üretimde kullanılan makina ve teçhizatların enerji sarfiyatının, toplam enerji sarfiyatı içerisindeki payını da arttırmıştır. Teknolojik gelişmeler, ağır çalışma şartlarına (yüksek hız, sıcaklık vs) uyum sağlayacak düşük enerji kayıplı, uzun ömürlü makina tasarımını zorunlu hale getirmiştir. Günümüzün en ileri teknolojisiyle üretilip farklı konstrüksiyonlarda kullanılan makine sistem ve ekipmanları, bir takım olumsuz faktörler sebebiyle zamanla iş yapabilme fonksiyonlarını yitirmektedirler. Bu sonucu hazırlayan en önemli etkenlerden biri de aşınma olarak karşımıza çıkmaktadır. Temas halinde olan ve izafi bir hareket yapan yüzeyler arasında daima harekete karşı yönde bir direnç, yani sürtünme kuvveti mevcuttur. Bunun sonucu olarak aşınma meydana gelir. Özellikle sürtünmeyle çalışan bazı sistemler (frenler, kavramalar vb) hariç, genel olarak eş çalışan parçalarda sürtünme ve aşınmanın azaltılması istenir. Birçok parametreye bağlı olmasına rağmen temel anlamda aşınma bir yüzey problemi olarak düşünülebilir. Makina parçalarının bozulma sebeplerinin analizi; bu bozulmaların %75'inin sürtünme yüzeylerinin aşınması sonucu olduğunu göstermektedir[1]. Dolayısıyla malzeme ömrünün uzamasındaki etken faktörlerden birisi, malzemelerin aşınma mukavemetlerinin artırılması veya uygun malzeme seçimi olacaktır.

Bu çalışmada Ni_3Al+B metaller arası bileşiğinin; yük, kayma mesafesi ve kayma hızına bağlı olarak oda sıcaklığı ile $450^{\circ}C$ sıcaklıkları arasında aşınma davranışları incelenmiştir. Deneyler farklı yük, farklı kayma mesafesi ve farklı kayma hızında gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar değişik malzeme karakterizasyonu metotları kullanılarak yorumlanmıştır.

2. METALLERARASI BİLEŞİKLER

Saf metale diğer bir elementin ilavesi (katı eriyik) saf metalin kafes yapısını, boyutlarını ve görünüşünü değiştirebilmektedir. Saf bir metale (katı eriyik), alaşımlama elementlerinin ilavesi değişik yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Çözünen atomlar, bir kafesteki çözen atomlar ile Hume Rothery Kuralları[2] çerçevesinde yer değiştirebilir. Bu tür alaşımlama “yer alan katı çözelti” olarak bilinir. Bu durum Şekil 2.1a.’da gösterilmektedir. Çözünen atomlar, çözen atomlar ile yakın atomik boyuta sahip olduğundan atomlar yer değiştirirler ve sonuçta kafesi çarpılmaya (distorsiyona) zorlarlar. Eğer elementler kafes yapıları içinde çözünebilirse, aynı kafes türüne sahip olurlar ve iki elementin atomları arasındaki boyut farkı büyükse, yer alan çözeltilerde katı çözünebilirlik o kadar küçük olur.

Çözünen atomlar, çözen atomlar arasındaki boşluklara sıkışabildikleri zaman (Şekil 2.1b.) sistem bir “arayer katı çözelti” oluşur. Bu tür alaşımlama, çözünen atomların boyutunun çözen atomların boyutlarının yaklaşık yarısı kadar veya daha küçük olması halinde ve bir kafeste büyük atomlar arasına yerleştiklerinde meydana gelir[3].



Şekil 2.1 a. Yer alan katı çözelti, b. Ara yer katı çözelti

Çözünen atomların büyüklüğü kadar çözücü atomlar arasındaki mesafenin büyüklüğü de bir arayer katı çözelti oluşumu için önemlidir. Demir, nikel, krom,

Eğer atomlar kafes yapısı içinde çözünmezlerse bir “Mekanik Karışım” oluşur. Her iki çözen ve çözünen atom birbirleri ile birleştikleri zaman ise metallerarası bileşikler oluşur. Metallerarası bileşikler, sabit sıcaklık ve sabit kompozisyonda tek sıvı fazdan tek katı fazına dönüşüm gösterirler. Metallerarası bileşikler, yüksek mukavemet ve sertlik, düşük süneklilik ve iletim özelliklerine sahiptirler[3].



Bir metallerrarası bileşik; bileşimi oluşturan metallerin her ikisinden tamamen farklı renkte olabileceği gibi, mikroyapı itibariyle kolaylıkla fark edilebilecek özelliklere sahiptir. Örneğin; beyaz bir renge sahip olan antimon, metalik-parlak mor renkteki Cu_2Sb metallerrarası bileşimini oluşturmak için daha farklı bir renge sahip olan bakırla birleşerek elde edilir[4].

Metallerarası bileşikler;

- Normal Değerlikli Bileşikler ve
- Elektron Bileşikleri

olmak üzere iki grupta incelenebilir[4].

2.1. Normal Değerlikli Bileşikler

Bu grup bileşiklerde normal kimyasal değerlik kuralları geçerlidir. (Örneğin; Mg_3Sb_2 , Mg_2Sn ve Mg_3Bi_2). Bu bileşikler genellikle güçlü metalik özelliklere sahip bir metal (magnezyum gibi) ile zayıf metalik kimyasal özelliklere sahip diğer bir metalin (antimon, kalay veya bizmut gibi) bir araya gelmesi suretiyle oluşur. Genellikle, böyle bir metallerarası bileşiğin ergime noktası her iki esas metalin ergime noktalarından daha yüksektir. Örneğin; Mg_2Sn metallerarası bileşiğinin ergime sıcaklığının $780^\circ C$ olmasına rağmen bu metallerarası bileşiği meydana getiren esas metaller magnezyum ve kalayın ergime sıcaklıkları sırasıyla 650 ve $232^\circ C$ ' dir[4].

2.2. Elektron Bileşikleri

Bu grup bileşiklerde normal değerlik kuralları geçerli değildir. Fakat bu grubun birçok örneklerinde söz konusu olan metallerarası bileşiklerin bir molekülündeki atomların toplam sayısı ve içerdiği bütün atomların değerlik bağlarının toplam sayısı arasında sabit bir oran vardır. Burada Hume-Rothery oranları olarak bilinen üç farklı oran mevcuttur.

- a) β -Yapısı: Bu yapı için, oran $3/2$ olup $CuZn$, Cu_3Al , Cu_5Sn , Ag_3Al gibi örnek olarak verilebilir.
- b) γ - Yapısı: Bu yapı için, oran $21/13$ olup Cu_5Zn_8 , Cu_9Al_4 , $Cu_{31}Sn_8$, Ag_5Sn_8 , $Na_{31}Pb_8$ gibi intermetalikler örnek olarak verilebilir.
- c) ϵ - Yapısı: Bu yapı için, oran $7/4$ olup $CuZn_3$, Cu_3Sn , $AgCd_3$, Ag_5Al_3 gibi metallerarası bileşikler örnek olarak verilebilir.

Söz gelimi, $CuZn$ bileşiğinde, bakır 1 ve çinko 2 değerliğe sahiptir. Dolayısıyla toplam değerlik sayısı 3'tür. Bu bileşik için toplam atom sayısı ise 2'dir. Buna göre;

oranın 3/2 olduğu tespit edilir. Benzer olarak Cu_3Sn_8 bileşiminde, bakır 1 ve kalay 4 değerliklerine sahiptir. Buna göre aşağıdaki işlemler takip edilirse;

$$\text{Toplam değerlik sayısı} = 31 \times 1 + 8 \times 4 = 63$$

$$\text{Toplam atom sayısı} = 31 + 8 = 39$$

Buradan;

$$\frac{TDS}{TAS} = \frac{63}{39} = \frac{21}{13}$$

olduğundan bu yapı γ -yapısına örnek olarak gösterilebilir[4].

2.3. Süper Örgüler

Katı çözeltilerin büyük bir bölümü, düşük sıcaklıkta düzenli yapıya sahiptir. Düzenli yapı, atomlar yerleşebileceği kafes yapılarındaki yerlerine geliş güzel değil, belli bir düzende yerleştiği zaman meydana gelir. Düzenli yapılar aynı zamanda süper örgüler olarak da bilinir.

Süper örgülerde genellikle düşük sıcaklıklarda uzun periyotlu düzenler oluşabilir. AB veya AB_3 tipindeki kompozisyonlar uzun periyotluluğa yakındır. Kritik bir değer üzerinde bütün sıcaklıklarda atomların yerleşimi açısından bir düzensizlik hakimdir. Sıcaklık kritik değer altına inince düzen kurulur ve sıcaklık azaldıkça düzen artar. Yeterli düşük sıcaklıkta kusursuz düzenliliğe yaklaşılır[5].

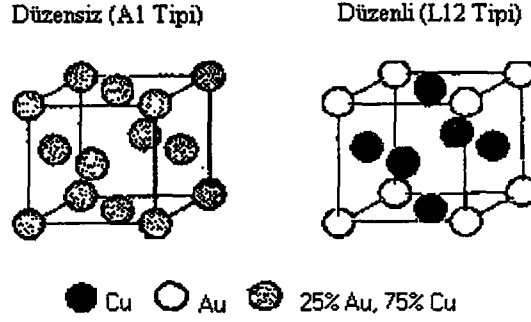
2.4. Süper Örgülerin Yaygın Türleri

Süper örgüye sahip alaşımların çoğu üç ana metalik yapı ile yakından ilgilidir. Bunlar; fcc (A1), bcc (A2) ve hcp (A3) yapılarıdır. Mesela A2 düzensiz yapısıyla yakından ilgili olan süper örgüler; DO_3 , L_{21} ve B2 yapılarıdır. A1 ve A3 tipinde sıkı paket yapıları düzensiz yapıya dayalı süper örgüler ise AuCu_3 (L_{12}), Mg_3Cd (DO_{19}) ve CuAuI (L_{10})'dır[5]. Süper örgüler, aşağıda izah edildiği gibi değişik gruplar altında toplanmıştır.

2.4.1. (L_{12}) Cu_3AuI Tipi Süper Örgüler

Yüksek sıcaklıkta %25 atomik Au ihtiva eden Cu_3Au alaşımı düzensiz yapıdadır ve altın ile bakır atomları bir fcc latisin latis noktalarını gelişigüzel işgal ederler. Kritik

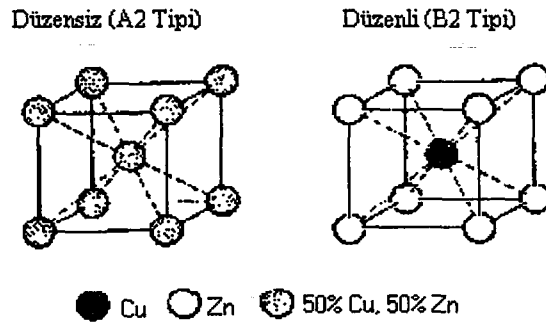
bir sıcaklığın altında tavlınınca (390°C) atomların yayınımları ile Cu atomları yüzey merkezlerine Au atomları ise köşelere yerleşir. Bu yapının tipik örnekleri; Cu_3Au , Pt_3Sn , Al_3U , AlZr_3 , Co_3V , FeNi_3 , MnNi_3 , Si_3U , TiZn_3 ...vb. dir[5].



Şekil 2.3. L_{12} yapısının süper örgüsü.

2.4.2. B2 (Beta Brass) Tipi Süperlatişler

İç içe girmiş iki tane basit kübik yapı olarak görülür. Bazen iki atomlu basit kübik olarak da görülebilir. Düzensiz kristal bcc yapısı (A2)'dir. Düzenli yapısında bakır, küpün merkezine, çinko küp köşelerine yerleşecek şekilde dağılır. CsCl tipi yapıya benzerler (ZnCu yapı). Bu tip süper örgüler alaşım sistemlerinde sıkça rastlanılması mümkündür. Bu yapının tipik örnekleri; β' - CuZn , β - AuCd , β - AlNi , LiTi , vb. [5].



Şekil 2.4. Beta brass yapısının süper örgüleri.

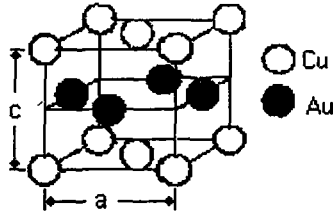
2.4.3. L_{10} veya CuAuI Tipi Süper Örgüler

Atomik olarak %47 ve %63'e kadar, Cu-Au sisteminde (001) düzlemini yalnız bakır veya yalnız altın atomları dolduracak şekilde süper örgüler oluşturabilirler. Her

düzlemde dört aynı cins atom bulunur. Komşu olan düzlemlerde ise, sekiz adet diğer cins atom bulunur.

Bu yapı c/a oranı 0.93 olan bir tetragonal yapıdır ve kısalma %7 kadardır. Uygun orandaki CuAl alaşımı 385°C'nin altında düzenli yapıya geçer.

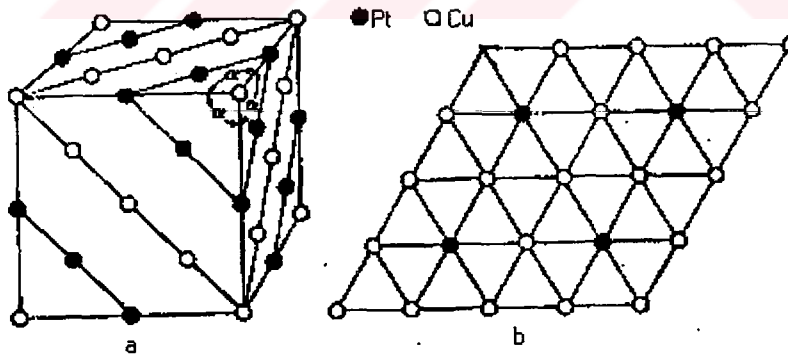
CuAuI tipinde süper örgü yapısına sahip çok sayıda alaşım mevcuttur[5].



Şekil 2.5. L₁₀ yapısının süper örgüleri.

2.4.4. L₁₁ Tipi Süper Örgüler

Cu-Pt sistemi, atomik olarak %50 oranında fcc düzensiz yapısına sahiptir. Fakat uygun şartlar sağlandıktan sonra (111) düzlemi birbirini takip edecek şekilde Cu ve Pt atomları tarafından meydana getirilirler ve rombohedral yapı oluştururlar.



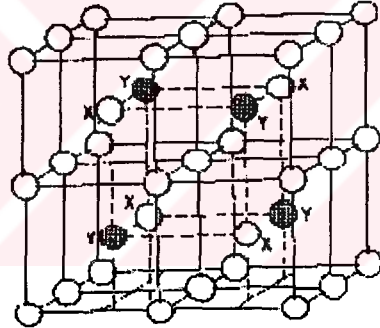
Şekil 2.6. L₁₁ yapısının süper örgüsü.

Eğer Cu'nun yüzdesi %50'yi aşarsa Pt'li (111) düzlemlerinde bazı Pt atomlarının yerlerini gelişigüzel bir şekilde Cu atomları alır. Pt'nin %50'yi geçmesi halinde Cu atomlarının (111) düzlemlerinde Cu atomlarının yerlerini gelişigüzel bir şekilde Pt atomları alır [5].

2.4.5. DO_3 ve $L2_1$ Süper Örgüler

FeAl yapılarında; Al atomları, bcc α -demir kafes yapısı içerisinde gelişigüzel bir şekilde yerleşirken, atomik olarak %18'lik Al konsantrasyonundan sonra tercihli yerlere yerleşmeye başlayarak düzenli yapı meydana getirirler. FeAl ve Fe_3Al süper örgülerinin her ikisinde bcc dört bitişik birim hücrenin hacim merkezli atomları ile Al atomlarının yer değiştirmesi şeklinde meydana gelir. Bu tip süper örgüler DO_3 tipi süper örgülerdir. Atomik olarak %18-25 Al oranı için atom sayısı arttığından dolayı Al atomları Y ve X konumlarının her ikisini de doldurarak FeAl alaşımını oluştururlar. Bu yapı düzenli β brass yapıya benzer. Tam düzenli Fe_3Al yapıda her Al atomu sekiz Fe atomu tarafından çevrilmiştir. Bu yapıyı elde etmek için $550^\circ C$ 'den oda sıcaklığına yavaş olarak soğutma gerekir.

DO_3 tipi süper örgülerin en bilinen özelliği her bir atomun maksimum sayıda benzemeyen atom tarafından çevrilmiş olmasıdır.



Şekil 2.7. DO_3 ve $L2_1$ yapısının süper örgüleri.

DO_3 ile yakından ilgili olan diğer bir süper örgü $L2_1$ süper örgüsüdür. A_2BC şeklinde bir üçlü element ihtiva eder. En tanınmış örneği Heusler alaşımıdır. Cu_2MnAl yapısını oluşturan atomlar anti-ferromagnetik ve düzensiz yapısı anti-ferromagnetik olmasına rağmen süper örgüsü ferromagnetik özellik gösterir. Yukarıda birim hücrede Al atomları Y pozisyonlarını, Mn atomları X pozisyonlarını ve Cu atomları da kalan pozisyonları işgal eder.

Cu_2MnSn bileşiğinde, Cu_2MnAl bileşiğindeki Al atomlarının yerlerini Sn atomları alır. Bunun dışında Cu_2MnGa da ferromagnetik süper örgülere sahiptir.

Cu_2NiAl ve Zn_2CuAu ise diğer Heusler alaşımlarıdır ve aynı zamanda termoelastik martenzitlere de sahip olur (shape memory effect) [5].

2.4.6. DO_{19} veya Mg_3Cd Tipi Süper Örgüler

AuCu_3 , L1_2 tipi süper örgüsüne benzer bir yapıdır. DO_{19} tipi süper örgü, hcp yapıdadır. a, düzensiz yapıdaki değerinin iki katına çıkar ve c değişmez. B atomları dört alt örgüden (birim hücresindeki yerden) birini işgal eder. A_3B tipinde formüle sahiptirler. Mg_3Cd , MgCd_3 ; DO_{19} 'un en tanınmış örnekleridir[5].

2.5. Düzenli Yapıdaki Metallerarası Bileşiklerin Tarihçesi

Metallerarasında meydana gelen kimyasal bileşimler konusu uzun zamanlardan beri çalışılmaktadır. İlk zamanlarda kimyacılar metallerin kendi aralarında nasıl birleşebildiklerini anlamak konusunda oldukça zorlandılar. Çünkü sık sık basit değerlik konusu ile ilgili uyumsuzlukların var olduğu ortaya çıktı. Gerçekten geçen yüzyılda Daltonides ve Berthollides bileşikleri arasında bir fark ileri sürüldü. Birinci bileşikte, bileşen atomlarının sayılarının basit oranları ile bileşik oluşumu söz konusu iken, ikinci bileşikte ise geniş bir kompozisyon aralığı için farklı bileşiklerin varlığı söz konusu oldu. Eski araştırmacıların bir çoğu halen bu farklılığı araştırma çabasındadırlar[6].

Konu üzerine hazırlanan ilk klasik, 1918 yılında iki İtalyan kimyacı tarafından yayınlanan bir kitaptır. Ayrıca İngiliz metalurjist C.H. Desh de 1914 yılında metallerarası bileşikler konusu üzerine bir çalışma yapmış ve metallerarası bileşiklerin bileşenlerinin teorilerini oluşturmak için teşebbüslerin kısmen sonuçsuz olduğunu beyan etmiştir. 20 yıl sonra Desh konuya yeniden dönüş yaptığı zaman kendisini teorinin durumu hakkında çok daha avantajlı hissetmiştir. Çünkü aynı yıllarda metallerarası fazlar ve bileşiklerin tartışma konusuna Hume-Rothery; atomik büyüklük faktörü, elektron/atom oranı ve elektronegatiflik açısından fikirler ileri sürmüştür. Günümüzde özelleştirilmiş bir takım fiziksel kavramlar, her iki ikili ve çoklu metallerarası bileşiklerin anlamlarını ifade etmek için kullanılmakta ve bunlar artık kimyasal uyumsuzluklar olarak değerlendirilmemektedirler[6].

Konu ile ilgili araştırma yapan ilk yazarlar, metallerarası fazların (terminal katı çözeltilerden farklı olarak) atomik düzenliliğin bir sonucu olarak meydana geldiğini

bilmemekteydiler. Bu durum özellikle Rus metalurjist Kurnakov için birçok karmaşıklığa neden olmuştur. Kurnakov, devrim öncesinde Cu-Au alaşımlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerinde bazı şaşırtıcı kuraldışı özelliklerin farkına vardı. Bu özellikler, bu alaşımın yalnızca belli bileşimlerinde ve yavaş soğuma sonrasında elektrik özdirençlerinin çok düşük olduğu ve asitler tarafından kimyasal saldırılara maruz kaldığı şeklinde tespit edilmiştir. Kurnakov, bu uyuşmazlıkları, Cu ve Au arasındaki bir takım katı çözeltilerin oluşumunu sonuca bağlamak istedi. Gerçekte, bir yüksek sıcaklıktan su verilen alaşımlar bu uyuşmazlıkları göstermiş ve meseleyi daha da karmaşık hale getirmiştir. Johansson ve Linde'den önce, 1925 yılında probleme uygulanan x-ray diffraksiyonu, bu tür malzemelerde uzun periyotlu düzenliliğin (LRO-long range order) mevcut olduğunu ortaya koydu. Daha sonraları, birçok farklı metallere fazlar ile yapılan çalışmalar sonucu, x-ray difraksiyon analistleri tarafından LRO'nun aşırı derecedeki geniş dağılımı ispat edildi ve superlatis tiplerinin büyük bir kısmı bulundu. Bu araştırmaların bazıları (Bradley ve Taylor tarafından Fe_3Al 'deki Heusler tipi superlattice çalışmaları ve Bradley ve Jay tarafından NiAl 'deki yapısal boşlukların keşfedilmesi gibi) klasik bir statüye ulaşmıştır[6].

Kurnakov'un ilk buluşları; yüksek sıcaklıklarda Cu_3Au ve CuAu gibi katı fazların düzensiz olduğu ve yalnızca yavaş soğumalar sonrasında düzenli yapıya dönüştükleri şeklindedir. Daha sonraları ise kritik sıcaklıklar keşfedildi. Bu olay, atomik ve magnetik düzenlilik arasındaki ilişkinin araştırılmasına sebep olmuştur[6].

Bugün bile fizikçilerin teorik yaklaşımları ve metalurjistlerin yorumları birçok alanda farklılık göstermektedir. Metalurjistlerin genel olarak literatürde bahsettikleri yapısal metallere bileşiklerdir. Fizikçiler ise daha filozofik anlamdaki konularla ilgilenmektedirler. Ancak metalurjistlerin bu fikirleri kendileri için oldukça fazla önem taşımaktadır. Bu konuda önemli bir örnek Pitsch ve Inden tarafından yapılan son çalışmadır[6].

1936 yılında İngiltere'de Sykes, antifaz bölgelerini keşfetti. Çok yakın bir zamanda, düzenli bir metallere bileşikteki antifaz bölgelerinin var olduğunun ve bileşiğin donma sıcaklığının altında kritik bir düzenlilik sıcaklığına sahip olduğunun farkına varılmıştır. Sykes'in çalışmaları tamamen x-ray difraksiyon metodu ile yapılmıştır. Fakat superlatislerdeki antifaz bölgeleri ve diğer kusurlar üzerine son 10 yıllık araştırmalar çoğunlukla TEM yardımıyla yapılmıştır ve bazı önemli sonuçlar elde

edilmiştir. Hatta optik mikroskobun basit teknikleri bile faydalı bilgiler verebilmektedir. Örneğin polarize ışık kullanarak rombohedral faz CuPt'deki düzenliliğin araştırılması için yapılan bir çalışma, bölgelerin tane sınırlarında ve kusurlarda çizikler olarak nasıl oluşabileceğini göstermiştir. Optik ve elektron mikroskobundan alınan bölge morfolojileri konulu tartışmalar Tanner ve Leamy tarafından literatürde ele alınmıştır[6].

Bazı alaşımlar, kritik sıcaklığın düşük bir değerinde (tipik olarak $T_c=150^\circ\text{C}$), LRO oluşturma eğilimindedirler. Bu alaşımlar; Cu_3Zn , Cu_3Al , NiFe ve Au_3Cu 'yu içermekte ve düzenlilik, taramalı kalorimetre kullanılarak çok etkili olarak çalışılmaktadır. NiFe alaşımında yapılan bir çalışma; LRO'nun, radyasyon sırasında alaşımın tavanmasıyla başarılabilirliğini göstermiştir. Yine benzer olarak, 1 milyon yılda 1°C soğuma ve ani bir çarpma sonucu kırılmak suretiyle elde edilen büyük meteorların, LRO düzenine sahip NiFe oluşturmak için gereken yeterli zamana sahip olduğu da keşfedilmiştir. Düzensizlik ve düzensizliğin difüzyonla ilişkisini göstermek için yüksek sıcaklıklardan su verilmiş alaşımların izotermal düzenlilik kinetikleri ile alakalı deneysel ve teorik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar Cahn tarafından tekrar edilmiştir[7].

Metallerarası bileşiklerin katı hal kimyalarının anlaşılmasıyla ilgili olan ilk çalışmalar, oluşacak bileşikleri tahmin etmeyi amaçlamıştı. Tahmin edilen ikili bileşiklerin kristal yapıları; AB_2 , AB_3 , A_{17}B_2 ve AB_{13} gibi yapılarıdır.

Yapıyı tahmin etmek için kısmen başarılı olmuş yarı-amprik bir yaklaşım Pettifor öncülüğünde "Yapı Haritasını" oluşturma metodu olarak gerçekleştirilmiştir[8]. Bu metot, çok başarılı olmakla beraber yapı haritasının imal edilmesi için birkaç yaklaşımdan birisidir. Büyüklük faktörü, e/A oranı ve elektronegatiflik üzerine desteklenmiş diğer bir yaklaşım Villars tarafından gerçekleştirilmiştir[9]. Diğer bir etkili yarı-amprik yaklaşım, bileşiklerin oluşum enerjilerinin tahmin edildiği "Miadene Metodu"dur[10].

2.6. Metallerarası Bileşiklerin Mekanik Özellikleri

Düzenli alaşımların mekanik davranışlarının çalışmaları ilk olarak Schenotay'daki GE-Araştırma Laboratuvarı ve Birmingham Üniversitesinde başlatılmıştır[11].

Uzun yıllar boyunca çalışmalar , kritik sıcaklık (T_c)'nin üzerine ısıtılmak ve su vermek suretiyle düzensizleştirilebilen fazlar üzerine toplandı. Cahn, İki Yönlü Düzenlilik (Reversibly Ordered) ve Tek Yönlü Düzenlilik (Permanently Ordered) kavramlarını ortaya attı. İki yönlü düzenlilik ifadesi T_c 'nin altında ve üstünde farklı düzenli yapıların söz konusu olduğunu, tek yönlü düzenlilik ifadesi ise T_c 'nin altında ve üstünde aynı düzenli yapının söz konusu olduğunu belirtmektedir. Bu ilk çalışmaların sonuçları 1966 yılında Stoloff ve Davies ve Cahn, 1967 yılında Lawley ve 1971 yılında Stoloff tarafından özetlendi[12]. Bu yıllarda en çok çalışılan bileşikler; Cu_3Al , Ni_3Fe , Ni_3Mn , $FeCo$, $CuZn$, $NiAl$, Fe_3Al ve Mg_3Cd 'yi içermektedir. Ayrıca kısa mesafeli diziliş düzeni (SRO-short range order)'nin etkisi de uzun mesafeli diziliş düzeni (LRO)'nunki gibi incelenmiştir.

Son yıllarda çalışmalar, “Gerçek” yapısal metallerarası bileşikler üzerine yoğunlaşmıştır. Yamaguchi ve Umakoshi tarafından gerçek yapısal metallerarası bileşiklerin plastik deformasyonu araştırılmıştır.

Düzenli alaşımlar, düzensiz alaşımlardan çok daha hızlı bir şekilde çalışma sertleşmesine uğrarlar. Bu teoremin önemli bir kısmı (halen tamamen kesin olarak yayınlanmamıştır), antifaz bölge sınırının bir şeridini arkasından sürükleyen hareketli bir dislokasyondaki jogların mevcut bulunduğu fikridir.

Çok kristalli yapıdaki $FeCo$ gibi alaşımların Hall-Petch eğimi ve engellemesi, düzenliliğin durumuna çok duyarlıdır. Dolayısıyla alaşımlardaki sünek-kırılgan geçiş, bir problem olabilir. Bu nedenle $FeCo$, tamamen düzenli olduğu zaman oda sıcaklığında kırılgandır. Metallerarası bileşiklerin sürünmesi ayrıntılı olarak çalışılmamıştır. Deneyler ve teorilerden, kararlı durum sürünme oranının yarı geçirgenlik (self-diffusivity)'in birinci kuvvetine orantılı olduğu ispatlanmıştır. $NiAl$ üzerine Whittenberg ve Fe_3Al üzerine Lawley ve arkadaşları tarafından yapılan ilk çalışmalar bu durumu anlaşılabilir bir hale getirmiştir[13].

Plastik olarak deforme olmuş metallerarası bileşiklerin ıslahı ve yeniden kristalleştirme işlemleri, LRO'nun tane sınırı hareketliliğini 100-300 kat aşağıya düşürdüğünü gösterir. Uygun olarak, soğuk işlenmiş bir metallerarası bileşik (bu işlem Ni_3Al 'ye dikkate değer şekilde uygulanır), tamamen yüksek bir sıcaklık için (bu sıcaklık T_c 'nin altı) fazladan bir mukavemet sergileyebilir. Bu alandaki benzer bir çalışma yakın zamanda Cahn tarafından yeniden tekrarlanmıştır. Yeniden kristalleştirme

başlamadan önce alaşım ya yumuşamakta veya sertleşmektedir (iyileşme veya uzama-yaşlanma sertleşmesi).

2.6.1. Ni₃Al Metallerarası Bileşiği

Aoki ve İzumu'nun bu malzemeyle ilgili ilk çalışmalarını takip eden yıllarda kapsamlı çalışmalar borun çok küçük miktarlarda ilavesinin Ni₃Al'yi sünekleştirdiğini göstermiştir[14]. Çalışmalarda daha çok nikel bileşiminin %76 veya daha fazla olması durumu için bor sünekleştirme mekanizması, tane büyüklüğü, tane şekli ve benzer konular üzerinde yoğunlaşmıştır. Özellikle geçmiş zamanlarda ilgi uyandıran bir hipotez ileri sürülmüş ve Ni₃Al'nin tane sınırında Ni ve B'un segregasyonlarının birleşmesinin bu bölgede ince tabakalı düzensiz bir yapıyı oluşturabileceği ve bu suretle malzemenin sünekleştiği belirtilmiştir. Bu hipotez hakkındaki fikir ve ispatlamalar Cahn'ın yakın bir zamandaki çalışmasında tartışılmıştır[15].

3. SÜRTÜNME VE AŞINMA

Temas halinde olan malzemelerin sürtünmesi ve bunun sonucu meydana gelen aşınma özellikleri; makine elemanlarının ve dizaynlarının en önemli problemlerinden biridir. Çünkü temas eden yüzeylerde, sürtünme kuvvetleri güç kaybına, aşınma ise işleme toleranslarının kötüleşmesine sebep olmaktadır.

3.1. Sürtünme

Sürtünme, bir katı cismin, kendisiyle temasta olan başka bir katı cismin bağlı hareketine göstermiş olduğu dirençtir. Hareket doğrultusunda ve zıt yönde olan bu dirence sürtünme kuvveti denir. Temasta olan katı cisimlerden birinin diğeri üzerinde kayma hareketine başlaması için gerekli olan kuvvete Statik sürtünme kuvveti, kayma hareketini devam ettirmek için gerekli kuvvete de Kinetik (Dinamik) sürtünme kuvveti denir.

Dinamik sürtünme kuvveti, statik sürtünme kuvvetinden daha küçüktür. Sürtünme de, temas eden yüzeyler arasındaki hareket kayma ve yuvarlanma yada bu iki hareketin bileşimi şeklindedir[16].

İki temel sürtünme kanunu vardır. Birinci kanunda; Sürtünme kuvvetini sürtünen yüzeyler arasındaki temas alanından bağımsız olduğu, ikinci kanunda ise sürtünme kuvvetinin, sürtünen cisimlere gelen normal kuvvetle orantılı olduğu belirtilmiştir[17].

İkinci kanuna göre sürtünme katsayısı tanımı yapılabilir. Buna göre; Sürtünme kuvveti normal kuvvetle orantılıdır.

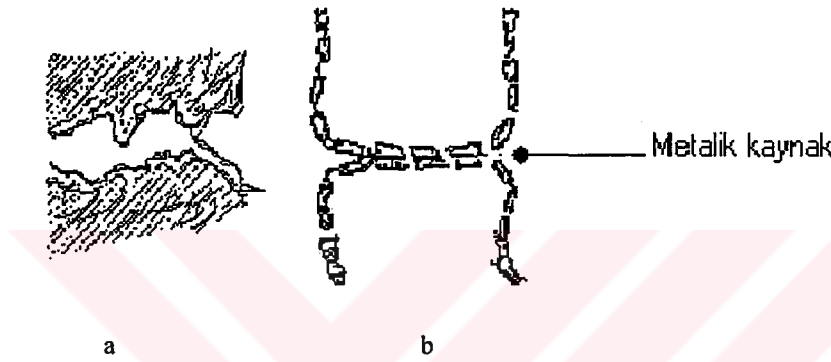
$$F_{\text{sür}} \propto F_{\text{nor}}$$

$$F_{\text{sür}} \propto \mu F_{\text{nor}}$$

Sürtünme katsayısı μ , sürtünmeyi karakterize eden, önemli bir faktördür. Statik durumda statik, dinamik durumda ise dinamik sürtünme katsayısı olarak tanımlanır. Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından biraz daha büyüktür. Deneyler göstermiştir ki; dinamik sürtünme katsayısı kayma hızına bağlıdır. Hızın artması halinde azda olsa değerinde bir düşme görülür[16]. Statik sürtünme katsayısı temas süresine bağlıdır. Temas süresini artmasıyla, sürtünme katsayısı da artar.

Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulduğu takdirde sürtünmenin azaldığı bilinmektedir. Yağlayıcı madde, malzeme yüzeyi üzerinde adhezyon kuvveti nedeniyle bir film teşkil ederek, metalik teması kısmen veya tamamen önler. Eğer yüzeyler tamamen metalik temastan ayrılmış ise buna sıvı sürtünmesi, kısmen ayrılmış ise bu durumda da yarı sıvı sürtünmesi denir.

Yük tatbik edilmeden önce yüzeylerdeki bu tabakalar arasında bir bağlantı oluşur. Yüklemeden sonra tabakaların bir kısmı kopar ve temas alanında metal kayması meydana gelir.



Şekil 3.1. Metal-metal temasında adhezyon ve kopma bölgeleri [18].

Sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı ile ilgili bağıntılardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

1. Sürtünme katsayısı, metalik kaynak bağı teşkil etmiş temas noktalarının kayma mukavemeti (τ_{ko}), tabakanın kopma mukavemeti (τ_{ko}) ve bağlantının kayma mukavemetine (τ_{ko}) bağlıdır.
2. Temas noktalarının kayma mukavemeti, temastaki malzemenin cinsine bağlıdır. Birbirleriyle kolayca alaşım yapan malzemeler arasında kuvvetli bağlar oluşur. Demir-karbon ve demir-nikel gibi birbiri üzerinde kayan malzemelerden, biri sert diğeri yumuşak olduğu takdirde; yumuşak malzeme diğeri malzemeyi kendi parçacıklarından oluşan ince bir tabaka ile kaplar ve bu şekilde iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kaymış olur. Yumuşak malzeme bir yağlayıcı malzeme gibi rol oynar. Bu durumda sürtünme katsayısı düşer. Bilindiği gibi birbirleriyle kolayca alaşım yapan malzemeler arasında kuvvetli kaynak bağları olmamasına özen gösterilmesi gerekir.

Yapılan araştırmalar, hegzagonal kafesli metallerin (τ_{ko})sürtünme katsayılarının daha düşük olduğunu , kübik hacim ve yüzey merkezli kafes sistemine sahip metallerin sürtünme katsayılarını ise daha büyük olduğunu göstermiştir[19].

3.2. Aşınma

Aşınma hakkında yapılan kabul görmüş tarifler şunlardır:

“Birbirlerine göre hareket halinde olan eş yüzeylerden birinde veya ikisinde meydana gelen malzeme kaybı”

“Katı cisimlerin yüzeylerinden tribolojik tesirlerle sürekli malzeme kaybı”

“Kullanılan malzemelerin yüzeylerine gaz, sıvı ve katıların teması neticesinde çeşitli etkenlerle malzemenin yüzeyinden mikro taneciklerin kopması sonucu meydana gelen yüzey bozulması”

“Malzeme yüzeylerinin, daha ziyade mekanik zorlamalar sebebiyle, bazı hallerde kimyasal tesirlerle küçük parçacıkların ayrılması sonucu değişmesi”

“Aşınma, sürtünen yüzeylerde malzemenin mekanik etkenlerle ve istenilmediği halde kopup ayrılmasıdır.”

“Mekanik bir etkinin sonucunda, bir yüzeyden parçacıkların yavaşça kalkmasıdır.”

“Tribolojik sistemi oluşturan eleman ve faktörlerin karşılıklı etkileşimlerinin ortak bir ürünüdür.”

Bu tariflerin bütünü kapsayan genel bir tarif şu şekilde verilebilir:

“Aşınma; kullanılan malzemelerin yüzeylerinin daha ziyade mekanik olarak etkileyen enerjiler ve mekanik etkiler ile küçük parçacıkların ayrılması sonucu istenilmeyen şekilde değişikliğidir.”

Bu genel tarife göre meydana gelen hasarın aşınma olarak ele alınabilmesi için aşağıdaki şartları sağlaması gerekir:

- Mekanik bir etkinin olması,
- Sürtünmenin olması (izafi hareket),
- Yavaş, fakat devamlı olması,
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- İstenmediği halde meydana gelmesi.

Yukarıda belirtilen etkilerin dışında herhangi bir sebepten dolayı hasar meydana geliyor ise aşınmanın diğer hasarlarla beraber olduğu söylenebilir. Fakat bu şartlar herhangi birini gerçekleştiriyorsa bu hasar türünün aşınma olarak değerlendirilmesi mümkün değildir.

3.3. Aşınma Sistemleri

Bir aşınma sisteminde;

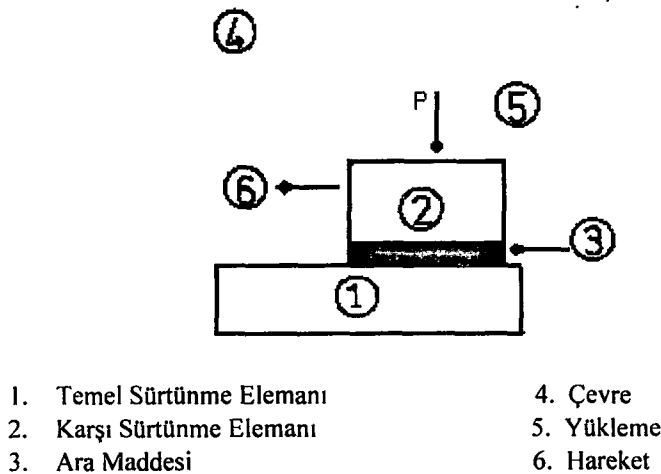
- Ana malzeme (aşınan),
- Karşı malzeme (aşındıran),
- Ara malzeme,
- Yük,
- Hareket.

aşınmanın temel unsurlarıdır.

Aşınma hadisesi içerisinde karşılaşılan temel unsurlar bir sistemi oluşturacaktır. Bu sebeple aşınma problemi kendi sistemi içerisinde incelenmeyi gerektirmektedir. Bu sistem, tribolojik sistem olarak adlandırılmaktadır.

Triboloji; sürtünme, yağlama ve aşınma kavramlarını kapsar.

Tribolojik sistem ise; “karşılıklı etkileyen elemanlarda esas cisim, karşı cisim ve ara madde, hız, termal şartlar ve yükün kombine etkisiyle neticelenen aşınmayı inceler.” Bir tribolojik sistem, elemanları ile birlikte şematik olarak Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Tribolojik Sistem ve Elemanları

Sistem içinde aşınmayı etkileyen diğer faktörler;

- Temas eden malzemelerin yapısı
- Basınç veya kuvvet
- Hız
- Sıcaklık, ortamın nemi ve basıncı, korozyon etkiler, yağlama gibi çevre şartları
- Yüzey düzgünlüğü

şeklinde özetlenebilir.

3.4. Aşınmaya Etki Eden Faktörler

Aşınmayı etkileyen pek çok faktörlerden bahsetmek mümkündür. Bu faktörler genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılarak incelenmiştir[20].

- a) Ana malzemeye bağlı faktörler (malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü, malzeme boyutu).
- b) Karşı malzemeye bağlı faktörler (aşındırıcının etkisi).
- c) Ortamın etkisi (sıcaklık, nem, atmosfer).
- d) İşletme koşulları (basınç, hız, kayma yolu).

3.4.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler

3.4.1.1. Malzemenin Kristal Yapısı

Malzemenin kristal yapısının aşınma direncine etkisi araştırılmıştır. Sıkı paket yapıya sahip malzemede aşınma direncinin, diğer kristal yapılarına göre daha büyük olduğu gözlenmiştir[21]. Buna örnek olarak kobalt gösterilebilir. Kobalt oda sıcaklığında sıkı paket hegzagonal kristal yapısına sahiptir ve aşınma direnci oldukça yüksek olan bir metaldir. Fakat bu metalin 417°C 'deki kübik yüzey merkezli kristal yapıya dönüşümü ile metalin aşınma direnci düşmektedir[22].

3.4.1.2. Malzemenin Sertliği

Aşınma direncini etkileyen faktörlerin başında gelen sertlik ile aşınma direnci arasındaki ilişki belli bir düzeye kadar doğrusal değişim gösterir. Yani sertliğin artması ile aşınma direnci de artar. Ancak belli bir değerden sonra sertlik, aşınmaya karşı yeterli direnci sağlayamaz[23].

Tavlanmış saf metallerde ve çeliklerde bağıl aşınma direnci (R) ile sertlik (H) arasında doğru orantılı bir değişim tespit edilmiş olup, aşağıdaki gibi doğrusal bir ilişkinin varlığı belirlenmiştir[24].

$$R=b.H$$

Burada “b” bir malzeme sabitidir.

3.4.1.3. Isıl İşlemin Etkisi

Isıl işlemin etkisiyle mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler aşınma direncini büyük ölçüde etkiler. Isıl işlemle sağlanan sertleştirme ile aşınma direnci artırılabilir. Yine ısıl işlemle malzemenin mikroyapısı değiştirilebildiğinden aşınmaya etki eden birçok faktör değiştirilerek metallerin aşınma davranışlarını önemli ölçüde geliştirmek mümkündür.

3.4.1.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Sürtünme kuvvetini yakından ilgilendirdiği için yüzey pürüzlülüğünün aşınmaya etkisi büyüktür. Pürüzlülüğün yüksek olduğu yüzeylerde temas alanı küçük, birim yüzeye tesir eden kuvvet büyük olacaktır. Bu sebeple yüzey pürüzlülüğü yüksek olan malzemelerde aşınma miktarı daha fazla olmaktadır.

Başlangıç şartlarında yüzey pürüzlülüğünün kontrolü kolaydır. Fakat çalışma sırasında aşınma mekanizmasına göre değişen yüzey profilinin kontrolü imkansızdır. Bunun için uygun çalışma çiftleri ile çalışılması uygundur.

3.4.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler ve Aşındırıcının Etkisi

Laboratuar deneylerinde çok çeşitli aşındırıcılar kullanılır. Aşındırıcı tanenin boyutu, sertliği ve şekli aşınma hızında önemli rol oynar. Tablo 3.1 de bazı aşındırıcıların sertlik değerleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Aşındırıcı malzemelerin sertlik değerleri.

Aşındırıcı cinsi	Mikrosertlik(kg/mm ²)	Dayanabildiği sıcaklık(°C)
Elmas	10000	700-800
Bor karbür	3700-5000	700-800
Silisyum karbür	2300-2600	1300-1400
Alüminyum oksit	2000-2300	1700-1800

Alüminyum oksit (Al_2O_3) aşındırıcı taneleri sert ve köşelidirler. Silisyum karbür (SiC) aşındırıcı taneleri ise daha sert ve köşeli olmalarına rağmen, alüminyum aşındırıcılara göre kırılırlar. Yüksek sıcaklıklarda bazı alümina ve silisyum karbür aşındırıcıların sürtünme katsayıları incelenmiş, neticede silisyum karbürün sürtünme katsayısının sıcaklığın yükselmesi ile azaldığı bulunmuştur[25].

Yüzeyler arasında aşınma söz konusu olduğuna göre sürtünme kuvvetinin bir kısmı sistemde sıcaklık olarak ortaya çıkacaktır. Özellikle sistemde kuru bir sürtünme söz konusu ise ortaya çıkan ısının boyutları oldukça yüksek olmakta, hatta bazı malzemelerde mikroyapı değişikliğine bile sebep olmaktadır. Co-Co çiftinin sıcaklığa bağlı olarak, belli bir sıcaklıktan sonra değişik mikroyapıya sahip olması sıcaklığın aşınma üzerindeki etkisini karakterize etmesi bakımından ilgi çekicidir.

Yapılan araştırmalar sıcaklığın artmasının aşınmayı belli bir sıcaklık değerine kadar etkilemediğini daha sonraki sıcaklıklarda ise tesirini hissettirdiğini göstermiştir. Yapılan çalışmalarda ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerin yüksek aşınma direncine sahip olduğu da tespit edilmiştir[26].

Rabinowicz, yüksek nem oranının, abrasiv aşınma miktarının yaklaşık %15 artmasına sebep olduğunu ve su buharının diğer yağlayıcılara benzer olarak abrazyon etkisini fazlalaştırdığını belirtmiştir[27].

3.4.3. İşletme Koşulları (Basınç, Hız, Kayma Yolu)

Aşınma sistemi içerisinde aşınma yüzeyinin maruz kalacağı basıncın büyüklüğü, birim yüzeye uygulanan kuvvetin ve dolayısıyla sürtünme kuvvetini büyümesini sağlayacağından, aşınmanın da artmasına sebep olacaktır. Araştırmacıların bir çoğu kritik bir yükleme miktarına kadar yükün artışı ile hacimsel aşınmanın orantılı bir

değişim gösterdiğini açığa çıkarmıştır. Kritik yükleme miktarı, aşınma yüzeyinin sertliğinin soğuk deformasyonla belli bir oranda arttığı değer olarak belirlenmiştir.

3.4.4. Aşınma Direncine Karbürlerin Etkisi

Çok fazlı alaşımlarda abrasiv aşınma ile sertlik arasında her zaman doğru bir orantı yoktur. İlişki kısmen fazların ayrı ayrı gösterdikleri davranışa dayanmaktadır. Ayrıca karbürlerin hacim oranı, şekli ve karbür/matris ara yüzeyinin mukavemeti de aşınmada önemli bir rol oynamaktadır[21]. Birbirine yakın olarak yerleşmiş karbürler, matrisin desteklenmesi ve matrisin plastik deformasyon kabiliyetinin azaltılması bakımından abrasiv aşınma direnci üzerine faydalı bir etkiye sahiptir. Örneğin karbürlerin abrasivlere direnç gösterecek kadar sert olduğu farz edilirse ve abrasivlerin, komşu iki karbür arasındaki matris fazına batacak kadar küçük, sert ve keskince olduğu kabul edilirse; malzemenin aşınma mekanizması, büyük oranda matris fazıyla kontrol edilecektir. Eğer matris fazı kolayca abrasiv aşınmaya maruz kalıyorsa ve karbür/matris ara yüzeyindeki bağ zayıf ise karbüre destek azalacaktır. Öte yandan eğer abrasiv partiküller komşu iki karbürün arasındaki matris fazına batacak kadar küçük değilse aşınma hızı karbürlerin kopma hızına bağlı olacaktır. Böyle bir durumda karbür ve abrasivin sertliği, karbür boyutu, karbür hacim oranı, abrasiv tipi daha az önemlidir.

Karbürlerin kırılması ve dökülmesi durumunda aşırı ağırlık kaybından dolayı aşınma direncinde bir azalma görülür. Bazı araştırmacılar ağırlık kaybının karbür hacim oranı ile doğrusal olarak azaldığını öne sürmüşlerdir. Fakat yüksek karbür hacim oranına ve yüksek sertliğe sahip alaşımda en düşük aşınma direnci elde edilmesinden dolayı bu hususta kesin yorum yapmak zorlaşmaktadır. Aşınmış yüzeylerin incelenmesi neticesinde matris içindeki M_7C_3 ve M_2C karbürlerinin aşınma sırasında koptuğu ve bunların ilave abrasiv partiküller oluşturarak aşınma hızını arttırdığı görülmüştür[28].

3.4.5. Matrisin Etkisi

Karbürler matris içerisinde süreksiz olduğunda matris tarafından desteklenmesi gerekir. Eğer matris tarafından yeterli destek sağlanır ise abrasiv aşınma sırasında karbürlerin dökülmesi önlenebilir[29]. Çoğu durumlarda bilhassa ağır abrasiv aşınma şartları altında çatlaklar önce karbür/matris ara yüzeyindeki yüksek gerilme konsantrasyonlarından dolayı bu bölgelerde başlamaktadır. Daha iyi abrasiv aşınma

direncinin matris fazının artan mikrosertliği ile elde edilebildiği düşünülebilir. Her ne kadar saf metallerdeki sertlik ve aşınma direnci arasındaki ilişki doğrusal olsa da, çok bileşenli alaşımlar için hiçbir basit kural bulunmamaktadır. Abrasiv aşınma da ise aşınmış yüzeylerde deformasyon sertleşmesi ile aşınma yüzeyin de sertliğini arttıracak ve aşınma direnci aşınan yüzeyin sertliği ile daha iyi belirlenecektir. Matris mukaveti, katı eriyik sertleşmesi ile de artabilir. Bazı araştırmacılar yüksek mukavemetli matrisin, karbürlere daha iyi destek sağlayabileceğini ve ince partiküllerin daha erken dökülmesini önleyebileceğini ileri sürmektedir[30].

3.5. Aşınmanın Sınıflandırılması

Aşınma türlerinin iki ana prensip altında incelenmesi daha doğru olacaktır.

- 1- Aşınma mekanizmalarına göre
- 2- İzaî hareketin şekline göre

Bunlar bir tablo halinde Tablo 3.2.'de verilmektedir.

3.6. Aşınma Mekanizmalarına Göre Aşınma Türleri

- 1- Adhesiv Aşınma
- 2- Tabaka Aşınması
- 3- Yorulma Aşınması
- 4- Ablativ Aşınma
- 5- Abrasiv Aşınma

Tablo 3.2.'de de ifade edildiği gibi, bir tribolojik sistem içerisinde bu aşınma mekanizmalarından birisinin, ikisinin ve hatta birkaçının birden görülebilmesi mümkün olmaktadır.

Tablo 3.2. Aşınma Şekilleri ve Mekanizmaları.

İzafi Hareketin Tribolojik Sistemi			Aşınma Mekanizmaları						Yüzeyin Girişimliliği
Adı	Şekli	Sürtünme Elemanları	Araçta	Adhezyon	Abrazyon	Yüzey Yorulması	Tribin Oksidasyon	Ablativ	
Kayma		Katı/Katı	Y A Ğ L A M A S I Z	+	+	+	+	+	Plastik Deformasyon ve Yanma
İlanlı Kayma				+	+	+	+	+	Yanık Uyk Çizgi
Yuvar- lanma				+	+	+	+	+	Soyulma
Klaymalı Yuvar- lanma				+	+	+	+	+	Plastik Deformasyon ve Yanma
Çarpma				+	+	+	+	+	Plastik Deformasyon ve Kırılma
Titreşim Salınım		İzafi Hareketlerin ve Aşınma Mekanizmalarının Kombine Etkileri							
Hidro Aşınma	 Akış Kavit	Katı/Sıvı	Parçacıklı veya Par- çacıksız	-	+	+	+	-	Yüzeyde Dalgalılık

3.6.1. Adhesiv Aşınma

Kaynaklaşma, yapışma ve yenme şeklinde tarif edilen bu tür aşınma birbirleriyle kayma sürtünmesi yapan metal-metal çiftinde meydana gelen kaynaklaşmanın bir sonucudur. Birbiri üzerinde kayan, çok küçük yüzeylerdeki gerilmeler küçük yüklemelerde dahi akma gerilmesi sınırına erişirler veya geçerler. Böylece bu yüzeyler arasında yapışma kuvveti ortaya çıkar. Bu sebeple bir parçadan diğerine malzeme geçişi, soğuk kaynaklaşma ve küçük parçacıkların kesilmesi meydana gelir. Bu tür aşınma genellikle iki safhada oluşur. İlk safhada temas yerindeki parçacık, yerinde deformasyona uğrar. İkinci safhada yerinden kopar ve malzeme yüzeyinden ayrılır.

Burada kastedilen yüzeyler arası yapışma kuvvetleri Adhezyon Kuvveti olarak tarif edilebilir. Benzer kafes yapılı iki metalik yüzey arasında bu kuvvetin doğması daha kolaydır. Bu esnada hareket ve sürtünme sebebiyle ortam sıcaklığının artması yapışma eğilimini arttıracak bir yönde etki yapacaktır.

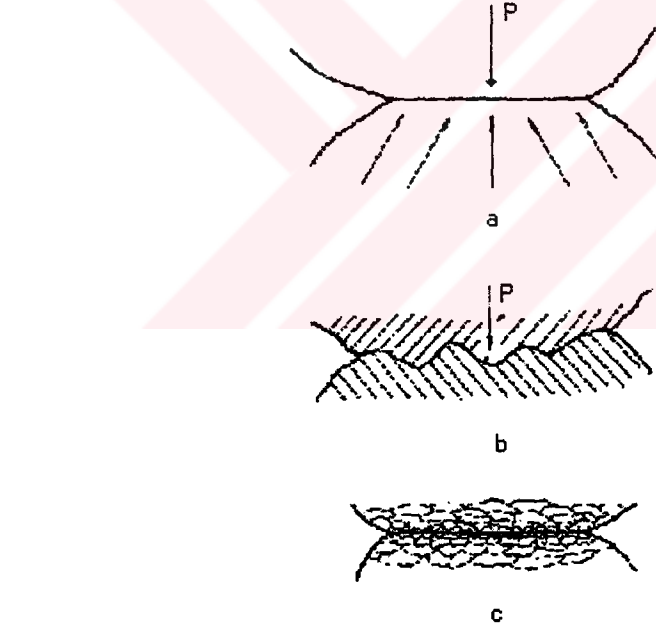
Malzeme yüzeyinden kopan parçacık ya tekrar orijinal parçanın yüzeyine transfer olacak veya düşerek kaybolacaktır. Adhesiv aşınmanın görülebilmesi için yüzeyler arasında güçlü bir temasın olması gereklidir.

Pürüzlerin deformasyonu sonucu, mikro adhezyon hızla temas yüzeyi boyunca yayılır. Sonuçta yüzeyde absorbe edilmiş sıvı ve gaz molekülleri ve oksit tabakaları

parçalanır. Malzeme molekülleri direk temasa geçer. Neticede, temas noktalarında mikro seviyede soğuk kaynak bağları meydana gelir. Özellikle çelik ve plastik gibi esnek malzemelerde, böyle bir temas sonucu, difüzyon veya tane büyümesi ile çok güçlü adhezyon oluşur. Sürtünmenin bağl hareketinin devamı halinde, bağlar kırılarak malzeme kaybına neden olur.

Eğer adhezyon ile oluşan bağ kuvveti pürüz mukavemetinden daha düşükse, pürüz temas noktalarından kopar ve hiçbir malzeme kaybına neden olmaz. Eğer aksi olursa, yani adhezyon bağın mukavemeti, pürüz mukavemetinden büyük olursa, bu durumda pürüz kopar ve malzeme kaybına neden olur[18]. Kırılan parçalar ara yüzeyde serbest kalacağı gibi metallere birine bağlı kalarak taşınabilirler. Parçacığın bir yüzeyden diğer bir yüzeye taşınmasına metal transferi adı verilir.

Bu tür bir mekanizmayı Şekil 3.3.'de görüldüğü gibi karakterize etmek mümkündür.



- a) Bir tek temas alanına tesir eden kuvvetler
- b) Pürüzlerin plastik deformasyonu
- c) Kaynama

Şekil 3.3. Adhesiv aşınma oluşum safhalarının şematik gösterilişi.

3.6.2. Tabaka Aşınması

Tabaka aşınması, malzemelerin sürtünme yüzeyinde cereyan eder. Malzemelerin birbirlerine göre izafi hareketi esnasında sürtünme ve bunun bir sonucu olarak da

titreşim hareketleri gözlenecektir. “Bu titreşimler tribolojik zorlanmaların işaretidir. Tribolojik zorlanmalar sırasında temas yüzeyleri arasındaki küçük genlikli titreşimlerin sebep olduğu bir oksit filmi oluşur.” Aşınma çifti yüzeylerinde, çevrede bulunan ara malzeme ve gazlar etkisiyle bahsedilen titreşim hareketleri sonucu tribokimyasal, tribo-adsorbsiyon ve benzeri hadiseler sonucunda sınırdaki bir tabaka oluşur. Bu tabaka oksit tabakasıdır.

Malzeme yüzeyinde oluşan bu oksit tabakası ana malzemenin aşınmaya karşı olan direncini önemli ölçüde değiştirir. Bu değişiklik genel olarak sürtünmeyle parçalanmış tabakanın abrasiv etki göstermesiyle kendini gösterir. Bu da tabii olarak aşınmayı artırıcı bir etki yapacaktır. Parçalanmış tabakanın yerine de tekrar yeni bir oksit tabakası meydana gelecektir.

3.6.3. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, titreşim zorlamalarında yorulma kırılması hasarı olarak ortaya çıkar. Özellikle malzemenin yüzeyine yakın kısımlarında, sürekli sabit veya değişken dinamik zorlamalar sonucunda değme yüzeyinin altında veya yüzeye yakın bölgelerin yorulması sonucu yüzeyden parçacıkların ayrılması şeklinde yorulma aşınması görülmektedir.

Bu aşınma türünde iç yapı tahribatı; çatlamlar, lokal ayrılmalar şeklinde kendini gösterir.

Maksimum çekme gerilmelerinin bulunduğu bölgelerde plastik deformasyon ve dislokasyon hadiselerine bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerlemekte, büyümekte ve nihayet yüzeyde küçük çukurlar meydana getirmektedir. Bu tür aşınma daha ziyade dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür.

3.6.4. Ablativ Aşınma

Ablativ aşınma mekanizmasının oluşması tamamen sürtünme ve diğer reaksiyon ısısının durumuna bağlıdır. Eğer sürtünme yüzeyindeki bazı bölgelerde sıcaklık çok yüksek noktalara ulaşırsa o yüzey bölgesinde bir değişiklik söz konusudur. Bu değişiklik mikro mertebededir. Yeterli sıcaklık ve zaman sonunda sürtünme elemanının molekül veya atomları, çevreye veya diğer sürtünme elemanlarına transfer olur. Bu

hadise Tribosüblüstasyon ve difüzyon esasına dayanır. Ablativ aşınmaya bölgesel olarak aşırı zorlanan ve fiziksel olarak veya kimyasal değişimler sebebiyle ısınan yerlerde rastlanır. Fren balatalarında ve uzay araçlarının sıcaklığa dayanıklı kabuğunda görülen aşınma türünün en mükemmel örnekleri olarak verilebilir.

3.6.5. Abrasiv Aşınma

Bu aşınma türü endüstriyel aletlerde malzeme kayıplarının başlıca sebebidir. Abrasiv aşınma en basit tarifıyla yumuşak olan malzemeye sürtünen daha sert malzemenin kesme etkisi şeklinde tarif edilebilir. Bu aşınma çeşidine katı-katı, katı-mineral, katı-sıvı çiftlerinde rastlanmaktadır. Arada üçüncü bir cisim bulunup bulunmamasına göre;

1- İki Cisimli Abrasiv Aşınma

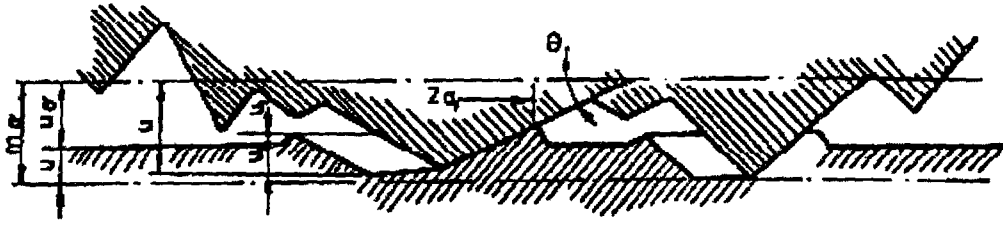
2- Üç Cisimli Abrasiv Aşınma

şeklinde gruplandırılması mümkündür.

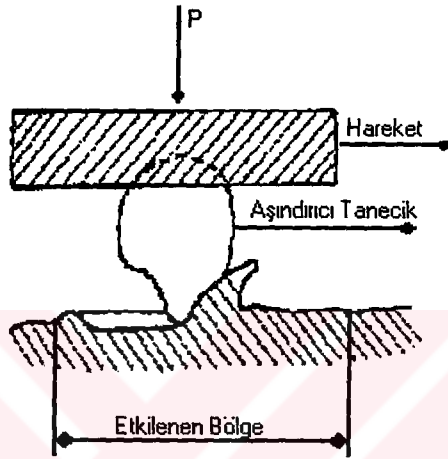
İki cisimli abrasiv aşınma, sürtünen cisimlerin doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir.

Üç cisimli abrasiv aşınmada ise, sürtünen iki cismin arasında üçüncü bir cismin olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları sonucunda görülebilir. Sert malzeme yüzeyindeki pürüzler kesici kenarlar gibi çalışır ve yumuşak olan yüzeyden talaş kaldırır veya kopan aşınma ürünü, parça aralarında kayan ara malzemeler, iki yüzey arasında aşındırıcı bir rol oynarlar.

Aşınma mekanizmaları metal-metal sürtünmelerinde iki cisimli abrasiv veya adhesiv olarak başlayıp, üç cisimli abrasiv olarak devam eder. Üçüncü cisim olarak araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro talaşlar veya parçalanmış oksit parçacıkları olabilir. Üç cisimli abrasiv aşınmanın, aşınmayı hızlandırdığı belirlenmiştir. Serbest hale geçen mikro talaş partiküllerinin, ana malzemedan daha sert olması bunun en büyük sebebi olarak gösterilebilir[1]. Şekil 3.4.'de iki cisimli, Şekil 3.5.'de ise üç cisimli abrasiv aşınma sistemi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.4. İki cisimli abrasiv aşınma.



Şekil 3.5. Üç cisimli abrasiv aşınma.

Endüstriyel aletlerdeki en önemli aşınma türü olan abrasiv aşınmaya genel olarak aşağıda verilen endüstriyel uygulamalarda rastlanmaktadır.

- Cevher işleme ve öğütme tesisleri
- Traktör, greyder gibi tarım, iş makinalarının bıçak ve tırnaklarında
- Eleklerde
- Nakletme makinalarında

Bu gibi makine ve makine parçalarında yalnızca abrasiv aşınmadan söz edileceği gibi,

Diğer aşınma türlerinin de birlikte görülmesi mümkündür.

Yukarıdaki uygulamalara bakıldığında abrasiv aşınmanın dikkati çektiği en önemli sektörün maden sektörü olduğu ortaya çıkmaktadır. Maden çıkarılma işlemlerinde karşılaşılan aşınmaya dayanıklılık şartları, Avery tarafından açıklanmış olan üç kısımda incelenebilir.

1. Scratching or Low-Stress Abrasion
2. Grinding Abrasion
3. Gouging Abrasion

Birinci tür abrasiv aşınma darbenin yokluğu halinde serbestçe hareket eden küçük aşındırıcı parçacıkların vasıtasıyla oluşur. Bu tür aşınmaya pervanelerde, pompa gövdelerinde v.b. rastlamak mümkündür.

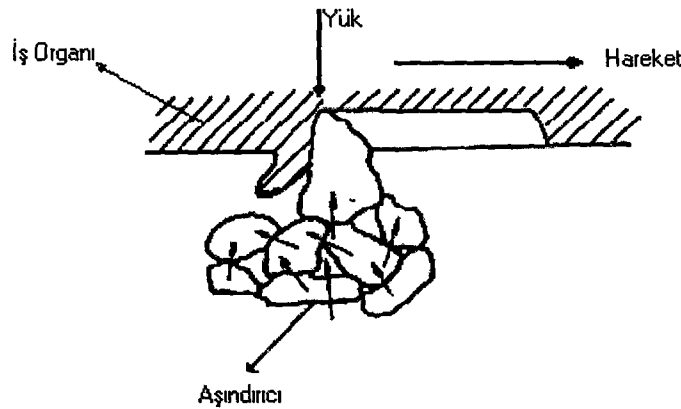
İkinci abrasiv türü olarak verilen Grinding abrasionda ise, aşındırıcı parçacıklar, iki metalik parça arasına girdiğinde ortaya çıkar. İlgili kısmi gerilmeler oldukça yüksektir. Bu tür aşınma daha önce açıklanan üç cisimli abrasiv aşınma türüne uymaktadır. Değirmen bilyalarında görülen aşınma bu tür aşınmalardan biridir.

Gouging abrasion ise, gerçekte işlenmekte olan mineralin metal parçacıklarını koparması ile meydana gelen bir parça kaldırma veya aşındırma olayıdır. Bu tip aşınmaya da kırıcılarda kırma sırasında rastlanır.

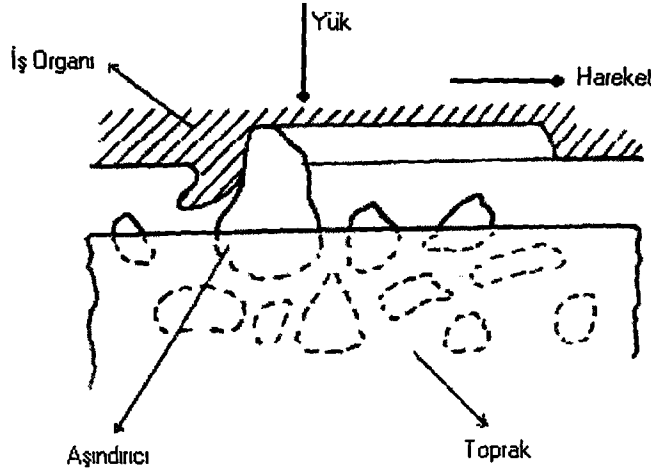
3.6.5.1. Çizme veya Düşük Yüklemeli Abrasyon

Bu tür abrasiv aşınmaya özellikle toprak, kum, çakıl gibi aşındırıcılarla temas halinde çalışan makinaların parçalarında rastlanır. Greyder, dozer bıçakları örnek olarak verilebilir.

Bu abrasivlerle temas halinde çalışan makinalardaki aşınma mekanizması iki cisimli abrasiv aşınma olarak incelenmelidir (Şekil 3.6.). Bunun yanında bazen de Şekil 3.7.'da ifade edildiği gibi üç cisimli abrasiv aşınma mekanizmasına da rastlanır.



Şekil 3.6. Toprakta iki cisimli abrasiv aşınma.



Şekil 3.7. Toprakta üç cisimli abrasiv aşınma.

Abrasiv tane büyüklüğü ve şekli, tanelerin hızı ve uygulanan yükün şiddetine göre abrasiv aşınma mekanizması aşağıdaki şekillerde ortaya çıkar.

a) Oyulma ve Kazınma

Kaya parçaları gibi kaba sert ve sivri köşeli taneler, metale yeterli basınçta sürtündükleri zaman oyuk ve kazınmış bölgeler oluşur. Yüzeyler düzgün olmayıp pürüzlüdür.

b) Yüksek Zorlama Altında Abrasyon

Abrasiv maddeler yüzeyden basınç altında sürtünerek geçerlerken ufalanırlar, yüzeyden metal kalkması ve mikroskobik veya makroskobik ölçüde olur, aşınmış yüzey genellikle yeknesak ve düzgündür.

c) Errezyon

Abrasiv maddenin, korunması söz konusu parça üzerinde az çok serbestçe hareket ettiği zaman meydana gelen aşınma şeklidir.

d) Darbe Abrasyonu

Bu tür aşınma genellikle büyük hız veya basınçla abrasiv parçalara temas eden malzemelerde görülür.

3.7. Aşınmanın Ölçülmesi ve Birimleri

Aşınma miktarının ölçülmesi sırasında her ölçme metodunda olduğu gibi yeterli hassasiyet, kolay ve seri uygulanabilirlik, ekonomiklik ve standartlaştırılmış bir ölçme yapılması istenir. Bu esaslar çerçevesinde imkanlar ve sistemin yapısına göre aşağıda sıralanan aşınma miktarı ölçme metotları söz konusudur.

3.7.1. Ağırlık Farkı Yoluyla Ölçme

Ekonomik olması, kullanılan ölçme aletinin duyarlılık kapasitesine göre hassa olması sebebiyle oldukça sık olarak kullanılan bir metottur. Deney numunelerinin her ölçülmesi için yerinden çıkarılıp ölçme yapılması, yani yerinde ölçme alınamaması dezavantajdır.

Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-4} g veya 10^{-5} g hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi yardımıyla yapılır.

Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade olunmuş ise, metre veya kilometre olarak tespit edilmiş bulunan kayma veya sürtünme yoluna göre birim kayma yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km), (mg/m) ile ifade olunur. Ağırlık kaybı birim alan için hesap edilecekse (gr/cm^2) gibi bir birim ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde ise yine ağırlık kaybından hareketle kullanılan malzemenin yoğunluğu göz önünde bulundurularak veya aşınan yüzeyin geometrik hesabından gidilerek bulunabilir. Burada elde edilecek birim hacimdeki aşınma miktarı (cm^3/m), (cm^3/km) gibi birimlerle ifade edilir.

3.7.2. Kalınlık Ölçme Metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeriyle karşılaştırılması, suretiyle elde edilir. Bu kalınlık olarak tespit edilen değer hacimsel olarak tespit edilerek birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilir.

Kalınlık hassas ölçme aletleri yardımıyla ± 1 μm duyarlılıkta ölçülebilir.

3.7.3. İz Değişiminin Ölçülmesi Metodu

Sürtünme yüzeyi bölgesine geometrisi belirli bir iz (küre izi=daire, gibi) plastik deformasyonla oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür.

Uygulamalarda en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme aletidir. Elmas piramit veya bilyanın bıraktığı iz çapındaki değişme, mikroskop yardımıyla ölçülmesi suretiyle ölçme yapılır.

3.7.4. Radyoizotoplarla Ölçme Metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α -parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır.

Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlarıdır. Fakat ekonomik olmaması yani uygulanabilirliği fazla masraf gerektirdiğinden özel amaçlarla kullanılır. Özel problemlerin dışında yaygın bir metot değildir[31].



4. METALLERARASI BİLEŞİKLER VE KOMPOZİTLERİN ABRASİV AŞINMA DAVRANIŞLARI

İleri teknoloji malzemeleri genel itibari ile özel uygulamaları temin maksadıyla tasarlanmaktadır. Bu malzemelerin ilgi duyulan bir sınıfı metallerearası bileşikler olarak günümüzde büyük önem kazanmıştır. Bir çok metallerearası bileşiklerde mevcut bulunan düzenli yapılar, değişik özelliklere (mukavemet, sertlik ve çevre direnci gibi) sahip malzeme tasarımına yardımcı olur. Söz gelimi, uzun periyotlu düzenli bir yapı, (long-range ordered süperlatice, LRO) dislokasyon yoğunluğunu ve yüksek sıcaklıklarda difüzyon hareketlerini azaltır. Dislokasyonların kafes içinde kolay hareket edememeleri, uzama sünekliği ve kırılma tokluğu gibi düşük sıcaklıkta kırılma ile ilgili özellikleri yakından ilgilendirir. Süneklik ve kırılma tokluğu, mühendislik uygulamalarında büyük önem arz eder. Bununla beraber, aşınmanın söz konusu olduğu konstrüksiyonlarda, çekme gerilmesinden çok, basma gerilmesi meydana gelir ve dolayısıyla bu değer, sertlik ve pekleşme kabiliyeti parametreleri kadar kritik bir parametre değildir[32]. Sonuç olarak, metallerearası bileşikler ve sert parçacıklarla takviyeli metallerearası kompozitler kimyasal saldırgan ortamlarda aşınma direnci yüksek uygulamalar için etkili malzemelerdir.

Bu bölümde Fe_3Al , $TiAl$, Ti_3Al , Al_3Ti , $NiAl$, Ni_3Al ve $MoSi_2$ gibi metallerearası bileşikler ve bu bileşikler üzerine desteklenmiş kompozitlerin abrasiv aşınma davranışları özetlenmeye çalışılmış ve belli metaller, alaşımlar ve seramiklerin davranışları ile karşılaştırılmıştır. En genel ifade ile yumuşak metallerearası bileşikler ($TiAl$ ve Fe_3Al gibi), metaller ve alaşımlara benzer bir aşınma davranışı sergilerken, sert metallerearası bileşikler ($MoSi_2$ gibi) daha ziyade bir seramik davranışı göstermektedirler.

Çok fazla malzemeler ve kompozitler, abrasiv aşınma direncinin önemli olduğu yerlerde sık sık kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemeler tipik olarak, bir matristen ve bu matriste takviye elemanı olarak görev yapan parçacıklardan (viskerler veya fiberler gibi) ibarettir. Çoğu durumlarda, takviye elemanının sertliği, mukavemeti ve elastisite modülü matris malzemesine göre daha yüksektir. Bununla beraber, sünek bir takviye elemanı ile katılandırılan, kırılma matrisli kompozitlerin kırılma tokluğu artırılabilir, dolayısıyla aşınma direnci yüksek kompozitler geliştirilebilir. Böylece kısmen zayıf

aşınma direncine sahip bir malzeme uygun takviye elemanlarının ilavesiyle ıslah edilmiş olur.

Tablo 4.1. İntermetalik bileşikler, alaşımlar ve kompozitler için üretim metotları[32].

Malzeme	Üretim Metodu
Fe₃Al	Ark kaynağı, homojenleştirme (1200°C'de 48 saat); B2 ısıtma işlemi (760°C'de 24 saat, su verme); DO ₃ ısıtma işlemi (560°C, 7 gün, yavaş soğuma); düzensizleştirme ısıtma işlemi (1100°C, 24 saat, su verme)
TiAl	Döküm+homojenleştirme (1200°C, 48 saat); SHS/reaktif sentez (RHP, 1150°C, 20 MPa, 1 saat)
Ti₃Al	Döküm+homojenleştirme (1200°C, 48 saat) SHS/reaktif sentez (RHP, 1150°C, 20 MPa, 1 saat)
Al₃Ti	SHS/reaktif sentez (RHP, 1150°C, 20 MPa, 1 saat)
Ni₃Al	Döküm+homojenleştirme (1200°C, 48 saat)
NiAl	SHS/reaktif sentez (RHIP, 1250°C, 172 MPa, 4 saat)
MoSi₂	Toz metalurjisi ile üretim (HIP, 1350°C, 172 MPa, 3 saat)
NiAl-TiB₂	SHS/reaktif sentez (RHIP, 1250°C, 172 MPa, 4 saat)
MoSi₂-SiC	Toz metalurjisi ile üretim (HP, 1600°C, 20 MPa, 1 saat); katı hal yer değiştirme reaksiyonları (HP, 1800°C)
MoSi₂-Nb	Toz presleme (HIP, 1350°C, 172 MPa, 3 saat)

SHS; kendi kendine ilerleme ve yüksek sıcaklık sentezi, RHIP; Reaktif Sıcak İzostatik Presleme, HIP; Sıcak İzostatik Presleme, RHP; Reaktif Sıcak Presleme ve HP; Sıcak Presleme

Önceden belirtildiği gibi, metallerarası bileşikler, yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü ve iyi çevresel kararlılık gibi aşınma direnci için gerekli birçok niteliğe sahiptir. İyi çevresel kararlılıkları sebebi ile, metallerarası bileşikler, sıcaklığın değiştiği, saldırgan, tribolojik ortamlarda kullanım alanları için ideal özellikler taşır. Ayrıca; metallerarası bileşikler, seçilen sünek özellikteki metaller veya seramiklerle birlikte kullanılmak suretiyle daha da geliştirilebilirler. Bu bölümde metallerarası bileşikler ve bir metallerarası kompozit çeşidi için tribolojik özellikler verilmeye çalışılmış ve bu malzemelerin aşınma davranışları, metaller, alaşımlar ve seramikler ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Metallerarası Bileşikler ve Kompozitler

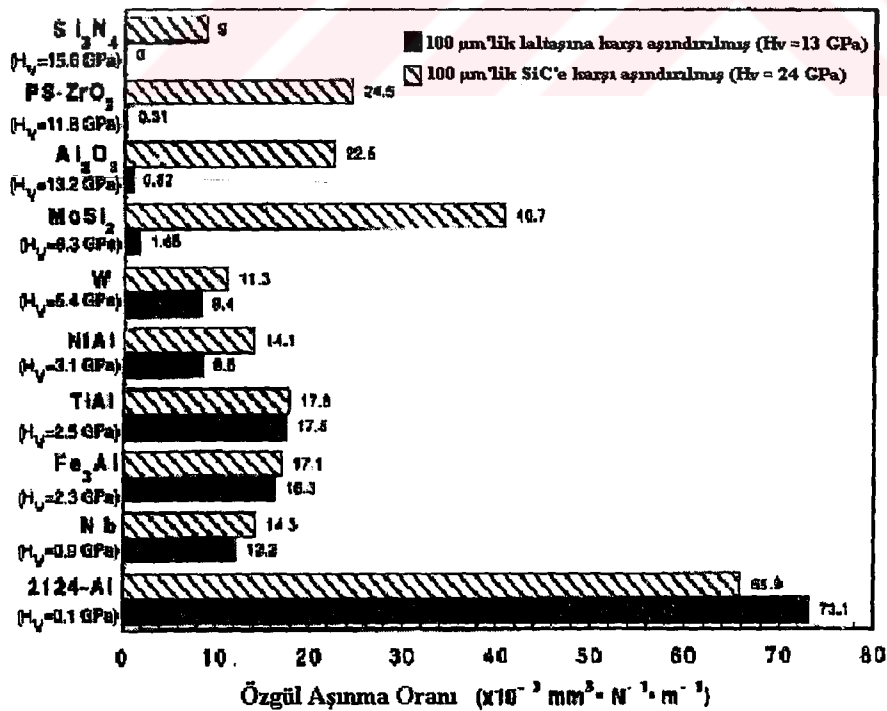
Geçen 25 yıl içinde metallerarası bileşikler üzerine önemli araştırmalar yapılmıştır. $TiAl$, Ti_3Al , $TiAl_3$, Fe_3Al , $NiAl$, Ni_3Al ve $MoSi_2$ üzerinde çalışma yapılan bu metallerarası bileşiklerin başlıcalarıdır. Metallerarası bileşiklerde, sünekliliğin artırılması ve gevrek fazların daha tok hale getirilmesi konusu aşınma mekanizmaları ve aşınma direnci açısından geniş olarak incelenmiştir. Kırılgan olan yapının sünekliliğinin artırılması ve sünek yapı elde edilmesi için geliştirilen metallerarası kompozit malzemelerin başlıcaları: $NiAl-TiB_2$, $MoSi_2-SiC$ ve $MoSi_2-Nb$ (matris-takviye)'dir. İngot ve toz metalurji yöntemlerinin her ikisi ile elde edilen bu malzemelere ait üretim basamakları Tablo 4.1. de verilmiştir[32].

4.2. Metallerarası Bileşikler, Metalik Alaşımlar ve Seramik Malzemeler için Abrasiv Aşınma Davranışları

100 μm 'lik garnet parçacıklarına (lal taşı parçacıkları) karşı aşınan metallerarası bileşikler ve alaşımların bir kısmı için abrasiv aşınma oranları Tablo 4.2'de verilmektedir. Ayrıca bu tabloda seçilen metaller ve seramikler için de aşınma oranları verilmiştir. Malzemelerin tümü, aynı tribolojik şartlar sağlanarak test edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Test edilen metallerarası alaşımların sert bileşiklerinin ($NiAl$ ve $MoSi_2$ gibi) düşük aşınma oranlarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Sıvı faz sinterlemesi yapılan Si_3N_4 numunesi, garnet parçacıkları abrasiv testi esnasında daha az kütle kaybına uğramış ve aşınma direncinin büyük olduğu görülmüştür. Tablo 4.2'deki sonuçlar, Fe'in Al ile alaşımlanmasının, aşınma direncini artıran etkili bir metot olduğunu gösterir. Ayrıca şunu da söylemek mümkündür: Düzensiz α (Fe-%16(atomik) Al) alaşımı saf Fe'den yaklaşık %33 daha düşük bir aşınma oranına sahiptir. Fe_3Al alaşımları (Fe-25Al ve Fe-34Al), saf demirden yaklaşık %45 daha düşük aşınma oranına sahiptir. Ti-Al bileşiklerinin tümü (Ti_3Al , $TiAl$ ve Al_3Ti) benzer aşınma oranlarına sahiptir ve bu bileşikler, saf titanyum ve titanyum esaslı alaşımlardan abrasiv aşınmaya karşı daha dirençlidirler[32].

Malzeme üretimindeki basamakların (Tablo 4-1), aşınma oranı üzerinde çok küçük etkilere sahip olduğu gözlenmiştir. Şöyle ki, toz metalurjisi ile üretilen bileşikler (SHS), ingot metalurji tekniği ile imal edilen malzemelere benzer bir aşınma oranına sahiptir. Bu sonuç malzeme seçiminde maliyet açısından oldukça önemlidir[32].

Şekil 4.1. ve Tablo 4.2.'de listelenen değerler, değişik malzemelerin aşınma oranları üzerine abrasiv ortamın etkisini gösterir. Burada şuna dikkat çekilebilir; yumuşak malzemelerin (Al alaşımı, Nb, Fe_3Al ve TiAl) aşınma oranları izafi olarak abrasiv parçacıklarının sertliğine kısmen duyarlıdır. Bununla beraber, daha sert malzemelerin aşınma davranışları (MoSi_2 ve seramikler gibi), abrasiv parçacık sertlikleri ile büyük ölçüde ilişkilidir. Bu malzemeler, daha yumuşak garnet taşı ile mukayese edilirse daha sert olan SiC parçacıkları karşısında aşınmaya tabi tutulduklarında, aşınma oranında bir veya iki kat daha fazla artma görülür. Bu malzemelerin aşınma yüzeyleri de bu sonucu doğrular niteliktedir. Aşınma işlemi sırasında malzemedan ayrılma mekanizması, SiC parçacıklarının sertliklerindeki artma sebebiyle daha sert ve daha kırılğan malzemeler için değişim gösterir. İki cisimli abrasiv aşınma için, abrasivin sertliği aşınan malzemenin sertliğine eşdeğer veya daha düşük sertlikte ise, daha yüksek sertliğe sahip kırılğan malzemeler olumlu davranış gösterirler. Bununla beraber, abrasivin sertliği aşınan malzemedan daha fazla ise, aşınma yüzeyinde daha büyük hasar meydana gelir. Garnet taşı ve SiC abrasiv parçacıklarının her ikisi de, yumuşak intermetalik bileşiklerden önemli miktarda sert oldukları için aşınma mekanizmalarında değişiklik gözlenmez[32].



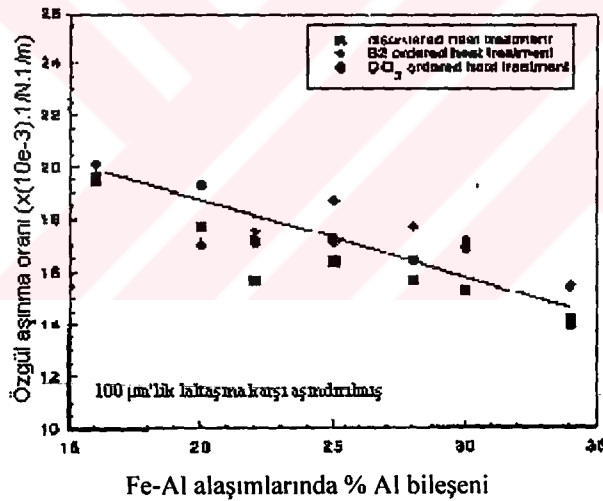
Şekil 4.1. Metaller, intermetalikler ve seramik malzemelerin özgül aşınma oranları üzerine abrasiv aşınma ortamının etkisi[32].

Tablo 4.2. 100 μm 'lik garnet taşı parçacıklarına karşı aşınan metaller, intermetalikler ve seramiklerin özgül aşınma oranları[32].

Malzeme	Sertlik (GPa)	Özgöl Aşınma Oranı ($\times 10^{-3} \text{ mm}^3(\text{Nm})^{-1}$)
Demir Esaslı		
Fe	0.7	29.1
$\text{Fe}_{84}\text{Al}_{16}$	1.9	19.5
$\text{Fe}_{75}\text{Al}_{25}$	2.3-2.7	18.1 (SHS); 16.4 (Döküm)
$\text{Fe}_{66}\text{Al}_{34}$	2.4	14.3
304 SS	1.6	12.8
ASTM A514	2.7	16.8
AISI 52 100	6.5	8.0
%12 Mn'lı çelik	2.1	10.3
AISI 1060	7.6	8.7
WCl	7.4	4.7
Titanyum Esaslı		
Ti_3Al	2.9	18.1 (SHS); 18.2 (Döküm)
TiAl	2.4	17.9(SHS); 17.5 (Döküm)
Ti-48Al-2Cr-2Nb	2.4	16.3
Al_3Ti	2.4	17.9
$\text{Al}_{67}\text{Ti}_{25}\text{Fe}_8$	3.6	20.0
$\text{Al}_{67}\text{Ti}_{25}\text{Cr}_8$	3.0	18.7
Düşük oksijenli Titanyum	3.0	24.2
Ti-8Al-1Mo-1V	3.1	23.6
Ti-10V-2Fe-3Al	2.8	37.8
Nikel Esaslı		
Ni_3Al	2.0	14.5
$\text{Ni}_3\text{Al}+0.02\text{B}$	1.8	13.7
NiAl	3.1	8.6
Refraktör Esaslı		
MoSi_2	8.3	0.3-1.1
Nb	0.8	12.2
W	5.4	8.4
Seramikler		
Al_2O_3	13.2	0.8
PS- ZrO_2	11.8	0.3
Si_3N_4	15.6	<0.01

4.3. Metalurjik Faktörler Yolu ile (Alaşım Bileşeni ve Isıl İşlemler) Aşınma Direncinin İyileştirilmesi

Bir üçüncü veya dördüncü elementin metallerarası bileşiklere küçük miktarlarda ilaveleri, ikili bileşimlerininkine benzer aşınma oranları verir. Örneğin, $\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$, Ni_3Al 'ye benzer bir aşınma oranına sahip ve Ti-48Al-2Cr-2Nb , Ti_3Al 'e benzer bir abrasiv aşınma oranına sahiptir. Ayrıca şu da kaydedilebilir: kararlı hale getirilmiş kübik üçlü $\text{Al}_{67}\text{Ti}_{23}\text{Cr}_8$ alaşımı ikili tetragonal Al_3Ti bileşiğine benzer bir aşınma oranına sahiptir. Benzer olarak, Fe_3Al 'nin aşınma davranışı kristal yapının türüne çok duyarlı değildir (Şekil 4.2). Kristal yapıya sahip alaşımlarda, XRD ve TEM bu durumu teyit etmek için kullanılmakta ve bu sonuçlar başka kaynaklar tarafından da doğrulanmaktadır. Fe-Al alaşımı için Al bileşenin Şekil 4.2'de gösterildiği gibi aşınma direnci üzerinde büyük bir rolü vardır. Artan Al bileşeni Fe-Al esaslı alaşımların aşınma oranlarını düşürür. Bu durum, alaşımların hacimsel sertleşmesindeki artıştan kaynaklanır ki bu alaşımların hacimsel sertleşmesi artan Al bileşeni ile artar.



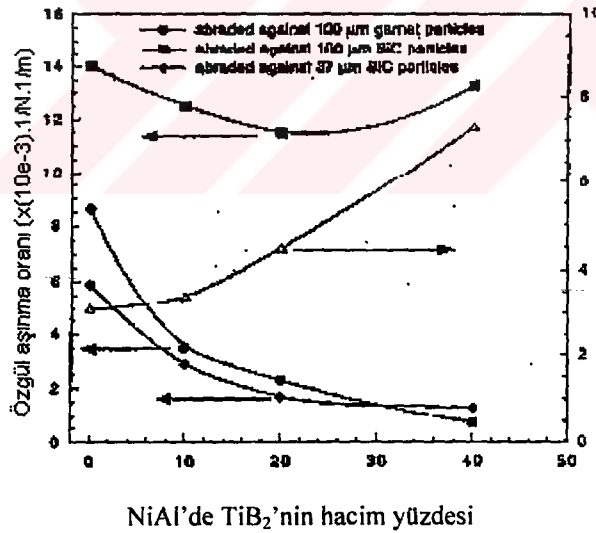
Şekil 4.2. 100 µm'lik lal taşı parçacıklarına karşı aşınan Fe-Al alaşımlarının özgül aşınma oranları üzerine Al atomik fraksiyonu ve kristal yapının etkisi[32].

Yukarıda söylendiği gibi, küçük alaşım ilaveleri, TiAl ve Ni_3Al 'nin aşınma oranları üzerine çok küçük etkilere sahiptir. İki fazlı mikroyapıda (Ti-48Al-2Cr-2Nb), her iki faz Ti_3Al ve TiAl ile benzer sertliğe sahiptir. Çünkü alaşımlar, ikili bileşiklerde olduğu gibi yaklaşık olarak eşit sertliktedir. Çok sert ikinci fazın çökeldiği alaşım ilaveleri kullanıldığı zaman aşınma direncinde önemli iyileşmeler elde edilmektedir. Bu davranış aşağıdaki kompozisyonlar üzerine oturtulmuş birkaç Fe_3Al üçlü alaşımları

yardımıyla sergilenmektedir: $Fe_{(75-x)}Al_{25}M_x$ ($x=2, 5, 10$ ve $M=Ti, Zr, Cr, Ni, Nb$ veya Mo). Ti, Ni, Nb ve Mo 'nin ilaveleri yüksek elemental hacim fraksiyonlarında Fe_3Al için ölçülen hacim oranı için bir azalmayla sonuçlanmıştır. Sert bir ikinci fazın çökmesi aşınma direncinde önemli iyileşmeler meydana getirmiştir. $Fe_{65}Al_{25}Ti_{10}$ alaşımı iyi bir aşınma direncine sahiptir ve aşınma oranı yaklaşık %40 civarında ikili Fe_3Al alaşımından daha düşüktür.

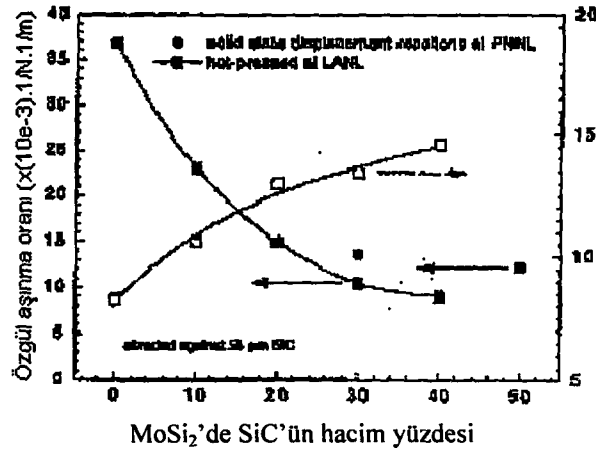
4.4. Kompozit Mukavemetlendirilmesi Yolu ile Aşınma Direncinin İyileştirilmesi

Şekil 4.3.'de gösterildiği gibi, $NiAl-TiB_2$ için sert-gevrek ikinci fazın çökmesi aşınma direncinde bir iyileşmeye neden olmaktadır. Aşınma direncindeki bu iyileşme ikinci faz parçacıklarının bir sonucu olarak kompozitin sertliğindeki artışın doğrudan bir sonucudur. $NiAl-TiB_2$ kompozitlerinin incelenen aşınma yüzeylerinde görülmüştür ki, $NiAl$ 'daki TiB_2 'nin hacimsel yüzdesi arttığı zaman özgül aşınma oranında bir azalma meydana gelir.



Şekil 4.3. $NiAl-TiB_2$ kompozitlerinin özgül aşınma oranları ve sertlikleri[32].

Ayrıca Şekil 4.4.'de gösterildiği gibi, kompozitin üretim metodu da aşınma oranı üzerinde etkilidir. Şekilden görüldüğü gibi, sıcak presleme ve katı hal yer değiştirme reaksiyonları ile üretilmiş malzemeler farklı aşınma oranları sergilemektedirler.

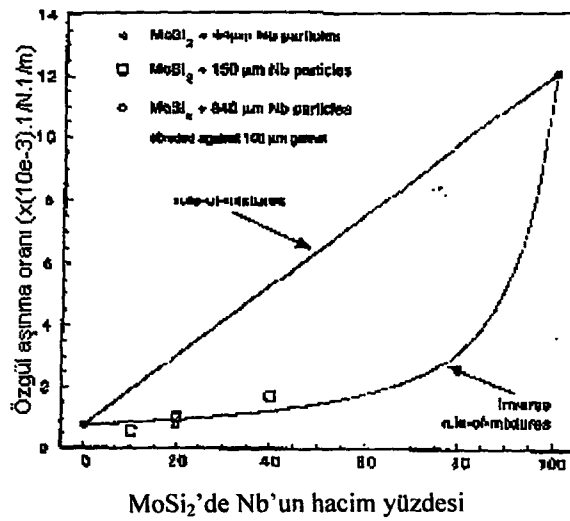


Şekil 4.4. MoSi₂-SiC kompozitlerinin özgül aşınma oranları[32].

Yine yapılan çalışmalar göstermiştir ki, MoSi₂-Nb kompozitlerinin küçük hacim oranlarında Nb'un takviyesi, MoSi₂'nin aşınma direncini iyileştirir (Tablo 4.3. ve Şekil 4.5.).

Tablo 4.3. Nb parçacık takviyeli MoSi₂ için özgül aşınma oranları[32].

MoSi ₂ 'de %Nb	Özgöl aşınma oranı (10 ⁻³ mm ³ (Nm) ⁻¹)
0	0.8
10	0.5
20	1.1
40	1.7
100	12.2



Şekil 4.5. MoSi₂-Nb kompozitinin özgül aşınma oranları[32].

Nb'un MoSi_2 'den daha küçük sertlik ve aşınma direncine sahip olmasına ve bu etkinin beklenilmemesine karşı Nb parçacıklarının ilavesi çatlak sapması boyunca MoSi_2 'nin kırılma tokluğunu iyileştirmekte ve sonuç olarak aşınma direncinin artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca Nb'un ilavesi burada aşındırıcı malzeme ve MoSi_2 arasındaki sürtünmeyi de azaltır.

Bu bölümde, metallerarası bileşiklerin ve metallerarası kompozitlerin bir kısmının abrasiv davranışları gözden geçirilmiş ve seçilen metaller, alaşımlar ve seramikler ile karşılaştırılmıştır. Buradan şu sonuçlar çıkarılabilir.

- 1- Bu malzeme grubunun bir türü olan Titanyum-Alüminyum metallerarası bileşikleri, geleneksel Ti alaşımlarından çok daha fazla aşınma direncine sahiptir.
- 2- Fe-Al'nin aşınma davranışı, Al içeriğine göre değişmekte, daha fazla miktarda Al içeren bu alaşımların aşınma direnci de artmakta, (süperlatis düzenliliği Fe_3Al alaşımının üzerinde çok küçük etkilere sahiptir) ve bu alaşımlar, çeliklerin bir kısmına benzer aşınma direnci göstermektedirler.
- 3- Yumuşak metallerarası bileşikler (TiAl ve Fe_3Al gibi) abrasiv aşınma durumlarında daha çok metaller gibi davranırken sert metallerarası bileşikler (MoSi_2 gibi) daha çok seramik davranışı sergilemiştir.
- 4- Bir ikinci fazın (Fe_3Al 'ye Ti ilavesi gibi) çökmesine neden olan alaşım elementi ilaveleri, aşınma davranışlarını önemli bir ölçüde iyileştirmiştir.
- 5- Kompozit mukavemetlendirilmesi bütün durumlarda aşınma direncini iyileştirmiştir. Yumuşak ve sünek takviyeler kadar gevrek ve sert takviyeler de metallerarası bileşiklerin aşınma direncini iyileştirmede etkilidirler[32].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

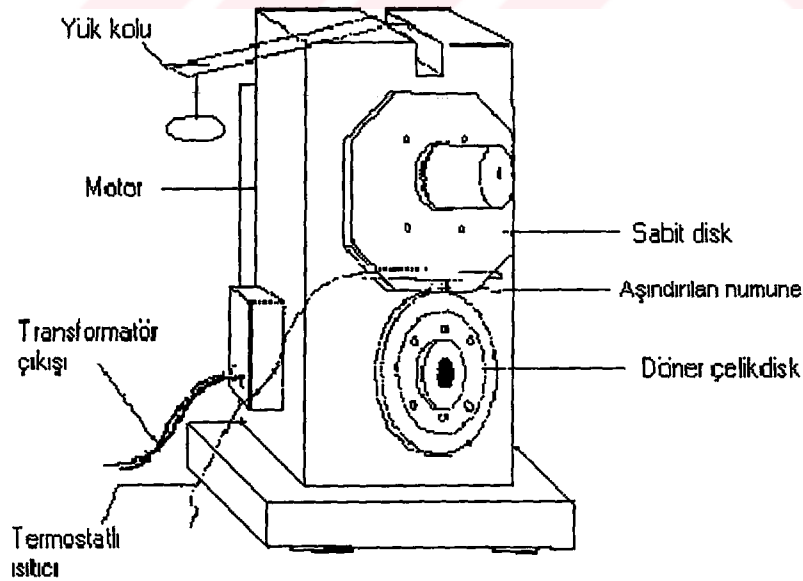
Bu deneysel çalışmada ana malzeme olarak Ni_3Al+B metaller arası bileşiği kullanılmıştır. Malzeme, sac levha şeklinde temin edilmiş olup malzemenin kimyasal analizi Tablo 5.1 de verilmiştir.

Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan Ni_3Al+B metaller arası bileşiğinin kimyasal analizi.

Elem.	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Al	Mo	Cu	N ₂	Zr	B	Fe	O ₂
Wt(%)	0.007	0.024	0.002	0.0004	0.03	0.046	Bal.	11.12	0.002	0.001	0.015	0.78	0.044	0.45	0.0064

5.2. Aşınma Deneyleri

Kimyasal bileşimleri ve özellikleri Tablo 5.1’de verilen numunelerin aşınma davranışlarını incelemek amacıyla Kayseri Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde bulunan Şekil 5.1’de krokisi ve Şekil 5.2’de resmi gösterilen TE53/80004 marka çok amaçlı sürtünme ve aşınma makinesinden yararlanılmıştır.



Şekil 5.1 TE53/80004 marka çok amaçlı sürtünme ve aşınma makinesi.

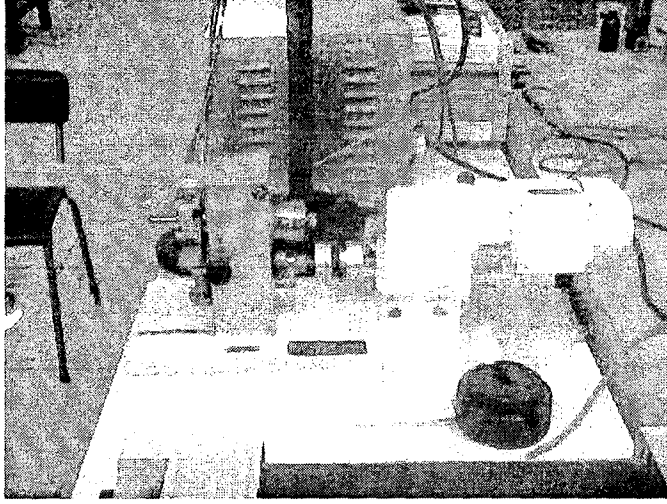


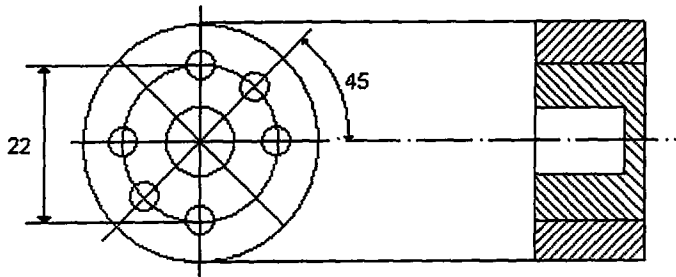
Foto 5.1. TE53/80004 marka çok amaçlı sürtünme ve aşınma makinesi.

Aşınma deney numuneleri 15x10x2mm boyutlarında kesilmiştir. Numuneleri kesmek için Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nde bulunan Metkon marka kesme cihazı kullanılmıştır.

Üzerinde deneylerin gerçekleştirildiği aşınma düzeneği blok-ring (plaka-silindir) esasına göre çalışmaktadır. Bu düzeneğe karşı aşındırıcı disk olarak, 6200 ZZ G3 standardındaki rulmanlar kullanılmıştır. Bu rulmanların kimyasal analizi Tablo 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.3'de de bu disklerin şekli gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Deneyde kullanılan disklerin (100 Cr 6) % ağırlıklı kimyasal kompozisyonu.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	W	Cu
100 Cr 6	0.90~1.05	0.15~0.35	0.25~0.45	0.030	0.025	0.40~0.60	---	Max. 0.30	---	---	~0.30



Şekil 5.2. Aşınma deneyinde kullanılan aşındırıcı diskler.

Piyasadan 6200 ZZ G3 serisinden yeterli miktarda temin edilen rulmanların içleri boşaltılmış ve bilyeleri çıkartılmış olan disklerin iç çapları, döner çelik disklerin bağlandığı milin dış çapından büyük olduğundan dolayı, disklerin içlerine, bu milin üzerine oturmasını sağlayacak kalınlıkta pirinç malzemeden burç geçirilmiştir. Bu işlemler neticesinde oluşan talaş ve pislikler rulmandan uzaklaştırılmış ve daha sonra asetonla temizlenip kurulan diskler, aşınma deney cihazına bağlanmıştır.

Ana malzeme olarak seçilen Ni_3Al+B metaller arası bileşiği uygun boyutlarda kesildikten sonra sırasıyla 400, 600, 1000 numaralı zımpara kağıdıyla zımparalanmış, 3μ ve 9μ 'luk elmas pastadan geçirilerek parlatılmıştır. Numuneler çok ince olduğundan aşınma cihazına bağlanabilmesi için Şekil 5.4'deki numune tutucu kullanılmıştır. Piyasadan 75x35x35 mm ebatlarında temin edilen normal imalat çeliği, 70x30x33 mm ebatlarına getirilmek için freze tezgahında işlenmiştir. Daha sonra direnç telinin yerleştirilmesi ve sabit diske bağlanabilmesi için gerekli olan delikler matkap tezgahında açılmıştır. Numunelerin yerleşeceği kanal da freze tezgahında testere ağızlı freze bıçağıyla açılmıştır.

Bu işlemlerden sonra 22 cm uzunluğunda ve 5 mm çapındaki AISI 304 paslanmaz çelik direnç teli, açılan kanala uzunlamasına yerleştirilmiştir. Numune tutucu ile paslanmaz çelik direnç telinin birbiriyle temas edip kısa devre yapmasını önlemek için telin yerleştirilmiş olduğu kanal, cam suyu ve ateş toprağı karışımıyla doldurulmuş ve 700°C'de 2 saat süreyle fırınlanmıştır.

Deney sırasında sıcaklığın tespit edilebilmesi için gerekli olan termocouple deliği de matkap tezgahında açıldıktan sonra numune tutucu aşınma deney cihazının sabit diskine bağlanacak duruma getirilmiştir. Şekil 5.3'de numune tutucunun şekli verilmiştir.

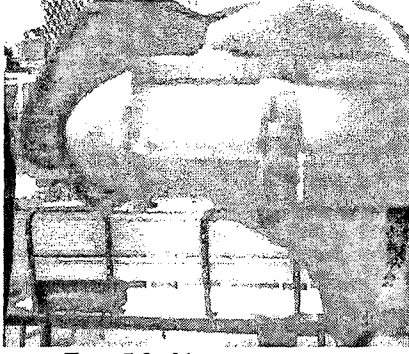
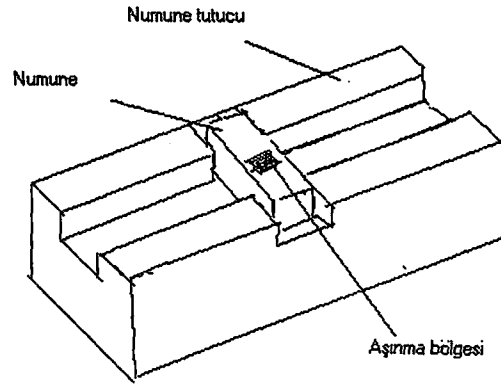
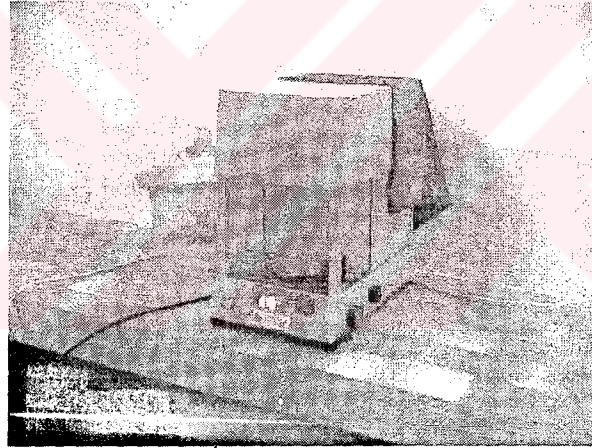


Foto 5.2. Numune tutucu.



Şekil 5.3. Numune tutucu.

Numuneler cihaza bağlanmadan önce ultrasonik olarak aseton içerisinde temizlenmiş ve 10^{-4} gr ağırlığa duyarlı hassas terazide tartılarak sabit disk üzerindeki yuvasına monte edilmiştir. Fotoğraf 5.5’de 10^{-4} gr ağırlığa duyarlı hassas terazinin resmi gösterilmektedir.

Foto 5.3. 10^{-4} gr ağırlığa duyarlı hassas terazi.

Seçilen malzeme için aşınma deneyleri, Tablo 5.3’de verilmiş olan parametrelere göre gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.3. Aşınma deneyi sırasında uygulanan yük, yol, kayma hızı ve sıcaklıklar.

Yük (N)	Kayma Mes. (m)	Kayma Hızı (m/s)	Sıcaklık (°C)
50	300	0.50	25
75	600	0.75	100
100	900	1.00	300
125	1200	1.40	450

Aşınma testine tabi tutulan bu numuneler test sonrası tekrar temizlenip asetonla silindikten sonra aşınma öncesi ve aşınma sonrası ölçülen ağırlık farklarından yararlanarak aşınma miktarları, ağırlık birimi (mg) cinsinden tespit edilmiştir.

Deney sırasında makineye bağlı olan bir transformatör yardımıyla kayma sırasındaki sürtünme katsayısı değerleri transformatörün ucuna bağlı Şekil 5.6'da görülen çizici vasıtasıyla grafik olarak tespit edilmiştir.

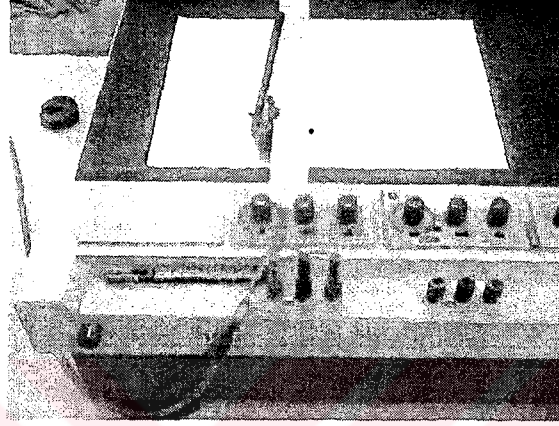


Foto 5.4. Çizici.

Çalışmamızın amacı Ni_3Al+B metallere arası bileşiğinin yüksek sıcaklıklardaki aşınma davranışının incelenmesi olduğundan deneyler farklı sıcaklıklarda yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı sıcaklıklar; oda sıcaklığı, 100, 300, ve 450°C'dir.

5.3. Metalografik Muayeneler

Metalografik çalışmalar, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. Deney sonrasında asetonla temizlenen deney numunelerinin, aşınma mekanizmalarını belirleyebilmek için LEO 440 (computer controlled digital) seri nolu Alman yapımı SEM mikroskobunda, taramaya tabi tutularak çeşitli büyütme ölçeklerinde kontrol edilmiş ve fotoğrafları çekilmiştir.

5.4. EDS Analizi

SEM mikroskobunun bir ünitesini oluşturan EDS cihazında numunelerin mikro yapısından ve aşınma yüzeylerinden noktasal analizler yapılmış, sonuçlar grafik şeklinde çıktı olarak alınmış ve değerlendirilmiştir.

5.5. XRD Analizi

Aşınma deneyleri neticesinde malzemede meydana gelen farklı yapıları, oksit tiplerini veya karşı elemandan ana malzemeye malzeme transferini tespit etmek amacıyla BRUKER AXS ADVANCE MODEL Alman yapımı XRD cihazı kullanılmıştır.

5.6. Sertlik Ölçümleri

Aşınma deneyleri neticesinde numune yüzeylerinde meydana gelen oksitlerin sertliklerinin tespit edilmesi amacıyla, Fırat Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği malzeme laboratuvarında bulunan Anton Paar&Paar Physica MHT-10 marka mikrosertlik cihazı kullanılmıştır.



6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Oda Sıcaklığında Farklı Yükler Altında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri

Yük ve sıcaklığın değişken olarak kullanıldığı aşınma deneylerinde; 50, 75, 100 ve 125N'luk dört farklı yük ve 25, 100, 300 ve 450°C olmak üzere dört farklı sıcaklık değeri kullanılmıştır. Bu deneylerde, zaman; $t=10\text{dk.}$, hız; $V=0.75\text{m/s}$ veya devir; $N=477\text{d/dk}$ olarak sabit alınmıştır. Her yükteki deneyler dört sıcaklık değeri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 6.1'de verilmiştir.

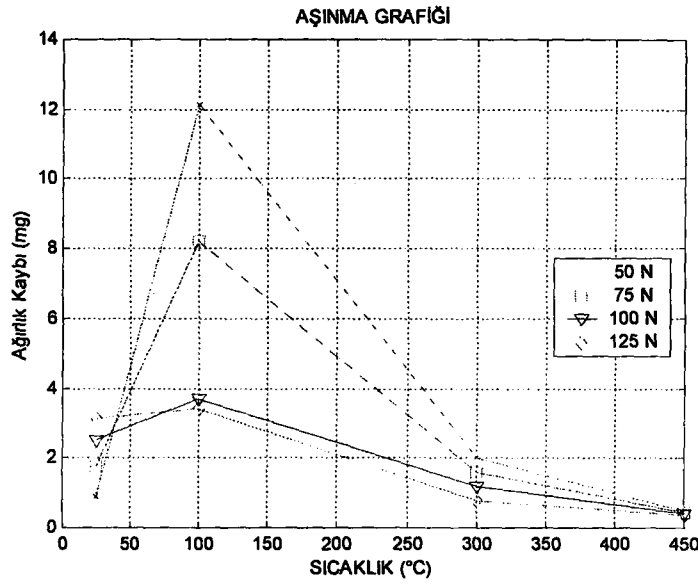
Tablo 6.1. Yük ve sıcaklık değişimine göre ağırlık kaybı değerleri.

	$T_1=25^\circ\text{C}$			$T_2=100^\circ\text{C}$			$T_3=300^\circ\text{C}$			$T_4=450^\circ\text{C}$		
F(N)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)
50	0.8518	0.8509	0.9	0.8559	0.8388	12.1	0.8464	0.8458	2	0.7562	0.7561	0.62
			1			41			17			29
75	0.8499	0.8444	1.9	0.9002	0.8910	8.1	0.8578	0.8573	1.5	0.8066	0.8085	0.6
			2			42			18			30
100	0.7837	0.7830	2.6	0.9114	0.9103	3.8	0.8283	0.8272	1.1	0.7479	0.7474	0.57
			3			43			19			31
125	0.8777	0.8746	3.2	0.8796	0.8790	3.5	0.8670	0.8661	0.9	0.8722	0.8716	0.55
			4			44			20			32

Bu deneylerde $t=10\text{dk.}$, $V=0.75\text{m/s}$ ve $N=477\text{d/dk}$ olarak alınmıştır

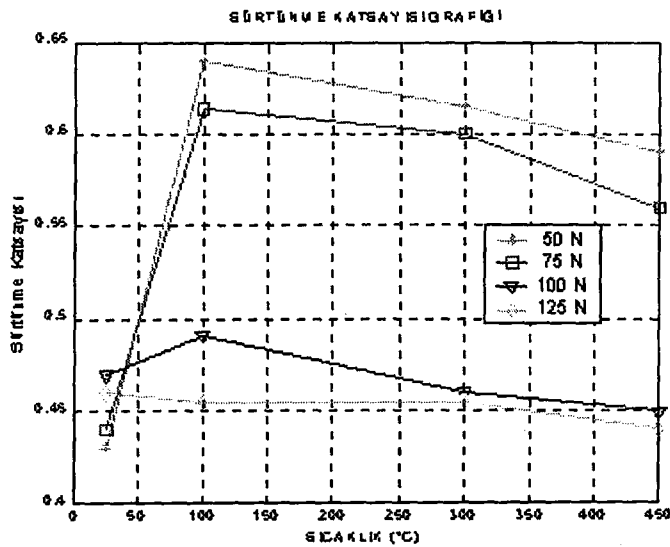
6.1.1. Farklı Yüklerde Gerçekleştirilen Aşınma Deney Sonuçları ve Değerlendirme

Tablo 6.1'deki sonuçlardan yararlanarak, yük-ağırlık kaybı ilişkisinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.1'deki grafiğe bakılacak olursa, ağırlık kaybı miktarı 100°C 'de, tüm yük değerlerinde maksimum değerlere ulaşmış ve bu sıcaklıktan sonra bir düşüş göstermiştir. 450°C 'deki ağırlık kaybı değerleri ise oda sıcaklığındaki ağırlık kaybı değerlerinin altına düşmüştür.



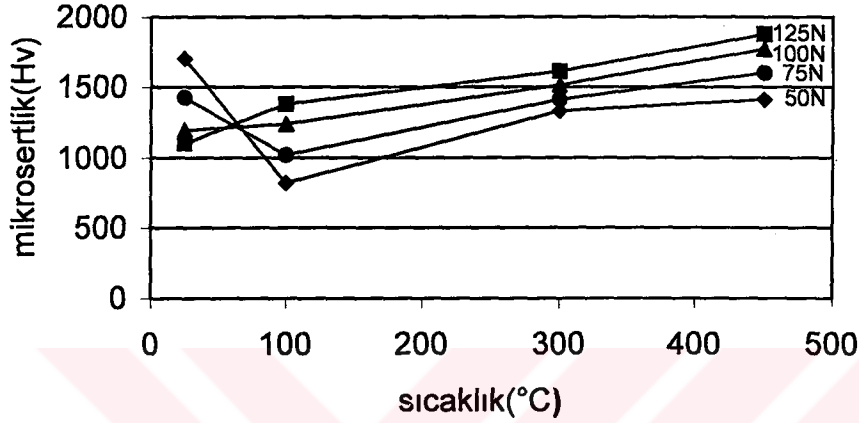
Şekil 6.1. Numunelerin yük ve sıcaklık değişimine bağlı olarak ağırlık kayıpları.

Aşınma deneyleri esnasında aşınma test cihazına bağlı olan bir çizici vasıtasıyla ana malzeme ile karşı aşındırıcı disk arasındaki sürtünme katsayıları tespit edilmiştir. Elde edilen bu değerlerden yararlanarak Şekil 6.2’de verilmiş olan sürtünme katsayısı grafiği oluşturulmuştur. Şekil 6.2.’deki sürtünme katsayısı grafiğindeki sonuçlar, Şekil 6.1’deki ağırlık kaybı değerlerine benzer olarak 100°C de en yüksek değerlere ulaşmış ve bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısı değerlerinde düşme gözlenmiştir.



Şekil 6.2. Yük ve sıcaklığa bağlı olarak, sürtünme katsayısı değişimi.

Aşınma deneyleri tamamlandıktan sonra aşınma yüzeylerindeki mikrosertlik tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlardan yararlanılarak sıcaklık ile aşınma yüzeylerinin sertliği arasındaki ilişki, Şekil 6.3’de verilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri sırasında 10mg yük uygulanmak suretiyle Vickers cinsinden değerler elde edilmiştir. Mikrosertlik değerleri 100°C’de aşındırılmış numuneler için düşük tespit edilirken 300 ve 450°C’ler için artarak hatta oda sıcaklığındaki değerlerden daha yüksek değerlere ulaşmıştır.



Şekil 6.3. Yük ve sıcaklık ile aşınma yüzeylerinin sertliğinin değişimi.

6.1.2. Deney Numunelerinin SEM, EDS ve XRD Sonuçları ve Değerlendirme

Ni_3Al+B metaller arası bileşiğinin aşınma deneyleri öncesinde çekilmiş orijinal mikroyapısı Fotoğraf 6.1’de verilmiştir. Fotoğrafta dendritik bir yapı görülmektedir. Dendritler, malzemede bulunan Zr etkisiyle oluşmuştur.

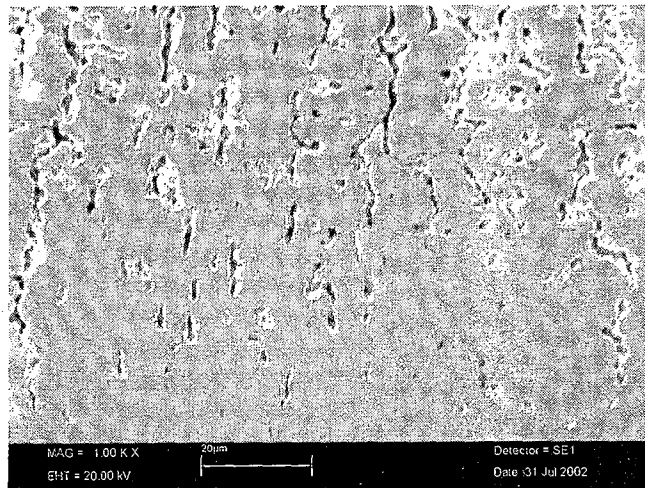
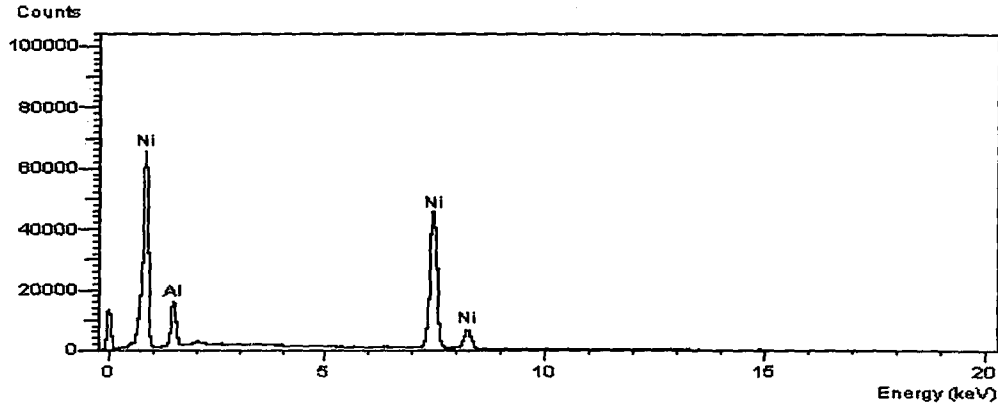


Foto 6.1. Ni_3Al+B metaller arası bileşiğinin orijinal mikroyapısı.

Aşınma deneyleri öncesinde $\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$ metaller arası bileşiğinin aşındırılacak yüzeyinden alınan EDS analizi Şekil 6.4.'de verilmiştir. Analiz sonucuna göre yüzeyde Ni ve Al elementlerinin varlığı görülmektedir. Tablo 5.1'deki kimyasal analize göre Şekil 6.4'deki EDS analizi beklenen sonuçtur.



Şekil 6.4. $\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$ metaller arası bileşiğinden alınan EDS analizi.

$\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$ metallerarası bileşiğinin; oda sıcaklığında, 50 ve 125N yük altında, gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde çekilmiş SEM fotoğrafları, Fotoğraf 6.2 ve Fotoğraf 6.3'de verilmiştir.

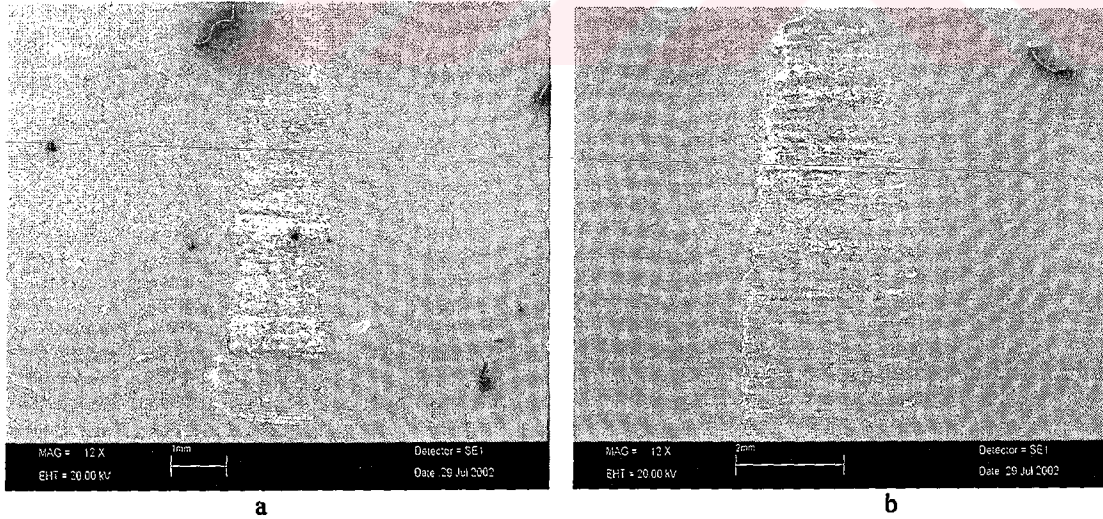


Foto 6.2. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 50N yük altında (X12), b) 125N yük altında (X12)

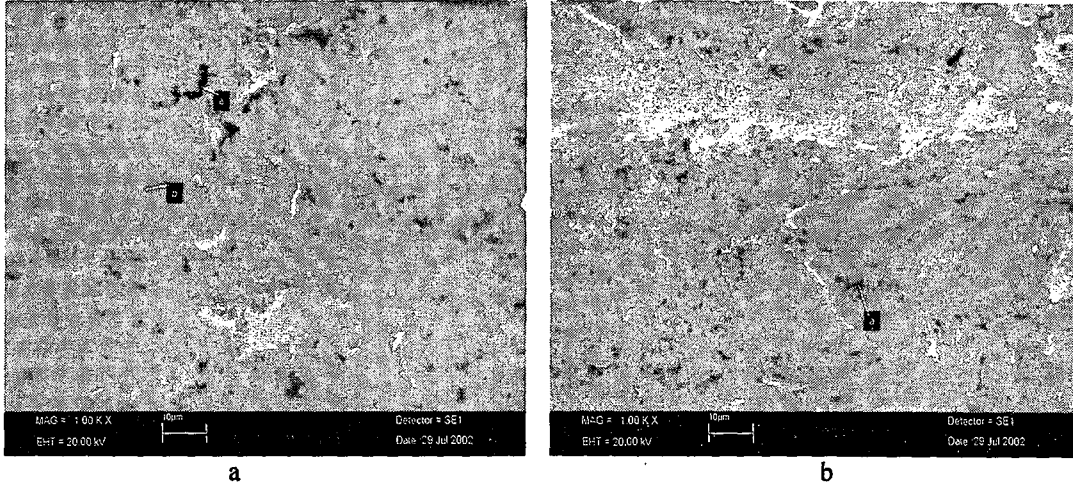
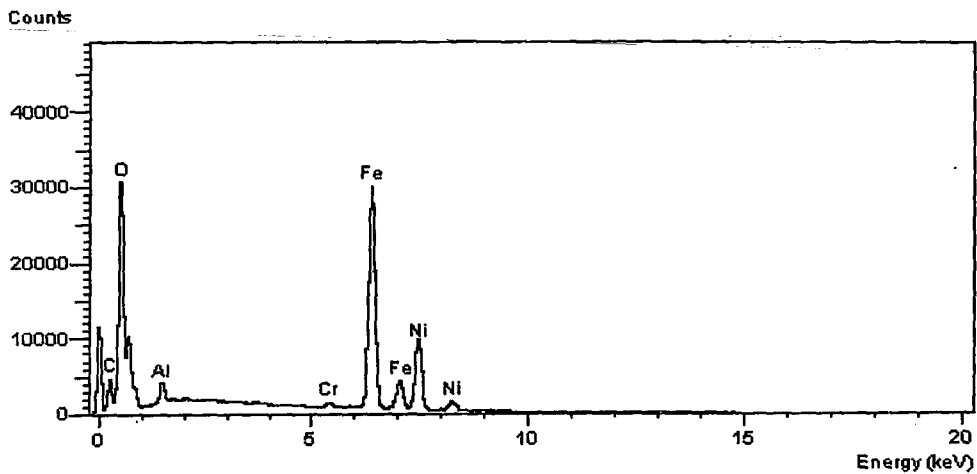


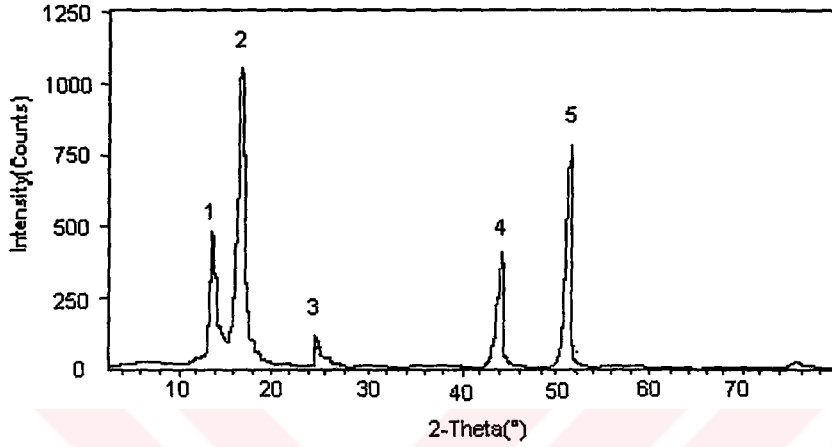
Foto 6.3. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 50N yük altında (X1000), b) 125N yük altında (X1000)

Fotoğraf 6.2'den görüleceği üzere, 125N yük altında aşındırılan numunede meydana gelen aşınma bölgesi, 50N yük altında aşındırılan numunede meydana gelen aşınma bölgesinden daha büyüktür. Bunun nedeni düşük sıcaklıklarda ve düşük yüklerde aşınma yüzeylerinde meydana gelen plastik deformasyon neticesinde, aşınma yüzeylerinin sertliğinin artmasıdır[34]. Şekil 6.5'de, deney sonunda aşınma yüzeyinden alınan EDS analizine göre, aşınma yüzeyinde Ni ve Al elementlerinden farklı olarak O, Fe ve C elementlerinin varlığı görülmektedir. Bu sonuç aşınma yüzeylerinde çeşitli oksitlerin oluştuğunu göstermektedir. Oluşan bu oksit tabakaları karşı aşındırıcı diskten ana malzemeye transfer olan farklı elementlerden de kaynaklanabilmektedir.



Şekil 6.5. Oda sıcaklığında, 50N yük altında aşındırılan numuneden alınan EDS analizi.

Şekil 6.6'da sonucu verilen XRD analizi ile aşınma yüzeylerinde meydana gelen oksit türleri tespit edilmiştir. Aşınan malzemede Mn, Si ve S elementlerinin çok az miktarda bulunmasına rağmen, $(\text{Fe, Mn})_2\text{SiO}_4$, MnSiO_3 , $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ve $\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$ bileşiklerine rastlanması aşındırıcıdan ana malzemeye transferi göstermektedir.



1: NiFe_2O_4 , 2: $(\text{Fe, Mn})_2\text{SiO}_4$, 3: MnSiO_3 , 4: $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$, 5: $\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$

Şekil 6.6. Oda sıcaklığında, 100N yük altında aşındırılan numuneden alınan XRD analizi.

Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde, yük arttırıldıkça ağırlık kaybının arttığı gözlenmektedir. Aşınma deneyleri neticesinde numunelerden alınan EDS, XRD ve SEM fotoğrafları, sıcaklık arttıkça malzeme yüzeyinde çeşitli oksit tabakalarının meydana geldiğini göstermiştir. Yine bu oksit tabakalarının türleri, sertlikleri ve yoğunlukları seçilen parametrelere ve sıcaklıklara göre farklılıklar gösterebilmektedir. Sıcaklık artışıyla oksit tabakalarının oluşumunun yanı sıra karşı malzemeden (disk) kopan parçacıklar ana malzeme yüzeyine yapışmakta, bu da ağırlık kaybının değişmesine neden olmaktadır.

Yük arttıkça ağırlık kaybının artması, oksitlenmenin meydana gelmediği durumlarda (koruyucu atmosfer şartlarında, vakum ortamlarında yada artan sıcaklık ile oksidasyon direncinin gözlemlendiği malzemelerde) beklenen bir sonuçtur[33]. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen aşınma deneylerinde, oksit oluşumundan ziyade aşınma yüzeylerinde plastik deformasyon meydana gelmektedir[34]. Meydana gelen plastik deformasyon neticesinde ise yüzeyin sertliği artmakta ve bu da ağırlık kaybının azalmasına neden olmaktadır.

Şekil 6.3'te verilen sertlik değerlerindeki değişimden de görüleceği gibi, sertlik arttıkça malzemenin sürtünme katsayısı azalmaktadır. Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'e bakılacak olursa, en az ağırlık kaybının meydana geldiği numunenin sertliği diğer numunelerin sertliğinden yüksek iken, sürtünme katsayısı ise daha düşüktür.

6.2. 100°C'de Farklı Yükler Altında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri

6.2.1 Deney Numunelerinin SEM, EDS ve XRD Sonuçları ve Değerlendirme

$\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$ metallararası bileşiğinin; 100°C'de, 50 ve 125N yük altında, gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde çekilmiş SEM fotoğrafları aşağıda verilmiştir.

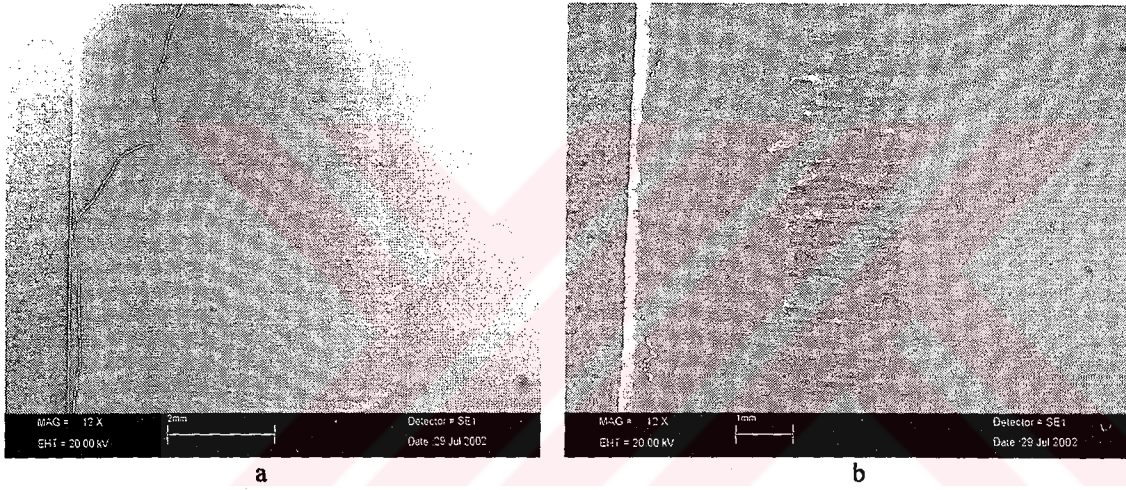


Foto 6.4 100°C'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 50N yük altında (X12), b) 125N yük altında (X12)

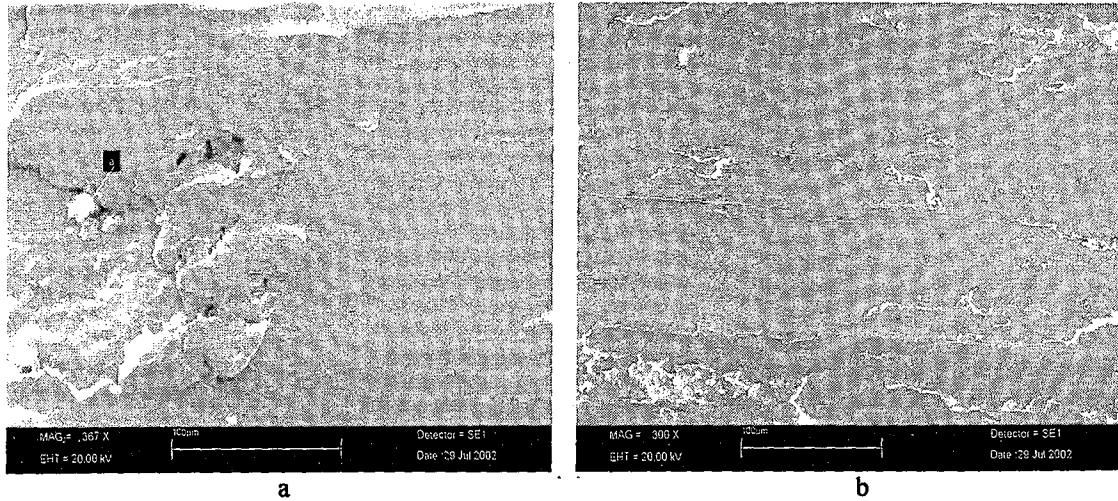
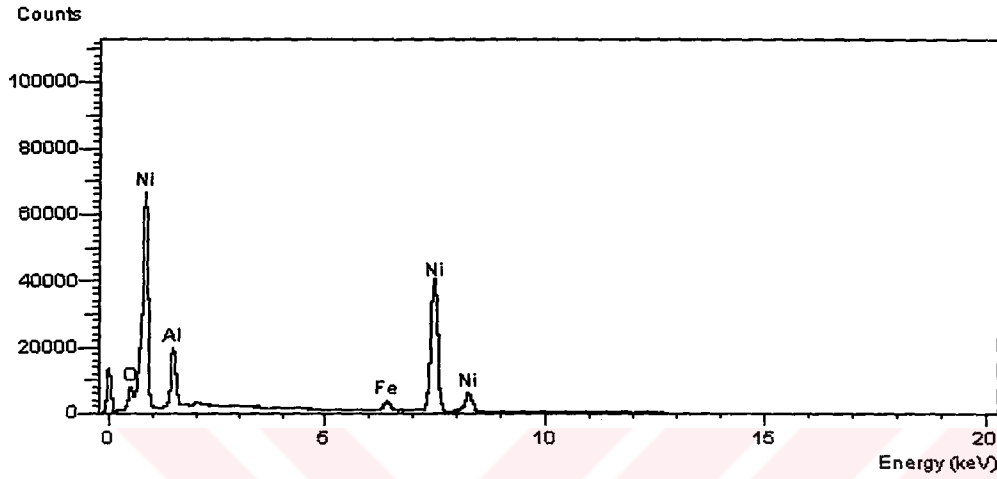
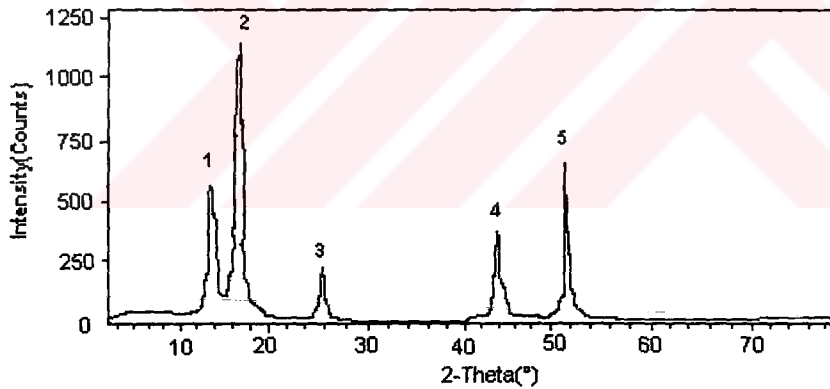


Foto 6.5. 100°C'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 50N yük altında (X367), b) 125N yük altında (X300)

Şekil 6.7’de, 100°C’de aşındırılan numunenin yüzeyinden alınan EDS analizi verilmiştir. Bu analize göre, aşınma yüzeyinde Ni ve Al elementlerinin haricinde O ve Fe elementleri de mevcuttur. Bu sonuç aşınma yüzeylerinde çeşitli oksitlerin oluştuğunu göstermektedir. Fakat burada oluşan oksitlerin yoğunlukları yüksek sıcaklıklara nazaran çok daha düşüktür.



Şekil 6.7. 100°C’de, 50N yük altında aşındırılan numuneden alınan EDS analizi.



1: NiFe_2O_4 , 2: $(\text{Fe, Mn})_2\text{SiO}_4$, 3: MnSiO_3 , 4: $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$, 5: $\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$

Şekil 6.8. 100°C’de, 100N yük altında aşındırılan numuneden alınan XRD analizi.

Şekil 6.1’de 100°C’de gerçekleştirilen aşınma deneylerinde meydana gelen ağırlık kaybının, deneyde uygulanan yüklerle ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Bu sıcaklıkta 50N yük altında aşındırılan numunede meydana gelen ağırlık kaybı sırasıyla 75, 100 ve 125N yükler altında aşındırılan numunelerde meydana gelen ağırlık kaybından daha fazladır. Şekil 6.7’deki EDS analizine göre, 100°C’de, 50N yük altında aşındırılan malzemede meydana gelen oksit miktarı daha yüksek sıcaklıklara göre çok daha düşüktür. Yüksek sıcaklıklarda oluşan oksit tabakalarının sertliği ana malzemeden

daha yüksektir[35]. 100°C’de yük artırıldıkça disk ile ana malzeme arasındaki sürtünme ısısının da ilavesiyle sıcaklık daha fazla artmaktadır. Bu da uygulanan yükün artmasıyla yüzeydeki oksit miktarının artmasına ve dolayısıyla ağırlık kaybının azalmasına neden olmaktadır.

Fotoğraf 6.5a’da malzeme yüzeyinde meydana gelen ayrılımları veya kopmaları görmemiz mümkündür. Oysa Fotoğraf 6.5b’de numune yüzeyinde çeşitli oksitler meydana gelmiş ve bu numune daha az aşınmıştır.

6.3. 300°C’de Farklı Yükler Altında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri

6.3.1 Deney Numunelerinin SEM, EDS ve XRD Sonuçları ve Değerlendirme

Ni_3Al+B metallerearası bileşiğinin; 300°C’de, 50 ve 125N yük altında, gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde aşınma yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları Fotoğraf 6.6 ve Fotoğraf 6.7’de verilmiştir.

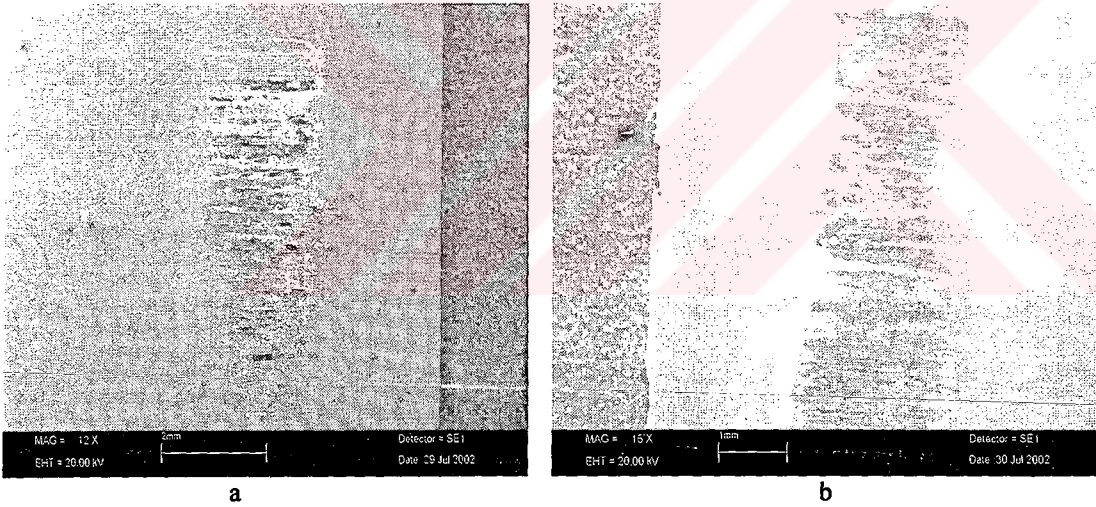


Foto 6.6. 300°C’de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.

a) 50N yük altında (X12), b) 125N yük altında (X15)

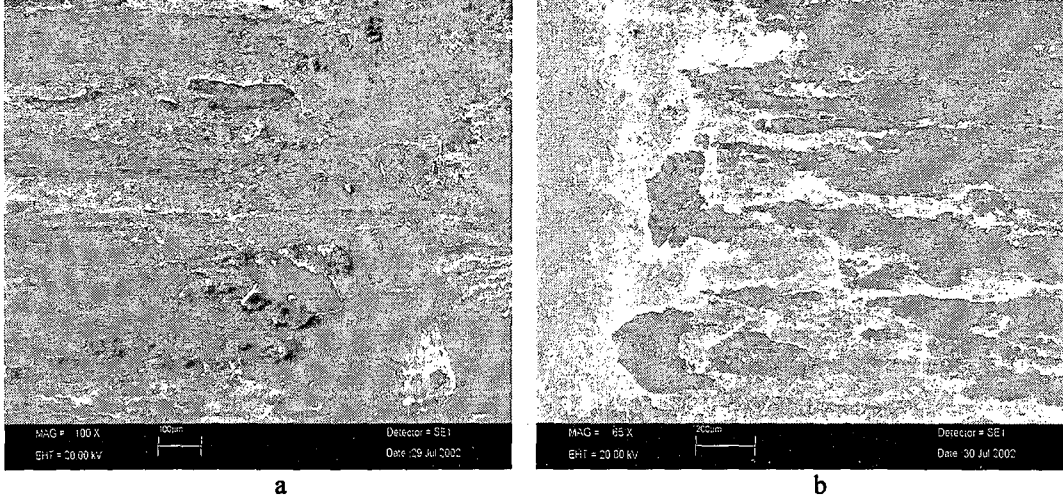
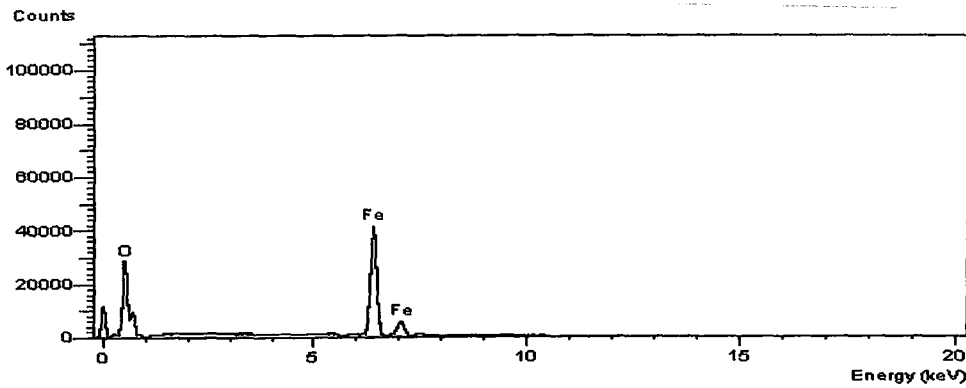


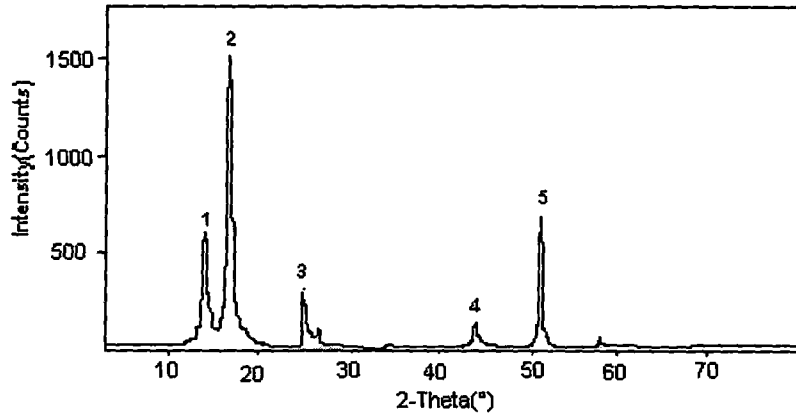
Foto 6.7. 300°C de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 50N yük altında (X100), b) 125N yük altında (X65)

Şekil 6.9'da, deney sonunda aşınma yüzeyinden alınan EDS analizi verilmiştir. Bu analize göre, aşınma yüzeyinde Ni ve Al elementlerinden farklı olarak O ve Fe elementlerinin varolduğu görülmektedir. Bu sonuç 300°C sıcaklıkta aşınma yüzeylerinde çeşitli oksitlerin oluştuğunu gösterir. 300°C'deki EDS sonuçları ile 100°C'deki EDS sonuçları karşılaştırılırsa, 300°C'de tespit edilen O ve Fe miktarının 100°C'deki O ve Fe miktarlarından daha fazla olduğu görülmektedir. Yani sıcaklık arttıkça yüzeyde oluşan oksit miktarlarında artış söz konusudur. Şekil 6.3 deki grafikte, 100°C'den sonra sertliğin artış göstermesi de aşınma yüzeylerinde oluşan oksit kalınlıklarının arttığını göstermektedir.



Şekil 6.9. 300°C'de, 50N yük altında aşındırılan numuneden alınan EDS analizi.

Şekil 6.10'da 300°C'de aşındırılan numunenin yüzeyinden alınan XRD analizi verilmiştir. Şekil 6.8. ile Şekil 6.10 karşılaştırılacak olursa, 300°C'de $\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$ bileşiği, miktar olarak bir artış göstermektedir.



1: NiFe_2O_4 , 2: $(\text{Fe, Mn})_2\text{SiO}_4$, 3: MnSiO_3 , 4: $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$, 5: $\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$

Şekil 6.10. 300°C'de, 100N yük altında aşındırılan numuneden alınan XRD analizi.

Şekil 6.1'de verilen aşınma grafiğinden görüldüğü üzere, 300°C'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinde meydana gelen ağırlık kaybının yük ile ilişkisi, 100°C'deki aşınma deneylerine paralel bir şekilde sonuçlanmıştır. Bu sıcaklıktaki deneylerde görülen ağırlık kaybı, 100°C'deki sonuçlara göre çok daha düşüktür. Şekil 6.9'daki EDS analizine bakılacak olursa, yüzeyde Fe ve O elementlerinin varlığı görülmektedir. Sıcaklık arttıkça karşı malzemedan ana malzemeye malzeme transferinin artması sonucu yüzeydeki oksitlerin yoğunlukları artmakta dolayısı ile de ağırlık kaybı 300°C'de düşmektedir. Fotoğraf 6.7'ye bakılacak olursa, 50N da aşındırılan numunenin yüzeyinde bölgesel olarak kopmalar görülürken 125N yük altında aşındırılan numunenin yüzeyi tamamen oksit tabakaları ile kaplıdır. Fotoğraf 6.7b'de görülen siyah bölgeler yüzeyde meydana gelen oksit tabakalarını göstermektedir.

6.4. 450°C’de Farklı Yükler Altında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri

6.4.1 Deney Numunelerinin SEM, EDS ve XRD Sonuçları ve Değerlendirme

$\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$ metallerearası bileşiminin; 450°C’de, 50 ve 125N yük altında, gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde alınmış SEM fotoğrafları Fotoğraf 6.8. ve Fotoğraf 6.9’da verilmiştir.

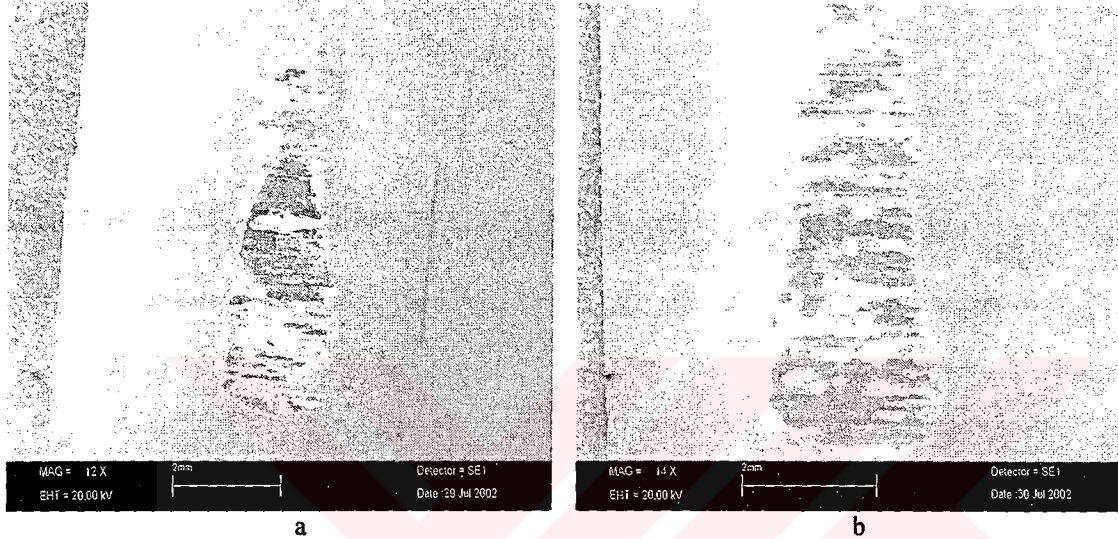
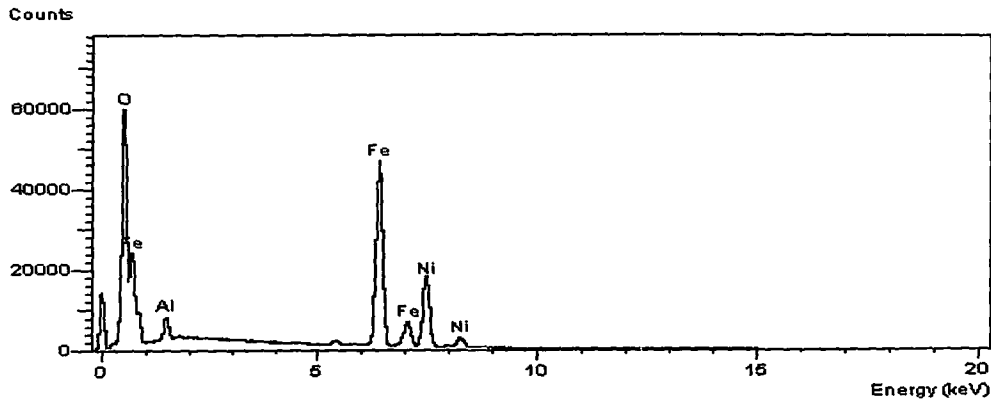


Foto 6.8. 450°C’de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 50N yük altında (X12), b) 125N yük altında (X14)

Şekil 6.11’de, 450°C’de gerçekleştirilen deney sonunda aşınma yüzeyinden alınan EDS analizi verilmiştir. Bu analize göre, O ve Fe elementlerinin varlığı görülmektedir. Ni ve Al elementlerinin haricinde tespit edilen en yüksek element miktarına bu sıcaklıkta rastlanmıştır. Bu sonuç meydana gelen en fazla oksit miktarının bu sıcaklıkta en fazla olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.11. 450°C’de, 125N yük altında aşındırılan numuneden alınan EDS analizi.

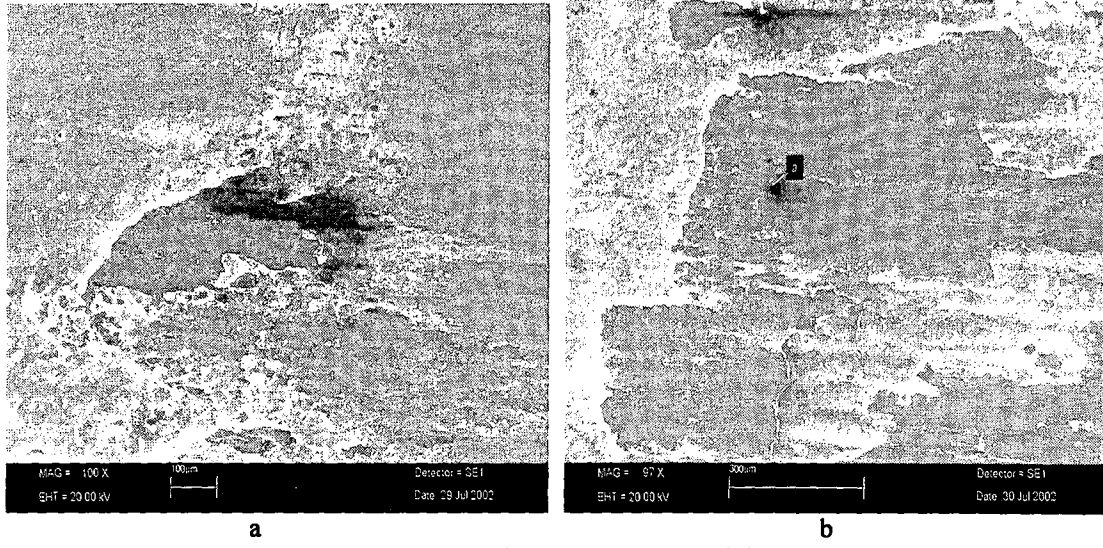
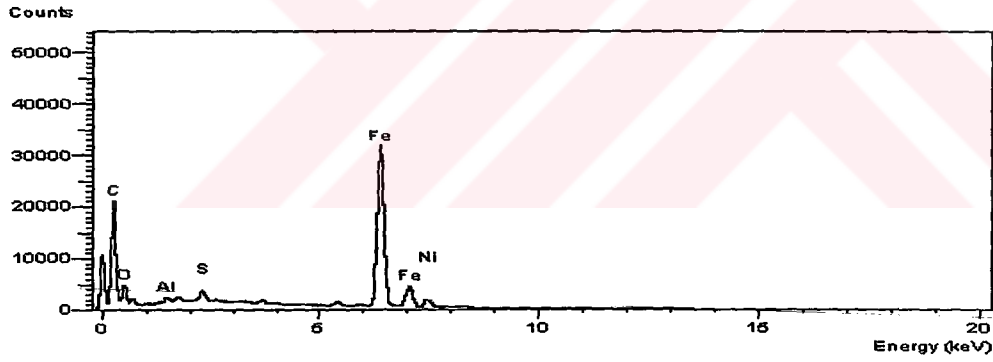
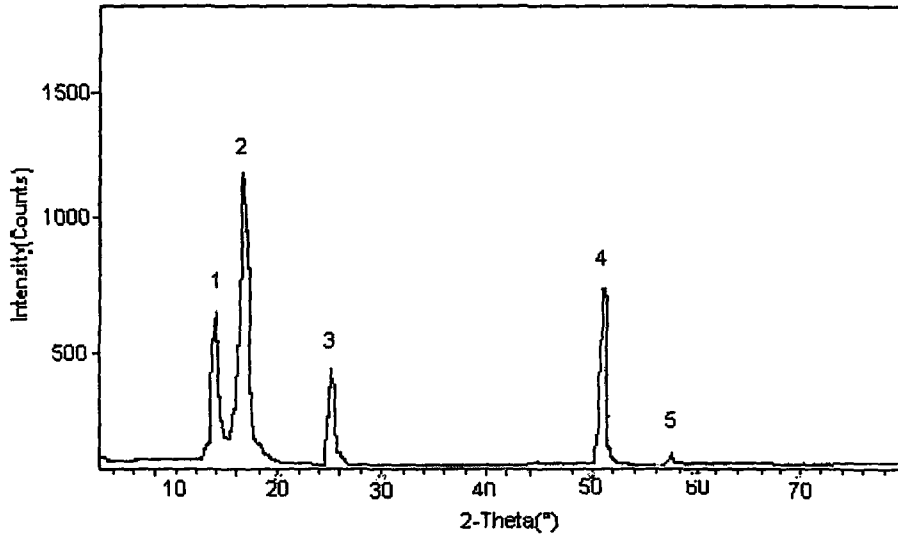


Foto 6.9. 450°C'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 50N yük altında (X100), b) 125N yük altında (X97)

Şekil 6.9b'de işaretli olan kısımdan alınan EDS analizine göre bu bölgede Fe ve O elementleri mevcuttur. Buna göre artan sıcaklıklar ile karşı malzemeden ana malzemeye daha fazla miktarlarda malzeme transferi söz konusu olmaktadır.



Şekil 6.12. Şekil 6.20b'de işaretlenen bölgeden alınan EDS analizi.



1: NiFe_2O_4 , 2: $(\text{Fe, Mn})_2\text{SiO}_4$, 3: MnSiO_3 , 4: $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$, 5: $\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$

Şekil 6.13. 450°C’de, 100N yük altında aşındırılan numuneden alınan XRD analizi.

Şekil 6.1’de, 450°C’de gerçekleştirilen aşınma deneylerinde gözlenen ağırlık kaybının yük ile ilişkisi 100 ve 300°C’deki aşınma deneylerine paralel bir şekilde sonuçlanmıştır. Bu sıcaklıktaki deneylerde elde edilen ağırlık kaybı sonuçları diğer tüm deney sonuçlarından daha düşüktür. Yani en yüksek sıcaklıkta en düşük aşınma miktarı görülmektedir.

Ağırlık kaybı miktarının 450°C’de en az seviyede olmasının nedeni, daha önceden de bahsedildiği gibi artan sıcaklıklarla birlikte daha sert oksit türlerinin oluşması (Şekil 6.3), bu oksitlerin yüzeydeki miktarının artması ve karşı malzemeden ana malzemeye malzeme transferi miktarındaki artıştır. Şekil 6.12’deki EDS analizi, sıcaklığın artmasıyla birlikte karşı malzemeden ana malzeme yüzeyine elementlerin transfer olduğunu göstermektedir.

Yine bir diğer mekanizmadan bahsetmek gerekirse; sıcaklık arttıkça (artan yüklerle birlikte sürtünmeden dolayı da sıcaklık artmaktadır) karşı malzemeden kopan abrasiv parçacıklar ana malzeme yüzeyinde yüksek bir plastisiteye neden olmakta ve bu da malzemenin aşınma direncini arttırmaktadır[36].

6.5. Oda Sıcaklığında Farklı Aşınma Mesafeleri İçin Yapılan Aşınma Deneyleri

6.5.1. Aşınma Deney Sonuçları ve Değerlendirme

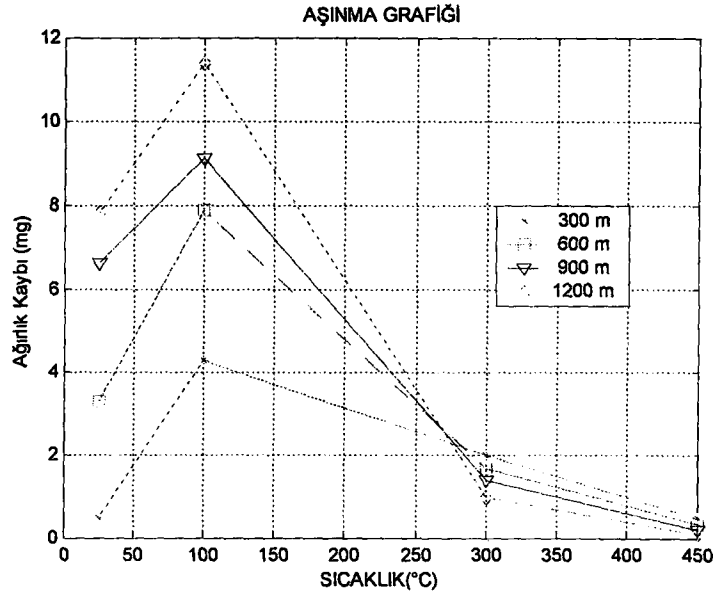
Yol ve sıcaklığın parametre olarak kullanıldığı aşınma deneylerinde; 300, 600, 900 ve 1200m'lik dört farklı yol ve 25, 100, 300 ve 450°C olmak üzere dört farklı sıcaklık değeri kullanılmıştır. Bu deneylerde, yük; $F=75\text{N}$, hız; $V=0.75\text{m/s}$ veya devir; $N=477\text{d/dk}$ olarak sabit alınmıştır. Her yoldaki deneyler dört sıcaklık değeri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Kayma mesafesi -sıcaklık değişimine göre ağırlık kaybı değerleri.

$T_1=25^\circ\text{C}$				$T_2=100^\circ\text{C}$			$T_3=300^\circ\text{C}$			$T_4=450^\circ\text{C}$		
X (m)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)
300	0.7498	0.7493	0.5	0.8309	0.8276	4.2	0.8161	0.8144	2.0	0.7823	0.7816	0.7
			5			37			13			25
600	0.8538	0.8525	3.3	0.8468	0.8389	7.9	0.8391	0.8371	1.7	0.8704	0.8703	0.5
			6			38			14			26
900	0.5712	0.5583	6.6	0.8630	0.8539	9.1	0.8740	0.8733	1.6	0.8059	0.8057	0.37
			7			39			15			27
1200	0.8388	0.8310	7.8	0.8878	0.8764	11.4	0.8459	0.8449	1.0	0.8350	0.8349	0.12
			8			40			16			28

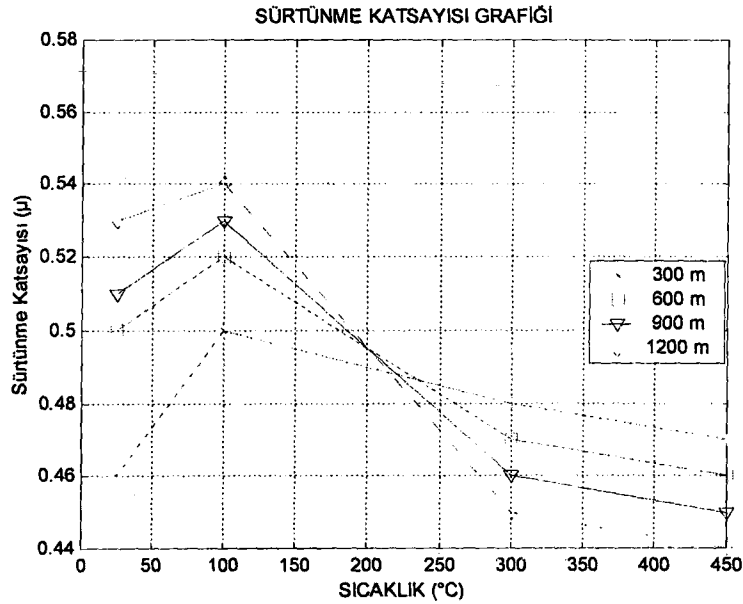
Bu deneylerde $F=75\text{N}$, $V=0.75\text{m/s}$ ve $N=477\text{d/dk}$ olarak alınmıştır.

Tablo 6.2'deki sonuçlardan yararlanarak, yol-ağırlık kaybı ilişkisinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 6.14'de verilmiştir. Şekil 6.14'deki grafiğe bakılacak olursa, ağırlık kaybı miktarı 100°C 'de, tüm yük değerlerinde maksimum değerlere ulaşmış ve bu sıcaklıktan sonra bir düşüş göstermiştir. 450°C 'deki ağırlık kaybı değerleri ise oda sıcaklığındaki ağırlık kaybı değerlerinin altına düşmüştür.



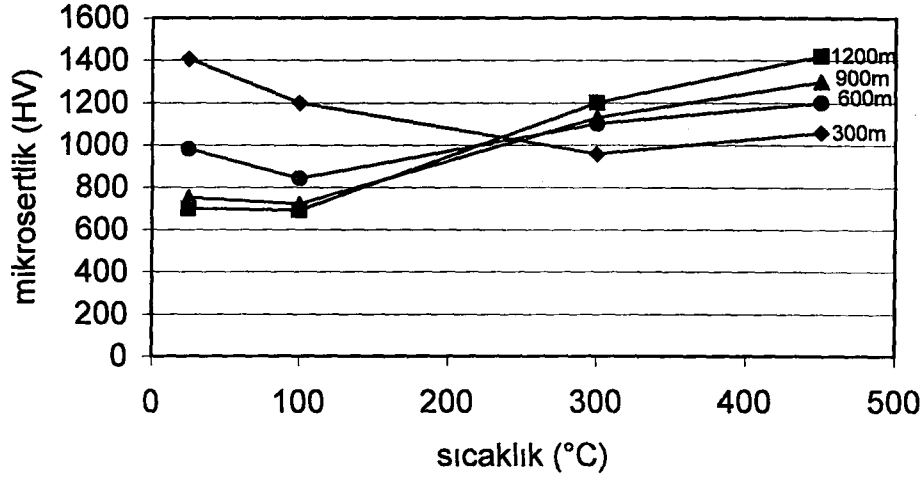
Şekil 6.14. Numunelerin, kayma mesafesi - sıcaklık değişimine bağlı olarak ağırlık kayıpları.

Aşınma deneyleri esnasında aşınma test cihazına bağlı olan bir çizici vasıtasıyla ana malzeme ile karşı aşındırıcı disk arasındaki sürtünme katsayıları tespit edilmiştir. Elde edilen bu değerlerden yararlanarak Şekil 6.15’de verilmiş olan sürtünme katsayısı grafiği oluşturulmuştur. Şekil 6.15’de, sürtünme katsayısı grafiğindeki sonuçlar, Şekil 6.14’deki ağırlık kaybı değerlerine benzer olarak 100°C de en yüksek değerlere ulaşmış ve bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısı değerlerinde azalma gözlenmiştir.



Şekil 6.15. Kayma mesafesi ve sıcaklığa bağlı olarak, sürtünme katsayısı değişim.

Aşınma deneyleri tamamlandıktan sonra aşınma yüzeylerindeki mikrosertlik tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlardan yararlanarak sıcaklık ile aşınma yüzeylerinin sertliği arasındaki ilişki Şekil 6.16’da verilmiştir.



Şekil 6.16. Kayma mesafesi ve sıcaklık ile aşınma yüzeylerinin sertliğindeki değişim.

6.5.2. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları ve Değerlendirme

Ni_3Al+B metallerarası bileşiğinin; oda sıcaklığında, 300 ve 1200m yolda, gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde alınmış SEM fotoğrafları aşağıda verilmiştir.

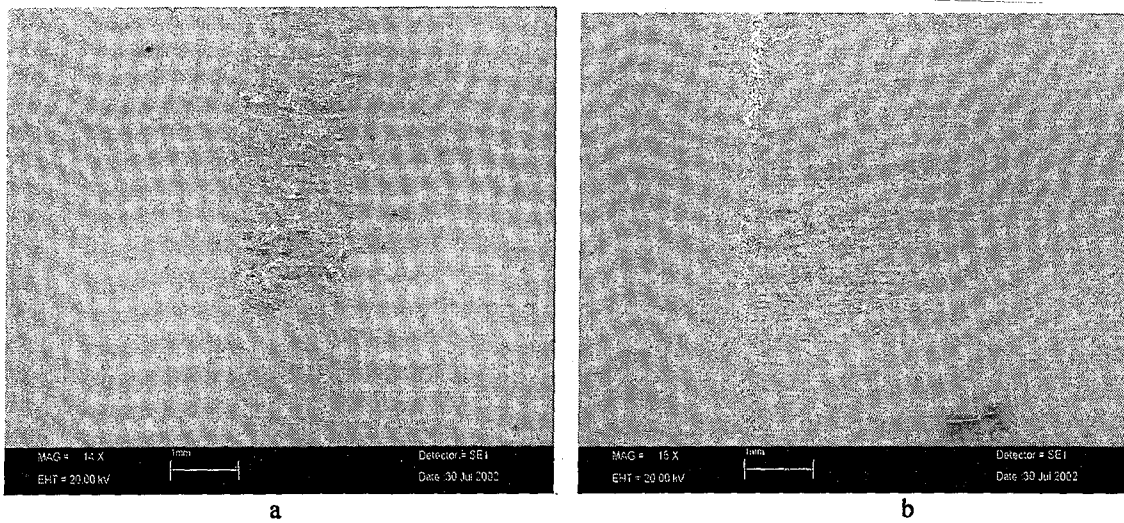


Foto 6.10. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 300m yolda (X14), b) 1200m yolda (X15)

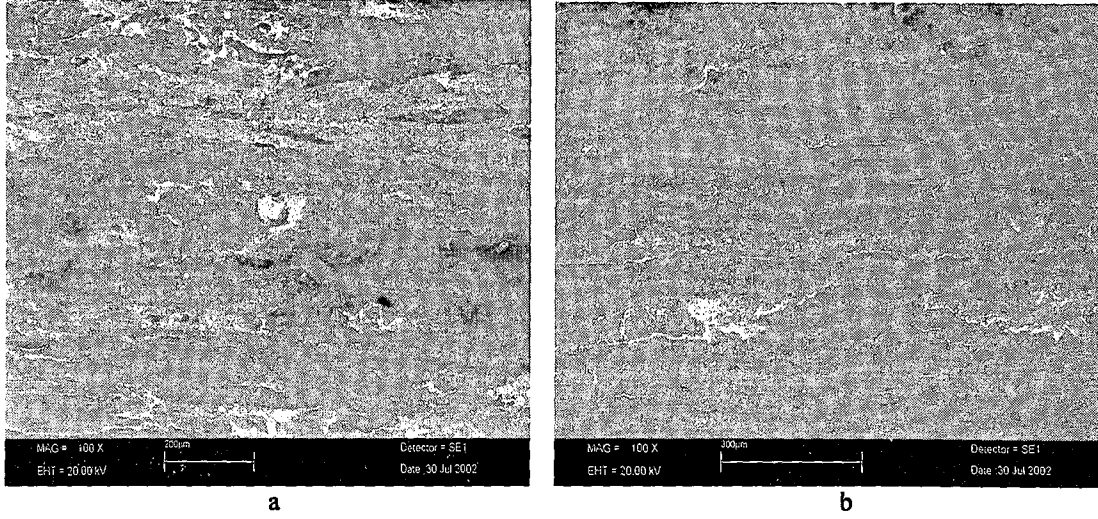


Foto 6.11. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 300m yolda (X100), b) 1200m yolda (X100)

Deney parametresi olarak yol-sıcaklık değişkenlerinin kullanıldığı deneylerde kayma mesafesi olarak 300, 600, 900 ve 1200m'lik mesafeler katedilmiştir. Yine deneylerde, tüm yol değerlerinde 4 farklı sıcaklık uygulanmıştır.

Oda sıcaklığındaki sonuçlara baktığımız zaman; en az ağırlık kaybının 300m'de, en fazla ağırlık kaybının ise 1200m'de meydana geldiği görülmüştür. Bu sıcaklıkta, aşınma yüzeylerinde oluşan oksit tabaklarının miktarları, yüksek sıcaklıklarda meydana gelen oksitlerin miktarlarına göre çok daha azdır. Değişken olarak yük parametresinin kullanıldığı deneylere benzer olarak, alınan yol arttırıldıkça ağırlık kaybının arttığı Fotoğraf 6.10'da açık bir şekilde görülmektedir. Fotoğraf 6.10b'deki aşınma bölgesi 300m yol alınarak tamamlanan aşınma deney numunesindeki aşınma bölgesinden daha büyüktür. Yüzeyde çok az ya da hiç oksit meydana gelmediğinden kayma mesafesinin artmasıyla ağırlık kaybının artması, aşınma mekanizmalarının doğal bir sonucudur.

6.6. 100°C'de Farklı Aşınma Mesafeleri İçin Yapılan Aşınma Deneyleri

6.6.1. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları ve Değerlendirme

Ni_3Al+B metallerarası bileşiğinin; 100°C'de, 300 ve 1200m kayma mesafesinde, gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde çekilmiş SEM fotoğrafları aşağıda verilmektedir.

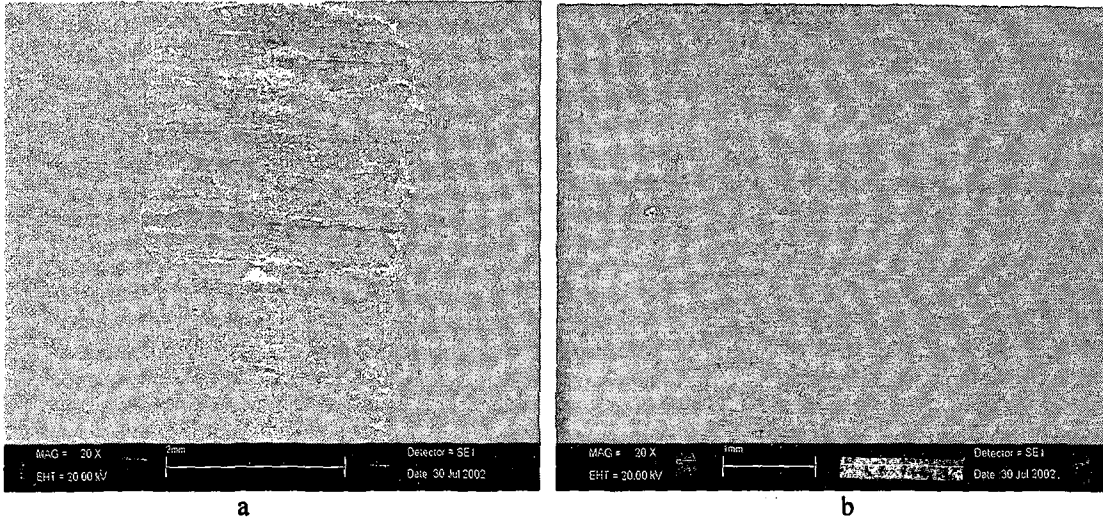


Foto 6.12. 100°C’de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.

a) 300m yolda (X20), b) 1200m yolda (X20)

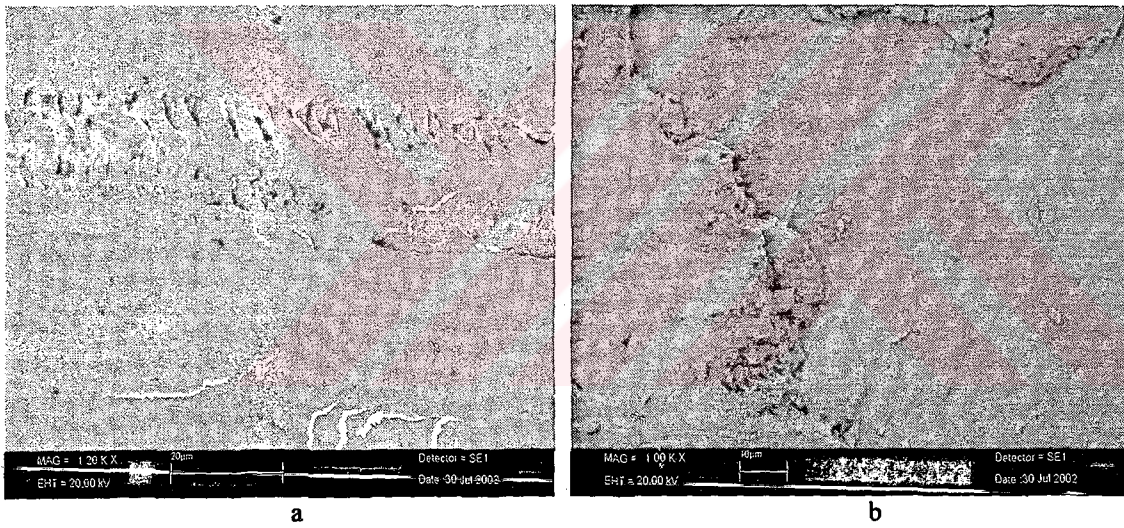


Foto 6.13. 100°C’de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.

a) 300m yolda (X1200), b) 1200m yolda (X1000)

Deney sıcaklığını 100°C’ye arttırdığımızda meydana gelen ağırlık kaybı, oda sıcaklığına göre artmıştır. Burada dikkati çeken nokta, 100°C’de artan yol ile ağırlık kaybının artmasıdır. Oysa değişken olarak yük ve hızın seçildiği deneylerde 100°C’de ağırlık kaybı miktarı bu değişkenlerin artışı ile azalmıştır. Yük ve hızın değişken olarak kullanıldığı aşınma deneylerinde bu iki parametrenin artması deney sıcaklığının artmasına neden olmakta ve bu da yüzeyde oksit oluşumuyla sonuçlanmaktadır. Yüzeyde oluşan oksit miktarı, daha önceden bahsedildiği gibi ağırlık kaybının azalmasına neden olmaktadır. Oysa bu deneyde sıcaklık 300 ve 1200m için sabittir.

Fotoğraf 6.12a ve b'ye bakılacak olursa, yüzeyde oluşan oksit miktarının çok az olduğu görülmektedir. Fotoğraf 6.13b'de (1200m kayma mesafesinden sonra) aşınma yüzeyinde ayrılma ve kopmaların olduğu Fotoğraf 6.13a'da ise kalınlaşarak kazınma şeklinde kopmaların meydana geldiği yüzey görülmektedir.

6.7. 300°C'de Farklı Aşınma Mesafeleri İçin Yapılan Aşınma Deneyleri

6.7.1. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları ve Değerlendirme

$\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$ metallerarası bileşiğinin; 300°C'de, 300 ve 1200m yolda, gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde çekilmiş SEM fotoğrafları aşağıda verilmektedir.

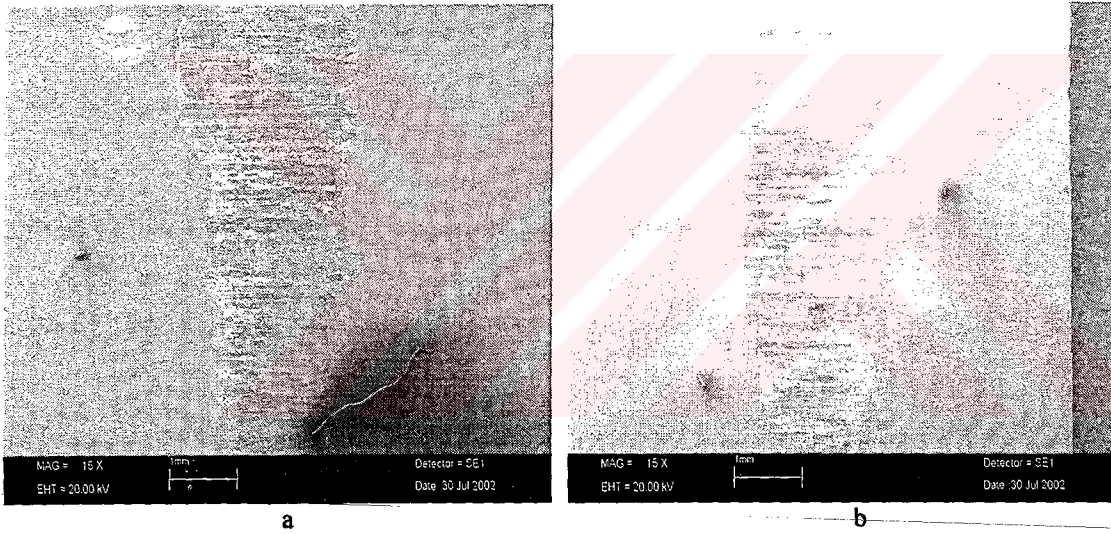


Foto 6.14. 300°C'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 300m yolda (X15), b) 1200m yolda (X15)

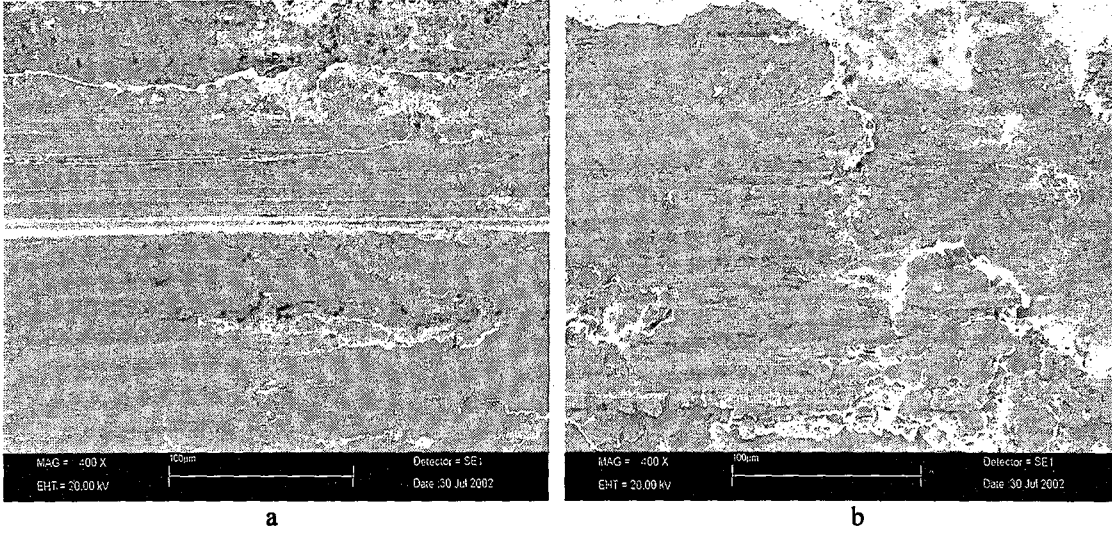


Foto 6.15. 300°C'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 300m yolda (X400), b) 1200m yolda (X400)

300°C'de gerçekleştirilen deneylerde ağırlık kaybı, seçilen 4 yol parametresi için de azalma göstermektedir. Şekil 6.16'da, 100°C'den sonra malzemenin sertliğinin arttığı görülmektedir. Sertlik, sıcaklık artışı ile oluşan oksitlerden dolayı artmaktadır. Aşınma neticesinde oluşan oksitlerin sertlikleri, $\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$ metaller arası bileşiğinden çok daha fazladır[35]. 100°C'den sonra aşınma yüzeylerinde meydana gelen oksitlerin tür ve yoğunluklarının artmasından dolayı ağırlık kaybı miktarı bu sıcaklıktan itibaren düşmektedir.

6.8. 450°C'de Farklı Aşınma Mesafeleri İçin Yapılan Aşınma Deneyleri

6.8.1. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları ve Değerlendirme

$\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$ metallerarası bileşiğinin; 450°C'de, 300 ve 1200m yolda, gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde alınmış SEM fotoğrafları aşağıda verilmektedir.

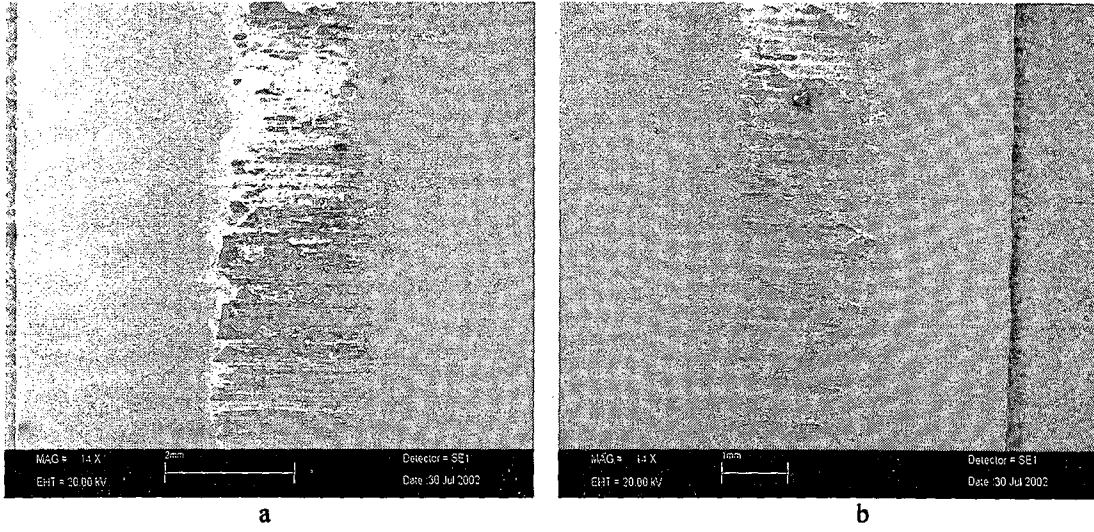


Foto 6.16. 450°C'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 300m yolda (X14), b) 1200m yolda (X14)

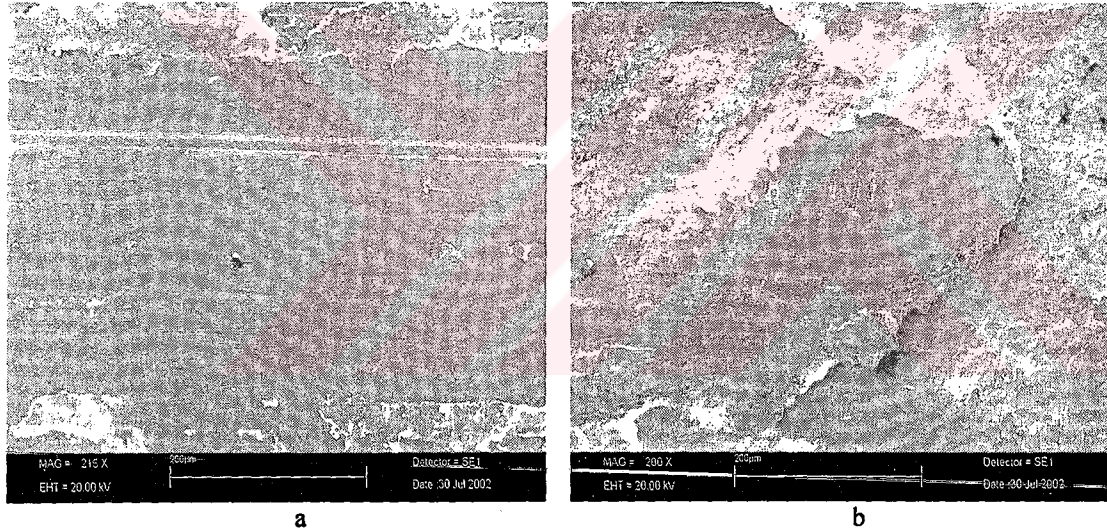


Foto 6.17. 450°C'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 300m yolda (X215), b) 1200m yolda (X200)

450°C'de de 300°C'deki mekanizmaya benzer olarak, sıcaklık artışıyla birlikte aşınma yüzeylerinde çok çeşitli oksitlerin meydana gelmekte, dolayısıyla aşınma yüzeyinin sertliği artmakta bu da ağırlık kaybının azalmasına neden olmaktadır. Fotoğraf 6.16a ve b'de karşı malzemeden kopan parçacıkların ana malzeme yüzeyine transfer olduğu görülmektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi ağırlık kaybı, oluşan oksitlerle birlikte karşı malzemeden kopan abraziv partiküllerin ana malzeme yüzeyine gömülmesi neticesinde de etkilenmektedir. Ana malzeme yüzeyine gömülen bu

parçacıklar koruyucu bir tabaka oluşturmaktadırlar[36]. Kayma mesafesi arttırıldıkça karşı malzemedan koparı parçacıkların miktarları da artmakta ve ana malzeme yüzeyine gömülmektedir. Meydana gelen bu tabaka ise ağırlık kaybının azalmasıda önemli bir rol oynamaktadır. Fotoğraf 6.17a’da malzeme yüzeyinde aşınma kanalları, pullanma ve yırtılmaların olduğu görülmektedir.



6.9. Oda Sıcaklığında Farklı Hızlarda Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri

6.9.1. Aşınma Deney Sonuçları ve Değerlendirme

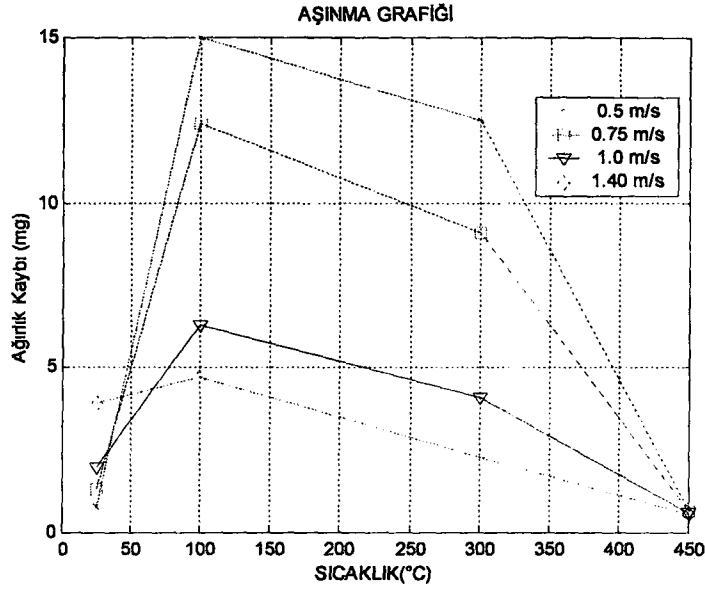
Kayma hızı ve sıcaklığın parametre olarak kullanıldığı aşınma deneylerinde; 0.5, 0.75, 1.0 ve 1.40m/s lik dört farklı hız ve 25, 100, 300 ve 450°C olmak üzere dört farklı sıcaklık değeri kullanılmıştır. Bu deneylerde, yük; $F=75\text{N}$, zaman; $t=10\text{dk.}$ sabit olarak alınmıştır. Her kayma hızındaki deneyler dört sıcaklık değeri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.3. Kayma hızı - sıcaklık değişimine göre ağırlık kaybı değerleri.

$T_1=25^\circ\text{C}$				$T_2=100^\circ\text{C}$			$T_3=300^\circ\text{C}$			$T_4=450^\circ\text{C}$		
V (m/s)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)	G_i (mg)	G_s (mg)	ΔG (mg)
0.5	0.7917	0.7909	0.8	0.8643	0.8493	15	0.7998	0.7793	20.5	0.8607	0.8600	0.7
			9			45			21			33
0.75	0.8063	0.8053	1.0	0.8844	0.8710	13.4	0.8438	0.8347	9.1	0.8353	0.8351	0.2
			10			46			22			34
1.0	0.8361	0.8348	1.8	0.8292	0.8239	5.3	0.6815	0.6774	4.1	0.8939	0.8933	0.6
			11			47			23			35
1.40	0.8339	0.8300	3.9	0.8818	0.8774	4.4	0.7346	0.3741	0.5	0.8581	0.8576	0.5
			12			48			24			36

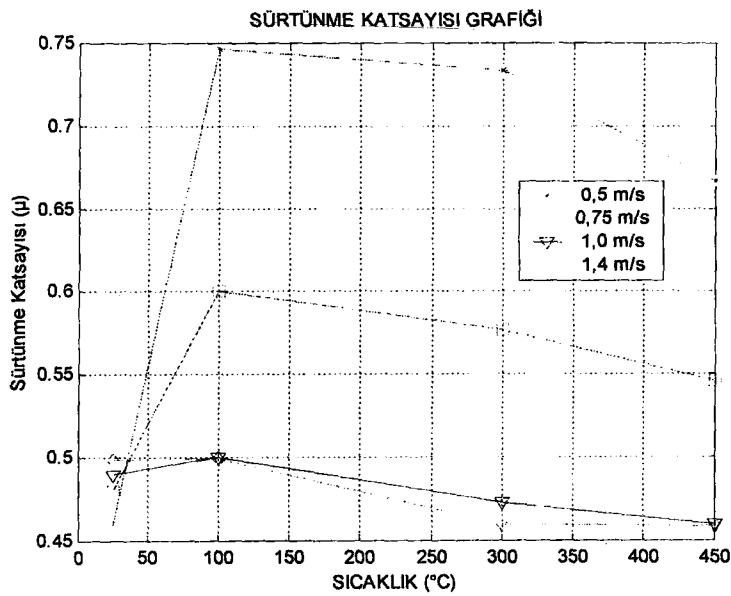
Bu deneylerde $F=75\text{N}$, $t=10\text{dk.}$ olarak alınmıştır.

Tablo 6.3 deki sonuçlardan yararlanarak, hız-ağırlık kaybı ilişkisinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 6.17’de verilmiştir. Şekil 6.17’deki grafiğe bakılacak olursa, ağırlık kaybı miktarı 100°C ’de, tüm yük değerlerinde maksimum değerlere ulaşmış ve bu sıcaklıktan sonra bir düşüş göstermiştir. 450°C ’deki ağırlık kaybı değerleri ise oda sıcaklığındaki ağırlık kaybı değerlerinin altına düşmüştür .



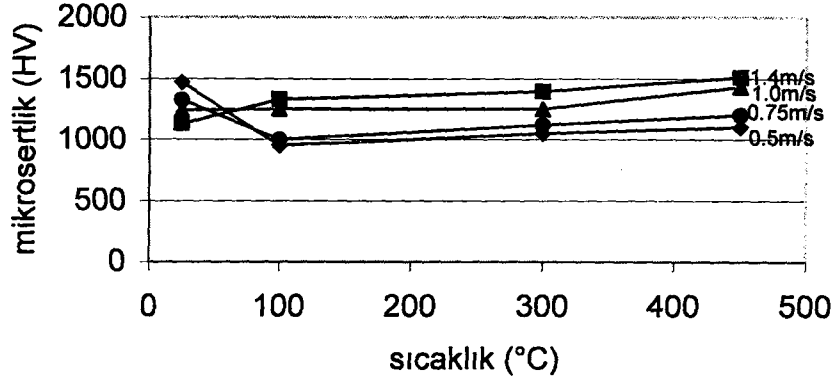
Şekil 6.17. Numunelerin hız - sıcaklık değişimine bağlı olarak ağırlık kayıpları.

Aşınma deneyleri esnasında aşınma test cihazına bağlı olan bir çizici vasıtasıyla ana malzeme ile karşı aşındırıcı disk arasındaki sürtünme katsayıları tespit edilmiştir. Elde edilen bu değerlerden yararlanarak Şekil 6.18’de verilmiş olan sürtünme katsayısı grafiği oluşturulmuştur. Şekil 6.18’de, sürtünme katsayısı grafiğindeki sonuçlar, Şekil 6.17’deki ağırlık kaybı değerlerine benzer olarak 100°C de en yüksek değerlere ulaşmış ve bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısı değerlerinde azalma gözlenmiştir.



Şekil 6.18. Hız ve sıcaklığa bağlı olarak, sürtünme katsayısı değişimi.

Aşınma deneyleri tamamlandıktan sonra aşınma yüzeylerindeki mikrosertlik tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlardan yararlanarak sıcaklık ile aşınma yüzeylerinin sertliği arasındaki ilişki Şekil 6.19’da verilmiştir.



Şekil 6.19. Hız ve sıcaklık değişimi ile aşınma yüzeylerinin sertliğindeki değişim.

6.9.2. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları

$\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$ metallerarası bileşiğinin; Oda Sıcaklığında, 0.5 ve 1.40m/s hızda, gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde alınmış SEM fotoğrafları Fotoğraf 6.18’de verilmiştir.

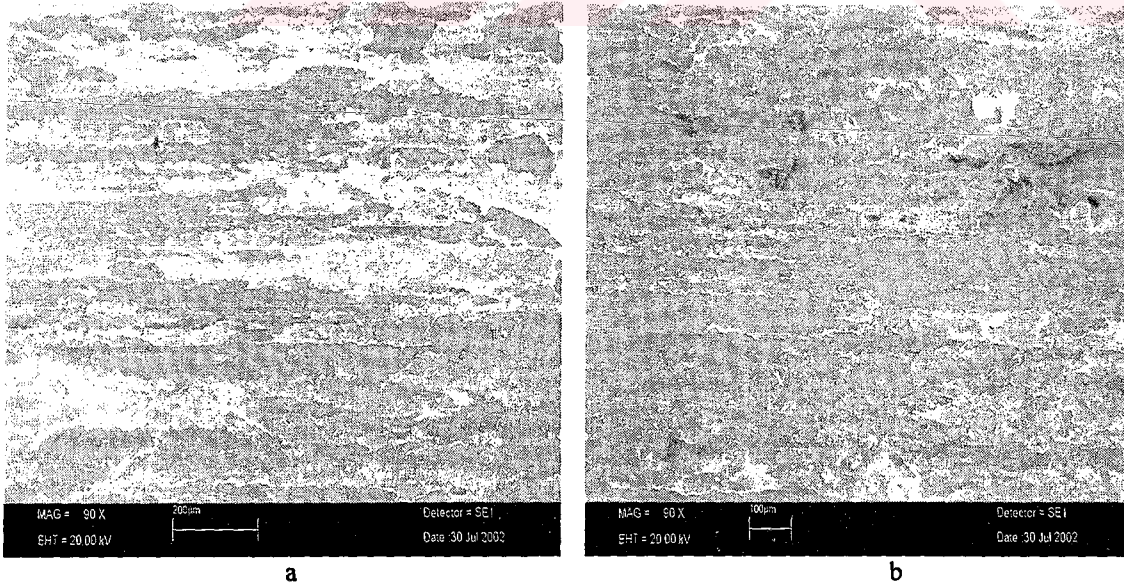


Foto 6.18. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.
a) 0.5m/s hızda (X90), b) 1.40m/s hızda (X90)

Deney parametresi olarak hız-sıcaklık değişkenlerinin kullanıldığı deneylerde hız olarak 0.5, 0.75, 1.0 ve 1.40m/s seçilmiştir. Yine deneylerde, tüm hız değerlerinde 4 farklı sıcaklık uygulanmıştır.

Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde hız artışı ile birlikte ağırlık kaybının arttığı Şekil 6.17'de görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda, 0.5m/s hızda ağırlık kaybı miktarı; 0.75, 1 ve 1.4m/s hızlarda gerçekleştirilen aşınma deneylerine göre daha düşük değerlerde kalmıştır. Aşınmada, düşük kayma hızlarında ve normal yükler altında plastik deformasyon, yüksek kayma hızlarında ise oksidasyon mekanizmaları söz konusudur[34]. Buna göre oda sıcaklığında düşük hızlarda, aşınma yüzeylerinde plastik deformasyon meydana gelmiş ve bu durum yüzey sertliğini arttırdığından dolayı ağırlık kaybı miktarı diğer hızlara göre daha az meydana gelmiştir.

6.10. 100°C'de Farklı Hızlarda Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri

6.10.1. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları

$\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$ metallerearası bileşiğinin; 100°C'de, 0.5 ve 1.40m/s hızda, gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde alınmış SEM fotoğrafları aşağıda verilmiştir.

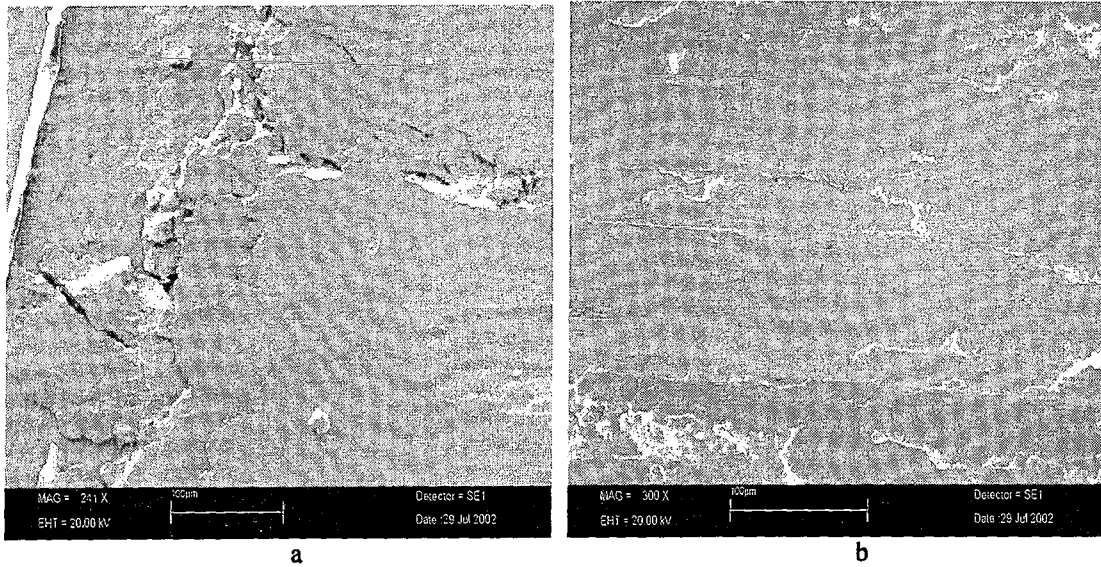


Foto 6.19. 100°C gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.

a) 0.5m/s hızda (X241), b) 1.40m/s hızda (X300)

Deney sıcaklığını arttırdığımızda Şekil 6.17'den görüleceği üzere kayma hızının artışıyla ağırlık kaybı arasında ters bir ilişki söz konusudur. Aşınma yüzeylerinin sıcaklığı kayma hızı ile ilgilidir[37]. Düşük hızda, sıcaklık ve reaksiyon hızı düşüktür[34]. Buradaki reaksiyondan kastedilen, aşındırılan yüzey ile ortamda bulunan H_2O arasında meydana gelen kimyasal reaksiyondur. Bu reaksiyon neticesinde, aşındırılan iki yüzey arasında çeşitli oksitler meydana gelmektedir. Meydana gelen oksitlerden bazıları; $NiFe_2O_4$, $MnSiO_3$, $(Fe, Mn)_2SiO_4$, $Cu_2O(SO_4)$ ve $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$ tür.

Deneylerde kullanılan hızın artmasıyla temas halindeki yüzeyler arasında sıcaklık artmaktadır. Bu da deney için seçilen ortam sıcaklığına eklenince en yüksek sıcaklık en büyük hızda oluşmaktadır.

6.11. 300 ve 450°C'de Farklı Hızlarda Gerçekleştirilen Aşınma Deneyleri

6.11.1. Deney Numunelerinin SEM Sonuçları

Ni_3Al+B metallerearası bileşiğinin; 450°C'de, 0.5 ve 1.40m/s hızda, gerçekleştirilen aşınma deneyleri neticesinde alınmış SEM fotoğrafları aşağıda verilmiştir.

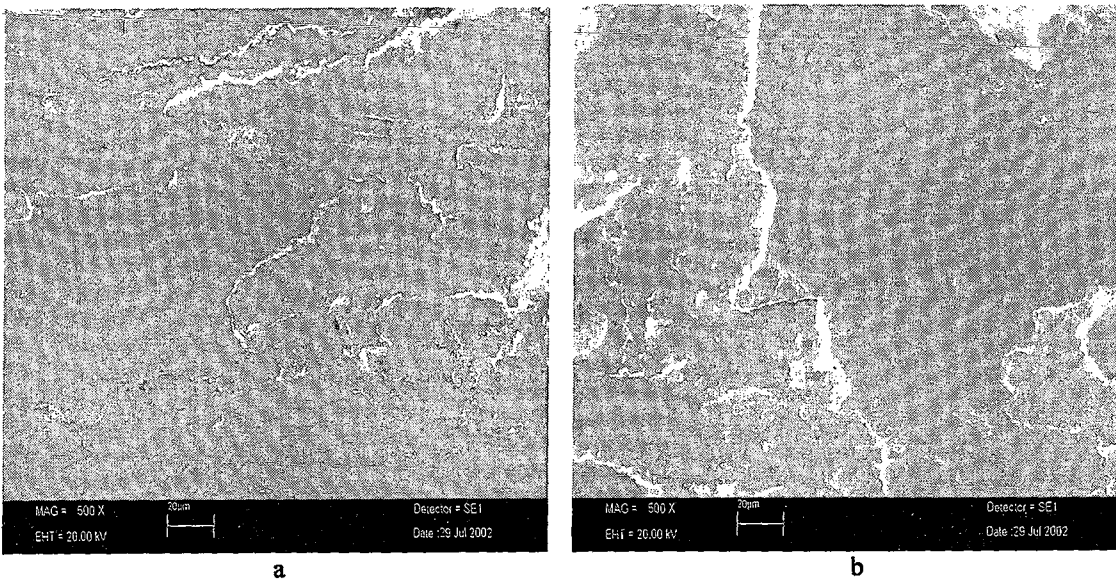


Foto 6.20. 450°C gerçekleştirilen aşınma deneylerinin SEM fotoğrafları.

a) 0.5m/s hızda (X500), b) 1.40m/s hızda (X500)

Deney sıcaklığının artırılması ile aşınma miktarlarında bir azalma görülmektedir. Fotoğraf 6.20’de numune yüzeylerinin tamamen oksitlerle kaplandığı görülmektedir. Yüksek hız ve sıcaklıklarda, aşınma mekanizması oksidasyon aşınmasıdır ve karşı malzemenin (disk) belli bir miktarı ana malzemeye transfer olmuştur[34]. Oluşan oksit tabakalarının ana malzemedan çok daha sert olması nedeniyle ağırlık kaybı miktarı azalmıştır.



7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ni_3Al+B metaller arası bileşiğinin; yük, kayma mesafesi ve kayma hızına bağlı olarak oda sıcaklığı ile $450^{\circ}C$ sıcaklıkları arasında aşınma davranışları incelendi. Deneyler; 4 farklı yük, 4 farklı kayma mesafesi ve 4 farklı kayma hızında gerçekleştirildi ve özet olarak aşağıdaki sonuçlar elde edildi.

Deneylerde aşınma sırasında, oksitlenme, karşı malzemeden ana malzeme yüzeyine malzeme transferi ve aşınma yüzeylerinde plastik deformasyon oluşup oluşmaması, ağırlık kaybı açısından önemli olan faktörler olarak tespit edilmiştir.

Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen aşınma deneylerinde ağırlık kaybı için etkin olan mekanizma, aşınma yüzeylerinde plastik deformasyonun meydana gelip gelmediğidir. Oda sıcaklığında, yük, hız ve kayma mesafesi değişenlerinin kullanıldığı bütün deneylerde, ağırlık kaybı değerleri benzer sonuçlar vermektedir. Bu sıcaklıkta kullanılan parametrelerin (yol, hız ve kayma mesafesi) artırılması ile ağırlık kaybı artmaktadır.

$100^{\circ}C$ 'de, yük, hız ve kayma mesafesinin kullanıldığı bütün deneylerde meydana gelen ağırlık kaybı değerleri, oda sıcaklığında ki değerlerden yaklaşık olarak 10-15 kat daha fazladır. Düşük sıcaklıklarda, yüzeyde plastik deformasyon oluşumu; $100^{\circ}C$ 'den daha yüksek sıcaklıklarda ise oksit oluşumu meydana gelen aşınma mekanizmaları olarak karşılaşılmaktadır. $100^{\circ}C$ 'de, bu mekanizmaların ikisi de diğer sıcaklıklara göre daha az etkili olduğundan ağırlık kaybı miktarı bu sıcaklıkta maksimum değerlere ulaşmaktadır. Fakat yük ve hız arttırıldıkça iki yüzey arasındaki sıcaklığın artmasına bağlı olarak yüzeylerde farklı oksit türleri oluşmakta ve buna bağlı olarak da ağırlık kaybı değerleri bir düşüş sergilemektedir. Parametre olarak yolun kullanıldığı deneylerde ise kayma mesafesinin arttırılması, temas halinde bulunan yüzeyler arasındaki sıcaklığı etkilememektedir. Çünkü, bu deneylerin tamamında yük ve hız sabittir. İki yüzey arasındaki sıcaklık ve basınç aynı olduğunda, kayma mesafesinin artmasıyla ağırlık kaybının artması doğal bir sonuçtur.

300 ve $450^{\circ}C$ 'de gerçekleştirilen aşınma deneylerinde de aşınma miktarları; yük, hız ve kayma mesafesi parametrelerinin tamamı için paralel sonuçlar vermektedir. Sıcaklığın $450^{\circ}C$ 'ye çıkarılmasıyla aşınma davranışı iki farklı mekanizmadan etkilenmektedir. Bunlardan birincisi, artan sıcaklıklarla birlikte aşınma yüzeylerinde

meydana gelen oksitler, ikincisi ise karşı malzemeden kopan parçacıkların ana malzeme yüzeyine yapışmasıdır. Alınan EDS ve XRD sonuçları da bu mekanizmaları doğrular nitelikte sonuçlar vermektedir. Artan sıcaklıklarla aşınma yüzeylerinde meydana gelen oksitlerin tür ve yoğunluklarında ve karşı malzemeden ana malzemeye geçen malzeme miktarlarında artış olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı yüksek sıcaklıklarda ağırlık kaybı değerleri oda sıcaklığındaki ve 100°C'deki değerlerin altına düşmektedir.

Deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar ışığında, $\text{Ni}_3\text{Al}+\text{B}$ metaller arası bileşiğinin optimum çalışma sıcaklığının oda sıcaklığı ve 300°C'den daha yüksek sıcaklıklarda olduğunu söyleyebiliriz.

Bundan sonraki çalışmalara ışık tutması açısından, malzeme yüzeyine çeşitli yüzey modifikasyonları uygulanıp aşınma deneylerinin gerçekleştirilmesi tavsiye niteliğindedir. Yine yüksek sıcaklık aşınma deneylerinin kontrollü atmosfer ortamlarında (vakum veya soygaz) gerçekleştirilip sonuçların irdelenmesi oksitlenme dışında malzemenin mikroyapısına bağlı aşınma davranışı karakteristiklerini belirlemede faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Atik, E., 1987, Poliüretan Esaslı Elemanların Belirlenmiş Şartlar İçin İmal Edilen Bir Düzenekte Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, U.Ü. Fen Bilimleri Enst.
2. Erdoğan M., 1998, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeler. Cilt 1
3. Herman, W.P., 1988, Intermetallic Compound. Materials Science and Metallurgy, 127-128.
4. Raymond, A., H., 1968, The Intermetallic Compound. Engineering Metallurgy, 270-278
5. Barret, C.S., Massalski, T.B., 1980, Superlattices. Structure of Metals, 270-278
6. Tanner, L.E., Leamy, H.J., 1974, Order-Disorder Transformations in Alloys, 180-239.
7. Cahn., R.W., 1987, Phase Transitions in Condensed Systems: Experiments and Theory, 385-404.
8. Pettifor, D.G., 1986, Phys., 19, 285.
9. Villars, P., Mathis, K., Hulliger, F., 1989, Cohesion and Structure, 2, 1-103.
10. Miedama, A.R., Niessen, A.K., 1988, Cohesion in Metals: Transitions Metal Alloys, Cohesion and Structure, 1.
11. Cahn, R.W., 1991, Load-Bearing Ordered Intermetallic Compounds-A Historical View. MRS Bulletin, 18-22.
12. Stoloff, N.S., Davies, R.G., 1966, Prog. Mater. 13,1.
13. Lawley, A., 1967, Intermetallic Compounds, 464-490.
14. Aoki, K., Ishikawa, K., Masumoto, T., 1995, Strength and Ductility of Ni₃Al Alloyed with Boron and Substitutional Elements. High Temperature Intermetallic Alloys IV, 2, 837-842.
15. Cahn, R.W., Siemers, F.W., Hall, E.L., 1987, Acta Metal., 35, 2737-2753.
16. Bowden, F.P., Tabor, 1950, Frictional Lubrication of Solid. Part-I Oxford Un. Pres.
17. Akkurt, M., 1982, Makine Elemanları. II. Cilt.
18. Odabaş, D., 1991, Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI 3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerinin Teorik ve Deneysel Araştırılması. E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
19. Halling, J., 1993, Principles of Tribology. The Mawmillan London, 72-92.

20. Zumgahr, K.H., 1987, Microstructure One and Wear of Materials. Tribology Series ,10, Elsevier Science Publisher.
21. Atamert, S., 1989 , Ph.D. Thesis, University of Cambridge
22. Buckley, D.H., 1968, Adhesion, Reibung und Verschleiss Von Cobalt und Cobaltlegierungen. Cobalt, 20-38
23. Uetz, A., Föhl, J., 1979, Tribologie- Stand der Erkenntnisse Undutzen. VDI-Berichte, 333, 1-5.
24. Soemantri, S., McGee, A.C., and Finnie, I., 1985, Some Aspect of Abrasive Wear at Elevated Temperatures. Wear, 104, 77-91.
25. Miyoshi, K., Buckley, D.H., 1979, Friction and Wear Behaviour of Simple-Crystal Silicon Carbide in Sliding Contact with Various Metals. Trans. ASLE, 22, 3, 245-256.
26. Ashok, K.V., 1978, Comparative Tendencies for Metal Loss by Abrasive Wear, Impact Erosion and Arc Erosion. Wear, 49, 305-314.
27. Robinowicz, E., Dunn, L.A., ve Russell, P.G., 1961, A Study of Abrasiv Wear Under Three Body Condition. Wear, 245-225 Hard Facing Alloys. Welding Institute Report, 7856.02, 86, 4793.
28. Desai, V.M., 1984, Effect of Carbide Size on the Abrasion of Cobalt Base Powder Metallurgy Alloys. Wear, 94, 347-376.
29. Noble, D.N., 1986, The Effect of Flux Coat Arc Welding Conditions on Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Two Iron-Based Hard Facing Alloys. Welding Institute Report, 7856.02, 86, 4793.
30. Rakayby, A.M., Mills, B., 1986, The Role of Primary Carbides in the Wear of High Speed Steels. Wear, 112, 327-340.
31. Keleştemur, M.H., 1989, Makine Yapı Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Direncine Yüzey Sertliğinin Etkisi ve Diğer Mekanik Özelliklerle İlişkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enst.
32. Hawk, J.A., Almand, D.E., 1997, Abrasiv Wear of Intermetallic – based Alloys and Composites. Materials Science&Engineering A Vol. 239-240.
33. Gürleyik, M., 1975, Metallerin ve Metal Olmayan Sert Malzemelerin Taneli Maddeler Tarafından Sürtünülerek Aşındırılması. Mühendis ve Makina, 19, 217.
34. La, P., Xue, Q., Liu, W., 2000, Tribological Properties of Ni₃Al-Cr₇C₃ Composite Coating Under Water Lubrication. Tribology International, 33, 469-475.

35. Dangsheng, X., 2001, Lubrication Behavior of Ni-Cr-Based Alloys Containing MoS₂ at High Temperature. *Wear*, 251, 1094-1099.
36. Berns, H., Koch, S., 1999, High Temperature Sliding Abrasion of a Nickel-Base Alloy and Composite. *Wear*, 225, 154-162.
37. Moore, 1975, Principle and Applications of Tribology. Pergamon International Library, UK.

