

**MONEL (Ni-Cu)
ALAŞIMLARININ AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**2014
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Umut ESGİN

**MONEL (Ni-Cu)
ALAŞIMLARININ AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Umut ESGİN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim
Dalında Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2014**

Umut ESGİN tarafından hazırlanan “MONEL (Ni-Cu) ALAŞIMLARININ AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK



Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 17/06/2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Hatice EVLEN (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Tansel TUNÇAY (KBÜ)



.../.../2014

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

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



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

Umut ESGİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**MONEL (Ni-Cu)
ALAŞIMLARININ AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Umut ESGİN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Haziran 2014, 77 sayfa

Bu çalışmada, dört farklı (Monel 400, Monel 404, Monel R-405 ve Monel K-500) alaşım toz metalurjisi (T/M) yöntemi ile üretilmiştir. Toz malzemeler 600 MPa basınç altında soğuk presleme işleminin ardından 1150 °C’de vakumlu ortamda 2 saat sinterlenerek fırında soğutulmuştur. Üretilen K-500 alaşımına yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırma ısıl işleminde, Monel K-500 alaşımı 980°C’de yapılan 1 saat çözeltiliye alma ısıl işleminden sonra suda soğutularak ve 480°C’de dört farklı sürede (6 saat, 8 saat, 10 saat ve 12 saat) yaşlandırılmıştır.

Hem sinterlenen Monel alaşımları (Monel 400, Monel 404, R-405 ve K500), hemde yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan K-500 alaşımlarının aşınma testleri pin-on-disk tipi cihazda yapılmıştır. Toz metalurjisi ile üretilen Monel alaşımları optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM+EDS), geçirimli elektron mikroskobu

(TEM), X-ışını kırınımı (XRD), sertlik ve yoğunluk ölçümleri yapılarak karakterize edilmiştir. Aşınma testleri sinterlenen monel alaşımlarında üç farklı yükte, (20N, 30N ve 40N), yaşlandırılan K-500 alaşımında 40N yük altında, beş farklı kayma mesafesinde (400-800-1200-1600-2000m) ve 1m/s kayma hızında yapılmıştır. Çalışma sonucunda, uygulanan yaşlandırma ısıl işlemlerinin malzemelerin mikro yapı ve aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı, ısıl işlem sonucu oluşan intermetalik çökeltilerinin malzemenin sertliğini ve mukavemetini artırdığını, aşınma davranışlarının da buna bağlı olarak da iyileştiği belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Monel alaşımları, toz metalurjisi, aşınma, yaşlandırma, mikro yapı ve mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 916.1.195

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

AN INVESTIGATION THE WEAR BEHAVIOURS OF MONEL (Ni-Cu) ALLOYS

Umut ESGİN

**Karabük University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Manufacturing Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

June 2014, 77 pages

In this study four different alloy (Monel 400, Monel 404, Monel R-405 ve Monel K-500) were produced by powder metallurgy technique. The powders were sintered at 1150 °C for 2 hours and cooled in the furnace after they cold pressing under 600 MPa pressure. Produced K-500 alloy were aged. The samples were solution treated at 980 °C for 1 hours, and they were aged at 480 °C at four different time (6 -12 hours) after the samples were quenched in the water.

Both sintered monel alloy (Monel 400, Monel 404, R-405 ve K500) samples and aged K-500 alloy samples were carried out wear tests with pin-on type disc apparatus. Produced monel alloys by powder metallurgy were characterized by optical microscope, scanning electron microscope (SEM+EDS), transmission electron microscope (TEM), X-ray diffraction (XRD). Density and hardness values were

measured. Sintered monel alloy samples were performed with 1m/s sliding speed under three different load (20 N, 30N and 40 N) Aged K500 alloy samples were performed under 40 N load at five different sliding distance (400-2000m). As results of this study, it was determined that applied aged heat treatments increased the wear resistance considerably, the intermetallic precipitates which were formed with heat treatment were increased the hardness and strenght, the wear behaviours can be developed depending on these reasons.

Key Word : Monel alloys, powder metallurgy, wear, aged, microstructure and mechanical properties.

Science Code : 916.1.195

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütölmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalıőmasından yardımlarını esirgemeyen Arő. Gör. Musa YILDIRIM'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez çalıőmasının düzenlenme aşamasında desteklerinden dolayı değerli dostum Harun AY' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aynı zamanda bu çalışmada, desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli eşime ve aileme yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ 1	1
BÖLÜM 2	3
NİKEL ESASLI ALAŞIMLAR.....	3
2.1. GİRİŞ	3
2.2. NİKEL ESASLI ALAŞIMLARIN MİKRO YAPISI	4
2.3. TİCARİ SAFLIKTAKİ NİKEL ALAŞIMLARI	6
2.3.1. Nikel 200 (UNS N02200) Alaşımı	6
2.3.2. Nikel 201 (UNSN02201) Alaşımı	7
2.3.3. Nikel 205 (UNS N02205) Alaşımı	7
2.3.4. Nikel 233 (UNS N02233) Alaşımı	7
2.3.5. Nikel 270 (UNS N02270) Alaşımı	7
2.4. NİKEL-KROM ALAŞIMLARI.....	7
2.4.1. Inconel 600 (UNS N06600) Alaşımı	8
2.4.2. Inconel 601 (UNS N06601) Alaşımı	8
2.4.3. Inconel 690 (UNS N06690) Alaşımı	9

2.5. NİKEL-BAKIR (MONEL) ALAŞIMLARI	9
2.5.1. Monel 400(UNS N04400) Alaşımı.....	11
2.5.2. Monel 404(UNS N04404) Alaşımı.....	11
2.5.3. Monel R-405(UNS N04405) Alaşımı.....	12
2.5.4. Monel K-500(UNS N05500) Alaşımı.....	12
BÖLÜM 3	13
TOZ METALURJİSİ	13
3.1. TOZ METALURJİSİNİN TANIMI.....	13
3.2. TOZLARIN ÜRETİLMESİ	13
3.2.1. Mekanik Yöntemle Toz Üretimi.....	16
3.2.2. Fiziksel Yöntemle Toz Üretimi	16
3.2.3. Kimyasal Yöntemle Toz Üretimi.....	17
3.2.4. Gaz Atomizasyonu ile Toz Üretimi	17
3.2.4.1. Atomizasyon Sistemleri	18
3.3. ŞEKİLLENDİRME.....	19
3.3.1. İzostatik Presleme Yöntemleri.....	20
3.3.1.1. Sıcak İzostatik Presleme (HIP)	20
3.3.1.2. Soğuk İzostatik Presleme (CIP).....	22
3.4. SİNERLEME	23
3.4.1. Katı Faz Sinterleme	23
3.4.2. Sıvı Faz Sinterleme.....	26
BÖLÜM 4	28
AŞINMA	28
4.1. AŞINMANIN TEMEL UNSURLARI.....	28
4.1.1. Aşınmayı Etkileyen Faktörler	29
4.1.1.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler	29
4.1.1.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler ve Aşındırıcı Etkisi.....	29
4.2. TRİBOLOJİK SİSTEM	30
4.3. AŞINMA TEST MODELLERİ	32
4.4. AŞINMA VEYA YÜZEY DEFORMASYONU	33

4.5. AŞINMA ÇEŞİTLERİ	35
4.5.1. Adhesiv Aşınma Mekanizması (Yapışma Aşınması)	35
4.5.2. Abrasiv Aşınma Mekanizması	37
4.5.3. Yorulma Aşınması	38
BÖLÜM 5	39
MALZEME VE METOT	39
5.1. GİRİŞ	39
5.2. TOZLARIN HAZIRLANMASI	39
5.3. TOZLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ	40
5.4. SİNERLEME İŞLEMLERİ	41
5.5. YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ	43
5.6. METALOGRAFİK NUMUNE HAZIRLAMA	44
5.7. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ	44
5.8. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	45
5.9. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMESİ	45
5.10. ENERJİ DAĞILIMLI X-İŞİNİ SPEKTROSKOPİSİ (EDS) İNCELEMESİ	45
5.11. GEÇİRİMLİ ELEKTRON MİKROSKOBU (TEM) İNCELEMELERİ VE NUMUNE HAZIRLANMASI	45
5.12. X-İŞİNİ KİRİNİMİ (XRD) İNCELEMELERİ	46
5.13. AŞINMA TESTLERİ	46
5.13.1. Aşınma Deney Cihazı	46
5.13.2. Karşılık Diski ve Malzemesi	47
5.13.3. Aşınma Deneyleri	47
BÖLÜM 6	49
DENEYSSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA	49
6.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ	49
6.1.1. Optik Mikroskop İncelemeleri	49
6.1.2. SEM ve EDS İncelemeleri	51
6.1.3. TEM İncelemeleri	54
6.1.4. XRD Analizleri	58

	<u>Sayfa</u>
6.2. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ.....	59
6.3. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	60
6.4. AŞINMA TESTLERİ	62
6.2.1. Ağırlık Kaybı ve Aşınma Oranı Sonuçları	62
6.2.2. Sürtünme Katsayısı Sonuçları.....	66
6.2.3. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi.....	67
BÖLÜM 7	70
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	70
7.1. SONUÇLAR	70
7.2. ÖNERİLER.....	72
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Ni-Cu denge diyagramı	9
Şekil 3.2. Öğütme düzeneği şematik gösterimi.....	16
Şekil 3.3. Elektrolizin şematik gösterimi	17
Şekil 3.4. Atomizasyon sistemleri Serbest düşmeli atomizasyon sistemi, yakından eşlemeli atomizasyon sistemi.....	18
Şekil 3.5. Presleme işleminin şematik gösterimi	19
Şekil 3.6. HIP akışlarının gösterimi	21
Şekil 3.7. CIP şematik gösterimi	22
Şekil 3.8. Sinterleme aşamalarının mikroskopik düzeyde şematiği	24
Şekil 3.9. Boyun bölgesinde meydana gelen sinterleme mekanizmaları	25
Şekil 3.10. Toz boyutunun sinterleme yoğunluğu üzerine etkisi	25
Şekil 3.11. Sıvı fazlı sinterleme aşamalarının mikro düzeyde şematiği	26
Şekil 4.1. Tribolojik sisteme giren enerji dağılımı	30
Şekil 4.2. Tribolojik sistemin elemanları	31
Şekil 4.3. Şematik kayma sürtünmesi ve aşınma test modelleri	32
Şekil 4.4. Şematik abrasiv aşınma test modelleri	33
Şekil 4.5. Yüzey aşınma ve bozulmalarının sınıflandırılması	34
Şekil 4.6. Adhesiv aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi.....	37
Şekil 4.7. Abrasiv aşınma şeması	38
Şekil 5.1. Turbula® Shaker Mixer (Model T2F Glenn Mills) karıştırıcı.....	40
Şekil 5.2. Deney numunelerinin baskılarının yapıldığı Hidroliksan marka pres.	41
Şekil 5.3. Monel alaşımlarının sinterleme işlem şeması . Sinterlemelerin yapıldığı Alcatel marka ACT-200 model fırın.....	42
Şekil 5.4. Monel K-500 alaşımının yaşlandırma işlem şeması	43
Şekil 5.5. Precisa XB200h marka hassas terazi.	44
Şekil 5.6. Aşınma test cihazının şematik görünümü.	47

Sayfa

Şekil 6.1. Sinterlenen Monel alaşımların optik mikroskop görüntüleri	50
Şekil 6.2. Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımının	53
Şekil 6.3. Monel alaşımlarının SEM görüntüleri	51
Şekil 6.4. Farklı sürelerde yaşlandırılmış K-500 alaşımının numunelerinin SEM ..	53
Şekil 6.5. TEM görüntüsü ve SAD paternleri.	54
Şekil 6.6. Yaşlandırılmış Monel K-500 alaşımı TEM/EDS analizi.	55
Şekil 6.7. SAD patern bölgesi element analizi değerleri.	56
Şekil 6.8. Monel alaşımlarına ait XRD analizi	57
Şekil 6.9. Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarına ait XRD analizi sonuçları	58
Şekil 6.10. Dört farklı sinterlenmiş Monel alaşımının için yoğunluk değişimi.	59
Şekil 6.11. Farklı sürelerde yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarının yoğunluk değişimi.	60
Şekil 6.12. Dört farklı Monel alaşımlarının sertlik (HV) değişimi.	61
Şekil 6.13. Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımının yaşlandırma süresine bağlı olarak sertlik (HV) değişimi.	61
Şekil 6.14. Farklı Monel alaşımlarına ait farklı (20N, 30N ve 40N) yükler altında ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.	63
Şekil 6.15. Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarına ait 40N yük altında ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.	65
Şekil 6.16. Farklı yük altında (20N, 30N ve 40N) Monel alaşımlarının sürtünme katsayısı değişimi.	66
Şekil 6.17. 40N yük altında yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarının sürtünme	67
Şekil 6.18. 1150 °C' de 2 saat sinterlenmiş Monel alaşımların 20N'da aşınma yüzeyleri SEM görüntüleri	68
Şekil 6.19. Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarının 40N da aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Monel alaşımları ve kimyasal bileşimleri	10
Çizelge 3.1. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği bazı faktörler	14
Çizelge 3.2. T/M' de kullanılan toz malzemelerin üretim yöntemi ve oranları	15
Çizelge 5.1. Monel alaşımların kimyasal bileşimleri (% ağırlıkca).....	39
Çizelge 6.1. Monel alaşımları EDS analizi sonuçları.	51
Çizelge 6.2. Yaşlandırılan Monel alaşımları EDS analizi sonuçları.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

F	: kuvvet
P	: basınç
A	: alan
g	: gram
d	: yoğunluk
m	: metre
km	: kilometre
μm	: mikron
$^{\circ}\text{C}$: derece
MPa	: megapaskal
Dv/dk	: devir sayısı
N	: newton
a	: atom
Ni	: Nikel
Fe	: Demir
Cu	: Bakır
Si	: Silisyum (silikon)
Mn	: Mangan
C	: Karbon
Al	: Alüminyum
Ti	: Titanyum

KISALTMALAR

- T/M : Toz Metalurjisi
CIP : Cold İsostatic Presing (Soğuk İzostatik presleme)
HIP : Hot İsostatic Presing (Sıcak İzostatik Presleme)
Wa : Aşınma oranı (mm^3/Nm)
 ΔG : Ağırlık kaybı (mg)
P : Yükleme ağırlığı (N)
S : Kayma yolu (m)
 ΔG : Ağırlık kaybı (mg)
OM : Optik Mikroskop
SEM : Scanning Electron Microscopy (Tarama Elektron Mikroskop)
EDS : Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)
XRD : X-ray Diffraction Analysis (X-Işını Kırınımı)
TEM : Transmission electron microscopy (Transmisyon Elektron Mikroskop)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde ülkelerin en önemli sorunlarından bir tanesi de kullanılan malzemelerde veya makine elemanlarında istem dışı olarak meydana gelen aşınmadır. İstenmeden meydana gelen aşınma, çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı sırasında kırılma kadar önemli bir problem olmasa bile, çok büyük ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Bu olay makine parçalarının tasarımında çok önemlidir. Çünkü makine parçalarının temas yüzeylerinde meydana gelen sürtünme güç kaybına ve meydana gelen aşınma ise ölçüsel değişmelere sebep olmaktadır. Bu nedenle de aşınma, göz önünde bulundurulması gereken en önemli metalurjik olaylardan biridir. Aşınma, temelde bir yüzey hasarıdır. Aşınma hasarları kapsamına giren yüzeyden malzeme kaybı kayma, kırılma, talaş oluşumu, yorulma, kimyasal çözünme ve difüzyon yoluyla gerçekleşmektedir. Bu nedenle ülkelerde her yıl milyonlarca dolarlık kaynak boşa harcanmaktadır. İstem dışı meydana gelen aşınma olayı çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı sırasında, büyük ekonomik kayıplara (enerji, işgücü, malzeme vs.) neden olmaktadır. Örneğin ABD de işleme maliyeti 70 milyar dolar/yıl ve takım maliyeti, 900 milyon dolar/yıl gibi çok yüksek maliyetlere ulaşmaktadır.

Toz metalurjisi (T/M), metal tozlarının şekillendirilmesi ile parça üretme teknolojisidir [1]. T/M üretim yöntemleri diğer metal şekillendirme yöntemlerinden tamamen farklıdır ve seramik parça üretim teknolojisine benzemektedir. Her iki halde de işleme tozların bir kalıp içerisinde sıkıştırılmasıyla başlanmaktadır. Üretilen ham parça pişirilerek (sinterleme) gerekli mukavemet sağlanmaktadır. Seramik tozların şekillendirilmesiyle, metal tozların şekillendirilmesi arasındaki en önemli fark, metal tozlarından üretilen sinterlenmiş parçaların kuvvet altında kolayca şekil değiştirilmesinin mümkün olmasıdır [2].

Monel alaşımları dayanıklı, korozyona karşı dirençli ve sert malzemelerdir. Yüksek mukavemet ve aşınma dirençlerinin yüksek olması, Monel alaşımlarının önemli özellikleri arasındadır. Monel alaşımları ağırlıkça %63-67 nikel ve %30-33 bakır içerikli alaşımlardır. 8-8.83 g/cm³lük yoğunluk, 27-38 HRC sertlik, 1300-1350 °C ergime derecesine, yüksek mekanik dayanım, korozyon ve aşınma direnci gibi üstün mekanik özelliklere sahip alaşımlardır. Bu nedenle valfler ve pompalar, doktor bıçakları, marine donanımları ve kimyasal bağlayıcıları, gemi sanayi, uçak sanayi, makine sanayi, savunma sanayi gibi sektörlerde önemli parçaların üretimlerinde tercih edilmektedirler [3,4]. Monel alaşımlarının sertleştirilebilirliklerinin yüksek olması, işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir. Bu alaşımların işlenmesi düşük hızlarda yapılmalıdır. Korozyon dirençleri yüksektir. Genellikle oldukça korozif koşullarda kullanılırlar. Küçük miktarlarda alüminyum ve titanyum ilave edilerek üretilen Monel K-500 alaşımlarının dayanımları arttırabilmektedir [4,7].

Bu çalışmada, savunma sanayi başta olmak üzere farklı alanlarda kullanılan Monel alaşımları, toz metalurjisi ile üretilerek Monel 400, Monel 404, R-405, K-500 alaşımlarının mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları ile birlikte aşınma davranışları da incelenmiştir. Ayrıca yaşlandırılma özelliğe sahip olan K-500 alaşımında ideal yaşlandırma parametreleri ve bu parametrelerin aşınma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

NİKEL ESASLI ALAŞIMLAR

2.1. GİRİŞ

Nikel esaslı süperalaşımalar genel olarak düşük alaşımlı çelikler ve paslanmaz çeliklere göre, yüksek sıcaklıklarda daha iyi mekanik özellik vermektedirler. Bu alaşımlar % 30–75 oranında nikel ve % 30'a kadar krom içermektedir. Nikel ve kromun birleşimi bu alaşımlara önemli bir oksidasyon direnci kazandırmaktadır. Sınıf olarak nikel esaslı alaşımlar (mekanik mukavemet açısından), özellikle 650 °C üzerinde paslanmaz çeliklerden daha üstün özelliktedirler [5,6].

Nikel alaşımları, daha yoğun olan çeliklerle kıyaslandığında, daha fazla mukavemet/ağırlık oranı sağlamaktadırlar. Nikel esaslı alaşımların bu tür agresif ortamlarda kullanılması yüksek korozyon direnci, mekanik ve termal yorulma, yüksek sıcaklıklarda sürünme ve erozyon direncine bağlıdır. Nikel esaslı alaşımların kullanıldığı bölgelerde bu özellikler etkin bir kullanım, performansı açısından gereklidir [5,6].

Nikel, pek çok mühendislik uygulamaları için mükemmel bir yapısal malzemedir. Bir çok ortamda, hem yüksek ve düşük sıcaklık dayanımı hem de yüksek oksidasyon ve korozyon direncine sahiptir. Nikelin cazip mühendislik özelliklerine de benzeyen başka metallere bulunmaktadır. Nikelin en büyük dezavantajı ise pahalı olmasıdır [4].

Nikel esaslı alaşımlar, gaz türbin bölümleri olmak üzere, uçak motorlarında kullanılan alaşımların ağırlıkça %50'lik kısmını kapsayan ve en çok kullanılan

alaşımlardır. Diğer uygulama alanları içerisinde liman donanımları, nükleer reaktörler, petrokimya fabrikaları ve yiyecek sektörleri bulunmaktadır. Uçak motorlarında, bu özelliklerin gereksinimi yüksek basınç ve sıcaklık altında kullanılan türbin bıçaklarında özellikle ortaya çıkmaktadır [4].

2.2. NİKEL ESASLI ALAŞIMLARIN MİKRO YAPISI

Nikel çok yönlü bir element olduğu için, bir çok metal ile alaşımlandırma işlemlerinde kullanılmaktadır. Nikel, demir ve krom arasındaki yüksek çözünürlüğünden dolayı, genellikle alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Yüzey merkezli kübik (YMK) yapıdaki nikel matris (γ), katı eriyik mukavemetlenmesi, karbür çökmesi veya çökeltme sertleşmesi ile güçlendirilebilmektedir [8].

Nikel alaşımları, geniş kullanım alanlarına sahip alaşımlardır. Farklı bileşimlerle ve iyi yüksek sıcaklık özelliklerine sahiptir. Benzer sıcaklıklarda kullanılan her hangi bir alaşım ile mukayese edildiğinde, daha fazla kullanım alanına sahip olduğu görülmektedir [9]. Üretim yöntemi olarak başta döküm olmak üzere, dövme ve toz metalurjisi yöntemleri kullanılmaktadır.

Genellikle nikel esaslı alaşımlara ilave edilen katkı elementleri, alaşımın mekanik özelliklerini (bileşime bağlı olarak) değiştirmektedir. Alaşım elementi olarak kullanıldığında ise, ilave edilen alaşım dayanımı artırır, sertliği yükseltir, sertleşmeyi kolaylaştırır, çekirdeğe kadar sertleşmeyi sağlar, korozyona karşı dayanımı yükseltir, mıknatıslanma özelliğini geliştirir, yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı artırır, elektrik direncini artırır, ısı etkisi altında genleşmeyi ayarlar ve kristal yapıyı inceltir [9,10].

Nikel alaşımlarının mikro yapısı tipik olarak γ fazı olarak adlandırılan, yüzey merkezli (YMK) yapıdaki östenit matris tarafından oluşturmaktadır. γ matrisinden başka birincil γ matrisi (γ') çökeltileri, tane sınırı γ' çökeltileri, ikincil gama (γ'') çökeltileri, karbürler ve sıkı paket fazlardır [9].

Nikel alaşımlarının mukavemeti, yapıda oluşturulan γ' çökeltilerinden dolayı artmaktadır. Mukavemetlenme mekanizmasının oluşması için bileşime, Al, Ti ve Nb elementleri ilave edilmektedir. γ' çökeltileri $Ni_3(Al,Ti)$ fazı şeklinde oluşmaktadır. Hem Ti, hem de Nb intermetalik çökeltilerin yanında ek mukavemet artışını sağlayan karbür yapılarının oluşumunda etkilidir. Al alaşım yüzeyinde kararlı bir oksit tabakası oluşturarak, Ni alaşımlarının yüksek sıcaklık oksidasyon direncini arttırmaktadır [9].

Çoğunlukla, korozyon direncininin veya ısıl direncin artırılması amacıyla kullanılmaktadır. Uygulama alanlarından bazıları ise;

- Kimya ve petro kimya endüstrisi: Cıvata, fanlar, vanalar, reaksiyon kapları, boru, transferi boru hattı, pompalar.
- Selüloz ve kağıt fabrikaları: Tüp, doktor bıçakları (neşter, makas vs.), ağartma devre ekipmanları, temizleyiciler.
- Uçak gaz türbinleri: Diskler, yanma odaları, cıvata muhafazaları, miller, egzoz sistemleri, bıçakları, kanatlar, brülör kutular, afterburnerlar, geri tepkileyiciler.
- Buhar türbini güç santralleri: Cıvata ve gaz ilave ısıtıcıları.
- Metal işleme: Sıcak iş takımları ve kalıpları.
- Tıbbi uygulamalar: Diş kullanımları, protez cihazlar.
- Uzay araçları: Roket motor parçaları
- Isı tedavi ekipmanları: Tepsiler, demirbaşlar, konveyör kemerler, sepetler, fanlar.
- Nükleer güç sistemleri: Kontrol çubuk sürücü mekanizmaları, supap sapları, yaylar.
- Kirlilik kontrol ekipmanları: Temizleyiciler, baca gaz kükürt giderme ekipmanları (fanlar, baca gazı ilave ısıtıcıları, kanallar).
- Metaller işleme fabrikaları: Fırınlar, afterburnerlar , egzoz fanları
- Kömür gazlaştırma ve sıvılaştırma sistemleri: Eşanjör, tekrarlayıcı, boru
- Otomotiv endüstrisi: Bujiler ve kızdırma bujileri (dizel motorlarda) [13].

2.3. TİCARİ SAFLIKTAKİ NİKEL ALAŞIMLARI

Nikel yüzey merkezi kübik kristal kafes yapılı bir metaldir. Yoğunluğu 8,9 g/cm³, atom numarası 28, atom ağırlığı 58.69 ve erime derecesi 1453 °C'dır. Bu element 1000 °C'ye kadar mekanik özelliklerini koruyabilmektedir. Nikel, yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci yüksek sıcaklıklardaki sürünme direnci nedeniyle demir ve kobalt gibi ferrromanyetik özellikler göstermektedir. Diğer metallerle karşılaştırıldığında, bazı üstün özelliklere sahiptir.

Yüksek saflıkta (%99,99) nikel üretilmesine karşın, ticari nikel genellikle yaklaşık %99,5 Ni ve Co içermektedir. Ticari saflıktaki nikel iyi mekanik özelliklere sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda korozyona direnci yüksektir. Düşük sıcaklıklarda ise tok ve sünektir. Sıcak şekillendirme aralığı 650°C-850°C arasındadır.

Ticari olarak üretilen saf nikel alaşımlarının bazıları şunlardır:

- Nikel 200 : (Ni % 99.6, C % 0.04)
- Nikel 201 : (Ni % 99.6, C % 0.02 maksimum)
- Nikel 205 : (Ni % 99.6, C % 0.04, Mg % 0.04)
- Nikel 233 : (C %0.15 max, Cu %0.10 max, Fe % 0.10 max, Mg %0.01-0.10, Mn % 0.30 max, S % 0.008 max, Si % 0.10 max, Ti % 0.005 max, Ni 99.00 min)
- Nikel 270 : (Ni % 99.97)

2.3.1. Nikel 200 (UNS N02200) Alaşımı

Elektrik ve elektronik parçalar, roket motor kılıflar, uçak ve füze parçaları, kimyasal nakil fiçileri, gıda ekipmanları ve boru malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Mikro yapısı, tipik bir tavlanmış katı eriyik gibidir. Mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda çalışan cihaz ve ekipmanların üretiminde kullanılmaktadır (özellikle 325 °C üstündeki sıcaklıkta çalışacak parçalarda).

2.3.2. Nikel 201 (UNSN02201) Alaşımı

Nikel 201, Nikel 200 alaşımının karbonca biraz daha dūřuk olanıdır. Yani dūřuk karbonlu nikel olarakta adlandırılmaktadır. Aynı mekanik özelliklere sahiptirler. Korozyona karşı yüksek dirence sahiptir. Sıcak ve soğuk Őekillendirilebilirler. Kostik buharlaştırıcılar, çubukların kaplanması ve yangın botlarında kullanılmaktadır.

2.3.3. Nikel 205 (UNS N02205) Alaşımı

Destek telleri ve çubukları, kurşun teller, anotlar, katot koruyucuları ve redresör lambalarında (ultrasonik güç dönüştürücüler) kullanılmaktadır.

2.3.4. Nikel 233 (UNS N02233) Alaşımı

Bu alaşım yüksek elektrik ve ısı iletkenliği ile korozyona karşı dirençli dövme nikel alaşımıdır. Geleneksel sıcak ve soğuk Şekillendirme yöntemleri bu alaşıma kolaylıkla uygulanabilmektedir. Aktif katotlar için uygun özelliklere sahiptir. Vakum tüpü anotları ve bu tüplerin parçalarında kullanılmaktadır.

2.3.5. Nikel 270 (UNS N02270) Alaşımı

Nikel 270, %99,98 saflıktaki nikel alaşımıdır. Bu alaşım tavlamasız ağır deformasyona izin veren, yüksek ısıl iletkenliğe ve sünekliliğe sahip bir alaşımdır. Yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme özellikleri göstermektedir. Katot kolları, florasan lambaları, u elektrodlu lamba parçaları, metallerin kaplaması ve kurşun tellerinin üretiminde kullanılmaktadır.

2.4. NİKEL-KROM ALAŞIMLARI

Nikel esaslı süper alaşımlar, genel olarak yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir. Örneğin, jet türbinlerinin maksimum gte çalışmaları sırasında, türbin giriş sıcaklığı 1650 C'ye ulaşmaktadır. Bu sıcaklıkta çalışan makine elemanlarının maruz kaldığı yük ve korozyona dayanabilmesi için, termal ve mekanik dirençli yeni

alaşımalar geliştirilmiştir [14,15]. Mo-Fe ilaveli alaşımlar Ni-Cr süper alaşımlarının kullanım alanları için büyük önem taşımaktadır. Çünkü bu alaşımlar yüksek sıcaklıkta çalışan parçalar olduğundan dolayı, ısı ve mekanik yorulmalara maruz kalmaktadır [11].

Ni alaşımlar, bazı önemli makine parçaları ve gaz türbinlerinde de kullanılmaktadır [16].

Ni-Cr alaşımlarının bazıları şunlardır;

- Inconel 600 (Ni % 76, Cr % 15, Fe % 8)
- Inconel 601 (Ni % 60.5, Cr % 23, Fe % 14.4, Al % 1.4)
- Inconel 690 (Ni % 61.5, Cr % 29, Fe % 9)

2.4.1. Inconel 600 (UNS N06600) Alaşımı

Inconel 600 alaşımı, korozyona ve ısıya dayanıklılık gerektiren uygulamalar için kullanılan, standart bir mühendislik malzemesidir. Bunun yanı sıra yüksek mekanik özellikleri ve kolay işlenebilirlik özelliklerini bir arada bulundurmaktadır. Inconel 600 alaşımının çok yönlülüğü, bu alaşım sınıfının altı ile 1095 °C sıcaklığa kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanımına yol açmıştır. Birçok koroziv ortama karşı çok direçlidir. Çok yüksek sıcaklıklarda bile yüksek mukavemet göstermektedir.

Kullanım alanları arasında, kimya sanayi, havacılık sanayi, ısı işlem sanayi, kağıt ve hamur sanayi, gıda işleme ekipmanları, nükleer mühendislik, gaz türbin parçalarının üretimi sayılabilir.

2.4.2. Inconel 601 (UNS N06601) Alaşımı

Inconel 601 alaşımı, ısıya ve korozyona dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu alaşımın karakteristik özelliklerinden biriside yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı çok mukavemetli olmasıdır. Ayrıca su korozyonuna karşı dirençli, yüksek mekanik dayanımı olan, kolay bir şekilde işlenebilen,

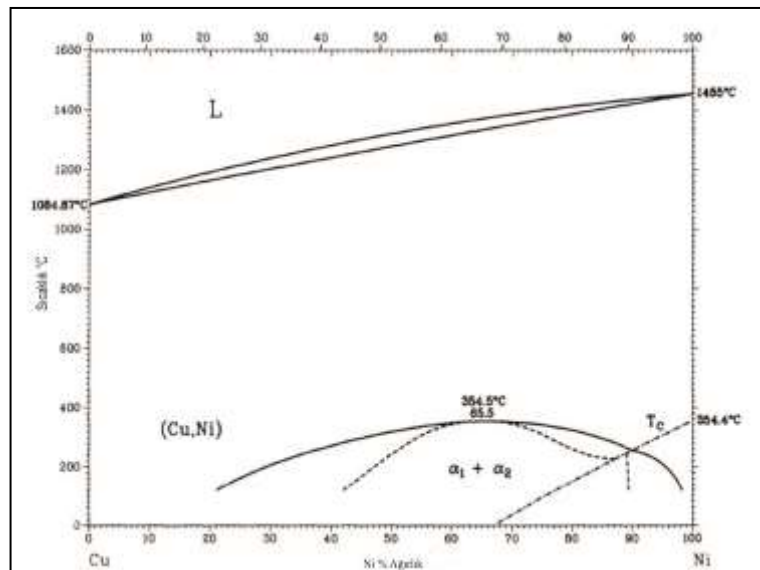
şekillendirilebilen ve kaynatılabilen bir alaşımdır. 1200 °C sıcaklığa kadar mükemmel oksidasyon direncine, yüksek sürünme özelliğine ve metalurjik kararlılığa sahiptir. Kimya sanayi, havacılık sanayi, ısıl işlem sanayi, elektrik üretim santralleri, ışınlam boruları, nitrik asit üretimi için katalizör destek malzemeleri ve buhar kızdırıcı boru destekleri parçaların üretiminde kullanılmaktadır.

2.4.3. İnconel 690 (UNS N06690) Alaşımı

Bu alaşımın İnconel 600 alaşımından farkı, kimyasal bileşiminde Ni oranı düşük Cr ve Fe oranının yüksek olmasıdır. Yüksek sıcaklıklara ve korozyona karşı dirençli bir alaşımdır. Nükleer buhar jeneratörleri, kömür gazlaştırma ve sülfürik, nitrik / hidrofluorik asit işleme gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

2.5. NİKEL-BAKIR (MONEL) ALAŞIMLARI

Nikel ve Bakır yapı bakımından YMK yapıya sahip olduğundan dolayı nikel ($a=3.62 \text{ \AA}$), bakırın ($a=3.62 \text{ \AA}$) çok yakın değerlere sahiptir. Böylece nikel ve bakır her oranda katı çözeltili oluşturmaktadır ve tek fazlı kristal yapıya sahiptir. Nikel esaslı % Ni (%50) alaşımları, Monel alaşımlar olarak bilinmektedir [3]. Ni-Cu denge diyagramı, Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1.Ni-Cu denge diyagramı [5].

Monel alaşımları dayanıklı, korozyona karşı dirençli ve sert malzemelerdir. Yüksek mukavemet ve aşınma dirençlerinin yüksek olması, Monel alaşımlarının önemli özellikleri arasındadır [3,4]. Ni-Cu alaşımlarının bazıları Çizelge 2.1.'de gösterilmiştir.

Monel alaşımların kullanım alanları;

- Enerji santralleri, gemiler ve kimya endüstrisi için cihaz, kondansör ve ısı dönüştürücülerinin üretimi,
- Yüksek sıcaklıklarda kullanılan ısıtıcı elektrik dirençleri,
- Gemicilikte tuz korozyonuna karşı engelleyici olarak,
- Motorlu araçlar ve parçaları,
- Elektrikli makineler ve parçaları,
- Yapı malzemeleri,
- Sıvı ve katı yağlarda hidrojenasyonu sağlanması,
- Batarya ve yakıt hücrelerinde ve seramik malzemelerde emaye ile demir arasında bağlayıcı olarak,
- Paslanmaz çelik üretiminde,
- Kimya endüstrisinde (Nikel alaşımları olarak metal korozyonuna maruz yerlerde, kostik solüsyonların dengelenmesinde ve petrol endüstrisinde),
- Fabrikasyon ürünlerde (Çatal, bıçak takımları, çekiç, pense gibi aletlerle diğer bir çok ev ve hastane aletlerinin yapımında),
- Termik makinalarında aşırı ısıl zorlanma ile karşılaşılan parçaların büyük bir bölümünün üretimi olarakda sıralanmaktadır.

Çizelge 2.1. Monel alaşımları ve kimyasal bileşimleri [5].

KİMYASAL BİLEŐİM	Cu	Ni	Si	Fe	Mn	C	Al	Ti
MONEL ALAŞIMLAR								
MONEL 400	31,7	63	0,5	2,45	2	0,3	**	0,05
MONEL 404	47,1	52	0,1	0,5	0,1	0,15	0,05	**
MONEL R-405	31	63,7	0,5	2,5	2	0,3	**	**
MONEL K-500	28,75	63	0,5	2	1,5	0,25	3,15	0,85

2.5.1. Monel 400 (UNS N04400) Alaşımı

Monel 400, Ni-Cu esaslı tek fazlı nikel-bakır alaşımıdır. Sadece soğuk işle sertleştirilebilen bir katı eriyik alaşımdır. Monel 400 yüksek sıcaklıklarda deniz suyuna ve buharına karşı çok dayanıklıdır. Nötr, alkali tuzlarına ve alkalilere karşı dayanıklıdır ve -200 ile +230 °C alışma sıcaklığı aralığında mekanik özelliklerini korumaktadır. Monel 400 alaşımının ergime aralığı 1300–1350 °C’dir. Bu alaşımının (tavlanmış) ortalama çekme dayanımı 400-600 N/mm² iken, hem tavlama yapılmış hemde yaşlandırılmış malzemelerde ise 850-1050 N/mm²’dir. Sertlik ortalama değerleri ise 110-160 HV’dir. Bu alaşımın kullanım alanları arasında;

Gemi inşa sanayi

- Kimyasal ve hidrokarbon işleme ekipmanları
- Petrol ve tatlısu tankları
- Ham petrol siloları
- Kazan besleme suyu ısıtıcıları ve diğer eşanjörler
- Vana, pompa, şaft, bağlantı elemanları
- Klorlu solventler
- Ham petrol damıtma depoları sayılabilir.

2.5.2. Monel 404 (UNS N04404) Alaşımı

Monel 404, düşük geçirgenlik ve iyi lehimlenebilme özelliklerine sahiptir. Demir bazlı alaşımlar için kullanılmaktadır. Monel 404, yüksek bakır içeriğine sahiptir. Bu nedenle, elektrik ve elektronik uygulamaları için uygundur. Monel 400 alaşımına benzer mekanik özelliklere sahiptir. Sertlik ortalama değerleri ise 110-170 Hv arasındadır. Bu alaşımının tavllanmış ortalama çekme dayanımı 400-600 N/mm²’dir. Bu malzeme için tipik uygulama alanları, kimyasal işleme, bağlantı elemanları, ısı değerştirici ve pompa parçalarının üretimidir.

2.5.3. Monel R-405 (UNS N04405) Alaşımı

Monel R-405, Monel 400'e benzemektedir. Genel olarak, uygulanan işlemler ve aşınmaları Monel 400 alaşımı için aynıdır. Monel alaşımlarının genel özelliklerini taşımakla birlikte aşınmaya ve korozyona karşı dirençli malzemedir. Bu alaşımının (tavlanmış) ortalama çekme dayanımı $400-600 \text{ N/mm}^2$ iken, sertlik değerleri 110-170 HV arasındadır. Bu alaşımın işlenebilirliği yüksektir.

2.5.4. Monel K-500 (UNS N05500) Alaşımı

Monel K-500, Monel 400 alaşımının yüksek korozyon direnci özelliğini, daha yüksek mukavemet ve sertlikle birleştiren bir alaşımdır. Monel K-500, $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ yaşlandırma ozeltilerinin oluşması için %3 Al ve %8 Ti ilavelerinin haricinde, Monellerin genel yapısal özelliklerine sahiptir. Monel K-500 deniz suyu ve birçok kimyasalla ve asitli gaz ortamına karşı dayanımları yüksektir. Sıfır-altı sıcaklıklardan $480 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa kadar, mekanik özelliklerini muhafaza etmektedir. Monel K-500 alaşımının (tavlanmış) ortalama çekme dayanımı $650-850 \text{ N/mm}^2$ iken hem tavlama yapılmış hemde yaşlandırılmış malzemelerde ise dayanım, $950-1050 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Çalışma sıcaklığı ise -100 ve $+260 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Ortalama sertlik değerleri ise 27-38 HRC'dir [3]. Monel K-500 alaşımlarının kullanım alanları arasında;

- Asitli gaz bulunan ortamlar
- Petrol ve gaz üretimi güvenlik liftleri ve vanaları
- Sondaj boruları gibi çeşitli petrol kuyu ekipmanları
- Denizcilik sanayinde kullanılan çeşitli ekipmanlar, bağlantı elemanları bulunmaktadır.

BÖLÜM 3

TOZ METALURJİSİ

3.1. TOZ METALURJİSİNİN TANIMI

Toz Metalürjisi (T/M), son şekle yakın parça üretimi ve ileri teknoloji malzemelerinin alaşımlanmasına imkân veren bir üretim yöntemidir. Tozların üretimi, özellikleri, kalıplanması ve elde edilen parçanın kullanılabilirlik testleri gibi alt başlıkların tamamına da, Toz Teknolojisi denilmektedir.

Ülkemizde T/M, 1960'lı yıllarda akademik çalışmalar düzeyinde başlamıştır. Bugün üretim sektörünün (otomotiv, savunma, havacılık gibi) birçok alanında kullanılan, söz sahibi bir yöntem haline almıştır. Örneğin, alaşımsız ve düşük alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, yüksek hız çelikleri, alüminyum, bakır bazlı alaşımlar (pirinç, bronz vs.), nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar (invar, kovar vb.), titanyum, manyetik alaşımlar ve refrakter malzemeler (tungsten karbür gibi), T/M yöntemi ile üretilen malzemelerdir.

3.2. TOZLARIN ÜRETİLMESİ

T/M yöntemiyle üretilen bir parçanın bitmiş ürün özellikleri toz parçacıklarının şekli, boyutu ve yüzey alanı gibi etkenlere bağlıdır. Tozların yüzey şekli akıcılık davranışlarını etkilemektedir. Genel olarak tozların yüzey şekli düzensizdir. Ayrıca küresel veya küresele yakın yüzeyli toz malzemelerin kalıp içerisine akış davranışları ile, kalıp içerisinde paketlenme özellikleri daha yüksektir.

Aynı tür malzemelerde küresel şekilli tozlar, yaprak (levha) şekilli tozlara oranla preslemede basıncı daha etkili iletmektedir. Burada belirtilenlerin dışında tozların fiziksel ve mekanik özelliklerinin de presleme ile sıkıştırılabilirlikte önemlidir.

Çizelge 3.1`de tozların önemli özellikleri ve bunların etki ettiği faktörler özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği bazı faktörler [17].

Önemli Özellikler	Etkisi
Tozun boyutu	Görünen (ham) yoğunluk
Boyut dağılımı	Akış davranışı
Toz şekli	Ham dayanım
Kimyasal kompozisyon	Sıkıştırılabilirlik
Yüzey özellikleri	Sinterleme
Mikro yapı	Şekillendirilebilirlik, tokluk

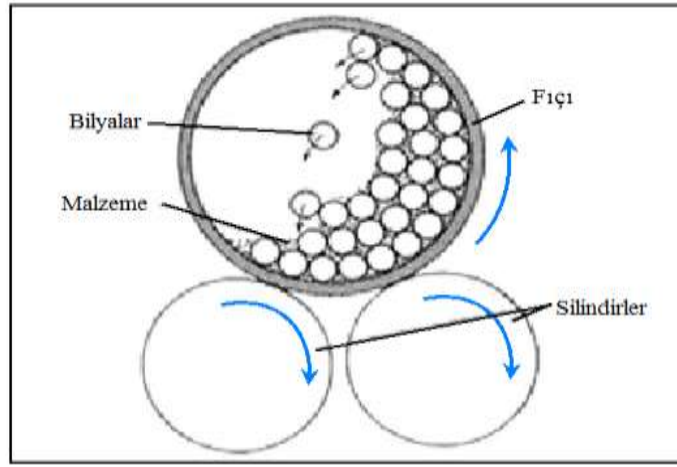
Toz üretim yöntemleri mekanik yöntemler, fiziksel yöntemler, kimyasal yöntemler ve atomizasyon yöntemi olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. T/M`de kullanılan toz malzemelerin üretim yöntemi ve oranları Çizelge 3.2`de gösterilmektedir. Endüstriyel kullanılan tüm metaller ve seramikler bu yöntemlerden biri ile toz haline getirilebilirler. Bir toz üretim yönteminin diğerlerine tercih edilmesi yöntemin uygulanabilirliğine, ekonomikliğine, elde edilen tozların özelliklerine ve bu özelliklerin kullanım yeri ihtiyaçlarını ne ölçüde karşılayabildiğine bağlıdır [18].

Çizelge 3.2. T/M’ de kullanılan toz malzemelerin üretim yöntemi ve oranları [17].

Üretilen Miktar	%70	%15	%15			
			Atomizasyon	Kimyasal İndirgeme	Öğütme	Elektrolitik çökelme
Alüminyum / Al alaşımları	X					
Berilyum			X	X		
Bakır / Bakır alaşımları	X	X		X		X
Cu-Al	X					
Cu-Pb	X					
Cu-Sn (bronz)	X					
Cu-Zn (pirinç)	X					
Cu-Ni-Zn	X					
Demir / Demir Alaşımları	X	X	X	X	X	
Düşük alaşımlı çelik	X					
Paslanmaz çelik	X					
Takım çeliği	X					
Molibdenim		X				
Nikel		X			X	X
Nikel alaşımları	X		X			
Gümüş	X			X		X
Tantalum		X		X		
Kalay	X					
Titanyum	X	X			X	
Tungsten		X				
Zirkonyum	X				X	

3.2.1. Mekanik Yöntemle Toz Üretimi

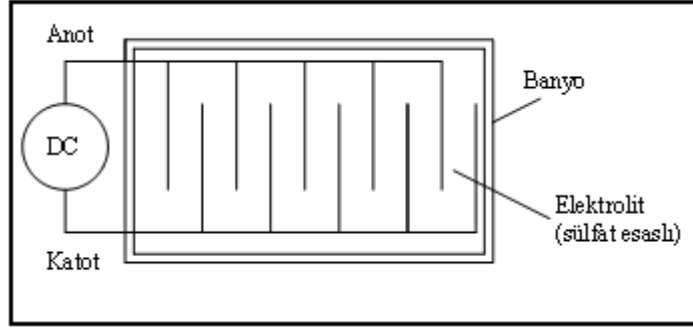
Öğütme, mekanik alaşımlama, darbe ve talaşlı üretim mekanik toz üretiminin alt başlıkları olarak sayılmaktadır. Bu yöntemlerden öğütme, en fazla tercih edilen mekanik üretim yöntemidir. Tozlar, parçacık boyutlarının kontrolü amacıyla, darbe veya talaşlı üretimle elde edildikten sonra, öğütme işlemine tabi tutulmaktadır. Tipik bir öğütme işlemi, şematik olarak Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Öğütme düzeneği şematik gösterimi [23].

3.2.2. Fiziksel Yöntemle Toz Üretimi

Bu yöntemle toz üretimi, saflık derecesi yüksek metallerin elektrolitik bir çözelti içerisinde çökeltmesi ile gerçekleştirildiğinden dolayı, elektroliz yöntemi olarak da adlandırılır. Şekil 3.3’de verilen düzenekte, katot üzerinde biriken tozlar alınarak yıkama, kurutma, öğütme ve tavlama gibi işlemlerden geçirilmektedir. Bu ilave işlemler üretim maliyetini artırıcı bir dezavantaj gibi görünse de, yapılması gerekli olan işlemlerdir. Yöntemin en önemli avantajı, yüksek saflıktaki tozların üretilmesidir. Bu yöntemle yaygın olarak verilen tozlar demir, bakır, çinko, krom tozlarıdır.



Şekil 3.2. Elektrolizin şematik gösterimi [21].

3.2.3. Kimyasal Yöntemle Toz Üretimi

Bu yöntemle demir, bakır, tungsten, molibden, nikel, kobalt gibi metal oksitlerin CO veya H₂ gibi indirgeyici gazlarla oksitlerinden kimyasal olarak indirgenmesi ile gerçekleştirilmektedir [18].

Kimyasal yöntemle üretilen sünger-demir tozu, bu yöntemin önemli bir uygulamasıdır. Sünger demir, demir oksit cevherinin uygun nitelikte indirgeyici elemanlara indirgenerek, süngerimsi bir kütleye dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. Magnetit (Fe₃O₄), kok ve kireç taşı ile karıştırıldı ve seramik kaplara doldurulmaktadır. Karışım seramik kaplar içerisinde 1260 °C sıcaklıktaki fırınlarda 68 saat bekletilerek indirgenir [22]. İndirgenmenin tamamlanması ile sünger demir elde edilmektedir. Elde edilen sünger demir külçeleri yüksek sıcaklıkta (1260 °C) birbirine kaynak olmuş tozlardan oluştuğundan, öğütülerek istenilen tane büyüklüğüne getirilmektedir. Hidrojen gazı altında tavlanarak oksijen ve karbondan mümkün olduğu kadar arındırılarak elekten geçirilmektedir.

3.2.4. Gaz Atomizasyonu ile Toz Üretimi

Gaz atomizasyonu, sıvı metalin yüksek hızlara sahip gaz akışının etkisiyle küçük damlacıklara ayrılması ile yapılmaktadır. Sıvı metal damlacıklar, ani çarpan gazın etkisi ile küreselleşerek katılaşmaktadır. Bu yöntemle üretilen tozların boyutları, 1µm-1mm arasında değişmektedir. Küresel metal alaşım tozları işlem sırasında gösterdiği hızlı katılaşmadan dolayı, üstün özelliklere sahiptir. Oluşan tozların mikroyapısı, diğer yöntemlerle elde edilen tozlara göre daha üstündür. Toz boyutu ve

dağılımının kontrol edilebilir olmasından dolayı, gaz atomizasyon yöntemi tercih edilen bir yöntemdir [23].

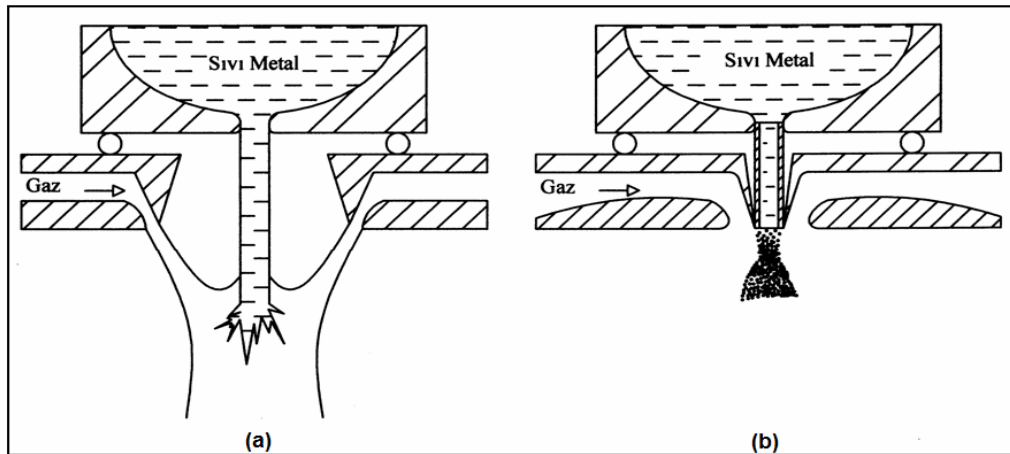
Gaz atomizasyon yönteminde amaç, yüksek hızda genişleyen gazın kinetik enerjisini sıvı metale aktararak, metali küçük damlacıklara ayırmaktır. Yüksek basınçlı gaz atomizasyon yöntemi, ince metal ve alaşım tozu üretiminde kullanılan, etkili bir yöntemdir.

Düzenli bir atomizasyon işlemi için aşağıda belirtilen koşullar sağlanmalıdır:

- Yüksek gaz kinetik enerjisi,
- Metal akış borusu ucunda negatif basınç oluşumu,
- Metal akış borusu ucunda radyal basınç farkı.

3.2.4.1. Atomizasyon Sistemleri

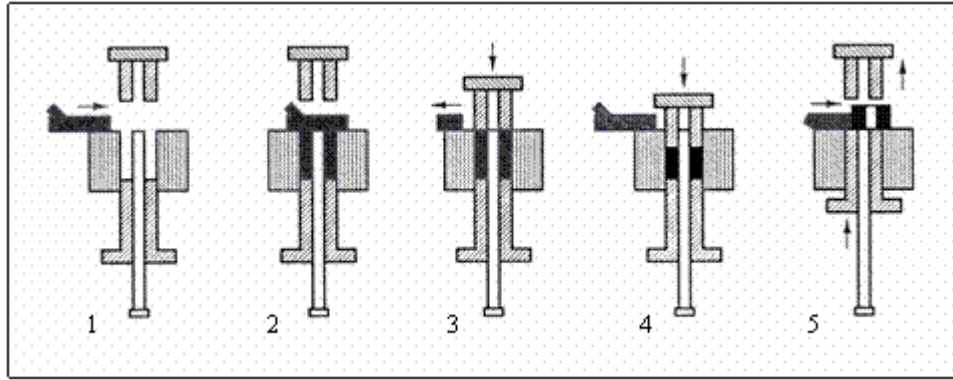
Atomizasyon sistemleri serbest düşmeli ve yakından eşlemeli olmak üzere iki çeşittir. Serbest düşmeli sistemlerde sıvı metalin, gaz jeti ile temas edinceye kadar serbest olarak akışı, Şekil 3.4'de şematik olarak gösterilmiştir. Sıvı metal yerçekimi etkisinde belli bir süre aktıktan sonra, gaz jeti ile tepkimeye girmektedir. Yakından eşlemeli sistemlerde, sıvı metal gaz çıkış bölgesine seramik bir akış borusu ile gönderilmektedir. Yakından eşlemeli sistemlerde daha iyi enerji aktarımı gerçekleştiği için, atomizasyon verimleri yüksektir [19].



Şekil 3.3. Atomizasyon sistemleri; a) Serbest düşmeli atomizasyon sistemi, b) yakından eşlemeli atomizasyon sistemi [22].

3.3. ŞEKİLLENDİRME

Toz metalürjisinde şekillendirmenin en önemli adımı preslemedir. Şekil 3.5’de görüldüğü gibi eksen boyunca uygulanan basınç sonucu, kalıbı dolduran tozlar preslenerek şekillendirilmektedir. Seri üretim sırasında basma işlemi, bir sonraki toz harmanı için yeniden tekrarlanmaktadır. Basma işlemi sırasında kullanılan kalıplar basit geometrik şekillerde olabileceği gibi, geometrik sınırlamaların çerçevesinde karmaşık da olabilmektedir. Basma sırasında kalıbın aşınma problemi tozlara ve kalıp duvarlarına yağlayıcı ilavesiyle giderilmektedir. Yağlamanın bir başka amacı da parçanın kolayca çıkarılmasını sağlamaktır. Kalıplar sementit karbür esaslı ve ısıl işleme sertleştirilmiş takım çeliğinden üretilmektedir.



Şekil 3.4. Presleme işleminin şematik gösterimi [24].

Basma işlemi için genellikle hidrolik, mekanik veya pnömatik presler kullanılmaktadır. Preslerin uyguladıkları basınç değerleri 70-800 MPa arasında iken, pratikte kullanılan basınç değerleri ise genellikle 145-450 MPa arasındadır [25]. Preslerin büyük bir kısmının kapasitesi yaklaşık 100 ton civarındadır. Son zamanlarda 200-300 ton kapasiteli presler yapılmıştır ve hatta 3000 tonluk presler üretilmiştir. Toz metalürjisi ürünlerinin kesit alanı maksimum 2000 mm^2 'dir. Ancak yüksek kapasiteli özel preslerin kullanılması halinde bu değer, 6500 mm^2 'ye çıkmaktadır. Uygulamaların çoğunda toz karışımı yer çekimi etkisi ile kalıbı doldurduktan sonra, presleme işlemi yapılmaktadır. Toz miktarı için, hacim veya ağırlık esasına göre bir başlangıç ölçüsü oluşturulmaktadır.

Sıkıştırma işlemi sırasında toz parçacıkları önce, uygulanan kuvvet yönünde hareket etmektedir. Toz sıvı gibi akmaz. Kalıp yüzeyi ile parçacıklar arasında sürtünme sonucu, bir reaksiyon kuvveti meydana gelmektedir. Bu kuvvet uygulanan kuvvete eşit bir değere ulaşana kadar, sıkıştırma eksensel yönde devam etmektedir. Daha sonra parçacıklar yatay yönde hareket ederler.

3.3.1. İzostatik Presleme Yöntemleri

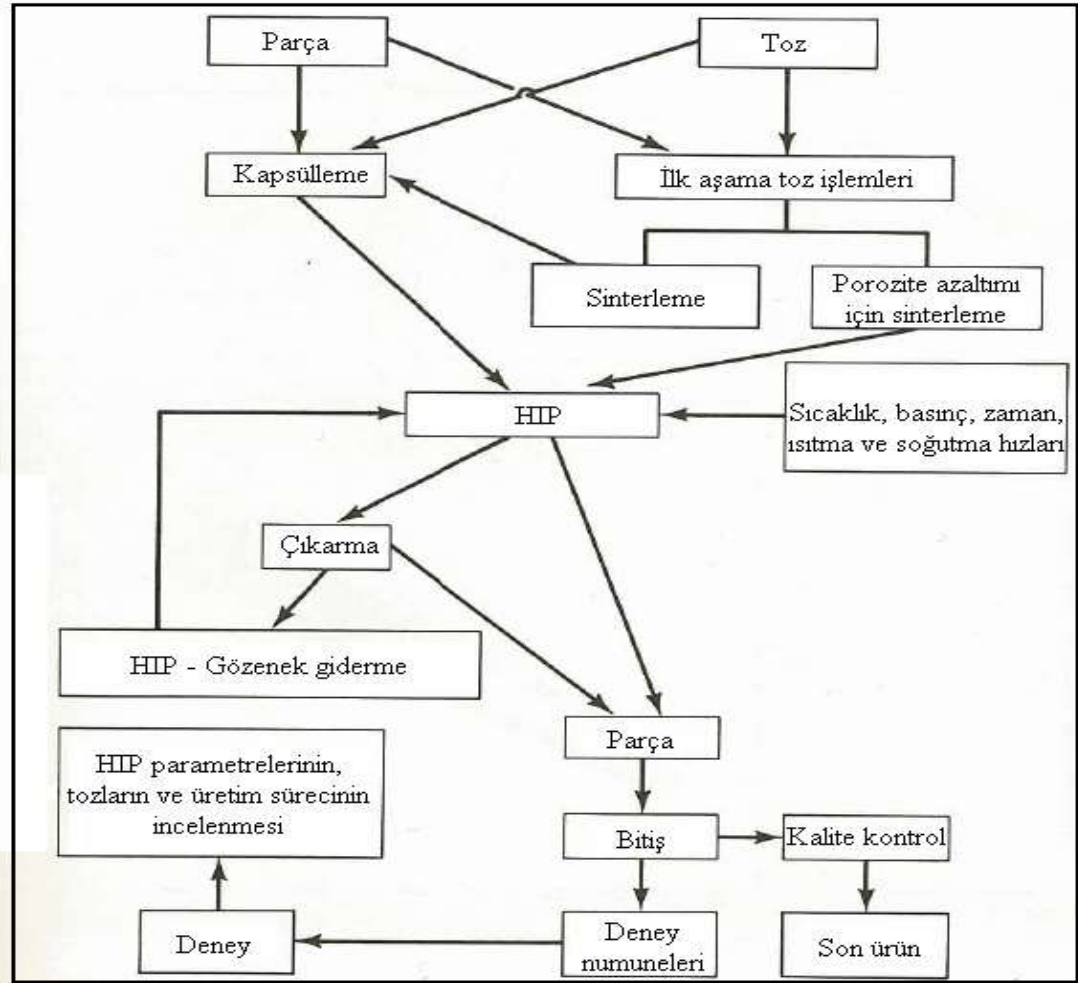
İzostatik presleme, tozların bir akışkan basıncıyla sıkıştırılmasıdır. Presleme genellikle bir yağ veya su içinde ve oda sıcaklığında CIP (Cold Isostatic Pressing) yapılmaktadır (Şekil4.3). Üretilen parça şeklinde bir esnek kalıp hazırlanarak, içi tozla doldurulmakta ve içindeki hava boşaltılıp gerekli sızdırmazlık sağlandıktan sonra, basınç kazanına bırakılmaktadır. İzostatik preslemede kalıp duvarı sürtünmeleri olmadığından ve basınç her yönde eşit olduğundan dolayı, yoğunluk dağılımı izotropik özellik göstermektedir. Bu yöntemin dezavantajı, hassas boyutsal toleransın elde edilmemesi ve işlemin yavaş olmasıdır. İzostatik presleme yöntemleri soğuk izostatik presleme ve sıcak izostatik presleme olarak ikiye ayrılmaktadır.

3.3.1.1. Sıcak İzostatik Presleme (HIP)

Sıcak izostatik presleme (HIP), toz metalürjisinin izostatik etkiyle yüksek basınçta ve yüksek sıcaklık kullanılarak parça üretme yöntemidir. Bu yöntemle T/M’de kullanılan diğer üretim yöntemlerine ve geleneksel döküm yöntemine göre, mekanik özellikler bakımından çok daha kaliteli parçalar üretilebilmektedir. Özellikle alaşımların teorik yoğunluğa çok yakın yoğunlukta istendiği durumlarda, bu yöntem en iyi sonucu vermektedir. HIP seri üretim uygulamaları için elverişli olmadığından dolayı, az kullanılan bir yöntemdir.

HIP aynı zamanda klasik sinterleme veya döküm yöntemiyle üretilen parçalara da uygulanabilmektedir. Burada amaç, parçalardaki gözenekli yapının giderilerek mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve kritik uygulamalarda kullanılabilir hale getirilmesidir. HIP için akış şeması, Şekil 3.6’da görülmektedir. T/M HIP uygulamalarında element veya alaşım tozları önce kapsülleme işlemine tabi

tutulmaktadır. Kapsüller, tozları bir arada istenen geometride tutan kalıplar gibi düşünölmelidir. 2-3 mm kalınlığındaki saclardan TIG kaynağı ile birleştirilerek üretilen bu kapsüller istenen nihai ölçüden, ortalama %10 daha büyük yapılmaktadır. Yüksek basınçta gerçekleştirilen HIP’de argon gazı kullanılmaktadır. Uygulanan basınç 20–300 MPa aralığında değişmektedir. Yöntemin sıcaklık aralığı 400–2200 °C’dir. Alüminyum alaşım tozları için uygulama yaklaşık 480 °C iken, tungsten alaşımlarında yaklaşık 1700°C’dir [18].

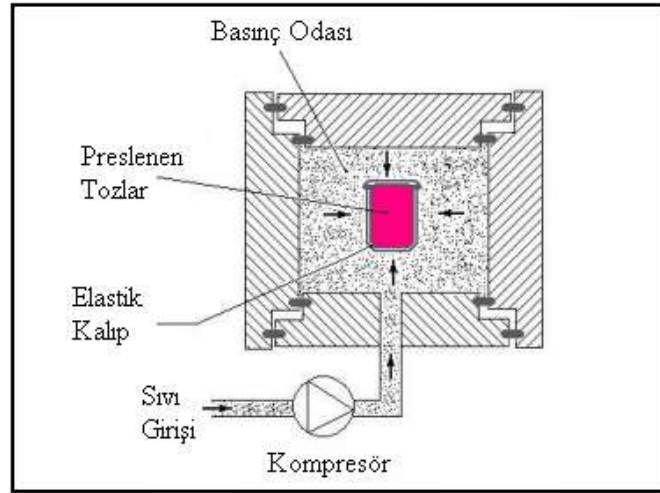


Şekil 3.5.HIP akışlarının gösterimi [19].

HIP genellikle petrol ve gaz boru hatlarında yüksek basınca maruz kalan flanş ve vanaların, tungsten karbürlü takımların, nikel tabanlı alaşımların, turbo jet motorların türbin diskleri ve millerinde, refrakter malzemelerin üretimlerinde, mıknatıs üretiminde, tungsten ağır alaşımlarından üretilen parçaların sinterlenmesinde kullanılmaktadır.

3.3.1.2. Soğuk İzostatik Presleme (CIP)

Soğuk izostatik presleme (CIP) basıncın sürekli ve her yönden eşit olarak uygulandığı bir sıkıştırma yöntemidir. Bu yöntemde toz malzemeler, kalıp olarak kullanılan esnek bir elastik kap içerisine yerleştirilmektedir. Kalıp, basınç kabının içindeki bir sıvı ortamına daldırılmaktadır. Böylece sıvıya uygulanan yüksek basınç sıvı yardımıyla sıkıştırılacak tozlara iletilerek, tozlar üzerinde bir hidrostatik basınç oluşturulmaktadır (Şekil 3.7). Daha sonra kalıp basınç kabından çıkarılarak, her bir parçanın kalıptan boşaltılması sağlanmaktadır. Sıvı ortam olarak su, yağ veya gaz kullanılabilir. Yaş veya hareketli kalıp olarak adlandırılan bu yönteme alternatif bir diğer yöntem ise, kuru kalıp veya sabit kalıp yöntemidir. Sabit kalıp yöntemi, elastik kalıbın sürekli olarak basınç kabında sabit bir şekilde kalmasını ifade etmektedir. Genellikle bu yöntem, büyük hacimli parçaların (kare, dikdörtgen, hegzagonal tüp veya çubukların) üretilmesinde kullanılmaktadır. Hareketli kalıp yöntemi ise, bir çok avantajlarından dolayı tercih edilmektedir. Sıkıştırma işlemi bir izostatik ortamda gerçekleştiği için basınç homojen bir şekilde dağılmakta ve böylece, uniform bir yoğunluk elde edilmektedir.



Şekil 3.6. CIP şematik gösterimi [18].

Tek eksenli preslerin aksine, kalıp duvarı ile pres arasında (sürtünmeden doğan) kalıcı gerilmeler oluşmamaktadır. Ayrıca sürtünme olmadığından dolayı herhangi bir

bağlayıcı veya yağlayıcı ilavesine de gerek kalmamaktadır. Karmaşık şekillerin son şekle çok yakın veya çok küçük hata toleransları ile üretimi mümkündür.

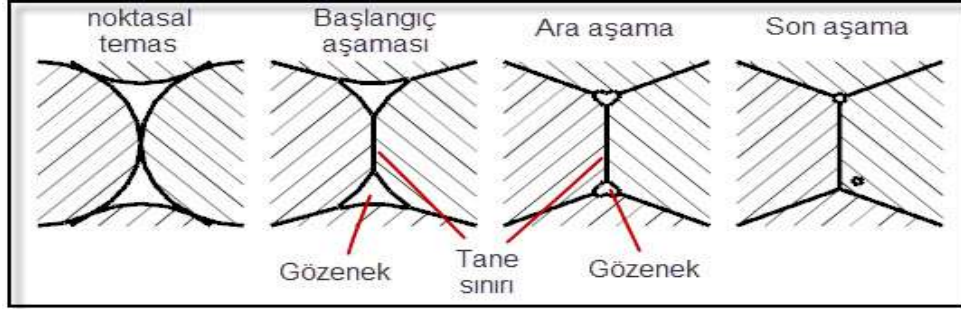
3.4. SİNERLEME

Kalıpta sıkıştırılarak şekillendirilmiş ham parçaların ergime sıcaklığının altında ısıtılarak, difüzyon yolu ile kimyasal bağlanması ve gözenek miktarının azaltılması işlemine sinterleme denir. Şekillendirilmiş toz parçalara mukavemet kazandırmak amacıyla, yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi uygulanmaktadır. Sinterleme, T/M'nin en fazla enerji gereksinimi olan basamağıdır. Sıkıştırılmış toz parçalar arasındaki bağlantı, mekanik kilitleme şeklindeki zayıf bir bağdır. Bu nedenle, kristal kafes içerisindeki bağ dayanımına kıyasla çok zayıftır [20].

Sıkıştırılmış yapıdaki toz tanecikleri birbiri ile temas etse de, her bir tanecik diğerinden bağımsızdır. Sinterleme ile tane temas noktaları artmakta ve fiziksel bir bağ oluşmaktadır. Bu türden bağ oluşumu, kristal kafes sistemi içerisindeki yüksek dayanımlı atomik bağlanma ile benzeşmektedir [27].

3.4.1. Katı Faz Sinterleme

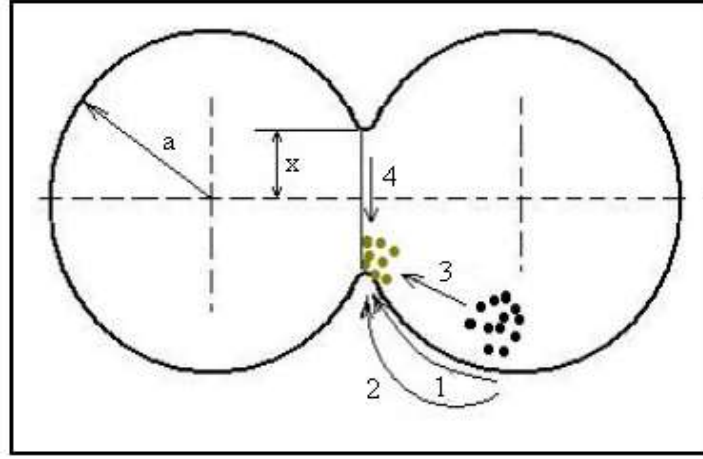
Tek fazlı sistemlerde (tek tip toz kullanılan) sinterleme tamamen katı faz sinterlemesidir. Sinterleme ile preslenmiş toz parçalarda yoğunluk artışı (hacimsel küçülme) meydana gelmektedir. Bu durum, özellikle küçük taneli tozlarda daha fazla görülmektedir. Hacimsel küçülme, malzeme türüne göre farklılıklar göstermektedir. Şekillendirmede kullanılan toz basma kalıpları, bu küçülmeler göz önüne alınarak (çekme miktarı kadar büyük) yapılmaktadır. Katı fazlı sinterleme, üç aşamada gerçekleşmektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. Sinterleme aşamalarının mikroskopik düzeyde şematığı [26].

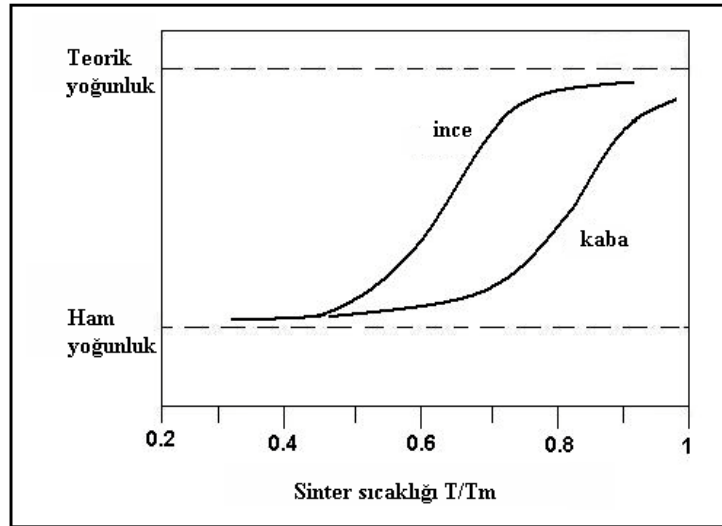
- Başlangıç Aşaması: Hacimsel daralmanın sınırlı olduğu bu aşamada tanecikler arası temas, "boyun" olarak adlandırılan sinter köprüleri oluşturmaktadır. Boyun bölgesinde görülen sinterleme mekanizmaları Şekil 3.9'da görülmektedir.
- Ara Aşama: Boyun oluşumunu takip eden aşamadır. Tanecik şekli tanınabilirliğini kaybetmektedir. Parçada meydana gelen boyutsal küçülme, en fazla bu aşamada olmaktadır.
- Son Aşama: Kapalı gözenek oranı hızla azalarak, birbirinden izole gözenekler küresel şekil kazanmaya başlamaktadır. Eğer gözenekler içerisinde hapsolmuş ve dışarıya çıkması mümkün olmayan gaz varsa ve gözenekteki gazın basıncı ile yüzey geriniminden doğan basınç denge halini alırsa, sinterlenmiş yapıda teorik yoğunluğa ulaşılmaz. Eğer vakumla sinterleme yönteminde olduğu gibi, gözeneklerde gaz yok ise veya gözenekteki gaz ana yapıdan kolayca difüz olup sistemden uzaklaştırılırsa, yoğunluk artışı devam eder ve %100 teorik yoğunluğa ulaşılabilir.

Katı fazlı sinterlemede tanecikler arasında boyun bölgesinde meydana gelen sinterleme mekanizması, Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Boyun bölgesinde meydana gelen sinterleme mekanizmaları [18].

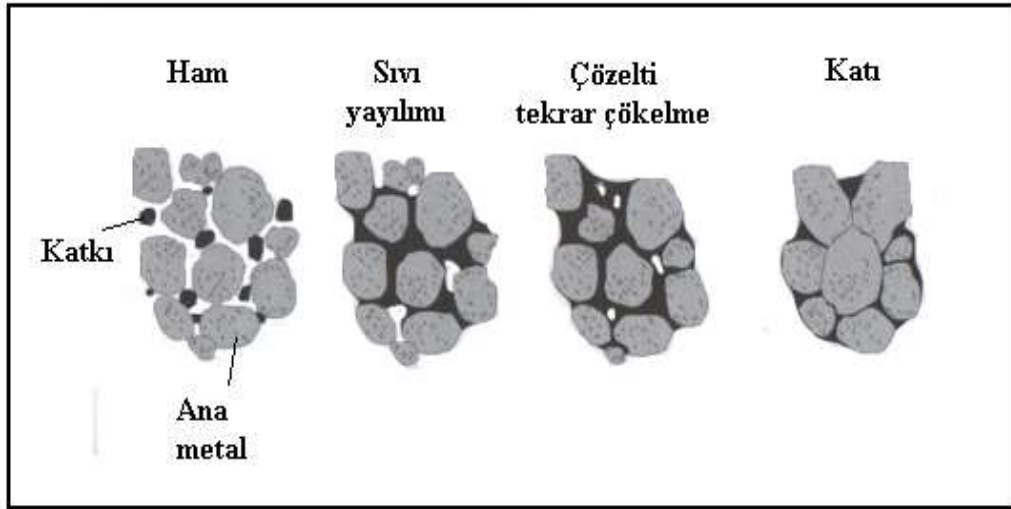
Sinterleme parametrelerinden toz boyutu, soğuk presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığı, atmosferi ve süresi üretilen parçaların özelliklerini belirleyen parametrelerdir. Üretilen parçaların teorik yoğunluğa ulaşması veya yaklaşması için, uygun şartların sağlanması gereklidir. Toz boyutunun, tozların sinterleme yoğunluğu üzerine etkisi, Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Toz boyutunun sinterleme yoğunluğu üzerine etkisi [26].

3.4.2. Sıvı Faz Sinterleme

Sıvı faz sinterleme, birden fazla alaşım içeren bileşimlerde alaşımlardan birinin ergime sıcaklığının hemen üzerine çıkarılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Ortamda sıvı bir fazın bulunması malzeme taşınımını kolaylaştırdığından dolayı, mikro yapı değişiklikleri hızlı gerçekleşmektedir. Sıvı fazın oluşumu ile, ani bir büzülme meydana gelmektedir. Bu sırada katı parçacıklar, sıvı faz içerisinde yeni bir düzene girmektedir. Bu sistemde sıvı faz miktarı minimum tutulmaktadır ve miktarı hiçbir zaman % 20'yi geçmemektedir. Şekil 3.11'de, sıvı faz sinterlemedeki yoğunlaşma aşamaları görülmektedir.



Şekil 3.10. Sıvı fazlı sinterleme aşamalarının mikro düzeyde şematığı [26].

Başlangıç ısıtmasıyla birlikte katı faz sinterlemesiyle bağlanma başlamaktadır. İlk sıvı oluştuğunda, tanelerin yeniden düzenlenmesiyle hızlı bir yoğunluk artışı meydana gelmektedir. Oluşan sıvı, katı parçacıkları ıslatarak hareket etmelerini kolaylaştırır ve yeniden düzenlenmelerini sağlamaktadır. Bundan sonra çözültide tekrar çökme gerçekleşir ve sıvı, katı atomların taşıyıcısı olmaktadır. Bu aşamada, daha küçük taneler sıvı içinde çözünür, yayılır ve büyük taneler üzerine çöklerler. Katı tane çözünürlüğü tane boyutuyla ters orantılıdır. Bu nedenle, öncelikle küçük taneler sıvı faz içinde çözünmekte ve işlemin sonlarına doğru tane sayısı azalarak tane irileşmesi meydana gelmektedir [26].

Sıvı faz sinterlemenin en önemli avantajı, hızlı sinterleme oranıdır. Sıvı faz matrisin teorik yoğunluğuna ulaşmasında engel gibi görünsede, taneciklerin yer değiştirmesi için gerekli kuvveti azaltarak, sinterlenmesinin daha düşük sıcaklık ve sürede tamamlanmasına yardımcı olmaktadır [28].

BÖLÜM 4

AŞINMA

Aşınma, sürtünme halinde bulunan yüzeylerde mekanik etkenlere bağlı olarak meydana gelen malzeme kaybıdır. Birbiriyle temas halindeki iki cisim arasında meydana gelen bağlı hareket ile cisimlerin yüzeylerinin birbirini etkilemesi sonucu aşınma meydana gelmektedir. Bu nedenle yüzeylerin ilk şekilleri bozulur, parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon yerine getirilemez [29]. Ayrıca, çeşitli makine elemanlarının birbiri ile sürtünerek çalışması sonucu, temas yüzeyleri zamanla aşınarak deforme olmaktadır [30].

Mühendislik malzemelerinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için bazı şartların gerçekleşmesi gereklidir. Bunlar;

- Mekanik bir etken olması,
- Sürtünmenin (bağlı hareketin) olması,
- Yavaş ve devamlı olması,
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- İstem dışı meydana gelmesidir.

4.1. AŞINMANIN TEMEL UNSURLARI

Aşınmanın gerçekleşmesi için sürtünme olmalıdır. Sürtünen iki cismin temas alanı, görünen temas alanından daha küçüktür. En hassas işleme yöntemleri ile de olsa işlenen katı malzemelerin yüzeyi hiçbir zaman düz değildir [31]. Çünkü, herhangi bir üretim yöntemi ile tam olarak pürüzsüz düz bir yüzeyin elde edilmesi mümkün değildir. Yüzeylerin temas etmesi halinde ise, yüzeylerdeki pürüzler karşılıklı

etkileşmektedir. İlk temas, pürüz tepeleri arasında oluşmaktadır. Pürüz tepeleri arasındaki girintiler temas etmezler. Gerçek temas alanı, temasta olan pürüzlerin toplam alanıdır. Yüklemenin şekli, yük temas alanının büyüklüğünü etkilemektedir. Yük arttıkça, ilk temas eden pürüzler şekil değişimine uğramaktadır (yani ezilir). Bunun sonucu kısa boyutlu yeni pürüzler birbiri ile temas ederler. Yüklemenin etkisi ile pürüz sayısı azalmakta ve gerçek temas alanı görülen temas alanına yaklaşmaktadır [30,32]. Yüzey pürüzlüğünün artışı ile aşınma direnci azalır. Temasta olan cisimlere bağlı hareket yaptırabilmek için, sisteme bir enerji girişi olmaktadır. Bu enerji yük ve hareket şeklindedir. Giriş ile çıkış arasındaki fark, mekanik titreşime, ısı, ses ve sürtünme enerjisine ve aşınmaya dönüşmektedir [30,32].

4.1.1. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

4.1.1.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler

- Malzemenin kristal yapısı,
- Sertliği,
- Elastik modülü,
- Deformasyon özellikleri,
- Yüzey pürüzlülüğü,
- Boyutu'dur.

4.1.1.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler ve Aşındırıcının Etkisi Ortamın Etkisi

- Sıcaklık
- Nem
- Atmosfer

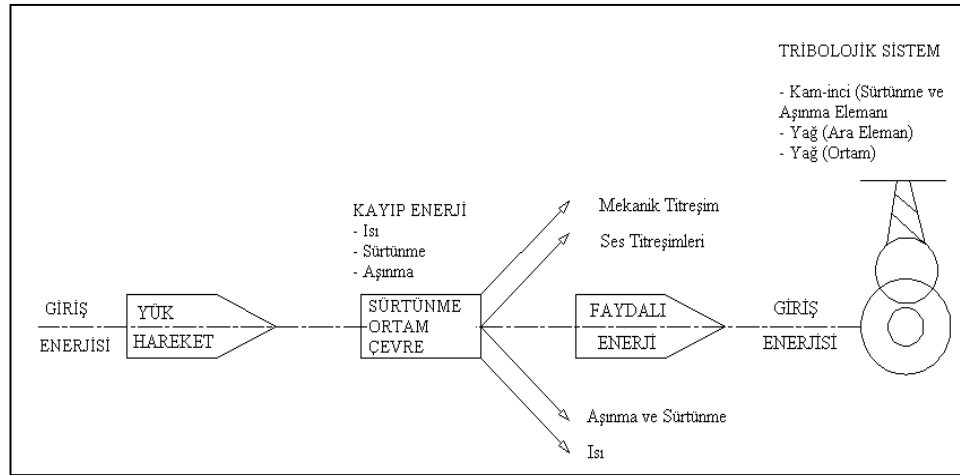
Servis koşulları

- Basınç
- Hız
- Kayma mesafesi

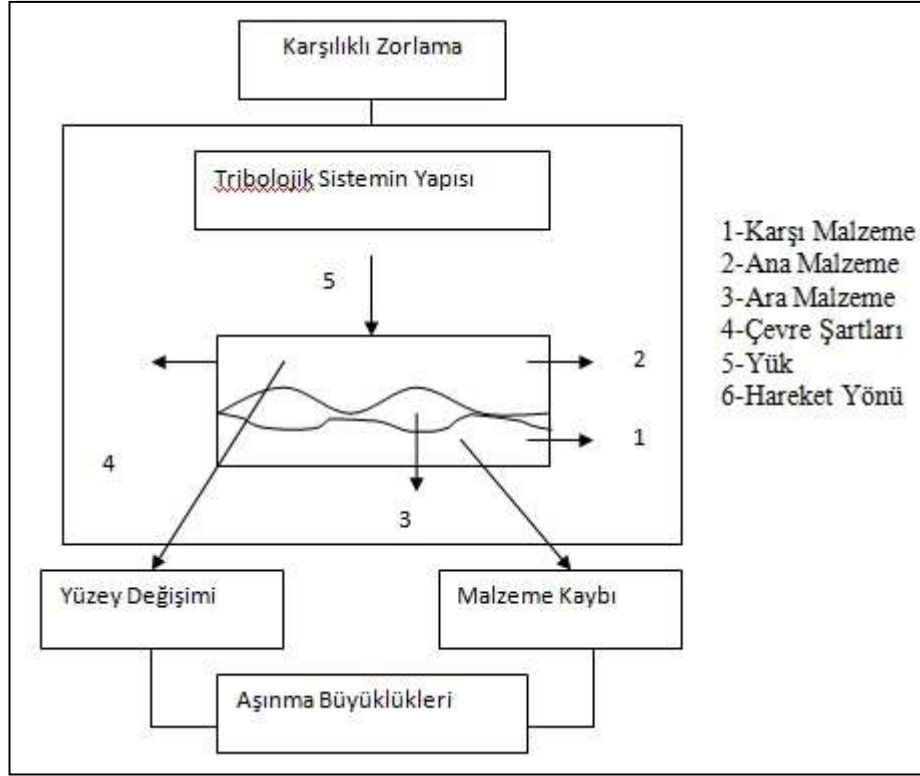
4.2. TRİBOLOJİK SİSTEM

Triboloji, “bir izafi hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olaylar inceleyen bilim” olarak tanımlanmaktadır. Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlamanın bilimsel incelenmesini ve tribolojik bilgilerin teknik uygulamasını içermektedir [30].

İçinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği sistemlere, tribolojik sistem denilmektedir. Mühendislik malzemelerinin aşınma davranışlarının araştırılmasında, mekanik sistemler, bir tribolojik sistem olarak dikkate alınmalıdır. Yani aşınma olayı, bir sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır [32]. Şekil 4.1’de bir tribolojik sisteme giren enerji dağılımı, Şekil 4.2’ de ise tribolojik sistemin elemanları görülmektedir.



Şekil 4.1. Tribolojik sisteme giren enerji dağılımı [36].



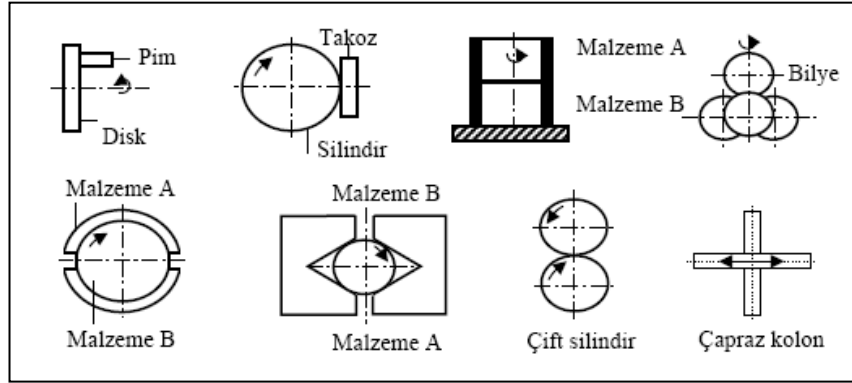
Şekil 4.2. Tribolojik sistemin elemanları [37].

Tribolojik sistemi oluşturan unsurlar, ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, hareket ve çevreden oluşmaktadır. Bir tribolojik sistem bu unsurların birçoğunu içinde bulundurmaktadır. Aşınma çiftini oluşturan ana malzeme ve karşı malzeme aralarında belirli bir ara malzeme varken, az veya çok yük altında hareket ettiklerinde aşınma başlamaktadır. Ana malzeme; metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç, deri v.s. gibi aşınma karakteristiğine önem verilen katı malzemelerdir. Aşındıran malzeme ise metal, mineral, plastik, ağaç v.s. şeklinde katı olabileceği gibi, sıvı veya gazlarla karışım durumunda da olabilmektedir. Ara malzeme ise yağlar, aşınma parçacıkları v.b. olabilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda, çoğu zaman aşınma parçacıkları yüzeylerden temizlenememektedir. Böyle durumlarda, arada yağlayıcı da yoksa kuru sürtünme söz konusudur. Çevre çalışma ortamıdır. Yükleme darbeli, darbesiz, sabit, değişken v.s. şeklinde veya bunların birden fazlasının bir arada bulunması halinde de olabilmektedir. Hareket ise kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe şeklinde olabilmektedir [33].

Tribolojik sistemde ortaya çıkan aşınma mekanizmaları da farklıdır. Adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, yorulma aşınması, tribooksidasyon aşınması gibi mekanizmalarla tanımlanan aşınma, tribolojik sistem içerisinde genellikle tek başlarına bulunmazlar ve etkin oranları kesin olarak belirlenemezler. Ancak aktif olan aşınma mekanizmasına göre önlemler alınabilmektedir [34,35].

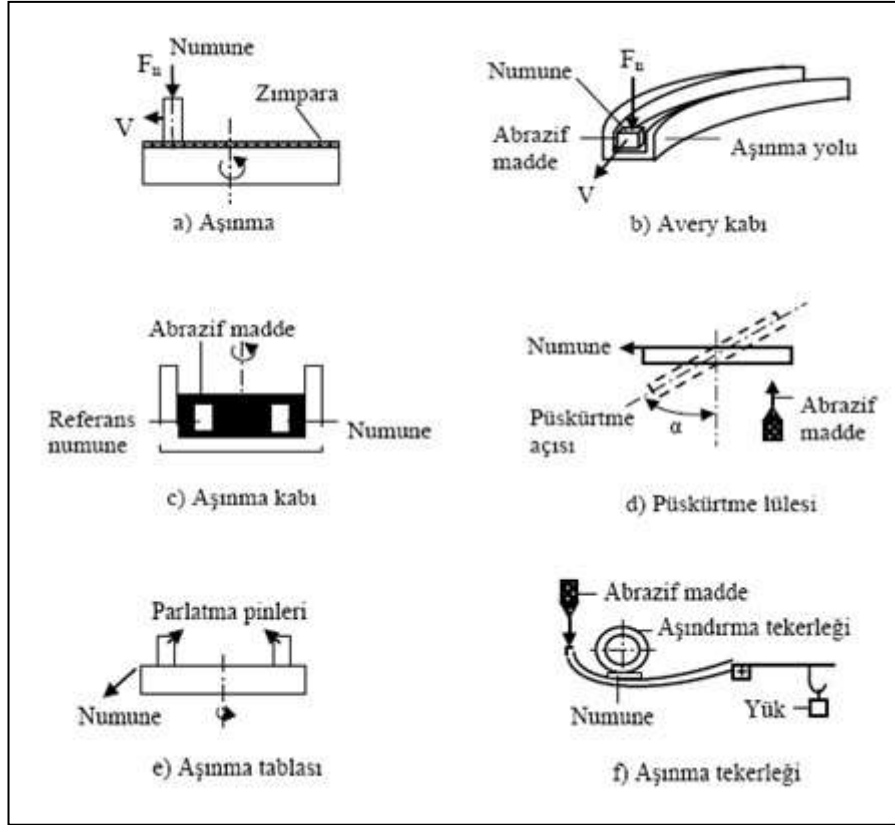
4.3. AŞINMA TEST MODELLERİ

Aşınmanın gerçek sistemlerde belirlenmesinin zorluğu, bir kısmı standartlaştırılan model cihazların geliştirilmesine yol açmıştır. Model cihazlarda tribo sistemi oluşturan unsurların, gerçek sisteme uygun şekilde oluşturulması, sonuçların tekrarlanabilir olması, bu cihazlardan beklenen özelliklerdir. Kayma sürtünme ve aşınma test cihazı modelleri tribolojik prensiplere göre, Şekil 4.3’de şematik olarak gösterilmiştir [37].



Şekil 4.3. Şematik kayma sürtünmesi ve aşınma test modelleri [37].

Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında ve yalnız karşı malzeme aşınmasının ölçüldüğü aşınma test cihazı modelleri de şematik olarak, Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



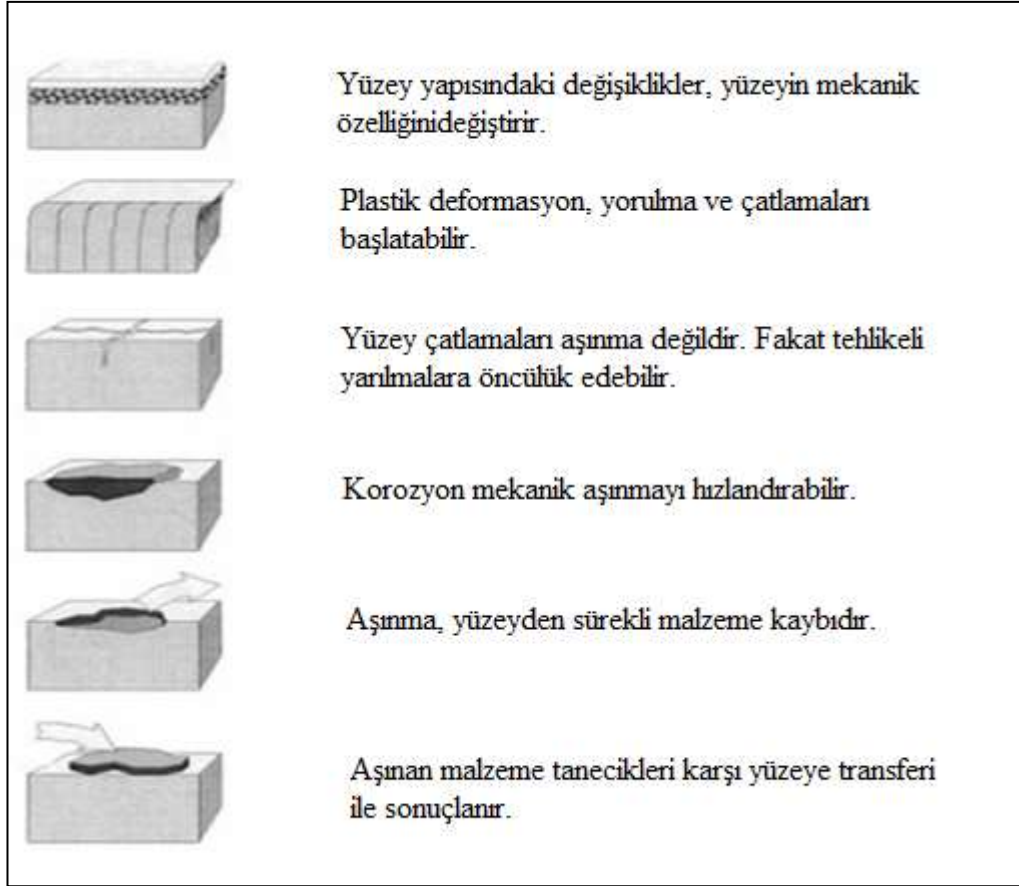
Şekil 4.4. Şematik abrasiv aşınma test modelleri [37].

Model aşınma test cihazlarıyla yapılan testlerin amaçları genellikle aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Sistem elemanlarının verimini, ömrünü, güvenilirliğini, fonksiyonunu, bakım yapılıp yapılmaması gerektiğini belirlemek, kalite kontrolünü yapmak,
- Malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarını belirlemek,
- Malzeme kayıplarını araştırmak,
- Yeni malzeme veya sürtünme ve aşınma azaltıcı yöntemleri geliştirmek.

4.4. AŞINMA VEYA YÜZEY DEFORMASYONU

Yüzey deformasyonu ve bozulma nedenleri çok geniştir. Önemli tribolojik yüzey bozulmalarının sınıflandırılması Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Yüzey aşınma ve bozulmalarının sınıflandırılması [38].

Yüzey aşınma ve bozulmalarının sınıflandırılmasını sırası ile açıklırsanız;

- Yüzeydeki yapısal değişiklikler, yüzey kaplama veya kristalleşme gibi yüzey değişiklikleri, yüzeyde mekanik deformasyona yol açabilmektedir. Yüzeydeki yapısal değişiklikler aşınmayı gerektirmez. Fakat dış yüzeyin mekanik özelliklerini değiştirebilir ve aşınmayı başlatabilir veya yeni çatlaklar oluşturabilir [38].
- Plastik deformasyon, yüzeyde termal genişleme ve azalmalar veya mekanik gerilmelerin etkisiyle oluşmaktadır. Yüzey bölgesinin plastik deformasyonu, kademeli aşındırmayı gerektirmemesine rağmen, sonuçta tehlikeli çatlaklara öncülük edebilecek önemli yüzey hasarlarının meydana gelmesi muhtemeldir [38].
- Yüzey bölgesindeki çatlaklar, aşırı yüzey gerilmeleri, yorulma deformasyonları ya da tekrar eden termal değişikliklerin nedeniyle olabilmektedir [38].

- Korozyon ve diğer kimyasal nedenle, başlıca aşınma mekanizmasında yer alabilir. Kimyasal etkiler çatlakların genişlemesini hızlandırmaktadır [38].
- Aşınma veya yüzey hasarı, çeşitli aşınma çeşitleri ile mikroskobik parçacıklar şeklinde yüzeyden sürekli malzeme kayıplarını içermektedir. Neticede aşınma mekanizması hem mekanik hem de kimyasal olabilmektedir [38].
- Aşınan malzeme parçacıkları karşı yüzeye transfer olmaktadır. Yüzeyde sürtünmeden dolayı oluşan aşırı ısınmanın etkisi ile aşınan tozlar toplanarak ara yüzeyde üçüncü bir yüzey tabakası meydana getirirler. Bu durum, kayma sürtünmesinin de nedenidir [38].

4.5. AŞINMA ÇEŞİTLERİ

Birçok araştırmacı, malzemelerin aşınması üzerine yaptıkları araştırmalar sonucu aşınmayı farklı farklı sınıflandırmışlardır [30,39].

- Adhesiv aşınma
- Abrasiv aşınma
- Yorulma aşınma

En genel olarak bilinenleridir.

4.5.1. Adhesiv Aşınma Mekanizması (Yapışma Aşınması)

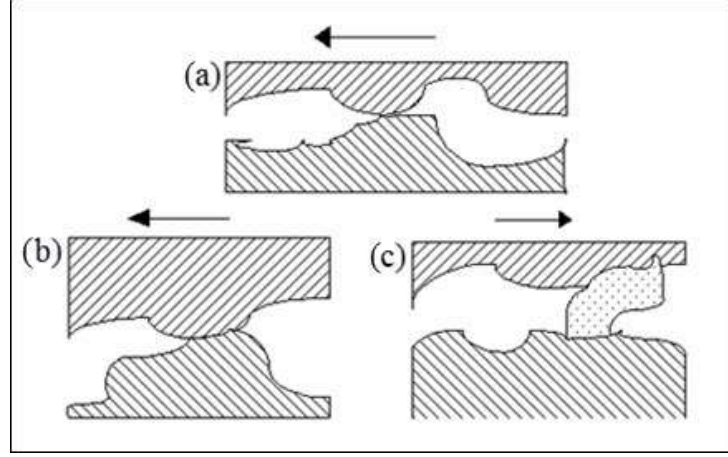
Kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında, adhesiv çekim kuvveti oluşmaktadır. Bu kuvvetin oluşması, moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden dolayı, metal ağırlığı veya etkileyen bir kuvvet, temasla olan çok küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç olarak etki etmektedir. Bu basınç, bu noktalardaki gerilme pürüzlerin akma sınırını aşması ile plastik deformasyona, pürüzlerin birbirini çizmesine, ve sıvanıp kaynaklanmalarına neden olmaktadır. Ayrıca pürüzlerin deformasyonu ile oluşan mikro adhezyon, temas yüzeyi boyunca yayılmaktadır. Çiftin karşılıklı hareket etmesi halinde de, yüzeyde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak, aşınma çiftinde soğuk kaynaklanmaya neden olmaktadır. Kayma hareketi sırasında bu noktalar

koparak aşınmaya neden olmaktadır. Bu tip malzeme kaybı, adhesiv aşınma olarak adlandırılmaktadır [39,40].

Aşınma çiftinin yüzeyleri arasındaki tutma kuvvetleri (adhesiv bağ mukavemetleri) eşit büyüklükte veya adhesiv bağ mukavemeti büyük ise, pürüz koparak malzeme kaybına neden olmaktadır. Eğer adhesiv bağ kuvveti pürüz mukavemetinden küçükse, pürüz kaynak noktasından koparak, malzeme kaybına neden olmaktadır. Adhesiv aşınması sırasında, iki sürtünme yüzeyi arasında üçüncül cisimler meydana gelmektedir. Özellikle, adhesiv aşınmada kırılan parçalar ara yüzeyde serbest kalabileceği gibi, metallere birine bağlı kalarak da taşınabilirler. Parçacığın bir yüzeyden diğer yüzeye taşınması, metal transferi olarak adlandırılmaktadır [30,31,32,41].

Adhesiv aşınma sırasındaki oksitlenme olayı, korozyif aşınma ile karıştırılmamalıdır. Yukarıda bahsedilen parçalanma malzeme moleküllerinin direkt temasa geçmelerine imkân vermektedir. Bunun neticesinde de, bölgesel kaynak bağları oluşmaktadır (soğuk kaynaklanma). Bu sırada eğer izafi hareket de varsa, yüzeydeki sıcaklık yükselerek ve ergime noktasına kadar ulaşabilmektedir. Böylece, kaynaklanma yerinden veya metal yüzeyinden bir parça kopar. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest olarak hareket edebildikleri gibi, metallere birine de bağlı olarak hareket edebilirler. Her iki durumda da malzeme kaybı (aşınma) meydana gelmekle beraber, ikinci durumda malzemelerin birinden diğerine malzeme transferi söz konusudur [42].

Kristalografik olarak benzer kafes yapılı malzemelerde adhesiv aşınma mekanizması açıklanabilmesine rağmen, farklı yapıdaki (mineral malzemeler gibi) malzemeler arasındaki aşınma, adhezyonla başlamaktadır. Bu gibi malzemelerde (Şekil 4.6'da görüldüğü gibi), yüksek gerilme ve basıncın etkisiyle pürüzler birbirine geçerek plastik şekil değişimi meydana gelmektedir. İzafi hareket başladığında zayıf olan malzemenin pürüzleri koparak, serbest hareket etmektedir.



Şekil 4.6. Adhesiv aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi; a) İki çıkıntının buluşması ve bağ oluşturması, b) Bağın koparak bir yüzden diğerine malzeme transferinin oluşumu, c) Uzanmış olan çıkıntının diğer yüzeydeki çıkıntıyla etkileşimi sonucunda da yüzeyde kırıntı oluşumu [31,43].

4.5.2. Abrasiv Aşınma Mekanizması

Abrasiv aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle, sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüzleri veya taneleri vasıtasıyla diğerini çizerek üzerinden mikro talaş kaldırması olayıdır. Bu tanım, katı/katı, katı/mineral, katı/sıvı gibi birçok sürtünme elemanlarında meydana gelen abrasiv aşınmayı ifade etmektedir.

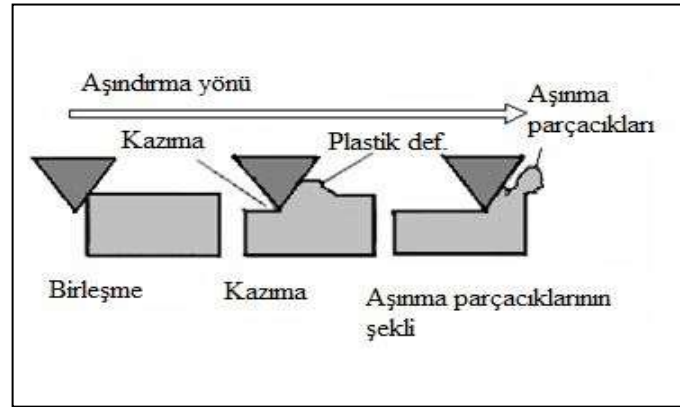
Sürtünen cisimlerin, direkt olarak karşılıklı etkileşimleri sonunda meydana gelen abrasiv aşınma, iki cisimli abrasiv aşınmadır. Eğer ara yüzeyde sürtünme elemanlarını çizerek tahrip eden sert tanecikler de bulunuyorsa, bu tür aşınmaya üç cisimli aşınma denir. Bu tanecikler ara yüzeye dışarıdan girebilecekleri gibi, aşınma parçacıkları da olabilirler [44].

Genellikle aşınma mekanizmaları, metal/metal sürtünmelerinde iki cisimli abrasiv veya adhesiv olarak başlayıp üç cisimli abrasiv olarak devam etmektedir. Üçüncü cisim, olarak ortaya çıkan toz, mineral taneleri, çizilme sonunda serbest hale gelen mikro talaşlar ve parçalanmış oksit parçacıkları olabilir. Üçüncü cisim abrasiv aşınmayı hızlandırmaktadır. Bir sistem içinde yüksek hızlı parçacıkların akışı, erozyon olarak bilinen abrasiv aşınmanın özel şeklini ortaya çıkarmaktadır [45].

Khrushov ve Babichev, aşındırıcı tanelerle temas eden yüzeyde iki işlemin meydana geldiğini ifade etmektedir [46]. Bunlar;

- Basıncın etkisiyle plastik şekil değiştirme sonucu çiziklerin oluşması (Metal kalkmadan, yüzeyin plastik şekil değiştirmesi),
- Mikro talaş şeklinde metal parçacıkların ayrılmasıdır (Yüzeyden mikro talaşların ayrılması)

Abrasiv aşınma, kesilme, kazınma ve tekrarlanan deformasyon gibi yüzeyi tahrip eden çeşitli mekanizmalar ile meydana gelmektedir. Abrasiv aşınma için en önemli şart, sürtünme sırasında, aşındırıcının sertliğinin aşınan malzemenin sertliğinden daha fazla olması gerekmektedir. Abrasiv aşınma şeması, Şekil 4.7'de gösterilmektedir [46].



Şekil 4.7. Abrasiv aşınma şeması [47].

4.5.3. Yorulma Aşınması

Mühendislik malzemelerinde yorulma, tekrarlanan zorlanmalar altında ve zamanla meydana gelmektedir. Yorulma aşınması mekanizması malzemenin yüzeyinden başlamaktadır. Yüzey bölgesi titreşimli bir zorlanmaya maruz kaldığında veya sürtünme elemanları tekrarlanan gerilimlerle etkileştiklerinde, bu gerilmelerin sebep oldukları mikro çatlaklar vasıtasıyla yorulma aşınması denilen pulcuklar şeklinde malzeme ayrılmalarına neden olmaktadır. Bu olay sırasında yapıda meydana gelen parçalanmalar ve yırtılmalar, yüzeyden kısmi çözümler olmaktadır [48].

BÖLÜM 5

MALZEME VE METOT

5.1. GİRİŞ

Bu çalışmada, dört farklı (Monel 400, Monel 404, Monel R-405 ve Monel K-500) alaşım T/M yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen alaşımların kodları ve kimyasal bileşimleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Monel alaşımların kimyasal bileşimleri (% Ağ.).

Alaşımlar	Cu	Ni	Si	Fe	Mn	C	Al	Ti
Monel 400	31,7	63	0,5	2,45	2	0,3	-	0,05
Monel 404	47,1	52	0,1	0,5	0,1	0,15	0,05	-
Monel R-405	31	63,7	0,5	2,5	2	0,3	-	-
Monel K-500	28,75	63	0,5	2	1,5	0,25	3,15	0,85

5.2. TOZLARIN HAZIRLANMASI

Kimyasal bileşimleri Çizelge 5.1’de verilen Monel 400, Monel 404, Monel R-405 ve Monel K-500 alaşımları, elementel tozların karıştırılmasıyla üretilmiştir. Bileşimi oluşturan elementel tozlar 1/10000 gr hassasiyetindeki terazide (% ağırlık bazında) tartılarak hazırlandıktan sonra, Turbula® Shaker Mixer (Model T2F Glenn Mills) karıştırıcıda 67 devir/dk ile 60 dakika karıştırılmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Turbula® Shaker Mixer (Model T2F Glenn Mills) karıştırıcı.

5.3. TOZLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ

Turbula karıştırıcıda 60 dakika karıştırılan tozlar, Ø12 mm X 6-7 mm boyutlarında ön şekillendirilmiştir. Ön şekillendirme işlemlerinde Hidroliksan marka 50 ton baskı kapasiteli hidrolik preste 600 MPa basınç uygulanmıştır (Şekil 5.2).

Baskı kuvveti hesabı:

$$F = P \times A$$

$$F = 600 \text{ MPa} \times 113 \text{ mm}^2 / 9,81 \text{ N/kg} = 6900 \text{ kg olarak belirlenmiştir.}$$

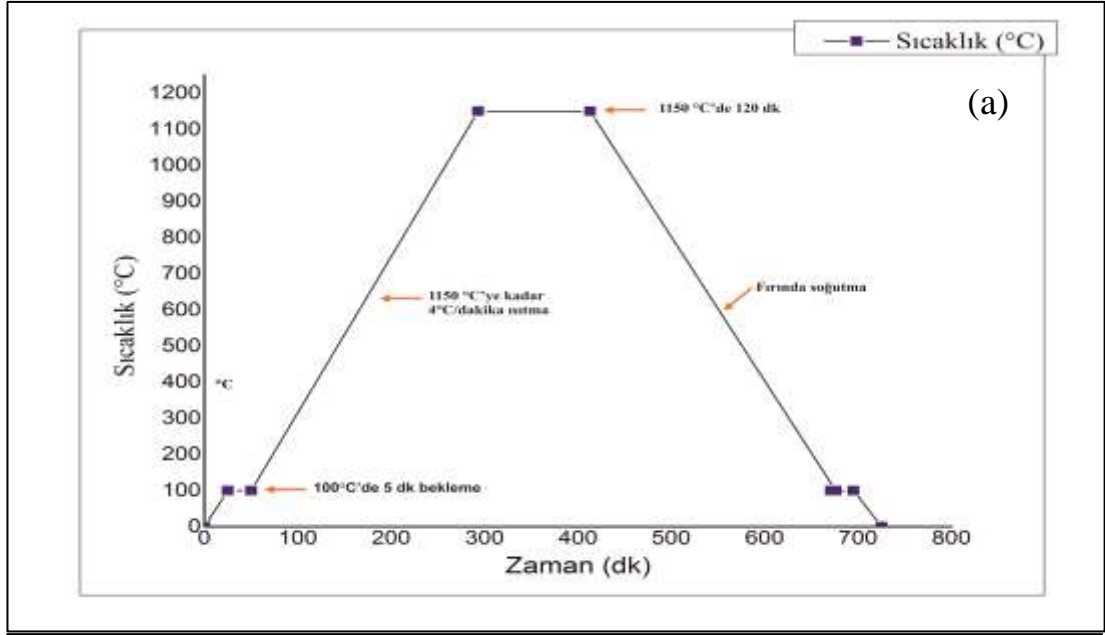
Şekil 5.2 de deneysel çalışmalarda kullanılan “Hidroliksan” marka pres verilmiştir.



Şekil 5.2. Ön şekillendirme sırasında kullanılan Hidroliksan marka pres.

5.4. SİNERLEME İŞLEMLERİ

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Ni-Cu esaslı Monel alaşımları tek aşamada sinterlenmiştir. Sinterleme işleminde 2000 °C sıcaklığa çıkabilen Alcatel marka vakumlu ısıtma işlem fırını kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda üretilen tüm Monel alaşımları 1150 °C'de, 10^{-6} milibar vakum altında sinterlenmiştir. Sinterleme işleminde numuneler 4°C/dakika ısıtma hızı ile 1150 °C'ye ısıtılmış, ardından 1150 °C de 2 saat sinterlendikten sonra, 4°C/dakika soğuma hızı ile fırında soğutulmuştur. Sinterleme işlemindeki sıcaklık-zaman (°C/dakika) akışı (şematik olarak) ve sinterleme işlemlerinin yapıldığı vakumlu ısıtma işlem fırınının görüntüsü Şekil 5.3'de verilmiştir.

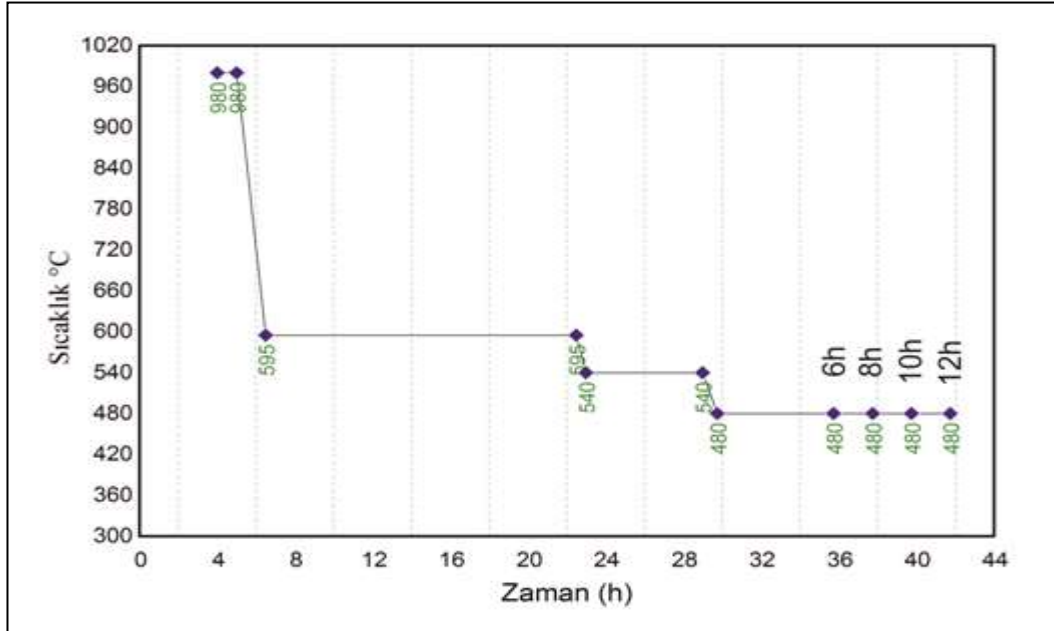


Şekil 5.3. Monel alaşımlarının a)Sinterleme işlem şeması, b)Sinterlemelerin yapıldığı Alcatel marka ACT-200 model fırın

5.5. YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ

Üretilen dört farklı Monel alaşımından sadece Monel K-500 alaşımına, yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. 1150 °C de sinterlenen Monel K-500 alaşımı numuneleri 480 °C de dört farklı sürede (6 saat, 8 saat, 10 saat ve 12 saat) yaşlandırılmıştır.

Monel K-500 alaşımının yaşlandırılmasında solüsyon sıcaklığı, 980 °C olarak belirlenmiştir. Tüm numuneler bu sıcaklıkta 2 saat bekletildikten sonra oda sıcaklığına hızlı (suda) soğutulmuştur. Oda sıcaklığına hızlı soğutulan numuneler kademeli olarak yaşlandırılmıştır. Bu nedenle numuneler önce 595 °C de 16 saat bekletildikten sonra (4°C/dakika soğuma hızı ile) fırından çıkarılmadan 540 °C sıcaklıkta 6 saat bekletilmiştir. 6 saat bekletilen numuneler (4°C/dakika soğuma hızı ile) sıcaklık 480 °C ye düşürülmüştür. Bu kademeli yaşlandırma işleminde numuneler 480 °C de 6 saat, 8 saat, 10 saat ve 12 saat bekletildikten sonra alınarak havada soğutulmuştur [49,50,51].



Şekil 5.4. Monel K-500 alaşımının yaşlandırma işlem şeması

5.6. METALOGRAFİK NUMUNE HAZIRLAMA

Sinterlenen ve yaşlandırılan numuneler, mikroyapı incelemeleri için hazırlanmıştır. Zımparalama işlemi Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan PRESI marka MECAPOL P 262 model polisaj cihazı kullanılarak yapılmıştır. Zımparalama işleminden sonra numuneler 3 µm elmas pasta ile parlatıldıktan sonra 50 ml gliserol, 20 ml HCl asit ve 10 ml HNO₃ solüsyonu ile 5-10 dakika dağlanmıştır [51].

Optik mikroskop incelemelerinde, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan MEIJI ML 7100 marka optik mikroskop kullanılmıştır.

5.7. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Sinterlenen numunelerin yoğunluk ölçümleri PRECISA XB200 h (Şekil 5.5) marka 220 gr min. 0.01gr 1/10000 hassasiyetli yoğunluk ölçüm cihazı kullanılarak Archimets prensibine göre yapılmıştır.



Şekil 5.5. Precisa XB200h marka hassas terazi.

5.8. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Yoğunluk ölçümleri yapılan numunelerin sertlikleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan SHIMADZU marka HMV-2 model universal makro sertlik cihazında (HMV_{0,5}) ölçülmüştür. Her bir numune üzerinden 5 adet sertlik ölçümü yapılarak ortalaması alınmıştır.

5.9. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMESİ

Standart metalografik işlemlerle hazırlanan numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemelerinde Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü AR-GE Laboratuvar'ında bulunan Zeiss-Ultra/Plus (FEG) model tarama elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aşınma testleri sonrasında numunelerin, aşınma yüzeyleri de SEM ile incelenmiştir.

5.10. ENERJİ DAĞILIMLI X-İŞİNİ SPEKTROSKOPİSİ (EDS) İNCELEMESİ

Metalografik numunelerin mikro yapı incelemelerinde oluşan yapıların belirlenmesi için EDS incelemeleri yapılmıştır.

5.11. GEÇİRİMLİ ELEKTRON MİKROSKOBU (TEM) İNCELEMELERİ VE NUMUNE HAZIRLANMASI

Yaşlandırma işlemleri sırasında yapıda oluşması beklenen ikincil faz çökeltilerin belirlenmesi amacıyla TEM incelemeleri yapılmıştır. TEM incelemeleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarları, Transmisyon Elektron Mikroskopi Laboratuvarı'nda Jeol SEM-2100F 200 kV Field Emission Elektron Mikroskop marka cihazla yapılmıştır.

Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımı TEM numunesi hazırlanmasında ilk önce disk kesiciyle 300 µm kalınlığında kesme işlemi uygulanmıştır. Ultrasonik kesiciyle 3mm çapında numune çıkartılmıştır. Elde önce 1200 imesh sonrada 5 um zımparayla numunenin her iki yüzüde zımparalanmıştır. 120 um kalınlığına gelen numuneler

Dimple Grinder (oyuklaştırıcı) ile 5 um elmas pasta kullanılarak oyuk açılmıştır. Daha sonra Kolloidal Silika kullanılarak parlatılmıştır. PIPS sistemi (iyon parlatma) ile önce 6 kV sonra 4 kV enerji kullanarak delindikten sonra parlatılarak, TEM incelemeleri için hazırlanmıştır.

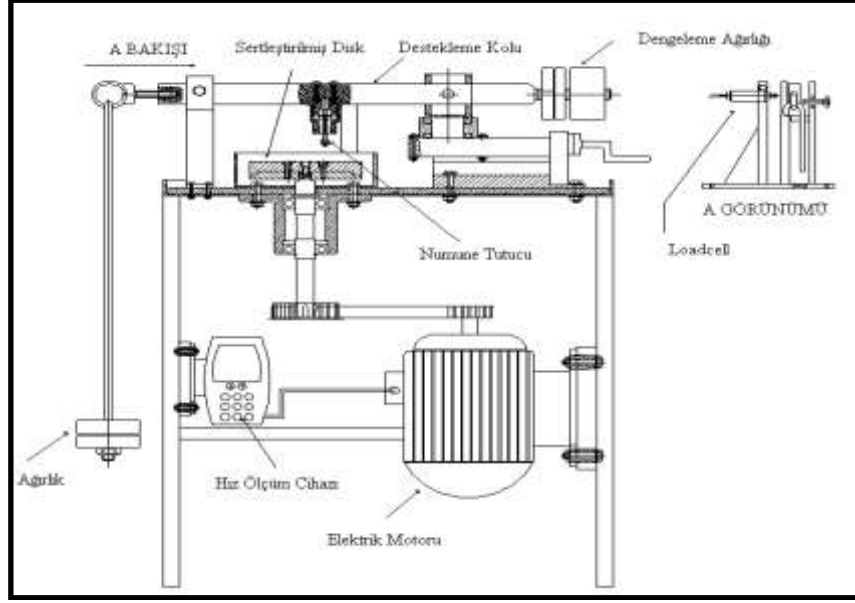
5.12. X-IşINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ

Sinterleme ve yaşlandırma işlemleri sırasında yapıda oluşması muhtemel tozların belirlenmesi amacıyla X-işını kırınımı (XRD) analizleri yapılmıştır. XRD incelemeleri Gebze İleri Teknoloji Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Teknolojik Süreçler Laboratuvarı'nda Rigaku (D-MAX RIN-2200 Series X-RAY Diffractometer) marka cihazla yapılmıştır.

5.13. AŞINMA TESTLERİ

5.13.1. AŞınma Deney Cihazı

AŞınma deneylerinde kullanılan pin-on-disk tipi standart deney ünitesinin şematik görüntüsü Şekil 5.6'da verilmektedir. Bu cihaz farklı yük ve kayma hızında çalışma kabiliyetine sahiptir. AŞınma testlerinde parametre olarak 1 m/sn hız, farklı yük (20N, 30N ve 40N) ve beş farklı kayma mesafesi (400-800-1200-1600-2000 m) test edilmiştir.



Şekil 5.6. Aşınma test cihazının şematik görünümü.

5.13.2. Karşılık Diski ve Malzemesi

Aşınma testlerinde diskin ve numune yüzeylerinin temiz olması gerekmektedir. Bu nedenle testten önce her numune ve disk yüzeyi aseton ile temizlenmiştir. Her numune farklı bir iz oluşturacak şekilde yerleştirilerek her test için aynı yüzey kalitesi sağlanmıştır. Tüm izler kullanıldıktan sonra disk taşlanarak tekrar teste hazır hale getirilmektedir. Monel alaşımları numuneleriyle çalışılacak dönel disk için AISI 4140 malzemedan yapılmış Ø230 mm çapında, 20 mm kalınlığında ve 60-64 HRC sertliğinde çelik disk kullanılmıştır.

5.13.3. Aşınma Deneyleri

Deney cihazı devrinin ölçülmesi için COMPACT marka takometre (0-1000 dv/dk, 0.5 V çıkışlı) kullanılmıştır. Aşındırılan numuneler 1/10000 hassasiyetli PRESICA marka terazide tartılarak ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Aşınma deneylerinde yük parametresi 20 N, 30 N ve 40 N uygulanmıştır. Aşınma mesafesi olarak 400 m, 800 m, 1200 m, 1600 m ve 2000 m olarak beş farklı mesafede test edilmiştir. Kayma hızı olarak da 1 ms^{-1} lik hız seçilmiştir.

Ağırlık kaybının ölçülmesi 10-3 veya 10-4 g hassasiyetinde bir terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram (g) veya miligram (mg) olarak ifade edilirse, metre (m) veya kilometre (km) olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km) veya (mg/m) olarak ifade edilebilir. Ağırlık kaybının ölçümü yönteminde en çok kullanılan bağıntı Eşitlik 5.2'de verilmiştir.

$$W_a = \frac{\Delta G \text{ (mg)}}{d \cdot P \cdot S \text{ (g/cm}^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m)}} \quad (5.2).$$

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

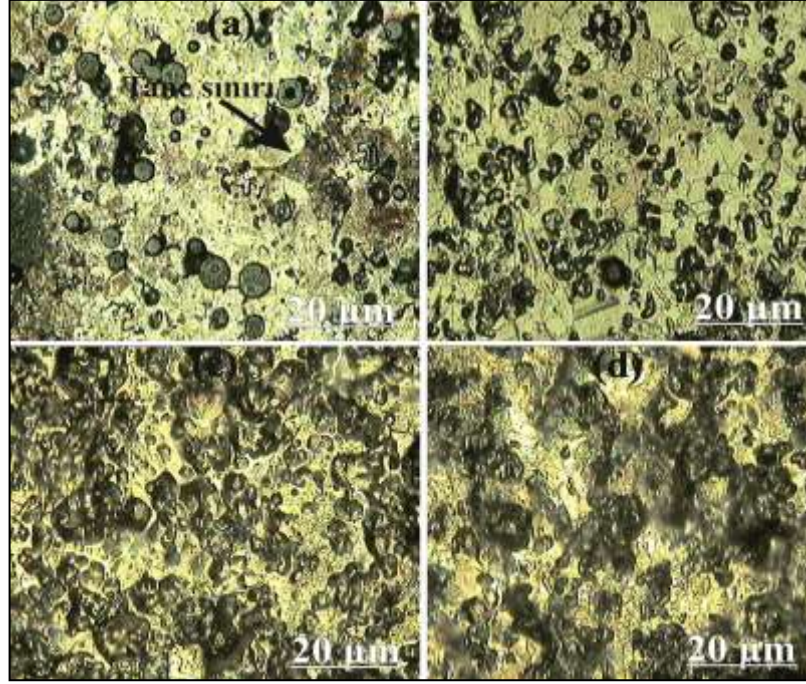
6.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

T/M ile üretilen dört farklı Monel alaşımlarının (Monel 400, Monel 404, Monel R-405 ve Monel K-500) sinterleme ve yaşlandırma işlemleri sonrası optik mikroskop (OM) taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektroskopisi (EDS), geçirimsiz elektron mikroskobu (TEM), X-ışını kırınımı (XRD), yoğunluk ve sertlik ölçümleri ile karakterize edilmiştir.

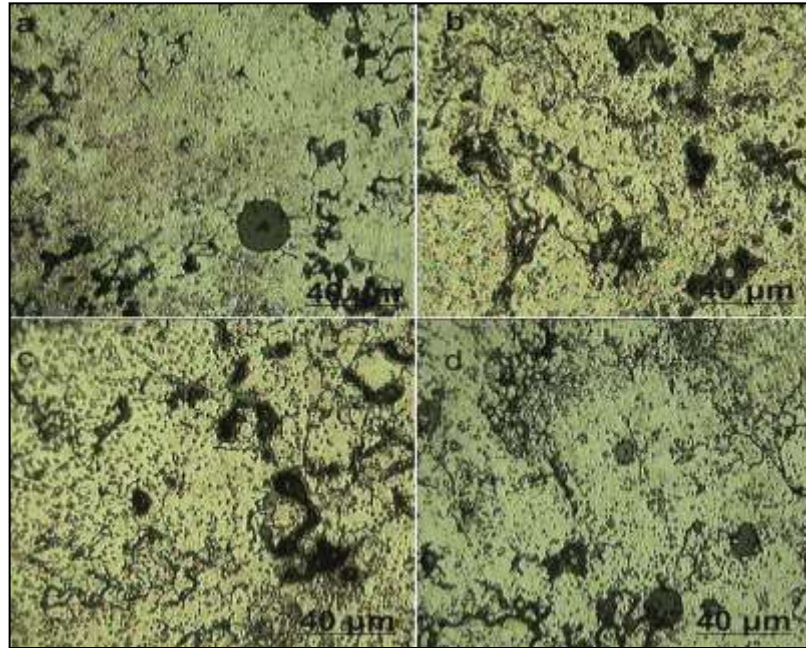
6.1.1. Optik Mikroskop İncelemeleri

Sinterlenen farklı Monel alaşımlarının tane yapılarının alınmış optik mikroskop görüntüleri, Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de verilmiştir.

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de verilen optik mikroskop görüntülerinde, sinterleme sonrasında yapıda oluşan gözeneklerin, çoğunlukla tane içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6.2’de verilen optik mikroskop görüntülerinde, Monel K-500 alaşımının yaşlandırma süresinin artması ile birlikte tane içerisindeki kürelerin (gri fazın) belirginleştiği gözlenmiştir.



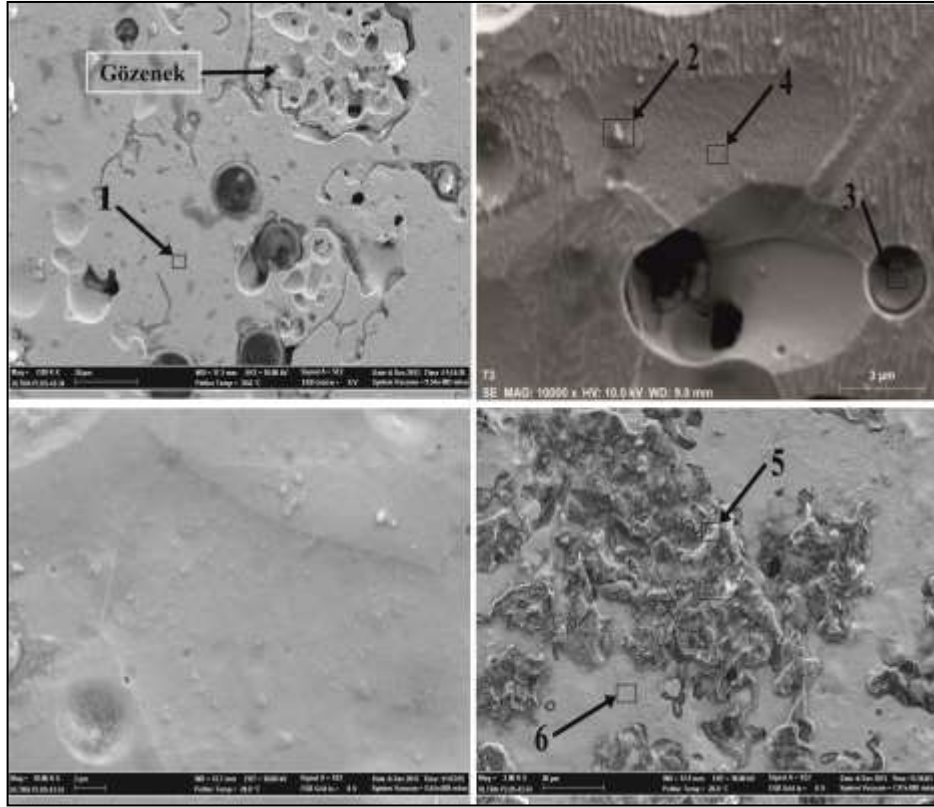
Şekil 6.1. Sinterlenen Monel alaşımların optik mikroskop görüntüleri a) Monel 400, b) Monel 404, c) Monel R-405 d) Monel K-500.



Şekil 6.2. Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımının a)6 saat, b)8 saat, c)10 saat ve d)12 saat optik mikroskop görüntüleri.

6.1.2. SEM ve EDS İncelemeleri

Sinterlenen farklı Monel alaşımlarının taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü Şekil 6.3 ve EDS analizi sonuçları da Çizelge 6.1’de verilmiştir.



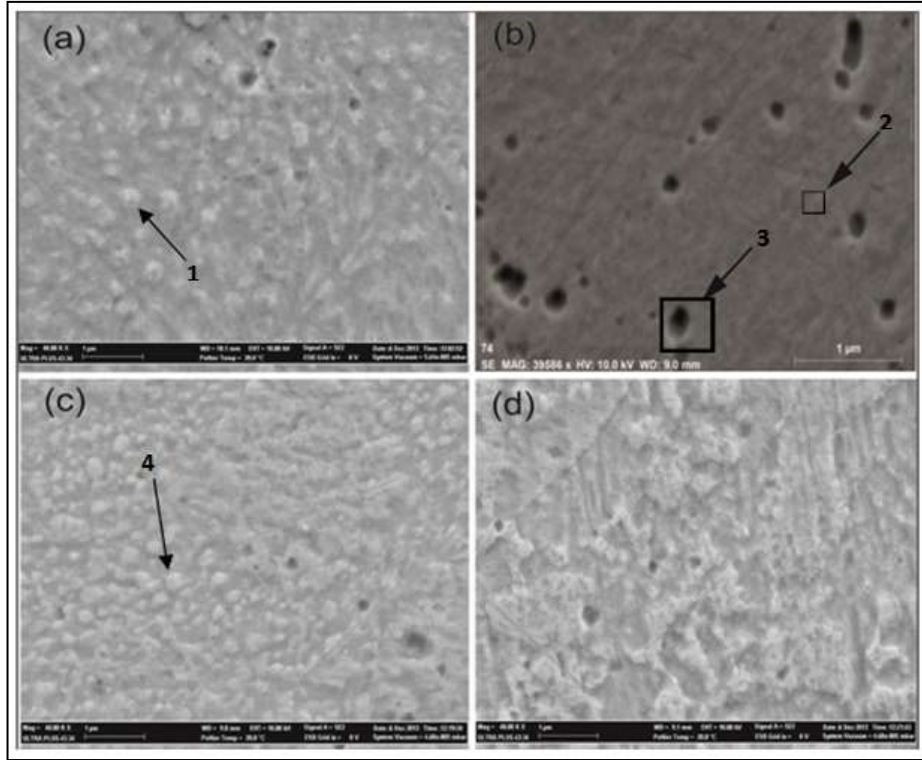
Şekil 6.3. Monel alaşımlarının SEM görüntüleri a) Monel 400, b) Monel 404, c) Monel R-405 ve d) Monel K-500.

Çizelge 6.1. Monel alaşımları EDS analizi sonuçları.

Şekil	Bölge	Element								
		C	O	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Ni	Cu
6.3.a	1.	4,2	3,67	0,51	0,51	----	3,42	1,88	48,51	37,81
6.3.b	2.	----	----	16,85	5,12	8	----	----	23,78	44,01
6.3.b	3.	----	----	29,76	0,66	0,3	----	----	16,75	31,4
6.3.b	4.	2,59	1,7	0,51	1,16	----	----	----	36,67	57,38
6.3.d	5.	45,2	25,24	7,5	4,67	----	----	9,57	23,78	----
6.3.d	6.	3,45	1,64	0,7	0,7	----	----	----	60,08	33,42

Şekil 6.3’de verilen dört farklı Monel alaşımlarının SEM görüntüleri incelendiğinde, Monel 400 (a) alaşımında küresel şekilli gri bölgelerin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca sinterleme sonrasında yapıda gözeneklerin oluştuğuda anlaşılmaktadır. Monel 404 alaşımının SEM görüntüsü (b) incelendiğinde, Monel 400 alaşımına göre gözenek miktarının azaldığı ve boyutsal küçülmelerin olduğu anlaşılmaktadır. Monel R-405 alaşımının SEM görüntüsü (c) incelendiğinde, yüzeyde çıkıntı şeklinde yükseltiler olduğu görülmektedir. Son alaşım olan Monel K-500 alaşımının SEM görüntüsünde (d), Monel 400 alaşımı ile benzer bir yapının oluştuğu, fakat SEM görüntüsünde girintili çıkıntılı koyu görüntülü fazın olduğu görülmektedir. Ayrıca çok az miktarda ve küçük boyutta gözenek olduğu görülmektedir. Oluşan bu koyu fazın içerisindeki bölgelerin çevresinde oksit oluşumlarının (beyaz bölgeler) olduğu belirlenmiştir. Toz hazırlama işlemleri sırasında hava ile temas sonucunda oksit oluştuğu düşünülmektedir.

Sinterlenen farklı Monel alaşımlarının EDS analizleri Çizelge 6.1’de verilmektedir. Şekil 6.3.a’da EDS analizleri incelendiğinde, 1. Bölgeden alınan EDS’de ana matrisi ifade etmektedir. Şekil 6.3.b’de Monel 404 alaşımından, 3. ve 4.bölgelerden alınan EDS analizlerinde, oluşan yapının Ni ve Al’ce zengin bir yapı olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6.3.d’de Monel K-500 alaşımı EDS analizi incelendiğinde, bölge (7)’ de oksitli bir yapının oluştuğu ve içerisinde C ve O’ce zengin bir yapının oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 6.4. Farklı sürelerde yaşlandırılmış K-500 alaşımının numunelerinin SEM görüntüleri a) 6 saat, b) 8 saat, c) 10 saat ve d) 12 saat.

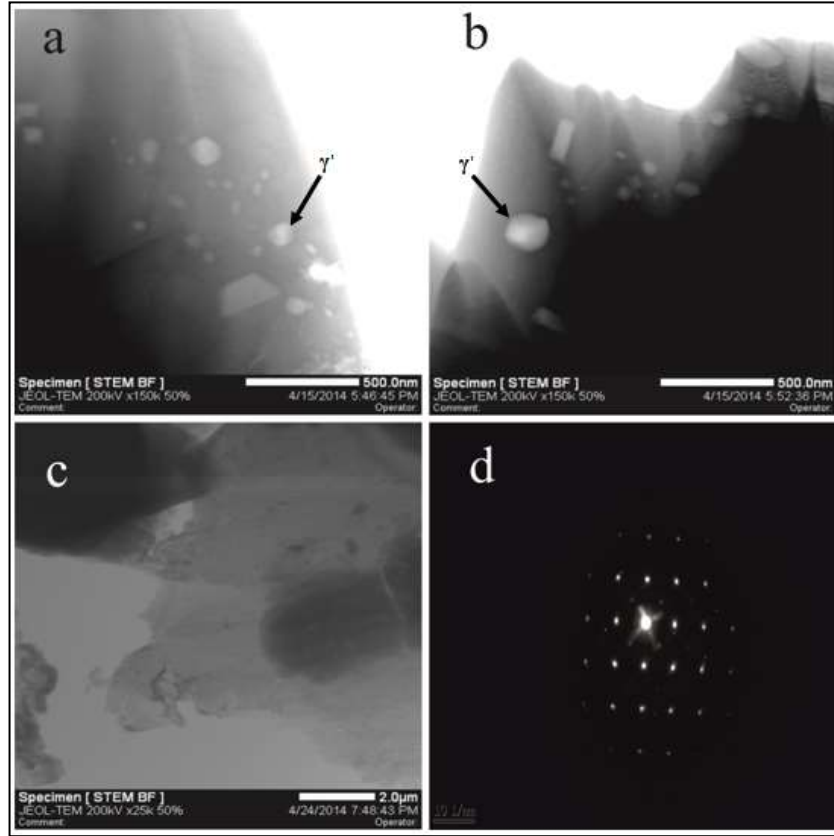
Çizelge 6.2. Yaşlandırılan Monel alaşımları EDS analizi sonuçları.

Şekil	Bölge	Element						
		O	Al	Si	Mn	Fe	Ni	Cu
6.4.b	2.	0,64	1,91	1,13	1,01	----	53,08	42,22
6.4.b	3.	1,59	1,75	0,88	----	1,75	54,02	40,02

Şekil 6.4’de farklı sürelerde (6,8,10 ve 12 saat) yaşlandırılmış K-500 alaşımının mikroyapısı SEM görüntüleri verilmiştir. Çizelge 6.2’de ise, EDS analizi sonuçları verilmiştir. Şekil 6.4.’te (a,c ve d) verilen yaşlandırılan alaşımların (6 saat, 10 saat ve 12 saat) SEM görüntüleri incelendiğinde, ana matrisde küresel yapıda bulunan ince ve kaba taneli (yaşlandırma ürünü) faz oluşumları görülmektedir. Şekil 6.4.b’ de 8 saat yaşlandırılan Monel K-500 alaşımının SEM görüntüleri incelendiğinde, Monel K-500 alaşımında da gözeneklerin olduğu (siyah küresel) görülmektedir. Beklenen yaşlandırma çökeltileri SEM görüntülerinde görülememektedir. Bu nedenle geçirimsiz elektron mikroskobu (TEM) incelemeleri yapılmıştır.

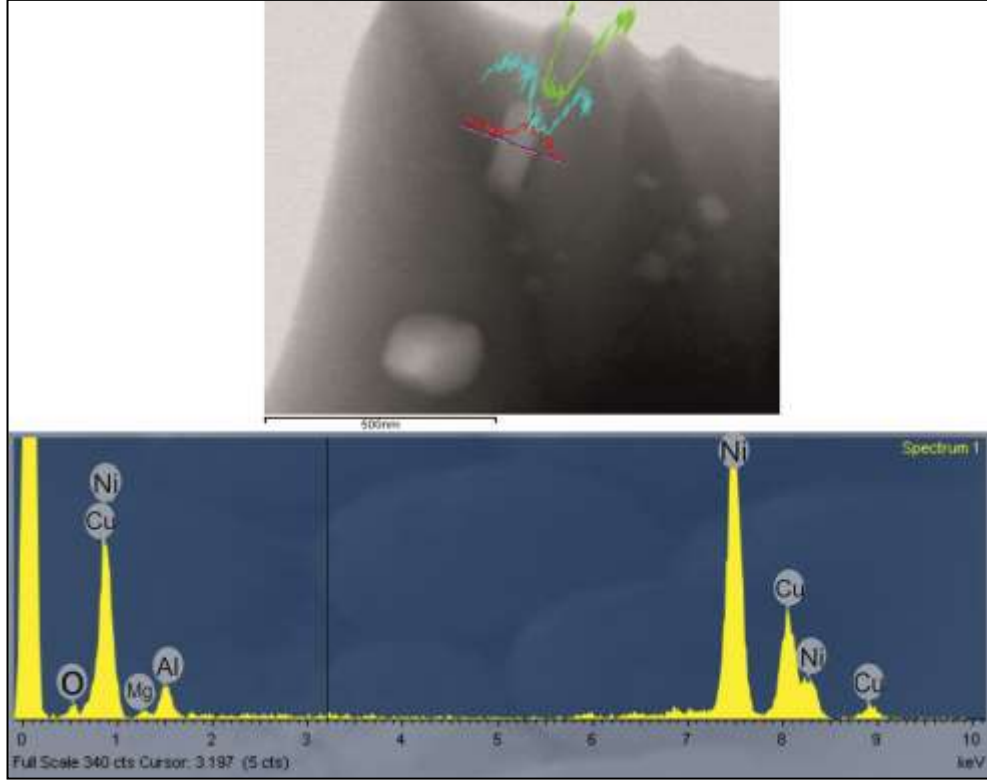
6.1.3. TEM İncelemeleri

Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımında, SEM görüntülerinde görülemeyen, γ' çökeltilerinin daha iyi görülebilmesi için geçirimli elektron mikroskobu (TEM) incelemesi yapılmıştır. 8 saat yaşlandırılmış Monel K-500 alaşımının, TEM, aydınlık alan ve seçili alan kırınım paterni (SAD) görüntüsü Şekil 6.5' de verilmiştir.



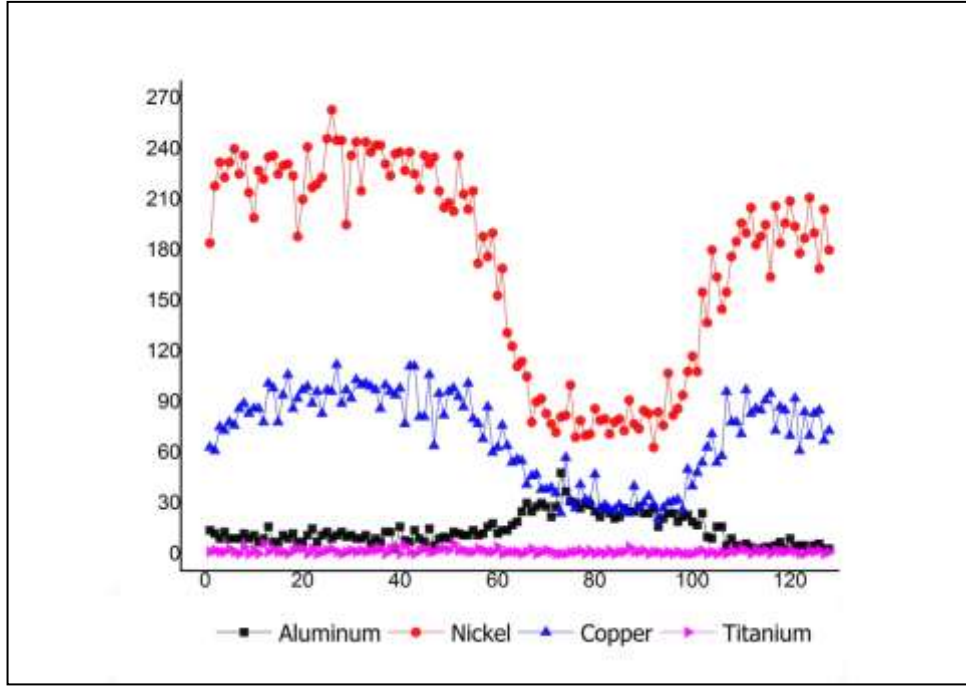
Şekil 6.5. a), b) ve c) TEM görüntüsü d) Bu görüntüye ait SAD paternleri.

Yaşlandırılmış Monel K-500 alaşımının, Şekil 6.5'de verilen aydınlık alan görüntüsünde (a ve b), yaşlandırma işleminde oluşan γ' $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ intermetalik fazı çökeltileri (küresel şekilli) görülmektedir. Seçili alan kırınım (SAD) patern (d), görüntüleri incelendiğinde, kristal yapıda bulunan Monel K-500 alaşımının, atomların çevresinde oluşan γ' çökeltileri görülmektedir.



Şekil 6.6. Yaşlandırılmış Monel K-500 alaşımı TEM/EDS analizi.

Şekil 6.6'da yaşlandırılan TEM/EDS analizleri verilmiştir. Şekil 6.6'dan da anlaşıldığı gibi, yapı içerisindeki ana matris Ni dışında Cu ve çökeltilerin oluşmasını sağlayan Al pikleri görülmektedir. Al oranının yüksek olması yapıda Ni ile $AlNi_3$ intermetalik fazının oluştuğunu göstermektedir.



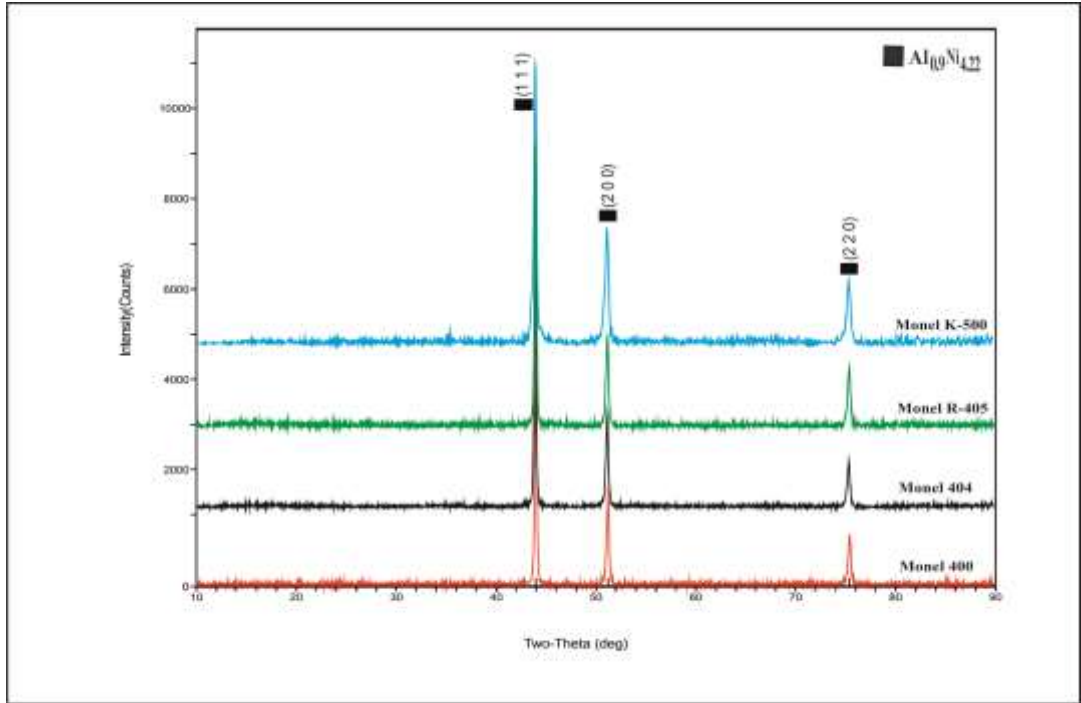
Şekil 6.7. SAD patern bölgesi element analizi değerleri.

Şekil 6.7' de SAD patern bölgesi element analizi sonucunda ana metalden çökelti yapısına doğru ilerledikçe Ni ve Cu yoğunluğu azaldığı, Al'un ise arttığı yapı içerisindeki Ti'nin azda olsa arttığı görülmektedir.

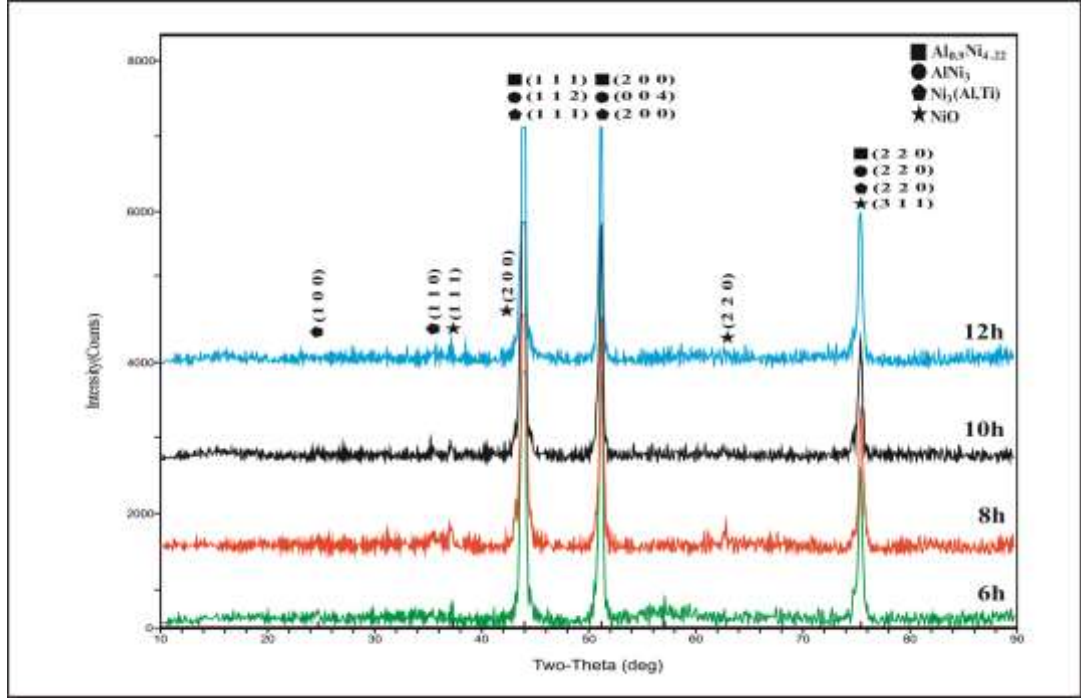
TEM incelemelerinde görünen, γ' $Ni_3(Al,Ti)$ fazı, nikel esaslı alaşımlar içinde en önemli fazdır. Katı çözeltilerinde yaşlandırma etkisiyle, intermetalik fazın çökmesiyle oluşmaktadır. Doymuş katı çözeltiler düşük sıcaklıklara hızlı soğutulur ve düşük sıcaklıklarda ikinci bir malzemeyi bileşiminde bulundurabilmektedir (Ni içerisinde bulunan $Ni_3(Al,Ti)$ intermetalikliği gibi). Çözeltiye alınan alaşımda aşırı doymuş katı eriyik oluştuktan sonra, γ' fazının $Ni_3(Al,Ti)$ içerisinde çökmesi, süper alaşım olan Monel K-500 alaşımında, mukavemetlenmeye neden olan mekanizmadır. γ' fazı miktarının artması, dayanımın artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle nikel esaslı alaşımlarda Al ve Ti miktarı arttıkça, alaşımın mukavemetide artmaktadır [51].

6.1.4. XRD Analizleri

Dört farklı Monel alaşımlarının, kırınım düzlemleri ve yapıdaki oluşan fazlar Şekil 6.8’de verilen XRD analizinde görülmektedir. Sinterlenen Monel alaşımlarında elementlerinin pik şiddetlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Her dört alaşımda da sadece gama (γ) matris’e ait pikler elde edilmiştir. XRD incelemelerinde matrisi oluşturan elementlerden ziyade, yapıda oluşan intermetalikler tarandığı için, elementler verilmemiştir. Sadece sinterleme sonrasında yapıda oluşan $Al_{0,9}Ni_{4,22}$ intermetaligi taranmıştır.



Şekil 6.8. Monel alaşımlarına ait XRD analizi a) Monel 400, b) Monel 404, c) Monel R-405 ve d) Monel K-500.



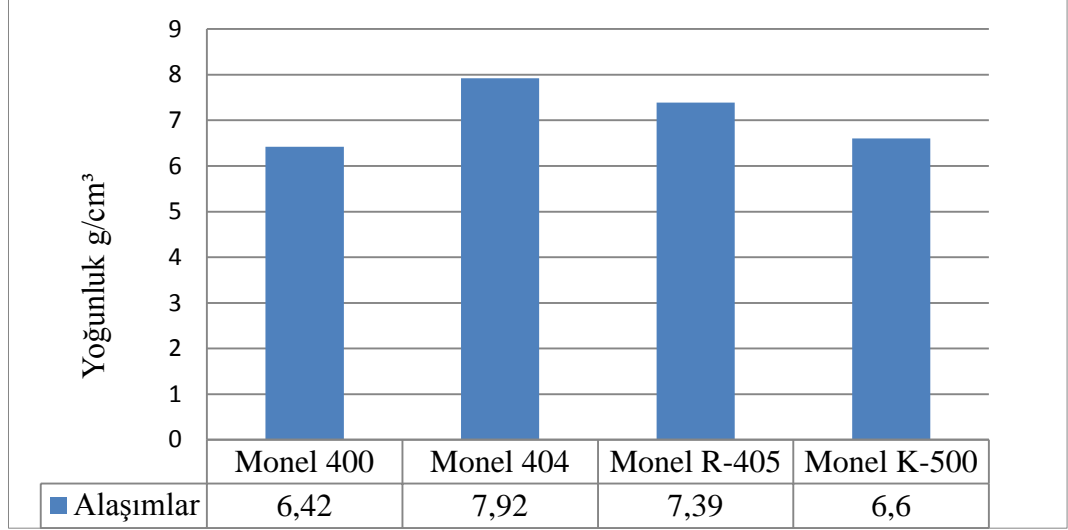
Şekil 6.9. Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarına ait XRD analizi sonuçları a) 6, b)8, c)10 ve d)12 saat.

Şekil 6.9’da farklı sürelerde yaşlandırılan Monel alaşımlarında elde edilen fazların büyük oranda aynı olduğu gözlemlenmiştir. Monel K-500 alaşımının ana matrisi γ ’dır. Çökelme sertleşmesi ile mukavemetlendirilen Monel K-500 alaşımlarında mukavemetini γ ’ çökeltileri $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ oluşmaktadır. XRD analizi sonucunda yaşlandırma ile yapıda $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ intermetalik fazının oluştuğu anlaşılmaktadır. Ayrıca yapıda $\text{Al}_{0,9}\text{Ni}_{4,22}$, AlNi_3 ve NiO intermetalik fazların oluştuğuda görülmektedir. 6 saat yaşlandırılan Monel K-500 alaşımı haricinde, 8, 10 ve 12 saat yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarında ise NiO fazının oluştuğu belirlenmiştir. Bunun nedeni ise, T/M yöntemi ile üretilen 6 saat yaşlandırılan Monel alaşımlarının sinterleme sırasında oksit oluşmaması, diğer yaşlandırma sürelerinde ise (8, 10 ve 12 saat) yapıda yaşlandırma işlemleri sırasında oksit oluştuğu düşünülmektedir [51].

XRD analizi sonuçlarına göre, (2θ) kırınım açısında bu fazlar $24,718^\circ$, $35,219^\circ$, $43,970^\circ$, $51,229^\circ$, $62,810^\circ$ ve $75,210^\circ$ piklerinde $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ intermetalik fazı, $51,229^\circ$, $62,810^\circ$ ve $75,210^\circ$ piklerinde $\text{Al}_{0,9}\text{Ni}_{4,22}$ fazı ve $36,973^\circ$ ve $43,190^\circ$ piklerinde AlNi_3 intermetalik fazı belirlenmiştir.

6.2. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

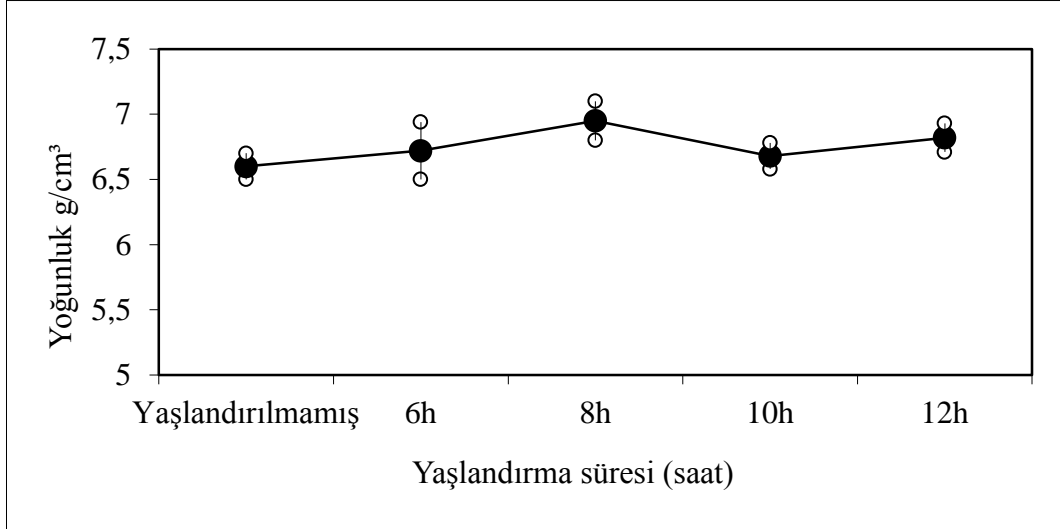
Sinterleme sonrasında yaşlandırılan dört farklı alaşımda elde edilen yoğunluk değerleri Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Dört farklı sinterlenmiş Monel alaşımının için yoğunluk değişimi.

1150 °C'de sinterlenen dört farklı Monel alaşımlarının yoğunluklarındaki değişim, içerdikleri kimyasal bileşimden dolayı farklılık göstermektedir. T/M yöntemi ile üretilen malzemelerde %100 yoğunluk değerlerine ulaşılması zordur. Bunun nedeni, yapıda oluşan gözeneklerdir. Farklı Monel alaşımların (Monel 400, Monel 404, Monel R-405 ve Monel K-500), teorik yoğunluklarını incelediğimizde, alaşımların sırasıyla, %73, %89, %84, %77 yoğunluk değerleri görülmektedir. Bu nedenle alaşımların, yoğunluk değerleri ile alaşımların teorik yoğunluklarını kıyasladığımızda yoğunluk değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. Yoğunluğa etki eden diğer etmenler ise, presleme ve sinterleme işlemleridir. Toz metal malzemelerde, uygulanan presleme kuvveti ile yoğunlukta bir artış görülmektedir. Yoğunluğun artışı sağlayan diğer bir parametre ise sinterlemedir. Sinterleme esnasında ise (sıcaklığa ve süreye bağlı olarak) malzemelerde meydana gelen oksidasyon, oksitlenme ile birlikte de yoğunlukta değişimler söz konusudur. Bu bağlamda, yoğunluk değerleri incelendiğinde ise, Monel 404 alaşımında

oksidasyonun az olduğu düşünülebilir. Şekil 6.11’de farklı sürelerde yaşlandırılan Monel K-500 alaşımının yoğunluk değışimleri verilmiştir.

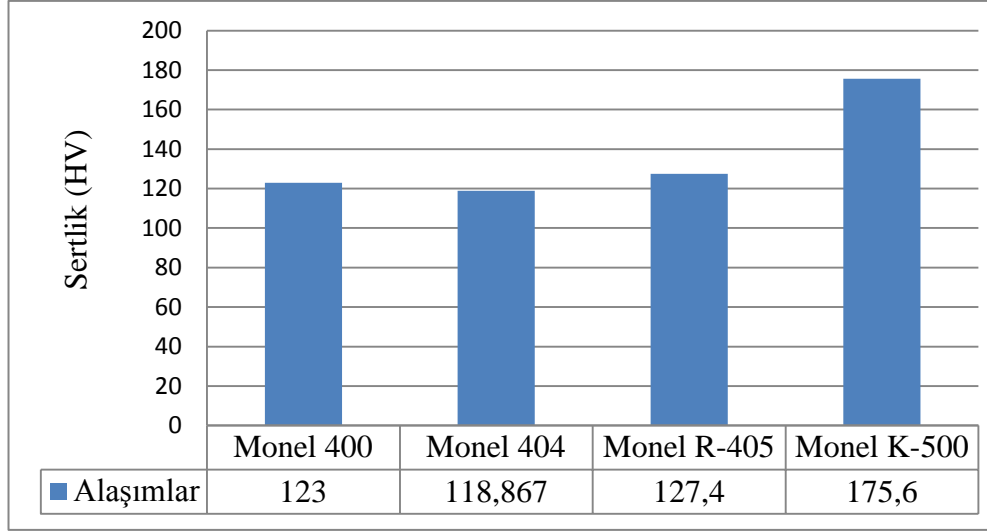


Şekil 6.11. Farklı sürelerde yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarının yoğunluk değışimi.

Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımının farklı yaşlandırma sürelerinde yoğunluk değışimlerinde birbirine yakın olduğu görülmektedir. Yaşlandırma işleminden sonra en yüksek yoğunluk değerin, 8 saat yaşlandırılan alaşımda elde edildiği görülmektedir. En düşük yoğunluk değeri ise yaşlandırılmamış Monel K-500 alaşımında elde edilmiştir. Bunun nedeni ise, sinterleme sırasında yaşlandırılmamış Monel K-500 alaşımının oksidasyona daha fazla uğraması olduğu düşünölmektedir.

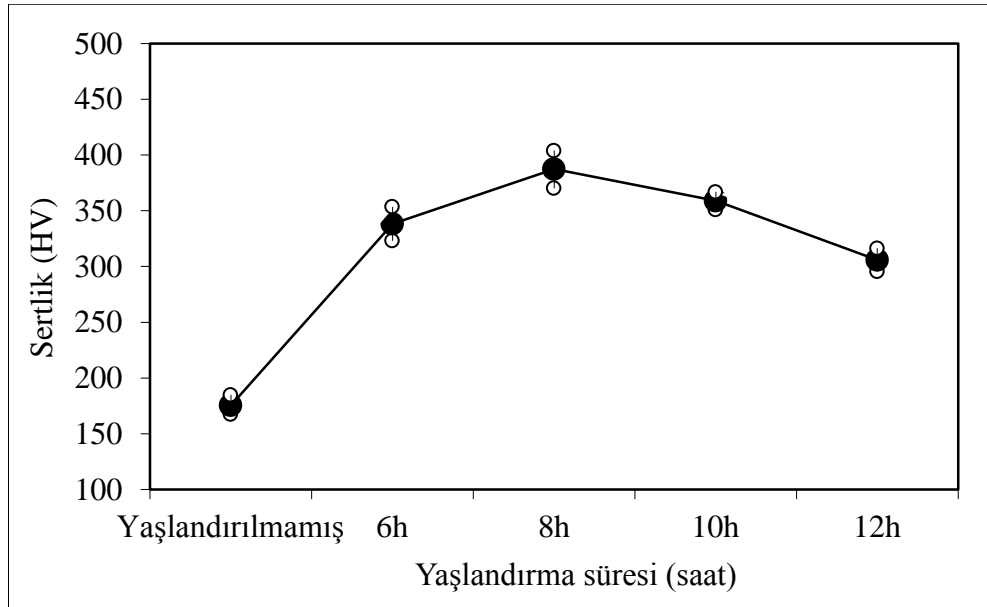
6.3. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Sinterlenmiş dört farklı Monel alaşımının sertlik ölçümü sonuçları, Şekil 6.12’de verilmiştir. Şekil 6.12’de verilen sertlik sonuçları incelendiğinde en yüksek sertlik değeri Monel K-500 alaşımında elde edilmiştir.



Şekil 6.12. Dört farklı Monel alaşımlarının sertlik (HV) değışımi.

Ayrıca Monel K-500 alaşımlarının yapısındaki hem nikelin diğer alaşımlara oranla yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Farklı sürelerde Monel K-500 alaşımlarının sertlikleri, Şekil 6.13’de verilmiştir.



Şekil 6.13. Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarının yaşlandırma süresine bağılı olarak sertlik (HV) değışımi.

Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarının numunelerinin sertlik değışımi incelendiğinde ve yaşlandırılmamış Monel K-500 alaşımlarının değerleri ile yaşlandırılan Monel K-500

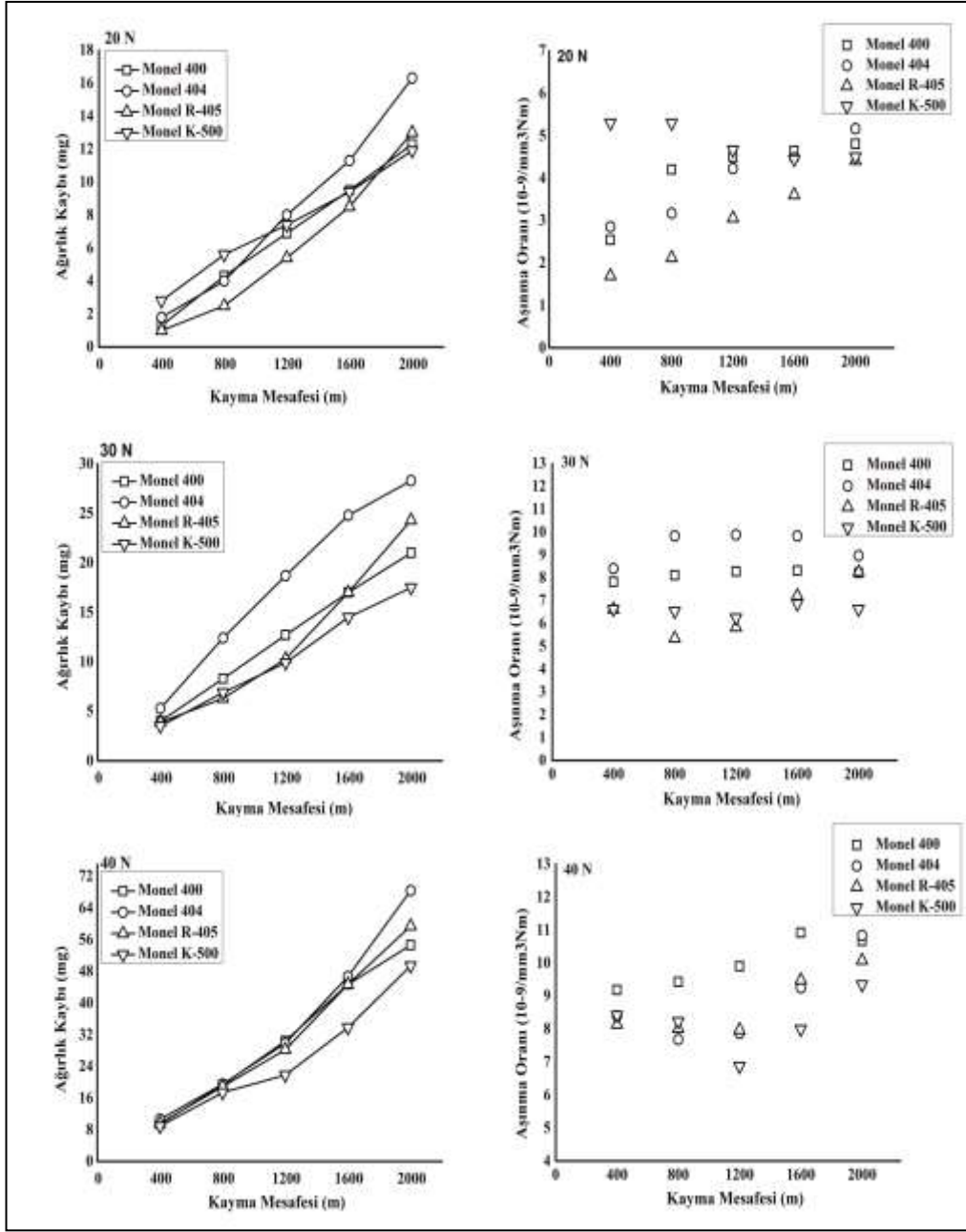
alaşımı değerlerini karşılaştırıldığında, yaşlandırma ısıl işleminin malzemenin sertlik değerlerine etkisi görülmektedir. Yaşlandırma ısıl işlemi ile oluşan çökeltiiler nedeniyle sertliği artmaktadır. Monel K-500 alaşımlarının yaşlandırılması ile yapıda oluşturulan γ' çökeltiileri $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ intermetalik fazı, sertlik artışındaki en önemli faktördür. Yaşlandırma işleminin ilk aşamalarında oluşan γ' çökeltiileri, küçük olduğundan dolayı, dislokasyon hareketlerini yeterince engelleyemediği için sertlikteki artış sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle sertlikte bir miktar artış gelmektedir. Yaşlandırma süresi ile birlikte, çökelti boyutları arttıkça, dislokasyon hareketleri zorlaşmakta ve sertlikte artmaktadır. 6 saat yaşlandırılan alaşım ile çökelti boyutları arttığı için, elde edilen sertlikte (yaşlandırılmamış alaşıma göre) daha yüksektir. Sertlik, 8 saat yaşlandırılan alaşımda ise en yüksek değere ulaşmaktadır. Yaşlandırma süresi, 10 saat ve 12 saatte ise, sertlik değerlerinde hafif bir düşüş görülmektedir. Bunun nedeni ise, aşırı yaşlanmayla birlikte çökeltiiler daha fazla yapıyla uyumsuz hale gelmektedir. Bu nedenle alaşımın sertliği düşmektedir [51,53].

6.4. AŞINMA TESTLERİ

Sinterlenen dört farklı Monel (Monel 400, Monel 404, Monel R-405 ve Monel K-500) alaşımı 1 ms^{-1} kayma hızı, farklı yükler (20N, 30N ve 40N) altında ve beş farklı kayma mesafesinde (400m, 800m, 1200m, 1600m ve 2000m) test edilmiştir. Ayrıca sinterlenen ve yaşlandırılan Monel K-500 alaşımı ise 1 ms^{-1} kayma hızı, 40N yük altında ve yine beş farklı kayma mesafesinde (400m, 800m, 1200m, 1600m ve 2000m) aşınma testleri yapılmıştır.

6.2.1. Ağırlık Kaybı ve Aşınma Oranı Sonuçları

Sinterlenen dört farklı Monel alaşımlarının 20N yük altında farklı mesafedeki, ağırlık kayıpları ve aşınma oranları değerleri Şekil 6.14'de verilmiştir.



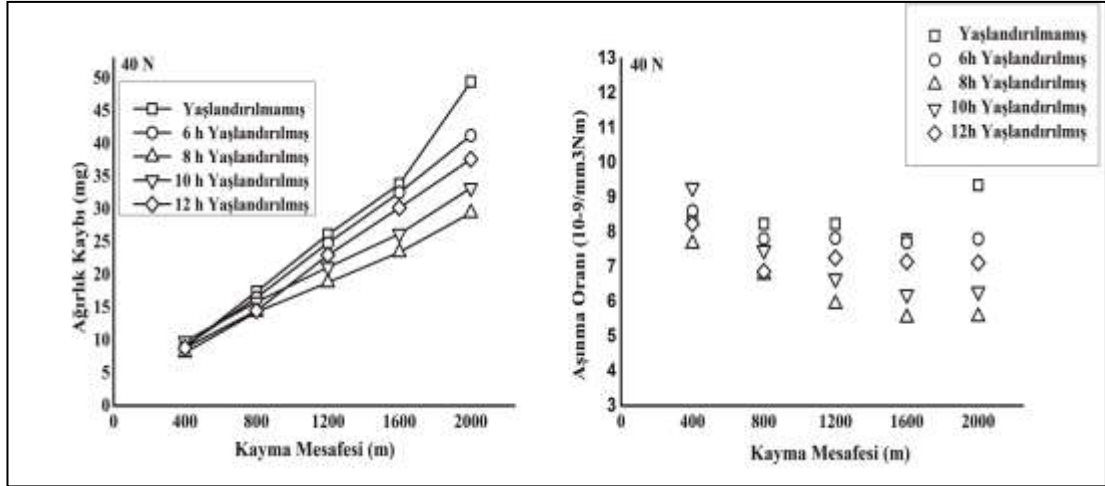
Şekil 6.14. Farklı Monel alaşımlarına ait farklı (20N, 30N ve 40N) yükler altında ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.

Sinterlenen dört farklı Monel alaşımlarının Şekil 6.14’de ağırlık kayıpları incelendiğinde, kayma mesafesindeki artışla birlikte, ağırlık kayıplarında arttığı görülmektedir. 20N yük uygulanarak yapılan aşınma testleri sonucunda, en az ağırlık kaybının 20N yük altında gerçekleştiği görülmektedir. Uygulanan yük artışı ile paralel olarak, en fazla ağırlık kaybının 40N yük uygulanarak yapılan aşınma testlerinde gerçekleştiği görülmektedir.

Sinterlenen dört farklı Monel alaşımlarını birbiri ile karşılaştırıldığı zaman, en fazla ağırlık kaybının, Monel 400 alaşımında gerçekleştiği görülmektedir. En düşük ağırlık kayıpları ise, Monel K-500 alaşımında elde edilmiştir. Dört farklı Monel alaşımları arasında gerçekleşen bu ağırlık kaybı farklılıkları, alaşımların sertliklerinin birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Sertlik değerinin en az olduğu alaşımın aşınma kaybı fazla, sertlik değerinin en fazla olduğu alaşımda ise, ağırlık kaybının en düşük olduğu belirlenmiştir.

Uygulanan yükün etkisi ile birlikte alaşımdaki gerilme pürüzlerinin akma sınırı aşması ile plastik deformasyona ve bu gerilme pürüzleri metal yüzeylerin teması sonucunda, iki metalin birbirini çizmesi ile malzeme taşınımından dolayı yüzeye sıvanarak, kaynaklanmaya neden olmaktadır. Bu kaynaklanmalar, yüzeyde ısıl etkenler sonucu oluşan oksit tabakalarını parçalanmasıyla meydana gelmektedir. Aşınma çiftlerinde gerçekleşen bu mekanizma sonucunda, T/M yöntemiyle üretilmiş alaşımlarda kütlesel parça kırılmalarına neden olmaktadır.

Farklı Monel alaşımlarının aşınma oranları Şekil 6.14'de incelendiğinde, kayma mesafesi ile paralel olarak aşınma oranlarının arttığı görülmektedir. Ağırlık kaybının en fazla olarak görüldüğü Monel 400 alaşımının, aşınma oranlarıda diğer alaşımlara oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Aşınma oranının en az olduğu Monel K-500 alaşımı olduğu görülmektedir. Hem ağırlık kayıpları, hem aşınma oranlarındaki bu farklılıklar, sertlik değerleri ve alaşımların yoğunlukları ile ilişkilidir. Şekil 6.15'de yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarına ait 40N yük altında ağırlık kayıpları ve aşınma oranları verilmektedir.



Şekil 6.15. Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarına ait 40N yük altında ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.

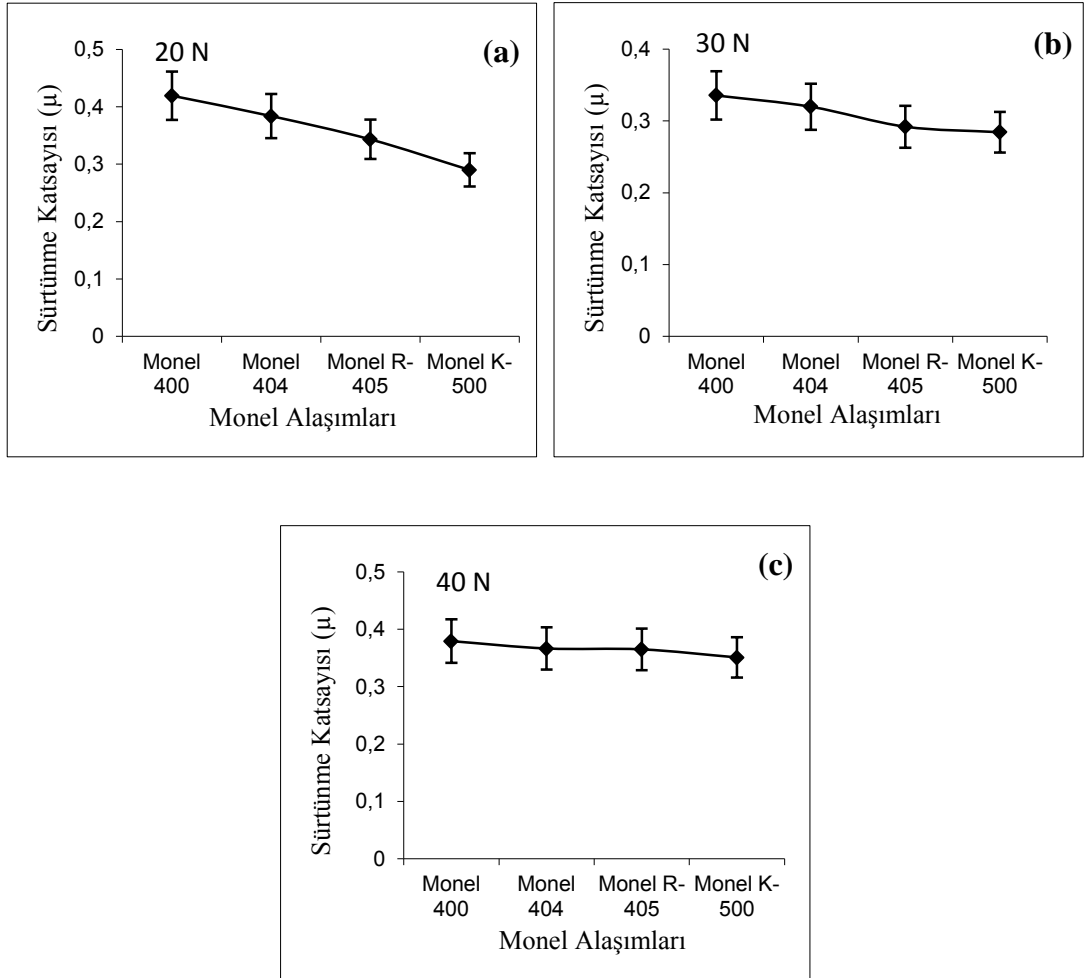
Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımının Şekil 6.15’de verilen ağırlık kayıpları incelendiğinde, kayma mesafesindeki artışla birlikte, ağırlık kaybının arttığı görülmektedir. 40N yük uygulanarak yapılan aşınma testlerinde en düşük ağırlık kaybının 8 saat yaşlandırılan Monel K-500 alaşımında elde edilmiştir. En yüksek ağırlık kaybının ise, yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmayan alaşımda elde edilmiştir. Ağırlık kayıplarındaki bu farklılığın en önemli nedeni, yaşlandırma ile yapıda oluşturulan γ' fazının arttırmasıdır. Alaşımların sertlikleri arttıkça, ağırlık kayıplarını azalmaktadır. Yaşlandırma öncesi ağırlık kaybı ile yaşlandırma sonrası ağırlık kaybının farklı olması, yaşlandırma ile oluşan γ' çökeltilerinden kaynaklanmaktadır. γ' çökeltilerinin boyutları arttıkça, alaşımın sertlik değerleride paralel olarak artmaktadır. 10 saat ve 12 saat yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarının ağırlık kaybı, 8 saat yaşlandırılan alaşımdan yüksek olmasının nedeni ise, yapı içerisindeki çökeltiler büyüyerek γ' çökeltilerinin aşırı yaşlanmasıdır. Aşırı yaşlanma nedeniyle alaşımların sertlik değerleri azalmakta ve ağırlık kaybının artmasına neden olmaktadır.

Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımının, aşınma oranları incelendiğinde ise, ağırlık kayıpları ile aşınma oranları paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Ağırlık kayıpları arttıkça, aşınma oranlarında arttığı görülmektedir. Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarında en düşük aşınma oranı değerleri, 8 saat yaşlandırılan alaşımlarda elde edilmiştir. En fazla aşınma oranı ise, yaşlandırılmamış Monel K-500 alaşımında

görülmektedir. Sertlik sonuçlarının, hem aşınma oranını, hemde ağırlık kaybını etkilediği belirlenmiştir.

6.2.2. Sürtünme Katsayısı Sonuçları

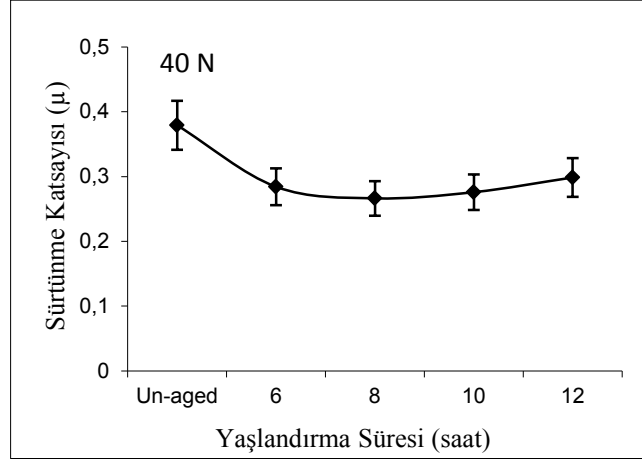
Sinterlenen dört farklı Monel alaşımlarının aşınma deneyi sırasında elde edilen sürtünme katsayı değerleri Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.16. Farklı yük altında (20N, 30N ve 40N) Monel alaşımlarının sürtünme katsayısı değişimi.

Şekil 6.16'da verilen farklı Monel alaşımlarının, sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde, uygulanan yük arttıkça, sürtünme katsayısı değerleri paralellik göstererek artmaktadır. Farklı yükler uygulanan (20N, 30N ve 40N) Monel alaşımlarında en yüksek sürtünme katsayısı değerleri Monel 400 alaşımında elde

edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı değerleri ise Monel K-500 alaşımında elde edilmiştir. Sertlik değerleri arttıkça Monel alaşımlarının sürtünme katsayılarının azaldığı, aşınma testleri sonucunda da görülmektedir. Monel 400 alaşımının sürtünme katsayısının, Monel 404 alaşımından yüksek çıkmasının nedeni, sertliğin daha düşük olmasıdır.

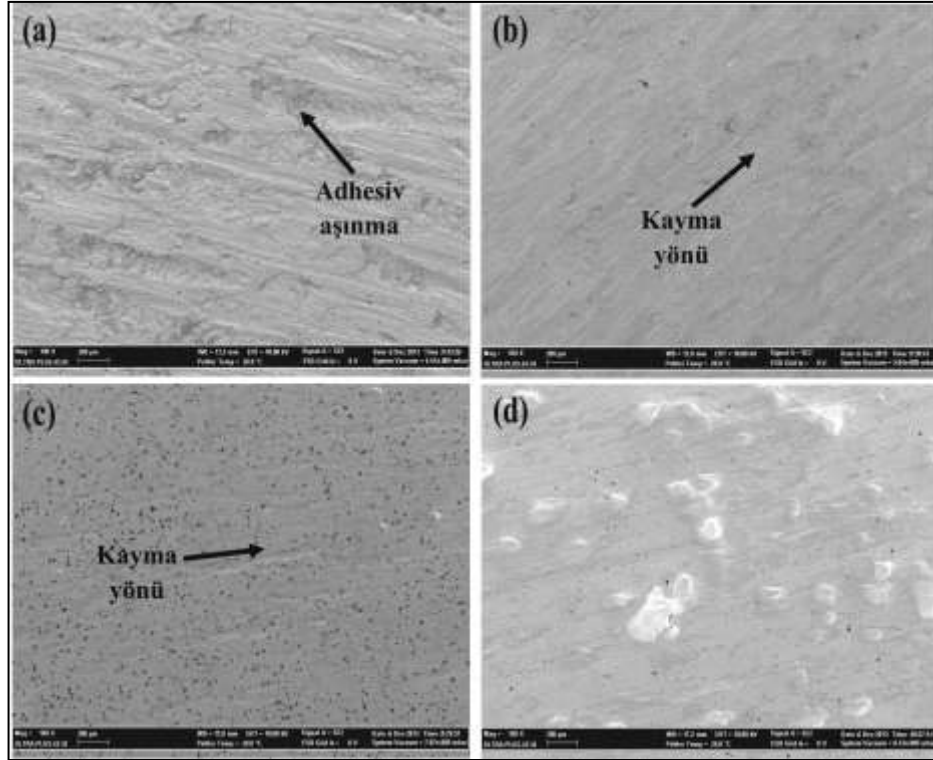


Şekil 6.17. 40N yük altında yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarının sürtünme katsayısı değişimi.

Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımının, Şekil 6.17’de verilen sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde, uygulanan yükün etkisiyle en fazla sürtünme katsayısı değeri yaşlandırılmamış olan Monel K-500 alaşımında gerçekleştiği görülmektedir. En düşük sürtünme katsayısının ise, 8 saat yaşlandırılmış alaşımda olduğu görülmektedir. Yaşlandırılmamış ve yaşlandırılmış (6, 8, 10 ve 12 saat) alaşımların sürtünme katsayısı değerlerinde (yaşlandırma başladıkça γ' çökeltilerin etkisiyle) sürtünme katsayısının düştüğü ve aşırı yaşlanmanın başlaması ile (10 saat ve 12 saat) sürtünme katsayılarının tekrardan artış gösterdiği görülmektedir. Yaşlandırmada, γ' çökelti boyutu ve oluşturduğu $Ni_3(Al,Ti)$ intermetalik fazı ikincil faz parçacıklarının etkisiyle bu değişimler gerçekleşmektedir.

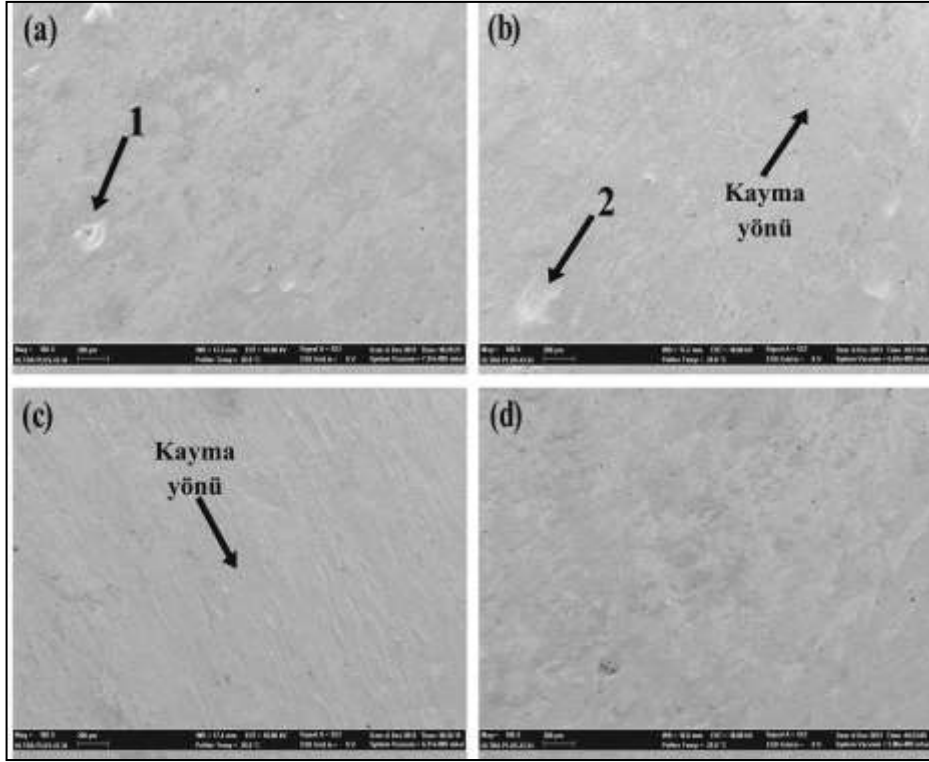
6.2.3. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Aşınma testleri sonunda dört farklı Monel alaşımlarının 20N yük altındaki aşınma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.18’de verilmiştir.



Şekil 6.18. 1150 °C’ de 2 saat sinterlenmiş a) Monel 400, b) Monel 404, c) Monel R- 405 ve d) Monel K-500 alaşımlarının 20 N da aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

Şekil 6.18’de verilen Monel alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntülerini incelediğinde, Özellikle Monel 400 alaşımının yüzeyinde meydana gelen plastik deformasyon görülmektedir. Aşınma yüzeylerinde metal metal teması sonucunda oluşan aşınma mekanizmasında sıvamaların oluştuğu (Şekil 6.8.a) anlaşılmaktadır. Monel 404 b) ve Monel R-405 c) alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntülerinde kayma yönü görülebilmektedir.



Şekil 6.19. Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarının 40 N da aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri; 6 saat a), 8 saat b), 10 saat c) ve 12 saat d).

Yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarının 40 N yük altında aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde ve aşınma izleri görülebilmektedir. Yaşlandırılmış alaşımların aşınma görüntülerinde sıvanmaların olduğu (1 ve 2 noktalarında), malzeme taşınımının gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle aşınma mekanizması adhesiv aşınmadır.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. SONUÇLAR

- Toz metalurjisi ile üretilen Monel alaşımlarında (Monel 400, Monel 404, Monel R-405 ve Monel K-500) yapıda oluşan gözeneklerin tane içerisinde olduğu gözlenmiştir.
- Farklı sürelerde (6, 8, 10 ve 12 saat) yaşlandırılan Monel K-500 alaşımında yaşlandırma süresindeki artışla birlikte, yapıda küresel (Al-Ni-Si-Cu) fazının boyutlarında artış olduğu gözlenmiştir.
- Dört farklı Monel alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinde yapıda, gözeneklerin olduğu ve oluşan fazların çevrelerinde oksitli bölgelerin olduğu gözlenmiştir.
- Farklı sürelerde yaşlandırılan Monel K-500 alaşımının TEM görüntülerinde, yaşlandırma sonucunda oluşan γ' Ni₃(Al,Ti) intermetalik fazının olduğu belirlenmiştir.
- Dört farklı Monel alaşımının XRD incelemelerinde, Monel alaşımlarında gama (γ) matris'e ait piklerin ve ayrıca Al_{0,9}Ni_{4,22} intermetalik fazının olduğu belirlenmiştir.
- Farklı sürelerde yaşlandırılan Monel K-500 alaşımının, XRD sonuçlarında, yaşlandırma sonucunda γ' Ni₃(Al,Ti) intermetalik fazı ile birlikte Al_{0,9}Ni_{4,22} , AlNi₃ ve NiO fazlarında olduğu belirlenmiştir.
- Dört farklı Monel alaşımlarından en yüksek yoğunluk Monel 404 alaşımında, en düşük yoğunluk ise Monel 400 alaşımında ölçülmüştür.
- Farklı sürelerde yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarının yoğunluklarının birbirine yakın olduğu, yaşlandırılmamış Monel K-500 alaşımı ile

- karşılaştırıldığında yaşlandırılan alaşımların yoğunlukların daha değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Dört farklı Monel alaşımlarından en yüksek sertlik değerleri Monel K-500 alaşımında elde edilmiştir.
- Farklı sürelerde yaşlandırılan Monel K-500 alaşımlarında en yüksek sertlik değerleri 8 saat yaşlandırılmış Monel K-500 alaşımında elde edilmiştir.
- Dört farklı Monel alaşımlarının 400 m, 800 m, 1200 m, 1600 m ve 2000 m kayma mesafelerinde en fazla ağırlık kaybının Monel 400 ve Monel 404 te gerçekleştiği, en düşük ağırlık kaybının ise Monel K-500 alaşımında gerçekleştiği belirlenmiştir.
- Farklı sürelerde yaşlandırılan olan Monel K-500 alaşımlarının 400 m, 800 m, 1200 m, 1600 m ve 2000 m kayma mesafelerinde en fazla ağırlık kaybının 8 saat yaşlandırılan numunelerde elde edilmiştir.
- Dört farklı Monel alaşımlarının 20N, 30N ve 40N yük altında ağırlık kayıpları verileri ile hesaplanan aşınma oranlarının paralellik gösterdiği belirlenmiştir.
- Aşınma testlerinde en düşük sürtünme katsayısı değerleri Monel K-500 alaşımında elde edilmiştir.
- Yaşlandırma ısı işlemi ile oluşan ikinci faz çökeltileri sertlik, yoğunluk, ağırlık kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısını etkilediği belirlenmiştir.
- SEM aşınma yüzeyi görüntülerinde, aşınma sırasında oluşan aşınma mekanizmasının adhesiv aşınma olduğu görülmüştür.

7.2. ÖNERİLER

- Yoğunluk değerlerini artırabilmek için presleme kuvveti artırılabilir.
- Sertlik değerlerini artırmak için sinterleme sıcaklığını 1250 °C seviyelerine çıkartılarak sinterleme işlemi yapılabilir.
- Yoğunluk, sertlik değerleri ve aşınma direncini artırmak için Toz Enjeksiyon Kalıplama yöntemi ile de üretim yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. A.S.M., “Metals Handbook”, 9.Baskı ,Cilt 7, *Powder Metallurgy*, U.S.A. (1984).
2. Al-Qureshi, H.A., Galiotto, A., Klein, A.N., “On the mechanics of cold die compaction for powder metallurgy”. *J. Mater. Process. Technol.* 166, 135–143 2005.
3. İnternet: Special Metals, “High-Performance Alloys”, <http://www.specialmetals.com/products/> (2014).
4. Smith, W. F., “Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri”, Demir Dışı Alaşımlar, Cilt 2., Çeviri: Erdoğan, M., *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara (2000).
5. Matthew, J. D. Jr., “Superalloys”, *American Society For Metals*, US (1984).
6. Ezugwu, E. O., Bonney, J. and Yamane, Y., “An overview of the machinability of aeroengine alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 134: 233-253 (2003).
7. A.S.M, “Metals Handbook” Vol. 7, 8th Edition, *American Society for Metal*, Metals Park, Ohio (1972).
8. Mankins, W. L., and Lamb, S., “Nickel and Nickel Alloys”. *In ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 2: 1363-1404 (1990).
9. Garimella, L., Liaw P., and Klarstrom, D., “Fatigue Behavior in Nickel-Based Superalloys”, *JOM*, 67-71 (1997).
10. Pollock, T. M., and Tin, S., “Nickel-Based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties”, *Journal of Propulsion and Power*, 361-374 (2006).
11. Huang Z. W., Wang Z. G., Zhu, S. J., Yuan, F. H, and Wang, F. G. “Thermomechanical fatigue behavior and life prediction of a cast nickel-based superalloy”, *Mater Sci Eng*, 432: 308 (2006).
12. Skelton, R. P., Webster, G. A., de Mestral, B., and Wang C. Y., “Modelling thermo-mechanical fatigue hysteresis loops from isothermal cyclic data”, *ASTM Spec Tech Publ.*, 1371: 69 (2000).
13. Davis, J. R., “Nickel, cobalt, and their alloys”, ASM Specialty Handbook, *ASM International*, 7-10 (2000).

14. Broomfield, R. W., Ford, D. A., Bhangu, H. K., Thomas, M. C., Frasier, D. J., and Burkholder, P., “Development and turbine engine performance of three advanced rhenium containing superalloys for single crystal and directionally solidified blades and vanes”, *Am Soc Mech Eng*, 1515 (1997).
15. Kovan, V., Hammer, J., Mai, R., and Yüksel, M., “Thermal–mechanical fatigue behaviour and life prediction of oxide dispersion strengthened nickel-based superalloy “, *PM1000 Materials Characterization*, 1600 – 1606 (2008).
16. Çelik, E., ve Çelik, Ö., “Ni – Cr süper alaşımlarına molibden katkısının mikroyapı, mekanik özellik ve iletkenliğe etkisinin araştırılması”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 7 (1): 187-193, Elazığ (2008).
17. İnternet: Sakarya Üniversitesi, “Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme”, <http://web.sakarya.edu.tr> (2012).
18. German, R. M., “Powder Metallurgy Science, 2nd ed.”, *Metal Powder Industries Federation*, USA, 64, 65, 74-78, 259-260 (1994).
19. Dunkley, J. J., “Atomization, Powder Metallurgy, Metal Handbook”, *ASM International Publ.*, England, 7 (9): 111,112 (1998).
20. Başaran, A., “Toz metal parçalara ısıl ve mekanik yüzey işlemlerin birlikte uygulanabilirliğinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 25-27 (2007).
21. Roll K.H., “Metal Handbook, , Ninth Edition Vol7”, *Powder Metallurgy*, 186-189, (1984).
22. Sarıtaş, S., “Toz metalurjisi, Makine müh. el kitabı”, *MMO*, 2.Baskı, I.Cilt (1994),.
23. İnternet:Ünal, R., “Toz Üretimi/Gaz Atomizasyonu” www.rahmiunal.net (1992).
24. Benjamin, J.S., “Mechanical Alloying”, *Sci.Amer*, 40-48 (1976).
25. Ay, M., Çaydaş,U. ve A., Haşçalık, A., “Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Fe-C-Mo-FeCr kompozitinin adhesiv aşınma davranışının incelenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* 3,: 25-31 (2006).
26. German, R.M., Çeviri, “Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Ankara (2007).
27. Kurt, A.O., “Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme”, *Sakarya Üniv.Müh.Fak.,Metalürji ve Malzeme Bölümü Ders Notları*, 1- 25, Sakarya (2004).

28. German, R. M., Farooq, S. C. and Kipphut, M., “Kinetics of Liquid Phase Sintering”, *Materials Science and Engineering*, 106: 215-224 (1988).
29. Akkurt, M., “Makine Elemanları Cilt 2”, *İTÜ Matbaası*, İstanbul, 76-79 (1992).
30. Gürleyik, M. Y., “Makine mühendisliğinde aşınma olayları”, *Mühendis ve Makine*, 323: 3-14 (1986).
31. Cöcen, Ü., Belevi, M. and Önel, K., “Tane silisyum karbür katkılı alüminyum alaşımı bazlı kompozitlerin aşınma davranışı”, *7. Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 155-187 (1997).
32. Odabaş, D., “Kuru sürtünme şartlarında termomekanik faktörlerin AISI 3315 çeliğinin aşınma davranışına olan etkilerin teorik ve deneysel araştırılması”, Doktora Tezi, *E. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 58-76 (1991).
33. Donald, R. A., “The Science and Engineering of Materials Third Edition”, *PSW Publishing Company*, 123 (1999).
34. Soydan, Y. ve Ulukan, L., “Sürtünme ve Aşınma Direnci Ölçme yöntemleri”, *8. Uluslar arası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, Ankara, 581-588 (1988).
35. Eyre, T. S., “Friction and Wear Control in Industry”. *Surface Engineering, Vol. 7*: 143-148. (1991).
36. İpek, R., “AISI 1020 Çeliğinin, Yüzey Sertleştirme İşlemleri Uygulanarak AISI 5155 Çeliğinin Yerine Kullanabilirliğinin Deneysel Araştırılması”, *E. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi*, Kayseri(1992).
37. Yılmaz, F., “Sürtünme ve aşınma”, *9. Uluslar Arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 229-247 (1997).
38. Niklas, A., Sture, H. and Staffan, J., “Friction and wear measurement techniques”, *Modern Tribology Handbook, CRC Press LLC*, USA 348-355 (2001).
39. İpek, R., “Tren Fren Pabuçlarının Aşınmasının Deneysel İncelenmesi”, *E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, Kayseri (1987).
40. Onaran, K., “Malzeme Bilgisi”, *İTÜ Çağlayan Basımevi*, İstanbul, 87-95 (1985).
41. Akkurt S., “Poliasetalin kuru ve su ile yağlama koşullarında sürtünme katsayısı ve aşınma bakımından incelenmesi”, *4. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, Ankara, 585-594 (1990).
42. Hurricks P. L., “Some metallurgical factor controlling the adhesive and abrasive wear resistance of steels a review”, *Wear*, 26: 285-304 (1973).

43. Gürleyik, M.Y., “Soğuk deformasyonla aşınma direnci artırılabilir”, **2.Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, Ankara, 501-510 (1986).
44. Karamış, M. B., “Traktör hızı ve pulluk çalışma derinliğinin uç demiri aşınma hızına etkileri ve optimizasyonu”, **2. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu**, Gaziantep, 668-677 (1986).
45. Kaya, H., “Malzeme”, **Ankara Erkek Teknik Öğretmen Okulu Yayınları I. Gün Matbaası**, İstanbul. (1961).
46. Anık. S., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, W. Weissbach’ın Werkstoffkundeund Werkstoffprüfung adlı eserinden çeviri, **Kurtuluş Matbaası**, İstanbul. (1977)
47. Koç, R., “Vagon boji bagalarına alternatif polimer malzemelerin deneysel incelenmesi”, Doktora Tezi, **SA.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 121-142 (2004).
48. Gürleyik, M. Y., “Yıkama Aşındırması”, Mühendis ve Makine, **KTÜ Yayınları**, Trabzon, 368: 25-34 (1980).
49. ASM International, “Nickel, cobalt, and their alloys”, ASM Specialty Handbook, **ASM International**, US, 234 (2000).
50. ASM International, “Heat treating”, ASM Metal Handbook, Vol.4, **ASM International**, USA (2002).
51. Ai, Jia-He, Ha, M., Gangloff, R. P. and Scully, J. R., “Hydrogen diffusion and trapping in a precipitation-hardened nickel–copper–aluminum alloy Monel K-500 (UNS N05500)”, **Acta Materialia**, 61 (9): 3186-3199 (2013).
52. Dey, G. K., Tewari, R., Rao, P., Wadekar, S. L. and Mukhopadhyay, P, “Precipitation hardening in nickel-copper base alloy monel K 500”, **Metallurgical and Materials Transactions A**, 24 (12): 2709-2719 (1993).
53. QQ-N-286G, “Federal specification for nickel–copper–aluminum alloy, wrought (UNS N05500)”, **HIS**, Japan (2000).
54. Bradley, E. F., “Superalloys”, **ASM International**, Metals Park, OH 44073 (1989).

ÖZGEÇMİŞ

Umut ESGİN 1987'de İstanbul'da doğdu.İlköğretimini Tezer Taşkiran İlköğretim Okulu'nda 2001 yılında tamamladıktan sonra liseyi İstanbul Tuzla Lisesi'nde Fen Bölümünü bitirerek 2004 yılında tamamladı. 2006 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği Bölümüne başladı ve 2011 yılında mezun oldu.Lisans programını tamamladıktan sonra yine Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. Aynı yıl M&T Reklam A.Ş. de Üretim Mühendisi ünvanı ile iş hayatına başladı. 2013 yılı staj döneminde Erasmus Konsorsiyum ile İspanya'da Staj yaptı. 2013 yılı Ekim ayında M&T Reklam A.Ş. deki Üretim Mühendisliği görevinden ayrıldı. 2011 yılında başladığı yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Aydınlı mah. Çamlıbelde yolu cad. Emlak Konutlar 1. Etap C1-1 Daire:11
Tuzla/İSTANBUL

Tel : (0)544 687 87 61
E-posta: uesgin@gmail.com