

**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN
17-4 PH PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERDE
ALAŞIM ELEMENTLERİNİN
AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**2019
DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

ENDER NALÇACIOĞLU

**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN
17-4 PH PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERDE
ALAŞIM ELEMENTLERİNİN
AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Ender NALÇACIOĞLU

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Şubat 2019**

Ender NALÇACIOĞLU tarafından hazırlanan “TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN 17-4 PH PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERDE, ALAŞIM ELEMENTLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA

Tez Danışmanı, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği



Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 12/02/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Hamit SARUHAN (DÜ)



Üye : Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA (KBÜ)



Üye : Prof. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Arif ÖZKAN (KOÜ)



Üye : Dr. Öğretim Üyesi Metin KAYA (KBÜ)

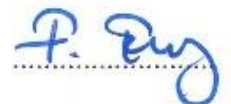


/ /2019

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

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.





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

Ender NALÇACIOĞLU

ÖZET

Doktora Tezi

**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN
17-4 PH PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERDE
ALAŞIM ELEMENTLERİNİN
AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Ender NALÇACIOĞLU

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA

Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Şubat 2019, 96 sayfa

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile farklı oranlarda molibden, tantalyum ve titanyum ilave edilerek üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımların kuru kayma aşınma davranışları incelenmiştir. Hazırlanan alaşım tozlar soğuk preslenerek (800 MPa) ham numuneler üretilmiştir. Üretilen green kompaktlar 10^{-6} milibar vakumda 1300 °C’de 1 saat sinterlenerek, fırın ortamında oda sıcaklığına soğutulmuştur. Daha sonra tantalyum ve titanyum ilave edilen numuneler 480 °C’de vakumlu fırın ortamında 1, 4 ve 8 saat yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Sonra molibden (Mo), tantalyum (Ta) ve titanyum (Ti) ilave edilen numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM+EDS), X-ışını kırınımı (XRD), yoğunluk ve sertlik ölçümleri ile

incelenmiştir. Aşınma testlerinde pin-on-disk cihazı kullanılmıştır. Aşınma testlerinde parametre olarak $0,8 \text{ ms}^{-1}$ kayma hızı, 30 N ve 45 N yük ve beş farklı kayma mesafesi (600, 1200, 1800, 2400 ve 3000 m) kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, farklı oranda Mo ilave edilen (% 0,5 - % 1- % 2 - % 4) 17-4 PH paslanmaz çeliğin yoğunluklarının artan % Mo oranıyla birlikte arttığı, sertliklerinin ise azaldığı belirlenmiştir. İlâveten, 17-4 PH paslanmaz çeliğin alaşımlarında, Mo miktarındaki artışa paralel olarak ağırlık kayıplarının da arttığı belirlenmiştir. Yine, farklı oranda Ta ilave edilen (% 0,15 - % 0,30 - % 0,45 - % 0,60) 17-4 PH paslanmaz çeliğin yoğunluklarının, aynı şekilde sertliklerinin, artan % Ta oranıyla birlikte ve en çok 8 saat yaşlandırma süresi sonunda arttığı belirlenmiştir. 17-4 PH paslanmaz çeliğin alaşımlarında, Ta miktarındaki artışın tersine ağırlık kayıplarının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, farklı oranda Ti ilave edilen (% 0,5 - % 1- % 1,5 - % 2) 17-4 PH paslanmaz çeliğin yoğunluklarının artan % Ti oranıyla birlikte azaldığı, sertliklerinin ise arttığı ve 17-4 PH paslanmaz çeliğin alaşımlarında, Ti miktarındaki artışın tersine ağırlık kayıplarının azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : 17-4 PH paslanmaz çelik, molibden, tantalyum, titanyum, toz metalurjisi, aşınma davranışı.

Bilim Kodu : 708.1.195

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ALLOY ELEMENTS ON WEAR BEHAVIOR OF 17-4 PH STAINLESS STEEL MATERIALS PRODUCED BY POWDER METALLURGY

Ender NALÇACIOĞLU

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine Training

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA

Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

February 2019, 96 pages

In this study, dry slip wear behaviors of 17-4 PH stainless steel alloys produced by adding molybdenum, tantalum and titanium in different ratios by powder metallurgy method were investigated. The prepared alloy powders were cold pressed (800 MPa) and green samples were produced. The produced green compacts were sintered in 10^{-6} millibars under vacuum for 1 hour at 1300 °C and cooled to room temperature in the oven environment. Tantalum and titanium added samples were then subjected to aging for 1, 4 and 8 hours in a vacuum oven environment at 480 °C. Then, molybdenum (Mo), tantalum (Ta) and titanium (Ti) added samples were examined by scanning electron microscopy (SEM + EDS), X-ray diffraction (XRD), density and hardness measurements. Pin-on-disk device was used in wear tests. In the wear tests, a sliding speed of 0,8 msec⁻¹, 30 N and 45 N load, and five different sliding

distances (600, 1200, 1800, 2400 and 3000 m) were used as parameters. As a result of the studies, it was determined that the density of 17-4 PH stainless steel increased with increasing Mo ratio and the hardness decreased with the addition of different amount of Mo (0.5 % - 1 % - 2 % - 4 %). In addition, it was determined that weight losses increased in parallel with the increase in the amount of Mo in the alloys of 17-4 PH stainless steel. Beside, It was determined that the densities of 17-4 PH stainless steel, which are added in different ratio Ta (0,15 % - 0,30 % - 0,45 % - 0,60 %), likewise their hardness, with increasing Ta % ratio increased end of the aging period up to 8 hours. Also, it was determined that weight losses were decreased in contrast to the increase in the amount of Ta in the alloys of 17-4 PH stainless steel. In addition, it was determined that the densities of 17-4 PH stainless steel decreased with increasing Ti % and hardness increased with the addition of different amount of Ti (0.5 % - 1 % - 1.5 % - 2 %) and the weight losses decreased in contrast to the increase in the amount of Ti in the alloys of 17-4 PH stainless steel.

Key Words : 17-4 PH stainless steel, molybdenum, tantalum, titanium, powder metallurgy, wear behavior.

Science Code : 708.1.195

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA ve Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu Doktora Tez Çalışması, Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Komisyonu tarafından KBÜ-BAP-11/2-DR-028 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedi 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	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
TOZ METALURJİSİ	3
2.1. TOZLARIN HAZIRLANMASI.....	4
2.1.1. Ön İşlemler	4
2.1.1.1. Metal Tozlarının Elekten Geçirilmesi.....	5
2.1.1.2. Tavlama.....	5
2.1.2. Tozların Harmanlanması ve Karıştırılması.....	5
2.1.3. Yağlayıcılar.....	6
2.1.4. Tozların Boyut ve Şekilleri.....	6
2.2. TOZ METALURJİSİ İLE PARÇA ÜRETİMİ	6
2.3. TOZ METALURJİSİ İLE PARÇA ÜRETİMİNİN AŞAMALARI	7
2.3.1. Toz Hazırlama	7
2.3.2. Kaba ve İnce Öğütme	8
2.3.3. Granülasyon.....	9
2.3.4. Atomizasyon Yöntemi	10
2.4. FİZİKSEL VE KİMYASAL YÖNTEMLER.....	11

	<u>Sayfa</u>
2.4.1. İndirgeme Yöntemi	11
2.4.2. Karbonil Yöntemi	11
2.4.3. Çökeltme Yöntemi.....	12
2.4.4. Elektroliz Yöntemi.....	12
2.4.5. Diğer Fiziko-Kimyasal Yöntemler	13
2.5. PRESLEME.....	13
2.5.1. Metal Kalıplarda Presleme	14
2.5.2. İzostatik Presleme	15
2.5.2.1. Sıcak İzostatik Presleme	16
2.5.2.2. Soğuk İzostatik Presleme	16
2.6. HADDELEME	17
2.7. EKSTRÜZYON	17
2.8. SİNERLEME	18
2.8.1. Sinterleme Atmosferi.....	20
2.8.2. Sinterleme Fırınları	20
2.9. SİNERLENMİŞ ÜRÜNLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ERGİME İLE ELDE EDİLENLERLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	21
2.10. TOZ METALURJİSİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	23
2.10.1. Toz Metalurjisinin Avantajları	23
2.10.2. Toz Metalurjisinin Dezavantajları	23
 BÖLÜM 3	24
PASLANMAZ ÇELİKLER	24
3.1. PASLANMAZ ÇELİKLER	24
3.1.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler	26
3.1.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	28
3.1.3. Ostenitik Paslanmaz Çelikler.....	31
3.1.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler	33
3.1.5. Çökelti Sertleştirmeli Paslanmaz Çelikler	35
 BÖLÜM 4	37
AŞINMA	37

	<u>Sayfa</u>
4.1. AŞINMANIN TEMEL UNSURLARI	40
4.2. AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER	41
4.2.1. Ana Malzemeye İlgili Faktörler	41
4.2.2. Karşı Malzemeye İlgili Faktörler, Aşındırıcının ve Ortamın Etkisi.....	41
4.3. AŞINMA VEYA YÜZEY DEFORMASYONU	42
4.4. AŞINMA MEKANİZMALARI	44
4.4.1. Adhesiv Aşınma.....	44
4.4.2. Abrasiv Aşınma	46
4.4.3. Tabaka Aşınması	46
4.4.4. Kayma Aşınması.....	46
4.4.5. Püskürtme Aşınması	47
4.4.6. Korozyon Aşınma	47
4.4.7. Yuvarlanma Aşınması	47
4.4.8. Yorulma Aşınması	47
4.4.9. Termik Aşınma	48
4.4.10. Kaviteasyon Aşınması	48
4.5. KURU SÜRTÜNMEDE ÇELİKLERİN GÖSTERDİĞİ AŞINMA DAVRANIŞLARI	48
 BÖLÜM 5	 51
DENEYSEL MALZEME VE METOT	51
5.1. DENEYSEL MALZEMELER	51
5.2. ELEMENTAL TOZLARIN TANECİK YAPILARININ İNCELENMESİ ..	52
5.3. ELEMENTEL TOZLARIN KARIŞTIRILMASI	53
5.4. TOZ KARIŞIMININ SOĞUK PRESLENMESİ	54
5.4.1. Presleme Kalıbı.....	54
5.5. SİNERLEME	55
5.6. YAŞLANDIRMA İŞLEMLERİ.....	57
5.7. KARAKTERİZASYON İŞLEMLERİ	57
5.7.1. Metalografik İşlemler	57
5.7.2. SEM, EDS ve XRD İncelemeleri	57
5.7.3. Sertlik Ölçümleri.....	57
5.7.4. Yoğunluk Ölçümleri	58

5.8. YAŞLANDIRMA SONRASI AŞINMA MİKTARLARININ ÖLÇÜMÜ	58
BÖLÜM 6	60
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA	60
6.1. MİKRO YAPI İNCELEMELERİ	60
6.1.1. Mo İlaveli Numunelerin SEM ve EDS İncelemeleri	60
6.1.2. Ta İlaveli Numunelerin SEM ve EDS İncelemeleri	61
6.1.3. Ti İlaveli Numunelerin SEM ve EDS İncelemeleri	63
6.2. YOĞUNLUK VE SERTLİK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ	65
6.2.1. Mo İlaveli Numunelerin Yoğunluk ve Sertlik Ölçümlerinin İncelenmesi	65
6.2.2. Ta İlaveli Numunelerin Yoğunluk ve Sertlik Ölçümlerinin İncelenmesi	67
6.2.3. Ti İlaveli Numunelerin Yoğunluk ve Sertlik Ölçümlerinin İncelenmesi	68
6.3. XRD ANALİZİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	69
6.3.1. Mo İlaveli Numunelerin XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	69
6.3.2. Ta İlaveli Numunelerin XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	70
6.3.3. Ti İlaveli Numunelerin XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	71
6.4. AŞINMA TEST SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	72
6.4.1. Mo İlaveli Numunelerin Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	72
6.4.2. Ta İlaveli Numunelerin Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	76
6.4.3. Ti İlaveli Numunelerin Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	82
BÖLÜM 7	88
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların işlem sırası.....	3
Şekil 2.2. Toz sıkıştırma kademeleri.....	14
Şekil 2.3. Metal kalıplarda presleme.....	15
Şekil 2.4. İzostatik presleme kalıbı.	16
Şekil 2.5. Toz haddeleme.....	17
Şekil 2.6. Sinterleme esnasında taneler arası bağların gelişimi.	19
Şekil 2.7. Potalı sinter fırınının şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.8. Toz metalurjisi tekniği ile üretimi yapılan bazı ürünlerin görüntüleri.....	22
Şekil 3.1. Paslanmaz çeliklerin Schaeffler diyagramı.....	25
Şekil 3.2. Ferrit içeriği ve katılaşma şeklinin belirlenmesi için kullanılan WRC diyagramı.....	34
Şekil 4.1. Tribolojik sistemin şematik gösterimi.	39
Şekil 4.2. Etkileşimli yüzeylerin gerçek ve görülen temas alanları.	40
Şekil 4.3. Yüzey aşınma ve bozulmalarının genel bir sınıflandırılması.	43
Şekil 4.4. Metal-metal sürtünmesinde yüzeyden parça kopması.	45
Şekil 4.5. Kuru sürtünmede çeliklerin gösterdiği aşınma davranışları.	49
Şekil 5.1. Presi Mecapol P262 marka polisaj cihazı.	52
Şekil 5.2. MEIJI ML 7100 marka optik mikroskop cihazı.	52
Şekil 5.3. Precisa XB220A marka hassas tartı.	54
Şekil 5.4. Turbula Shaker Mixer (Model T2F Glenn Mills) tipi karıştırıcı.	54
Şekil 5.5. Presleme kalıbı.....	55
Şekil 5.6. Tek eksenli 50 ton kapasiteli Hidroliksan marka pres.	55
Şekil 5.7. Thermal Technology GMBH marka ısıtma işlem fırını.	56
Şekil 5.8. 17-4 PH alaşımlarının sinterlenme sıcaklık zaman grafiği.	56
Şekil 5.9. SHIMADZU marka HMT (vickers) sertlik cihazı.	58
Şekil 5.10. Aşınma test cihazının şematik görünümü.	59
Şekil 6.1. Farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin mikroyapı SEM görüntüleri.	60

Şekil 6.2. Farklı miktarlarda Ta ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin mikroyapı SEM görüntüleri.	62
Şekil 6.3. Farklı miktarlarda Ti ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin mikroyapı SEM görüntüleri.	64
Şekil 6.4. Farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin a) yoğunluk değişimleri, b) sertlik değişimleri.	66
Şekil 6.5. Farklı miktarlarda Ta ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin a) yoğunluk değişimleri, b) sertlik değişimleri.	67
Şekil 6.6. Farklı miktarlarda Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin a) yoğunluk değişimleri, b) sertlik değişimleri.	68
Şekil 6.7. Farklı miktarlarda Mo içeren 17-4 PH paslanmaz çeliklerin XRD sonuçları.	69
Şekil 6.8. Farklı miktarlarda Ta içeren 17-4 PH paslanmaz çeliklerin XRD sonuçları.	70
Şekil 6.9. Farklı miktarlarda Ti içeren 17-4 PH paslanmaz çeliklerin XRD sonuçları.	71
Şekil 6.10. Farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin ağırlık kaybı ve aşınma oranları.	73
Şekil 6.11. Farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin sürtünme katsayıları.	74
Şekil 6.12. Farklı miktarlardaki Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin 30 N, 45 N'luk kuvvetler altındaki aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.	75
Şekil 6.13. Farklı miktarlarda Ta ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.	78
Şekil 6.14. Farklı miktarlarda Ta ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin sürtünme katsayıları.	79
Şekil 6.15. Farklı miktarlardaki Ta ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin 45 N'luk kuvvet altındaki aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	80
Şekil 6.16. % 0,60 Ta ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliğin 45 N'luk kuvvet altındaki aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonuçları.....	81
Şekil 6.17. Farklı miktarlarda Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.	83
Şekil 6.18. Farklı miktarlarda Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin sürtünme katsayıları.	84

Şekil 6.19. Farklı miktarlardaki Ti ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 4 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin 45 N'luk kuvvet altındaki aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	85
Şekil 6.20. % 2 Ti ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 4 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliğin 45 N'luk kuvvet altındaki aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonuçları.....	86



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. I. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler.....	27
Çizelge 3.2. II. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler.....	27
Çizelge 3.3. III. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler	28
Çizelge 3.4. Standart tip martenzitik paslanmaz çelikler.....	29
Çizelge 3.5. Martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.....	30
Çizelge 3.6. Süpermartenzitik paslanmaz çelik tipleri.....	31
Çizelge 3.7. AISI 200 ve 300 serisi ostenitik paslanmaz çelikler.....	32
Çizelge 3.8. Ticari olarak kullanılan dupleks paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri.....	34
Çizelge 3.9. Çökelti sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri	35
Çizelge 5.1. Elementel tozlar ve özellikleri	51
Çizelge 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan 17-4 PH paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri.....	53
Çizelge 6.1. Farklı oranlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin EDS analizi sonuçları	61
Çizelge 6.2. Farklı oranlarda Ta ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin EDS analizi sonuçları ...	63
Çizelge 6.3. Farklı oranlarda Ti ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin EDS analizi sonuçları ...	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

C	: karbon
Co	: kobalt
Cr	: krom
Cu	: bakır
Fe	: demir
Mg	: magnezyum
Mn	: mangan
Mo	: molibden
MPa	: mega paskal
Nb	: niobyum
Ni	: nikel
Si	: silisyum
Ta	: tantalyum
Ti	: titanyum
µm	: mikrometre

KISALTMALAR

EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
HMV	: Hardness Micro Vickers (Mikro Vickers Sertlik)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
T/M	: Toz Metalurjisi
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işını Difraksiyonu)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

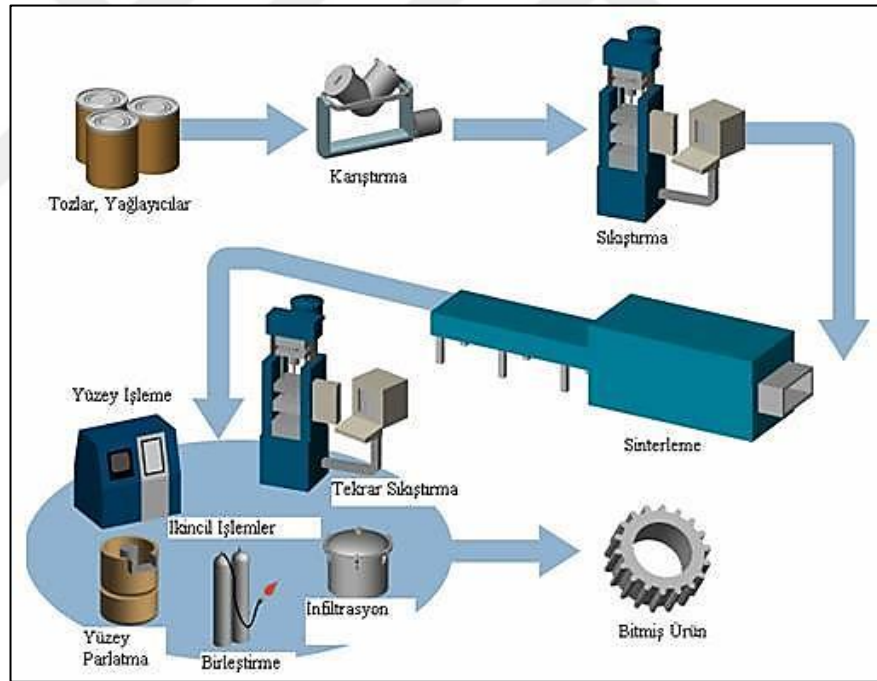
Sertleştirilebilir paslanmaz çelikler, paslanmaz çeliklerin korozyon direncini muhafaza ederek, yüksek mukavemet ve sertlik elde etmek amacıyla geliştirilmiş malzeme gurubunda yer alan malzemelerdir (Esfandiari ve Dong 2007). Çökelti mukavemetlendirilen paslanmaz çelikler ilk olarak 1940'larda üretilmiştir. Bu alaşımlar yaşlandırma ile sertleştirilebilmelerinden dolayı, özel uygulamalarda tercih edilmektedir. 17-4 PH (çökelti sertleştirmeli) paslanmaz çelik kimyasal bileşiminde alaşım elementi olarak % 17 Cr, % 4 Ni, % 3 Cu (% ağı.) içermektedir. Bu alaşım, iyi korozyon direnci ve düşük maliyetlerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Ping vd., 2006). 17-4 PH paslanmaz çeliği yapısal malzeme olarak yüksek mukavemet, kırılma tokluğu, iyi kaynaklanabilirlik ve işlenebilirlik özellikleri nedeniyle kimya endüstrisinde, enerji santrallerinde, hafif su reaktörlerinde (LWRs) ve basınçlı su reaktörlerinde (PWR) kullanılmaktadır (Wang vd., 2008). Ayrıca, petro-kimya endüstrisi, kimyasal işlem ekipmanları, uçak parçaları, bağlantı elemanları, pompa şaftları, santrifüj kompresör rotorları, kompresör pervane, nükleer reaktör parçaları, dişliler, kağıt fabrikası ekipmanları, füze parçaları ve jet motor parçalarında 17-4 PH paslanmaz çelikleri kullanılmaktadır (Ping vd., 2006). Bu alaşımların en büyük dezavantajları ise mekanik özelliklerinin sınırlı olmasıdır. Bu nedenle de tribolojik özellikleri zayıftır (Kochmanski ve Nowacki 2008). 17-4 PH paslanmaz çelikler nispeten düşük sertlik ve zayıf tribolojik özelliklerinden dolayı, gerilim altında ve sürtünmeye maruz kalan servis şartlarında kısa sürede deformasyona uğramaktadır. Bu olumsuz özelliklerin giderilmesi ve dayanımın artırılması için alaşımın mukavemetinin artırılması gereklidir. 17-4 PH paslanmaz çelikler de dayanım arttırıcı işlemlerin başında yaşlandırma işlemi gelmektedir. Fakat, yaşlandırma işlemi uygulanan alaşımın, korozyon özellikleri azalmaktadır. Diğer bir ifade ile, yaşlandırma işlemi uygulanan alaşımın, korozyon hassasiyeti de artmaktadır. Yaşlandırma işlemi ile birçok kullanım alanında istenen şartlar karşılanırken, türbin kanatları, yataklar ve hatta ortopedik cerrahi gibi bazı

uygulamalarındaki korozyona karşı iyi direnç gibi tasarım gereksinimleri karşılanamamaktadır (Esfandiari ve Dong 2007). Birçok yapısal parçanın üretiminde kullanılan 17-4 PH paslanmaz çeliklerin ekonomik ömrü, korozyon özelliğinin yanı sıra aşınma davranışı ile de yakından ilişkilidir. Aşınma direnci, en az akma mukavemeti veya kırılma tokluğu değerleri kadar önemli bir özelliktir (Gülsoy, 2007). Bu alaşımların dayanımlarının arttırılmasında yaşlandırma ısı işlemlerinin yanında, alaşımlama ile de dayanım artışı sağlanabilmektedir (katı eriyik mukavemetlenmesi). Bu amaçla 17-4 PH paslanmaz çeliklerin aşınma direncinin arttırılmasında Ta, Nb, Co, W ve Mo gibi refrakter metaller, alaşım elementleri olarak kullanılmaktadır (Xiao vd., 2012). Bu nedenle, yüksek Mo içeren alaşımlar, yüksek sıcaklıklardaki yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Kim vd., 2013). Mo, oda sıcaklığında veya altında ultra yüksek bir erime sıcaklığına ve yüksek sünek-gevrek geçiş sıcaklığına sahiptir (Kim vd., 2013). Bu çalışmada, toz metalurjisi (harmanlama/karıştırma) yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik malzemelerin dayanımını ve kullanım ömrünü attırmak için orijinal bileşime alaşım elementi olarak farklı miktarlarda Mo, Ta ve Ti ilave edilmiştir. Mo ilave edilen alaşımlara herhangi ek bir işlem uygulanmamıştır. Farklı miktarlarda Ta ve Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımlara ise yaşlandırma ısı işlemi uygulanmıştır. 480 °C’de ve farklı sürelerde yaşlandırılan 17-4 PH paslanmaz çeliklerde alaşım element miktarı ve yaşlandırma sürelerinin, alaşımların mikroyapı ve aşınma davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisi, metal tozlarının belirli miktarlarda karıştırılarak oda sıcaklığında hassas kalıplarda, uygun basınçlarda sıkıştırılması (presleme) ve atmosfer kontrollü fırınlarda pişirilerek (sinterleme) parça üretme metodudur. Parçalarda istenen diğer özellikleri elde etmek için sinterlemeden sonra kalibrasyon, çapak alma, yağlama ve ısıl işlem gibi farklı işlemler de uygulanabilir. Şekil 2.1’de toz metalurjisinin işlem basamakları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Toz metalürjisi ile üretilen parçaların işlem sırası (İnternet: muhendisalemi.com).

Sinterlenmiş parçalar, istenilen mekanik özelliklere ve yüzey kalitesine sahiptirler. Genel olarak bu yöntemle üretilen parçalara ilave işlemler gerekmez. Hammadde, hemen hemen % 100’e yakın oranlarda kullanılmış ve imalat masrafları çok düşük

seviyede tutulmaktadır. Daha fazla mukavemet ve hassasiyet istendiğinde ise parçalara bir sonraki aşamada ısıtılma işlemi ve kalibrasyon işlemleri yapılmaktadır. Toz metalurjisinin temel amacı, toz şeklindeki çok küçük metal ve metalik alaşımı parçacıkların preslenmesi ve sinterlenmesi yoluyla dayanıklı parçaların üretilmesidir.

Sinterleme işlemi, geleneksel yöntemlerle parça üretimindeki ergitmenin yerine, metal tozlarının ergime sıcaklıklarının altında bir sıcaklıkta yapılan bir işlemdir. Sinterlenen parçacıklar 1-4 µm arasındadır. Presleme işlemi, amaca göre oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda yapılabilir. Toz metalurjisi yöntemi küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri üretimine uygundur.

Toz metalurjisi, II. Dünya Savaşı'ndan sonra modern anlamda yeni bir parça üretim tekniği olarak teknolojiye yerini almıştır. Toz metalurjisi genellikle küçük boyutlu parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Toz metalurjisi ürünlerinin yaklaşık % 70'i otomotiv sektöründe, % 10'u iş makinelerinde, % 5'i tarım aletlerinde ve % 15'inde bazı ekipmanların üretiminde kullanılmaktadır.

Toz metalurjisi ile bazı üretim problemlerinin üstesinden gelmek mümkündür. Bunlar:

- Sünek hale getirilmiş refrakter malzemelerin üretimi,
- Amalgamlarda (civalı alaşım) kullanılan plastik malzemelerin üretimi,
- Sert ve aynı zamanda tok alaşımların üretimi,
- Bileşenleri birbiriyle zor karışan veya karışamayan elektrik kontakt malzemelerinin üretimi,
- Yağlama gerektirmeyen gözenekli yatakların üretimidir.

2.1. TOZLARIN HAZIRLANMASI

2.1.1. Ön İşlemler

Ön işlemler, malzemelere şekillendirmeden önce uygulanan elekten geçirme, tavlama, yağlayıcı ilavesi, harmanlama ve karıştırma gibi yapılması gerekli olan

işlemlerdir.

2.1.1.1. Metal Tozlarının Elekten Geçirilmesi

Birçok metal tozunun üretim işleminde, kontrol edilmesi gereken en önemli özellik toz boyut dağılımıdır. Çünkü, taşıma, akışkanlık, şekillendirilebilme, sinterleme oranı, boyutsal değişim ve mekanik mukavemet gibi özellikler, toz boyut dağılımına bağlıdır. T/M sektöründe parçacık boyut dağılımında en yaygın kullanılan metot elemedir. Toz parçacıklar, farklı aralıklardaki elekler kullanılarak sınıflandırılmaktadır (Başaran, 2007).

2.1.1.2. Tavlama

Metal tozların tavlama işlemi, en yaygın ısıtma işlemlerinden biridir. Üretim aşamasında birçok metalik toz, üretim yöntemine bağlı olarak kirlenmektedir. Karbon, oksijen ve azot gibi kirlilikler, ürünün sinterlenmemiş (ham) mukavemetini ve sıkıştırılabilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Metalik tozlara uygulanan tavlama işlemi ile parçacıkların üzerindeki ince oksit film tabakasının ve nemin giderilmesi hedeflenmektedir (Dunkley, 1998).

2.1.2. Tozların Harmanlanması ve Karıştırılması

Metal tozların harmanlanması, aynı nominal yapıdaki (aynı bileşime sahip) tozların birbirleriyle karıştırılması olarak tanımlanmaktadır. Karıştırma ise, iki veya daha çok sayıda farklı (kimyasal bileşimleri farklı olan) tozların karıştırılması olarak tanımlanmaktadır.

Tozlar, akma oranı, yoğunluk, şekillendirildikten sonra kalıptan çıkarmak için gerekli güç, sinterleme sonrası oluşan çekme (hacimsel daralma), mekanik mukavemet gibi birçok farklı özellikler gözönüne alınarak gruplandırılmaktadır. Parçayı oluşturan tozların karışımında, tane boyutu ve yoğunluğundaki çok küçük değişimler bile, malzemenin özelliklerini değiştirmektedir. Bu yüzden, T/M parça üreticileri, zamandan tasarruf sağlamak için farklı partilerde (aynı kompozisyonlar)

verilmiş olsa bile, aynı partide maksimum parça üretimini hedeflemektedirler (Dunkley, 1998).

2.1.3. Yağlayıcılar

Yağlayıcılar ve metalik tozlar (arzuya bağlı alaşım elementleri ile birlikte), homojen bir karışım sağlanması için karıştırılmaktadır. Karışım içerisine genellikle % 0,5-1,5 arası yağlayıcı ilave edilmektedir. Metalik stearatlar ve parafin sıkça kullanılan yağlayıcılardır. Yağlayıcı kullanmadaki amaç, toz kütleleri, takım yüzeyleri ve kalıp duvarları arasındaki sürtünmeyi düşürmek, tozların sıkıştırılması sırasında kolay kaymalarına sağlamaktır. Yağlayıcılar, parçanın her bölgesinde aynı yoğunluğun sağlanmasına yardımcı olmaktadır (İnternet: turkishpm.org).

2.1.4. Tozların Boyut ve Şekilleri

Metal tozları kullanılarak yapılan işlemlerde, kullanılan tozun boyut ve şekli üretilen malzemenin birçok özelliğini etkilemektedir. Bu nedenle, toz boyutlarının ölçülmesi gerekmektedir. T/M sektöründe en çok kullanılan toz ölçüm yöntemi, elek analizidir. Eleklerle, sadece toz boyut analizi değil aynı zamanda hangi oranda ve ne boyutta toz elde edildiği de belirlenmektedir (İnternet: turkishpm.org).

Üretilen tozların şekli ve boyutu, T/M ürünlerin optimum özelliklerini belirleyen ana faktörlerin başında gelmektedir. Tozların üretiminde kullanılan atomizasyon yöntemi, toz şeklinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Gaz veya hava atomizasyonu ile üretilen toz parçacıkları küresel şekilli olmasına rağmen, su atomizasyonu ile düzensiz şekilli toz parçacıkları üretilmektedir.

2.2. TOZ METALURJİSİ İLE PARÇA ÜRETİMİ

İnsanlarla malzeme arasındaki, ilişki insanoğlunun başlangıcına kadar uzanmaktadır. İnsanoğlu, kendini diğer varlıklardan ayırt eden zekâsı ve duyguları sayesinde, daima çevresindeki malzemeleri lehine kullanma yoluna gitmiştir. Özellikle son elli yıl içerisinde, uzay sanayi ve elektronik sanayisinin baş döndürücü bir şekilde ilerlemesi,

insanoğunu daha karmaşık malzemeler üretmeye yöneltmiştir. Bu mecburiyet, malzeme bilimineki gelişmeyi de zorunlu hızlandırmıştır. Mühendislik malzemelerinin kullanıldığı ortamlar ve yerler farklı olduğundan dolayı, malzemelerden farklı özellikler ve davranışlar sergilemesi istenmektedir. Malzemelerin üretimi genellikle geleneksel yöntemler ile (dökümle) yapıldığından dolayı istenilen özelliklere uygun malzemelerin üretimi zor veya problemlidir. Bu sebeple, parça üretimlerinde tercihen sinterleme metodu seçilmektedir. Metalik parçaların üretiminde, saf veya alaşımlardan elde edilen tozların yanında, metal bileşiklerden elde edilen tozlar da kullanılmaktadır.

Toz metalurjisi daha çok;

- Talaşlı imalat gerektirmeyen makine parçalarının,
- Sert metallerin,
- Takım çeliklerinin,
- Sermetlerin,
- Kaymalı yatakların,
- Gözenekli metal ve fitillerin,
- Sürtünme elemanlarının,
- Elektrik ve manyetik malzemelerin üretiminin yanında, diğer uygulamalarda da kullanılmaktadır.

2.3. TOZ METALURJİSİ İLE PARÇA ÜRETİMİNİN AŞAMALARI

2.3.1. Toz Hazırlama

Toz metalurjisinde kullanılan malzeme metaller, alaşımlar ve seramiklerdir. Bu tozların hazırlanmasında farklı yöntemler kullanılmaktadır. Başlıca yöntemler mekanik, elektrolitik, kimyasal ve atomizasyondur. Tozlar arasında tane büyüklüğü, tane şekli ve granülometrik düzen bakımından önemli farklar bulunduğundan dolayı, istenilen toz özellikleri dikkate alınarak toz üretimi yapılmaktadır (Ersümer, 1970). Mekanik yöntemle toz üretimi, kaba ve ince öğütme olmak üzere iki şekilde yapılır.

2.3.2. Kaba ve İnce Öğütme

Metalik tozların üretiminde kullanılan bu basit yöntem, metallerin tornalama, planyalama, frezeleme ve eğeleme gibi işlemlerde mekanik olarak küçük parçacıklar şekline getirilmesi ile yapılmaktadır. Fakat bu yöntemle üretilen demir ve magnezyum tozlarının, toz metalurjisinde önemli bir uygulaması yoktur.

Ham madde yeteri derecede kırılansa, kaba öğütmeden sonra ince öğütme yapılır. Çimento endüstrisindeki gibi sert maddelerin öğütülmesinde kullanılan donanım, toz metalurjisinde malzeme miktarı az olduğundan dolayı kullanılmamaktadır. Malzemenin cinsine göre sert seramiklerden yapılmış bilyalı öğütücüler veya sert alaşımla kaplı çelik öğütücüler kullanılmaktadır.

Ancak, az sayıda metal (manganez, krom, antimon, bizmut gibi) bilyalı öğütücülerde öğütülebilirler. Çeşitli nedenlerle bilyalı öğütücülerde öğütülemeyen metal tozları, başka yöntemler kullanılarak öğütülürler. Örneğin, mümkün olduğu kadar yüksek saflıkta demir cevherinden, direkt redükleme ile üretilecek sünger demir, bilyalı öğütücülerde istenildiği kadar ince bir toz haline getirilebilir. Diğer yandan, elektroliz yolu ile kırılkan ve küçük taneli elektrolitik demir de üretilebilir. Bu demirde bilyalı bir öğütücüde, istenen incelikte bir toz haline getirilebilir. Bu şekilde üretilen demir tozu, özellikle yüksek frekans bobinlerinin çekirdeklerinde kullanılır.

Demir-nikel alaşımlarının manyetik özelliklerinin yüksek olması ve çekirdeklerde sünek demir üretiminde kullanılabildikleri anlaşıncı, bu alaşımların toz metalurjisi ile üretimi gündeme gelmiştir. Kolay bir şekilde haddelenebilmeleri ve sıcak dövülebilmeleri için demir-nikel alaşımlarında Mn ve Mg ile birlikte, oksit ve kükürdün giderilmesi düşünülmüştür. Mn ve Mg ilavesine rağmen, malzeme belirli bir sıcaklığın üzerinde yine haddelenebilmektedir. Fakat haddeleme belirli bir minimum sıcaklığın altında yapıldığında malzeme parçacıklar haline gelmektedir. Küçük taneler üretmek için külçe, yüksek sıcaklığa kadar ısıtılır ve birkaç kez haddelenir. Bu nedenle, son haddeleme sıcaklığı, bu minimum sıcaklığın biraz üstünde seçilmelidir. Bu sayede, son haddeleme ile metal toz halini alır. Sünek metallerin bilyalı öğütücülerde öğütülmeleri zordur. Çünkü, öğütme sırasında iri

taneler daha büyümekte, küçük taneler ise öğütücü cidarlarına ve bilyalara yapışmaktadır. Tok bileşenli metallerin pervaneli öğütücülerde istenen granülometrik bileşiminde bir toz haline getirilebilmeleri, önemli bir ilerlemedir. Bu yöntem "Hametag yöntemi" denir. Bu yöntem tok metallerin (demir, bakır, alüminyum gibi) tozlarının hazırlanmasında, kaba toz haline getirilmiş, kırılğan metal ve alaşımların öğütölmelerinde kullanılır.

Pervaneli öğütücü, içinde karşılıklı iki mil üzerinde yüksek manganlı sert çelikten veya sinterlenmiş sert alaşımdan yapılmış birer pervane bulunan bir kaptan oluşur. Bu pervaneler ters yönde çok yüksek ve eşit hızla dönerler. Toz haline getirilecek malzeme böylece öğütölürken, meydana gelen iki ters ve çok hızlı gaz akımı da toz haline gelmiş parçacıkları sürükler. Öğütöcüler otomatik olarak yüklenebilirler. Öğütölen madde devamlı olarak elekten geçirilebilir. Toz parçacıklarının oksitlenmesini engellemek için, genellikle hidrojen ve azot gibi redükleyici veya inert (belirli şartlar altında kimyasal reaksiyona girmeyen) bir atmosfer kullanılmaktadır. Pervanelerin şekline, boyutuna ve dönüş hızlarına bağılı olarak farklı şekilli taneler ve granölometride tozlar üretilir. Bu tozların mükemmel sıkıştırılabilme özelliğı vardır. Kullanım alanlarına örnek olarak makine parçaları ve gözenekli yataklar gösterilebilir.

2.3.3. Granölasyon

Ergimiş bir metalden metalik tozlarının hazırlanmasında kolay uygulanan, maliyeti düşük bir yöntemdir. Granölasyon, suda granölasyon veya ergimiş metalin katılaşması sırasında karıştırılarak elde edilen granölasyon olarak ikiye ayrılır. Su içine ergimiş metalin dökölmesiyle elde edilen granölasyon, geçmişden bu zamana bilinen bir yöntemdir. Örneğın ergimiş kurşun suyla dolu kaba elekten geçirilerek dökölür. Kurşun damlaları daha düşerken, önemli bir soğumaya maruz kalırlar. Kurşuna arsenik katılarak damlaların uzamasının önüne geçilir.

Birçok metal katılaşırken karıştırıldığında toz haline gelir. Bu yöntem, kaba alüminyum tozlarının üretiminde kullanılmaktadır. Ergimiş alüminyumun soğuması sırasında mekanik olarak karıştırılır. Kadmiyum, çinko, kalay tozları da bazen böyle

üretir. Bu yöntemle kurşun kalay alaşımı tozlarıda hazırlanabilmektedir. Tozun hazırlanması denge diyagramındaki sıvı (likidüs) ve katı (solidüs) eğrileri arasındaki sıcaklık aralığındadır.

2.3.4. Atomizasyon Yöntemi

Bu yöntem, ergitilebilen tüm metallerden toz üretmek amacıyla kullanılabilmektedir. Üretim tekniği, sıvı metalin pota dibindeki bir delikten akışı esnasında, ergiyik metalin üzerine basınçlı sıvı veya gaz gönderilmesi ile sıvı metalin çok ince parçalara ayrıştırılarak katılaşmasını içermektedir.

Dünyada üretilen tozların % 80'inden fazlası atomizasyon metodu ile yapılmaktadır. Diğer üretim tekniklerine göre bu yöntemde, tane şekli, tane büyüklüğü ve dağılımın kontrolü çok kolaydır. Özellikle alaşım tozlarının üretimi için, çok uygun bir yöntemdir. Çünkü, en iyi homojenlik bu yöntemle sağlanabilmektedir.

Atomizasyon ile üretilen tozların inceliği, ergiyik metal üzerine gönderilen dağıtıcı hüzmelin basıncı ile ilgilidir. Basınç arttıkça sıvı metal daha fazla püskürtüldüğünden dolayı parçacıklara ayrılma daha fazla olmaktadır. Püskürtülen parçacıklar hızlı soğutulmalıdır. Aksi takdirde birbirine yapıştığı için istenen incelikte toz elde etmek zorlaşmaktadır. Bu yöntemle elde edilen tozların tane şekli, soğuma süresi, sıvı metal sıcaklığı ve atomizasyon türü ile yakından ilgilidir. Uzun soğutma süresi, yüksek sıvı sıcaklığı etkisiyle küresel tozlar elde edilirken, su atomizasyonu çabuk soğutma sağladığından karmaşık şekilli tozların oluşmasına neden olur. Atomizasyon yöntemi ile toz üretmede farklı teknikler kullanılır. Bunlar;

- Su atomizasyonu,
- Gaz atomizasyonu,
- Döner disk atomizasyonu,
- Döner elektrot atomizasyonudur.

2.4. FİZİKSEL VE KİMYASAL YÖNTEMLER

2.4.1. İndirgeme Yöntemi

Kimyasal indirgeme 1965 yılına kadar en sık kullanılan metal tozu üretim tekniği olmuştur. Bu yöntemle demir, bakır, volfram, molibden, nikel ve kobalt tozları üretilmektedir. Öğütülerek toz haline getirilen oksitler, indirgeyici ortamda uygun sıcaklıklara ısıtılarak indirgenirler. En düşük maliyetli indirgeyici ortam ise karbondur. Ancak hidrojen de aynı şekilde kullanılabilir.

Bu yöntem genellikle demir tozu üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca volfram ve molibden gibi yüksek sıcaklıklarda redüklenebilen bazı metaller için tek üretim yoludur. Ham madde olarak manyetit ve hadde oksitleri kullanılabilir. Üretim sırasında manyetit seramik kaplarda 1050-1200 °C arası sıcaklıkta fırınlarda birkaç gün bekletilmektedir. Kap içerisinde kok, kireçtaşı ve magnetit karıştırılır. Kireç taşı kükürdü absorbe eder. Fırında indirgeme sırasında CO gazı yanarak ısı verir ve indirgenmesinin tamamlanması ile sünger demir elde edilir.

İşlem sonunda kok ve kül, demir külçelerinden ayrılmaktadır. Sünger demir kırıldıktan sonra öğütülerek yabancı maddelerden temizlenir. Elde edilen tozlar 250 °C 'de hidrojen (redükleyici) ortamında tavlanarak, sinterleme ile birbirine bağlanır. Daha sonra sinter ürünü demir süngerini öğütülerek, istenilen tane büyüklüğüne getirilir.

2.4.2. Karbonil Yöntemi

Karbonil yönteminde CO gazı etkisi ile demir ve nikel karbonillerini veren metallerin tozları küçük taneli, yüksek saflıkta ve küresel şekilde olarak üretilmektedir. Üretilen tozların tane boyutları 2 µ - 10 µ aralığındadır.

2.4.3. Çökeltme Yöntemi

Çökelme sıvı veya tuz çözeltisinde yapılmaktadır. Çökeltme metodu hidro-metalurji olarak adlandırılmaktadır. Çözeltiden önce bir hidroksit çökeltir ve sonra bu hidroksit ısıtılarak parçalanır. Günümüzde bakır, nikel ve kobalt tozları hidro-metalurji yöntemi ile üretilmektedir (Sarıtış, 1991).

Reaktif metal tozlarının üretiminde, gazdan çökeltme yöntemi uygulanır. Bu yöntemle W, Nb, V, Ti, Zr gibi metal klorürler, oksitler ve florürler, hidrojen ile reaksiyona sokularak istenen tozlar üretilmektedir.

2.4.4. Elektroliz Yöntemi

Ergimiş bir tuzun elektrolizi ile metalik tozların üretimi, yaygın kullanılan bir yöntemdir. Sulu çözeltilerin elektrolizi demir, bakır, kurşun ve kalay tozlarının üretimine uygundur. Direkt olarak metal tozunun üretilebilmesi için akım şiddetinin ve (elektrolit çözeltisinin hızlı hareket etmesi) banyo sıcaklığının yüksek olması gerekir. Ayrıca, banyoya bazı kolloidal maddeler ilave edilmektedir. Elektroliz yöntemi vanadyum, niyobyum, tantal, titanyum, zirkonyum ve uranyum tozlarının üretiminde tercih edilmektedir.

Elektroliz kabında bakır sülfat ve sülfirik asitten oluşan elektrolit ve bakır anot ile antimonlu kurşun katotlar bulunmaktadır. Anot, tozu üretilecek metalden oluşur. Devreye akımın verilmesi ile reaksiyon başlayarak anottan kopan parçacıklar katotta toplanırlar. Katot üzerindeki toplanma, ya gevşek bağlantılı toz halinde (bakır, gümüş gibi) veya sıkı ve gevrek bir tabaka halinde (demir ve magnezyum gibi) meydana gelir. Her iki durumda da katotta toplanan metal, kolaylıkla toplanıp öğütülerek toz haline getirilmektedir.

Elektrolizle elde edilen tozlar yıkanarak elektrolitten ve tuzlardan iyi bir şekilde temizlenmektedir. Kurutma işlemi, asal gaz altında yapılarak oksitlenmenin önüne geçilmelidir. Elektroliz metodu ile çok yüksek saflıkta toz üretilmekle birlikte

(% 99,5) üretim maliyetinin yüksekliği, bu yöntemin kullanılabilirliğini sınırlamaktadır (Kurt, 1994).

2.4.5. Diğer Fiziko-Kimyasal Yöntemler

Oksitlerin veya diğer metalik karışımların yüksek sıcaklıkta ayrıştırılması ile de metal tozları üretilmektedir (gümüş, altın, kurşun ve platin tozlarının Ag_2O , Au_2O_3 , PbO ve PtO_2 'den üretimi).

Metal hidrür (kalsiyum hidrür gibi), metalik bir oksit (titan veya zirkonyum oksit) üzerine etki ederek ve oluşan hidrürü ayrıştırarak, metalik toz üretimi yapılabilmektedir (Ersümer, 1970).

2.5. PRESLEME

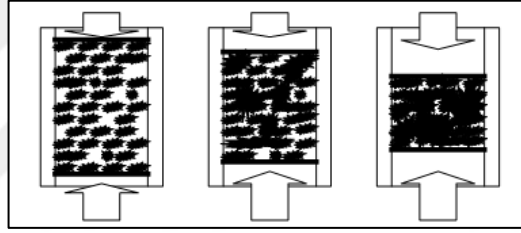
Teorikte düzlemsel ve iki temiz yüzeyin temasıyla oda sıcaklığında birleştirilmesi prensipte mümkündür. Metallerin yüzeyinde oluşan oksit tabakaları gibi olumsuz etkenler olmasa da adhezyon kuvvetlerinin etkili olması için yüzeyler arasındaki mesafe çok az olmalıdır. Metal tozlarından parça üretmek için tozlar, üretimi istenen parça geometrisine uygun olarak şekillendirilir. Tozlar arasında bağ oluşturmak amacıyla sıkıştırılırlar. Presleme ile parçaya sadece şekil verilmektedir. Gerekli mukavemet, ancak sinterlemeden sonra elde edilmektedir. Tozların şekillendirilmesinde pek çok yöntem vardır. Bunlar genelde basınçsız yöntemler ve basınçlı yöntemler olarak ikiye ayrılabilir.

Basınçsız yöntemlerde toz bir kalıp içine doldurulup gevşek halde doğrudan sinterlenir veya çok ince küresel tozlar akışkan bir taşıyıcı yardımıyla karıştırılıp döküm yoluyla şekillendirilir. Ancak bu metodun bugün ticari kullanım alanı yok denilecek kadar azdır.

Basınçlı yöntemler soğuk veya sıcak olarak gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler genellikle kalıplarda presleme, izostatik presleme, haddeleme, ekstrüzyon, metal injeksiyon kalıplama gibi yöntemlerdir.

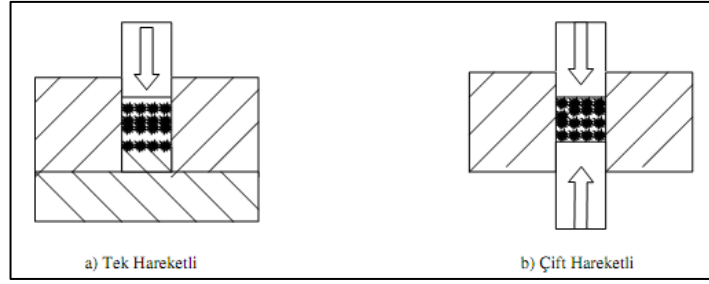
2.5.1. Metal Kalıplarda Presleme

Metal tozları şekillendirilecekleri kalıplara doldurulduklarında belirli bir yoğunluğa ulaşmaktadır. Bu görünür yoğunluk tozun şekline, tane büyüklüğüne, tane dağılımına ve katkı maddelerine bağlıdır. Basıncın uygulaması ile kalıp içindeki toz kütlesinin yoğunlaşması üç aşamada oluşur. İlk aşamada tozlar yer değiştirerek daha yoğun bir paketlenme meydana getirirler. Artan basınçla birlikte ikinci aşamada (tozlarda) önce elastik ve daha sonra plastik şekil değişimi meydana gelmektedir. Çok yüksek basınçlarda plastik deformasyona uğrayan tane sayısı artarken, yoğunlaşmanın üçüncü aşamasına geçilir. Bu aşamada, gevrek tozlar kırılarak küçük toz tanecikleri oluşturur ve gözenekleri doldurarak yoğunluk artışına katkı sağlamaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Toz sıkıştırma kademeleri (Koç, 2002).

Sıkıştırma esnasında toz ara yüzeylerinde ve toz ile kalıp duvarı arasında meydana gelen sürtünme, zımbanın uyguladığı kuvvetin tozlara aktarılmasını azaltır ve zımbadan uzaklaştıkça yoğunlukta azalma meydana gelir. Boy/çap oranı arttıkça parçaların alt uçlarında yoğunlaşmayı sağlamak zorlaşır. Uzun parçalar, Şekil 2.3’de görüldüğü gibi, çift hareketli zımbaların kullanıldığı kalıplarda sıkıştırılmalıdır.

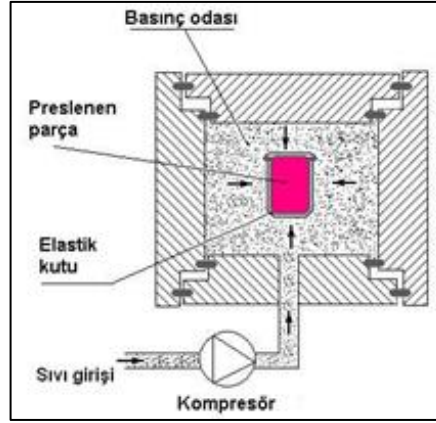


Şekil 2.3. Metal kalıplarda presleme (Koç, 2002).

Homojen yoğunluk elde etmek ve sıkıştırılabilirliği artırmak için toza bazı yağlayıcıların ilave edilmesi gerekir. Kullanılan yağlayıcılar; metal stearat ve stearik asittir. Karbon ilavesinin sorun olmadığı durumlarda grafit katı yağlayıcı olarak kullanılabilir. Kalıp malzemesi kaliteli takım çeliğinden yapılmalıdır. Çünkü, sıkıştırma sırasında tozların kalıp duvarını çizmesi veya aşındırması söz konusudur.

2.5.2. İzostatik Presleme

İzostatik presleme, tozların bir akışkan basıncı yardımıyla sıkıştırılmasıdır. Presleme genellikle bir yağ veya su içinde ve oda sıcaklığında CIP (Cold Isostatik Pressing) yapılmaktadır. Üretilmek istenen parça şeklinde bir esnek kalıp hazırlanarak içi tozla doldurulmaktadır. Kalıp içerisindeki hava boşaltılıp gerekli sızdırmazlık sağlandıktan sonra, basınç kazanına bırakılır. İzostatik preslemede kalıp duvarı sürtünmeleri olmadığından ve basınç her yönde eşit olduğundan dolayı, yoğunluk dağılımı ve mekanik özellikler izotropiktir. Bu yönetimin dezavantajı, hassas boyutsal toleransın elde edilememesi ve uzun süreli olmasıdır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. İzostatik presleme kalıbı (İnternet: sakarya.edu.tr).

İzostatik presleme basıncın uygulandığı ortam, oda sıcaklığında ise “soğuk izostatik presleme”, yüksek sıcaklıkta olduğunda ise “sıcak izostatik presleme” olarak adlandırılmaktadır.

2.5.2.1. Sıcak İzostatik Presleme

Sıcak izostatik presleme, yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlarda, toz taneciklerinin kuvvetli difüzyon bağları oluşturarak yoğunlaşması ile gerçekleşen bir şekillendirme yöntemidir. Başka bir ifade ile, yoğunlaşma ve sinterleme birlikte gerçekleşmektedir.

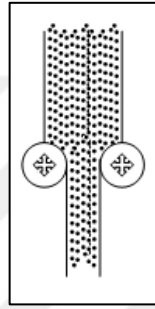
Basınç altında en çok kullanılan ortam argon ortamıdır. Fakat yüksek sıcaklıklarda helyum ve azot gazları da kullanılmaktadır. Basınç 20-300 MPa arasında değişmektedir. Özel durumlarında basınç 1000 MPa’a çıkabilmektedir (Ekşi ve Sarıtaş, 1996).

2.5.2.2. Soğuk İzostatik Presleme

Soğuk izostatik presleme, esnek bir kalıp içerisine doldurulan tozlara oda sıcaklığında yüksek akışkan basıncının uygulandığı bir işlemdir. Basınç oluşturmak için su veya yağ kullanılmaktadır. Basınç oranı 210 MPa’dan, 410 MPa’a kadar değişmektedir. Fakat özel durumlarda basınç 760 MPa’a kadar çıkmaktadır. Sıkıştırılan toz kütlelerinin ortalama teorik yoğunluğu % 60-80 arasındadır.

2.6. HADDELEME

Haddeleme malzemeyi, kendi eksenleri etrafında dönen silindirik şekle sahip iki merdane arasından geçirerek gerçekleştirilen plastik şekil verme işlemidir. Şekil 2.5'te toz haddeleme işlemi şematik olarak verilmektedir. Metal tozları bir besleme ünitesinden (şekilde görüldüğü gibi) haddelerin arasına akıtılarak sıkıştırılmaktadır. Bu sayede de sürekli şekillendirme gerçekleştirilmektedir. Haddelenerek şekillendirilen parçalar sonradan sinterlenirler.



Şekil 2.5. Toz haddeleme (Koç, 2002).

2.7. EKSTRÜZYON

Metal tozlarının ekstrüzyonla şekillendirilme uygulamaları sınırlıdır. Ekstrüzyon yönteminde tozlar kapalı bir kap içine doldurulduktan sonra, kabın içerisindeki hava vakumlanır. Tozlar kap içerisinde ısıtılarak, ekstrüzyon yoluyla parça üretimi gerçekleştirilir. Ekstrüzyon sıcak ve soğuk olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır.

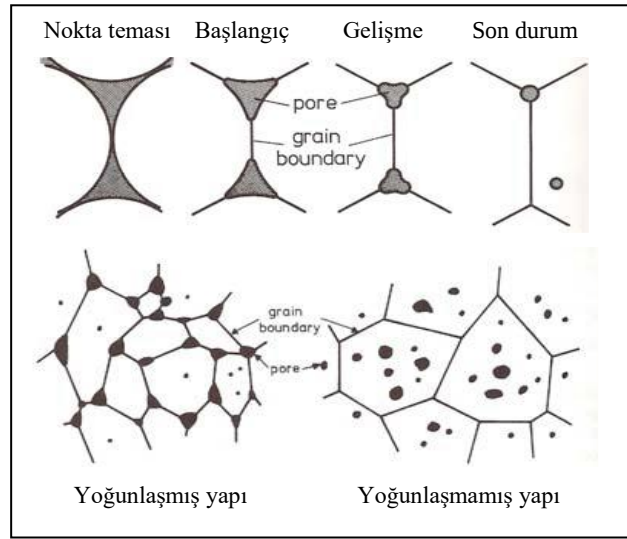
Soğuk ekstrüzyonda, oda sıcaklığındaki tozlara basınç uygulanarak, tozlar arasında mekanik bağlar oluşturulmaktadır. Üretilen bu parçalar daha sonra sinterlenirler. Sinterlenen parçalarda hacimsel daralmalar meydana geldiği için üretilen parçanın boyutsal kontrol problemi söz konusudur.

Sıcak ekstrüzyonda ise metal tozları, yüksek sıcaklıklar kullanılarak üretim gerçekleştirilmektedir. Daha önceden alaşımlandırılan tozlar, sıcak ekstrüzyonla şekillendirilmektedir. Bu yöntemle üretilmiş parçalarda, sinterlemeye gerek yoktur. Sünük metaller soğuk, sert metaller ise sıcak ekstrüzyonla şekillendirilmektedir.

2.8. SİNERLEME

Sinterleme, soğuk preslenerek ön şekillendirilen parçaların atmosfer kontrollü bir ortamda ve yüksek sıcaklıklarda pişirilerek yapılan bir mukavemetlendirme işlemidir. Presleme sırasında toz yüzeylerindeki sürtünmeden dolayı soğuk olarak kaynaklanmalar olmaktadır. Ham mukavemetteki amaç, parçanın bozulmadan kalıptan çıkmasını sağlamaktır. Presleme ile şekillendirilen parçalarda sinterleme ile tozlar, mekanik kilitlenme ile mukavemet kazanmaktadır. Parçaların kullanıldığı yerdeki gerekli mukavemet ise sinterleme ile elde edilmektedir. Ham mukavemet ile sinterleme sonrası mukavemet arasında yaklaşık 100 katının üzerinde fark vardır. Sinterlemede toz taneleri arasında mekanik bağlar oluşmaktadır. Sinterleme, sıkıştırılarak şekillendirilen ham parçalar malzemenin ergime sıcaklığının altında bir sıcaklığa ısıtılarak mukavemet kazandırılmaktadır. Bu sıcaklık malzemelerin çoğunda ergime sıcaklığının yaklaşık olarak % 70-80 arasında, bazı refrakter malzemelerde sinterleme sıcaklığı ergime sıcaklığının yaklaşık % 90'nına kadar ulaşabilmektedir. Demir ve çelik malzemeler için sinterleme sıcaklıkları 1100–1200 °C, bronz için ise 800 °C'dir.

Sinterleme sıcaklığı ile sinterleme süresi arasında yakın bir ilişki vardır. Sinterleme süresi kısa tutulduğunda sıcaklık arttırılmakla sıcaklık düşük tutulduğunda süre arttırılmaktadır.



Şekil 2.6. Sinterleme esnasında taneler arası bağların gelişimi (German, 1989).

Sinterleme başlangıcında (Şekil 2.6’da görüldüğü gibi) toz parçacıkları birbiri ile temas halindedir. Sinterleme süreci başlangıç, gelişme ve son durum olmak üzere üç aşamada tamamlanmaktadır.

Gözenekler içine haps olan gazlar, son yoğunlaşmayı sınırlandırmaktadır. Son aşamada % 92’yi geçen oran teorik yoğunluk elde edilebilmektedir. Sinterleme sırasında yapıda bazı değişimler olmaktadır. Toz taneleri arasında meydana gelen difüzyon sonucu, mekanik bir bağ oluşmaktadır. Farklı bileşimlerdeki tozların karıştırılması halinde, difüzyon metaller arası fazların ve katı çözelti alaşımlarının oluşmasına neden olmaktadır. Yüksek sıcaklıkta birbirleriyle temas halindeki yüzeyler arasında atomlar arası bağ teşekkül eder ve atomların her iki yönde hareketi ile bağ kuvveti artmaktadır. Aynı zamanda plastik ve viskoz akış (akışkanlığı düşük, kısmi ergime) meydana gelebilir. Buna bağlı olarak kütsel difüzyon ile boşlukların boyutları küçülür. Böylece parçanın hacmi azalır ve yoğunluğu da artar. Düşük ham yoğunluğa sahip parçalarda ise büzülme (hacimsel daralma) daha fazladır. Isıtma sırasında faz dönüşümü olursa, hacimsel daralma ihmal edilebilir. Bazı durumlarda ise büyüme görülebilir. Pres kalıplarının boyutları, büzülme oranları dikkate alınarak belirlenmektedir.

2.8.1. Sinterleme Atmosferi

Sinterleme işleminde elde edilmek istenen mekanik özellikler için farklı sinterleme atmosferleri kullanılmaktadır.

Bu atmosferler;

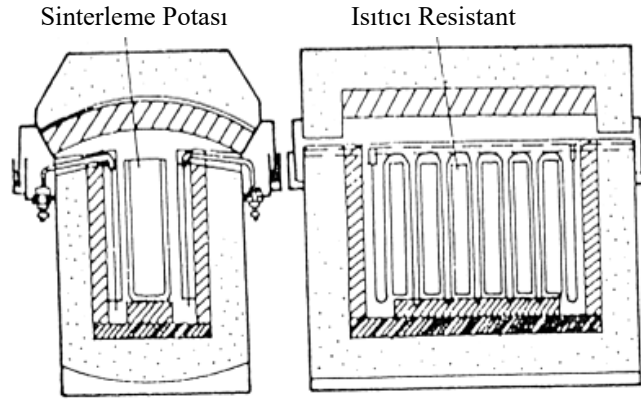
- Oksitleyici atmosferler: Hava, CO₂, su buharı (H₂O),
- Redükleyici atmosfer: Hidrojen, CO, metan (CH₄) ve amonyak,
- Nötr atmosfer: Vakum, helyum, argon, azot,
- Nitrürleyici atmosfer: Amonyak (NH₃); bazen çelikler, çelikle azotun reaksiyonunu önlemek için azottan arındırılmış atmosferdir.

Bazen bu gazların karışımları da kullanılmaktadır. Örneğin bir CO ve CO₂ karışımı aynı zamanda oksitleyici, redükleyici veya karbon gidericide olabilmektedir. Gaz karışımlarının etkisi sinterleme sıcaklığına ve sinterlenen malzemeye bağlıdır. Metan gazı ile çalışıldığında, bu gaz azot atmosferi oluşturduğundan dolayı paslanmaz çelik ve krom alaşımlı çeliklerin sinterlenmesinde metan gazının kullanımından sakınılmalıdır.

2.8.2. Sinterleme Fırınları

Toz metalurjisi yönteminin yaygınlaşması ile farklı özelliklere sahip sinterleme fırınlarının üretimine başlanmıştır. Deneyimler sonucu doğrudan beslemeli fırınlar, sinter işlemlerinde yaygın kullanım alanı bulmaktadırlar. Modern sinter fırınlarının temeli bu fırınlara dayanmaktadır. Sinter fırınlarının tasarımında şu faktörler dikkate alınmaktadır (Şekil 2.7).

- Sinterleme sıcaklığı,
- Sinterleme atmosferi,
- Üretim kapasitesi,
- Devamlılık.



Şekil 2.7. Potalı sinter fırınının şematik gösterimi (Koç, 2006).

2.9. SİNERLENMİŞ ÜRÜNLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ERGİME İLE ELDE EDİLENLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Sinterlenen ürünlerin yapılarına bakarak, bu malzemelerin özellikleri hakkında fikir edinmek zordur. Ergime ve sinterleme ile elde edilen metaller arasındaki en belirgin fark, sinter ürünlerinin daha gözenekli olmasıdır. Gözenekler, artan sinterleme sıcaklığı ile azalmakla birlikte sıcak dövme gibi bazı işlemlerle tamamen yok edilebilmektedir. Sıcak dövülmüş sinter ürünlerinin yapıları, farklı yöntemlerle üretilmiş ürünlerin yapılarına benzemektedir.

Sıvı faz sinterlemede yoğunluk, diğer yöntemlerle yapılan üretimlerin yoğunluğuna yakın olsada teorik olarak yine de yapıda gözenek bulunması kaçınılmazdır. Sinter ürünlerle, geleneksel yöntemlerle üretilen metallerin yoğunlukları arasındaki fark gözenekliliğin bir ölçüsü olsa da, gözeneklerin şekli ve boyutları hakkında bir fikir vermez. Hâlbuki gözenekler birçok farklı özelliklerde etki etmektedir. Gözeneklilik, tanelerin şekil ve büyüklüğüne, presleme basıncına, sinterleme sıcaklığı ve atmosfere bağlıdır. Bu sebeple, sinter ürünlerinin özellikleri ergime ile elde edilen metallerinkine nazaran daha büyük farklılık göstermektedir.

Sinterlenmiş ürünlerin kopma uzamaları düşüktür. Fakat bu özellik sinterlemeden sonra yapılan sıcak veya soğuk presleme işlemi ile artırılabilir. Sinterlenmiş metalin kopma uzamasının düşük olması, toz tanelerinin tamamen birleşmemesinden kaynaklanmaktadır. Aynı sebeple, sinterlenmiş ürünlerin çekme mukavemeti ile

uzaması arasındaki bağıntı ergime ile üretilen ürünlerden farklıdır. Çünkü, tanelerin sürekliliği sınırlıdır. Bu sebeple yapı gözeneklidir. Sinterlenmiş bakır parçalarındaki gözenekliliğe rağmen, beklenmedik şekilde, yorulmaya karşı ergime ile üretilen metal kadar, hatta daha fazla mukavemet göstermişlerdir (Koç, 2006). Yoğunlukla beraber, elektrik iletkenliği de sinter ürünlerinin önemli özelliklerindendir. Elektrik iletkenliği, presleme ve ısıtma sırasında, toz parçacıklarının birleşme şekli, gaz baloncuklarının oluşması ve yapıdaki oksitler hakkında fikir verebilir. Belirli bir sıcaklıkta tanelerin ani olarak büyümesi, sinterlenmiş ürünleri diğer yöntemlerle üretilen metallere ayıran en önemli özelliktir. Yüksek sinterleme sıcaklıklarında, kristalleşme sonucunda iri taneler meydana gelmektedir. Bu durum, yoğunluk ve mekanik mukavemet gibi özelliklere etki etmektedir.

Sinterlenmiş toz metalik malzemelerin en önemli dezavantajı gevrek olmalarıdır. Dinamik yük uygulamalarının olduğu parçaların sinterlemeden sonra tam yoğunluğa ulaşmaları gerekir. Dövme işlemi sıcak ya da soğuk olarak yapılabilir. Parça kuvvet altında plastik şekil değiştirerek istenen son şekli alırken, bir yandan da tam yoğunluğa ulaşmaktadır.

Şekil 2.8’de toz metalurjisi tekniği ile üretilen bazı ürünlerin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.8. Toz metalurjisi tekniği ile üretilen bazı ürünlerin görüntüleri (Koç, 2006).

2.10. TOZ METALURJİSİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

2.10.1. Toz Metalurjisinin Avantajları

- Talaş kaldırma işlemlerini azaltarak veya ortadan kaldırarak hurda kayıplarını azaltır.
- Ergime kayıpları yoktur.
- Dar toleranslarda, düzgün yüzeyli parçalar meydana getirilebilir.
- Yoğunluk ve ergime noktasındaki farklılıklar sebebiyle, diğer yöntemlerle üretimi mümkün olmayan alaşım veya karışımlar üretilebilirler.
- Aşınma mukavemetini artırmak için üretilen parçaların gözeneklerine yağ emdirilebilir.
- Seri üretime uygundur.
- Daha ekonomik üretim yapılabilmektedir.
- Fiziksel ve mekanik özelliklerde (tane büyüklüğü, boşluk olmaması, çekme mukavemetinin artması, iyi islenebilme özelliği vb.) iyileşme sağlanabilmektedir.

2.10.2. Toz Metalurjisinin Dezavantajları

- Tozların kalıp içindeki akışı sınırlı olduğundan, parçanın şekli sınırlayıcı bir etken oluşturabilir.
- Kompleks şekilli parçaların yoğunluğu her yerde aynı olmayabilir.
- Üretilen parçaların mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için ek işlemlere gerek duyulabilir.
- Metal tozları, ingot halindeki malzemelerden daha maliyetlidir.

BÖLÜM 3

PASLANMAZ ÇELİKLER

Alaşımsız ve düşük alaşımlı çelikler, atmosferik ortam etkisi ile oksitlenirler veya korozyon farklı ortamların etkisiyle korozyona uğrarlar. Bu tür malzemelerden yapılmış yapı elemanlarını tahribattan korumak için, ilave önlemlerin de alınması gerekir. Ancak teknikte, pasif korozyondan korunmanın yeterli olmadığı ve malzeme seçiminin diğer koşulları sağlayamadığı alanlar da vardır. Böyle durumlarda paslanmaz veya aside dayanıklı çelikler kullanılarak sorun çözümlenir (Topbaş, 1993).

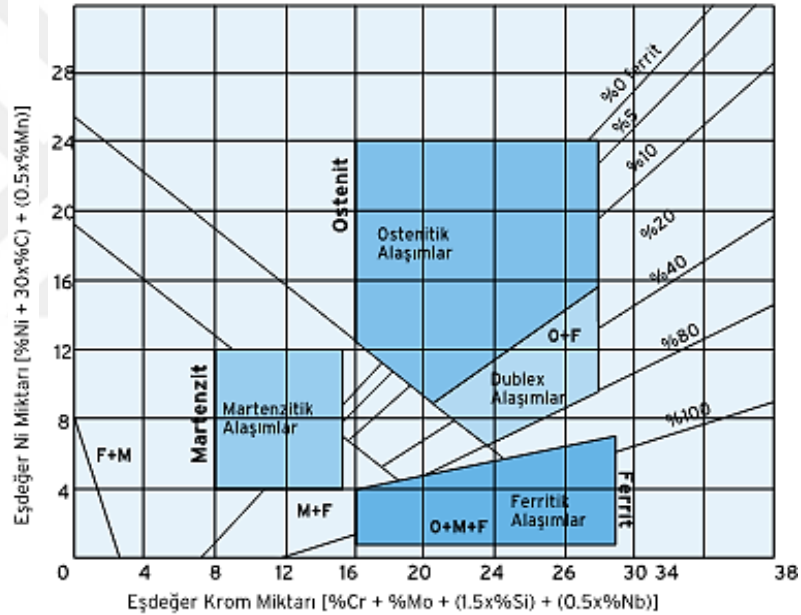
3.1. PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler, korozyona karşı mükemmel dirençleri nedeniyle tercih edilirler. Paslanmaz çelikler, en az % 12 Cr içerirler. Krom oksijenle etkileştiğinde ince bir koruyucu krom oksit katmanı oluşturmaktadır (Erdoğan, 1998). Yüksek alaşımlı çelik grubuna giren paslanmaz çelikler, yüksek oranlarda krom ve nikel içerirler. Bu çelikler hem korozyona hem de ısıya dayanıklıdır. Paslanmaz çeliklerin korozyon direncinin yüksek olması, yüzeylerinin ince ve kararlı krom oksit veya nikel oksit filmlerinin oluşmasından kaynaklanmaktadır.

Paslanmaz çelikler, yüksek miktar krom içerdiklerinden dolayı üçlü Fe-Cr-C alaşım sisteminde yer almaktadırlar. Bu çeliklerin ısıtım özellikleri, kimyasal bileşimlerine bağlıdır. Genelde paslanmaz çelikler martenzitik, ferritik ve ostenitik paslanmaz çelikler olmak üzere üç ana gruba ayrılırlar (Savaşkan, 2004). Paslanmaz çelikler, esas olarak Fe-Cr, Fe-Cr-C ve Fe-Cr-Ni ikili veya üçlü faz denge sistemlerine sahiptirler. Fakat mikro yapı ve özelliklerini etkileyen birçok alaşım elementi de içermektedir. Bu alaşımlarda “paslanmazlık özelliği” öncelikle (% 12’den daha yüksek) Cr miktarına bağlıdır. Bu oranlarda malzemenin yüzeyinde

kromca zengin oksit tabakası meydana geldiği için malzeme ortam şartlarının etkisinden korunmaktadır (Lippold, 1993).

Paslanmaz çeliklerde istenilen mikro yapı ve diğer özelliklerinin elde edilebilmesi için Mn, Si, Mo, Ni, Ti ve N gibi alaşım elementleri kullanılmaktadır. Paslanmaz çeliklerin mikro yapısı üzerine bileşimin etkisini ayrıntılı olarak tanımlamak amacıyla, Cr ve Ni eşdeğerliği kavramı geliştirilmiştir. Şekil 3.1’de Cr ve Ni eşdeğerliklerinin karşılıklı olarak verildiği Schaeffler diyagramı, paslanmaz çeliklerin kaynağında mikro yapı ve bileşim arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Schaeffler diyagramı, paslanmaz çeliklerin yol haritası olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 3.1. Paslanmaz çeliklerin Schaeffler diyagramı (İnternet: saritas.com.tr).

Paslanmaz çelikler; mikro yapılarına göre ferritik, martenzitik, ostenitik ve dupleks çelikler olarak sınıflandırılırlar. Ayrıca, çökelme sertleşmeli martenzitik ve ostenitik tip çelikler de, çökelme sertleşmesi gösteren çelikler olarak sınıflandırılmıştır (Lippold, 1993). Paslanmaz çeliklerde Ni, C, Co, Mn ve N ostenit oluşumunu, Cr, Si, Mo, Be, B ve Nb gibi elementler ise ferrit oluşumunu artırmaktadır (Yıldırım, 1984; Yıldırım vd., 2001).

3.1.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler SAE–AISI 400 serisi paslanmaz çelikler sınıfındandır. Bu çelikler genellikle % 11-28 arasında Cr miktarına sahiptirler (Krysiak vd., 1993). Ferritik paslanmaz çeliklerin tamamı, ergime sıcaklığından oda sıcaklığına kadar ferritik olarak bilinen hacim merkezli kübik (hmk) kristal kafes sistemine sahiptirler. Yüksek Cr miktarına sahip alaşımlar, istenilmeyen tetragonal sigma (σ) fazının çökmesiyle gevrekleşebilirler. σ fazı, yaklaşık 440 °C gibi düşük bir oluşum sıcaklığına sahiptir. Yüksek saflıktaki ferritik paslanmaz çeliklerde, Cr ve Mo içeriği σ -fazının çökme sıcaklığını yaklaşık 1000 °C'ye kadar yükseltir (Krysiak vd., 1993).

Ferritik paslanmaz çelikler, ostenitik paslanmaz çeliklerden daha yüksek akma dayanımı ve daha düşük süneklığe sahiptirler. Oda sıcaklığında korozyon direncinin gerekli olduğu uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılırlar. Ferritik paslanmaz çelikler, ostenitik paslanmaz çeliklerden daha ucuzdurlar (Mohandas vd., 1999).

Ferritik paslanmaz çeliklerin darbe tokluğu üzerine parça kalınlığının önemli bir etkisi vardır. Bu çeliklerde, soğutma hızına bağlı olarak karbür ve nitrür çökelmeleri tane sınırları boyunca aynı hızda, matriste ise rastgele dağılıma sahiptir. Bu yüzden tane boyutu, süneklik ve tokluk açısından önemli bir faktördür (Krysiak vd., 1993). Ferritik paslanmaz çelikleri üç grupta toplanabilir. I. grup alaşımlar, standart ferritik paslanmaz çeliklerdir. II. grup alaşımlar, standart alaşımların biraz değiştirilmiş versiyonudur. III. grup alaşımlar ise çok düşük oranda ara yer elementi (C, N ve O) içerirler (Krysiak, 1993).

I. grup ferritik paslanmaz çelikler, korozyon ve yüksek sıcaklıklarda pul pul dökülmeye, yani hidrojen kırılabilirliğine karşı dayanıklıdır. Çizelge 3.1'de standart tip I. grup ferritik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri görülmektedir. Bu alaşımların kaynak işlemi sonrası martenzitik durum ve tane büyümesinden dolayı korozyon direnci, tokluk ve sünekliliğinin azaldığı bilinmektedir. Bu alaşımların kaynağında ön ısıtma ve kaynak sonrası ısıtma işlemi gereklidir.

Çizelge 3.1. I. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler (Krysiak vd., 1993).

Tipi	% Bileşim			
	C	Cr	Mo	Diğer
429	0.12	14.0-16.0	-	-
430	0.12	16.0-18.0	-	-
430 F	0.12	16.0-18.0	0.6	0.06 P
430 FSe	0.12	16.0-18.0	-	-
434	0.12	16.0-18.0	0.75-1.25	0.6 Nb + Ta
436	0.12	16.0-18.0	0.75-1.25	-
442	0.20	18.0-23.0	-	-
446	0.20	23.0-27.0	-	-

II. grup ferritik paslanmaz çelikler kaynak edilebilirliği düzeltmek ve diğer özelliklerin geliştirilebilmesi için, standart tip ferritik paslanmaz çeliklerin biraz değiştirilmiş halidir. Bu gruptaki ferritik paslanmaz çelikler, daha düşük oranda C ve Cr miktarına sahiptir. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamaları ve aynı zamanda tarımsal ilaçlama tankları ve otomotiv sanayinde kullanılmaktadırlar. Çizelge 3.2’de, II. grup standart tip ferritik paslanmaz çelikler görülmektedir.

Çizelge 3.2. II. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler (Krysiak vd., 1993).

Tipi	% Bileşim				
	C	Cr	Mo	Ni	Diğer
405	0.08	11.5-14.5	-	-	0.1-0.3 Al
409	0.08	10.5-11.5	-	0.5	0.48-0.75 Ti
409 C	0.02	12.5	-	0.2	0.4 Nb
441	0.02	18.5	-	0.3	0.7 Nb, 0.3 Ti
AL 433	0.02	19.0	-	0.3	0.4 Nb, 0.5 Ti
AL 446	0.01	11.5	-	0.2	0.2 Nb, 0.1 Ti
AL 468	0.01	18.2	-	0.2	0.2 Nb, 0.1 Ti
YUS 436 S	0.01	17.4	1.2	-	0.2 Ti
439	0.07	17.0-19.0	-	0.5	0.5-1.0 Ti
12 SR	0.2	12.0	-	-	1.2 Al, 0.3 Ti
18 SR	0.04	18.0	-	-	2 Al, 0.4 Ti
406	0.06	12.0-14.0	-	0.5	2.75-4.25 Al, 0.6 Ti

III. grup ferritik paslanmaz çelikler yüksek Cr ve Mo miktarına sahip ferritik paslanmaz çeliklerdir ve genel korozyon, oyuklaşma (pitting) korozyonu ve gerilmeli korozyon kırılmasına karşı dayanımlıdır. Bu alaşımlar, kaynak işlemi sonrası korozyona dayanıklı, tok ve sünekliğe sahip olabilmesi için, hem vakum ortamında elektron ışınlı veya vakum ortamında indüksiyonla ergitmeyle, hem de vakum ortamında oksijen ile dekarbürize edilerek üretilmelidir (Krysiak vd., 1993).

İçerisinde 150 ppm'den daha az ara yer elementi (C+N) bulunan III. grup paslanmaz çelikler, ultra yüksek saflığa sahip ferritik paslanmaz çelikler olarak adlandırılır. Bu alaşımlarda saflık, yüksek Cr miktarından dolayı tokluk ve kaynak edilebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Alaşıma az miktarda Nb ilave edilerek kaynaklı malzemelerde korozyon direnci artırılabilir (Krysiak vd., 1993). Çizelge 3.3'de, standart tip III. grup ferritik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri görülmektedir.

Çizelge 3.3. III. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler (Krysiak, 1993).

Tipi	% Bileşim						
	C	N	Cr	Mo	Ni	Nb	Diğer
E-Brite 26-1	0.01	0.015	25-27	0.75-1.5	0.30	0.05-0.20	0.4 Mn
AL 29-4-2	0.01	0.020	28-30	3.5-4.2	2-2.5	-	-
AL 29-4	0.01	0.020	28-30	3.5-4.2	0.15	-	0.3 Mn
SHOMAC 30	0.003	0.007	30	2	0.2	-	0.3 Mn
YUS 190 L	0.004	0.0085	18	2	0.4	-	-

3.1.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, hacim merkezli kübik (HMK) veya sertleştirilmiş halde tetragonal kristal kafes sistemine sahip Fe-Cr-C alaşımlarıdır. Bu çelikler ferromanyetiktir ve ısı ile sertleştirilebilir. Martenzitik paslanmaz çelikler genellikle atmosferik korozyona karşı dirençlidirler. Bileşimlerindeki Cr miktarları genellikle % 11-18, C ise % 1,2'ye kadar çıkabilir. Cr ve C miktarları sertleştirme

sonrası martenzitik bir yapı elde etmek için dengelenmiştir. Çizelge 3.4’de standart tip martenzitik paslanmaz çelikler verilmiştir (Davis, 1993).

Çizelge 3.4. Standart tip martenzitik paslanmaz çelikler (Davis, 1993).

Tipi	% Bileşim							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Diğer
403	0.15	1.0	0.5	11.5-13.0	-	0.04	0.03	-
410	0.15	1.0	1.0	11.5-13.0	-	0.04	0.03	-
414	0.15	1.0	1.0	11.5-13.0	1.25-2.25	0.04	0.03	-
416	0.15	1.25	1.0	12.0-14.0	-	0.06	0.15	0.6 Mo
416 Se	0.15	1.25	1.0	12.0-14.0	-	0.06	0.03	0.15 Se
420	Min 0.15	1.0	1.0	12.0-14.0	-	0.04	0.03	-
420 F	Min 0.15	1.25	1.0	12.0-14.0	-	0.06	0.15	0.6 Mo
422	0.20-0.25	1.0	0.75	11.5-13.0	0.5-1.0	0.04	0.03	0.75-1.25 Mo
431	0.20	1.0	1.0	15.0-17.0	1.25-2.50	0.04	0.03	0.15-0.3 V
440 A	0.60-0.75	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.04	0.03	0.75 Mo
440 B	0.75-0.95	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.04	0.03	0.75 Mo
440 C	0.95-1.20	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.04	0.03	0.75 Mo

En yaygın olarak kullanılan 410 tipi martenzitik paslanmaz çelik, % 12 Cr içeriği ile yüksek mukavemet özelliğine sahiptir. 422 tipi paslanmaz çeliklere Molibden, mekanik özellikleri ve tane sınırı korozyonuna karşı korozyon direncini artırmak için ilave edilmiştir. 414 ve 431 tipi paslanmaz çeliklere Nikel, yine aynı nedenlerle ilave edilmektedir. Martenzitik paslanmaz çeliklerde korozyon dayanımını artırmak için daha yüksek miktarlarda Cr kullanılmaktadır (Davis, 1993). Normal şartlarda martenzitik paslanmaz çelikler, 275 MPa’lık bir akma dayanımına sahiptirler. Bununla birlikte, C miktarına bağlı olarak sertleştirme ve temperleme sonrasında, 1900 MPa’lık bir akma dayanımı elde edilebilir. Aynı zamanda bu alaşımlar, iyi süneklik ve tokluk özelliğine de sahiptirler. Uygulanan ısıl işleme bağlı olarak sertlikleri 150 HB’den 600 HB’ye kadar değişmektedir. Martenzitik paslanmaz çeliklerin özellikleri, Çizelge 3.5’de verilmektedir.

Çizelge 3.5. Martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri (Davis, 1993).

Tipi	Uygulanan işlem	Çekme Dayanımı(MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik
403	Sertleştirilmiş	485	275	20	88 HRB
410	Sertleştirilmiş	485	205	20	95 HRB
410 S	Sertleştirilmiş	415	205	22	88 HRB
414	Temperlenmiş	795	620	15	-
416	Temperlenmiş	485	275	20	-
418	Temperlenmiş	965	760	15	-
420	Temperlenmiş	720	1480	20	52 HRC
422	Temperlenmiş	825	585	17	-
431	Sertleştirilmiş	795	620	15	-
440	Sertleştirilmiş	725	415	20	95HRB
440	Temperlenmiş	1790	1650	5	51 HRC

410 tipi martenzitik paslanmaz çelikler, buhar tribünleri, jet motorları ve gaz tribünlerinde kullanılmaktadır. Daha yüksek C miktarına sahip olan 440 tipi paslanmaz çelik, çatal-bıçak takımı, cerrahi dişçilik aletleri, makaslar, yaylar, valfler, dişliler, şaftlar, kamlar ve bilyeli yataklarda kullanılmaktadır (Davis, 1993). % 13 Cr ve düşük miktarlarda karbon içeren çelikler, süpermartenzitik paslanmaz çelikler olarak adlandırılır. Bu çelikler, özellikle yağ ve gaz endüstrisinde kullanılmaktadır. Süpermartenzitik paslanmaz çelikler, kaynak edilebilir martenzitik paslanmaz çelikler veya süper 13 Cr çelikleri olarak adlandırılırlar. Çizelge 3.6'da, süpermartenzitik paslanmaz çelik tipleri verilmektedir.

Çizelge 3.6. Süpermartenzitik paslanmaz çelik tipleri (Davis, 1993).

Tipi	% Bileşim								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Diğer
X80 11Cr-2Ni	< 0.015	< 2	0.15	11	2	< 0.5	0.4	< 0.012	-
HP 13 Cr	< 0.03	0.4	< 0.3	13	4	1	-	0.05	-
D 13.5.2N	0.02	0.7	0.3	13.3	4.8	1.6	0.1	0.08	-
X80 12Cr-4.5Ni	< 0.015	< 2	0.15	12	4.5	1.5	0.4	0.012	-
CRS	0.02	0.5	0.3	12.5	4.5	1.5	1.5	0.05	-
Super 13 Cr	0.02	0.5	0.2	12.2	5.5	2	0.2	0.02	0.2V
Super 13 C	0.02	0.4	0.2	12.5	5	2	-	< 0.08	-
Super 13 Cr-6-2.5-Ti	< 0.01	0.4	0.3	12	6.2	2.5	-	< 0.01	0.07 Ti
X80 12 Cr-6.5Ni-2.5Mo	< 0.015	< 2	0.15	12	6.5	2.5	0.4	< 0.012	-

Bu yeni kaynak edilebilir martenzitik çelik tipleri yüksek dayanım, iyi korozyon direnci ve - 40 °C'ın altında uygun kırılma tokluğu gibi özelliklere sahiptir. Mikro yapısı, yüksek dayanım ve tokluğa sahip düşük karbonlu temperlenmiş martenzitten meydana gelmektedir. Çekme dayanımları, 780-1000 MPa arasındadır.

3.1.3. Ostenitik Paslanmaz Çelikler

Ostenitik paslanmaz çelikler, geniş bir sıcaklık aralığında (oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar) tek fazlı yüzey merkezli kübik (YMK) bir kristal kafes sistemine sahiptir. Bu yüzden, yalnızca tek fazlı (katı eriyik) alaşımlama ve dövmeyle mukavemetleri artırılabilir (Brooks, 1993). Ostenitik paslanmaz çelikler, orta dereceli ve şiddetli korozyon ortamları için geliştirilmiştir. Aynı zamanda kriyojenik sıcaklıklardan 600 °C'ye kadar yüksek tokluğa sahiptir. Manyetik olmadıkları için, manyetik malzemelerin kullanılmadığı alanlarda da kullanılırlar (Shigenaka vd., 1993).

Ostenitik paslanmaz çelikler içerisinde en yaygın kullanılan tipler AISI 200 ve 300 seri alaşımlardır. Ayrıca, alaşım elementi ilaveleri ve özel alaşım bileşimi, kaynak edilebilirlik ve kaynak bölgesinin mikro yapısı üzerine büyük bir etkiye sahiptir. Bu alaşımlardan AISI 300 serisi, genellikle % 8-20 Ni ve % 16-25 Cr içermektedir. Düşük miktarlardaki alaşım elementi ilavesi % 1 Si deoksidasyon, % 0,02-0,08 C ostenitin kararlılığı ve % 1,5 Mn ise hem ostenitin kararlılığı hem de sülfür ve Si ile

bileşikler oluşturmak için kullanılmaktadır. Çizelge 3.7’de, AISI 200 ve 300 serisi paslanmaz çelikler verilmektedir (Brooks, 1993).

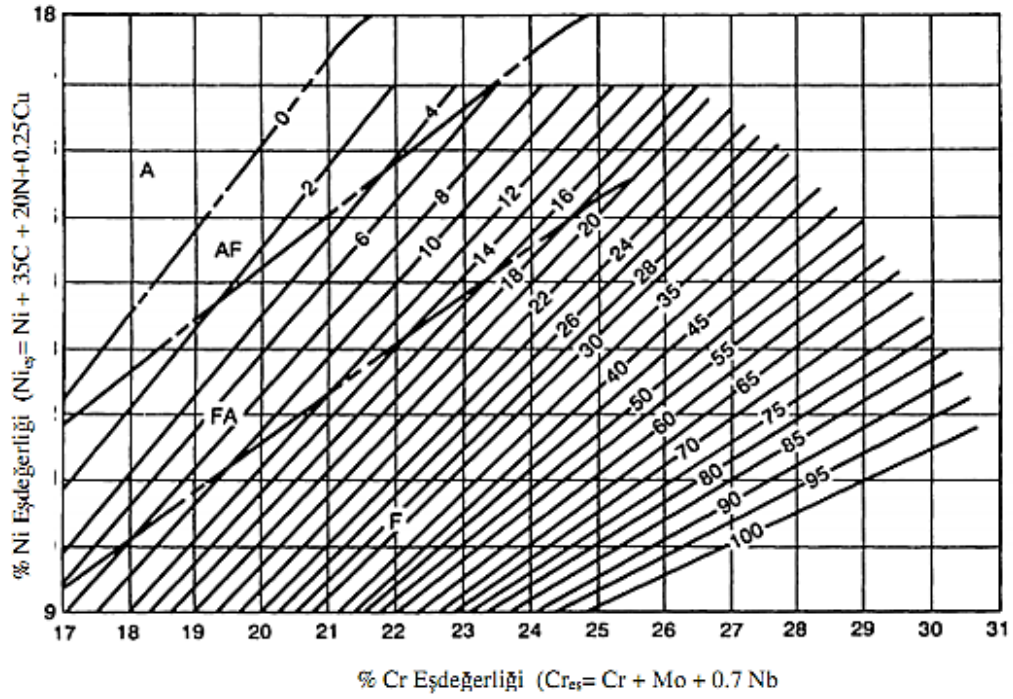
Çizelge 3.7. AISI 200 ve 300 serisi ostenitik paslanmaz çelikler (Brooks, 1993).

Tipi	% Bileşim							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Diğer
201	0.15	5.5-7.5	1.0	16-18	3.5-5.5	0.06	0.03	0.25 N
202	0.15	7.5-10.0	1.0	17-19	4-6	0.06	0.03	0.25 N
203	0.12-0.2	14.0-15.5	1.0	16.5-18	1-1.75	0.06	0.03	0.32-0.4 N
301	0.15	2.0	1.0	16-18	6-8	0.045	0.03	-
302	0.15	2.0	1.0	17-19	8-10	0.045	0.03	-
302 B	0.15	2.0	2.0-3.0	17-19	8-10	0.045	0.03	-
303	0.15	2.0	1.0	17-19	8-10	0.2	0.15	0.6 Mo
303 Se	0.15	2.0	1.0	17-19	8-10	0.2	0.06	0.15 Se
304	0.08	2.0	1.0	18-20	8-10.5	0.045	0.03	-
304 H	0.04-0.1	2.0	1.0	18-20	8-10.5	0.045	0.03	-
304 L	0.03	2.0	1.0	18-20	8-12	0.045	0.03	-
304 LN	0.03	2.0	1.0	18-20	8-12	0.045	0.03	0.1-0.16 N
304 Cu	0.08	2.0	1.0	17-19	8-10	0.045	0.03	3-4 Cu
304 N	0.08	2.0	1.0	18-20	8-10.5	0.045	0.03	0.1-0.16 N
305	0.12	2.0	1.0	17-19	10.5-13	0.045	0.03	-
308	0.08-0.20	2.0	1.0	19-21	10-12	0.045	0.03	-
309	0.08	2.0	1.0	22-24	12-15	0.045	0.03	-
309 S	0.25	2.0	1.0	22-24	12-15	0.045	0.03	-
310	0.08	2.0	1.0	21-26	19-22	0.045	0.03	-
310 S	0.25	2.0	1.5	24-26	19-22	0.045	0.03	-
314	0.08	2.0	1.5-3.0	23-26	19-22	0.045	0.03	-
316	0.08	2.0	1.0	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3 Mo
316 F	0.04-0.1	2.0	1.0	16-18	10-14	0.2	0.03	1.75-2.25 Mo
316 H	0.03	2.0	1.0	16-18	10-14	0.045	0.1	2-3 Mo
316 L	0.03	2.0	1.0	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3 Mo
316 LN	0.03	2.0	1.0	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3 Mo, 0.1 N
316 N	0.08	2.0	1.0	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3 Mo, 0.1 N
317	0.08	2.0	1.0	18-20	11-15	0.045	0.03	3-4 Mo
317 L	0.03	2.0	1.0	18-20	11-15	0.045	0.03	3-4 Mo
321	0.08	2.0	1.0	17-19	9-12	0.045	0.03	0.4 Ti
321 H	0.04-1.0	2.0	1.0	17-19	9-12	0.045	0.03	0.4 Ti
330	0.08	2.0	0.75-1.5	17-19	34-37	0.045	0.03	-
347	0.08	2.0	1.0	17-19	9-13	0.045	0.03	0.8 Mo
347 H	0.04-0.1	2.0	1.0	17-19	9-13	0.045	0.03	0.47-1 Nb
348	0.08	2.0	1.0	17-19	9-13	0.045	0.03	0.2 Co, 0.8 Nb, 0.1 Ta
348 H	0.04-0.1	2.0	1.0	17-19	9-13	0.045	0.03	0.2 Co, 0.8-1 Nb, 0.1 Ta
384	0.08	2.0	1.0	15-17	17-19	0.045	0.03	-

Ostenitik paslanmaz çeliklerin en önemli alaşımı X12CrNi18.8’dir. Bu alaşımın yapısı normal ısıtılmalardan sonra 1050 °C ’da su verildiğinde veya havada soğutulduğunda ince ostenit tanelerinden meydana gelir. Oda sıcaklığında kararlı olan bu yapı, yüksek sıcaklıklarda kararlılığını kaybetmektedir. Oda sıcaklığında çeliğin mikro yapısı ostenit + (δ)-ferrit ve (Fe, Cr)₃C karbürlerinden oluşur. Bunun dışında σ-fazı da yapıda görülebilir (Yıldırım, 1984; Yıldırım vd., 2001).

3.1.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler

Dupleks paslanmaz çelikler; Fe, Cr, Ni sistemine dayalı iki fazlı alaşımlardır. Bu alaşımlar, mikro yapıda eşit oranda hmk (hacim merkezli kübik yapı) ferrit ve ymk (yüzey merkezli kübik yapı) ostenit bulundurmaktadır. Dupleks paslanmaz çelikler düşük karbon içeriği ($\% < 0,03$) ile birlikte yapısında Mo, N, W ve Cu bulunmaktadır. Genellikle $\% 20-30$ Cr ve $\% 5-10$ Ni içerirler. Dupleks paslanmaz çeliklerin geleneksel 300 serisi paslanmaz çeliklerden üstün özellikleri ise gerilmeli korozyon kırılma dayanımı, mukavemet ve oyuklaşma (pitting) korozyonu dayanımıdır. Bu malzemeler, asitler ve sudan kaynaklanan klora karşı direncin gerektiği orta dereceli sıcaklıklarda ($- 60$ ile $+ 300$ °C) kullanılırlar. Ticari olarak kullanılan dupleks paslanmaz çelik tipleri Çizelge 3.8’de verilmektedir (Noble, 1993). Dupleks paslanmaz çeliklere ilave edilen alaşım elementleri hem ostenit hem de ferrit oluşturmalarıdır. Dupleks paslanmaz çeliklerde kullanılan temel alaşım elementleri içerisinde Cr ve Mo ferrit oluşturu, Ni, C, N ve Cu ise ostenit oluşturmaktadır. Ostenit ve ferrit oluşturu alaşım elementlerinin dengesi, alaşımın mikro yapısını meydana getirmektedir. Şekil 3.2’de verilen WRC diyagramı (katılaşma faz sınırlarını içeren), uygun ana malzeme bileşiminin seçimi ve kaynak işleminde kaynak metali ferrit içeriğinin hesaplanması için kullanılmaktadır (Noble, 1993).



Şekil 3.2. Ferrit içeriği ve katılaşma şeklinin belirlenmesi için kullanılan WRC diyagramı (Noble, 1993).

Ticari olarak kullanılan dupleks paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri, Çizelge 3.8’de verilmektedir. Dupleks paslanmaz çeliklerin yüksek alaşım içeriği ferritik matris gevrekleşmesine karşı hassasiyetini engellemektedir. Ayrıca mekanik özellikleri tokluğu arttırmaktadır. Bu çelikler daha çok yağ, gaz, petrokimya ve kâğıt endüstrisi gibi sahalarda kullanılmaktadır (Noble, 1993).

Çizelge 3.8. Ticari olarak kullanılan dupleks paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri (Noble, 1993).

Tipi	% Bileşim							Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	N		
S 31200	0.03	2.0	1.0	24-26	5.5-6.5	1.2-2.0	0.14-0.20	690	450
S 31500	0.03	1.2-2	1.4-2	18-19	4.25-5.25	2.5-3.0	0.05-0.1	630	440
S 31803	0.03	2.0	1.0	21-29	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.2	620	450
S 32304	0.03	2.5	1.0	21-24	3.0-5.5	0.05-0.6	0.05-0.2	600	400
S 32550	0.03	1.5	1.0	24-27	4.5-6.5	2.9-3.9	0.1-0.2	760	550
S 32750	0.03	1.2	1.0	24-26	6.0-8.0	3.0-5.0	0.24-0.32	800	500
S 32760	0.03	1.0	1.0	24-26	6.0-8.0	3.0-4.0	0.3	750	550
S 32900	0.03	1.0	0.75	23-28	2.5-5.0	1.0-2.0	-	620	485
S 32950	0.03	2.0	0.60	26-29	3.5-5.2	1.0-2.5	0.15-0.35	690	480

3.1.5. Çökelti Sertleştirmeli Paslanmaz Çelikler

Çökelti sertleştirmeli paslanmaz çelikler, 585-795 MPa akma gerilmesi ve sertleşebilir 400 seri paslanmaz çeliklerden daha üstün korozyon direncine sahip, Fe-Cr-Ni alaşımıdır. Bu alaşımlar, Cu, Al, Ti, Nb ve Mo gibi elementlerin biri veya birkaçı kullanılarak çökelti sertleştirmeli martenzitik ve ostenitik hale gelirler. Çökelti sertleştirmeli paslanmaz çelikler, martenzit başlama ve bitiş sıcaklıklarına dayanarak martenzitik, yarı ostenitik ve ostenitik olmak üzere üç ayrı şekilde gruplandırılabilir. Çökelti sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri, Çizelge 3.9'da verilmiştir (Pollard, 1993). 17-4 PH gibi martenzitik PH çelikler, yüksek normalizasyon sıcaklığından havada soğutmayla tamamen martenzite dönüşebilmektedir. Bunlar, oda sıcaklığının hemen üzerinde bulunan bir M_f (martenzit bitiş sıcaklığı) sıcaklığına sahiptirler. Bu yüzden, oda sıcaklığında martenzitiktirler. Sertleşme, 680-620 °C'da 1-4 saat süreyle yaşlandırma işlemi ile sağlanmaktadır (Pollard, 1993).

Çizelge 3.9. Çökelti sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri (Pollard, 1993).

Tipi	% Bileşim								Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Diğer			
Martenzitik Tip										
PH 13-8 Mo	0.05	0.1	0.1	12-15	7.5-8.5	2.0-2.5	0.9-1.3 Al	1410	1520	
15-5 PH	0.07	1.0	1.0	14-15	3.5-5.5	-	2.5-4.5 Cu	1170	1310	
17-4 PH	0.07	1.0	1.0	15-17	3.0-5.0	-	3-5Cu,0.3 Nb	1170	1310	
Custom 450	0.05	1.0	1.0	14-16	5.0-7.0	0.5-1.0	1.5Cu,0.4Nb	655	895	
Custom 455	0.05	0.5	0.5	11-12	7.5-9.5	0.5	2Cu,1.2Ti,0.5 Nb	1520	1620	
Yarı Ost. Tip										
PH 15-7 Mo	0.09	1.0	1.0	14-16	6.5-7.7	2.0-3.0	0.75-1.5Al	1210	1380	
17-7 PH	0.09	1.0	1.0	16-18	6.5-7.7	-	0.75-1.5Al	1030	1275	
AM-350	0.09	0.5	0.5	16-17	4.0-5.0	2.5-2.5	0.1 N	610	1380	
AM-355	0.15	0.5	0.5	15-16	4.0-5.0	2.5-3.5	0.1 N	1070	1170	
Ostenitik Tip										
A-286	0.08	2.0	1.0	13-		1.0-1.5	2Ti,0.3Al,0.	105	724	
JBK- 75 (b)	0.015	0.02	0.02	13-16		1.5	2Ti,0.2Al,0.2V	-		

17-7 PH alaşımı gibi yarı ostenitik çökelti sertleştirmeli çelikler, M_s (martenzit başlangıç sıcaklığı) sıcaklığının oda sıcaklığından oldukça düşük olduğu dengeli

bileşimlere sahiptir. Bu yüzden, ısıtılma işlem sıcaklığından soğutulduklarında sünek, aynı zamanda rahatlıkla şekillendirilebilen bir yapıya sahiptirler. Şekillendirme işlemi sonrasında martenzite dönüşüm, uygun bir ısıtılma işlemle C ve diğer alaşım elementlerinin çökmesi sonucu, Ms ve Mf sıcaklıklarının artmasıyla elde edilmektedir. Eğer düşük bir ısıtılma işlem sıcaklığı (730-760 °C) kullanılırsa, Mf sıcaklığı oda sıcaklığı civarına yükselir ve martenzit dönüşüm soğumayla elde edilir. Eğer yüksek bir ısıtılma işlem sıcaklığı (930-955 °C) kullanılırsa, bu durumda, daha az karbon çöker ve Mf sıcaklığı sıfırın altında kalır. Bu durumda, martenzit dönüşümü elde etmek için soğutmak gerekir. Aynı zamanda martenzitik dönüşüm soğuk dövmeyle de elde edilebilir. Martenzitik yapı 455-565 °C bir sıcaklıkta yaşlanmayla sertleştirilebilir (Pollard, 1993).

Ostenitik PH çelikler (A-286 gibi) martenzite dönüştürülemediklerinden dolayı, düşük Ms sıcaklığına sahiptirler. Herhangi bir alaşım için farklı ısıtılma işlemleri kullanılarak alaşımın özellikleri geliştirilebilmektedir. Bununla beraber, uygun mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için belirli standart ısıtılma işlemleri kullanılmaktadır (Pollard, 1993).

BÖLÜM 4

AŞINMA

Günümüz sanayisinde korozyon ve yorulma sorunlarıyla birlikte görülen üçüncü büyük bir problem de aşınmadır. Aşınma, teknik bir sorun olduğu kadar, ekonomiyi de yakından ilgilendirmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırmada çeşitli aşınma mekanizmalarıyla meydana gelen malzeme kaybının yıllık yüz milyar dolar olduğu ifade edilmektedir (Gürleyik, 1987; Demirci, 2004). Bu da milli hâsılanın yaklaşık % 6-7'sini oluşturmaktadır.

Teknik anlamda aşınma cisimlerin yüzeylerinde, mekanik etkenlerle (mekanik bir sebep veya mekanik bir enerji) mikro taneciklerin koparak ayrılması sonucu, malzemede istenmeyen deformasyon olayıdır (Gürleyik, 1987; Demirci, 2004). DIN 50320'ye göre aşınma, katı cisim yüzey bölgesinden tribolojik etkenlerden kaynaklanan malzeme kaybıdır. Moore'a göre aşınma, malzemelerin yüzeylerine gaz, sıvı ve katıların teması ile malzemenin yüzeyinden mikro tanelerin kopması sonucu meydana gelen yüzey bozulmasıdır (Moore, 1976).

Yukarıda verilen tanımlardan da anlaşıldığı gibi, aşınma olayının tek bir tanımı yoktur. Bunun yerine aşınmayı niteleyen bazı şartları ve kıstasları belirtmek daha uygundur. Malzemedeki yıpranma olayının aşınma diye tanımlanabilmesi için, bazı şartların sağlanması gereklidir. Bunlar;

- Mekanik bir etkinin olması,
- Sürtünmenin olması (izafî hareket),
- Yavaş ve sürekli olması,
- Malzeme yüzeyinde deformasyon oluşması,
- İstenilmediği halde ortaya çıkması'dır.

Bu şartlardan birini sağlamayan yıpranma olayı aşınma olarak değerlendirilmemektedir. Genel olarak aşınma yataklarda, frenlerde, pistonlarda, dişlilerde, kırma ve öğütme değirmenlerinde, yol, toprak ve ziraat makinelerinde, türbin kanatlarında, maden cevheri üretim aletlerinde ve buna benzer yerlerde oluşmaktadır.

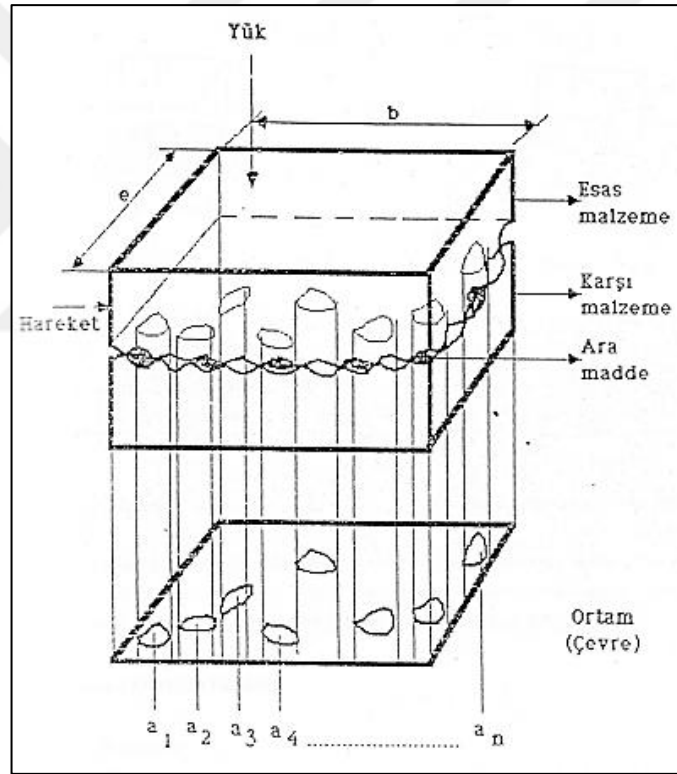
Çeşitli makine elemanları ve mühendislik malzemelerinin ömürlerine etki eden aşınma, önlenemeyen bir hata türüdür. Bununla birlikte malzemelerin aşınma karakteristikleri, malzeme cinsine ve bununla alakalı olarak sürtünme sırasında oluşan yüzey filminin özelliklerine kadar geniş bir spektrumda değerlendirilmelidir. Bir malzemenin aşınma performansı sertlik ve mikro yapı optimizasyonu ile ilişkilidir. Aşınma olayı sadece spesifik bir malzeme özelliği değildir. Aynı zamanda bu olay bir sistem bütünlüğünü oluşturmaktadır. Bu sistem tribolojik sistem olarak adlandırılmaktadır.

Triboloji, sürtünme, yağlama ve aşınma kavramlarını kapsamaktadır. Tribolojik sistem ise, karşılıklı etkileşen elemanlarda (esas malzeme, karşı malzeme, ara madde) hız, termal şartlar ve yükün bileşimiyle ortaya çıkan aşınma olayını inceleyen bilim dalıdır. Tribolojik sistem, Şekil 4.1’de şematik olarak gösterilmektedir.

Tribolojik sistemin elemanları:

- **Esas malzeme (aşınan):** Fiziksel ve kimyasal özellikleri yanında, yüzey yapısı, şekli ve durumu komple belli olan malzemedir.
- **Karşı malzeme (aşındıran):** Aşınmanın meydana gelmesinde başlıca öneme sahip olan karşı sürtünme elemanı, katı bir cisim, sıvı veya gaz olabilir. Karşı malzeme ile esas malzeme aşınma çiftini oluşturmaktadır.
- **Ara malzeme:** Esas sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında katı, sıvı, gaz, buhar, ya da bunların karışımı şeklinde olan maddeler.

- **Yük:** Etki eden kuvvetin büyüklüğü, türü (statik, dinamik, darbeli veya titreşimli olup olmaması) doğrultusu ve zamana göre değişimi, yüklemenin şiddetini belirleyen faktörlerdir.
- **İzafi hareket:** Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre izafi hareketinin cinsi (kayma, yuvarlanma veya çarpma etkilerinden hangisinin ağırlıklı olduğu), büyüklüğü ve doğrultusu ile belirlenir.
- **Çevre (ortam):** Sistemi içine alan ve genellikle sıvı veya gaz halinde bulunan ortamdır.

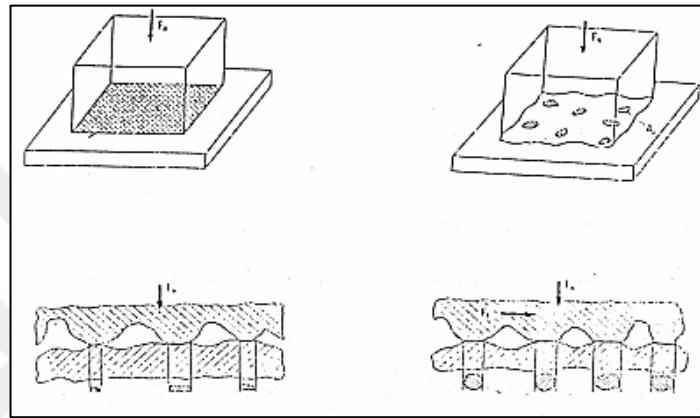


Şekil 4.1. Tribolojik sistemin şematik gösterimi (Korkut, 1997).

$S = e.b$ (birim kare) iken; gerçek temas yüzeyi, pürüzlerin temas yüzeylerinin toplamıdır. Gerçek temas alanı $S_g = a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n$ şeklindedir. Buradan da anlaşıldığı gibi görünen temas alanı (S), gerçek temas alanından (S_g) daima büyüktür. $S > S_g$ (Kragelsky, 1960).

Bir tribolojik sistemde birbirleriyle temas eden iki cismin gerçek temas yüzeyi, görünen temas yüzeyinden daha küçüktür. Çünkü, temas yüzeyleri ne kadar düzgün işlenirse işlensin, yüzeyde mutlaka pürüz denilen çıkıntılarının bulunduğu bir gerçektir. Bu sebeple, temas halindeki iki cisim bu pürüzler vasıtasıyla temas halindedir.

Pürüzlerin arasındaki girintiler ise temas alanı dışında kalmaktadır. Şekil 4.2’de bu temas alanı şematik olarak gösterilmektedir.



a) Görülen temas alanı

b) Gerçek temas alanı

Şekil 4.2. Etkileşimli yüzeylerin gerçek ve görünen temas alanları (Korkut, 1997).

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 (Cöcen, 1997). Çünkü, üretim tekniğinde tam olarak pürüzsüz ve düz bir yüzeyin elde edilmesi imkânsızdır. Yüzeylerin temas etmesi halinde ise yüzeylerdeki pürüzler karşılıklı etkileşmektedir. İlk temas, pürüz tepeleri arasında oluşmaktadır. Pürüz tepeleri arasındaki girintiler ise temas etmezler. Gerçek temas alanı, temasta olan pürüzlerin toplam alanıdır. Yüklemin şekli ve yük temas alanının büyüklüğünü de etkilemektedir. Yük arttıkça ilk temas eden pürüzler şekil değişimine uğrar (yani ezilir) ve bunun sonucu kısa boyutlu yeni pürüzler birbiri ile temas ederler. Yükleme ile pürüz sayısı azalır ve gerçek temas alanı, görünen temas alanına yaklaşır (Gürleyik, 1986; İpek, 1987;

Odabaşı, 1991; İpek, 1992). Yüzey pürüzlülüğünün artışı ile aşınma direnci azalmaktadır.

Temas halindeki cisimlere bağlı hareket yaptırabilmek için sisteme bir enerji girmektedir. Giren enerji, yük ve hareket şeklindedir. Giriş ile çıkış arasındaki fark, mekanik titreşime, ısı, ses ve sürtünme enerjisine ve aşınmaya dönüşmektedir (Gürleyik, 1986; İpek, 1987; Odabaşı, 1991; İpek, 1992).

4.2. AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

4.2.1. Ana Malzemeye İlgili Faktörler

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

4.2.2. Karşı Malzemeye İlgili Faktörler, Aşındırıcının ve Ortamın Etkisi

- Sıcaklık
- Nem
- Atmosfer

Servis koşulları

- Basınç
- Hız
- Kayma mesafesi

Farklı yüksek basınç ve çalışma hızlarında yüzey basıncının artması ile aşınmanın hızlandığı aynı yükte (çalışma hızının artması ile) aşınma da artmaktadır. Basınç

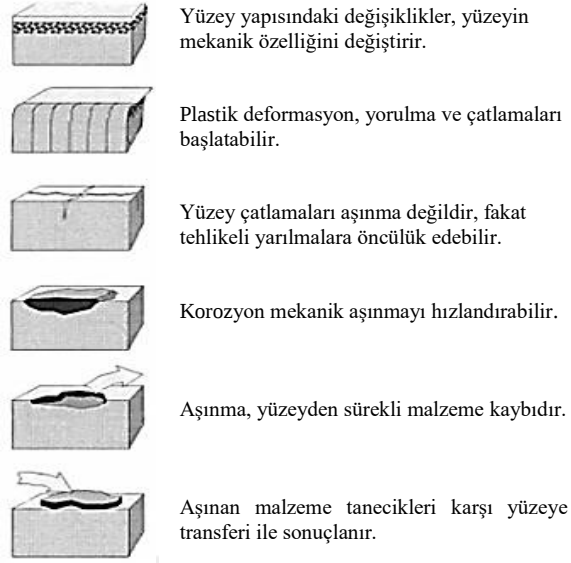
artışına paralel olarak çalışma hızının da artması, aşınmayı hızlandırmaktadır. Ayrıca sürtünmeyi artıran yük de aşınmanın artmasına neden olmaktadır (Karamış, 1986).

Sürtünme enerjisinin ısıya dönüşmesi ile gerçek temas alanının sıcaklığında artmaktadır. Artan sıcaklığın etkisi ile sürtünen yüzeylerde meydana gelen bölgesel ergimeler nedeniyle yüzeylerden küçük parçacıklar koparak aşınmayı hızlandırmaktadır. Sürtünme ve aşınma sonucu meydana gelen yapısal dönüşümler de ısıl çatlamalara ve sürtünme sırasında parçacıkların koparak aşınmanın artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, katı cisimlerin aşınmasında sürtünen yüzeylerin sıcaklığı da çok önemlidir (Karamış, 1986).

Metal-metal sürtünme aşınmasında aşınma miktarı, zamana ve kayma mesafesine bağlıdır. Aşınma miktarı aşınan parçanın şekline ve ağırlık değişimine ait sayısal bir büyüklüktür. Aşınma ve aşınma miktarı birbirinden ayırt edilmelidir. Aşınma miktarı, parçanın ağırlık kaybı ve hacimsel aşınma veya sürtünme yüzeyinin yükseklik kaybı olarak ifade edilmektedir (İpek, 1987; Arıkan, 1988).

4.3. AŞINMA VEYA YÜZEY DEFORMASYONU

Yüzey deformasyonu ve bozulma nedenleri çok geniştir. Önemli tribolojik yüzey bozulmalarının genel bir sınıflandırılması, Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Yüzey aşınma ve bozulmalarının genel bir sınıflandırılması (Niklas vd., 2001).

Yüzey aşınma ve bozulmalarının sınıflandırılması sırası ile açıklanırsa;

- Yüzeydeki yapısal değişiklikler (yüzey kaplama veya kristalleşme gibi yüzey değişiklikleri), yüzeyin mekanik deformasyonuna yol açabilmektedir. Yüzeydeki yapısal değişiklikler aşınmayı gerektirmez. Fakat dış yüzeyin mekanik özelliklerini değiştirebilir ve aşınma durumunu başlatabilir veya çatlaklar oluşturabilir (Niklas vd., 2001).
- Plastik deformasyon, yüzeyde termal genleşme (azalma) veya mekanik gerilmelerin etkisiyle oluşmaktadır. Yüzey bölgesindeki plastik deformasyon, kademeli aşınmayı gerektirmemesine rağmen, tehlikeli çatlaklara öncülük eden önemli yüzey hasarlarıdır (Niklas vd., 2001).
- Yüzey bölgesindeki çatlaklar, aşırı yüzey gerilmeleri, yorulma deformasyonları veya tekrar eden termal değişikliklere neden olabilmektedir (Niklas vd., 2001).
- Korozyon ve diğer kimyasal etkiler de aşınma olarak adlandırılabilir. Kimyasal etkiler çatlakların genişlemesini hızlandırarak malzeme kaybına neden olmaktadır (Niklas vd., 2001).

- Aşınma veya diğer bir ifade ile yüzey hasarı, çeşitli aşınma türleri ile mikroskobik parçacıklar şeklinde, yüzeyden sürekli malzeme kayıplarıdır. Sonuç olarak aşınma mekanizması hem mekanik hem de kimyasal olabilmektedir (Niklas vd., 2001).

- Aşınan malzemelerin bir kısmı karşı yüzeye transfer olur. Yüzeyde sürtünmeden dolayı oluşan aşırı ısınmanın etkisi ile aşınan tozlar toplanarak, ara yüzeyde üçüncü yüzey tabakası meydana getirirler. Bu durum kayma sürtünmesinin de nedenidir (Niklas vd., 2001).

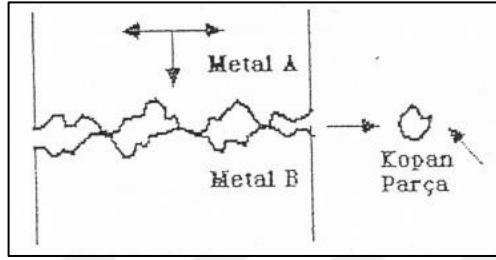
4.4. AŞINMA MEKANİZMALARI

4.4.1. Adhesiv Aşınma

Özellikle birbiriyle kayma sürtünmesi yapan, metal-metal aşınma çiftinde ortaya çıkan bir aşınma türüdür. Birbiriyle temasta olan benzer kafes yapılı iki metalik yüzey arasında adhezyon kuvveti olarak adlandırılan bir çekim söz konusudur. Bu kuvvetin meydana gelebilmesi için, malzemelerin moleküllerinin birbirine çok yaklaşması gerekir. Temas halindeki iki metal, birbirleriyle yüzeylerindeki pürüzler sayesinde etkileşirler. Malzeme ağırlığı veya bir dış kuvvet etkisiyle, çok küçük olan pürüz tepelerine etkiyen basınç veya gerilme çok büyüktür. Bu kuvveti taşıyamayan pürüzler plastik deformasyona uğramaktadır. Eğer malzemenin deformasyon kabiliyeti yüksekse, mikro adhezyon alanları, temas yüzeyine tamamen yayılmaktadır. Böylece, yüzeyde adsorbe edilmiş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanmaktadır.

Yüzeyde oluşan kopmalar ile malzeme molekülleri, direkt olarak temas imkânı bulmaktadır. Bunun sonucunda da bölgesel kaynak bağları oluşmaktadır (soğuk kaynama). İzafe hareketin de yardımıyla yüzeydeki sıcaklık yükselmesi ile kaynaklanma yerinden veya metal yüzeyinden parçacıklar kopmaktadır. Bu parçacıklar, ara yüzeyde serbest halde kalabildikleri gibi yüzeylerden birine de yapışabilirler. Şekil 4.4’de iki metalin sürtünmesi sırasında yüzeyden parça kopması şematik olarak verilmektedir. Eğer sürtünen malzemelerin yapıları farklı ise, aşınma

adhezyonla başlamaz. Bu gibi durumlarda malzemelerde, yüksek gerilme ve basıncın etkisi ile pürüzler birbirine geçerek plastik şekil değiştirmektedir. İzafi hareket başladığında öncelikli olarak zayıf olan malzemenin pürüzleri kopar ve serbest tanecikler oluşur. Eğer sıcaklık yükselir ve ısı difüzyon fazlalaşırsa, bölgesel kaynak bağları oluşmaktadır. Difüzyon az ise kaynaklanma olmadığı için kırılan parçacıklar serbest hale geçerler.



Şekil 4.4. Metal-metal sürtünmesinde yüzeyden parça kopması (Korkut, 1997).

Adhesiv aşınma teorisi, Archard tarafından, aşınma hacminin üç parametrenin fonksiyonu olarak tarif edilmesiyle açıklanmıştır (Korkut, 1997). Bu parametreler;

- Kayma hızı,
- Normal yük,
- Sertlik'dir.

Ancak bu teori, aşınmanın malzemenin mikro yapısı üzerindeki etkisini yeterli açıklığa kavuşturamadığı ve ideal kayma şartlarının sınırlılığı nedeniyle, fazla kabul görmemektedir. Bu teorinin temelini, pürüzlerdeki adhezyon mekanizması ve pürüzlerdeki kohezyon hataları oluşturmaktadır. Aşınma sırasında malzemede meydana gelen çatlak ve çatlak büyümeleri dikkate alınmamaktadır. Temas alanındaki aşınan parçacıkların benzer yarıçaplı yarı küresel parçacıklardan oluştuğu teorisiyle Eşitlik (4.1)'de verilen denklem geliştirilmiştir.

$$W = KdP / 3H \quad (4.1)$$

Burada;

W: Aşınma oranı,
K: Aşınma katsayısı,
d: Kayma mesafesi,
P: Uygulanan yük,
H: Malzemenin hacim sertliğidir.

Archard, aşınma oranının uygulanan yük ile doğru orantılı olduğunu ve yine aşınma oranının görünen temas alanından bağımsız olduğunu belirtmektedir. Bu teori ile malzemenin sertliği ile aşınma direnci arasında bir ilişki oluşturulmaktadır.

4.4.2. Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma, malzeme yüzeyine karşı metalik veya metalik olmayan aşındırıcı bir maddenin teması ile oluşmaktadır. Bu kararlı katmanın oluşmasında uygulanan yük, kayma hızı, çalışma sıcaklığı ile malzemenin bileşimi önemlidir. Aşındırıcı yüzeyin, aşınma oranını en aza indirebilmek için, yüksek sertliğe ve yeterli tokluğa sahip malzemeler kullanılması önerilmektedir.

4.4.3. Tabaka Aşınması

Abrasiv aşınmada, malzemenin aşınma yüzeyine yakın bölgelerinin önemi yokken, tabaka aşınmasında önemlidir. Çevredeki gazların ve ara malzemelerin etkisi ile meydana gelen aşınma yüzeyi sınır tabakası, çizilmelerle tekrar oluşmaktadır. Bu sebeple, bu tür aşınmada en önemli özellik aşınma yüzeylerinde meydana gelen tabakadır ve malzemenin rolü ikinci plandadır.

4.4.4. Kayma Aşınması

Kayma aşınmasını, taneli minerallerden kaynaklanan ve metal-metal aşınması olarak iki grupta incelemek mümkündür. Metaller, aşındırıcı minerallerin sertliğine bağlı olarak belirli bir aşınma davranışları gösterirler. Eğer mineral sertliği metalin sertliğinden fazla ise, aşınma miktarı da artmaktadır. Ayrıca, yüksek aşınma bölgesine temas eden tane keskinliği, aşınma miktarını arttırmaktadır. Metal olmayan

sert malzemelerde aşınma metallerde ki gibi mineral tanelerinin sertliğine bağlı olarak artmaktadır. Metal-metal aşınmasında ise, yüzey işleme kalitesi ve yağlamanın aşınmanın azaltılmasında büyük etkisi vardır.

4.4.5. Püskürtme Aşınması

Püskürtme aşınmasında aşınma miktarı, malzemenin özelliklerine ve püskürtme açısına bağlıdır. Her malzemenin püskürtme açısına bağlı olarak aşınma direnci farklıdır. Örneğin küçük püskürtme açısında yumuşak ve deforme olabilen malzemeler daha fazla aşınırken, sert ve gevrek malzemelerde büyük püskürtme açılarında maksimum aşınma sergilemektedir. Ayrıca aşınma miktarı, püskürtülen maddenin sertliğine ve püskürtme hızına bağlı olarak değişmektedir.

4.4.6. Korozi Aşınma

Abrasiv aşınma ile kimyasalların birlikte oluşturduğu aşınma şeklidir. Aşınan yüzeyler, korozi etkilere maruz kaldığında korozi aşınma meydana gelir. Kimyasal korozyon kendi başına oluşabildiği gibi, diğer aşınma türleri ile birlikte de ortaya çıkabilir. Yüzeyde oluşan filimler yüzey aşınmasını önlemektedir. Fakat filimler kırılınca ise, aşınma hızlanmaktadır. Çünkü, sürtünme hareketi esnasında filimler çatlar ve kırıldıktan sonra dökülmektedir (Domke, 1988).

4.4.7. Yuvarlanma Aşınması

Yuvarlanma aşınması birbiri üzerinde yuvarlanarak hareket eden malzemelerde görülmektedir. Yuvarlanma sırasında aşınma sadece bir malzemede olabildiği gibi, her iki malzemede de (farklı oranlarda) meydana gelebilir. Yuvarlanma aşınmasında yüzeylerin ıslak veya kuru olması aşınmayı etkilemektedir.

4.4.8. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, tekrarlı yüklemeler ve titreşim zorlamalarında meydana gelmektedir. Yorulma aşınmasında, iç yapı tahribatı, çatlamlar, lokal ayrılmalar

ortaya çıkar. Periyodik yüklemeler dolayısıyla, yüzeyde veya yüzeye yakın bölgelerde çatlaklar oluşması nedeniyle, yüzeyden kısmi çözülmeler meydana gelmektedir.

4.4.9. Termik Aşınma

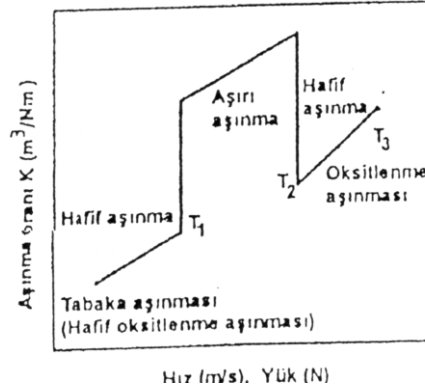
Yüksek sıcaklığın yanı sıra darbe ve gazların etkisi ile birlikte görülen aşınma seklidir. Bu aşınmaya örnek olarak, buhar ve gaz valfleri oturma yüzeyleri, valf etekleri veya valf klapeleri, sıcak hadde silindir ve merdaneleri verilebilir (Layıktez, 1988).

4.4.10. Kavitasyon Aşınması

Su makinelerinde suyun vakum (emme) etkisinin genellikle su içindeki kum zerresi gibi abrasiv maddelerle birlikte oluşturduğu aşınmadır. Bu tür aşınmanın görüldüğü yerler genel olarak su türbini çark kanatları, deniz taşıtı pervaneleri, pompa çarkları, boru dirsekleri v.s. gibi yerlerdir.

4.5. KURU SÜRTÜNMEDE ÇELİKLERİN GÖSTERDİĞİ AŞINMA DAVRANIŞLARI

Kuru sürtünmede çeliklerin, kayma hızı ve yükleme şartlarına bağlı olarak üç tür aşınma davranışı göstermektedir. Şekil 4.5’de T1, T2, T3 noktaları ile sınırlanan bu davranış şekilleri görülmektedir.



Şekil 4.5. Kuru sürtünmede çeliklerin gösterdiği aşınma davranışları (Koç, 2006).

- **Tabaka aşınması**

T1 noktasının altındaki düşük yük ve kayma hızı şartlarında (argon gazı ortamında) yüzey yorulması sonucu pulcuk şeklinde dökülmektedir. Bu taneciklerin boyutları 1-10 μm arasında değiştiği için, bu tür aşınma tabaka aşınması olarak adlandırılmaktadır. Sürtünme ortamının atmosfere veya sıvı bir ortama açık olması halinde, reaksiyon ürünü olarak meydana gelen aşınma taneciklerinin boyutu 0,1 μm civarında olmaktadır. Tabaka aşınmasının bir türü olan bu aşınma hafif aşınma olarak tanımlanmaktadır. Hafif aşınmada yüzeyler de birbiri üzerinde adsorplanan gaz tabakaları veya oda sıcaklığında teşekkül eden oksit filmleri üzerinde kayar ve aşınma tanecikleri tamamen oksitlerden oluşur. Bu nedenle, bu aşınma hafif oksitlenme aşınması olarak da tanımlanmaktadır.

- **Aşırı aşınma**

T1 ve T2 noktaları arasında aşınma oranının ani olarak artış gösterdiği bölge, aşırı aşınma bölgesi olarak tanımlanmaktadır. T1 noktasından itibaren daha önce düşük yük veya hız şartlarında, aşınan yüzeylerde oluşan koruyucu oksit filmleri kırılarak aşırı aşınma bölgesine geçilmektedir. Yükün veya hızın artması ile temas yüzeyinde meydana gelen sıcaklık etkisiyle plastik deformasyon miktarı da artmaktadır. Bunun sonucu olarak da aşınma miktarı hızlı bir artış göstermektedir. Aşırı aşınmada meydana gelen aşınma tanecikleri boyutları 10 μm civarındadır.

- **Oksitlenme aşınması**

Kayma hızı veya normal yükün etkisiyle temas noktalarındaki sıcaklığının artması halinde, aşınan yüzeylerde plastik deformasyonun yanında, bir de kalıcı oksit filmi oluşur. Bu filmin kayma hareketi sırasında kırılmasıyla meydana gelen malzeme kaybına oksitlenme aşınması adı verilmektedir. Çeliklerdeki oksitlenme aşınması T_2 ve T_3 arasında ve bu noktalar civarında meydana gelmektedir.



BÖLÜM 5

DENEYSEL MALZEME VE METOT

5.1. DENEYSEL MALZEMELER

Deneyisel çalışmalarda kullanılan tozlar Alfa Aesar (Almanya) firmasından temin edilmiştir. 17-4 PH paslanmaz çeliklerin üretiminde kullanılan elemental tozlar ve özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Elemental tozlar ve özellikleri.

	Elemental Tozlar	Safılık (%)	Toz Boyutu (µm)
1	Bakır (Cu)	99	44
2	Demir (Fe)	99,9	10
3	Karbon (C)	99	10-20
4	Krom (Cr)	99	44
5	Mangan (Mn)	99,8	44
6	Molibden (Mo)	99,95	3-7
7	Nikel (Ni)	99,9	3-7
8	Niobyum (Nb)	99,8	1-5
9	Silisyum (Si)	99,99	1-20
10	Tantalyum (Ta)	99,9	44
11	Titanyum (Ti)	99,7	13,538

5.2. ELEMENTAL TOZLARIN TANECİK YAPILARININ İNCELENMESİ

Çizelge 5.1’de verilen tozların yüzey özelliklerinin ve boyutlarının görülebilmesi için soğuk gömme işlemleri yapılmıştır.

Hazırlanan numuneler Şekil 5.1’deki Presi Mecapol P 262 marka polisaj cihazında zımparalanarak parlatılmıştır.



Şekil 5.1. Presi Mecapol P262 marka polisaj cihazı.

Zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra Şekil 5.2’deki MEIJI ML 7100 marka mikroskop cihazı ile tozların toz yapıları incelenmiştir.



Şekil 5.2. MEIJI ML 7100 marka optik mikroskop cihazı.

5.3. ELEMENTEL TOZLARIN KARIŞTIRILMASI

Üretilmesi planlanan numuneler, 17-4 PH paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimine bağlı kalınarak ağırlık (%) bazında elementel tozlar kullanılarak hazırlanmıştır. Çizelge 5.2’de elementel tozlar kullanılarak hazırlanan 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımların kimyasal bileşimleri verilmektedir.

Çizelge 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan 17-4 PH paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri.

	Elementler (% Ağırlık)										
17-4 PH	Cr	Cu	Ni	Mn	Si	Mo	Ta	Ti	Nb	C	Fe
Mo İlaveli	17	4	4	1	1	0,5	-	-	0,3	0,07	Kalan
Mo İlaveli	17	4	4	1	1	1	-	-	0,3	0,07	Kalan
Mo İlaveli	17	4	4	1	1	2	-	-	0,3	0,07	Kalan
Mo İlaveli	17	4	4	1	1	4	-	-	0,3	0,07	Kalan
Ta İlaveli	17	4	4	1	1	-	0,15	-	0,3	0,07	Kalan
Ta İlaveli	17	4	4	1	1	-	0,30	-	0,3	0,07	Kalan
Ta İlaveli	17	4	4	1	1	-	0,45	-	0,3	0,07	Kalan
Ta İlaveli	17	4	4	1	1	-	0,60	-	0,3	0,07	Kalan
Ti İlaveli	17	4	4	1	1	-	-	0,5	0,3	0,07	Kalan
Ti İlaveli	17	4	4	1	1	-	-	1	0,3	0,07	Kalan
Ti İlaveli	17	4	4	1	1	-	-	1,5	0,3	0,07	Kalan
Ti İlaveli	17	4	4	1	1	-	-	2	0,3	0,07	Kalan

Çizelge 5.2’de verilen kimyasal bileşimlere uygun olarak Precisa XB220A marka 0,0001 g hassasiyetindeki hassas terazide tartılarak hazırlanmıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Precisa XB220A marka hassas tartı.

Daha sonra elementel tozlar Şekil 5.4’de verilen Turbula Shaker Mixer (Model T2F Glenn Mills) karıştırıcıda 120 rpm (dev/dak) ile 2 saat karıştırılmıştır.



Şekil 5.4. Turbula Shaker Mixer (Model T2F Glenn Mills) tipi karıştırıcı.

5.4. TOZ KARIŞIMININ SOĞUK PRESLENMESİ

5.4.1. Presleme Kalıbı

Karıştırılan alaşım tozlar, Şekil 5.5’de verilen kalıpta soğuk preslenerek (800 MPa) Ø10x6-7 mm boyutunda ham numuneler üretilmiştir.



Şekil 5.5. Presleme kalıbı.

Soğuk presleme işleminde, Şekil 5.6'daki tek eksenli ve 50 ton sıkıştırma kapasiteli Hidroliksan marka pres kullanılmıştır.



Şekil 5.6. Tek eksenli 50 ton kapasiteli Hidroliksan marka pres.

5.5. SİNERLEME

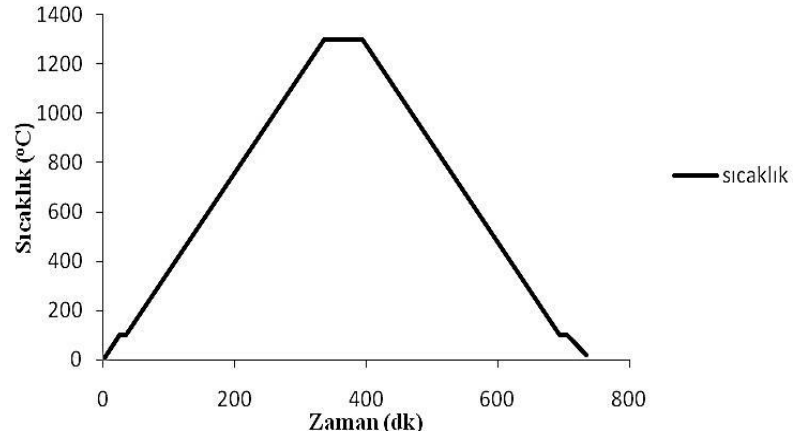
Ön şekillendirilmiş ve farklı miktarlarda Mo, Ta ve Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik ham parçalar Şekil 5.7'deki Thermal Technology GMBH marka ısıt

işlem fırınında 1300 °C’da, 1 saat sinterlenerek (10^{-6} milibar vakumda ve 4 °C/dak ısıtma hızında), fırında (aynı soğuma hızında) oda sıcaklığına soğutulmuştur.



Şekil 5.7. Thermal Technology GMBH marka ısıtma fırını.

Fırın çalıştırılmadan önce seramik tüp 10 dakika argon gazı ile doldurularak, fırın içerisindeki atmosferik ortam tamamen boşaltılmıştır. Ayrıca fırın içerisine sinterleme öncesinde kurban malzemesi olarak sünger (sponge) Ti konulmuştur. Şekil 5.8’de 17-4 PH alaşımlarının sinterlenme sıcaklık zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 5.8. 17-4 PH alaşımlarının sinterlenme sıcaklık zaman grafiği.

5.6. YAŞLANDIRMA İŞLEMLERİ

Farklı miktarlarda Ta ve Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımı numuneler, 1050 °C’de vakumlu fırın ortamında 1 saat tutularak solüsyona alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise aynı numuneler (literatür dikkate alınarak belirlenen yaşlandırma parametreleri) 480 °C’de vakumlu fırın ortamında 1, 4 ve 8 saat yaşlandırılmıştır.

5.7. KARAKTERİZASYON İŞLEMLERİ

5.7.1. Metalografik İşlemler

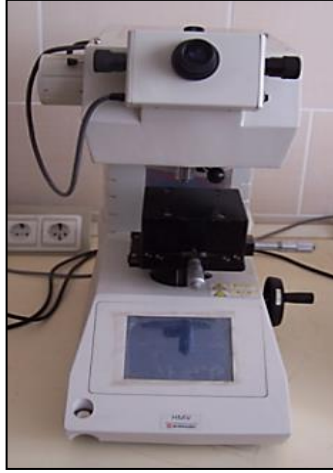
Sinterlenen ve sonrasında yaşlandırılan 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımlar Presi Mecapol P262 marka polisaj cihazında 300 dev/dak hızda 800, 1000 ve 1200 SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. 1 µm elmas pasta ile parlatılmış, % 25 oxalic acid, % 75 saf su içeren çözeltide elektrolitik (12 V) dağlanmıştır.

5.7.2. SEM, EDS ve XRD İncelemeleri

Dağlanan tüm numuneler (SEM+EDS) (CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM) marka tarama elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile (RIGAKU ULTRA IV) incelenmiştir.

5.7.3. Sertlik Ölçümleri

17-4 PH alaşımı numunelerin sertlik ölçümleri, Şekil 5.9’daki SHIMADZU marka mikro sertlik ölçüm cihazında (HMV 50 g’lık yük uygulanmıştır) yapılmıştır. Sertliklerin belirlenmesinde her bir numunede beş farklı yerden sertlik ölçümü yapıp ortalaması alınmıştır.



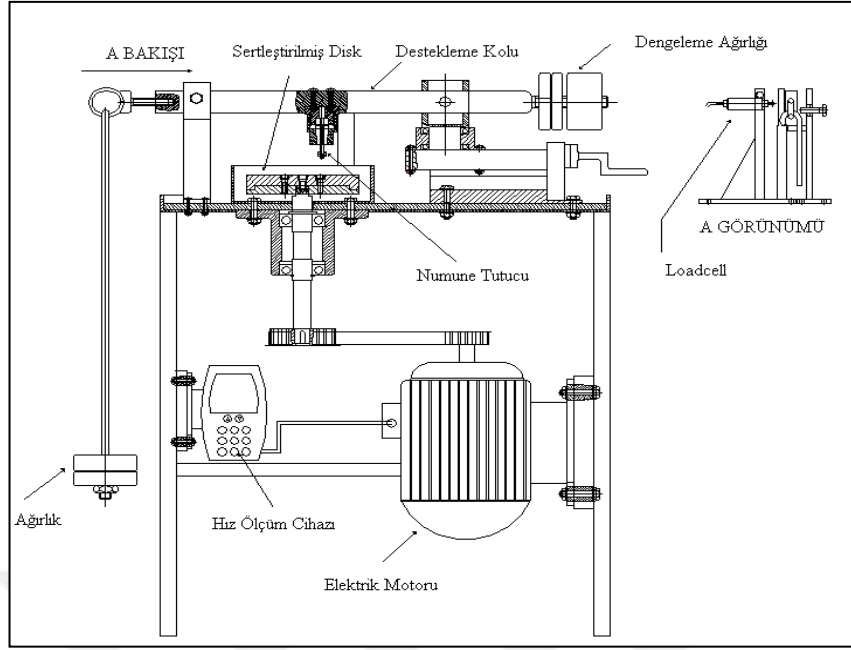
Şekil 5.9. SHIMADZU marka HMV (vickers) sertlik cihazı.

5.7.4. Yoğunluk Ölçümleri

17-4 PH alaşımı numunelerin yoğunluk ölçümleri Precisa XB220A marka maksimum 220 g, 0,0001 (1/10000) g hassasiyetteki hassas teraziye bağlı yoğunluk ölçüm kiti ile Archimets prensibine göre gerçekleştirilmiştir.

5.8. YAŞLANDIRMA SONRASI AŞINMA MİKTARLARININ ÖLÇÜMÜ

Aşınma testlerinde Şekil 5.10'daki şematik görüntüsü verilen pin-on-disk tipi standart test cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz her türlü yük, kayma hızı ve farklı devirlerde çalışabilmektedir. Cihazdaki aşındırıcı döner disk; Ç4140 malzemesinde 230 mm çapında, 20 mm kalınlığında, vakum ortamında sertleştirilmiş 60 HRC sertliğe sahiptir.



Şekil 5.10. Aşınma test cihazının şematik görünümü.

Aşınma testleri öncesinde numune yüzeyleri 1200 grid zımpara ile hazırlandıktan sonra 6 μm elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır. Böylece, her numunede aynı yüzey kalitesi sağlanmıştır. Aşınma testlerinde (ASTM: G99-05) iki farklı yük (30 N ve 45 N), beş farklı kayma mesafesi (600, 1200, 1800, 2400 ve 3000 m) ve $0,8 \text{ ms}^{-1}$ lik kayma hızı test edilmiştir. Test öncesinde aşındırıcı disk ve numune yüzeyleri aseton ile temizlenmiştir. Numunelerin aşınma öncesi ve sonrası ağırlıkları 0,0001 (1/10000) g hassasiyetli terazide tartılarak, ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Aşınma oranlarının hesaplanmasında ise Eşitlik (5.1)'de verilen denklem kullanılmıştır.

$$W_a = \frac{\Delta G \text{ (mg)}}{d P S \text{ (g/cm}^3\text{) (N) (m)}} \quad (5.1)$$

Burada; W_a aşınma oranı (mm^3/Nm), ΔG ağırlık kaybı (mg), P yükleme ağırlığı (N), S kayma mesafesi (m), d yoğunluk (g/cm^3) dür.

Son olarakda aşınma yüzeyleri yine CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM marka tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

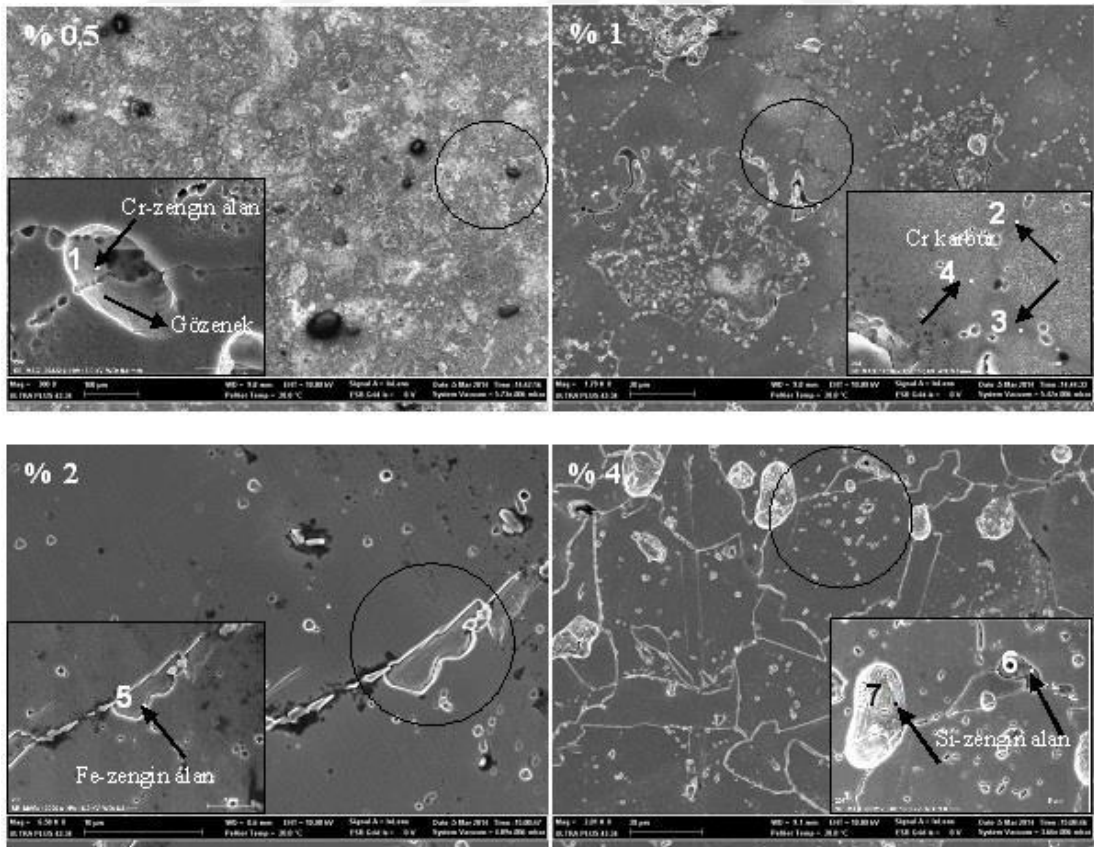
BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

6.1. MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

6.1.1. Farklı Miktarlarda Mo İlave Edilen 17-4 PH Alaşımlarının SEM ve EDS İncelemeleri

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımlarının sinterlenme sonrası mikroyapı SEM görüntüleri, Şekil 6.1’de ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) sonuçları, Çizelge 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin mikroyapı SEM görüntüleri.

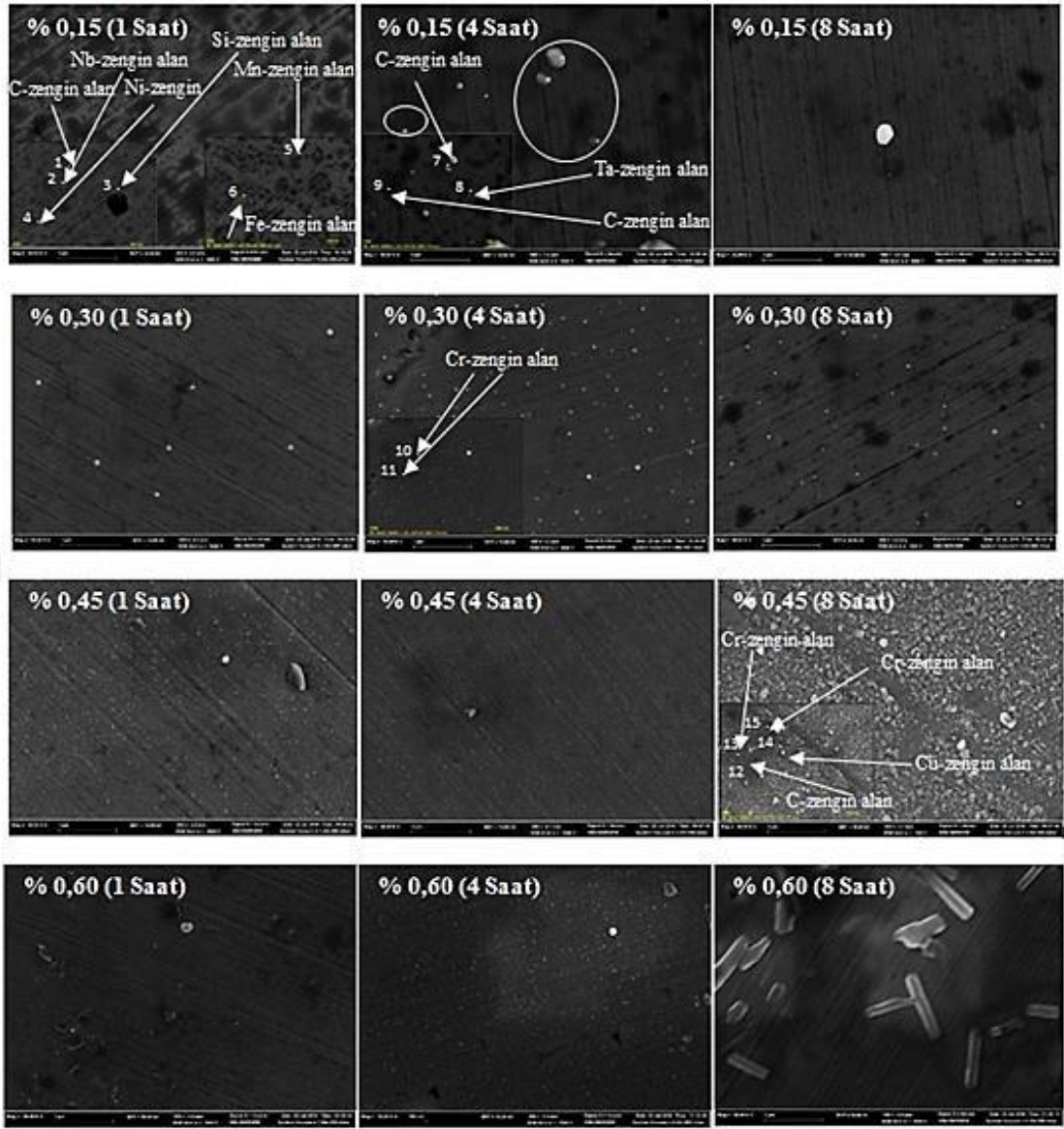
Çizelge 6.1. Farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin EDS analizi sonuçları.

Konum	Element Miktarı (%)							
	C	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Si
1	-	35,33	-	127,53	3,62	-	7,10	-
2	14,05	9,24	3,24	65,52	1,08	0,50	4,82	1,54
3	14,07	9,83	13,53	52,97	1,18	0,35	4,31	3,77
4	9,83	10,32	4,43	67,56	1,39	0,47	4,44	1,55
5	2,55	14,86	-	67,07	-	0,70	5,15	0,58
6	30	3,06	-	7,24	-	0,11	-	59,59
7	19,13	15,31	-	59,58	-	2,02	2,02	1,93

Şekil 6.1’de 1300 °C sıcaklıkta 1 saat sinterlenen ve farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımların mikroyapı SEM görüntülerinde, alaşımların yapısında Fe-zengin (δ -ferrit) bölgelerle birlikte mikro boşlukların da olduğu görülmektedir. Benzer bulgular daha önce yapılan bazı çalışmalarda da rapor edilmiştir (Gülsoy vd., 2004; Gülsoy, 2005; Gülsoy, 2007). Ayrıca, Çizelge 6.1’de verilen EDS analizi sonuçlarına göre, alaşımların yapısında C-zengin (2, 3, 4, 6, 7), Cr-zengin (1) bölgelerin olduğu da anlaşılmaktadır. Alaşımların yapısında oluşan bu C’ca zengin bölgeler, karbürlerin oluştuğunun da bir göstergesidir. Toz metalurjisi ile üretilen alaşımlarda görülen ve kaçınılması mümkün olmayan ortak özellik ise, alaşımların yapısında oluşan gözeneklerdir. Toz metalurjisi yönteminde, yoğunluk, üretilen parçanın gözeneklilik oranının bir göstergesi olarak değerlendirildiğinden bu gözeneklerin oluşması, aynı zamanda alaşımların yoğunluğunun da azalmasına neden olmaktadır.

6.1.2. Ta İlave Edilen 17-4 PH Alaşımların SEM ve EDS İncelemeleri

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımlarının 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırma sonrası mikroyapı SEM görüntüleri, Şekil 6.2’de ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) sonuçları ise Çizelge 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Farklı miktarlarda Ta ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin mikroyapı SEM görüntüleri.

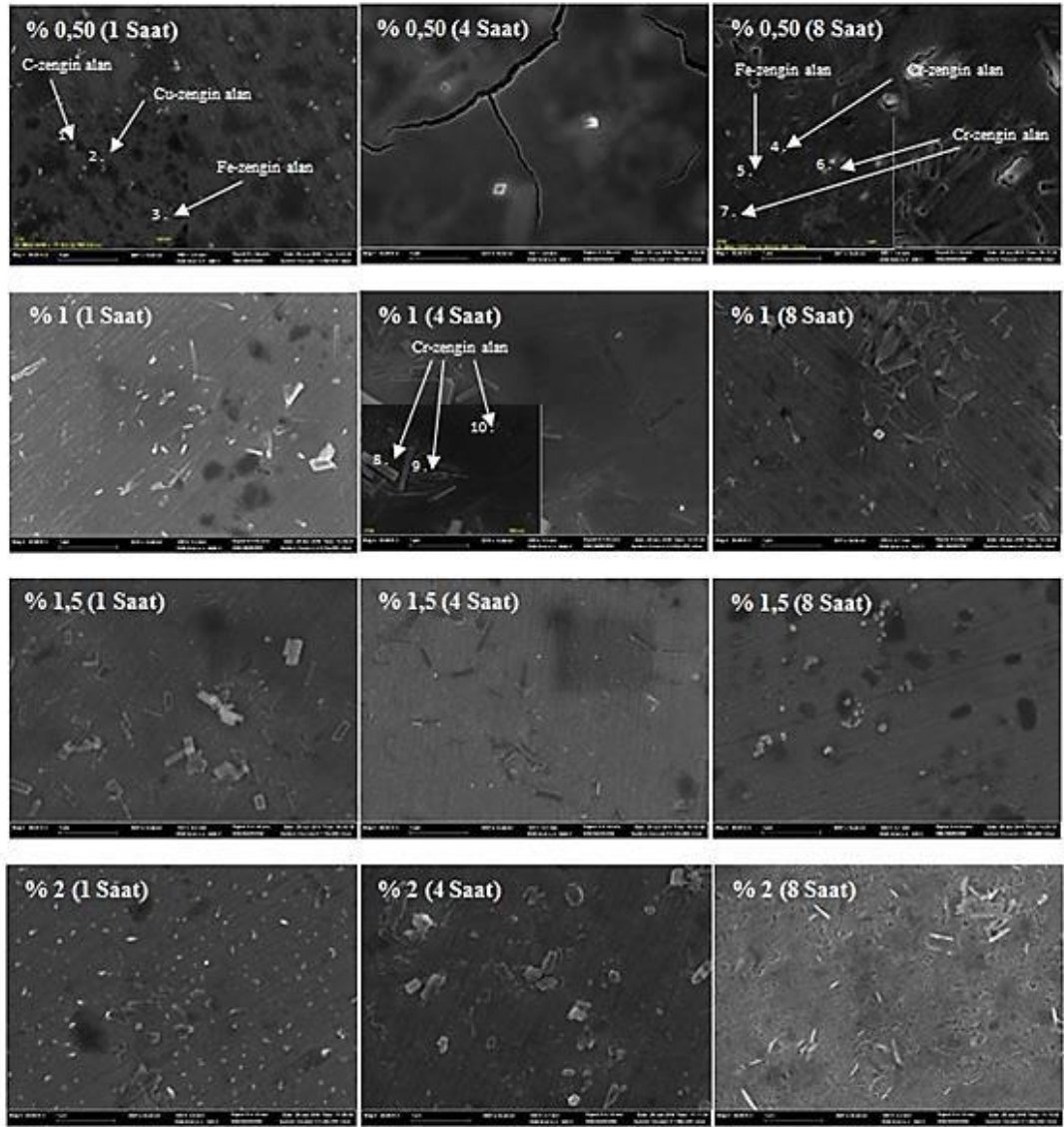
Çizelge 6.2. Farklı miktarlarda Ta ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin EDS analizi sonuçları.

Konum	Element Miktarı (%)								
	C	Cr	Cu	Fe	Mn	Ta	Ni	Si	Nb
1	7,36	6,99	-	75,53	0	0	8,17	1,96	0
2	7,21	12,57	-	70,31	0	0,07	6,91	1,28	1,66
3	4,26	11,14	-	61,80	0	1,85	3,21	17,26	0,48
4	5,76	12,88	-	70,23	0	1,36	9,35	0,34	0,07
5	4,90	12,28	-	73,36	2,26	0,59	6,14	0,46	0
6	3,98	12,69	-	75,14	0,50	0,30	6,04	0,43	0,92
7	16,64	16,75	-	61,44	0	0,92	3,44	0,69	0,12
8	9,80	17,99	-	66,21	0,51	1,00	4,10	0,39	0
9	14,03	14,18	-	67,38	0,98	0,02	2,24	1,17	0
10	4,23	30,78	3,92	56,39	1,04	0,63	2,58	0	0,43
11	3,50	28,43	1,63	62,12	0,58	0	3,41	0,33	0
12	4,13	19,06	4,08	67,44	0	0	3,02	1,38	0,90
13	3,66	20,16	2,06	68,40	0,49	0	3,39	1,85	0
14	3,98	10,97	8,30	67,71	2,46	1,07	5,09	0,29	0,13
15	3,81	16,31	4,66	69,86	0,21	0,61	3,54	0,90	0,09

Şekil 6.2’de, farklı miktarlarda Ta ilave edilip 1300 °C sıcaklıkta sinterlenen ve 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımların mikroyapı SEM görüntülerinde genel olarak ana faz içinde homojen dağılmamış karbürlerin olduğu görülmektedir. Ayrıca, Çizelge 6.2’de verilen EDS sonuçları incelendiğinde, mikro yapıda C-zengin bölgelerin olduğu (1, 2, 7, 8, 9) anlaşılmaktadır.

6.1.3. Ti İlave Edilen 17-4 PH Alaşımların SEM ve EDS İncelemeleri

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımlarının 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırma sonrası SEM görüntüleri, Şekil 6.3’de ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) sonuçları, Çizelge 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.3. Farklı miktarlarda Ti ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin mikroyapı SEM görüntüleri.

Çizelge 6.3. Farklı miktarlarda Ti ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin EDS analizi sonuçları.

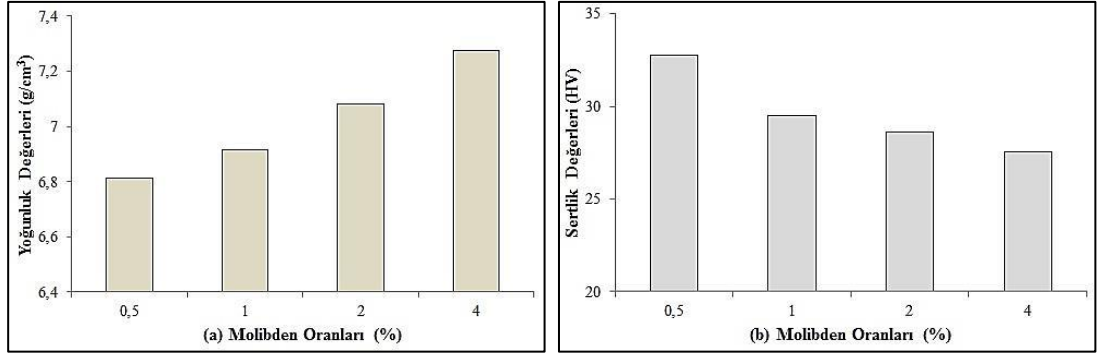
Konum	Element Miktarı (%)								
	C	Cr	Cu	Fe	Mn	Ti	Ni	Nb	Si
1	10,70	15,10	13,27	55,37	0	0	5,57	0	-
2	5,82	15,23	13,02	61,01	0,14	0	4,78	0	-
3	0,91	15,20	5,09	73,87	0	0	4,47	0,46	-
4	4,72	21,39	2,64	66,66	1,16	0,08	2,71	0	0,64
5	3,79	17,11	2,89	71,44	1,47	0,19	2,08	0,52	0,50
6	4,28	17,87	2,20	72,77	0,17	0	2,15	0	0,55
7	2,67	19,36	3,56	68,84	0,69	1,20	2,39	0,61	0,68
8	5,53	68,71	1,39	20,57	1,66	0	1,94	0,13	0,07
9	2,58	88,55	0,05	7,72	0,37	0	0,73	0	0
10	1,84	96,33	0,33	0,65	0,34	0	0,35	0,13	0,03

Şekil 6.3’de, farklı miktarlarda Ti ilave edilen ve 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımların mikroyapı SEM görüntüleri incelendiğinde, alaşımların yapısında karbür türü fazların olduğu anlaşılmaktadır. Bu fazların karbür türü fazlar olduğu, Çizelge 6.3’de verilen EDS sonuçlarından da anlaşılmaktadır (1, 2, 4, 8 C-zengin bölgeler). Ayrıca, Çizelge 6.3’de verilen EDS sonuçları incelendiğinde, mikro yapıda Cr-zengin bölgeler olduğu (8, 9, 10) anlaşılmaktadır.

6.2. YOĞUNLUK VE SERTLİK SONUÇLARININ İNCELENMESİ

6.2.1. Farklı Miktarlarda Mo İlave Edilen Alaşımların Yoğunluk ve Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 6.4’de, toz metalurjisi (TM) yöntemi ile üretilen ve farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin yoğunluk ve sertlik değişimleri verilmiştir.

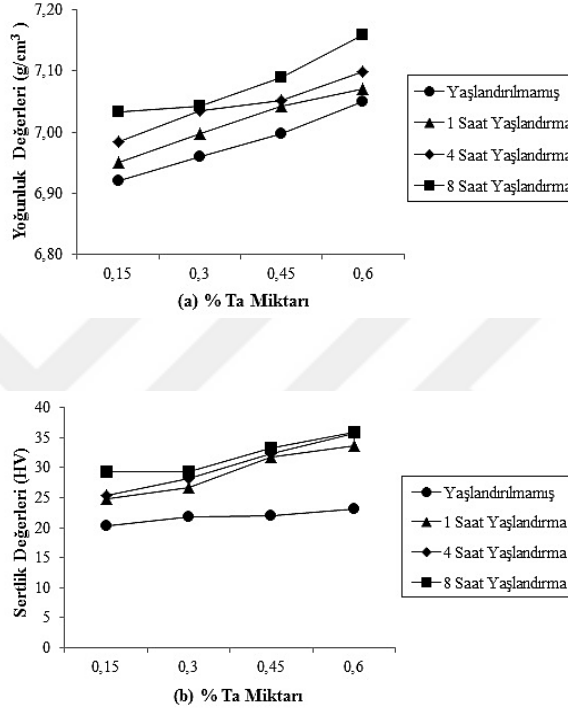


Şekil 6.4. Farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin
a) yoğunluk değişimleri, b) sertlik değişimleri.

Şekil 6.4 a’da verilen yoğunluk sonuçlarına göre, 17-4 PH paslanmaz çeliklerin bileşimindeki Mo miktarı arttıkça, alaşımların yoğunluklarının da arttığı açıkça görülmektedir. Yoğunluk artışındaki en önemli parametrelerin sinterleme süresi ve sıcaklığı olduğu daha önce yapılan bazı çalışmalarda da rapor edilmiştir (Wu vd., 2002; Wu vd., 2002). Yoğunluk artışında diğer önemli bir faktörde sıvı faz sinterlemesidir (Salahinejad vd., 2012; Pandya vd., 2012; Javanbakht vd., 2015). Bu çalışmada, tüm sinterleme parametreleri sabit tutulduğu için, 17-4 PH paslanmaz çeliklerin yoğunluk değişimlerinde bahsedilen parametrelerin etkisi elimine edilmiştir. Tüm numunelerdeki tek değişken sadece alaşımın içerdiği Mo miktarıdır. Bu bilgilere dayanılarak yoğunluk değişiminin, ilave edilen molibdenin yoğunluğundan kaynaklandığı ifade edilebilir. Şekil 6.4 b’de ise sertlik değişimleri verilmiştir. Deneysel çalışmaların başında, ilave edilen Mo miktarı arttıkça, 17-4 PH paslanmaz çeliklerin sertliklerinin artması öngörülmüştü. Fakat yapılan çalışmalar sonunda beklentilerin oluşmadığı gözlenmiştir. Şekil 6.4 b’de verilen sertlik sonuçları incelendiğinde, ilave edilen Mo miktarı arttıkça, alaşımın sertliğinin azaldığı belirlenmiştir. Mo periyodik tablonun VIA grubunda bulunduğu için, diğer elementlere göre daha yüksek elektronik konfigürasyona ve ergime sıcaklığına (2623 °C) sahiptir. Bunun anlamı, yüksek ergime sıcaklığına sahip olması nedeniyle sinterleme işlemlerinin yapıldığı sıcaklıkta, katı eriyik içerisinde çözünürlüğünün sınırlı olmasıdır. Bu nedenle de, Mo miktarının arttırılması sertliğe katkı sağlamamaktadır.

6.2.2. Ta İlave Edilen 17-4 PH Alaşımların Yoğunluk ve Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 6.5’de, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen ve farklı miktarlarda Ta içeren 17-4 PH paslanmaz çeliklerin yoğunluk ve sertlik değişimleri verilmiştir.



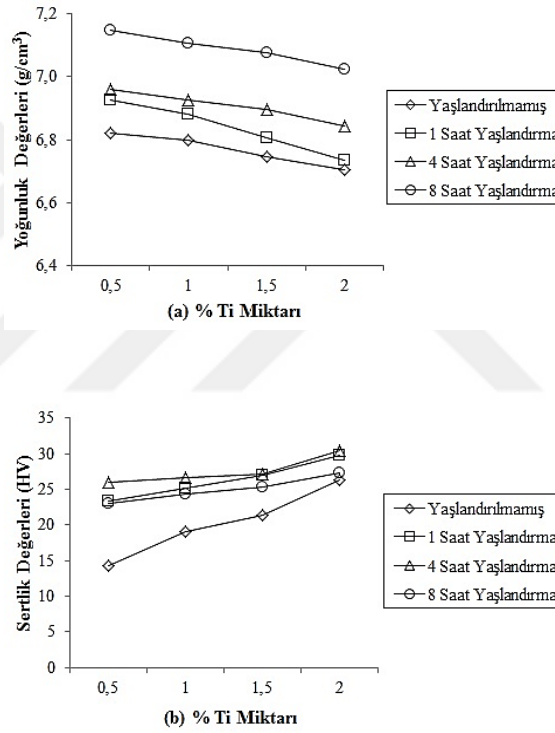
Şekil 6.5. Farklı miktarlarda Ta ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin a) yoğunluk değişimleri, b) sertlik değişimleri.

Şekil 6.5 a’da verilen yoğunluk sonuçları incelendiğinde 17-4 PH alaşımların yoğunlukları, kimyasal bileşimindeki Ta miktarı arttıkça artmaktadır. Alaşımlara ilave edilen Ta miktarı arttıkça, alaşımların yoğunluklarının artması beklenen bir sonuçtur. Çünkü Ta refrakter metal grubundaki metallerden birisi olduğu için, Ta miktarı arttıkça, alaşımların yoğunlukları da artmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi bu çalışmada sinterleme parametreleri sabit tutulduğu için yoğunluktaki bu değişimin alaşımlara ilave edilen Ta yoğunluğu ile ilişkilendirmek mümkündür. Sertlik değişimleri ise Şekil 6.5 b’de verilmiştir. Sertlik sonuçları incelendiğinde 17-4 PH alaşımlarının kimyasal bileşimine ilave edilen Ta miktarı arttıkça, 17-4 PH paslanmaz çelik numunelerinin de sertliklerinin arttığı görülmektedir. Sertlikteki bu artışı 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımlarda, yaşlandırma sırasında yapıda oluşması

mümkün olan karbür fazlarındaki artışa bağlamak mümkündür. Bu nedenle yaşlandırma süresi arttıkça, yapıda oluşturulan ikinci faz ve karbürlerde sertliği arttırıcı bir fonksiyon göstermektedir.

6.2.3. Ti İlave Edilen 17-4 PH Alaşımların Yoğunluk ve Sertlik Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 6.6’da, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen ve farklı miktarlarda Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin yoğunluk ve sertlik değişimleri verilmiştir.



Şekil 6.6. Farklı miktarlarda Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin a) yoğunluk değişimleri, b) sertlik değişimleri.

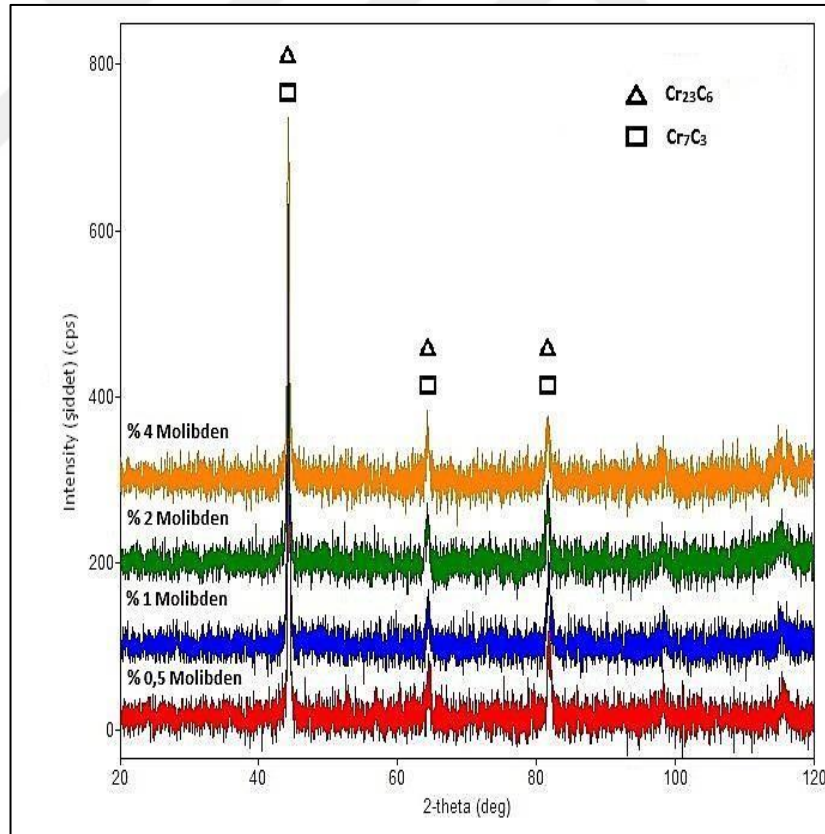
Şekil 6.6 a’da verilen yoğunluk sonuçları incelendiğinde, 17-4 PH paslanmaz çeliklerin bileşimindeki Ti miktarı arttıkça, alaşımların yoğunlukları azalmaktadır. Alaşımların yoğunluğundaki bu değişimin nedeni, 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımlara ilave edilen Ti yoğunluğunun, alaşımın yoğunluğundan daha düşük olmasıdır. Şekil 6.6 b’de verilen sertlik sonuçları incelendiğinde ise, alaşımlara ilave edilen Ti miktarının artmasıyla, alaşımın sertliğinin de arttığı görülmektedir. Bu durum Hall-Petch eşitliğiyle açıklanabilir. Bu eşitliğe göre tane boyutu ne kadar

küçük olursa malzemelerin akma dayanımında o ölçüde artmaktadır. Ti elementinin atomlarında tane içinde çözünmeyen ikinci faz oluşturacak şekilde çöktüğü için tane boyutunun büyümesine engel olmaktadır. Bu yüzden alaşımın sertliğide artmaktadır.

6.3. XRD ANALİZİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.3.1. Mo İlave Edilen 17-4 PH Alaşımların XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 6.7’de farklı miktarlarda Mo içeren 17-4 PH paslanmaz çeliklerin XRD sonuçları verilmiştir. XRD analizlerinde 17-4 PH paslanmaz çelik malzemelerde dayanımın artırılmasına katkı sağlayan Cr_{23}C_6 ve Cr_7C_3 (karbürler) fazları taranmıştır.

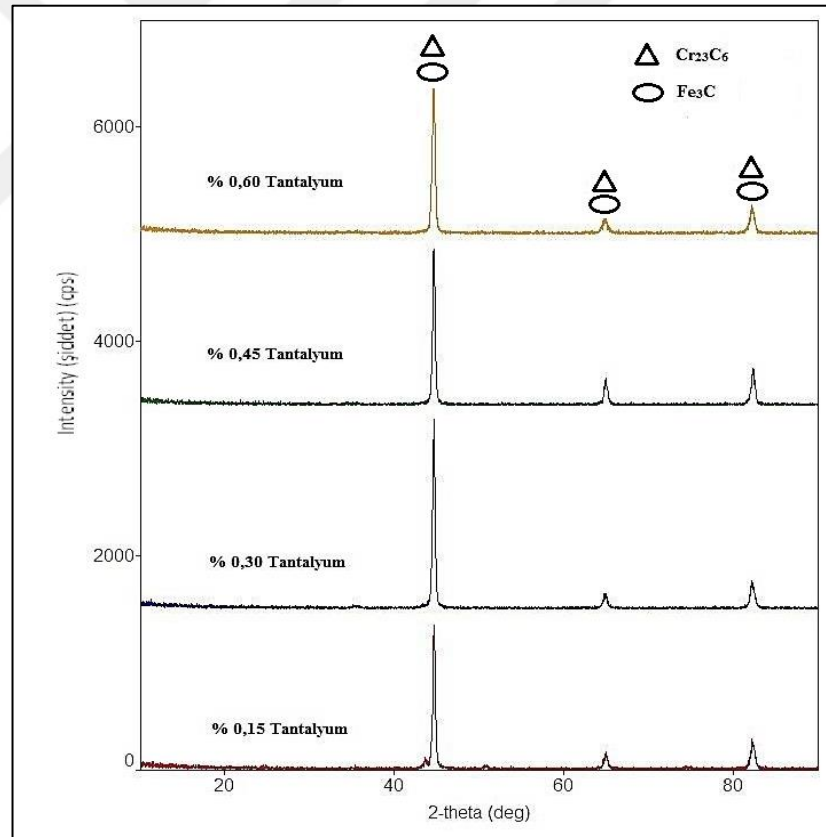


Şekil 6.7. Farklı miktarlarda Mo içeren 17-4 PH paslanmaz çeliklerin XRD sonuçları.

Şekil 6.7’de verilen XRD analiz sonucu incelendiğinde, yapıda M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ karbürlerinin oluştuğu görülmektedir. M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ karbürleri, malzemelerin mekanik özelliklerini, özellikle aşınma davranışını arttıran fazlardır (Çetinkaya, 2006; Kalyon vd., 2014).

6.3.2. Ta İlave Edilen 17-4 PH Alaşımların XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı miktarlarda Ta içeren 17-4 PH paslanmaz çeliklerin XRD sonuçları Şekil 6.8’de verilmiştir. 17-4 PH paslanmaz çelik malzemelerde dayanımın artmasını sağlayan $Cr_{23}C_6$ ve Fe_3C fazlarına bakılmıştır.



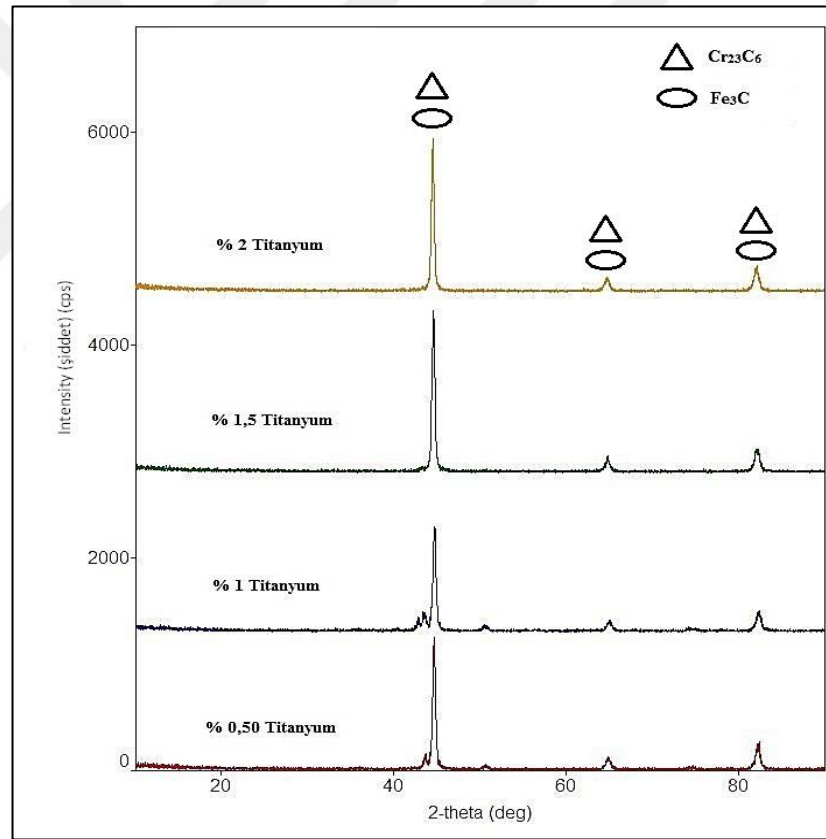
Şekil 6.8. Farklı miktarlarda Ta içeren 17-4 PH paslanmaz çeliklerin XRD sonuçları.

Şekil 6.8’de verilen XRD analiz sonucuna bakıldığında, yapıda oluşması beklenen $M_{23}C_6$ ve M_3C karbürlerinin, oluştuğu tesbit edilmektedir. Bilindiği gibi karbürler,

alaşım elementinin (alaşım elementlerini Mn, Cr, Mo, W, Ta, V, Nb ve Ti oluşturmaktadır) karbon elementi ile yaptığı sert ve mukavemetli kompleks yapılardır. Bu yapılar sayesinde malzemelerin mekanik özellikleri iyileşirken, aşınma dirençleride artmaktadır (Yıldırım, 1986; Çetinkaya, 2006; Kalyon vd., 2014).

6.3.3. Ti İlave Edilen 17-4 PH Alaşımların XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı miktarlarda Ti içeren 17-4 PH paslanmaz çeliklerin XRD sonuçları Şekil 6.9'da verilmiştir. 17-4 PH paslanmaz çelik malzemelerde dayanımın artmasında önemli rol oynayan Cr_{23}C_6 ve Fe_3C fazları taranmıştır.



Şekil 6.9. Farklı miktarlarda Ti içeren 17-4 PH paslanmaz çeliklerin XRD sonuçları.

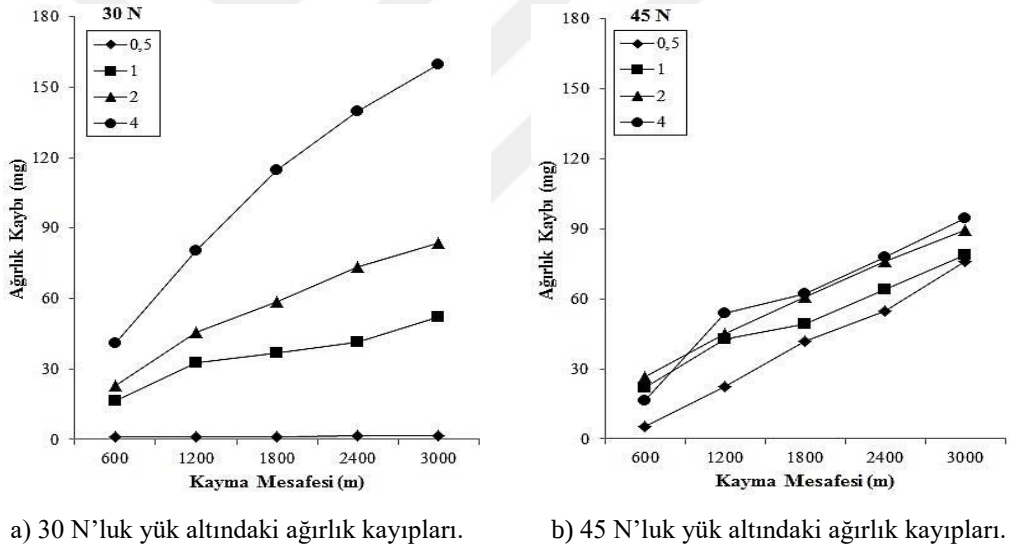
Şekil 6.9'da verilen XRD analiz sonucu incelendiğinde, yapıda M_{23}C_6 ve M_3C karbürlerinin oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu karbürler alaşım elementinin karbonla yaptığı sert ve kompleks yapılardır ve alaşımların aşınma dirençlerini artırırken,

mekanik özelliklerini de iyileştiren fazlardandır (Yıldırım, 1986; Çetinkaya, 2006; Kalyon vd., 2014).

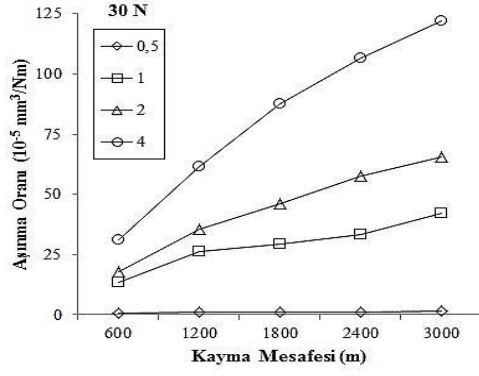
6.4. AŞINMA TEST SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.4.1. Mo İlave Edilen 17-4 PH Alaşımların Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

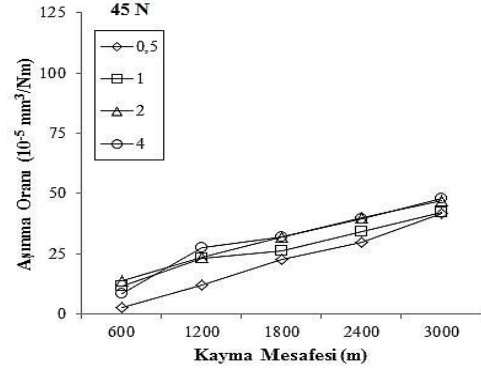
Farklı miktarla Mo ilave edilen TM 17-4 PH paslanmaz çeliklerin aşınma davranışı üzerindeki etkisinin belirlenmesi için aşınma testleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen ağırlık kayıpları ve hesaplanan aşınma oranları Şekil 6.10'da, sürtünme katsayıları ise Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.10. (devam ediyor).



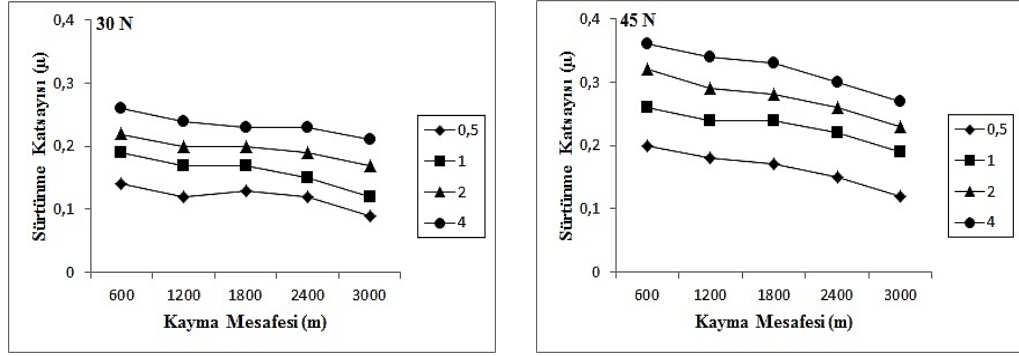
c) 30 N'luk yük altındaki aşınma oranları.



d) 45 N'luk yük altındaki aşınma oranları.

Şekil 6.10. Farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin ağırlık kaybı ve aşınma oranları.

Şekil 6.10'da verilen ağırlık kayıpları incelendiğinde, hem 30 N yük altında hem de 45 N yük altında 3000 m kayma mesafesi sonunda en yüksek ağırlık kaybının % 4 Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında elde edildiği görülmektedir. En düşük ağırlık kayıpları ise % 0,5 Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında elde edilmiştir. Kuru kayma aşınma testlerinde elde edilen ağırlık kayıpları ile sertlik sonuçları (Bkz. Şekil 6.4 b) karşılaştırıldığında, sonuçların birbirini desteklediği anlaşılmaktadır. Sertlik sonuçlarına göre en yüksek sertliğe sahip (% 0,5 Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında) numunelerde daha düşük ağırlık kaybı, sertliği düşük olan (% 4 Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında) numunelerde ise daha yüksek ağırlık kaybı meydana geldiği gözlenmiştir. İlave edilen Mo miktarı arttıkça, 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımlarının ağırlık kayıpları da artmaktadır. Yine Şekil 6.10'da verilen aşınma oranları incelendiğinde, ağırlık kaybı sonuçlarıyla aşınma oranlarının birbirini desteklediği görülmektedir.

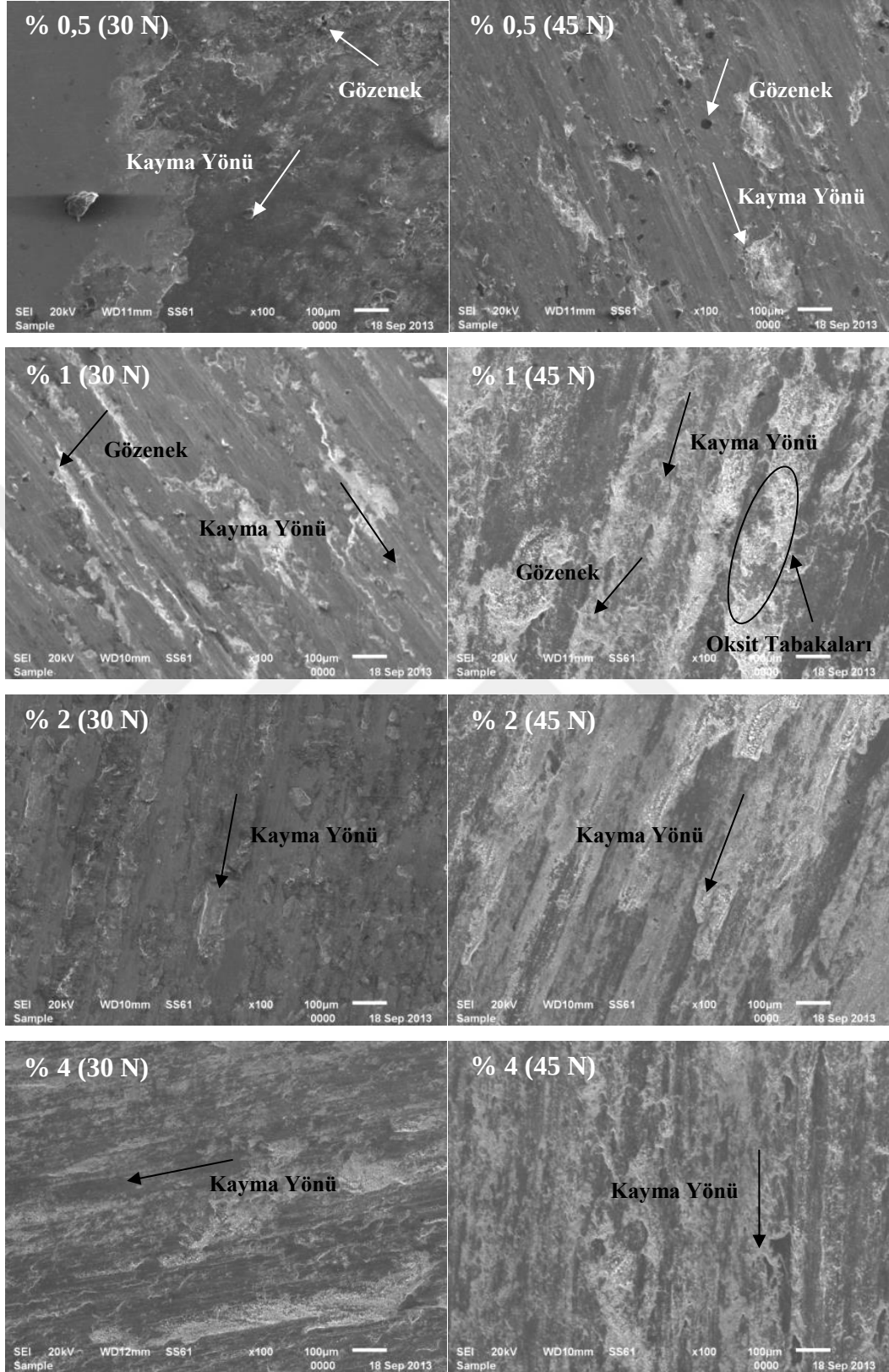


a) 30 N'luk yük altındaki sürtünme katsayıları. b) 45 N'luk yük altındaki sürtünme katsayıları.

Şekil 6.11. Farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin sürtünme katsayıları.

Şekil 6.11'de verilen sürtünme katsayısı sonuçlarına göre, en yüksek sürtünme katsayısı değerleri, kimyasal bileşiminde % 4 Mo bulunan numunelerde elde edilirken, en düşük sürtünme katsayısı değerlerinin ise % 0,5 Mo içeren alaşımda olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen sürtünme katsayıları, sertlik sonuçları (Bkz. Şekil 6.4 b) ve Şekil 6.10'da verilen ağırlık kaybı sonuçları ile ilişkilendirildiğinde, sonuçların birbirleri ile tutarlı olduğu görülmektedir. En yüksek sertlik ölçülen % 0,5 Mo içeren alaşımın, aşınma testleri sonunda en düşük ağırlık kaybına ve en düşük sürtünme katsayısına da sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Aşınma testleri sonunda elde edilen sonuçların, daha önce yapılan bazı çalışmalarda elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu da görülmektedir (Pandya vd., 2012; Kalyon vd., 2014). Şekil 6.12'de farklı miktarlarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımların 3000 m kayma mesafesi sonunda elde edilen aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmiştir.

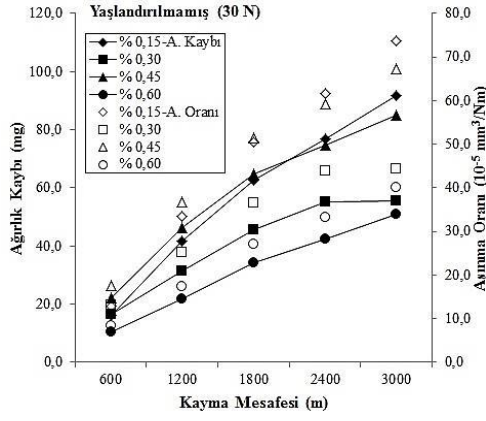


Şekil 6.12. Farklı miktarlardaki Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin 30 N, 45 N'luk kuvvetler altındaki aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

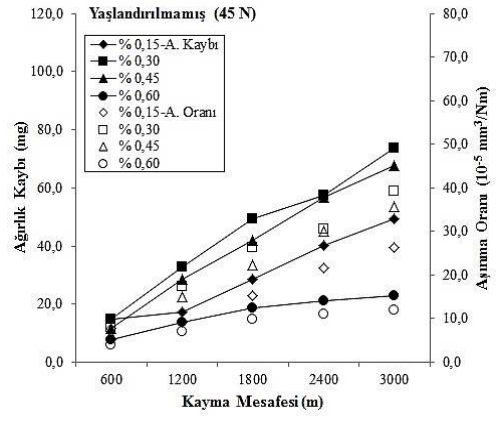
Şekil 6.12'deki aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, test edilen bütün numunelerde kayma yönü belirgin olarak görülebilmektedir. 30 N ve 45 N'luk yük altında % 0,5 Mo içeren alaşımların yüzeyinde, kayma işlemi sırasında kopan parçacıkların tekrar yüzeye sıvandıkları görülmektedir. Numune yüzeylerinde meydana gelen plastik deformasyon sonucunda, yüzeyden kopan parçalar ısı etkenleriyle tekrar yüzeye soğuk kaynaklanmaktadır. Gerçekleşen bu olay, 17-4 PH paslanmaz çeliklerin aşınma davranışında baskın mekanizmanın adhesiv aşınma mekanizması olduğunu göstermektedir. Bressan et. al. (Bressan vd., 2008) yaptıkları bir çalışmada, aşınma testleri sonucunda numune yüzeylerinde mikro-çizikler, adhezyon ve mikro-delemination mekanizmasının gerçekleştiğini vurgulamaktadır. Mikro-delemination mekanizması, numunenin disk üzerinde kayması sırasında yüzeyden küçük tabakalar şeklinde kopan parçacıkların dışarıya transferi ile gerçekleşmektedir. Ayrıca aşınmış yüzeylerdeki beyaz bölgelerden oksidasyon meydana geldiği de anlaşılmaktadır. Kayma sırasında meydana gelen sürtünme, uygulanan yüke de bağlı olarak sürtünme yüzeyinde sıcaklık artışına neden olmaktadır. Numune ve çelik disk temas yüzeyinde meydana gelen sıcaklık artışı ile yüzeyde oksit tabakası oluşmaktadır. Oluşan bu oksit tabakası, katı yağlayıcı etkisi gösterdiği için, ağırlık kaybında ve buna paralel olarak da aşınma oranlarında azalmaya neden olmaktadır. Daha önce yapılan bazı çalışmalarda, kayma mesafesine bağlı olarak farklı yük ve kayma hızlarında, kayma işlemi sırasında numune yüzeyinde oluşan oksit tabakasının ağırlık kaybını azalttığı belirtilmektedir (Özyürek ve Çiftçi 2011; Sağlam vd., 2011; Özyürek vd., 2013).

6.4.2. Ta İlave Edilen 17-4 PH Alaşımların Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

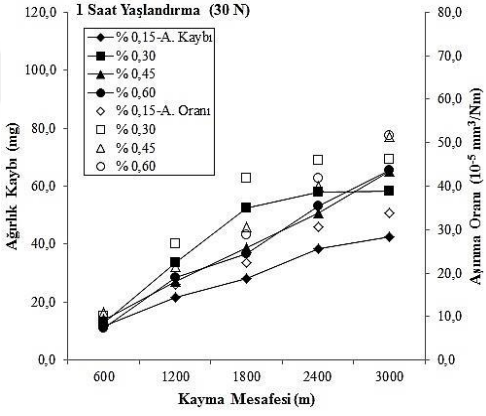
Farklı miktarla Ta ilave edilen TM 17-4 PH paslanmaz çeliklerin kuru kayma aşınma davranışı üzerindeki etkisinin belirlenmesi için aşınma testleri yapılmıştır. Testlerin sonucunda elde edilen ağırlık kayıpları ve hesaplanan aşınma oranları Şekil 6.13'de, sürtünme katsayıları ise Şekil 6.14'de verilmiştir.



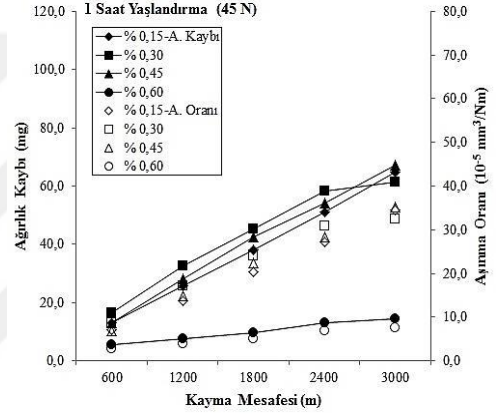
a) 30 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.



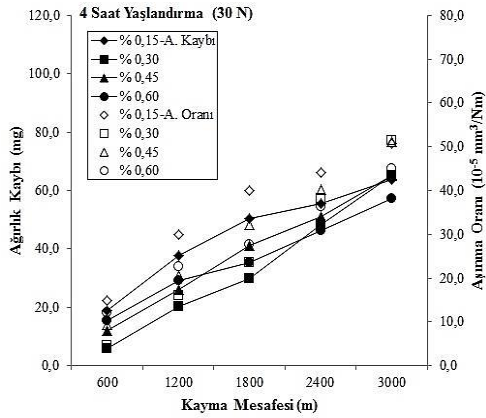
b) 45 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.



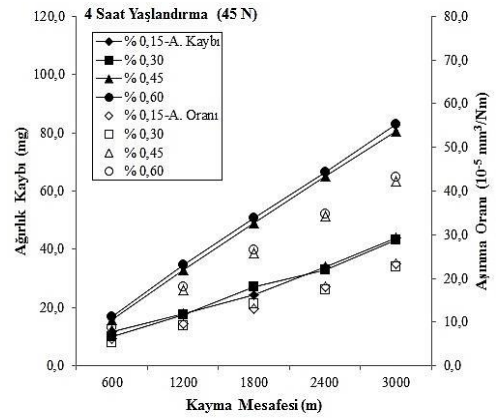
c) 30 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.



d) 45 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.

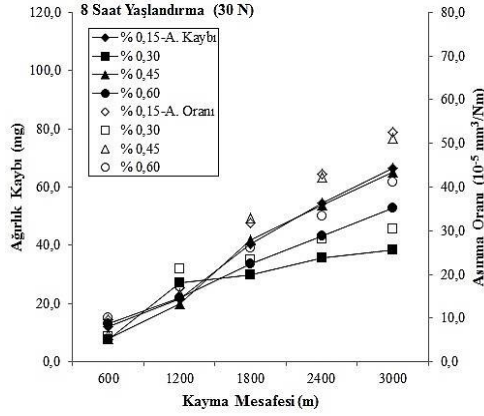


e) 30 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.

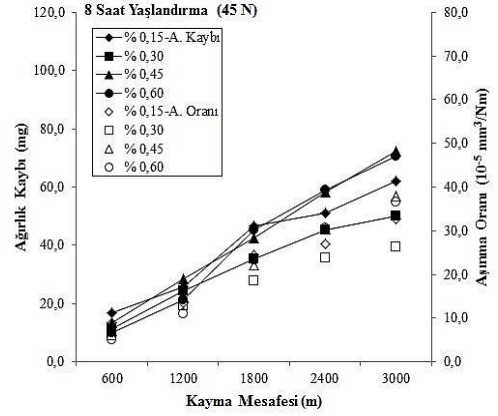


f) 45 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.

Şekil 6.13. (devam ediyor).



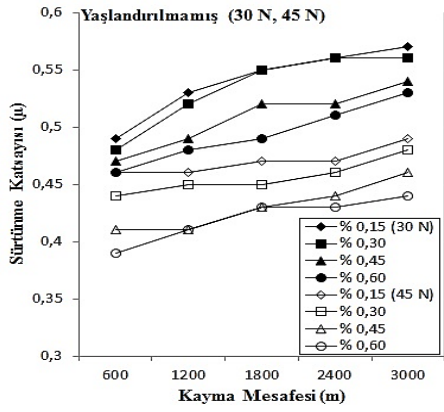
g) 30 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.



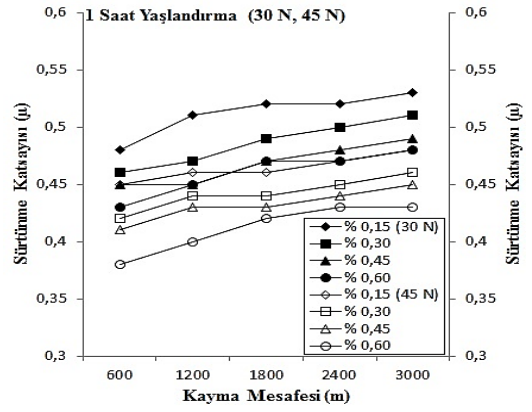
h) 45 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.

Şekil 6.13. Farklı miktarlarda Ta ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.

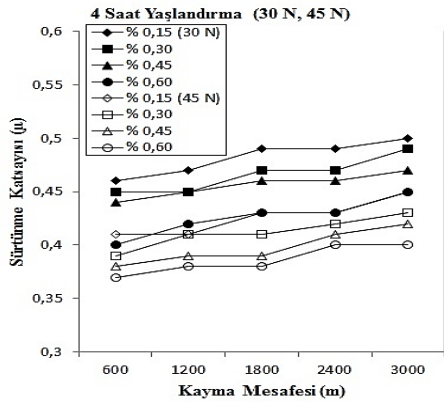
Şekil 6.13'de verilen ağırlık kayıpları incelendiğinde, hem 30 N hem de 45 N yük altında 3000 m kayma mesafesi sonunda % 0,15 Ta ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında en yüksek ağırlık kaybının olduğu görülmektedir. % 0,60 Ta ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında ise en düşük ağırlık kayıpları meydana gelmiştir. Sertlik sonuçları (Bkz. Şekil 6.5 b) ile aşınma testlerinde elde edilen ağırlık kayıpları karşılaştırıldığında, sonuçların birbirini desteklediği görülmektedir. Sertlik sonuçları incelendiğinde en yüksek sertliğe sahip (% 0,60 Ta ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında) numunelerde ağırlık kaybının en az, sertliği en düşük olan (% 0,15 Ta ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında) numunelerde ise ağırlık kaybının en yüksek gerçekleştiği görülmüştür. Alaşıma eklenen Ta miktarı arttıkça, 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımlarının ağırlık kayıpları da azalmaktadır. Şekil 6.13'de verilen aşınma oranları incelendiğinde de ağırlık kaybı sonuçlarıyla aşınma oranlarının birbirini desteklediği görülmektedir.



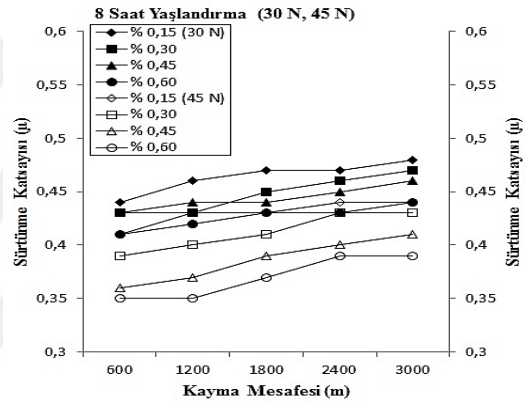
a) 30 N ve 45 N'luk yük altındaki sürtünme katsayıları.



b) 30 N ve 45 N'luk yük altındaki sürtünme katsayıları.



c) 30 N ve 45 N'luk yük altındaki sürtünme katsayıları.



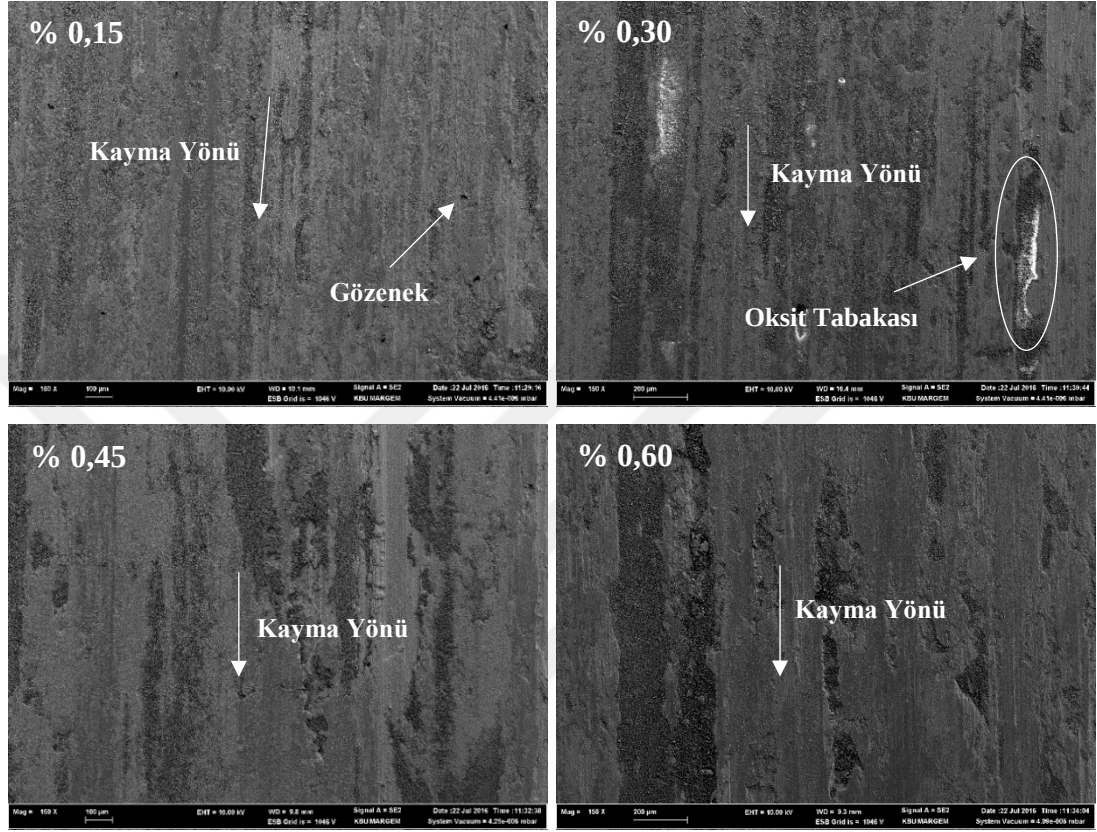
d) 30 N ve 45 N'luk yük altındaki sürtünme katsayıları.

Şekil 6.14. Farklı miktarlarda Ta ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin sürtünme katsayıları.

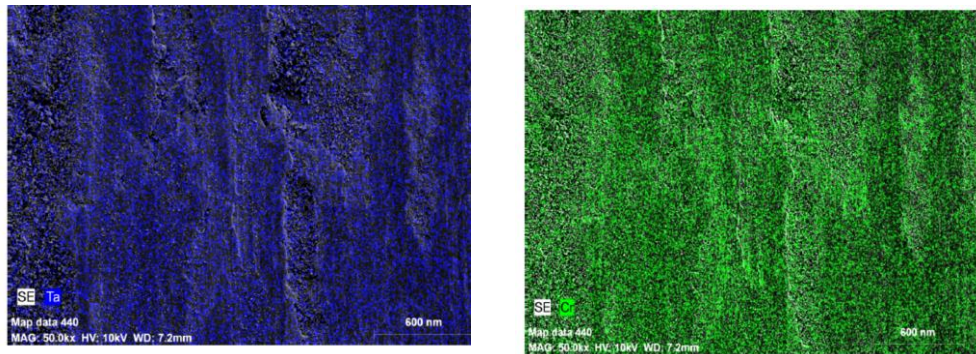
Şekil 6.14'de verilen sürtünme katsayısı sonuçları incelendiğinde en yüksek sürtünme katsayısı değerleri, % 0,15 Ta ilave edilen numunelerde görülürken, en düşük sürtünme katsayısı değerleri % 0,60 Ta ilave edilen alaşımda görülmektedir. Sürtünme katsayıları, sertlik sonuçları (Bkz. Şekil 6.5 b) ve Şekil 6.13'de verilen ağırlık kaybı sonuçları ile karşılaştırıldığında, sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir. Sertliğin en yüksek olduğu % 0,60 Ta ilave edilen alaşımın, aşınma testleri sonunda en az ağırlık kaybına ve en düşük sürtünme katsayısına da sahip olduğu görülmektedir.

Farklı miktarlarda Ta ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımların 3000 m kayma mesafesi sonunda elde edilen aşınma

yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.15’de, % 0,60 Ta ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliğin 45 N’luk kuvvet altındaki aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonuçları Şekil 6.16’da verilmiştir.



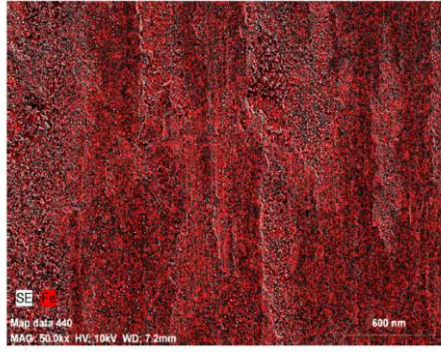
Şekil 6.15. Farklı miktarlardaki Ta ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin 45 N’luk kuvvet altındaki aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.



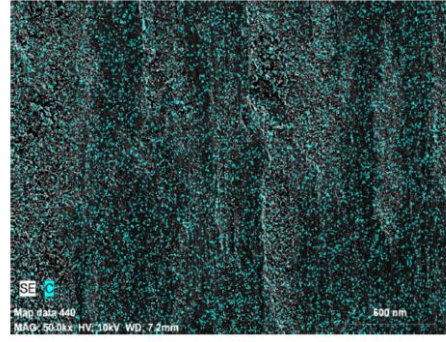
a) Ta dağılımı

b) Cr dağılımı

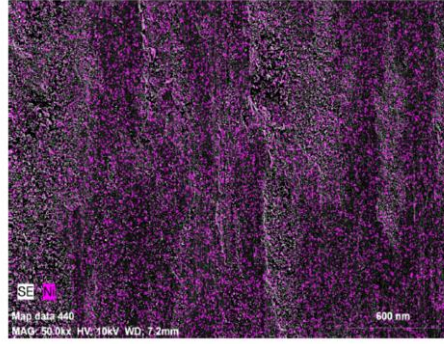
Şekil 6.16. (devam ediyor).



c) Fe dağılımı



d) C dağılımı



e) Ni dağılımı

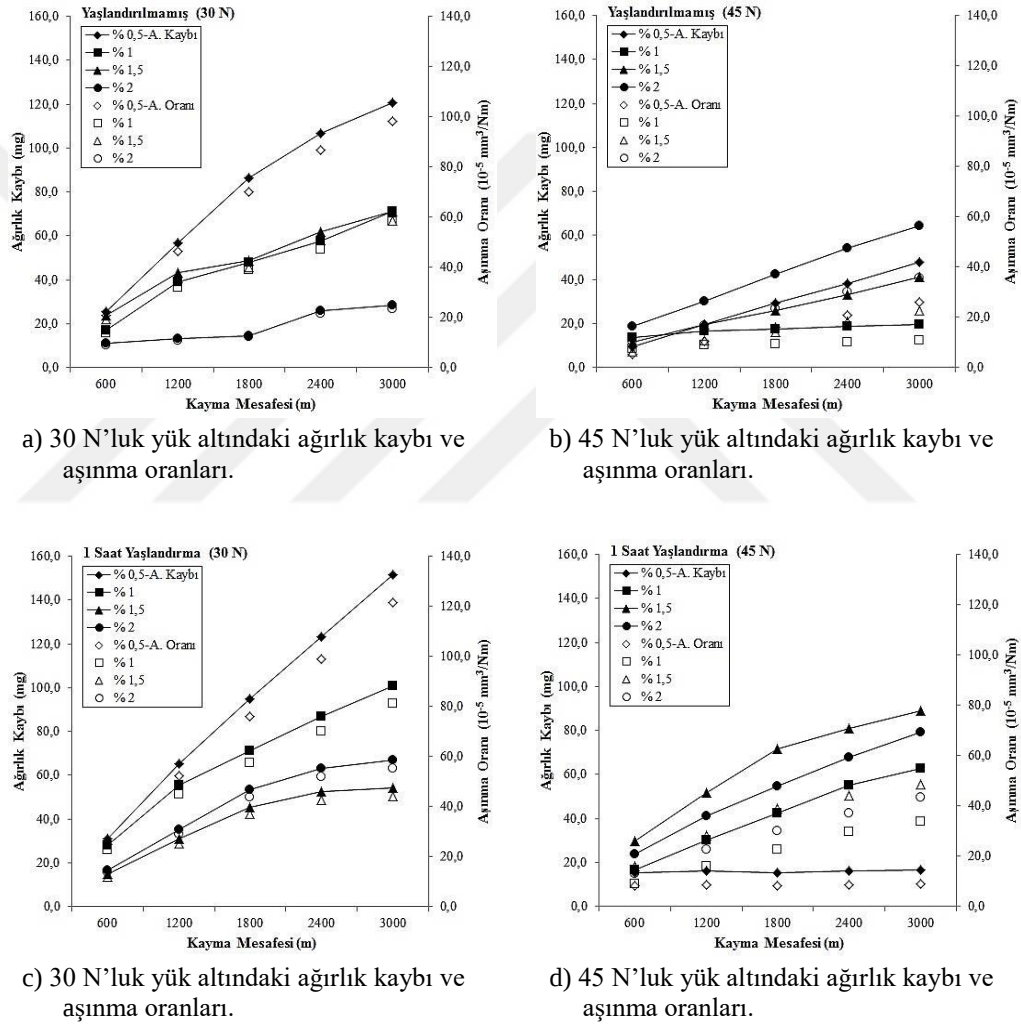
Şekil 6.16. % 0,60 Ta ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliğin 45 N'luk kuvvet altındaki aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonuçları.

Şekil 6.15'deki aşınma yüzeyi SEM görüntülerine bakıldığında, tüm numunelerdeki kayma yönü belirgin olarak anlaşılmaktadır. Kayma işlemi sırasında 45 N yük altında % 0,15 Ta içeren alaşımların yüzeyinde, meydana gelen plastik deformasyon sonucunda kopan parçacıkların, ısı etkenlerle tekrar yüzeye soğuk kaynaklandığı (sıvandıkları) görülmektedir. Bu olay, adhesiv aşınma mekanizmasının, baskın mekanizma olduğunu göstermektedir (Yılmaz, 1997). SEM görüntülerindeki beyaz bölgeler de oksit tabakalarının meydana geldiğini göstermektedir. Bu oksit tabakası, katı yağlayıcı etkisi gösterdiğinden, ağırlık kaybında ve aşınma oranlarında düşüşe sebep olmaktadır (Qi vd., 2003).

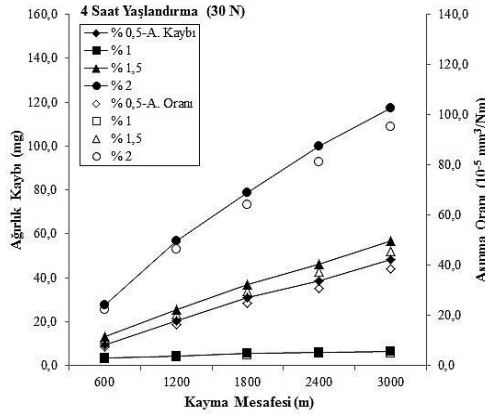
Şekil 6.16'daki aşınma yüzeyi EDS görüntülerine bakıldığında ise alaşıma ilave edilen Ta ve içeriğindeki Cr, Fe, C, Ni elementlerinin yüzeyde homojen bir şekilde dağılım gösterdikleri anlaşılmaktadır.

6.4.3. Ti İlave Edilen 17-4 PH Alaşımların Aşınma Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

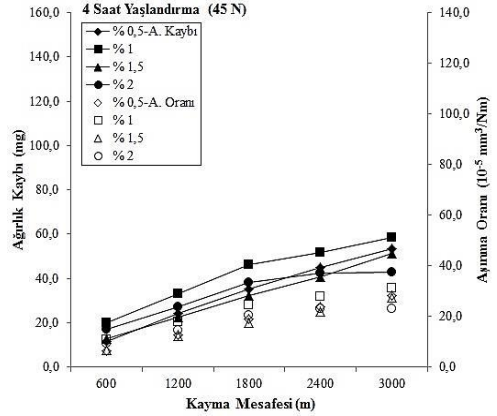
Farklı miktarlarla Ti ilave edilen TM 17-4 PH paslanmaz çeliklerin kuru kayma aşınma davranışı üzerindeki etkisinin belirlenmesi için aşınma testleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen ağırlık kayıpları ve hesaplanan aşınma oranları Şekil 6.17’de, sürtünme katsayıları ise Şekil 6.18’de verilmiştir.



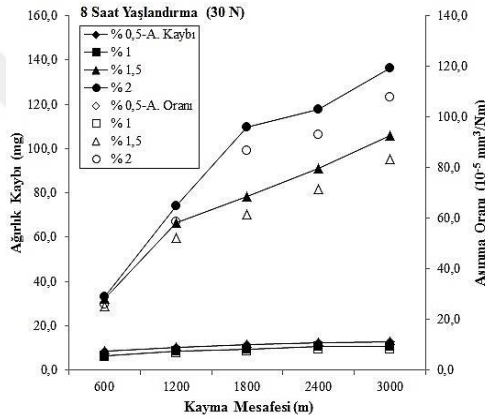
Şekil 6.17. (devam ediyor).



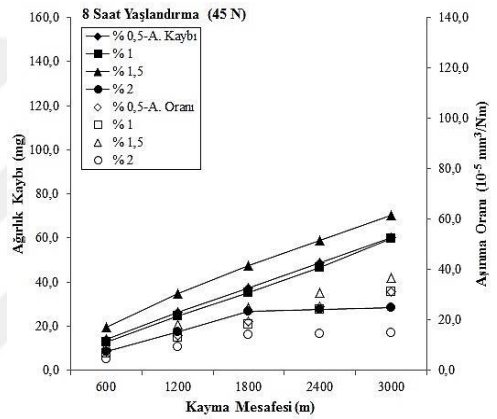
e) 30 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.



f) 45 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.



g) 30 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.

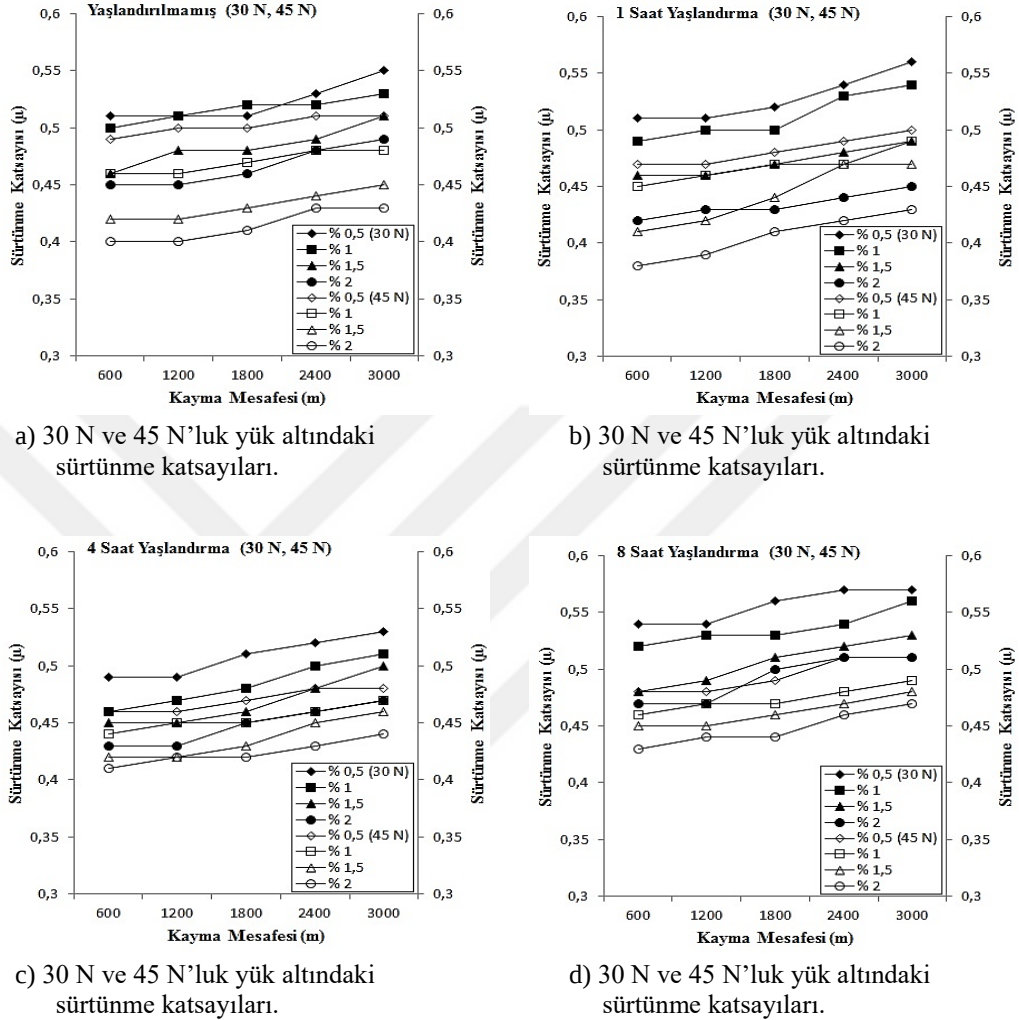


h) 45 N'luk yük altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranları.

Şekil 6.17. Farklı miktarlarda Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.

Şekil 6.17'de verilen ağırlık kayıpları incelendiğinde, hem 30 N hem de 45 N yük altında 3000 m kayma mesafesi sonunda % 0,5 Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında en yüksek ağırlık kaybının, % 2 Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında ise en düşük ağırlık kaybının elde edildiği görülmüştür. Ağırlık kayıpları ile sertlik sonuçları (Bkz. Şekil 6.6 b) karşılaştırıldığında, sonuçların birbirini desteklediği görülmektedir. En yüksek sertliğe sahip (% 2 Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında) numunelerde daha düşük ağırlık kaybı, sertliği en düşük olan (% 0,5 Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımında) numunelerde ise daha yüksek ağırlık kaybı tesbit edilmiştir. Alaşımdaki Ti miktarı arttıkça, 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımlarının ağırlık kayıpları ters orantılı olarak

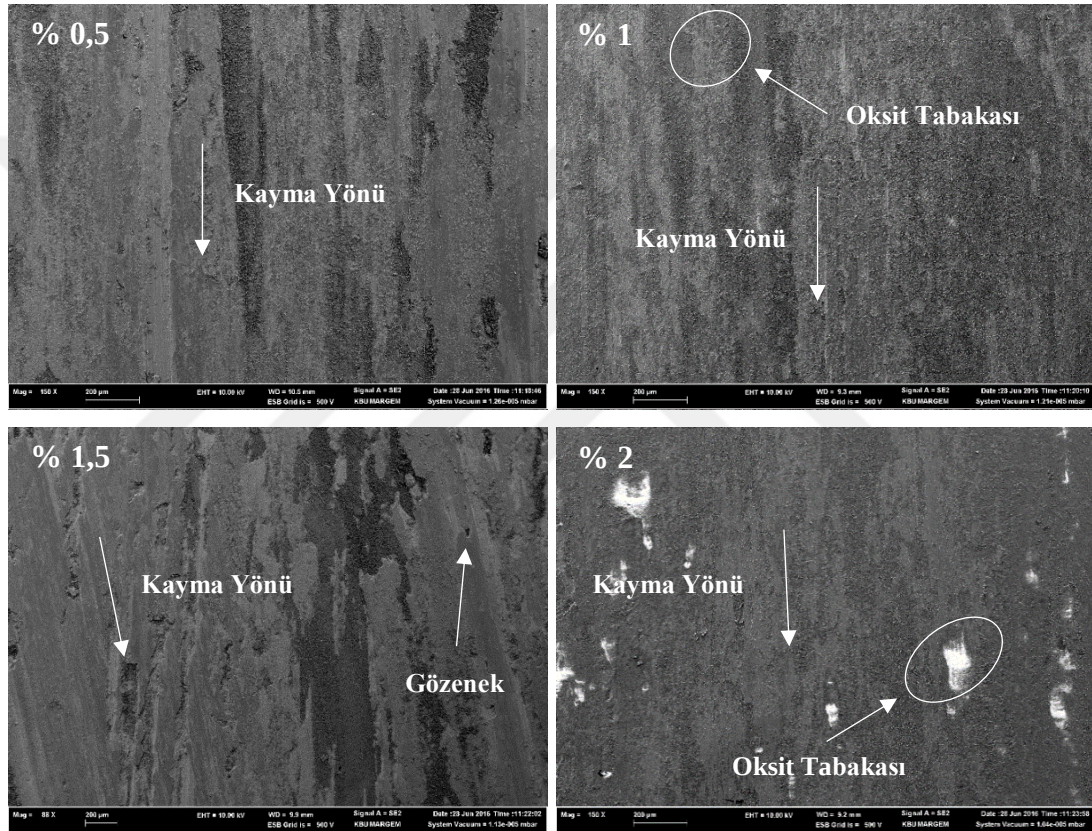
azalmaktadır. Şekil 6.17’de verilen aşınma oranları incelendiğinde de ağırlık kaybı sonuçlarıyla aşınma oranlarının birbirini desteklediği anlaşılmaktadır.



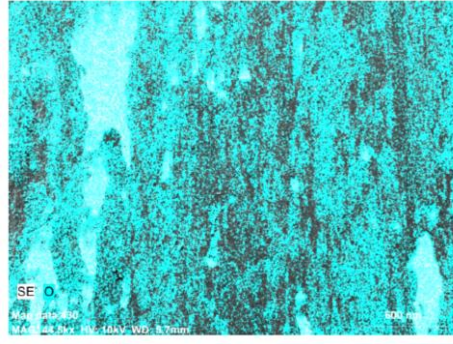
Şekil 6.18. Farklı miktarlarda Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin sürtünme katsayıları.

Şekil 6.18’de verilen sürtünme katsayısı sonuçları incelendiğinde en yüksek sürtünme katsayısı değerlerinin, % 0,5 Ti bulunan numunelerde, en düşük sürtünme katsayısı değerlerinin ise % 2 Ti içeren numunelerde olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısı sonuçları, sertlik sonuçları (Bkz. Şekil 6.6 b) ve Şekil 6.17’de verilen ağırlık kaybı sonuçları ile ilişkilendirildiğinde, sonuçlar tutarlı görülmektedir. Ayrıca aşınma testleri sonunda, en yüksek sertlikteki % 2 Ti içeren alaşımın, en düşük ağırlık kaybına ve sürtünme katsayısına da sahip olduğu görülmektedir.

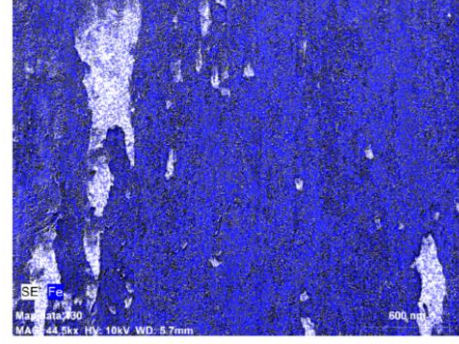
Testlerin sonunda ulaşılan sonuçların, daha önce yapılan bazı çalışmalarda ortaya çıkan sonuçlarla uyum içinde bulunduğu da anlaşılmaktadır (Pandya vd., 2012; Kalyon vd., 2014). Farklı miktarlarda Ti ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 4 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımların 3000 m kayma mesafesi sonunda elde edilen aşınma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.19’da, % 2 Ti ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 4 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliğin 45 N’luk kuvvet altındaki aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonuçları Şekil 6.20’de verilmiştir.



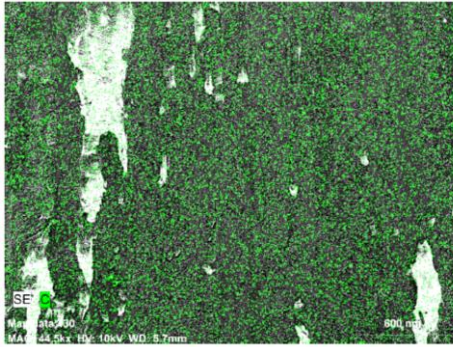
Şekil 6.19. Farklı miktarlardaki Ti ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 4 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliklerin 45 N’luk kuvvet altındaki aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.



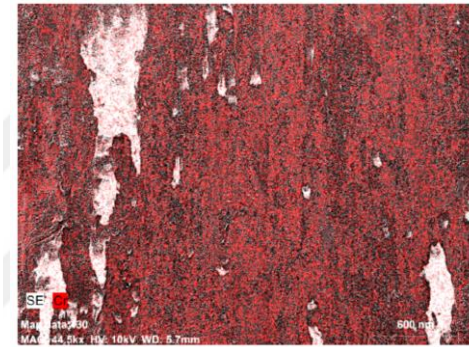
a) O dağılımı



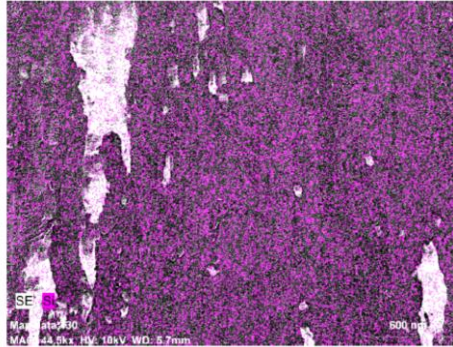
b) Fe dağılımı



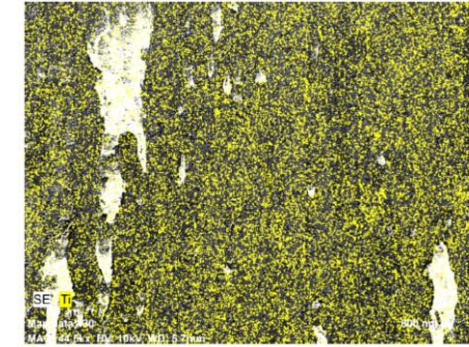
c) C dağılımı



d) Cr dağılımı



e) Si dağılımı



f) Ti dağılımı

Şekil 6.20. % 2 Ti ilave edilen 480 °C sıcaklıkta 4 saat yaşlandırılmış 17-4 PH paslanmaz çeliğin 45 N'luk kuvvet altındaki aşınma yüzeyi EDS (mapping) sonuçları.

Şekil 6.19'daki aşınma yüzeyi SEM görüntülerinde, bütün numunelerdeki kayma yönü açık bir şekilde görülebilmektedir. 45 N'luk yük altında % 0,5 Ti içeren alaşımların yüzeyinde, kayma işlemi sırasında meydana gelen plastik deformasyon sonucunda, yüzeyden kopan parçacıkların ısı etkenleriyle tekrar yüzeye soğuk kaynaklandıkları görülebilmektedir. Bu da, adhesiv aşınma mekanizmasının, baskın

mekanizma olduğunu göstermektedir (Yılmaz, 1997). SEM görüntülerindeki beyaz bölgeler de oksit tabakalarının meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Bu tabakada, katı yağlayıcı etkisi göstererek, ağırlık kaybında ve aşınma oranlarında düşüşte rol almaktadır (Qi vd., 2003). Önceden yapılan bazı çalışmalarda da farklı yük ve kayma hızlarında, kayma mesafesine bağlı olarak, oksit tabakasının ağırlık kaybını düşürdüğü ifade edilmektedir (Özyürek ve Tekeli 2011; Leon-Patino vd., 2013; Özyürek vd., 2013).

Şekil 6.20'deki aşınma yüzeyi EDS görüntülerine bakıldığında ise alaşıma ilave edilen Ti ve içeriğindeki O, Fe, C, Cr, Si elementlerinin yüzeyde homojen bir şekilde dağılım gösterdikleri anlaşılmaktadır.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımına farklı miktarlarda molibden (Mo) ilave edilerek, Mo miktarının aşınma davranışı üzerindeki etkisi ile birlikte, farklı miktarlarda tantalyum (Ta) ilave edilerek, 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saatlik yaşlandırma süresi sonunda Ta miktarının aşınma davranışı üzerindeki etkisi ve yine farklı miktarlarda titanyum (Ti) ilave edilerek, 480 °C sıcaklıkta 1, 4 ve 8 saatlik yaşlandırma süresi sonunda Ti miktarının aşınma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Mo ilave edilen alaşımın mikro yapısının ferritik olduğu belirlenmiştir.
- Dört farklı miktarda Mo ilave edilen (% 0,5 - % 1- % 2 - % 4) 17-4 PH paslanmaz çeliğin yoğunluklarının artan % Mo miktarıyla birlikte arttığı belirlenmiştir.
- Malzemede artan % Mo ilavesiyle birlikte sertlik değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir.
- Mo ilave edilen alaşımın mikro yapısında, M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ karbürlerinin oluştuğu belirlenmiştir.
- Dört farklı miktarda Mo ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin alaşımlarında, Mo miktarındaki artışa paralel olarak ağırlık kayıplarının da arttığı belirlenmiştir.

- Mo ilave edilen alaşımların aşınma yüzeyi SEM görüntülerinden baskın aşınma mekanizmasının adhesif aşınma mekanizması olduğu belirlenmiştir.
- Ta ilave edilen alaşımın mikro yapısının ferritik olduğu belirlenmiştir.
- Dört farklı miktarda Ta ilave edilen (% 0,15 - % 0,30- % 0,45 - % 60) 17-4 PH paslanmaz çeliğin yoğunluklarının 480 °C sıcaklıkta 3 farklı yaşlandırma süresi sonunda artan % Ta miktarıyla birlikte arttığı belirlenmiştir.
- Malzemede yaşlandırma sonrası artan % Ta ilavesiyle birlikte sertlik değerlerinde de artma olduğu tespit edilmiştir.
- Ta ilave edilen alaşımın mikro yapısında, $M_{23}C_6$ ve M_3C karbürlerinin oluştuğu belirlenmiştir.
- Dört farklı miktarda Ta ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin alaşımlarında, Ta miktarındaki artışın tersine olarak ağırlık kayıplarının azaldığı belirlenmiştir.
- Ta ilave edilen alaşımın aşınma yüzeyi SEM görüntülerinden baskın aşınma mekanizmasının adhesif aşınma mekanizması olduğu belirlenmiştir.
- Ti ilave edilen alaşımın mikro yapısının ferritik olduğu belirlenmiştir.
- Dört farklı oranda Ti ilave edilen (% 0,5 - % 1- % 1,5 - % 2) 17-4 PH paslanmaz çeliğin yoğunluklarının 480 °C sıcaklıkta 3 farklı yaşlandırma süresi sonunda artan % Ti miktarıyla birlikte azaldığı belirlenmiştir.
- Malzemede yaşlandırma sonrası artan % Ti ilavesiyle birlikte sertlik değerlerinde artma olduğu tespit edilmiştir.
- Ti ilave edilen alaşımın mikro yapısında, $M_{23}C_6$ ve M_3C karbürlerinin oluştuğu belirlenmiştir.

- Dört farklı oranda Ti ilave edilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin alaşımlarında, Ti miktarındaki artışın tersine ağırlık kayıplarının azaldığı belirlenmiştir.
- Ti ilave edilen alaşımın aşınma yüzeyi SEM görüntülerinden baskın aşınma mekanizmasının adhesif aşınma mekanizması olduğu belirlenmiştir.
- 17-4 PH alaşımlarının SEM görüntülerinde yapıda, tane sınırlarının belirgin olmadığı görülmüştür.

Daha sonra yapılabilecek çalışmalar için öneriler;

- Farklı sinterleme parametreleri uygulanarak yoğunluk miktarına ve mikroyapıya etkisi incelenebilir.
- Toz metalurjisi ile ve geleneksel döküm yöntemiyle üretilen parçalar arasındaki mikro yapı ve aşınma davranışları incelenebilir.
- Aşınma deneyleri yapılırken farklı yükler, kayma hızları ve kayma mesafeleri kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Arıkan, R., “MOS₂ ilaveli çinko – alüminyum esaslı kompozitlerin yapımı ve aşınma özellikleri”, **3. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, S.537 – 547, Ankara, (1988).

Başaran, A., “Toz metal parçalara ısı ve mekanik yüzey işlemlerin birlikte uygulanabilirliğinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 25-27 (2007).

Bressan, J. D., Daros, D. P., Sokolowski, A., Mesquita, R. A., Barbosa, C. A. “Influence of hardness on the wear resistance of 17-4 PH stainless steel evaluated by the pin-on-disc testing”, **J. Materials Processing Technology**, 205, 353, (2008).

Brooks, J. A., Lippold, J. C. “Selection of Wrought Austenitic Stainless”, **ASM Metals Handbook**, V.6, 456-469 (1993).

Çetinkaya, C. “An investigation of the wear behaviours of white cast irons under different compositions”, **Materials & Design**, 27, 437, (2006).

Cöcen, Ü., Belevi, M., Önel, K. “Tane silisyum karbür katkılı alüminyum alaşımı bazlı kompozitlerin aşınma davranışı”, D.E.Ü Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, **7. Denizli Malzeme Sempozyumu**, 2 -3 -4 Nisan (1997).

Davis, J. R., “Selection of Wrought Martensitic Stainless Steels”, **ASM Metals Handbook**, V.6, 432-441 (1993).

Demirci, A. H., “Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi”, **Alfa Basım Dağıtım Ltd. Şti.**, 1. Baskı, İstanbul, 1-8 (2004).

Dunkley, J. J., “Atomization, Powder Metallurgy”, Metal Handbook, **ASM International Publ.**, England, 7(9): 111-112 (1998).

Ekşi, A., Sarıtaş, S., “İzostatik preslemede prensipler ve uygulamalar”, **1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı**, Gazi Üniversitesi, Ankara, 16-17 Eylül (1996).

Erdoğan, M., “Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri”, **Nobel Dağıtım**, Bildiri Kitabı, Kızılay / Ankara, 229-246 (1998).

Ersümer, A., “Toz Metalurjisi, Sert Metal / Sinterleme”, **İ.T.Ü. Matbaası**, İstanbul, 1-47 (1970).

Esfandiari, H., Dong, M. “The corrosion and corrosion-wear behaviour of plasma nitrided 17-4 PH precipitation hardening stainless steel”, **Surface & Coatings Technology**, 202, 466, (2007).

German, R. M., “Powder Metallurgy Science”, **MPIF**, USA, 203-335 (1989).

Gülsoy, H. O., Salman, S., Özbek, S. “Effect of FeB additions on sintering characteristics of injection molded 17-4 PH stainless steel powder”, **J. Materials Science**, 39, 4835 (2004).

Gülsoy, H. O., “Influence of Nickel Boride additions on sintering behaviors of injection moulded 17-4 PH stainless steel powder”, **Scripta Materialia**, 52, 187 (2005).

Gülsoy, H. O., “Dry sliding wear in injection molded 17-4 PH stainless steel powder with Nickel Boride additions”, **Wear**, 262, 491, (2007).

Gürleyik, M. Y., “Makine mühendisliğinde aşınma olayları”, **Mühendis ve Makine**, Cilt 27, Sayı 323, S 3-14 (1986).

Gürleyik, M. Y., “Püskürtme aşınması”, **2. Denizli Malzeme ve İmalat Sempozyumu**, Bildiri Kitabı, Denizli, 134-152 (2-3 Mart 1987).

İnternet: Mühendis Âlemi, “Toz Metalurjisi İle Malzeme Üretim Aşamaları”, <http://www.muhandisalemi.com/toz-metalurjisi-ile-malzeme-uretim-asamalari/> (2018).

İnternet: Toz Metalurjisi Ders Notu, “İzostatik Presleme Kalıbı”, <http://web.sakarya.edu.tr/~aokurt/dersler/toz/dersnotu.pdf> (2016).

İnternet: Paslanmaz Çeliklerin İç Yapıları ve Temel Türleri, “Paslanmaz Çeliklerin Schaeffler Diyagramı”, <http://www.saritas.com.tr/ktlg/pdf/Paslanmaz%20Celik%20Saritas%2004.pdf> (2016).

İnternet: Türk Toz Metalurjisi Derneği, “Yağlayıcılar”, <http://www.turkishpm.org> (2016).

İpek, R., “Tren fren pabuçlarının aşınmasının deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, (1987).

İpek, R., “AISI 1020 çeliğinin, yüzey sertleştirme işlemleri uygulanarak AISI 5155 çeliğinin yerine kullanılabilirliğinin deneysel araştırılması”, Doktora Tezi, **E. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, (1992).

Javanbakht, M., Hadianfard, M. J., Salahinejad, E., “Microstructure and mechanical properties of a new group of nanocrystalline medical-grade stainless steels prepared by powder metallurgy”, **J. Alloys and Compounds**, 624, 17, (2015).

Kalyon, A., Özyürek, D., Günay, M., Aztekin, H., “Dry sliding wear behaviours of valve seat insert produced from high chromium white iron”, 34 (7), 635, (2015).

Karamış, M. B., “Abrasive aşınma mekanizmasında yüzey basıncının aşınmaya etkisi”, **2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, S.493 – 500, ODTÜ, Ankara 17-19 Eylül (1986).

Kim, Y., Lee, S., Noh, J-W., Lee, S. H., Eong, I-D., Park, S.J., “Rheological and sintering behaviors of nanostructured molybdenum powder”, **Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, 41, 93, (2013).

Kochmanski, P., Nowacki, J., “Influence of initial heat treatment of 17-4 PH stainless steel on gas nitriding kinetics”, **Surface & Coatings Technology**, 202, 4834, (2008).

Koç, V., “Toz metalurjisi tekniğinde mekanik alaşımlandırma”, Doktora Semineri, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 34s. (2002).

Koç, V., “Toz metalurjisi tekniği ile üretilen bir paslanmaz çelikte katkı elemanlarının aşınma direncine etkileri”, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 25-26-61s. (2006).

Korkut, M. H., “Ferritik paslanmaz çeliklerin mikro yapısı ve aşınması üzerine karbür yapıcı elementlerin etkilerinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 90s. (1997).

Kragelsky, I. V., “Contact area of rough surface”, **Wear**, 3, 170-187 (1960).

Krysiak, K. F., Grubb, J.F., Campbell, R.D., “Selection of Wrought Ferritic Stainless Steels”, **ASM Metals Handbook**, V.6, 443-454 (1993).

Kurt, A., “Toz metal bronz yatak malzemelerin özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi**, , Ankara, (1994).

Layıktez, C., “Çeşitli Sanayi Kollarında Aşınma Türlerinin İncelenmesi”, **Oerlikon Yayını**, İstanbul, (1988).

Leon-Patino, C.A., Aguilar-Reyes, E.A., Bedolla-Becerril, E., Bedolla-Jacuinde, A., Mendez-Diaz, S., “Dry sliding wear of gradient Al-Ni/SiC composites”, **Wear**, 301, 688-694 (2013).

Lippold, J. C., “Introduction to The Selection of Stainless Steels”, **ASM Metals Handbook**, V.6, 431 (1993).

Mohandas, T., Reddy, G. M., and Naveed, M., “A comparative evaluation of gas tungsten and shielded metal arc welds of a ferritic stainless steel”, **Journal of Materials Processing Technology**, No: 94, 133-140 (1999).

Moore, A. J. W., “Tribology and hard surfacing: the australian scene” **Tribology International**, 9 6, 265-270 (1976).

Niklas, A., Sture, H. and Staffan, J. “Friction and Wear Measurement Techniques”, **Modern Tribology Handbook**, Vol.13 (2001).

Noble, D. N., “Selection of Wrought Duplex Stainless”, **ASM Metals Handbook**, V.6, 471-479 (1993).

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, (1991).

Özyürek, D., Çiftçi, İ., “An investigation into wear behaviour of TiB₂ particle reinforced aluminum composites produced by mechanical alloying”, **Science and Engineering of Composite Materials**, 18 (1-2), 5, (2011).

Özyürek, D., Tekeli, S., “Wear properties of titanium and Ti6Al4V titanium alloy by mechanical milling”, **High Temperature Materials and Processes**, 30, 1-2, 175-180 (2011).

Özyürek, D., Çiftçi, İ., Tuncay, T., “The effect of aging and sliding speed on wear behaviour of Cu-Cr-Zr alloy”, **Materials Testing**, 55 (6), 468, (2013).

Pandya, S., Ramakrishna, K. S., Annamalai, A. R., Upadhyaya, A. “Effect of sintering temperature and electrochemical properties of austenitic stainless steel”, **Materials Science & Engineering A**, 556, 271, (2012).

Ping, L., Qi-Zhou, C., Bo-Kang, W., Xian-Zhong, Z. “Effect of aging temperature on erosion-corrosion behavior of 17-4 PH stainless steels in dilute sulphuric acid slurry”, **Journal of Iron and Steel Research International**, 13 (5), 73, (2006).

Pollard, B., “Selection of Wrought Precipitation-Hardening Stainless Steels”, **ASM Metals Handbook**, V.6, 482-493 (1993).

Qi, W.X., Tu, J.P., Liu, F., Yang, Y.Z., Wang, N.Y., Lu, H.M., Zhang, X.B., Guo, S.Y., Liu, M.S., “Microstructure and tribological behavior of a peak aged Cu-Cr-Zr alloy”, **Materials Science and Engineering**, A343, 89-96, (2003).

Sağlam, I., Özyürek, D., Çetinkaya, K. “Effect of ageing treatment on wear properties and electrical conductivity of Cu-Cr-Zr alloy”, **Bulletin of Materials Science**, 34 (7), 1465, (2011).

Salahinejad, E., Hadianfard, M. J., Ghaffari, M., Mashhadi, Sh. B. “liquid-phase sintering of medical-grade P558 stainless steel using a new biocompatible eutectic additive”, **Materials Letters**, 74, 209, (2012).

Sarıtaş, S., Kurt, A. 1991 “Toz metal yatak malzemelerin özellikleri”, **5. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, ODTÜ Ankara (1992).

Savaşkan, T., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, Trabzon (2004).

Shigenaka, N., Hashimoto, T., Fuse, M., “Effects of alloying elements (Mo, Si) in an austenitic stainless steel on dislocation under irradiation”, **Journal of Nuclear Materials**, 207 (12), 46-52 (1993).

Topbaş, A.M., “Isıl İşlemler”, **Prestij Basım Yayın ve Hizmetleri**, İstanbul, 105-110 (1993).

Wang, J., Zou, H., Li, C., Qiu, S., Shen, B. “The spinodal decomposition in 17-4 PH stainless steel subjected to long-term aging at 350 °C”, **Materials Characterization**, 59, 587, (2008).

Wu, Y., German, R. M., Blain, D., Marx, B., Schlaefel, C., "Effect of residual carbon content on sintering shrinkage, microstructure and mechanical properties of injection molded 17-4 PH stainless steel”, **J. Materials Science**, 37, 3573, (2002).

Wu, Y., Blain, D., Schlaefel, C., Marx, B., German, R. M., “Sintering densification and microstructural evolution of injection moulding grade 17-4 PH stainless steel powder”, **Metallurgical and Materials Transaction A**, 33 (7), 2185, (2002).

Xiao, M., Li, F., Xie, H., Wang, Y., “Characterization of strengthening mechanism and hot deformation behavior of powder metallurgy molybdenum”, **Materials and Design**, 34, 95, (2012).

Yıldırım, M. M., “Malzeme Bilgisi (III)” **Fırat Üniversitesi Basımevi**, Elazığ, (1984).

Yıldırım, M. M., “Malzeme Bilgisi (II)” **Fırat Üniversitesi Basımevi**, Elazığ, (1986).

Yıldırım, M. M., Doğan, Z. S., Çakan, A., Pakdil, M., “Mühendislik Malzemeleri III”, **MKÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları**, No:5, İskenderun, 1-27, 67-83 (2001).

Yılmaz, F., “Sürtünme ve aşınma”, **9. Uluslar Arası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, S. 229-247, İstanbul, (1997).

ÖZGEÇMİŞ

Ender NALÇACIOĞLU 1969'da Muş'un Malazgirt ilçesinde doğdu; ilkokul öğrenimini İstanbul'da, ortaokul öğrenimini ise Balıkesir'de tamamladı; Balıkesir Merkez Anadolu Teknik Lisesinden mezun olduktan sonra 1989'da Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Resim ve Konstrüksiyon Öğretmenliği bölümüne girdi; 1994'de mezun oldu. 1995 yılında Milli Eğitim Bakanlığı adına mecburi hizmet karşılığı burslu olarak gittiği Pittsburgh Üniversitesinde Makine Mühendisliği bölümünde 1998 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 1998 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu doktora eğitimine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Yeni Mahalle Feza Sokak
Birkelam Apartmanı No:55/9
Safranbolu/KARABÜK

Tel : (370) 712 7576
Cep Tel : (533) 252 0311
E-posta : endern@hotmail.com