KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PLAZMA NİTRÜRLENMİŞ Ti-6Al-4V ALAŞIMININ ADHEZİF AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

OKAN GÜL

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

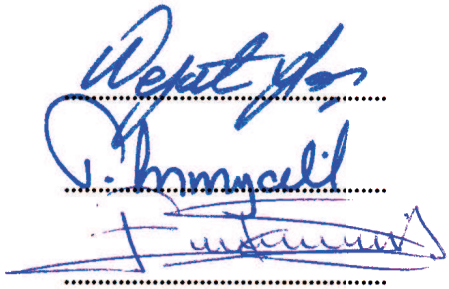
PLAZMA NİTRÜRLENMİŞ Ti-6Al-4V ALAŞIMININ ADHEZİF AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

OKAN GÜL

Doç.Dr.Nejat Y. SARI
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr.Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Yrd.Doç.Dr.Erdal KARADENİZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 03.07.2013

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Titanyum ve alaşımları yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci ve düşük yoğunluk gibi özelliklere sahip önemli mühendislik malzemelerindendir. En çok kullanılan titanyum alaşımı, alfa-beta alaşımı olan Ti6Al4V alaşımıdır. Titanyum alaşımlarının endüstriyel uygulamalarının % 45'inde Ti6Al4V alaşımları kullanılmaktadır. Ti6Al4V alaşımlarının en önemli özellikleri; korozyona karşı yüksek dirençleri, sertlikleri ve yüksek dayanımlarıdır. Bu üstün özellikleri sayesinde Ti6Al4V alaşımları, tıbbi uygulamalarda, havacılık-uzay endüstrisinde, kimyasal tesislerde, denizcilik uygulamalarında ve savunma sanayinde birçok uygulama alanı bulmaktadır. Tüm bu olumlu özelliklerine karşılık titanyum ve alaşımları, zayıf aşınma özellikleri nedeniyle hareketli temasın meydana geldiği mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Aşınma direnci zayıf olan Ti6Al4V alaşımının bu özelliğinin iyileştirilmesi için çeşitli yüzey işlem yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada plazma nitrürlenmiş Ti6Al4V alaşımının aşınma davranışı incelenmiştir.

Tez çalışmalarımın her safhasında yardımlarını esirgemeyen, katkılarıyla beni sonuna kadar destekleyen ve yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Nejat SARI'ya, bu çalışmanın ortaya çıkmasında emeği olan değerli hocam Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e, sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Plazma nitrürleme işlemindeki yardımlarından dolayı İstanbul Isıl İşlem Teknik Müdürü Metalurji Yük. Müh. Soydan KENEŞ'e, SEM ve XRD analizlerindeki yardımlarından dolayı Uzm. Fuat KAYIŞ'a, numunelerin sertlik ölçümündeki yardımlarından dolayı Alper Isıl İşlem çalışanı Metalurji ve Malzeme Yük. Müh. Behzat DEGE'ye, numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümündeki yardımlarından dolayı Federal Mogul çalışanı Makine Müh. Taner EGEMEN'e, diğer tüm hocalarım ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan, beni cesaretlendiren ve bu günlere getiren aileme sonsuz teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Mayıs-2013 Okan GÜL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR viii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Özellikleri 3
1.2. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması 4
1.2.1. Saf titanyum 5
1.2.2. α titanyum alaşımları 5
1.2.3. α'ya yakın (near-α) titanyum alaşımları 5
1.2.4. α+β titanyum alaşımları 6
1.2.5. β titanyum alaşımları 7
1.3. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Kullanım Alanları 7
1.4. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Plazma Nitrürlenmesi 10
1.4.1. Plazma nitrürlemenin avantajları 11
1.4.2. Nitrürleme sonucu oluşan tabakalar 13
1.4.2.1. Yayınım tabakası 14
1.4.2.2. Bileşik tabaka 14
1.5. Aşınma 15
1.5.1. Aşınmayı etkileyen faktörler 15
1.5.2. Aşınma mekanizmaları 16
1.5.2.1. Adhezif aşınma 16
1.5.2.2. Abrazif aşınma 16
1.5.2.3. Delaminasyon (yorulma) aşınması 16
1.5.2.4. Oksidasyon aşınması 17
2. LİTERATÜR TARAMASI 18
3. MALZEME VE YÖNTEM 21
3.1. Plazma Nitrürleme İşlemi 24
3.2. X Işınları Difraktometresi ile Faz Analizi 26
3.3. Vickers Sertlik Ölçümü 27
3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü 28
3.5. Aşınma Deneyi 29
3.6. SEM ve EDX Analizi 33
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 34
4.1. XRD Analizi 34
4.2. Vickers Sertlik Ölçümü Sonuçları 36
4.3. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları 37
4.4. Aşınma Testleri 39
4.5. SEM ve EDX Analizleri 49

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 77
KAYNAKLAR 79
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 83
ÖZGEÇMİŞ 84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Plazma nitrürleme yöntemi 11
Şekil 1.2. Titanyumun nitrürlenmesi sürecinde yüzeyde tabakaların oluşumunun şematik gösterimi 14
Şekil 3.1. a) Nitrürlenmemiş b) 4 saat nitrürlenmiş c) 8 saat nitrürlenmiş d) 12 saat nitrürlenmiş numunelerin görüntüleri 22
Şekil 3.2. a) Parlatma cihazı b) Parlatma işlemi 23
Şekil 3.3. a) Plazma nitrürleme fırını b) Plazma nitrürleme fırını iç kısmı 25
Şekil 3.4. X ışınları difraktometresi 26
Şekil 3.5. Sertlik ölçme cihazı 27
Şekil 3.6. Hassas Kesme cihazı 28
Şekil 3.7. Yüzey pürüzlülüğü test cihazı 28
Şekil 3.8. 52100 çeliğinden yapılmış aşındırıcı disk 29
Şekil 3.9. Aşınma cihazı 30
Şekil 3.10. Isıl işlem fırını 31
Şekil 3.11. Hassas terazi 31
Şekil 3.12. Aşındırıcı disk-numune temas alanı 32
Şekil 3.13. Taramalı elektron mikroskobu 33
Şekil 4.1. Nitrürlenmemiş numunenin XRD analizi 34
Şekil 4.2. 4 saat nitrürlenmiş numunenin XRD analizi 34
Şekil 4.3. 8 saat nitrürlenmiş numunenin XRD analizi 35
Şekil 4.4. 12 saat nitrürlenmiş numunenin XRD analizi 35
Şekil 4.5. Nitrürlenmiş numunelerin enine kesitindeki sertlik dağılımları 36
Şekil 4.6. 4 saat plazma nitrürlenmiş numunenin yüzey pürüzlülüğü grafiği 38
Şekil 4.7. 8 saat plazma nitrürlenmiş numunenin yüzey pürüzlülüğü grafiği 38
Şekil 4.8. 12 saat plazma nitrürlenmiş numunenin yüzey pürüzlülüğü grafiği 38
Şekil 4.9. Kayma mesafesine bağlı olarak 6 N yükte numunelerin aşınma miktarı 39
Şekil 4.10. Kayma mesafesine bağlı olarak 12 N yükte numunelerin aşınma miktarı 40
Şekil 4.11. Kayma mesafesine bağlı olarak 18 N yükte numunelerin aşınma miktarı 41
Şekil 4.12. Numunelerin aşınma miktarına 1000 m kayma mesafesinde yükün etkisi 41
Şekil 4.13. Kayma mesafesine bağlı olarak 6 N yükte numunelerin aşınma hacmi 43
Şekil 4.14. Kayma mesafesine bağlı olarak 12 N yükte numunelerin aşınma hacmi 43
Şekil 4.15. Kayma mesafesine bağlı olarak 18 N yükte numunelerin aşınma hacmi 44
Şekil 4.16. Kayma mesafesine bağlı olarak 6 N yükte numunelere etki eden basınç 45
Şekil 4.17. Kayma mesafesine bağlı olarak 12 N yükte numunelere etki eden basınç 45

Şekil 4.18. Kayma mesafesine bağlı olarak 18 N yükte numunelere etki eden basınç 46
Şekil 4.19. Kayma mesafesine bağlı olarak 6 N yükte numunelerin aşınma derinliği 47
Şekil 4.20. Kayma mesafesine bağlı olarak 12 N yükte numunelerin aşınma derinliği 48
Şekil 4.21. Kayma mesafesine bağlı olarak 18 N yükte numunelerin aşınma derinliği 48
Şekil 4.22. 1000 m kayma mesafesinde a) 6 N yük altında nitrürlenmemiş b) 12 N yük altında nitrürlenmemiş c) 18 N yük altında nitrürlenmemiş d) 6 N yük altında 4 saat nitrürlenmiş e) 12 N yük altında 4 saat nitrürlenmiş f) 18 N yük altında 4 saat nitrürlenmiş g) 6 N yük altında 8 saat nitrürlenmiş h) 12 N yük altında 8 saat nitrürlenmiş ı) 18 N yük altında 8 saat nitrürlenmiş i) 6 N yük altında 12 saat nitrürlenmiş j) 12 N yük altında 12 saat nitrürlenmiş j) 18 N yük altında 12 saat nitrürlenmiş numunelerin SEM fotoğrafları 49
Şekil 4.23. Nitrürlenmemiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X) 50
Şekil 4.24. Nitrürlenmemiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X) 51
Şekil 4.25. Nitrürlenmemiş numunenin 12 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X) 53
Şekil 4.26. Nitrürlenmemiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X) 54
Şekil 4.27. Nitrürlenmemiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X) 55
Şekil 4.28. Nitrürlenmemiş numunenin 18 N yük altında ve 400 m kayma mesafesi sonundaki SEM görüntüsü 57
Şekil 4.29. Şekil 4.28'deki aşınma döküntüsünün EDX analizi 57
Şekil 4.30. 4 saat nitrürlenmiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X) 58
Şekil 4.31. 4 saat nitrürlenmiş numunenin 12 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X). 59
Şekil 4.32. 4 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X). 61
Şekil 4.33. 4 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X) 62
Şekil 4.34. 4 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında ve 100 m kayma mesafesi sonundaki SEM görüntüsü 64

Şekil 4.35. Şekil 4.34'teki aşınma döküntüsünün EDX analizi 64
Şekil 4.36. 8 saat nitrürlenmiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X). 65
Şekil 4.37. 8 saat nitrürlenmiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X) 66
Şekil 4.38. 8 saat nitrürlenmiş numunenin 12 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X). 68
Şekil 4.39. 8 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında a) (20X) 1000 m b) (1000X) 1000 m kayma mesafesinde çekilen SEM görüntüsü 69
Şekil 4.40. 12 saat nitrürlenmiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X). 71
Şekil 4.41. 12 saat nitrürlenmiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X) 72
Şekil 4.42. 12 saat nitrürlenmiş numunenin 12 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X). 73
Şekil 4.43. 12 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X). 75
Şekil 4.44. 12 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X) 76

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Titanyumun, alüminyum ve demire kıyasla bazı fiziksel özellikleri 3
Tablo 3.1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi 21
Tablo 4.1. Nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenmiş numunelerin yüzey sertlikleri ... 37
Tablo 4.2. Plazma nitrürlenmiş numunelerin tabaka derinliğine göre sertlik değerleri 37
Tablo 4.3. Plazma nitrürlenmiş numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 37
Tablo 4.4. Nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenmiş numunelerin aşınma değerleri 42

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

Al	: Aluminyum
Mo	: Molibden
O	: Oksijen
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
UN	: Nitrürlenmemiş
V	: Vanadyum

Kısaltmalar

4h	: 4 saat nitrürlenmiş
8h	: 8 saat nitrürlenmiş
12h	: 12 saat nitrürlenmiş
HSP	: Hegzagonal Sıkı Paket
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
CP Ti	: Commercially Pure (Ticari Saflıkta) Titanyum
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)
HRC	: Hardness Rockwell C (Rockwell C Sertliği)
HV	: Hardness Vickers (Vikers Sertliği)
kgf	: Kilogram Kuvvet
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDX	: Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)

PLAZMA NİTRÜRLENMİŞ Ti-6Al-4V ALAŞIMININ ADHEZİF AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Titanyum ve titanyum alaşımları sahip olduğu üstün korozyon direnci, düşük elastiklik modülü, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve biyouygunluk gibi özelliklerinin iyi bir kombinasyonunu sergiler. Bu kombinasyon neticesinde biyomalzeme, uçak-uzay sanayi ve kimya sanayi gibi alanlarda kullanılır. Ancak titanyum ve alaşımları bu üstün özelliklerine karşın, yetersiz yüzey özellikleri ve düşük aşınma direncine sahiptirler. Titanyum ve titanyum alaşımlarının zayıf özelliklerini geliştirmek için yüzey işlem metotlarından biri olan plazma nitrürleme işlemi uygulanabilir.

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının zayıf olan yüzey özelliklerinin plazma nitrürleme yöntemi ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Plazma nitrürleme işlemi 535 ^{o}C sıcaklıkta yapılmıştır. Nitrürleme sırasında % 75 N_2 - % 25 H_2 oranında gaz karışımı kullanılmıştır. 4, 8 ve 12 saat gibi değişik sürelerde nitrürleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenmiş numunelere Vickers sertlik ölçümü, X ışınları difraktometresi ile faz analizi, yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmıştır. Numunelerin aşınma özelliklerini belirlemek için 6, 12 ve 18 N yük altında aşınma testi yapılmıştır. Aşınan izlerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri alınmıştır.

Yapılan plazma nitrürleme işleminin sonucunda Ti6Al4V alaşımının aşınma direnci ve sertliği artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Plazma nitrürleme, Ti6Al4V alaşımı

THE INVESTIGATION OF ADHESIVE WEAR BEHAVIOUR ON PLASMA NITRIDED Ti-6Al-4V ALLOY

ABSTRACT

Titanium and titanium alloys exhibit an excellent combination of properties including, greater corrosion resistance, greater strength, lower modulus of elasticity and excellent biocompatibility in comparison to other metallic materials. As result of this combination titanium and its alloys are used in biomedical, aerospace and air craft industry, chemical industry. Nonetheless in comparison to the excellent combination of titanium, titanium and its alloys have poor tribological properties and low wear resistance. These poor properties of titanium and its alloys can be treated by plasma nitriding which is one of the methods to treat surface properties of titanium alloys.

In this study, plasma nitriding method aims to improve the poor surface properties of the Ti6Al4V alloy. Plasma nitriding process is applied at 535 ^{o}C. % 75 N_2 - % 25 H_2 gas mixture was used for the plasma nitriding. Nitriding was carried out at various times such as 4, 8 and 12 hours. Unnitrided and plasma nitrided samples were investigated by Vickers hardness, X-ray diffraction analysis of phase and the surface roughness measurement. Wear tests were carried out at 6, 12 and 18 N load to determine the wear properties of the samples. Traces of wear images were taken by scanning electron microscope (SEM).

As a result of the plasma nitriding process of Ti6Al4V alloy increased wear resistance and hardness.

Key Words: Wear, Plasma nitriding, Ti6Al4V alloy

GİRİŞ

Titanyum sergilediği; nontoksik yapısı, anti magnetik özelliği, hafif olması, mekanik özelliklerinin iyi oluşu, rahatlıkla küçük boyutlu ürünlerin üretilebilir olması, biyouygunluğunun yüksek olması, korozyona karşı direncinin yüksek olması gibi sebeplerle biyomedikal uygulamalarda, havacılık-uzay sanayinde, otomotiv sanayinde ve kimya sanayi gibi birçok korozif çevrede kullanılmaktadır. Özellikle ticari safiyette titanyum ve Ti6Al4V alaşımı mühendislik uygulamalarında tercih edilen en yaygın malzemelerdir [1-3]. Titanyum ve alaşımlarının sergiledikleri bu üstün özelliklerine karşın zayıf aşınma direnci, yüksek sürtünme katsayısı gibi yetersiz yüzey özellikleri mühendislik uygulamalarında kullanım alanlarını daraltmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının bu zayıf yüzey özelliklerini gaz nitrürleme, plazma nitrürleme, yüzey lazer işlemleri, iyon implantasyonu gibi değişik yüzey mühendisliği yöntemlerini kullanarak geliştirmek mümkündür [4,5].

Bilinen nitrürleme yöntemlerine göre, plazma nitrürleme işleminin; üniform sıcaklık dağılımının oluşması, düşük sıcaklıklarda ve geniş sıcaklık aralıklarında nitrürleme yapılmasına imkân vermesi, enerji ve gaz tüketiminin az olması, işlem süresinin kısa olması, nitrürleme sonrası oluşan bileşik tabaka ve yayınım tabakası kalınlıklarının kontrol edilebilmesi, yayınım olayının hızlı olması ve çevre dostu olması nedeniyle günümüzde endüstride oldukça geniş kullanım alanı bulmuştur.

Çalışmanın birinci bölümünde genel bilgiler başlığı altında titanyum ve titanyum alaşımlarının özellikleri, titanyum alaşımlarının nitrürlenmesi ve aşınma ile ilgili genel bilgilere yer verilmiştir. İkinci bölümde literatür çalışması yapılmıştır. Üçüncü bölümde malzeme ve yöntem başlığı altında kullanılan malzeme ve uygulanan test yöntemleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde yapılan testler sonucunda elde edilmiş olan bulgular ve sonuçlar irdelenmiş ve grafikler yardımı ile açıklanmıştır.

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının sertliğini ve aşınma direncini geliştirmek için plazma nitrürleme yöntemi kullanılmıştır. Çalışma 535 ^{o}C sıcaklıkta yapılmıştır. Plazma nitrürleme sırasında %75 N_2 - %25 H_2 oranında gaz karışımı kullanılmıştır.

Nitrürleme süresi olarak 4, 8 ve 12 saat gibi değişik sürelerde plazma nitrürleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Nitrürleme sonrası numunelere vickers sertlik ölçümü, X-ışınları difraktometresi ile faz analizi, yüzey pürüzlülüğü ölçümü, aşınma cihazı ile aşınma miktarının tespiti, aşınan yüzeylerin SEM ile incelemesi ve bazı aşınan yüzeylerde EDX analizi yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı üstün özelliklere ve çok yaygın kullanım alanına sahip olan Ti6Al4V alaşımının düşük olan aşınma direncinin plazma nitrürleme yöntemi ile geliştirilmesi ve ne derecede gelişme sağlandığının belirlenmesidir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Özellikleri

Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve yüksek korozyon direnci gibi özellikleri bünyesinde bir arada barındıran önemli mühendislik malzemeleridir. Titanyum ve alaşımları henüz 1952 yılından beri kullanımda olduğu için nispeten yeni mühendislik malzemeleridir [6].

Titanyum 4,54 g/cm^3 yoğunluğa sahip hafif bir metaldir. Bu yoğunluk alüminyum (2,71 g/cm^3) ve demirin (7,87 g/cm^3) arasındadır. Titanyum demirden (1536 ^{o}C) daha yüksek bir ergime noktasına (1668 ^{o}C) ve demir (194 GPa) ile alüminyumun (62 GPa) arasında ortalama bir elastikiyet modülüne (115 GPa) sahiptir. Klasik hafif metal olarak bilinen alüminyumun iki katı, demir veya nikelin ise yarı özgül ağırlığına sahiptir (Tablo 1.1) [6].

Tablo 1.1. Titanyumun, alüminyum ve demire kıyasla bazı fiziksel özellikleri

	Titanyum	Aluminyum	Demir
Yoğunluk (g/cm^3)	4,54	2,7	7,87
Elastisite Modülü (GPa)	115	62	194
Ergime Noktası ^{o}C	1668	660	1536
Oda sıcaklığındaki kristal yapı	HSP	YMK	HMK

Titanyum dünyada yapısal olarak kullanılan metaller arasında alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra 4.sırada yer alırken en çok rezervi olan metaller sıralamasında da 9. sırada yer almaktadır. Ancak titanyum saf olarak bulunmamakla beraber saf hale getirme işlemleri bu metali pahalı kılmaktadır [7].

Titanyum allotropik bir malzeme olup, oda sıcaklığındaki sıkı paket hekzagonal (HSP) kristal yapıdaki α fazı, yaklaşık 885 ^{o}C'de hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki β fazına dönüşür. Saf titanyum için bu sıcaklık "β dönüşüm sıcaklığı" adını

alır. Oksijen, azot ve karbon gibi α fazını kararlı hale getiren ara yer elementlerinin oldukça güçlü etkisiyle yükselen bu sıcaklık; yer alan alaşım elementlerinin etkisiyle ya düşmekte ya da yükselmektedir [9].

Titanyum alaşımlarının özellikleri genel olarak , α ve β fazlarının yapıdaki hacimsel oranlarına ve dağılımlarına bağlılık göstermektedir. HMK β ile kıyaslandığında, HSP α daha yoğun paketlenmiştir ve anizotropik bir kristal yapıya sahiptir, α fazının , β ile kıyaslanmasıyla; plastik deformasyona daha yüksek dayanım gösterdiği, sünekliğinin daha düşük olduğu, mekanik ve fiziksel özelliklerinin anizotropik olduğu, difüzyon hızının yaklaşık β difüzyon hızının iki katı olduğu ve daha yüksek sürünme dayanımı sergilediği söylenebilir. En önemli α kararlaştırıcı elementi olan alüminyumun yoğunluğu titanyumun yaklaşık yarısıdır. Bu sebeple α alaşımlarında V ve Mo gibi daha ağır elementler kullanılsa da, β alaşımlarından daha hafiftirler, α alaşımları genelde orta derece mukavemete sahiptir, α+β alaşımları ve yarı kararlı β alaşımları ise, sırasıyla yüksek ve çok yüksek mukavemete sahip olabilirler. Ancak çok yüksek mukavemet değerlerine erişebilen β alaşımları bu özellik için sünekliklerinden taviz vermek durumundadırlar. Süneklik büyük ölçüde mikroyapıya bağlı olsa da, β alaşımlarına yaşlandırma sertleştirmesi uygulanmadığı zaman sünekliği α ve α+β alaşımlarınınkine yakın olabilir [10].

Titanyumun yüksek oksijen afinitesi, oda sıcaklığında dahi yüzeyinde çok ince (nm) bir oksit tabakası oluşmasına sebep olur. Titanyum esaslı malzemelerin yüksek korozyon dayanımlarının sebebi yüzeyde oluşan bu oksit tabakasıdır. α alaşımlarının korozyon dayanımları, β alaşımlarından daha yüksektir [11].

Günümüzde yüzden fazla titanyum alaşımı bilinmektedir. Bunların ancak 20 - 30 tanesi ticari kullanım sahasına sahiptir. Klasikleşmiş alaşımlar arasında Ti6A14V tek başına, kullanılan toplam titanyum alaşımı miktarının yarısını oluşturmaktadır. Alaşımlandırılmamış titanyum ise toplam kullanılan miktarın % 20 ila % 30'unu teşkil eder [12].

1.2. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımları genelde α, α'ya yakın (near-α), α+β ve β alaşımları olarak sınıflandırılırlar.

1.2.1. Saf titanyum

Ticari saflıktaki titanyum (CP Ti), % 98,4 - % 99,5 oranında titanyum içermektedir. CP Ti oda sıcaklığında sıkı paket hegzagonal yapıdaki α fazında bulunmakta olup 885 ^{o}C'de hacim merkezli kübik yapıdaki β fazına dönüşür. Ayrıca bu dönüşüm sırasında her iki fazın da bir arada bulunduğu küçük bir sıcaklık aralığı da vardır [13].

CP Ti, genellikle yüksek mukavemet gerektirmeyen ancak korozyon direncinin ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilir. Saf titanyum düşük mukavemetinin yanında yüksek sünekliğe sahiptir. Oda sıcaklığındaki alaşımsız titanyumun mikroyapısı % 100 oranında α fazındadır. [14].

1.2.2. α titanyum alaşımları

Alüminyum, kalay veya zirkonyum içeren α alaşımları daha çok yüksek sıcaklık ya da çok soğuk ortamlarda tercih edilmektedir, α fazı zengin olan alaşımlar, β alaşımlarına göre yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı daha dayanıklıdır. Çok düşük miktarda ara yer atomu içeren α alaşımları, sünekliğini ve tokluğunu çok düşük sıcaklıklarda dahi sürdürmektedir [8].

α alaşımları en çok kimya sanayi ve proses mühendisliğince kullanılır. Bu uygulamalarda gerekli olan çok yüksek korozyon dayanımı ve deformasyon kabiliyetine sahiptirler. Saf titanyumun mukavemet gereksinimini karşılayamadığı yerlerde, en eski titanyum alaşımı olan ve uzun zaman önce kabul görmüş Ti-5A1-2.5Sn alaşımı tercih edilir. Düşük sıcaklıklı uygulamalar olan hidrojen depolama ve basınçlı araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [15].

1.2.3. α'ya yakın (near-α) titanyum alaşımları

Süper alfa ya da α'ya yakın (near-α) alaşımlar olarak bilinen bu alaşımların mikroyapısındaki α fazı yüksek kararlılığa sahiptir ve sınırlı miktarda β fazını kararlı kılan elementler içermektedir [16]. α fazı sabitleyicileri olarak bilinen Al, O gibi elementleri fazla miktarda, Mo, V gibi β fazı sabitleyicilerini ise düşük miktarda içerirler.

α'ya yakın alaşımlar yüksek sıcaklık gerektirecek uygulamalarda kullanılırlar. α alaşımlarının üstün sürünme dayanımı ve α+β alaşımlarının yüksek mukavemeti α'ya yakın alaşımlarda bir arada bulunur. Günümüzde çalışma sıcaklıkları 500-550 ^{o}C' ye kadar çıkmıştır. Ti-8Al-1Mo-1V, yüksek sıcaklık için geliştirilmiş ilk titanyum alaşımıdır. Ancak yüksek alüminyum içeriği zayıf gerilmeli korozyon dayanımına sebep olur. Bu sebeple sonradan geliştirilen bütün titanyum alaşımları en fazla % 6'ya kadar alüminyum içeriğine sahiptirler. 1970'lerde yapılan bir çalışma içerikte en fazla % 0,1'e kadar olan silisyumun, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo'in sürünme dayanımını çok arttırdığını ortaya koymuştur. Bugün en gelişmiş yüksek sıcaklık titanyum alaşımı Amerikan TIMETAL 834 olarak bilinir. Kullanım sıcaklığı üst limiti olan 600 ^{o}C'de uzun süre kararlı davranmakta ve oksidasyona karşı koruma sağlamaktadır [17].

1.2.4. α+β titanyum alaşımları

Bu alaşımlar, bileşimlerinde α ve β fazlarının kararlılığını artıran bir ya da daha fazla kararlaştırıcı alaşım elementleri içerirler. α ve β fazını kararlaştırıcı elementlerin uygun bir şekilde ayarlanmasıyla oda sıcaklığında α ve β fazlarının karışımı olan bir mikroyapı elde edilebilmektedir. Tavlama sonrasında da yüksek süneklik, homojenlik ve yüksek dayanım sağlanmaktadır [18].

En yaygın kullanılan α+β alaşımı Ti6A14V'dur. 1950'lerde geliştirilmiştir ve bilinen ilk titanyum alaşımları arasında gösterilmektedir. Ti6A14V'un üstünlüğü sadece dengeli özellikleri değil, kullanılmış ve kullanılmakta olan titanyum malzemeler arasında en yaygın olarak kullanılanı olmasıdır. Yaygın kullanımı özellikle havacılık sanayinde önemli bir kriter olan en çok test edilmiş, denenmiş ve geliştirilmiş titanyum alaşımı olmasını sağlamıştır. Diğer yaygın kullanıma sahip α+β alaşımları; yüksek mukavemet amaçlı geliştirilmiş Ti-6Al-6V-2Sn, yüksek mukavemet ve yüksek tokluğa sahip Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, gaz türbin motorlarında 400 ^{o}C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılmak için geliştirilmiş Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr alaşımlarıdır [19].

Ti6A14V alaşımı toplam titanyum üretiminin % 50 'sinden fazlasını oluşturmaktadır. Ti6Al4V alaşımı içerisindeki Al yoğunluğu düşürürken, α fazın kararlılığını ve

dayanımınıda artırır. Bununla birlikte V β fazın miktarını artır. Bu alaşımlardan yüksek mukavemet değerleri elde etmek için ısıl işlem uygulanabilmektedir. Bu yüzden α+β alaşımları 350-400 ^{o}C arasındaki sıcaklıklarda ve özellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılabilmektedir [19].

Mukavemet artışı için, alaşım ilk olarak yarı kararlı doymuş hale getirilmek üzere çözeltiye alma sıcaklığından hızla soğutulmakta ve daha sonra yaklaşık 500 ^{o}C'de yaşlandırılmaktadır. Bu sırada mikroyapıdaki aşırı doymuş α ve β fazları çözünerek yapıya homojen bir şekilde dağılmakta ve sertlik artmaktadır [8].

1.2.5. β titanyum alaşımları

Bu alaşımlar bileşimlerinde önemli miktarda β fazını kararlaştırıcı alaşım elementleri içermektedir. Sertleştirilebilme, dövülebilirlik, soğuk şekillendirilebilme ve yüksek yoğunluk gibi özellikleriyle diğer titanyum alaşımlarından farklılık arz etmektedir. Bu alaşımlar oda sıcaklığında α+β alaşımları ile aynı mukavemet değerlerine sahip olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda bu değerler α+β alaşımlarından sonra gelmektedir [17].

β alaşımları kararsız alaşımlardır ve α fazının β matrisi içinde çökeltilmesi ile sertleştirilirler. Yüksek kırılma tokluğuna sahip olup molibden içermeleri bu alaşımların korozyona karşı direncini artırır. α+β alaşımlarına göre daha iyi işlenebilirlikle beraber ısıl işleme daha yatkın olduğu bilinmektedir [17].

1.3. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Titanyum ve alaşımlarının; kimyasal, endüstriyel, denizcilik ve uzay ile ilgili uygulamaların geniş bir yelpazesinde üstün, oldukça güvenilir ve ekonomik olduğu teknik açıdan kanıtlanmıştır. Bunun yanında son on yıllık dönemde; kimyasal makine imalatında, gemi yapımında, otomotiv endüstrisinde, yağ ve gaz endüstrisi ekipmanlarının imalatında, gıda sanayinde, tıp uygulamalarında ve sivil mühendislik uygulamalarında titanyum ve alaşımlarının kullanım oranı hızla artmaktadır.

Geleneksel olarak titanyumun kullanımı uzay, uçak ve deniz sanayi alanlarında yoğunlaşmıştır. Metalin kuvvetli ve rijit yapısı, düşük özgül ağırlığı ve görece hafif oluşu, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ve korozyona karşı direnci kullanımın bu özel alanlarda yaygınlaşmasına neden olmuştur. Son otuz yılda metalin yeni işleme

yöntemlerinin gelişimine paralel olarak biyomedikal aparatlardaki ve dental implantlardaki kullanımı artmaktadır. Son yıllarda titanyum ve alaşımlarının, medikal ve dental uygulamalarında ciddi bir artış görülmektedir [20].

Titanyum halen diğer yaygın kullanıma sahip metaller gibi kesintisiz üretim yöntemine sahip olmayışı ve cevherlerinin düşük tenorlu oluşu nedeniyle pahalı bir malzemedir. Yine de diğer metallerin bir arada sunamadığı özelliklere sahip oluşu sayesinde çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [21].

Titanyum oksijenle çok çabuk reaksiyona girdiği için yüzeyinde daima koruyucu bir titanyum dioksit tabakası görülür. Bu sayede korozyona karşı yüksek direnç gösterir dolayısıyla doku uyumu en iyi olan metaldir. Günümüzde metal alerjisinin korozyon kaynaklı olduğu kanıtlanmıştır. Titanyum korozyona karşı dirençli olduğu için metal alerjisi olan hastalarda kullanılabilir. Titanyum alaşımları mikro cerrahinin hassasiyetine uygundur. Havacılık ve uzay sanayisinin ihtiyaçları ile gelişmiş olan titanyum, mikro cerrahi alanında vazgeçilmez hale gelmiştir. Yine çok önemli bir özellik olarak titanyumun bazı alaşımları aşınmaya dayanıklıdır ve uzun ömürlüdür. Sert oluşuyla ince uçları güçlü kullanıma imkân sağlar. Korozyona karşı çok yüksek dayanıma sahiptir. Titanyum alaşımlarının yorulma dayanımı da diğer metallerin yorulma dayanımlarına göre önemli ölçüde üstündür. Son yıllarda en çok kullanılan metal implant, titanyumdur [22].

Titanyum, ticari saflıkta titanyum ve Ti6A14V olmak üzere iki şekilde kullanılır. Saf titanyum mekanik özellikler açısından zayıftır ve protez üzerine poroz kaplama olarak kullanılır. Poroz kaplamalar kalça protezlerinde ve diş implantlarında, kaplamadaki porların içinde kemik büyümesini sağlamak amacıyla sık sık kullanılırlar. Yapay bağlantı ve yerleştirme tedavilerinde yaygın olarak kullanılan Ti6A14V alaşımları, paslanmaz çelikler ve kobalt-krom alaşımlarının yaklaşık yarısı kadar bir elastik modüle sahiptir [23].

Sonuç olarak titanyum esaslı alaşımların biyolojik olarak uyumlu oldukları histolojik deneylerle kanıtlanmış olup tek dezavantajı oldukça pahalı olmasıdır [23].

Ti6A14V alaşımı halen havacılık uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Alüminyum alaşımlarının, yüksek mukavemet çeliklerinin veya nikel esaslı süper

alaşımların yüksek sıcaklıktaki kararlılıklarının yetersiz kaldığı durumlarda titanyum alaşımları ön plana çıkmaktadırlar [9].

Titanyumun havacılık sanayinde yaygın kullanımının önemli sebepleri; hafiflik, çalışma sıcaklığı, korozyon direnci ve hacim kısıtlamasıdır [9].

Yakıt tasarrufu sağlayan ve çevreye daha az zarar veren araçlara olan talebin artması araçların ağırlığının hafiflemesi ve performansın arttırılmasını gerektirmiştir. Bu noktada yüksek korozyon direnci ve güce sahip titanyum alaşımları başlıca tercih maddesi olmuştur. Ancak titanyumun maliyeti arttırması otomotiv endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılmasının önündeki en büyük engeldir ve kullanımını yarış otomobilleri, yarış motorları ve Formula 1 araçları gibi yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren araçlarla sınırlamıştır. Titanyumun pahalı bir malzeme olması kullanım yaygınlığının önündeki en önemli engeldir. Yakın gelecekte titanyum fiyatlarının çok fazla düşmesi beklenmemektedir. Umut edilen yüksek hacimli otomotiv pazarında fiyatların havacılık alanındakinin yarısı ya da üçte biri oranında ucuzlayacağı ve böylece otomotiv endüstrisinde de titanyumun daha yaygın olarak kullanılmasıdır [21].

Titanyum alaşımları yüksek performanslı malzemeler olarak bilinmektedir. Yeni kullanım alanları araştırılırken yine yüksek performans gerektirecek alanların araştırılması gerekmektedir ve bu durum özellikle yüksek performans gerektiren spor dallarını öne çıkmaktadır. Titanyum ve titanyum alaşımlarının kullanıldığı başlıca alanlar golf, tenis, bisiklet, su altı sporları, dağcılık, trekking ve kış sporlarıdır. Örneğin golf oynarken ana amaç topu mümkün olduğunca uzağa atabilmektir ve bunu sağlamak için golf sopasının ucu en önemli elemandır. Önceleri ağaç kullanılarak üretilen uçlar daha sonra çelik kullanılarak üretilmeye başlanmıştır. 1990'ların ortalarında ise ilk kez titanyum kullanılarak üretilen uçlar pazara sürülmüştür. Düşük ağırlıklı metaller kullanmak üreticilere daha büyük uçlar üretip ağırlığı hafif tutma şansını tanımaktadırlar. Üretimde genellikle Ti6A14V kullanılmakla birlikte Ti3A12.5V gibi diğer α+β alaşımlar da kullanılmaktadır [9].

Titanyumun bir başka avantajı da paslanmaz çeliğin yarısı, alüminyum da üçte biri kadar bir ısıl genleşme katsayısına sahip olmasıdır. Bu durum inşasında fazla cam ya da beton kullanılan binalarda titanyum kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Düşük

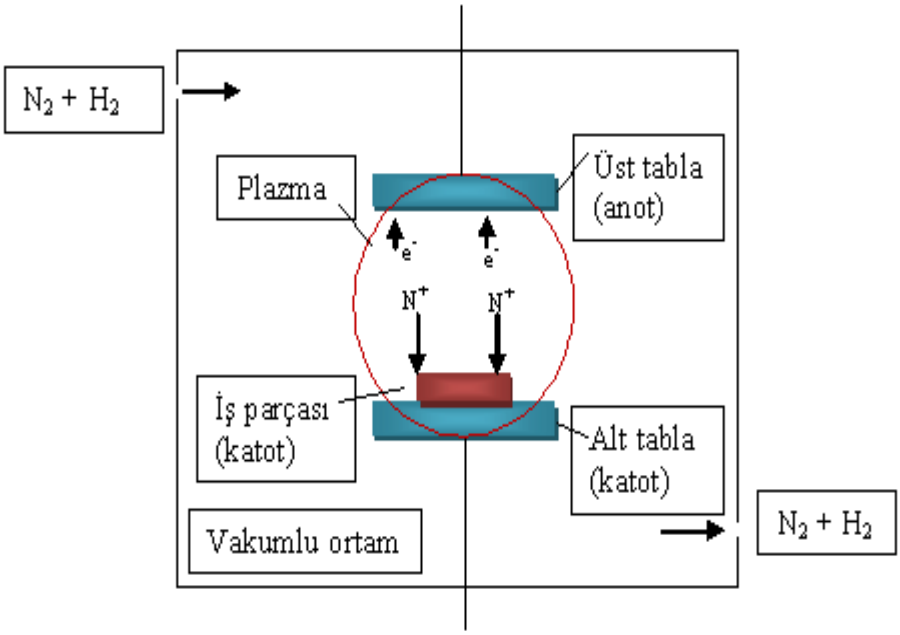
ısıl genleşme katsayısının bir sonucu olarak hareketli çatılar gibi büyük titanyum yapılarda gece gündüz ısı farkının neden olduğu gerilim en aza indirilebilmektedir [8].

Denizcilik uygulamalarında da yine yüksek korozyon direncinin yanı sıra yüksek mukavemetin önem kazandığı alanlarda kullanılmaktadır. Medikal uygulamalarda titanyumun tercih edilmesinin altında yatan nedenlerin başında vücut sıvılarının neden olduğu korozyona dayanıklı olmasından dolayı insan vücuduna uyum sağlamasıdır [23].

1.4. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Plazma Nitrürlenmesi

Plazma nitrürleme son 20-30 yılda geliştirilmiştir, diğer klasik nitrürleme yöntemlerine göre birçok kazanımlara sahip olup oluşturulan tabakanın derinliğinin ve fazlarının kontrol edilebildiği bir termokimyasal iyileştirme işlemidir. Adını işlem sırasında kullanılan azot veya gaz karışımının oluşturduğu plazmadan alan yöntemde temel prensip, vakumlu bir ortamda azot atomlarının elektrik verilerek iyonlaştırılması ve katot (negatif kutup) olarak yerleştirilen parça yüzeyine çarptırılarak azot iyonlarının sıcaklığın da etkin rolü ile parça içerisine yayınımının sağlanarak yüzeyde istenen nitrür fazlarının oluşturulmasına dayanmaktadır. Bu yöntem, azot içeren karışım gazın yaklaşık 1-10 mbar basınç (vakum) altında, 400-2000 V uygulanan gerilim ile iki kutup arasında $N \rightarrow N^{+} + e^{-}$ eşitliğinde belirtildiği gibi iyonize edilmesiyle gerçekleştirilmektedir [24].

Azotun iyonlarına ayırılması sonucunda iyon halinde olan pozitif yüklü azot atomlarının katotta bulunan malzeme yüzeyine manyetik alanın etkisi ile hızla çarparak difüze olmaları ile gerçekleştirilir. Doğru akımın kullanılması plazma ortamının sürekliliğini sağlamak içindir.



Şekil 1.1. Plazma nitrürleme yöntemi [24]

Şekil 1.1'de, nitrürleme mekanizmasını temel alarak, nitrürlemek istenilen parçalar, vakumlu ortamı oluşturabilmek için, kapalı bir kap içine yerleştirildikten sonra kap içindeki hava dışarıya atılır. Kap içindeki vakumun sağlanmasından sonra ortama verilen azot, elektrik enerjisi yardımıyla iyonlaştırılır ve plazma oluşması sağlanır. Plazma içindeki pozitif yüklü azot iyonları negatif kutup (katot) halindeki parça yüzeyine çarpar. Bu çarpma sırasında azot, iyonlaşırken aldığı fazla enerjisini parçaya geçirirken, hem bu enerji hem de çarpmanın etkisi ile malzeme yüzeyine yayınır. Kullanılan gaz N_2, $N_2 + H_2$ karışımı veya amonyak (NH_3) olabilir [25].

İşlem sırasında kap içindeki gaz, 1 ila 10 mbar arasındaki düşük basınç altında tutularak plazma oluşumunun kolaylaştırılması sağlanır. Basınç değerinin iyi ayarlanması gerekir. Basıncın çok düşük tutulması, ortamdaki gaz miktarınında çok az olması anlamına gelmesinden dolayı hem plazma sürekliliği hem de nitrürleme oranı olumsuz etkilenir. Yeterli vakumun sağlanamaması durumunda ise oluşması istenilen plazma ortamı için gereken enerji miktarı artacaktır.

1.4.1. Plazma nitrürlemenin avantajları

Plazma nitrürlemenin diğer nitrürleme yöntemlerinden farklarını ortaya çıkaran temel etken, nitrürleme sırasında ortamdaki azot miktarının oranının ve miktarının

kontrol altında tutulabilmesi ve azotun malzeme yüzeyine adeta bombardıman edilircesine gönderilmesinden kaynaklanmaktadır.

Uygulamadaki bu fark sonucu;

a) Nitrürleme sonucu oluşacak nitrür tabakalar ve onların bileşenleri kontrol altına alınabilmektedir. Örneğin malzemenin uygulama alanına göre bileşik tabaka çok az olacak veya hiç olmayacak şekilde ayarlanabilmekte, böylelikle malzeme yüzeyindeki mekanik özellikler belirlenebilmektedir.

b) Plazma nitrürlemede uygulanan gerilim işlem sıcaklığını belirlediği için gerilim ayarlanarak işlem sıcaklığı kontrol edilebilmektedir.

c) Ayrıca plazma nitrürlemenin bombardıman etkisi ile azot difüzyonu yapılması nedeniyle parça yüzeyindeki sıcaklık, parçanın diğer kısımlarından farklı değerlere sahip olabilmekte, bu da parçanın heterojen sıcaklık dağılımına sahip olmasına sebep olmaktadır. Böylece parçanın bütünü düşünüldüğünde malzemede sıcaklıktan dolayı bir değişimin olmaması sağlanabilmektedir.

d) Diğer yöntemlere göre daha kısa sürede aynı nitrür derinliğine ulaşılabilmektedir. 0,5 mm kalınlığında nitrür tabakası oluşturmak için plazma nitrürleme ile yaklaşık olarak 10 saatlik işlem süresi gerekirken, iki kadameli gaz nitrürleme ile 25 saatlik, sıvı nitrürleme ile 30 saatlik, tek kademeli gaz nitrürleme ile 50 saatlik işlem süresi gerekmektedir.

e) Nitrürleme sonrasında karşılaşılabilecek çarpılma olayları minimuma inmekte, hatta ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır.

f) Karmaşık geometrili parçalar daha kolay nitrürlenebilmektedir. Ayrıca parçanın tamamının yerine bir kısmının nitrürlenmesi mekanik maskelemeyle yapılabilmektedir.

g) Yorulma dayanımında diğer yöntemlere göre % 25 - 40’lara varan artışlar elde edilebilmektedir.

h) İşlem sonrası parçanın boyut değişimi 8-10 μm mertebelerini pek geçmemektedir.

i) Nitrürleme sırasında plazma oluşumu için kullanılan güç kaynağı dışında, ısı üretimi sağlayacak bir sistem gerekmemesi, kullanılan enerjinin doğrudan olarak azot atomlarının difüzyonunda kullanılması nedeniyle harcanan enerji miktarı daha düşük olmakta, enerji gereksinimi elektrik enerjisinden sağlandığından, fosil atıkların yakılması sonucu oluşabilecek atıklar gibi çevreye zararlı çıktılarının olmaması sebebiyle çevre kirlenmesine neden olmamaktadır.

j) Nitrürleme sıcaklığı çok düşük seviyelerde bile başarılı nitrürlemeler yapılabilmektedir [25,26].

Bu üstün yanlarının yanı sıra plazma nitrürlemenin bazı zayıflıkları da bulunmaktadır;

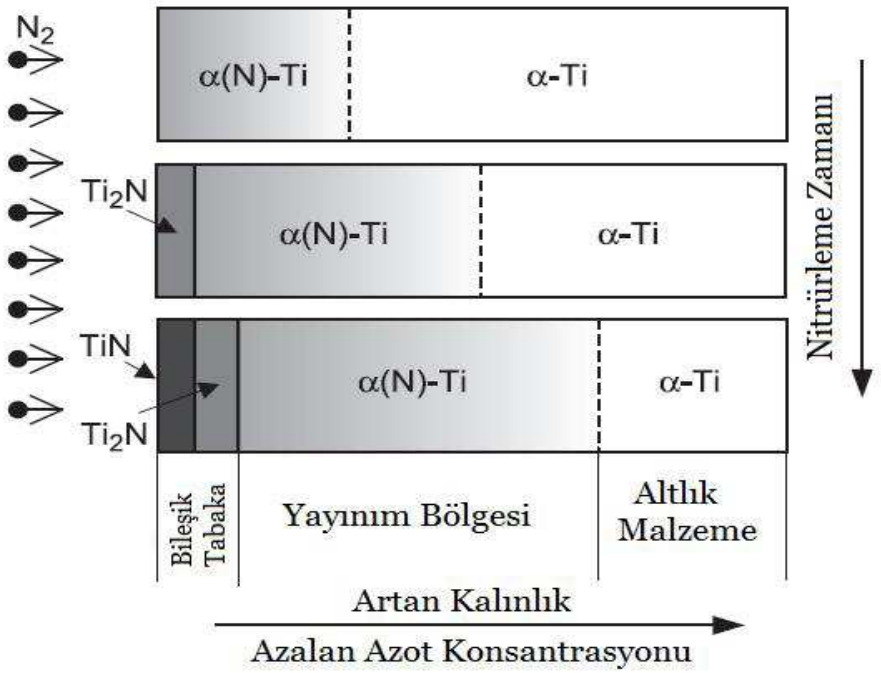
a) Plazma nitrürleme sisteminin kurulumunun pahalı olması ilk yatırım giderlerinin yüksek olmasına sebep olmaktadır.

b) İşlem sonrası su verme imkanı olmaması dezavantajlarından biridir. Su verme işlemi bazı durumlarda yorulma dayanımını arttırmada kullanılmaktadır.

1.4.2. Nitrürleme sonucu oluşan tabakalar

Şekil 1.2'de şematik olarak gösterildiği gibi plazma nitrürleme işlemi sonucunda titanyum ve alaşımlarının yüzeyinde iki tabakanın oluştuğu görülür.

Bunlardan malzemenin çekirdeğinden yüzeye doğru ilk oluşan tabaka α(N)-Ti yayınım (difüzyon) tabakası olup onun üzerine azot konsantrasyonunun artışı ile gelişen TiN ve Ti_2N fazlarından oluşan bileşik tabaka (compound layer)dır.



Şekil 1.2. Titanyumun nitrürlenmesi sürecinde yüzeyde tabakaların oluşumunun şematik gösterimi [25]

1.4.2.1. Yayınım tabakası

Şekil 1.2'de gösterildiği gibi plazma nitrürleme işlemi sonucunda titanyum ve alaşımlarının yüzeyinde malzemenin çekirdeğine doğru nitrürleme ile ilk oluşan tabaka yayınım (difüzyon) tabakasıdır.

Azot iyonları sıcaklık, zaman ve vakum basıncı etkisi ile HSP α-titanyum faz içerisine azotun arayer çökelmesi şeklinde olarak difüze olur. Malzemenin çekirdeğine doğru nitrürleme ile gerçekleşen bu yayınım ile ilk oluşan tabaka yayınım (difüzyon) tabakası olarak adlandırılır. Bu tabaka azotça zengin α(N)-Ti kristalleri içermektedir. Bu katı çözelti içerisinde çekirdeğe doğru azot konsantrasyonunun azalmasıyla birlikte sertlik değerlerinin yavaş yavaş azaldığı ve titanyumun nitrürsüz haldeki ana fazı (matris) sertlik değerine ulaştığı görülmektedir.

1.4.2.2. Bileşik tabaka

Malzeme içerisinde azot konsantrasyonunun artması ve sıcaklığının etkisi ile difüzyon tabakasının üzerinde oluşan tabaka bileşik tabaka olarak adlandırılmaktadır. Eğer gaz/metal arayüzeyinde azot konsantrasyonu arayer çökelti fazının muhafaza edebileceğinden daha fazla olursa bu durum yeni bir faz oluşumunu gerektirir. Bu

durumda oluşan yeni faz Ti_2N fazıdır. Aynı kuralı takiben artan azot iyon konsantrasyonu sonucu Ti_2N fazı üzerinde TiN fazlarının oluşumuna neden olur. Bu TiN ve Ti_2N nitrür tabakalarından meydana gelen bileşik tabaka çok yüksek sertlik değerlerine sahiptir [27-29].

1.5. Aşınma

Aşınma temas eden yüzeylerden mekanik etkenlerle malzeme yüzeyinden kayıp olarak tanımlanmaktadır. Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlar bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel oluşan ayrılmalardır [30].

Bir aşınma sisteminde;
• Ana malzeme (aşınan),
• Karşı malzeme (aşındıran),
• Ara malzeme,
• Yük,
• Hareket ile birlikte aşınma meydana gelir.

1.5.1. Aşınmayı etkileyen faktörler

Aşınmayı etkileyen çeşitli faktörler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler, aşağıda dört grup halinde verilmiştir:

1. Ana malzemeye bağlı faktörler;
a) Malzemenin kristal yapısı
b) Malzemenin sertliği
c) Elastisite modülü
d) Deformasyon davranışı
e) Yüzey pürüzlüğü
f) Malzemenin boyutu
2. Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi
3. Ortamın etkisi
a) Sıcaklık
b) Nem
c) Atmosfer

4. Servis koşulları

a) Basınç

b) Hız

c) Kayma yolu

1.5.2. Aşınma mekanizmaları

1.5.2.1. Adhezif aşınma

Yapışma, ovalanma ve kavrama olarak da bilinen adhezyon aşınması, birbirine temas eden cisimlerin temas yüzeylerinin, bir normal kuvvet etkisi altında izafi hareket yapmaları sırasında görülür. Cisimlerin gerçek temas yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğü sebebiyle aslında çok küçük olduğundan, bu noktalardaki gerilmeler çok küçük yük durumlarında dahi akma gerilmesi sınırına erişirler ve akarak plastik deformasyona uğrarlar ve cisimler birbirine mikro kaynaklar ile bağlanırlar. Bu sırada iki cisim arasında devam eden izafi hareket sebebiyle kaynak bağı kopar. Bu kopma sonucu diğer cisme göre yumuşak olan malzemeden imal edilmiş cismin yüzeyinde boşluklar oluşur, diğer yüzeydeyse çıkıntılar meydana gelir ve iki yüzey arasına adhezif parçacıklar dökülür. Adhezif aşınma çoğu durumda kaymalı aşınma olarak da adlandırılır [30].

1.5.2.2. Abrazif aşınma

Abrazyon aşınması veya abrazif aşınma, çizilme aşınması olarak da bilinmektedir. Çizilme aşınmasında, bir diğerine göre izafi hareket yapan iki cisim temas yüzeyleri arasına yabancı sert parçacıklar girer. Bu şekilde aşınan yüzeyde çizikler ve kesikler oluşur ve aşınmaya sebebiyet verir. Pulluk gibi aletlerde, kırıcılar ve iş makinelerinin kazıma bıçakları ve çalışma ağızları gibi parçalarda bu tür aşınma oldukça yaygındır.

1.5.2.3. Delaminasyon (yorulma) aşınması

Yorulma, dişli çarklar, rulmanlı yataklar, kam mekanizmaları gibi birbirleriyle sürekli temas halindeki yüzeylerde sıkça görülen bir aşınma türüdür. Bu tür makine elemanlarında temas alanları küçük olduğundan temas yüzeylerinde basınç meydana gelir. Bu basınçlar yüzeyin hemen altında kayma gerilmelerine sebebiyet verir. Değişken zorlanmalara maruz bu elemanlarda yorulma olayı başlamış olur.

1.5.2.4. Oksidasyon aşınması

Oksidasyon aşınması, en yaygın karşılaşılan kimyasal aşınma proseslerinden biridir. Metallerin yüzeyinde ince bir oksit tabakası her zaman oluşabilmektedir. Bu tabaka aynı zamanda**,** sürtünme ve aşınmaya karşı koruyucu tabaka özelliğine sahip olabilir. Oksidasyon aşınması teorisine göre, kayan iki yüzey arasında ortaya çıkan sürtünme ısısı, metal yüzeyi üzerindeki oksit filminin kalınlığını arttırmak için enerji sağlayabilir.

Oksit filmi kritik bir kalınlığa ulaştığında çıkıntılar aşınma partikülleri oluşturarak kırılırlar. Bu yığıntılar abrazif aşınmayı başlatabilir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Molinari ve arkadaşları, plazma nitrürlenmiş Ti6Al4V alaşımının özelliklerini incelemiştir. Plazma nitrürleme işlemini laboratuvar ortamında, %80 N_2 - %20 H_2 gaz karışımında ve 700, 800 ve 900 ^oC sıcaklıklarda 24 saat süreyle yapmıştır. Nitrürleme sonrası yüzey sertliklerini 700, 800 ve 900 ^oC için sırasıyla 1500, 1900 ve 2300 $HV_{0.03}$ olarak ölçmüştür. Plazma nitrürleme sonrası Ti_2N ve TiN fazlarının oluştuğunu belirtmiştir. Ayrıca nitrürleme sıcaklığının artmasıyla bu fazların yoğunluğunun arttığını göstermiştir. Aşınma testlerini 50, 100 ve 200 N yük altında ve 0,3, 0,6 ve 0,8 m/s hızlarda gerçekleştirmiştir. En fazla aşınma miktarını 200 N yük altında ve 0,8 m/s hızda bulmuştur. Nitrürleme sıcaklığının artmasıyla daha az aşınma olduğunu belirtmiştir. Aynı şekilde aşınma testinde yükün ve hızın artmasıyla aşınma miktarının arttığını göstermiştir. Mikrosertlik profili incelemesinde mikrosertliğin sıcaklıkla arttığını ancak derinlik arttıkça azaldığını göstermiştir [31].

Yıldız ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımını %25 Ar - %75 N_2 gaz karışımında, 650, 700 ve 750 ^oC sıcaklıkta, 1, 2 ve 4 saat boyunca plazma nitrürlemiştir. Nitrürlemeden sonra nitrürleme süresi ve sıcaklığına bağlı olan ε-Ti_2N ve δ- TiN fazlarından oluşan tabaka elde etmiştir. En yoğun faz TiN fazıdır ve sıcaklık ile nitrürleme süresinin artmasıyla δ- TiN fazının yoğunluğu artmıştır. Nitrürlenmiş numuneler arasında en az yüzey sertliğinin 600 $HV_{0.01}$ ile 650 ^oC'de 1 saat nitrürlenmiş numunede, en fazla yüzey sertliğinin 1400 $HV_{0.01}$ ile 750 ^oC'de 4 saat nitrürlenmiş numunede olduğunu göstermiştir. Nitrürleme sıcaklığının ve süresinin artmasının alaşımın aşınma direncini ve sertliğini arttırdığını ancak aşınma oranını azalttığını belirtmiştir [32].

Yılbaş ve arkadaşları, plazma nitrürlenmiş Ti6Al4V alaşımının özelliklerini incelemiştir. Nitrürleme işlemini N_2-H_2 (8:1) gaz karışımında ve 450 ile 520 ^oC sıcaklıkta yapmıştır. Nitrürleme sonrası numunelerde δ-TiN ve ε-Ti_2N fazlarını bulmuştur. Nitrürleme yüzeyinden çekirdeğe doğru gidildikçe mikrosertlik azalmıştır. Plazma nitrürleme sıcaklığı arttıkça aşınma direnci artmıştır [33].

Raman ve arkadaşları, plazma nitrürlenmiş Ti6Al4V numunelerin özeliklerini incelemiştir. Nitrürleme işlemini 520 ^{o}C'de ve saf azot ile % 25 H_2 - % 75 N_2 gaz karışımı olmak üzere 2 farklı gaz ortamında 4 ve 18 saatte yapmıştır. Yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 850 ^{o}C) plazma nitrürleme yapmanın Ti6Al4V alaşımının yorulma dayanımını kötü etkilediğini ve tane büyümesine yol açtığını belirtmiştir. Bunun üstesinden gelmek için düşük sıcaklıkta (600 ^{o}C altında) nitrürleme yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Nitrürlenmiş numunelerde ε-Ti_2N ve δ-TiN fazları belirlenmiştir. Saf azotla yapılan nitrürlemede gaz karışımına kıyasla daha fazla TiN piki görülmüştür. 18 saatlik nitrürlemede 4 saatlik nitrürlemeye göre daha kalın tabaka oluşmuştur. Nitrürleme zamanının artması nitrürleme tabakasının kalınlığını arttırmıştır. Gaz karışımında yapılan nitrürlemede saf azota göre daha yüksek yüzey sertliği elde etmiştir. Gaz karışımında 4 saat nitrürleme ile 571 $HK_{0.02}$, 18 saat nitrürleme ile 489 $HK_{0.02}$, saf azotta 4 saat nitrürleme ile 472 $HK_{0.02}$, 18 saat nitrürleme ile 387 $HK_{0.02}$ sertlik değerleri ölçmüştür [34].

Taktak ve arkadaşları, plazma nitrürlenmiş Ti6Al4V alaşımının aşınma direncini incelemiştir. Plazma nitrürleme işlemi 700, 800 ve 900 ^{o}C sıcaklıkta 3, 6, 9 ve 12 saat için saf azot ortamında yapmıştır. Plazma nitrürlemeden sonra TiN (δ) ve Ti_2N (ε) fazları oluşmuştur. En fazla sertlik değeri 2600 $HV_{0.05}$ ile 900 ^{o}C'de 12 saat nitrürlenmiş numunede ölçmüştür. En az sertlik değeri ise 1700 $HV_{0.05}$ ile 700 ^{o}C'de 3 saat nitrürlenmiş numunededir. Numuneler 2.5, 5, 7.5, 10 ve 12.5 N yük altında 0.1 m/s hızla 500 m boyunca aşınma testine tabi tutmuştur. En az aşınma miktarını 900 ^{o}C sıcaklıkta, 12 saatte elde etmiştir. Nitrürleme sıcaklığı ve süresi arttıkça aşınma direnci artmıştır [35].

Hosseini ve arkadaşları, plazma nitrürleme sıcaklığının ve süresinin Ti6Al4V alaşımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Plazma nitrürleme işlemini 700, 750, 800 ve 850 ^{o}C sıcaklıkta, 2, 5 ve 10 saat boyunca, N_2/H_2= 4 oranında gaz karışımında yapmıştır. Plazma nitrürlemeden sonra δ-TiN ve ε-Ti_2N fazları olduğunu saptamıştır. Yüzey sertliğini 800 ^{o}C'de 2 saat için 660 $HV_{0.2}$, 5 saat için 710 $HV_{0.2}$ ve 10 saat için 760 $HV_{0.2}$ ölçmüştür. 10 saat için 700 ^{o}C'de 640 $HV_{0.2}$, 750 ^{o}C'de 670 $HV_{0.2}$, 800 ^{o}C'de 740 $HV_{0.2}$ ve 850 ^{o}C'de 800 $HV_{0.2}$ olarak ölçmüştür. Aşınma testleri sonucunda en az aşınma miktarını 850 ^{o}C'de 10 saat nitrürlenmiş numunede elde etmiştir [36].

Straffelini ve arkadaşları, plazma nitrürlenmiş ve plazma nitrürlenmemiş Ti6Al4V alaşımının kayma aşınmasını incelemiştir. Plazma nitrürleme işlemini 800 ^{o}C sıcaklıkta, 8 ile 24 saat boyunca ve % 80 N_2 - % 20 H_2 gaz karışımında gerçekleştirmiştir. Nitrürleme işleminden sonra yapılan yüzey sertlik ölçümünde 24 saat nitrürlenmiş numunede 800 $HV_{0.025}$, 8 saat nitrürlenmiş numunede 640 $HV_{0.025}$ olarak ölçmüştür. Aşınma testinde 24 saat nitrürlenmiş olan numunenin 8 saat nitrürlenmiş olan numuneye kıyasla daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu belirtmiştir [37].

Nolan ve arkadaşları, plazma nitrürlenmiş Ti6Al4V alaşımının kayma aşınmasını incelemiştir. Ti6Al4V alaşımına PVD ve plazma nitrürleme prosesini uygulamıştır. Uygulanan bu yüzey işleminin ardından numunelere XRD analizi yapmıştır. XRD analiz sonucuna göre numunelerde TiN ve Ti_2N fazlarının oluştuğunu belirtmiştir. Numunelerin yüzey sertliklerini ölçmüştür. Plazma nitrürlenmiş numunenin yüzey sertliğini yaklaşık 850 $HV_{0.002}$ olarak belirtmiştir [38].

Literatür taramasında görüleceği üzere, çoğu araştırmacı plazma nitrürleme işlemini 650-900 ^{o}C sıcaklık aralığında yapmışlardır. Buna karşın az sayıda araştırmacı ise yüksek sıcaklığın malzemenin yorulma dayanımını düşürdüğü ve tane büyümesi etkisi nedeni ile plazma nitrürleme işlemini düşük sıcaklıklarda (450-520 ^{o}C) yapmışlardır. Dolayısıyla bu çalışmada 535 ^{o}C'de farklı sürelerde plazma nitrürlenmiş Ti6Al4V alaşımının adhezif aşınma direnci ve yüzey karekterizasyonu incelenmiştir.

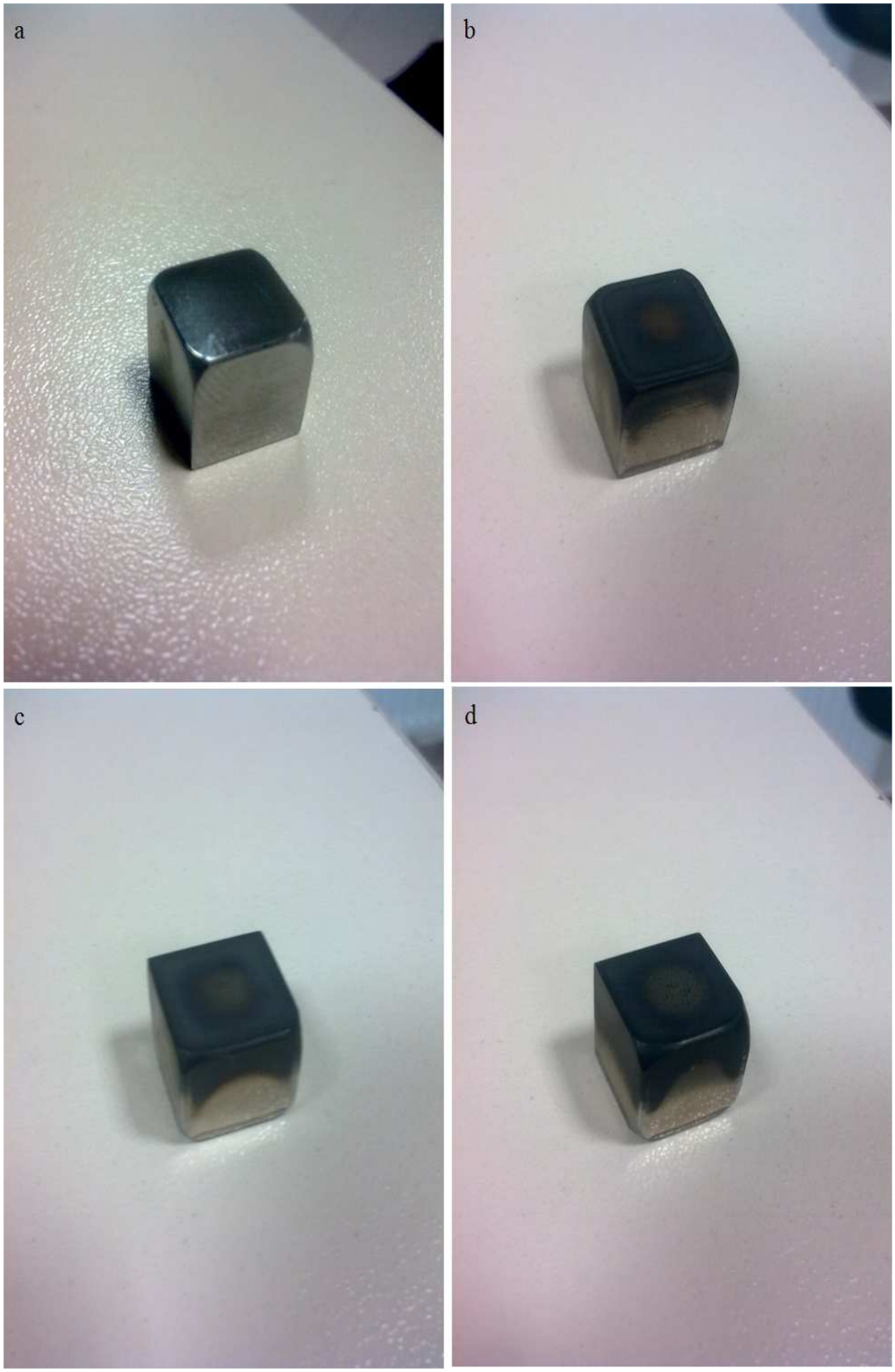
3. MALZEME VE YÖNTEM

Deneylerde, 20 mm çap ve 500 mm uzunluğundaki Ti6Al4V alaşımından yapılmış çubuklar deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu çubuklar freze tezgahında 12x12 mm ölçülerinde kare kesitli parçalar haline getirilmiştir. Ardından hazırlanan malzeme ince sulu taşlama ile 11x11 mm boyutlarına getirilmiştir. Son olarak tel erozyon yöntemiyle 11 mm aralıklarla kesilerek 11x11x11 mm boyutlarında küp numuneler elde edilmiştir. Bu malzemelerin kimyasal bileşimi Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi

Malzeme	ASTM	Malzeme kompozisyonu (% ağırlık)	ASTM kompozisyonu (% ağırlık)
Ti6Al4V	F136	90,2 Ti 5,1Al 4,2 V 0,07 C 0,15 Fe 0,02 H 0,04 N 0,12 O	88,3-90,8 Ti 5,5-6,5 Al 3,5-4,5 V Max 0,08 C Max 0,25 Fe Max 0,0125 H Max 0,05 N Max 0,13 O

Parçalara uygulanacak plazma nitrürleme işleminde azot iyonlarının numune yüzeyine difüzyonu için parçaların yüzeyinin mümkün olduğunca düz, parlak olması ve parçaların yüzeyinde yağ, kir gibi yabancı maddelerin olmaması gerekmektedir. Bu nedenle parçaların parlatılması gerekir. Parlatma işlemi nitrürlemeden sonra yapıldığı zaman hem parlatmanın güçleşmesi hem de oluşturulan nitrür tabakasının bir kısmının kaldırılması söz konusudur. Bu yüzden parçaların parlatılması işlemi, parçaların nitrürlenmesinden önce gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'de nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenmiş numuneler görülmektedir. Parlatma işlemi için ince sulu taşlamadan geçmiş parçaların yüzeyleri sırasıyla 1000, 1200, 2000 numaralı zımparalarla zımparalanmıştır. Daha sonra 1 μm elmas pasta ile çuhada parlatılmıştır. Parlatma için kullanılan Metkon marka parlatma cihazı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. a) Nitrürlenmemiş b) 4 saat nitrürlenmiş c) 8 saat nitrürlenmiş d) 12 saat nitrürlenmiş numunelerin görüntüleri



Şekil 3.2. a) Parlatma cihazı b) Parlatma işlemi

3.1. Plazma Nitrürleme İşlemi

Plazma nitrürleme işlemi endüstriyel ortamda yapılmıştır. Numuneler plazma nitrürlenmeden önce yüzeyleri parlatılarak üzerinde bulunan yağ, toz gibi pislik maddelerden dolayı saf alkolde bir süre bekletilerek temizlenmesi sağlanmıştır.

Plazma nitrürleme işlemleri sırasında hazırlanan küp parçalar bir taban yüzeyi üzerinde duracak şekilde katot levha üzerine yerleştirilmiştir. Özellikle parlatılmış yüzeyin ve taban hariç diğer bütün bölgelerin nitrürlenmesi sağlanmıştır.

Plazma nitrürleme sırasında gaz karışım oranı % 75 N_2 - % 25 H_2 gazı olacak şekilde düşünülmüştür. Bu oranla vakum basıncı 5 mbar ve voltaj 550 V olacak şekilde ayarlanmıştır. Plazma nitrürleme sıcaklığı 535 ^oC olarak belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda (600 ^oC ve üzeri) yapılan nitrürleme işleminin malzemenin yorulma dayanımını azalttığı için bu sıcaklık seçilmiştir. Yapılan plazma nitrürleme işleminde gaz karışım oranı ve sıcaklık sabit tutulup süre parametreleri değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Nitrürleme süresi 4, 8 ve 12 saat olarak uygulanmıştır.

Plazma nitrürleme işleminden sonra numunelere uygulanılması düşünülen yüzey pürüzlülüğü ölçümü, yüzey sertliği ölçümü, XRD analizi ve aşınma testlerinde kullanılmak üzere her bir deney parametresi için 10 adet numuneye plazma nitrürleme işlemi uygulanmıştır.

Şekil 3.3 a'da plazma nitrürleme fırınının fotoğrafı görülmektedir. Şekil 3.3 b'de ise plazma nitrürleme fırının iç kısmının fotoğrafı bulunmaktadır. Plazma nitrürleme yapılacak numunelerin yerleştirildiği alt tabla kısmı da aynı fotoğraf içerisinde yer almaktadır. Bu kısım aynı zamanda katotu oluşturur. Plazma nitrürleme sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan termokupl da fotoğrafta görülmektedir.



Şekil 3.3. a) Plazma nitrürleme fırını b) Plazma nitrürleme fırını iç kısmı

3.2. X Işınları Difraktometresi ile Faz Analizi

Rigaku marka X-Işınları Difraktometresi Şekil 3.4'te görülmektedir. XRD cihazı plazma nitrürleme işlemi sonrası numunelerde oluşan fazların tespiti için kullanılmıştır. XRD cihazı ile nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenen numunelerin faz analizi gerçekleştirilmiştir. Oluşan Cu- Kα X-ışınları 1,54 Å dalga boyunda (λ=1,54 Å) olup numunelerin yüzeyine değişik açılarda gönderilmiştir. Ölçümlerde tarama alanı olarak 20^o-90^o ve tarama hızı olarak 1^o/dak. seçilmiştir. Cihazdan alınan XRD analiz sonuçlarına göre nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenmiş numunelerin XRD analiz grafikleri çizilmiştir.



Şekil 3.4. X ışınları difraktometresi

3.3. Vickers Sertlik Ölçümü

Mikrosertlik ölçümlerinde Şekil 3.5'te gösterilen FM-300e marka vickers sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri numunelerin plazma nitrürleme işlemi sonrasında yüzeylerindeki sertliklerin tespitleri için yapılmıştır. Ayrıca numunelerin kesitleri alınarak yapılan ölçümlerde nitrürleme işleminin numunelerde oluşturduğu sertlik derinliği tespit edilmiştir.



Şekil 3.5. Sertlik ölçme cihazı

Vickers sertlik ölçüm cihazı 0,01 kgf (98,07 mN)-2 kgf (19,614 mN) kuvvet aralığına sahiptir. Vickers sertlik ölçme cihazıyla plazma nitrürlenmiş parçaların hem yüzey sertlikleri hem de numunelerin kesitinden malzeme yüzeyinden çekirdeğe doğru sertlik ölçümleri alınmıştır. Numunelerin kesitlerini almak için Şekil 3.6'da gösterilen Metkon marka hassas kesme cihazı kullanılmıştır. Kesme işlemi kesit yüzeyinin düzgün olması için düşük kesme hızlarında yapılmıştır. Kesit alındıktan sonra hassas sertlik ölçümleri elde etmek için yüzeyler sırasıyla 1200, 2000 ve 2400 numaralı zımparalar ile zımparalanmıştır. Yüzeyden çekirdeğe doğru sertlik taraması yapılırken, 10 µm gibi kısa mesafe aralıklarında ölçüm yapmak için küçük izlerin oluşturulması gerekir. Bu sebeple çok düşük yüklerle (0,1 kgf) ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Hassas Kesme cihazı

3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Plazma nitrürlenmiş numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümü Mahr Federal Perthomer marka yüzey pürüzlülüğü test cihazı ile yapılmıştır. Sonuçların tutarlı çıkması için her bir ölçüm üç kez tekrar edilmiştir. Test cihazı Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7. Yüzey pürüzlülüğü test cihazı

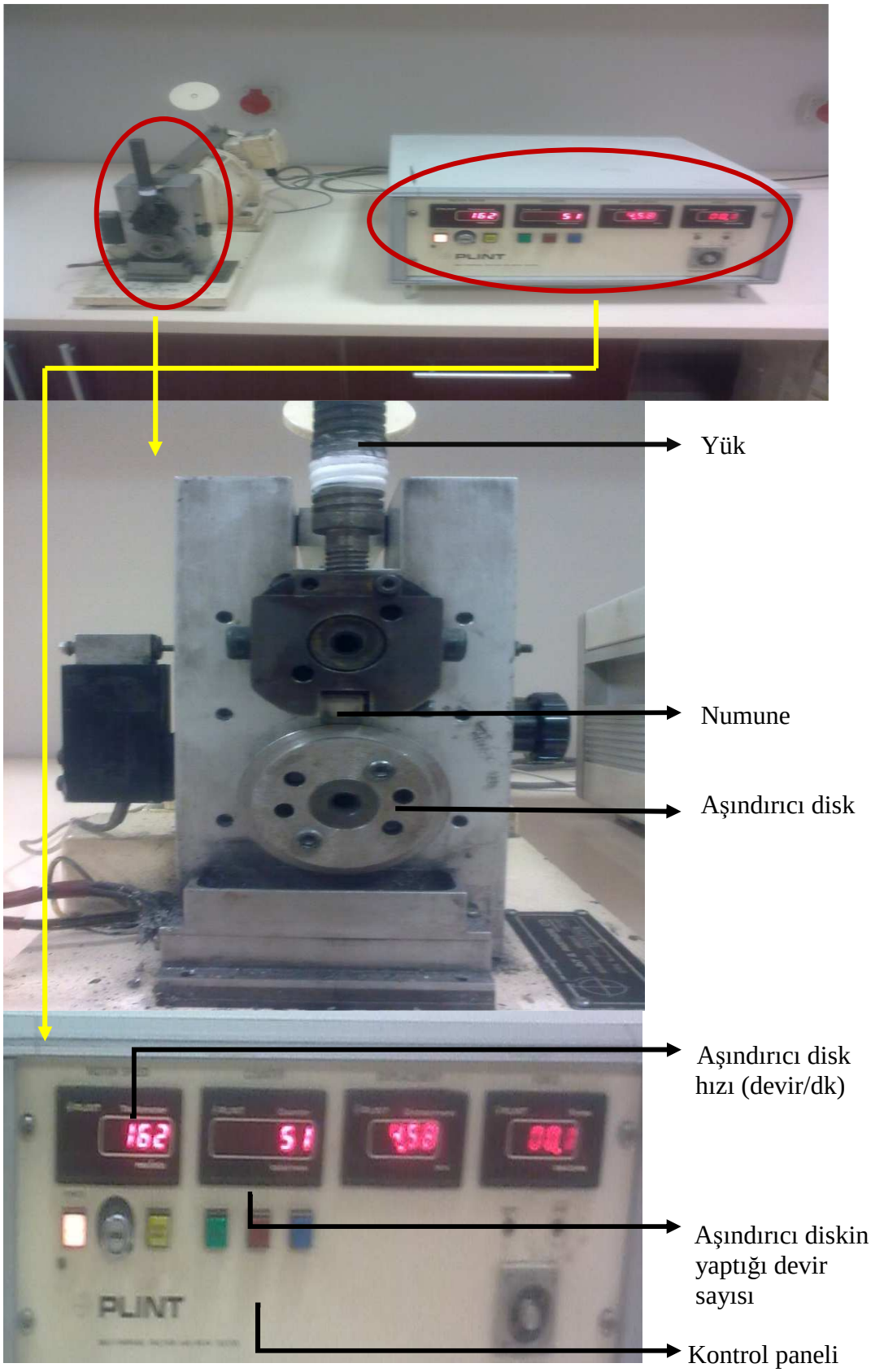
3.5. Aşınma Deneyi

Aşınma deneyleri Şekil 3.9'da gösterilen ASTM G77 standartındaki Plint marka aşınma cihazı ile yapılmıştır. Block on ring tipi aşınma cihazı nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenen numunelerin aşınma dirençlerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Aşınma deneyleri her bir numune için üç kere tekrar edilmiştir. Aşınma deneyleri 0,5 m/s (160 d/dak.) kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Numuneler toplamda 1000 m kayma mesafesi boyunca aşındırma işlemine tabi tutulmuştur. Numuneye uygulanan yükler 6, 12 ve 18 N olarak seçilmiştir. Aşınma deneyleri oda sıcaklığında yapılmıştır. Başlangıçta numunelerde çizgisel temas oluşmaktadır. İlerleyen aşamalarda ise çizgisel temastan alan temasına geçilmektedir.

Aşındırıcı disk olarak 60 mm çapında ve 4 mm kalınlığında 52100 çeliği kullanılmıştır. Silindir şeklinde olan 52100 çeliğinin disk haline getirilmesi için torna tezgahı kullanılmıştır. Aşınma testleri sırasında özellikle nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenen numunelerin yüzeyine temas eden aşındırıcı disklerin çevresinin hassas bir şekilde işlenmesine dikkat edilmiştir. Aşınma deneylerinde kullanılan aşındırıcı disk Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8. 52100 çeliğinden yapılmış aşındırıcı disk



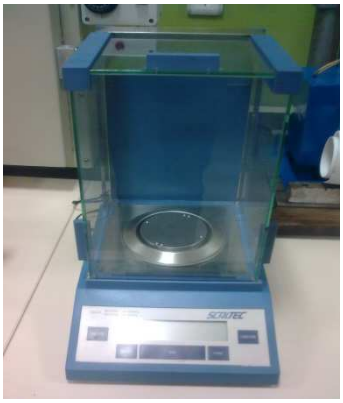
Şekil 3.9. Aşınma cihazı

22 HRC sertlik değerine sahip olan 52100 çeliği aşınma testlerinde kullanılması için sertliğinin artırılması gerekir. Bunun için 52100 çeliğine su verme işlemi uygulanmıştır. 52100 çeliği 880 ^{o}C'ye ısıtılarak, bu sıcaklıkta 1 saat süreyle bekletilmiştir [38]. Daha sonra suda soğutularak sertliğinin yaklaşık olarak 62 HRC'ye çıkması sağlanmıştır. Şekil 3.10'da aşındırıcı diski ısıtmada kullanılan ısıl işlem fırını görülmektedir.



Şekil 3.10. Isıl işlem fırını

Numunelerdeki aşınma miktarları, ağırlık kaybı ve aşınma hacmi esasına göre belirlenmiştir. Ağırlık kaybını belirlemek için aşınma testinden önce numune hassas terazide tartılarak ağırlığı not edilmiştir. Daha sonra aşınma testine tabi tutulan numune hassas terazide tekrar tartılmıştır. Aşınmadan önceki ve aşınmadan sonraki ağırlık değerleri arasındaki fark alınarak aşınma miktarı hesaplanmıştır. Numuneleri tartmada kullanılan Scaltec marka hassas terazi Şekil 3.11'de görülmektedir.

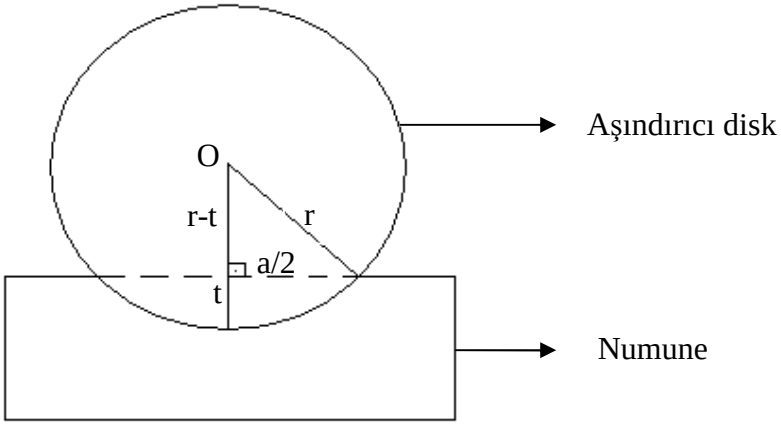


Şekil 3.11. Hassas terazi

Aşınma hacminin hesabı için; aşınma izlerinin SEM görüntüleri kullanılarak izlerin boyutları ölçülmüş ve bu değerler kullanılarak aşınma hacimleri Denklem (3.1);

$$V_{aş} = h.r^2 \left[\frac{\pi.\arcsin\left(\frac{a}{2r}\right)}{180} - \frac{1}{2}\mathrm{Sin}\left(2.\arcsin\left(\frac{a}{2r}\right)\right) \right] \qquad (3.1)$$

kullanılarak matematiksel olarak hesaplanmıştır. $V_{aş}$ aşınma hacmi (mm^3), h aşındırıcı disk kalınlığı (mm), r disk yarıçapı (mm), a aşınma izi boyu (mm) ve b aşınma izi genişliğidir (mm).



Şekil 3.12. Aşındırıcı disk-numune temas alanı

Aşınma izlerinden izin alanı hesaplanmıştır. Bu alan numunelerin deney boyunca maruz kaldığı basıncın hesabında kullanılmıştır. Ayrıca Şekil 3.12'den yararlanarak aşınma izi derinliği de hesaplanmıştır. Böylelikle aşınma izi derinliği dikkate alınarak, numunenin nitrür tabakalarından mı ya da matristen mi aşındığına karar verilebilir. Şekil 3.12'den, r disk yarıçapı (mm), t aşınma izi derinliği (mm) ve a aşınma izi boyu (mm) olmak üzere aşındırıcı disk-numune temas bölgesinden yararlanılarak Denklem (3.2);

$$r^2 = (r-t)^2 + (a/2)^2 \qquad (3.2)$$

elde edilmiştir.

3.6. SEM ve EDX Analizi

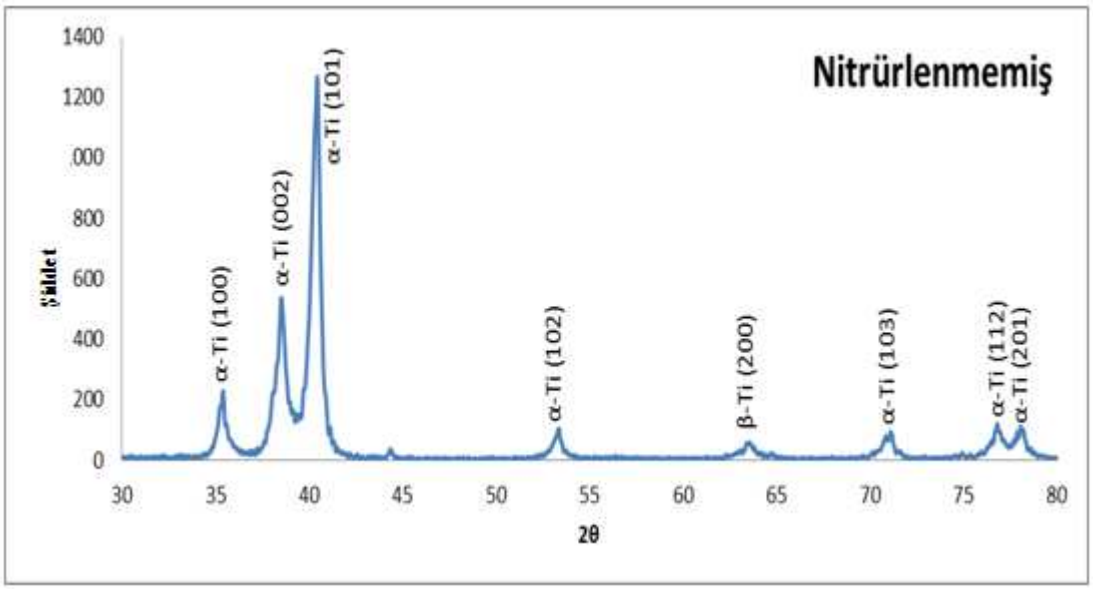
Nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenmemiş numuneler aşınma testine tabi tutulduktan sonra aşınma izlerinin SEM fotoğrafları çekilmiştir. SEM fotoğrafları numunelerin aşınma mekanizmalarını incelemek için alınmıştır. Ayrıca bu görüntülerden aşınma izlerinin alanları hesaplanmıştır. Şekil 3.13'te SEM ve EDX analizinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu görülmektedir. Nitrürlenmemiş, 4, 8 ve 12 saat nitrürlenmiş numunelerin her biri için ayrı ayrı olmak üzere 100, 400 ve 1000 m kayma mesafelerindeki aşınma izleri 20 ve 1000 büyütme alınarak ikişer kez görüntüleri alınmıştır. Ayrıca nitrürlenmemiş numunenin 18 N yük altında ve 400 m kayma mesafesindeki ile 4 saat plazma nitrürlenmiş 18 N yük altında ve 100 m kayma mesafesindeki SEM fotoğraflarında görülen aşınma dökuntülerine EDX analizi yapılmıştır.



Şekil 3.13. Taramalı elektron mikroskobu

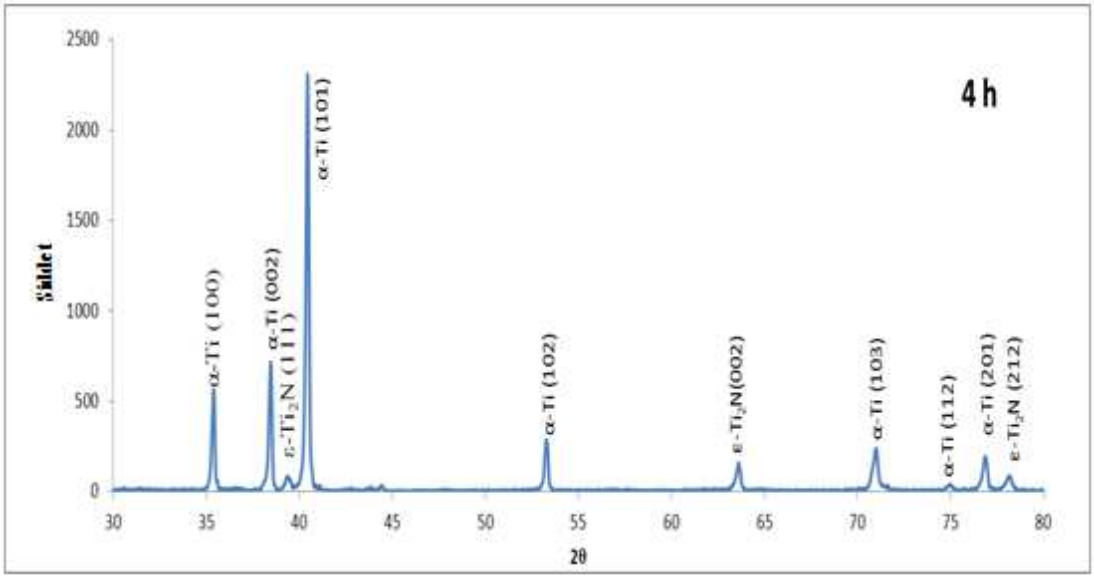
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. XRD Analizi



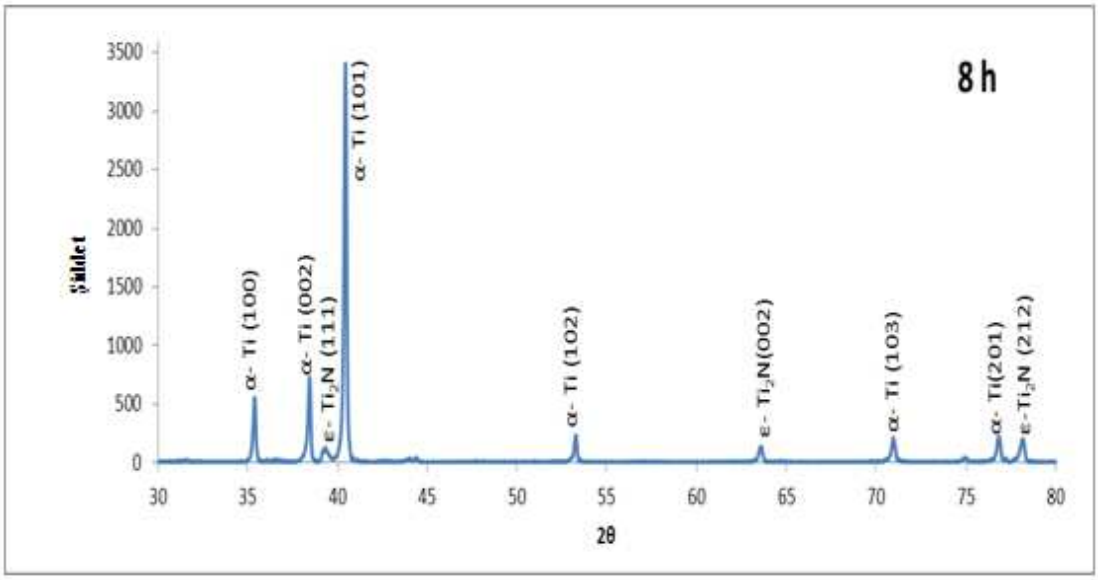
Şekil 4.1. Nitrürlenmemiş numunenin XRD analizi

Şekil 4.1'de nitrürlenmemiş Ti6Al4V alaşımının XRD analizi görülmektedir. Titanyum alaşımı α- Ti ve β- Ti fazlarından oluşmaktadır. Ancak yoğun olarak α- Ti fazından oluştuğu XRD analizinden görülmektedir.



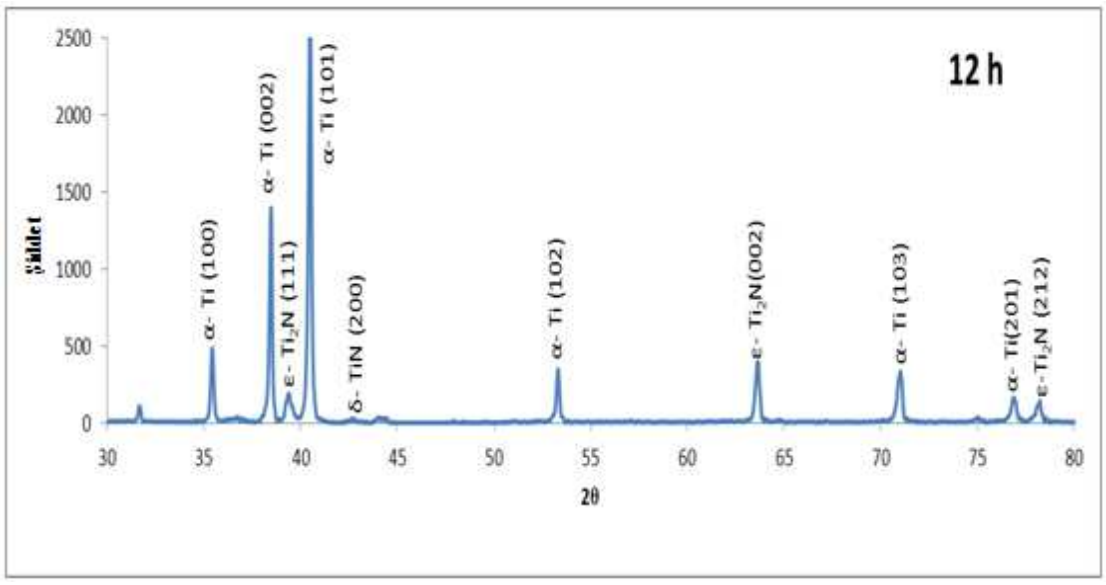
Şekil 4.2. 4 saat nitrürlenmiş numunenin XRD analizi

Şekil 4.2'de 4 saat plazma nitrürlenmiş Ti6Al4V alaşımının XRD analizi görülmektedir. Bu analize göre numunede ε- Ti_2N fazlarının oluşmaya başladığı gözlemlenmektedir. Yaklaşık olarak 39^o ve 76^o faz açılarında ε- Ti_2N fazının oluştuğu şekilden görülmektedir.



Şekil 4.3. 8 saat nitrürlenmiş numunenin XRD analizi

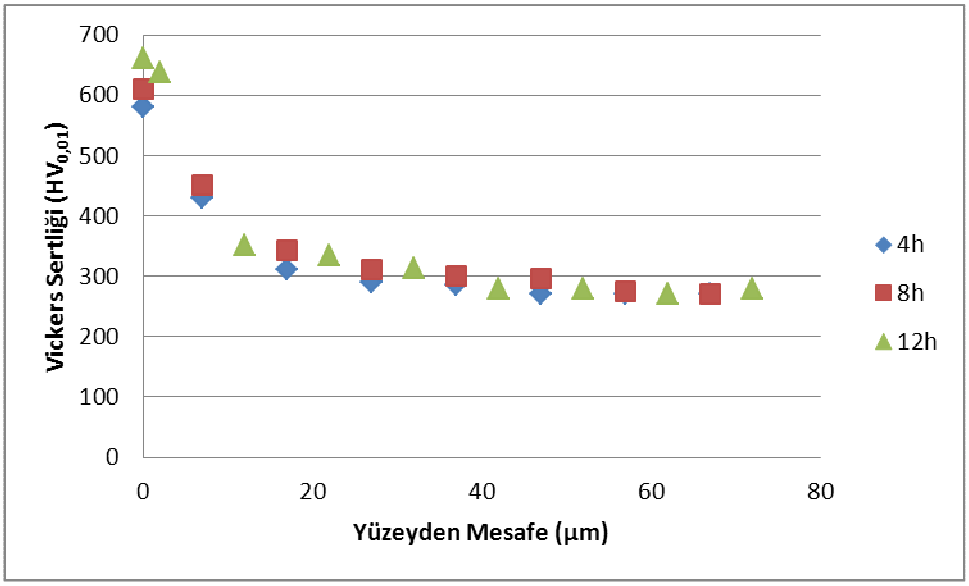
Şekil 4.3'de 8 saat plazma nitrürlenmiş alaşımın XRD analiz sonucu görülmektedir. Bu analize göre numunede ε- Ti_2N fazı oluşmuştur. 4 saatlik numuneye benzer açılarda elde edilen bu fazın, 8 saat boyunca plazma nitrürlenmiş alaşımda daha yoğun olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4. 12 saat nitrürlenmiş numunenin XRD analizi

Şekil 4.4'de 12 saat plazma nitrürlenmiş numunenin XRD analiz sonucu görülmektedir. Bu sonuca göre 4 saat ve 8 saat nitrürlenmiş numunelerde görülen ε-Ti_2N fazı 12 saat plazma nitrürlenmiş numunede daha yoğun bir şekilde görülmüştür. ε- Ti_2N fazının dışında 12 saat nitrürlenmiş numunede δ- TiN tipinde yeni bir fazın ortaya çıktığı şekilde görülmektedir. Bu faz ε- Ti_2N fazının üzerinde, numune yüzeyine en yakın bölgede oluşur.

4.2. Vickers Sertlik Ölçümü Sonuçları



Şekil 4.5. Nitrürlenmiş numunelerin enine kesitindeki sertlik dağılımları

Şekil 4.5'de 4, 8 ve 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin yüzey sertlikleri ve yüzeyden içeriye doğru belli mesafeler boyunca ölçüm yapılmış sertlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.5 incelendiğinde nitrürleme süresi arttıkça numunenin yüzey sertliğinin arttığı görülmektedir. Yine aynı şekilden 350 $HV_{0.01}$ değeri baz alındığında bu sertlik değerine 12 saat nitrürlenmiş numunede 20 µm, 8 saat nitrürlenmiş numunede 15 µm ve 4 saat nitrürlenmiş numunede ise 12 µm'de ulaşıldığı görülmektedir. Tablo 4.1'de numunelerin yüzey sertlikleri görülmektedir. Tablo 4.2'de ise tabaka derinliğine göre sertlik değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenmiş numunelerin yüzey sertlikleri

	Nitrürlenmemiş	4 saat nitrürlenmiş	8 saat nitrürlenmiş	12 saat nitrürlenmiş
Yüzey Sertliği ($HV_{0,01}$)	270	580	610	660

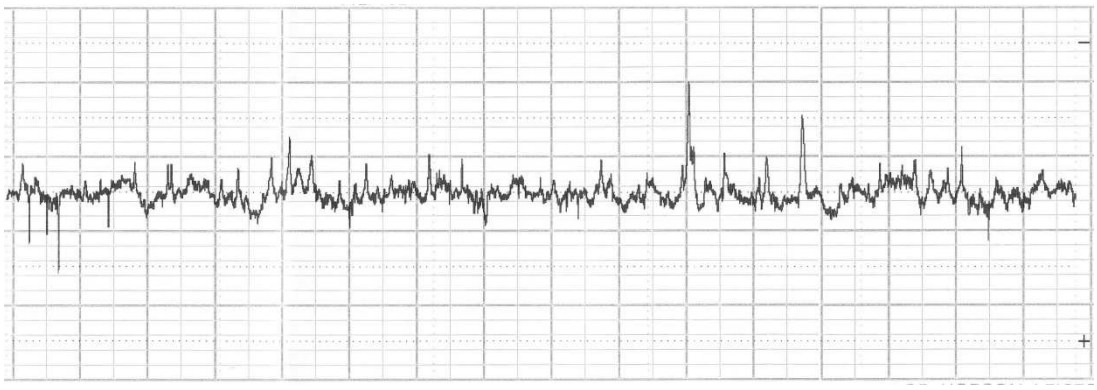
Tablo 4.2. Plazma nitrürlenmiş numunelerin tabaka derinliğine göre sertlik değerleri

Yüzeyden mesafe (µm)		4 saat nitrürlenmiş	8 saat nitrürlenmiş	12 saat nitrürlenmiş
0	Sertlik ($HV_{0,01}$)	580	610	660
2		-	-	638
7		430	450	-
12		-	-	351
17		310	342	-
22		-	-	334
27		290	310	-
32		-	-	314
37		285	300	-
42		-	-	280
47		270	296	-
52		-	-	280
57		270	275	-
62		-	-	271
67		270	270	-
72		-	-	280

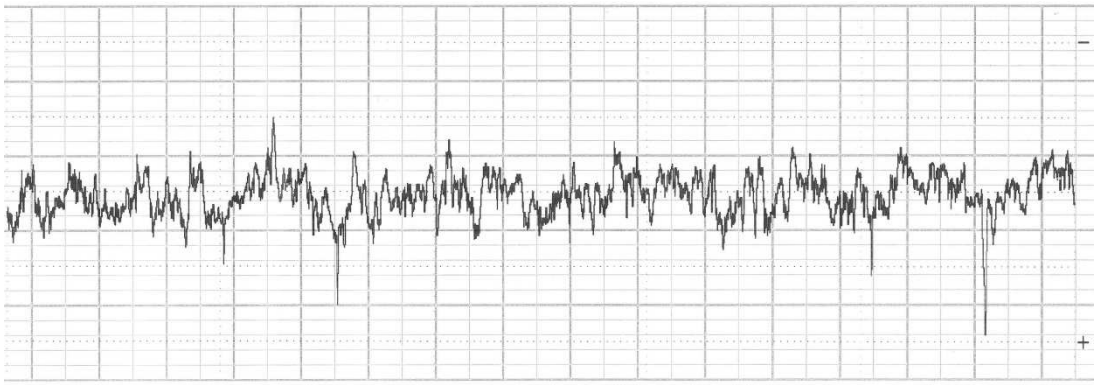
4.3. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

Tablo 4.3. Plazma nitrürlenmiş numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri

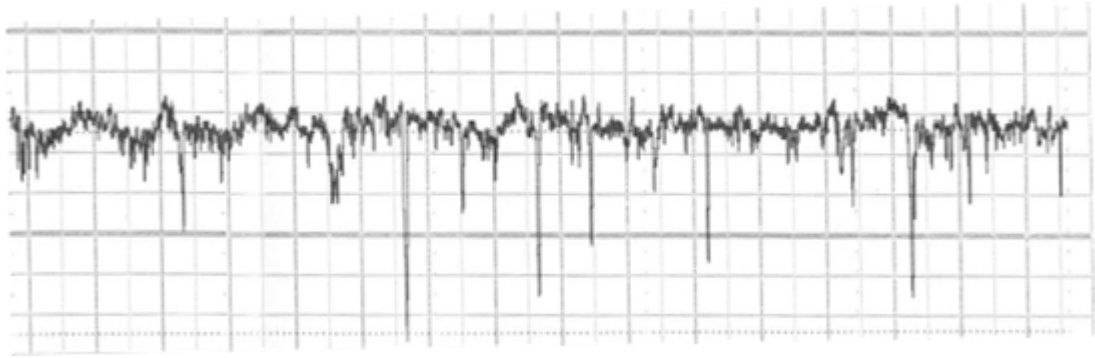
Numuneler	**Ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)**
4 saat nitrürlenmiş	0.060
8 saat nitrürlenmiş	0.112
12 saat nitrürlenmiş	0.160



Şekil 4.6. 4 saat plazma nitrürlenmiş numunenin yüzey pürüzlülüğü grafiği



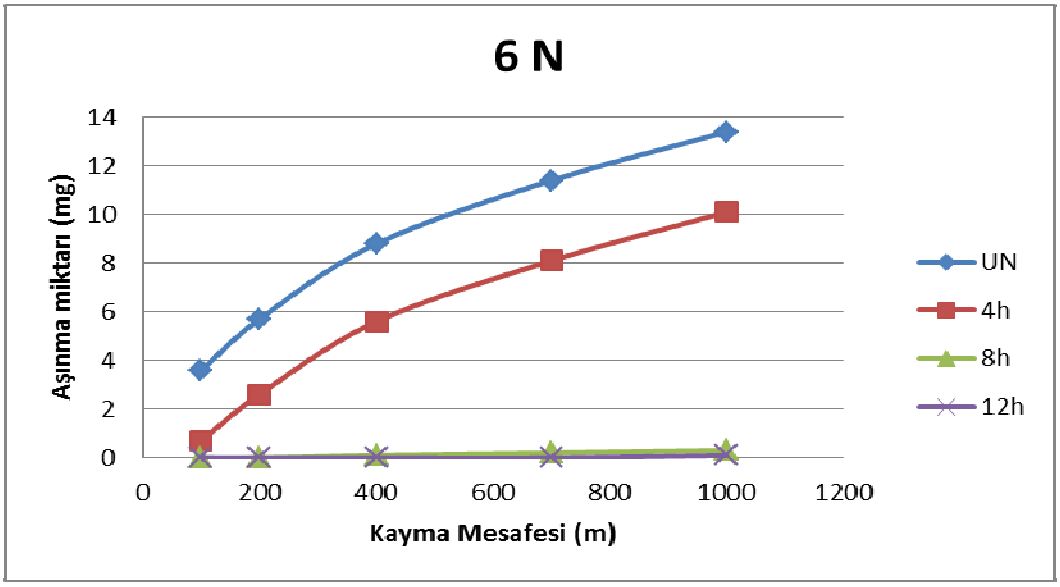
Şekil 4.7. 8 saat plazma nitrürlenmiş numunenin yüzey pürüzlülüğü grafiği



Şekil 4.8. 12 saat plazma nitrürlenmiş numunenin yüzey pürüzlülüğü grafiği

Tablo 4.3'e göre plazma nitrürleme süresi arttıkça numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır. (Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8) Bunun sebebi sürenin artmasıyla birlikte numunelerin daha fazla azot iyonu bombardımanına maruz kalmasıdır. Yüzeyi deforme eden azot iyonları pürüzlülük değerinin artmasına sebep olmuştur.

4.4. Aşınma Testleri

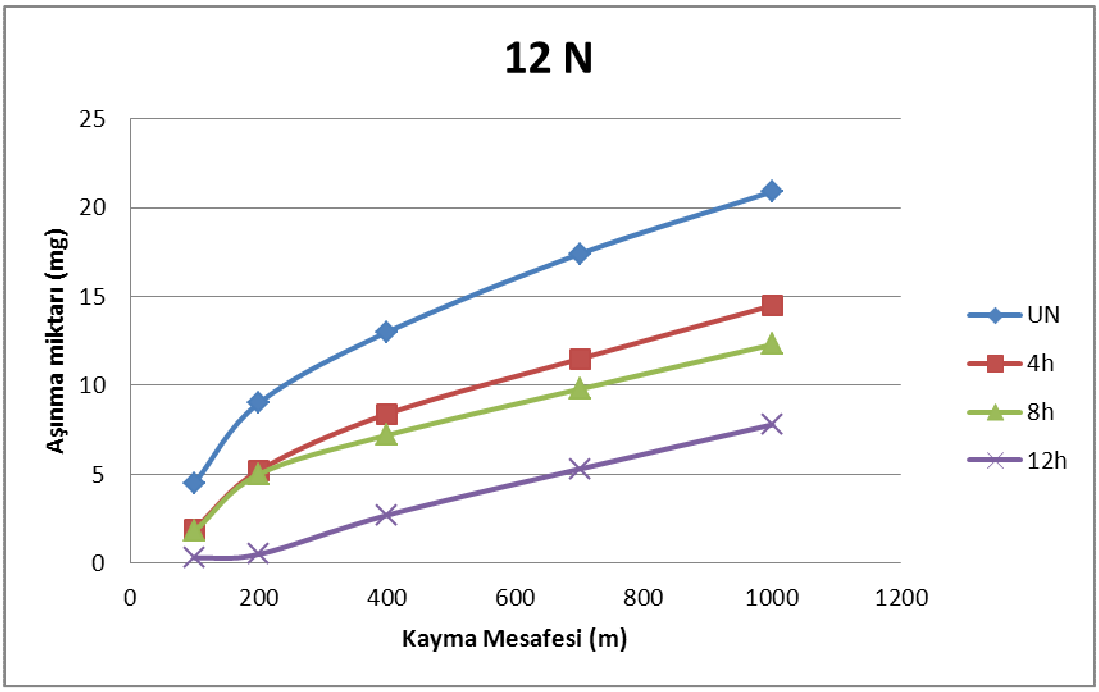


Şekil 4.9. Kayma mesafesine bağlı olarak 6 N yükte numunelerin aşınma miktarı

Şekil 4.9'da nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 6 N yük altında 100, 200, 400, 700 ve 1000 m kayma mesafelerindeki aşınma miktarları görülmektedir. En çok aşınmanın plazma nitrürlenmemiş numunede meydana geldiği Şekil 4.9'dan görülür. Kayma mesafesi arttıkça aşınmanın miktarı artmaktadır. Numuneyi 4 saat plazma nitrürlemek nitrürlenmemiş numuneye göre aşınma miktarında yaklaşık olarak % 30 oranında bir iyileştirme sağlamıştır. 8 saat ve 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerde aşınma miktarı çok çok az, neredeyse sıfıra yakındır. 12 saat nitrürlenmiş numunede 1000 m kayma mesafesi sonunda 0,1 mg'lık bir aşınma olmuştur. Bunun sebebi artan plazma nitrürleme süresinin sonucu olarak daha fazla miktarda ε- Ti_2N fazının oluşmasıdır. Ayrıca 8 saat ve 12 saat nitrürlemede aşınma miktarının az olmasının sebebi; oluşan sert bölgenin aşınması için 6 N'luk yükün yeterli olmamasıdır.

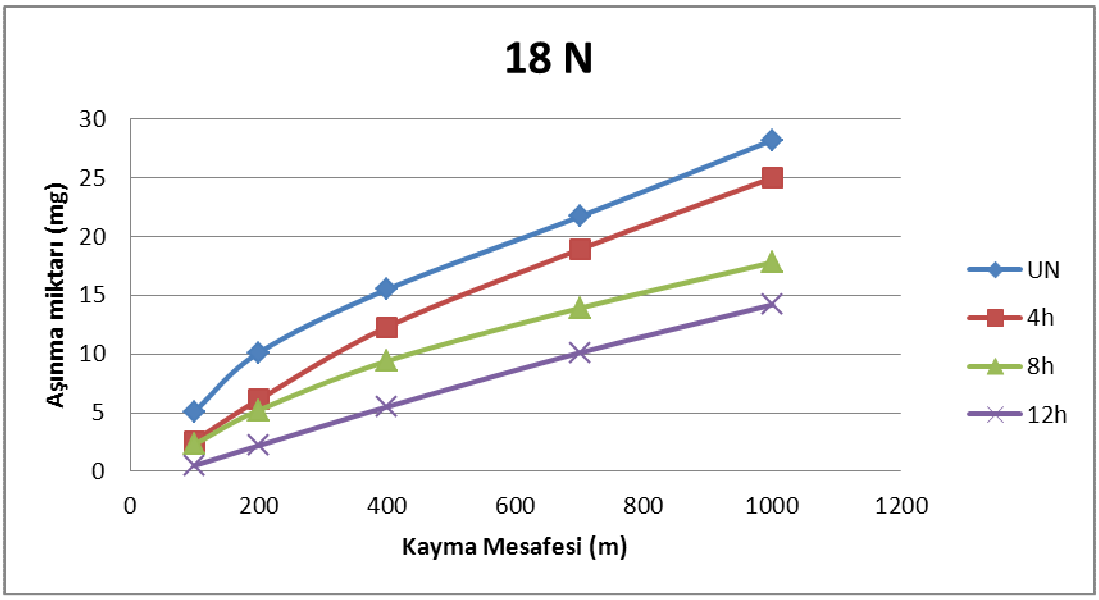
Şekil 4.10'da nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 12 N yük altında 100, 200, 400, 700 ve 1000 m kayma mesafelerindeki aşınma miktarları görülmektedir. Plazma nitrürleme süresinin artmasıyla birlikte aşınma miktarında meydana gelen azalma şekilde görülmektedir. 6 N yük altındaki aşınma miktarıyla kıyaslandığında aşınma miktarları daha fazladır. Çünkü yük artmıştır ve numuneyle aşındırıcı disk arasındaki basınç daha fazladır. Nitrürlenmemiş, 4 saat ve 8 saat

plazma nitrürlenmiş numunelerde aşınma miktarı 100 m ile 200 m arasında bir artış göstermiş ancak 200 m'den sonra azalan bir eğimle artış göstermeye devam ettiği şekilde görülmektedir. 12 saat nitrürlenmiş numunede 100 m ile 200 m arasında çok az miktarda (yaklaşık olarak 0,5 mg) aşınma meydana gelmiştir. 200 m kayma mesafesinden sonra aşınma miktarında artış olduğu şekilde görülmektedir. Bunun sebebi 12 saat plazma nitrürlenmiş numunede oluşan δ- TiN fazıdır. Bu faz çok sert olduğu için ilk 200 m boyunca az miktarda aşınma meydana gelmiştir. 200 m kayma mesafesinden itibaren aşınma miktarında artış olmuştur.



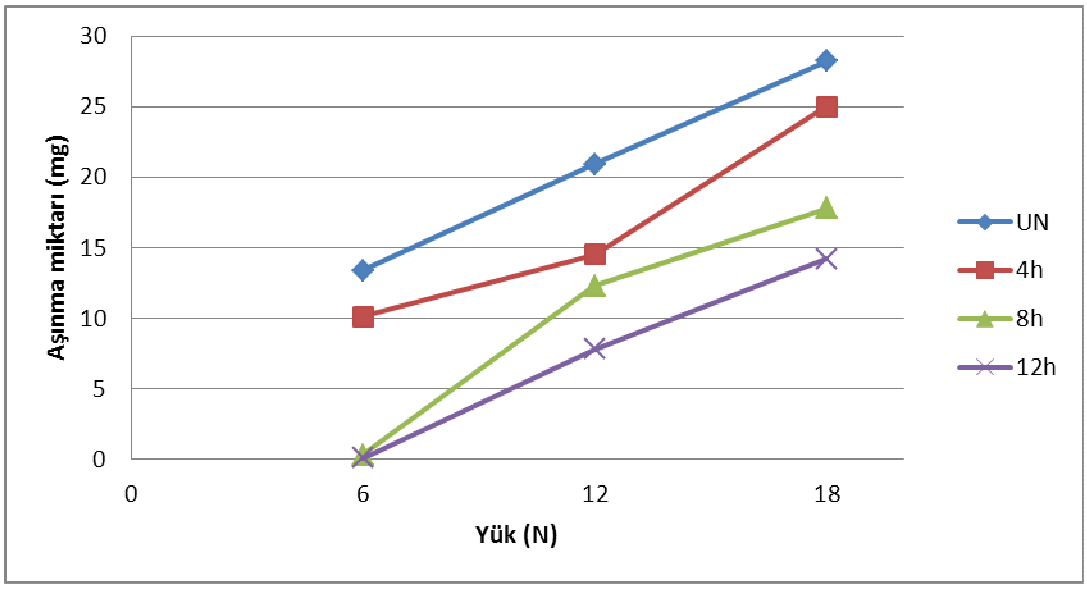
Şekil 4.10. Kayma mesafesine bağlı olarak 12 N yükte numunelerin aşınma miktarı

Şekil 4.11'de nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 18 N yük altında 100, 200, 400, 700 ve 1000 m kayma mesafelerindeki aşınma miktarları görülmektedir. 18 N yük aşınma testlerinde kullanılan en fazla yük miktarıdır. Bu sebeple bu şekilde görülen aşınma miktarları 6 N ve 12 N'a göre daha fazladır. Plazma nitrürleme süresinin artmasının Ti6Al4V alaşımının aşınma direncine olumlu katkı yaptığı Şekil 4.11'den de görülmektedir. Kayma mesafesinde artış oldukça aşınma miktarı da artmaktadır. 12 saat nitrürlenmiş numunede, 18 N yük altında ilk kayma mesafelerindeki aşınma miktarı 12 N yük altındaki aşınmaya göre fazladır. Bunun sebebi artan yükle birlikte numunedeki aşınma miktarının artmasıdır.



Şekil 4.11. Kayma mesafesine bağlı olarak 18 N yükte numunelerin aşınma miktarı

Şekil 4.12'de nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerde yükün değişimiyle birlikte meydana gelen toplam aşınma miktarları görülmektedir. Şekil 4.12'ye göre aşınma testlerinde uygulanan yük arttıkça aşınma miktarı artmaktadır. Tablo 4.4'te nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenmiş numunelerin aşınma miktarları mg cinsinden görülmektedir.



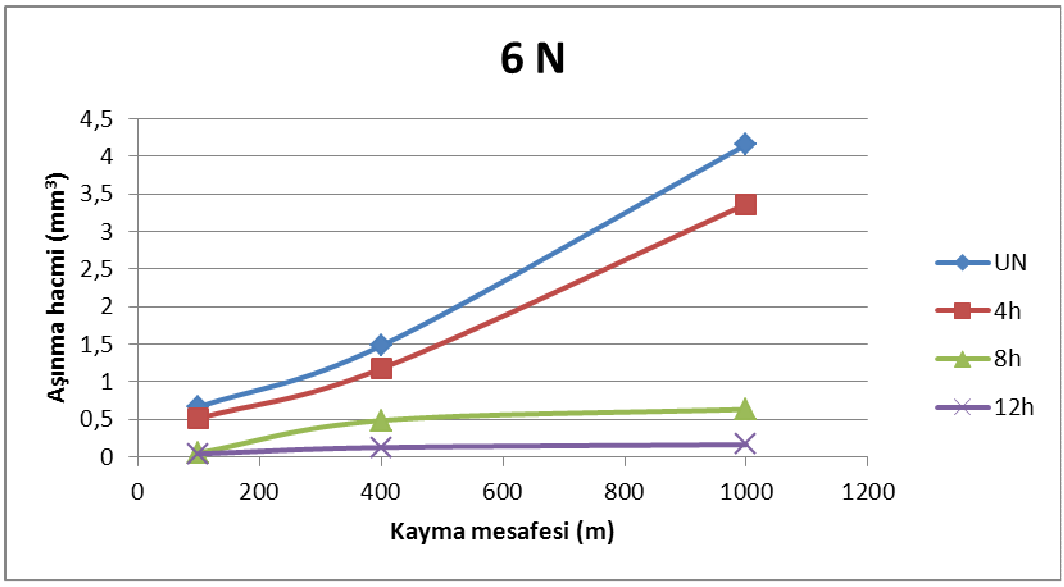
Şekil 4.12. Numunelerin aşınma miktarına 1000 m kayma mesafesinde yükün etkisi

Tablo 4.4. Nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenmiş numunelerin aşınma değerleri

		18 N		
Kayma mesafesi (m)	Nitrürlenmemiş	4 saat nitrürlenmiş	8 saat nitrürlenmiş	12 saat nitrürlenmiş
100	5,1	2,6	2,3	0,5
200	10,1	6,1	5,2	2,2
400	15,5	12,3	9,4	5,5
700	21,7	18,9	13,9	10,1
1000	28,2	25	17,8	14,2

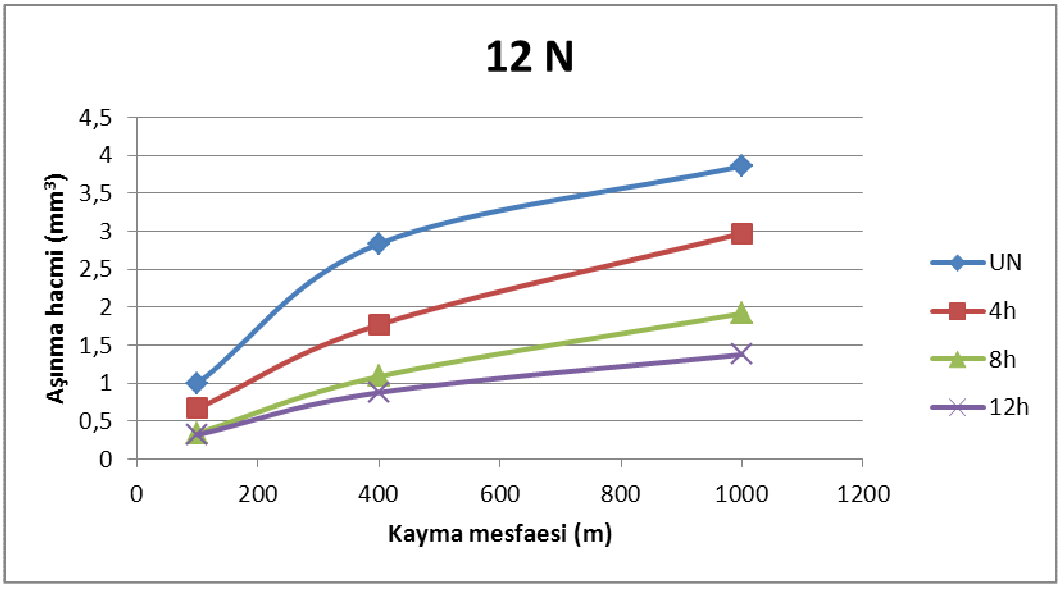
		12 N		
Kayma mesafesi (m)	Nitrürlenmemiş	4 saat nitrürlenmiş	8 saat nitrürlenmiş	12 saat nitrürlenmiş
100	4,5	1,9	1,8	0,3
200	9	5,2	5	0,5
400	13	8,4	7,2	2,7
700	17,4	11,5	9,8	5,3
1000	20,9	14,5	12,3	7,8

		6 N		
Kayma mesafesi (m)	Nitrürlenmemiş	4 saat nitrürlenmiş	8 saat nitrürlenmiş	12 saat nitrürlenmiş
100	3,6	0,7	0	0
200	5,7	2,6	0	0
400	8,8	5,6	0,1	0
700	11,4	8,1	0,2	0
1000	13,4	10,1	0,3	0,1



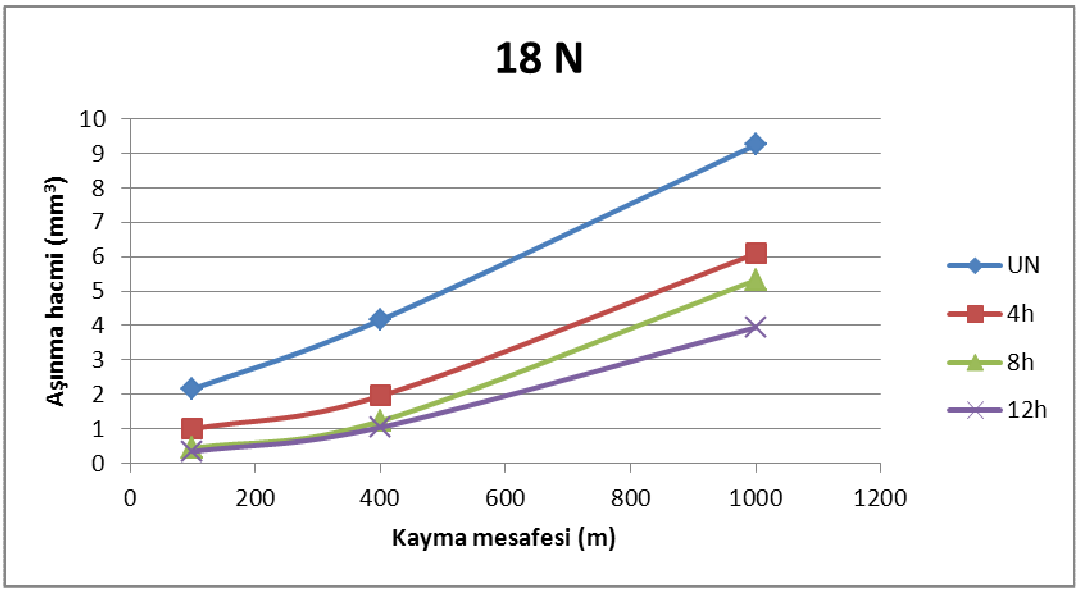
Şekil 4.13. Kayma mesafesine bağlı olarak 6 N yükte numunelerin aşınma hacmi

Şekil 4.13'te nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 6 N yük altında 100, 400 ve 1000 m kayma mesafelerindeki aşınma hacimleri görülmektedir.



Şekil 4.14. Kayma mesafesine bağlı olarak 12 N yükte numunelerin aşınma hacmi

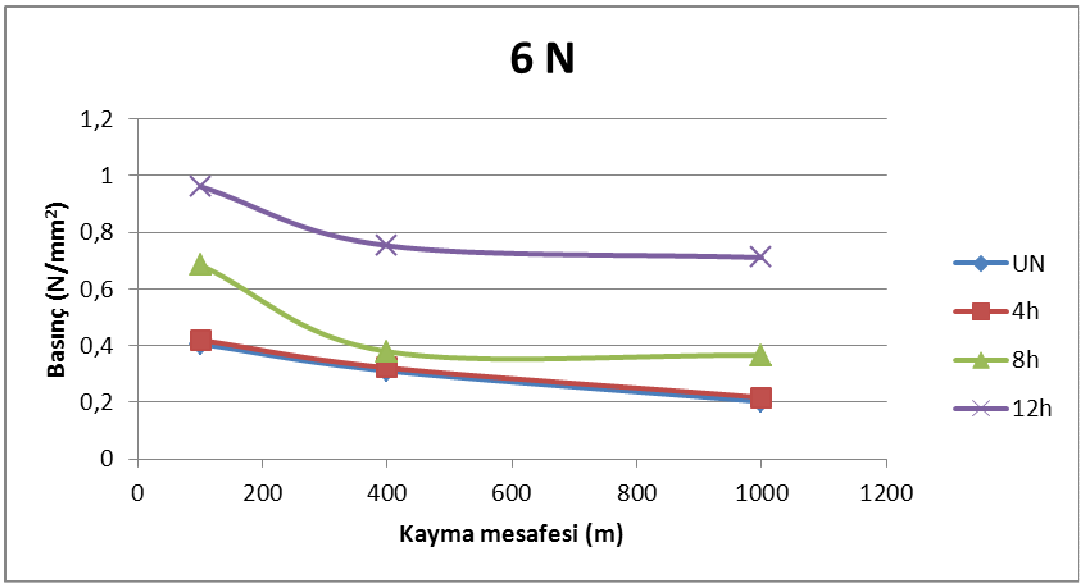
Şekil 4.14'te nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 12 N yük altında 100, 400 ve 1000 m kayma mesafelerindeki aşınma hacimleri görülmektedir.



Şekil 4.15. Kayma mesafesine bağlı olarak 18 N yükte numunelerin aşınma hacmi

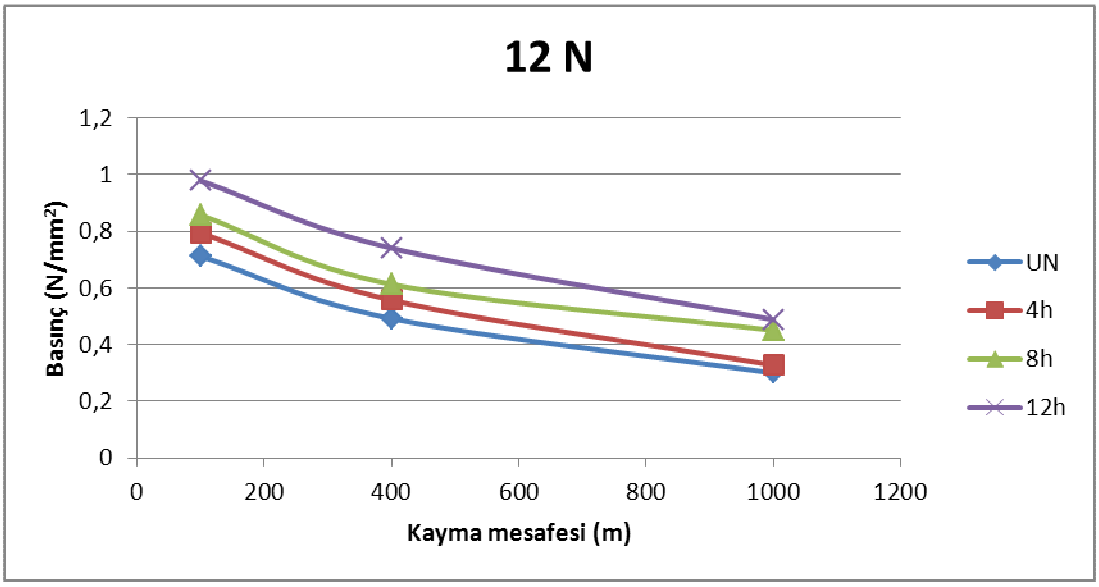
Şekil 4.15'te nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 18 N yük altında 100, 400 ve 1000 m kayma mesafelerindeki aşınma hacimleri görülmektedir.

Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15'ten görüleceği üzere aşınma hacmi kayma mesafesinin artmasıyla artmıştır. Ancak plazma nitrürleme süresinin artması numunelerin aşınma hacmini azaltmıştır. Nitrürlenmemiş numunenin 6 N yük ve 1000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma hacmi 4 saat nitrürleme ile % 19, 8 saat nitrürleme ile % 85, 12 saat nitrürleme ile % 96 oranında azaldığı görülmüştür (Şekil 4.13). Nitrürlenmemiş numunenin 12 N yük ve 1000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma hacmi 4 saat nitrürleme ile % 23, 8 saat nitrürleme ile % 50, 12 saat nitrürleme ile % 64 oranında azaldığı görülmüştür (Şekil 4.14). Nitrürlenmemiş numunenin 18 N yük ve 1000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma hacmi 4 saat nitrürleme ile % 34, 8 saat nitrürleme ile % 42, 12 saat nitrürleme ile % 57 oranında azaldığı görülmüştür (Şekil 4.15). Bu verilerden hareketle, nitrürleme süresi sabit olmak üzere nitrürlenmemiş numunenin aşınma hacmindeki yüzde azalma oranı yük arttıkça azalmaktadır. Bu durum muhtemelen yükün artmasıyla nitrürlenmiş numunedeki sert tabakanın aşınma direncinin azalmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.16. Kayma mesafesine bağlı olarak 6 N yükte numunelere etki eden basınç

Şekil 4.16'da nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 6 N yük altında 100, 400 ve 1000 m kayma mesafelerindeki basınç değerleri görülmektedir. Nitrürlenmemiş numune 1000 m kayma mesafesi boyunca ortalama 0,306 N/mm^2 basınca maruz kalmıştır. Bu değerler 4, 8 ve 12 saat plazma nitrürlenmiş numuneler için sırasıyla ortalama 0,320 N/mm^2, 0,477 N/mm^2 ve 0,809 N/mm^2'dir.

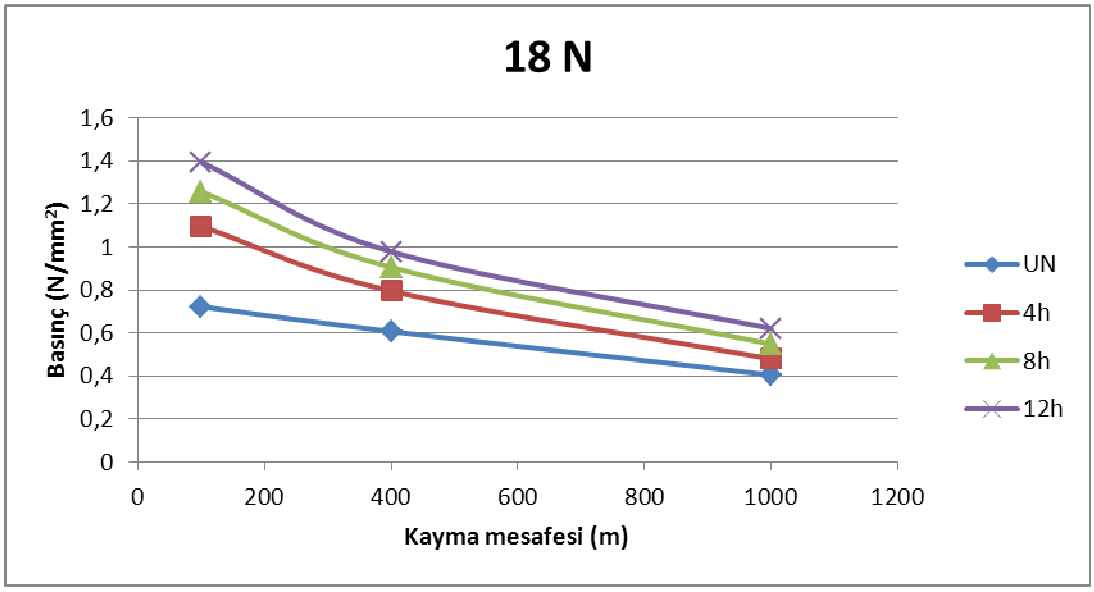


Şekil 4.17. Kayma mesafesine bağlı olarak 12 N yükte numunelere etki eden basınç

Şekil 4.17'de nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 12 N yük altında 100, 400 ve 1000 m kayma mesafelerindeki basınç değerleri

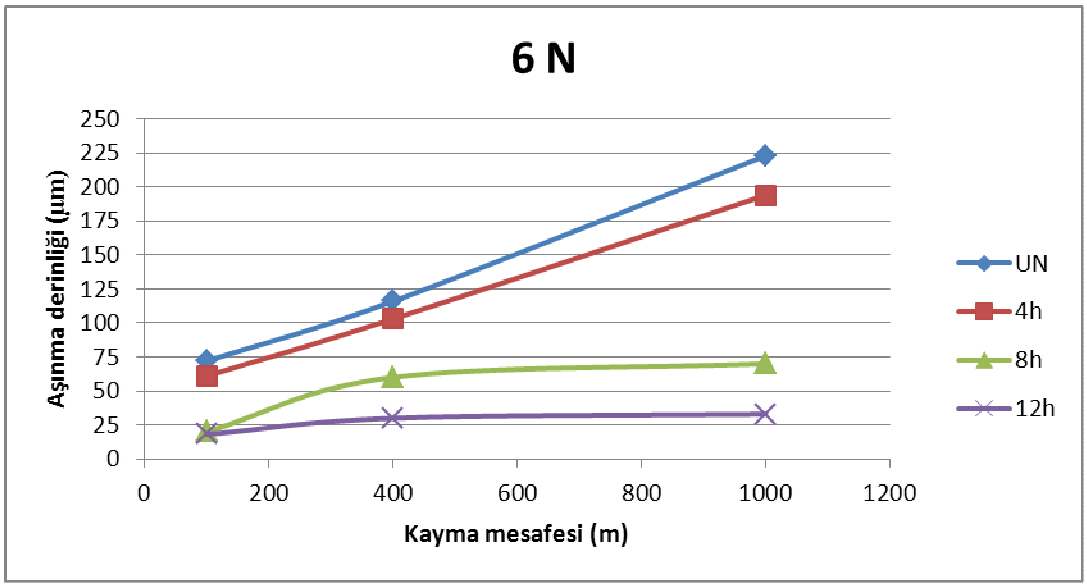
görülmektedir. Nitrürlenmemiş numune 1000 m kayma mesafesi boyunca ortalama 0,501 N/mm^2 basınca maruz kalmıştır. Bu değerler 4, 8 ve 12 saat plazma nitrürlenmiş numuneler için sırasıyla ortalama 0,560 N/mm^2, 0,640 N/mm^2 ve 0,736 N/mm^2'dir.

Şekil 4.18'de nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 18 N yük altında 100, 400 ve 1000 m kayma mesafelerindeki basınç değerleri görülmektedir. Nitrürlenmemiş numune 1000 m kayma mesafesi boyunca ortalama 0,578 N/mm^2 basınca maruz kalmıştır. Bu değerler 4, 8 ve 12 saat plazma nitrürlenmiş numuneler için sırasıyla ortalama 0,790 N/mm^2, 0,903 N/mm^2 ve 0,998 N/mm^2'dir.



Şekil 4.18. Kayma mesafesine bağlı olarak 18 N yükte numunelere etki eden basınç

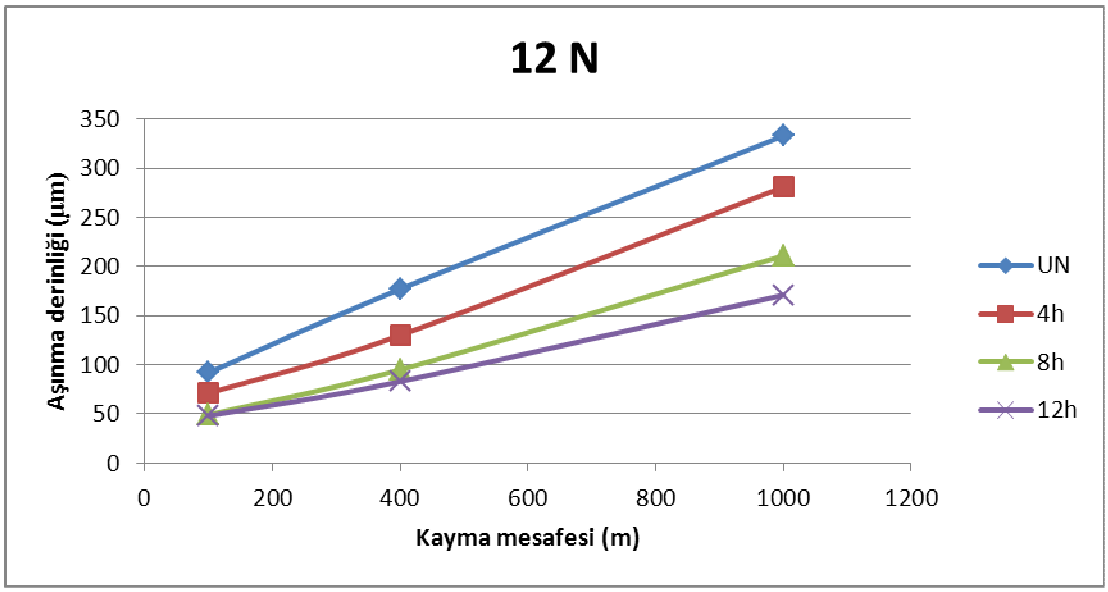
Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18'den görüleceği üzere kayma mesafesinin artmasıyla birlikte numunelere etki eden basınç azalmıştır. Basıncın azalmasının nedeni; artan kayma mesafesiyle birlikte aşınma izinin alanının artmasıdır. Deney sırasında numunelere etki eden ortalama basıncın sıralaması; 12h>8h>4h>UN şeklindedir. Dolayısıyla nitrürleme süresinin artmasıyla aşınma direnci kazanıldığından deney esnasında numune üzerinde daha küçük iz alanı oluşmakta böylelikle numuneye etki eden basınç değeri daha fazla olmaktadır.



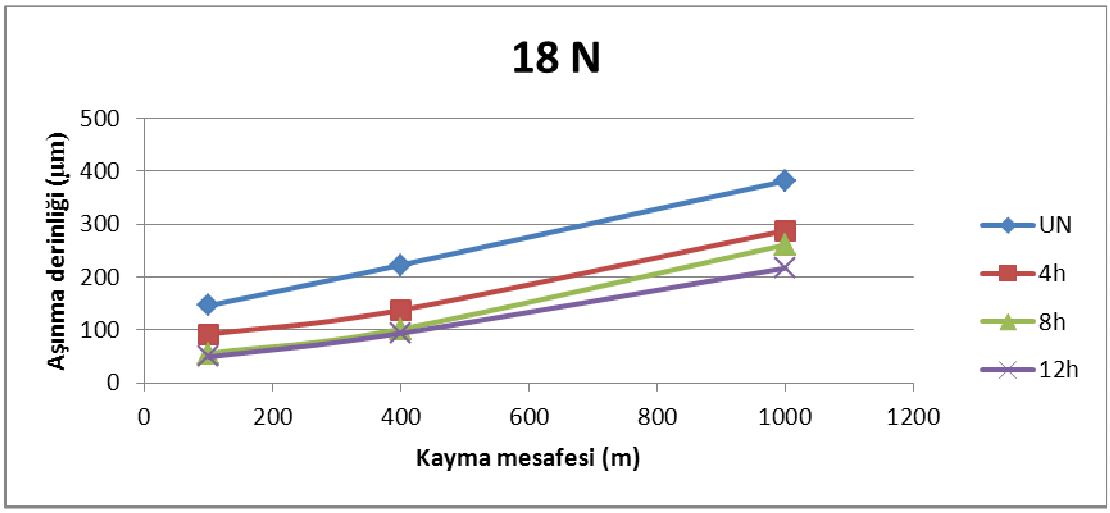
Şekil 4.19. Kayma mesafesine bağlı olarak 6 N yükte numunelerin aşınma derinliği

Şekil 4.19'da nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 6 N yük altında 100, 400 ve 1000 m kayma mesafelerindeki aşınma derinlikleri görülmektedir. 100 m kayma mesafesinde 4 saat nitrürlenmiş numunede 61 µm, 8 saat nitrürlenmiş numunede 20 µm ve 12 saat plazma nitrürlenmiş numunede ise 18 µm aşınma derinliğine ulaşılmıştır. Daha önce belirtildiği üzere 4 saat nitrürlenmiş numunede oluşan 12 µm, 8 saat nitrürlenmiş numunede oluşan 15 µm ve 12 saat nitrürlenmiş numunede oluşan 20 µm'lik sertlik derinliği göz önüne alındığında; 100 m kayma mesafesinde 12 saat nitrürlenmiş numunede aşınmanın sert tabakada gerçekleştiği buna karşın, 4 ve 8 saat nitrürlenmiş numunede ise sert tabakanın aşınarak geçildiği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Şekil 4.20'de nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 12 N yük altında 100, 400 ve 1000 m kayma mesafelerindeki aşınma derinlikleri görülmektedir. 12, 8 ve 4 saat nitrürlenmiş numunelerde meydana gelen aşınma derinliğinin sırasıyla 48, 49 ve 71 µm olduğu dikkate alındığında nitrürlenmiş bütün numunelerde, ilk 100 m kayma mesafesinde sert tabakanın geçildiği ve matris malzemesinin aşındığı sonucu ortaya çıkmaktadır.



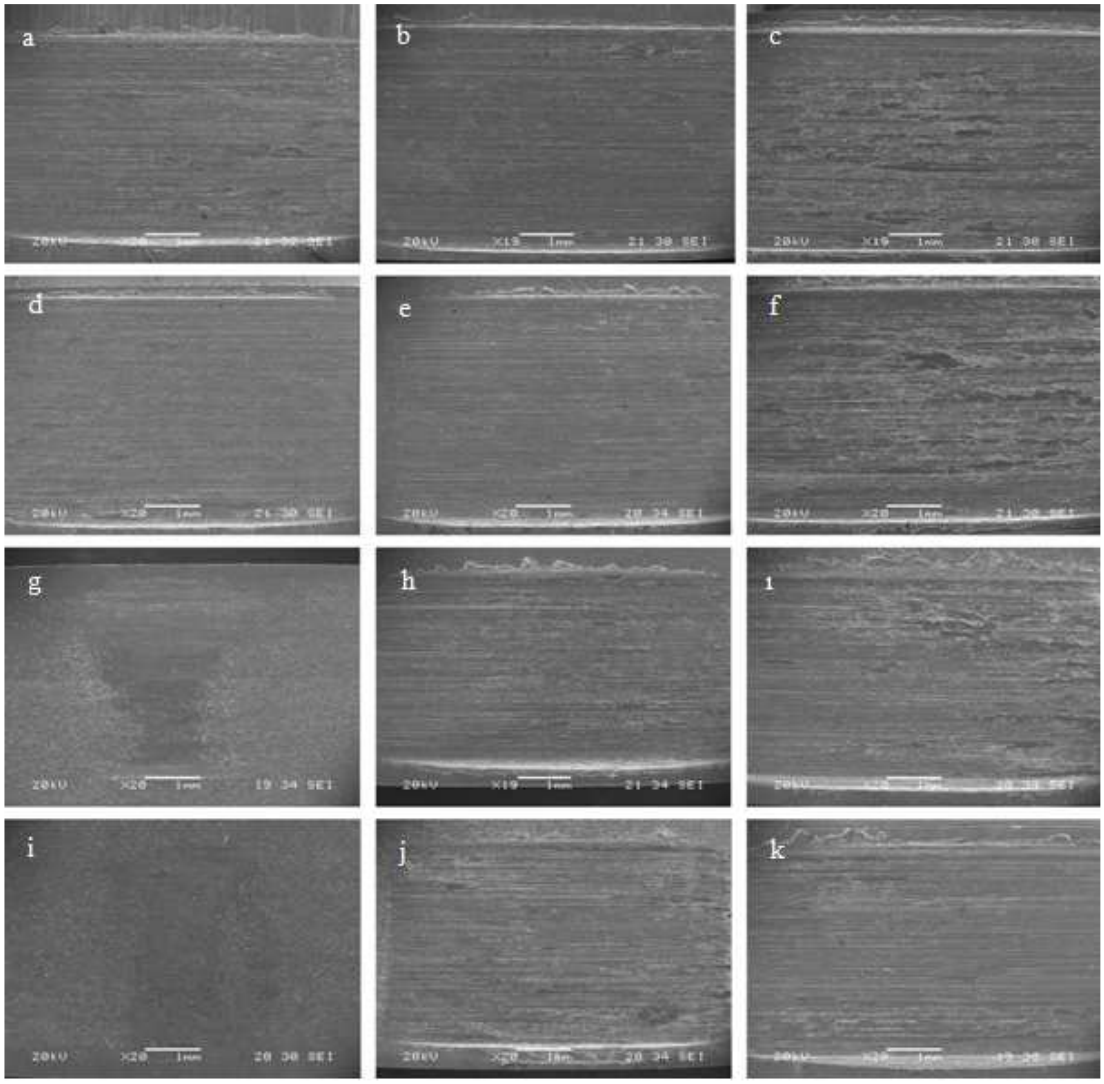
Şekil 4.20. Kayma mesafesine bağlı olarak 12 N yükte numunelerin aşınma derinliği



Şekil 4.21. Kayma mesafesine bağlı olarak 18 N yükte numunelerin aşınma derinliği

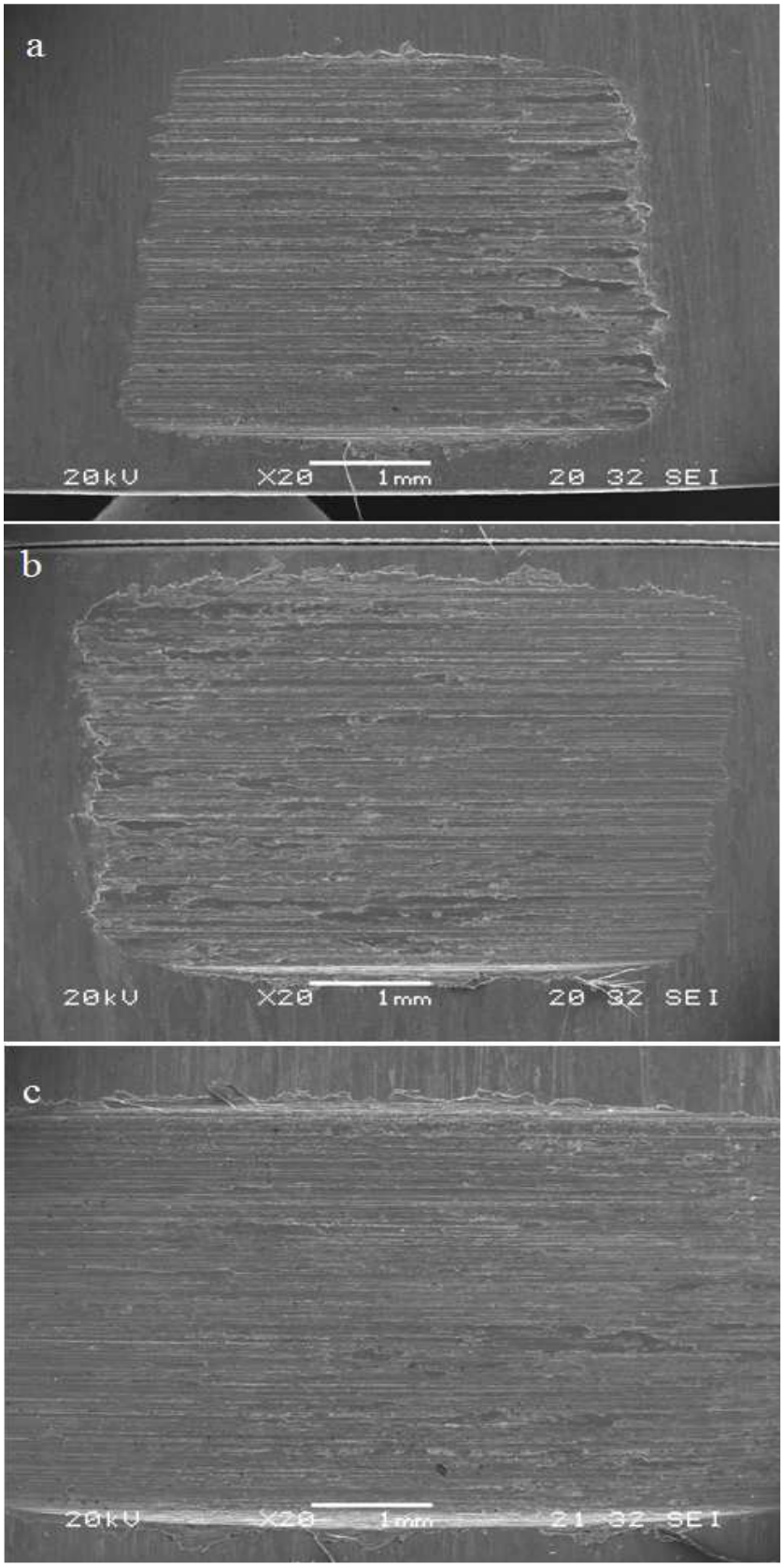
Şekil 4.21'de nitrürlenmemiş ve 4, 8, 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 18 N yük altında 100, 400 ve 1000 m kayma mesafelerindeki aşınma derinlikleri görülmektedir. 12, 8 ve 4 saat nitrürlenmiş numunelerde meydana gelen aşınma derinliğinin sırasıyla 49, 56 ve 92 µm olduğu dikkate alındığında nitrürlenmiş bütün numunelerde, ilk 100 m kayma mesafesinde sert tabakanın geçildiği ve matris malzemesinin aşındığı sonucu ortaya çıkmaktadır.

4.5. SEM ve EDX Analizleri

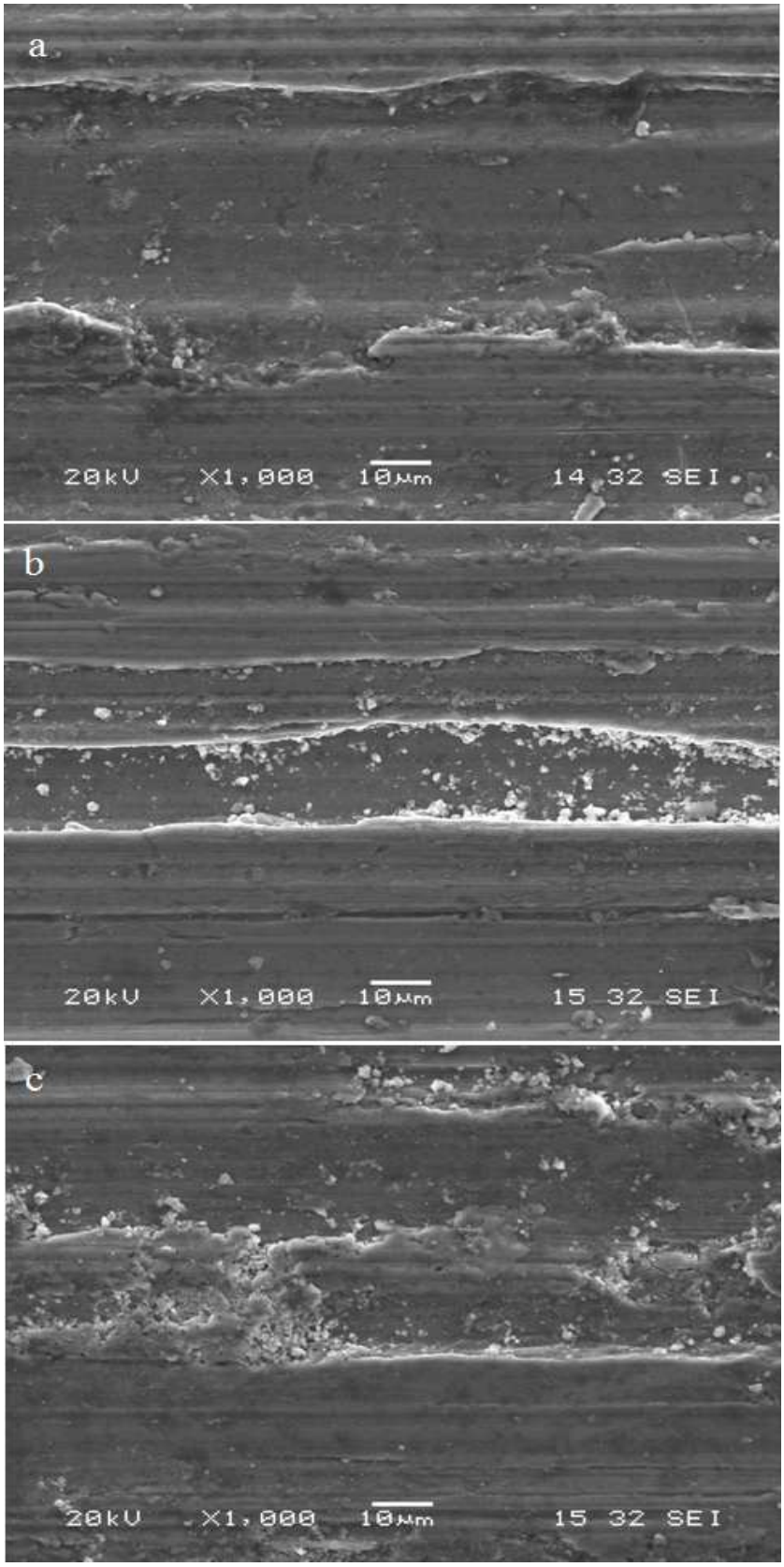


Şekil 4.22. 1000 m kayma mesafesinde a) 6 N yük altında nitrürlenmemiş b) 12 N yük altında nitrürlenmemiş c) 18 N yük altında nitrürlenmemiş d) 6 N yük altında 4 saat nitrürlenmiş e) 12 N yük altında 4 saat nitrürlenmiş f) 18 N yük altında 4 saat nitrürlenmiş g) 6 N yük altında 8 saat nitrürlenmiş h) 12 N yük altında 8 saat nitrürlenmiş ı) 18 N yük altında 8 saat nitrürlenmiş i) 6 N yük altında 12 saat nitrürlenmiş j) 12 N yük altında 12 saat nitrürlenmiş j) 18 N yük altında 12 saat nitrürlenmiş numunelerin SEM fotoğrafları

Şekil 4.22'de 100 m kayma mesafesinde nitrürlenmemiş ve plazma nitrürlenmiş numunelerin 20 kat büyütmedeki SEM fotoğrafları görülmektedir. Şekil 4.22'ye göre aşınma testinde uygulanan yük arttıkça numumenin daha fazla aşınmaya maruz kaldığı görülmektedir. Fotoğraflardan, 6 N'dan 18 N'a doğru gidildikçe aşınma sebebiyle meydana gelen oluklar görülmektedir. Plazma nitrürleme süresi arttıkça numunelerde meydana gelen aşınma izinin küçüldüğü anlaşılmaktadır.



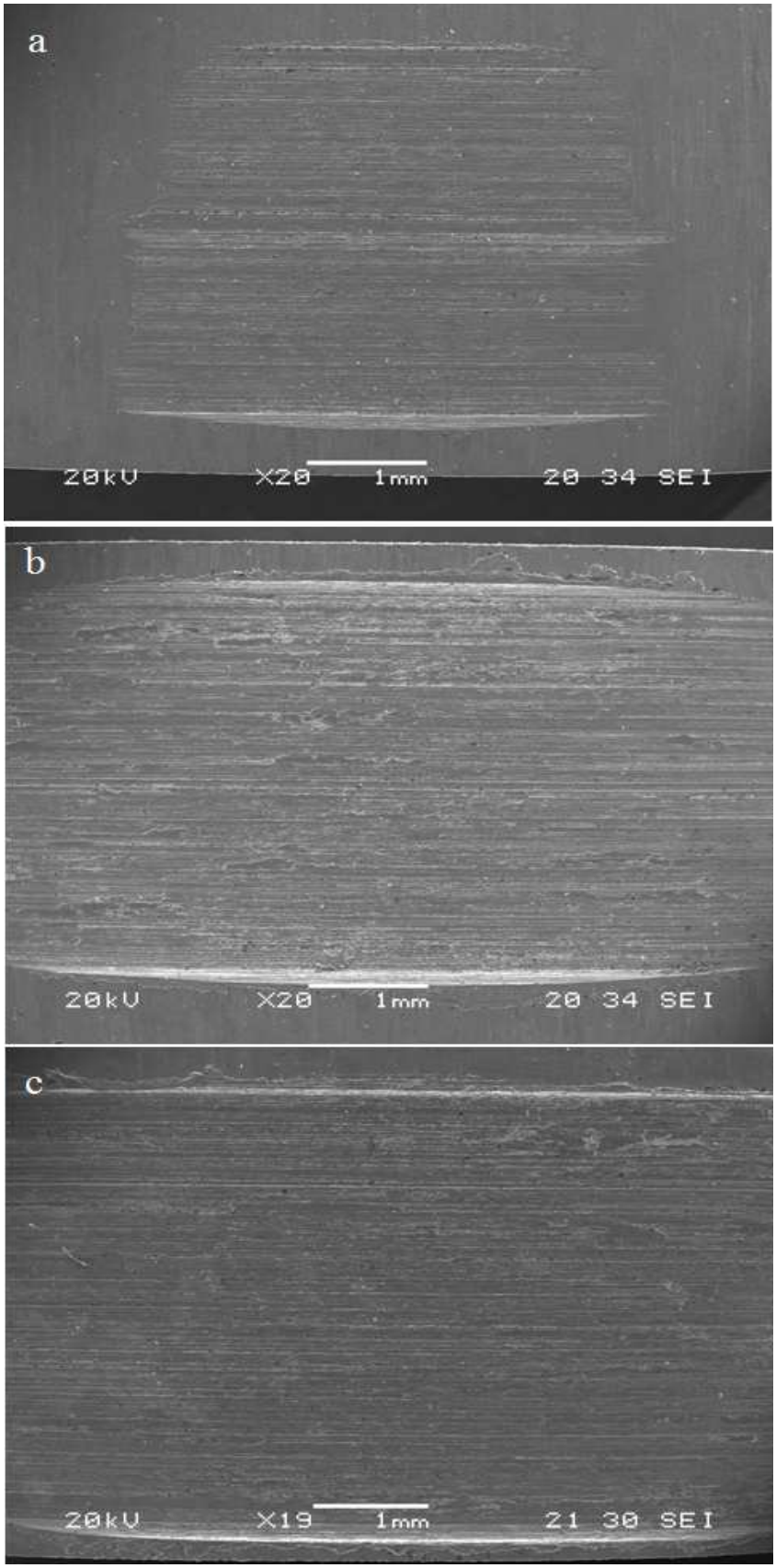
Şekil 4.23. Nitrürlenmemiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X)



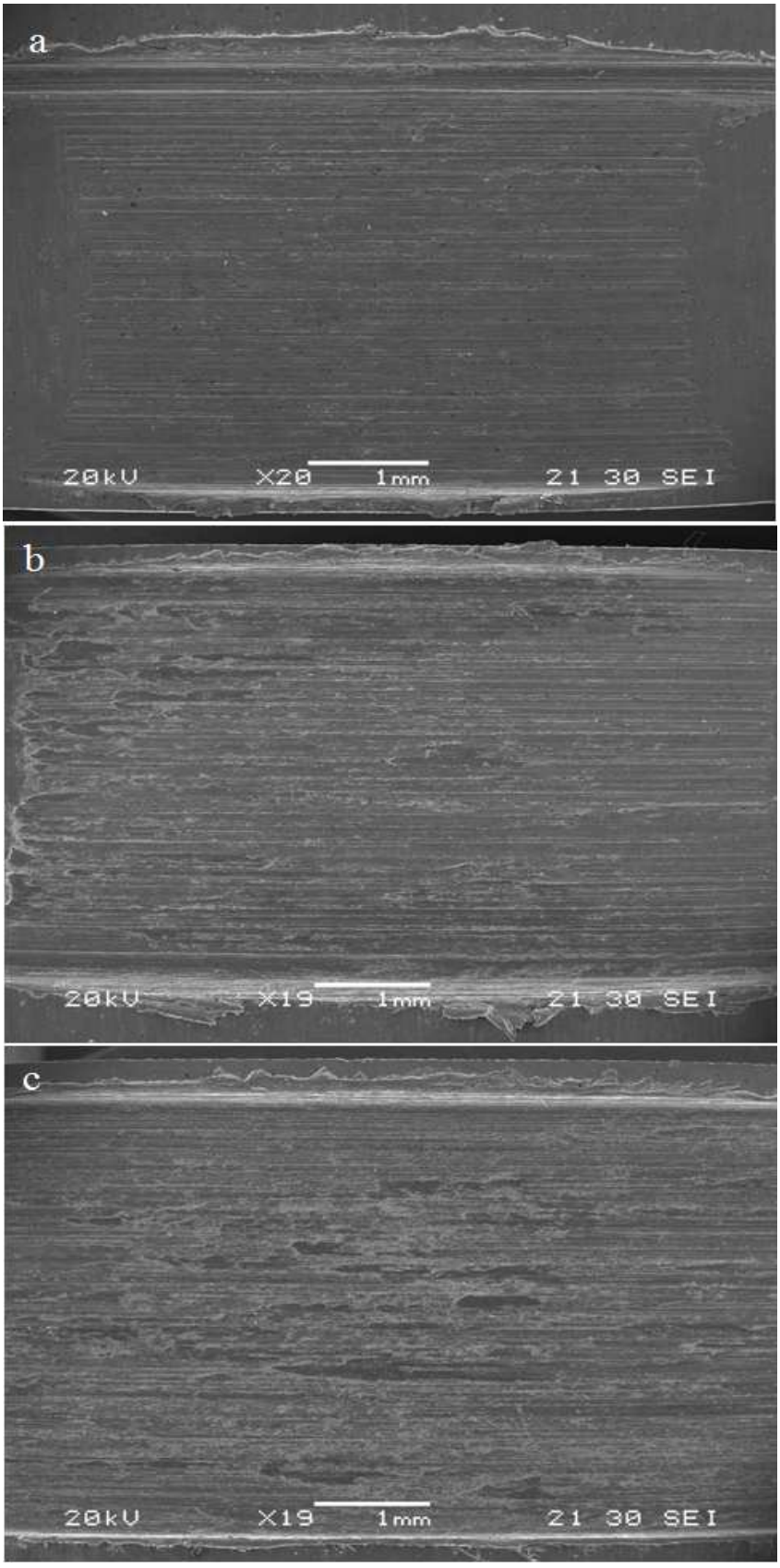
Şekil 4.24. Nitrürlenmemiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X)

Şekil 4.23 ve 4.24'te nitrürlenmemiş numunelerin 6 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. 100 m kayma mesafesi sonunda numune yüzeyinde mikrosürme denilen çiziklerin ve mikroçatlakların oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.24 a). 400 m ve 1000 m kayma mesafelerinde çiziklerin arttığı ve numune yüzeyinde olukların meydana geldiği görülmektedir (4.24 b). Aşınma sırasında özellikle 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında aşınma döküntülerinin bir kısmının numune yüzeyine yapıştığı görülmektedir (Şekil 4.24 b ve 4.24 c). 6 N yük altında 1000 m kayma mesafesi sonunda nitrürlenmemiş numunenin aşınma hacminin 4,158 mm^3, buna karşın aşınan malzeme hacminin ise 2,95 mm^3 olduğu dikkate alındığında aşınma sırasında malzemenin plastik deformasyona da maruz kaldığı sonucuna varılabilir.

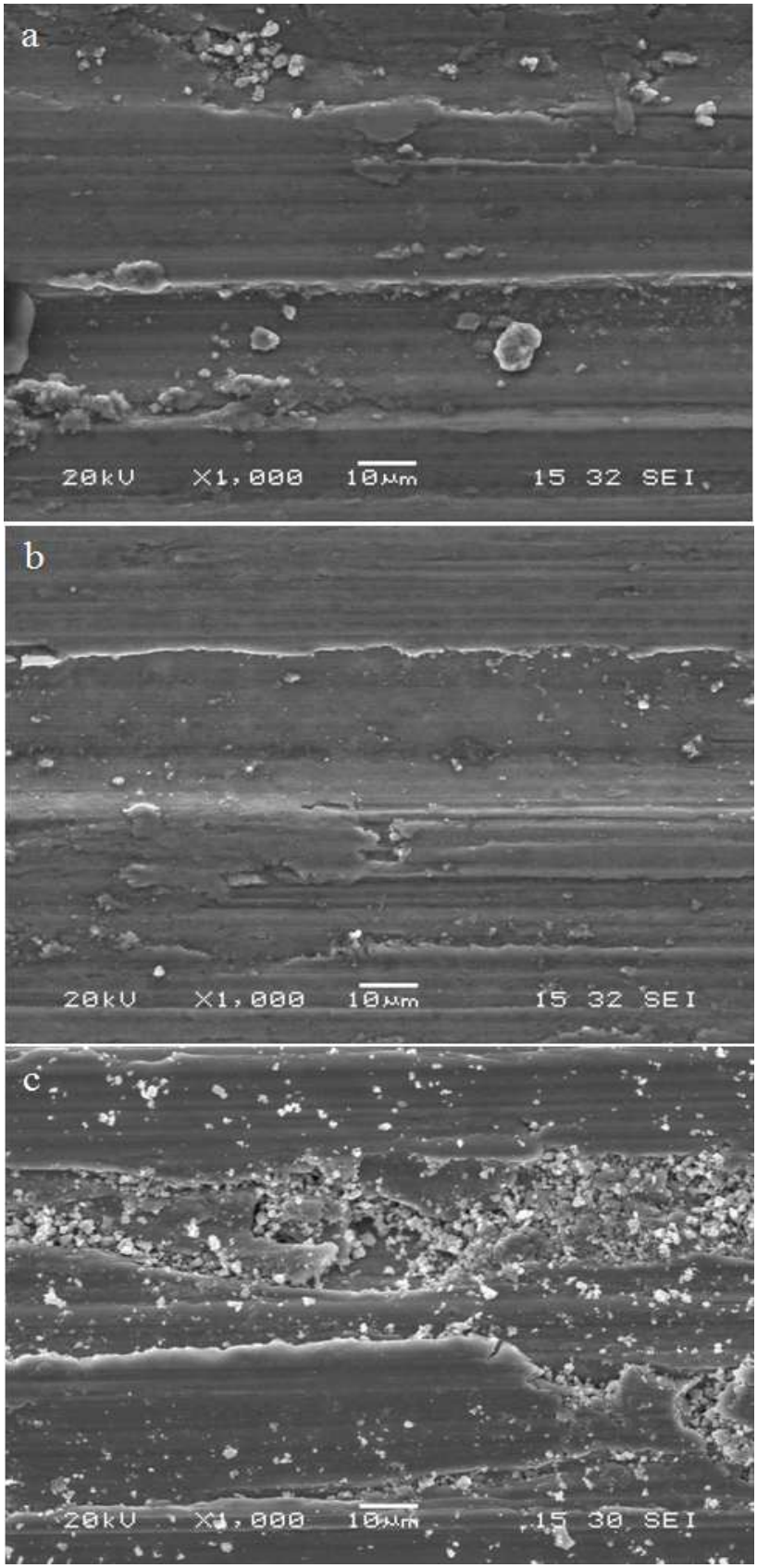
Şekil 4.25'te nitrürlenmemiş numunelerin 12 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. İlk metrelerde yüzeyde oluşan çizikler görülmektedir (Şekil 4.25 a). Özellikle kayma mesafesi 400 m ve 1000 m'ye ulaştığında 100 m'de meydana gelen çizikler daha da büyüyerek malzeme yüzeyinde oluklar oluşturmuştur (Şekil 4.25 b ve 4.25 c).



Şekil 4.25. Nitrürlenmemiş numunenin 12 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X)

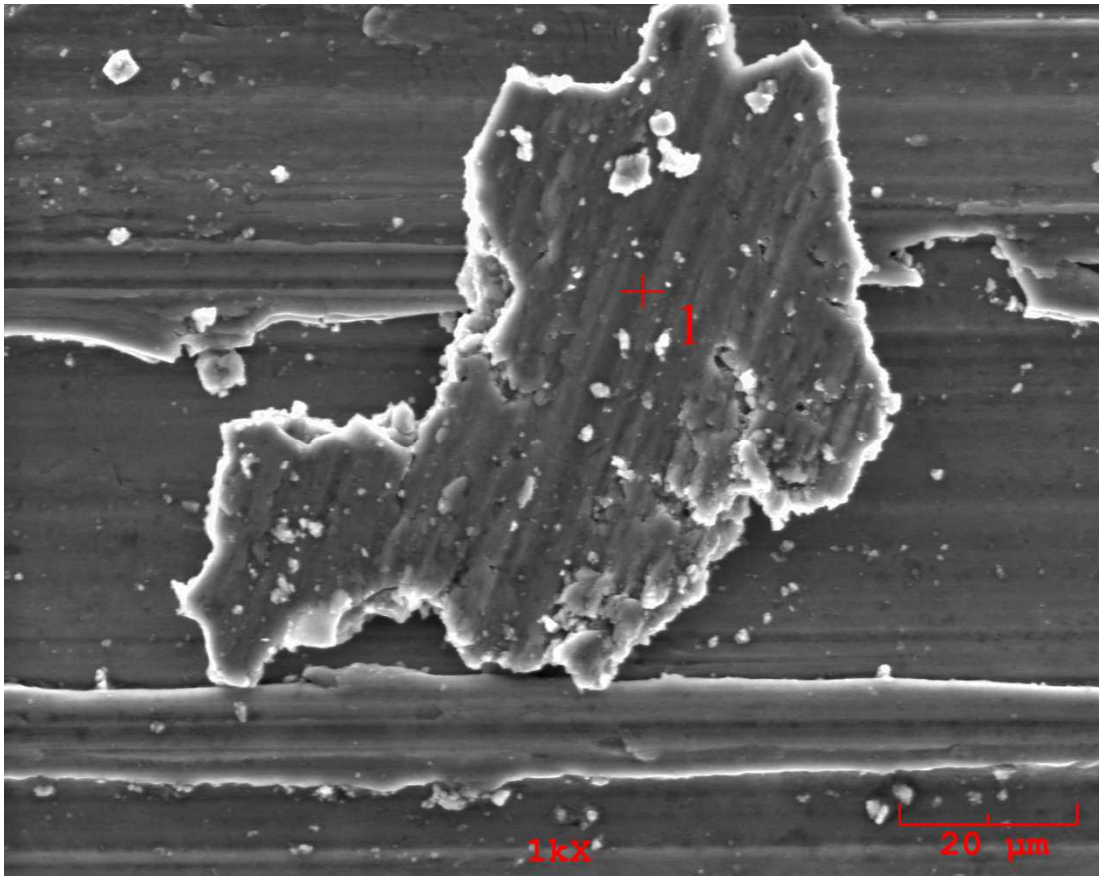


Şekil 4.26. Nitrürlenmemiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X)

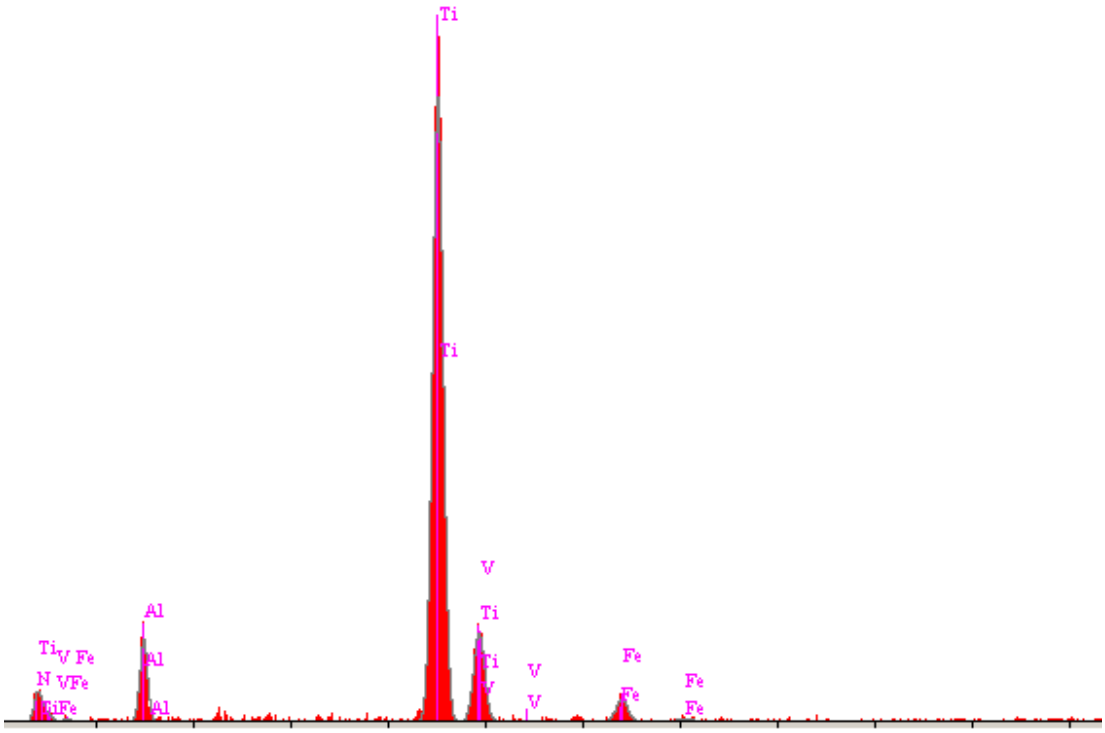


Şekil 4.27. Nitrürlenmemiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X)

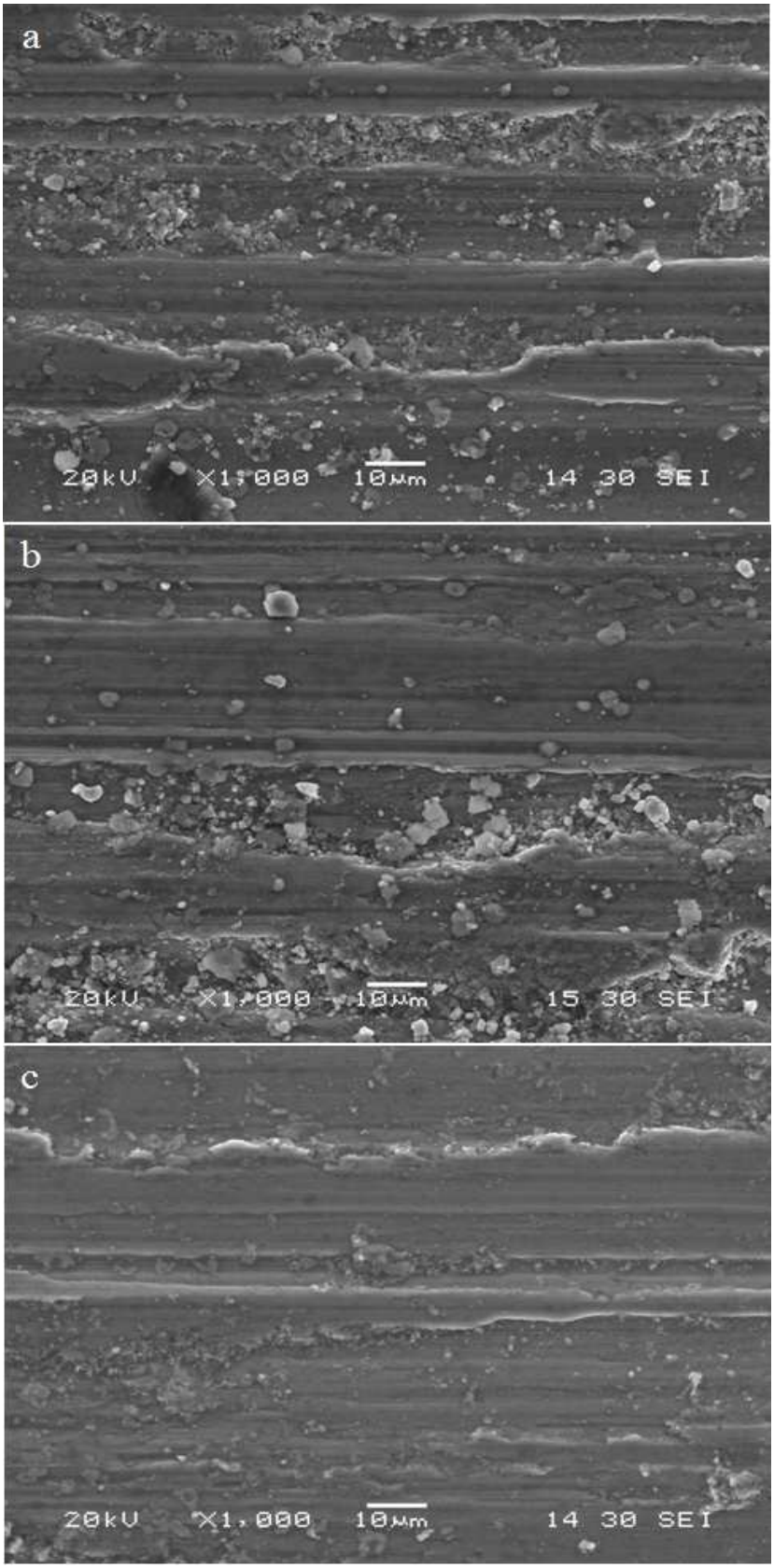
Şekil 4.26'da ve 4.27'de nitrürlenmemiş numunelerin 18 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. Şekil 4.26 a'da 100 m kayma mesafesinde yüzeyde çiziklerin olduğu, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında numune yüzeyinde mikroçatlakların ve olukların oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 4.26 b ve 4.26 c). Şekil 4.27'de 18 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonunda nitrürlenmemiş numunenin aşınma hacminin sırasıyla 2,152, 4,16 ve 9,246 mm^3, buna karşın aşınan malzeme hacminin ise 1,12, 3,41 ve 6,21 mm^3 olduğu dikkate alındığında aşınma sırasında malzemenin plastik deformasyona da maruz kaldığı sonucuna varılabilir. Ayrıca yüzeyden kopan birçok aşınma döküntülerinin tekrar numune yüzeyine yapıştığı görülmektedir (Şekil 4.27). Nitekim Şekil 4.28'deki SEM fotoğrafından görüldüğü gibi plazma nitrürlenmemiş numunenin 18 N yük altında ve 400 m kayma mesafesi sonrasında numune yüzeyine yapışan bir aşınma döküntüsünün numuneden mi yoksa aşındırıcı diskten mi olduğunu öğrenmek için EDX analizi yapılmıştır (Şekil 4.29). EDX analizi sonucuna göre numune yüzeyine yapışan bu parçanın bol miktarda titanyum, alüminyum ve vanadyum içerdiği görülmektedir. Dolayısıyla numune yüzeyindeki aşınma döküntülerinin numunenin kendisine ait olduğu söylenebilir. Ayrıca az miktarda ortaya çıkan demir pikleri numune yüzeyinde bir oksitlenmenin meydana geldiğini göstermektedir.



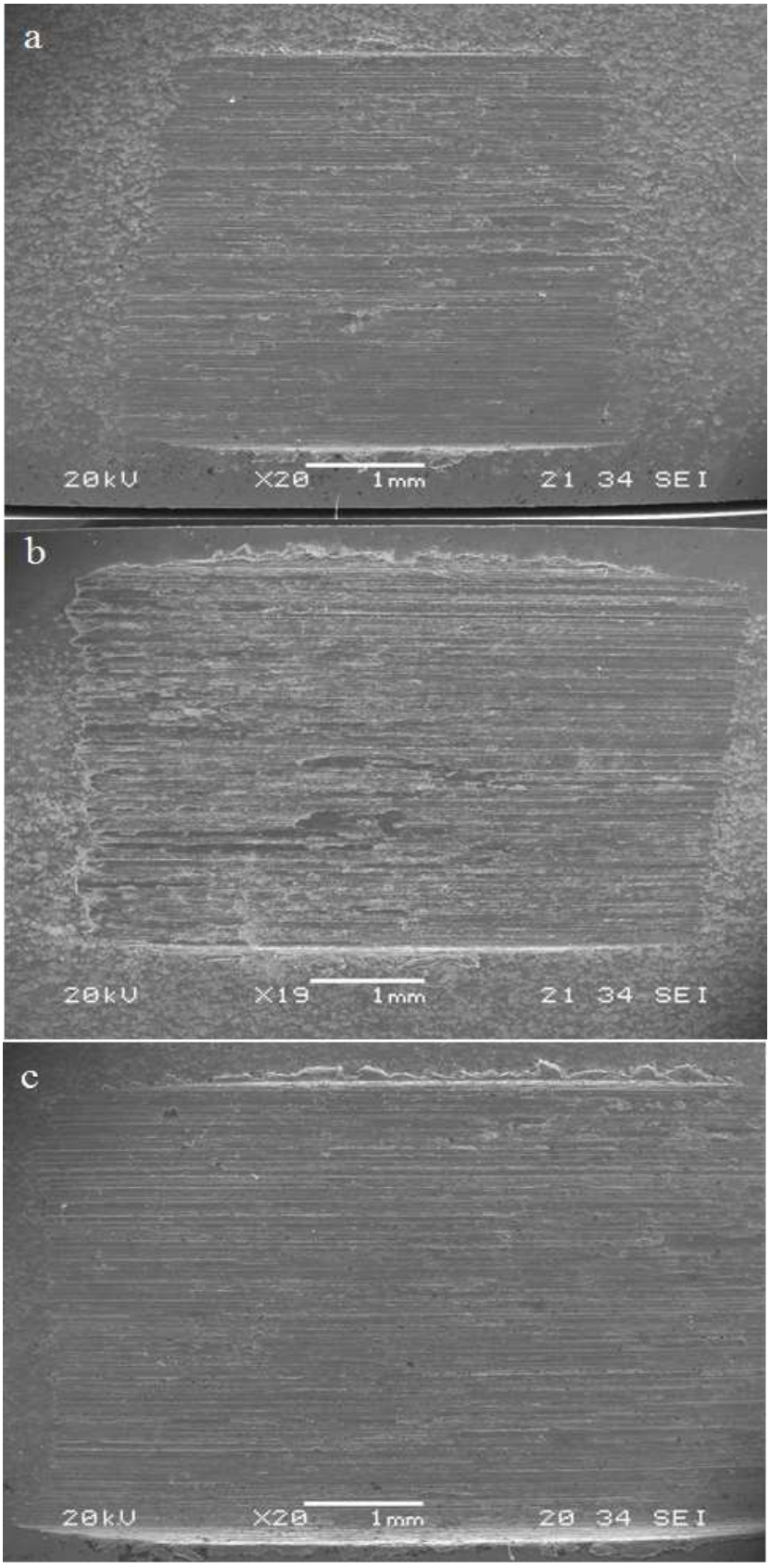
Şekil 4.28. Nitrürlenmemiş numunenin 18 N yük altında ve 400 m kayma mesafesi sonundaki SEM görüntüsü



Şekil 4.29. Şekil 4.28'deki aşınma döküntüsünün EDX analizi



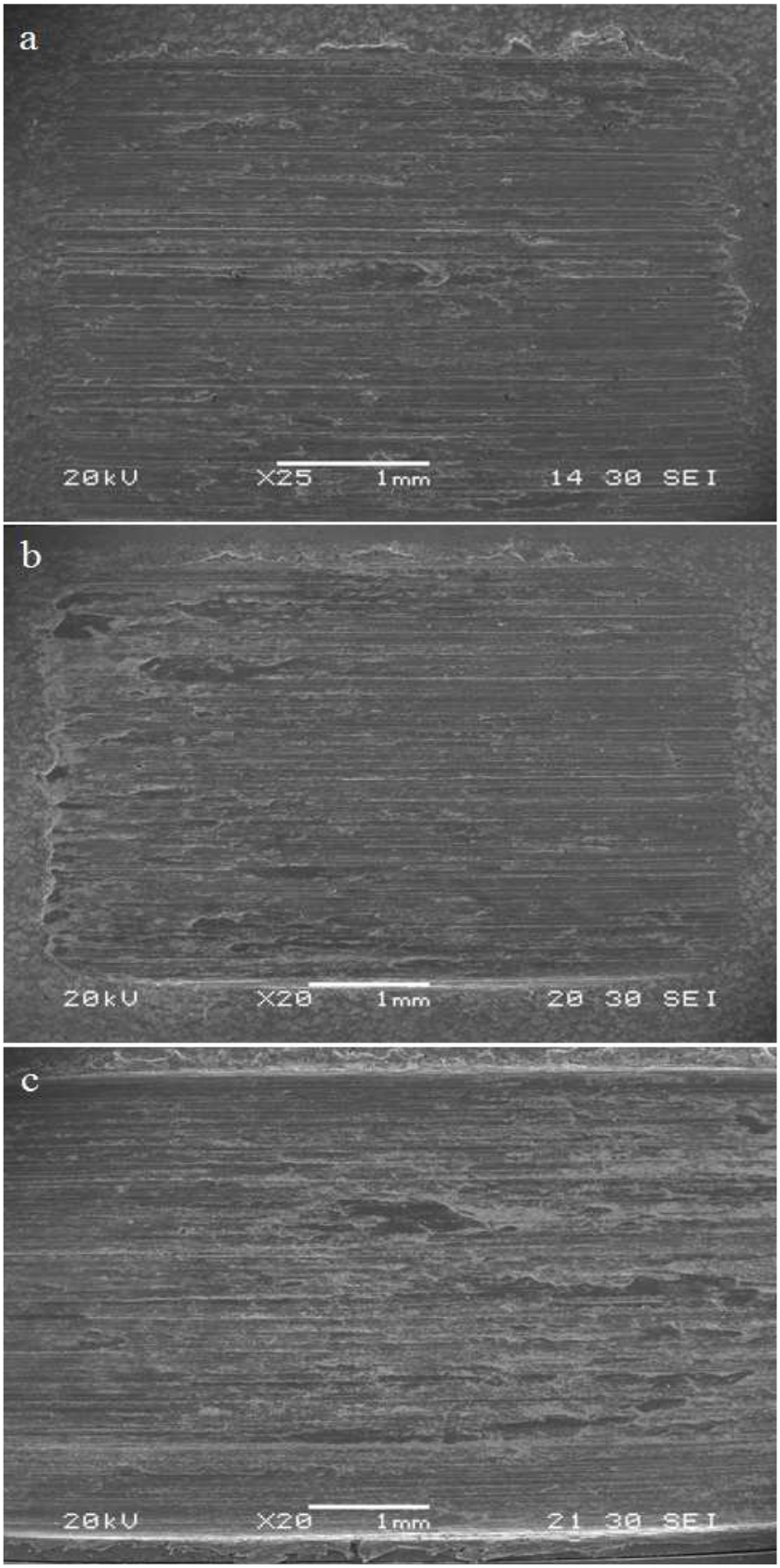
Şekil 4.30. 4 saat nitrürlenmiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X)



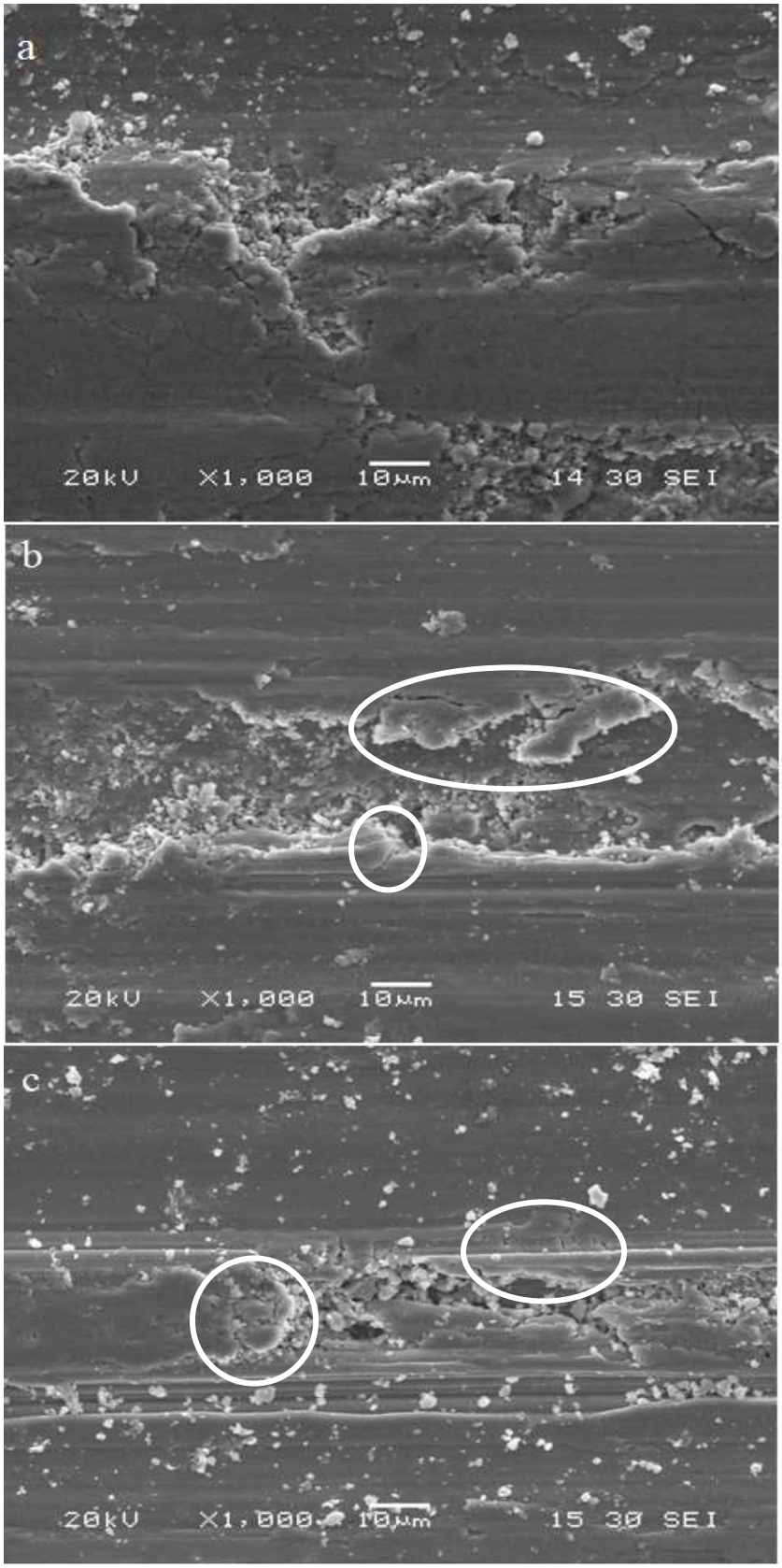
Şekil 4.31. 4 saat nitrürlenmiş numunenin 12 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X)

Şekil 4.30’da 4 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 6 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. Söz konusu numune nitrürlenmiş numuneler arasında en fazla aşınma miktarı göstermiştir. Fotoğraflardan numunenin mikroçatlama ve mikrosürme mekanizmaları sonucunda aşınmış olduğu ve ayrıca yine nitrürlenmemiş numunede olduğu gibi aşınma döküntülerinin bir kısmının numune yüzeyine yapışmış olduğu da görülmektedir. Şekil 4.30 c’de 6 N yük altında 1000 m kayma mesafesi sonunda nitrürlenmiş numunenin aşınma hacminin 3,368 mm^3, buna karşın aşınan malzeme hacminin ise 2,22 mm^3 olduğu dikkate alındığında aşınma sırasında malzemenin plastik deformasyona da maruz kaldığı sonucuna varılabilir.

Şekil 4.31’de 4 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 12 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasıda çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. Fotoğraflardan 100 m kayma mesafesinde plazma nitrürlenmiş numune yüzeyinde çiziklerin olduğu (Şekil 4.31 a), bu çiziklerin 400 m ve 1000 m kayma mesafelerinde arttığı (Şekil 4.31 b ve 4.31 c) görülmektedir.

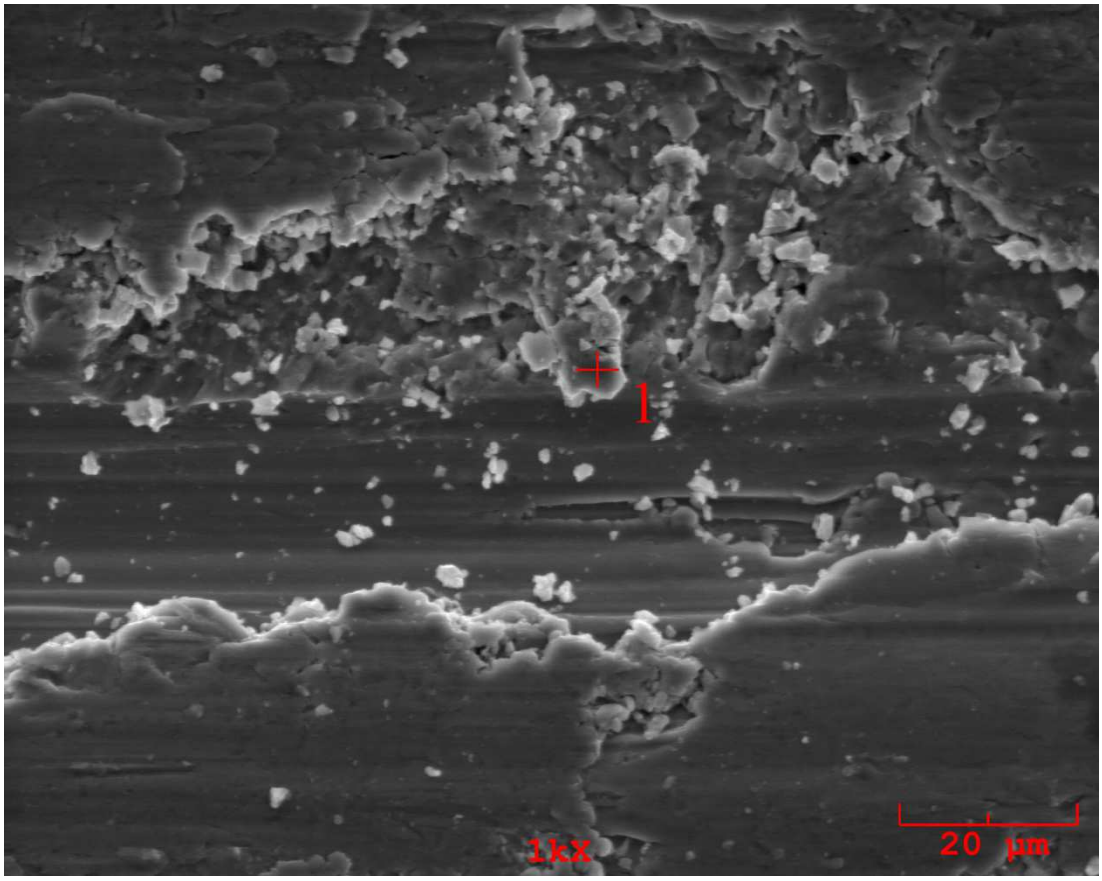


Şekil 4.32. 4 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X)

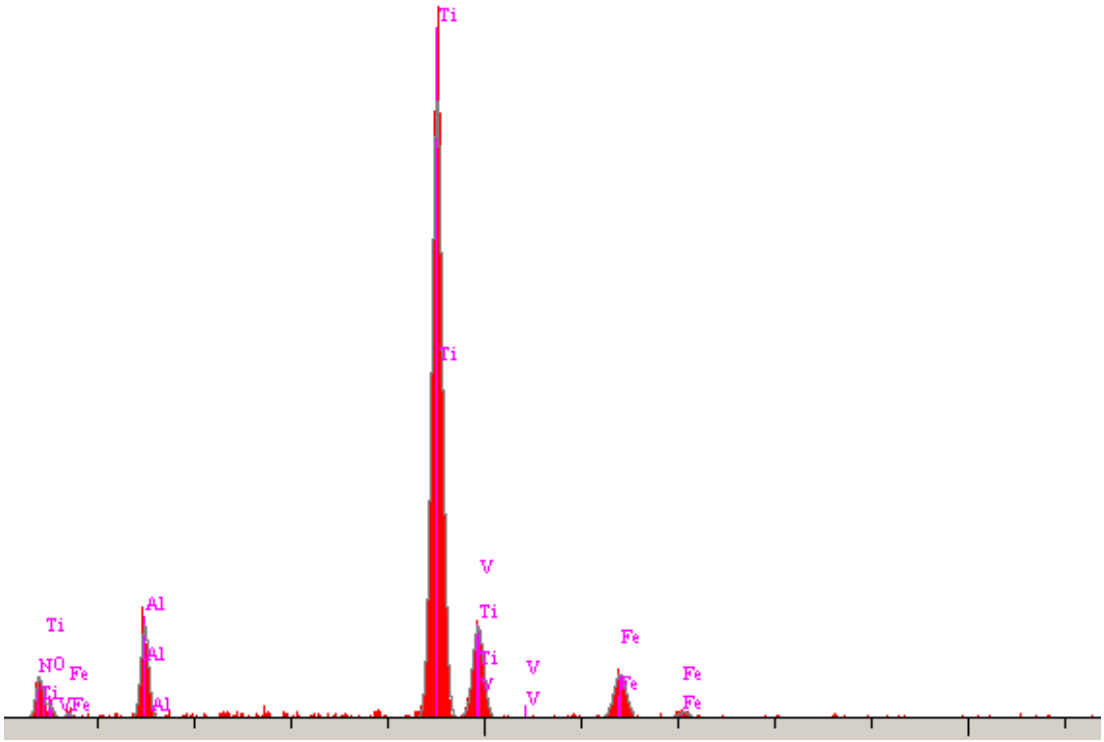


Şekil 4.33. 4 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X)

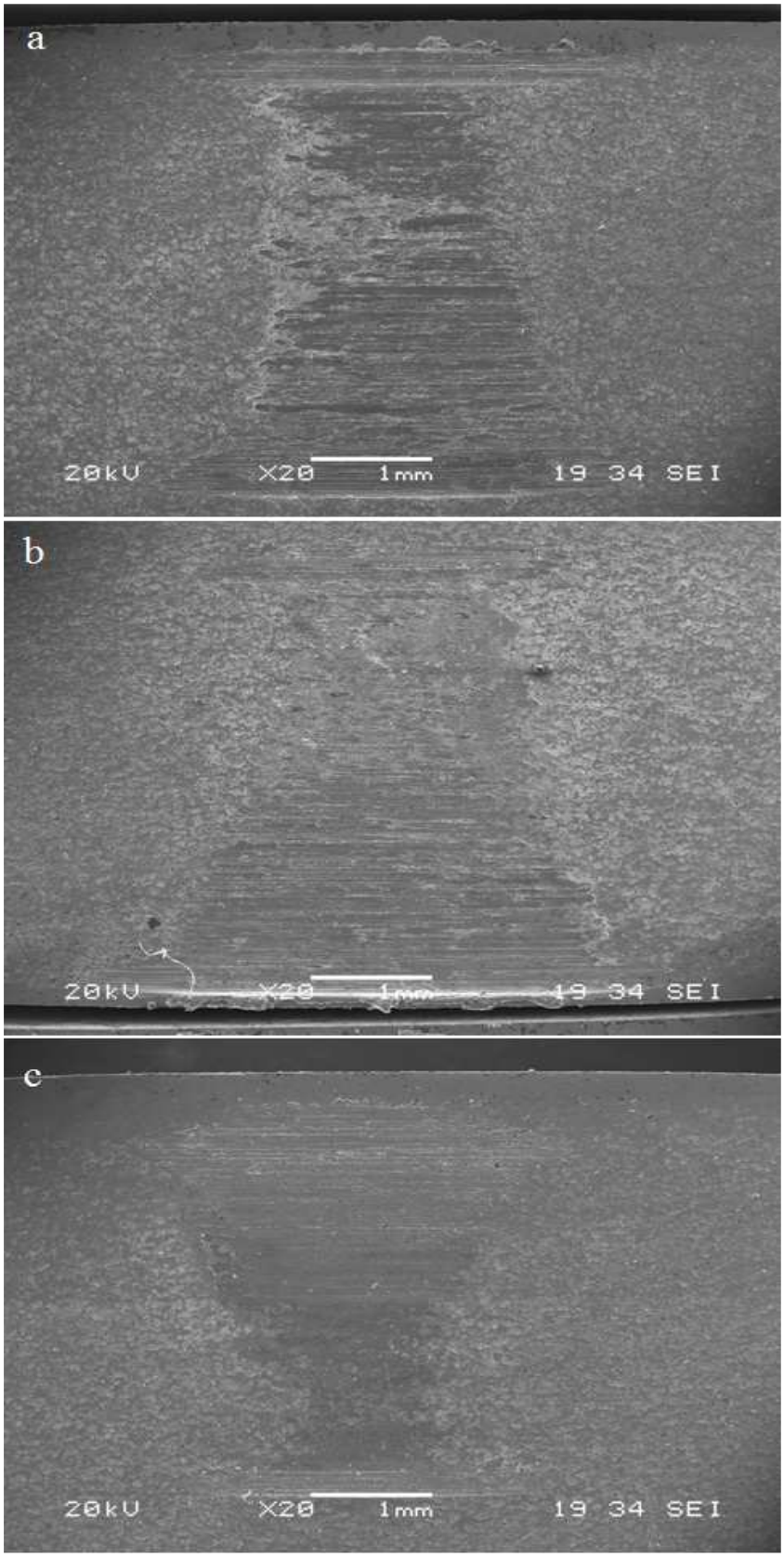
Şekil 4.32'de ve 4.33'te 4 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 18 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. Aşınma testlerinde uygulanmış olan en fazla yük 18 N olduğu için 100 m kayma mesafesinde numune yüzeyinde fazla miktarda çizik ve çatlak oluşumunun varlığı görülmektedir (Şekil 4.33 a). Ayrıca 400 m ve 1000 m kayma mesafesinde derin olukların oluştuğu görülmüştür. Şekil 4.33 b'de görüldüğü gibi 400 m kayma mesafesi sonrasında numune yüzeyinde mikroçatlama şeklinde aşınma mekanizmasının meydana geldiği görülmektedir. Oluşan çatlaklar SEM fotoğrafı üzerinde daire işareti ile gösterilmiştir (Şekil 4.33 b ve 4.33 c). Bu çatlayan kısımların ilerleyen sürelerde malzemeden ayrılarak aşınmaya neden olduğu sonucuna varılabilir (Şekil 4.33 c). Ek olarak kopan parçaların bir kısmının malzeme yüzeyinde kaldığı görülmektedir. Nitekim Şekil 4.34'teki SEM fotoğrafından görüldüğü gibi 4 saat plazma nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında ve 100 m kayma mesafesi sonrasında numune yüzeyine yapışan aşınma döküntülerinin numuneden mi yoksa aşındırıcı diskten mi olduğunu öğrenmek için rastgele seçilen bir döküntü üzerinde EDX analizi yapılmıştır (Şekil 4.35). EDX analizi sonucuna göre numune yüzeyine yapışan bu parçanın bol miktarda titanyum, alüminyum ve vanadyum içerdiği görülmektedir. Dolayısıyla numune yüzeyindeki aşınma döküntülerinin numunenin kendisine ait olduğu söylenebilir. Ayrıca az miktarda ortaya çıkan demir pikleri numune yüzeyinde bir oksitlenmenin meydana geldiğini göstermektedir.



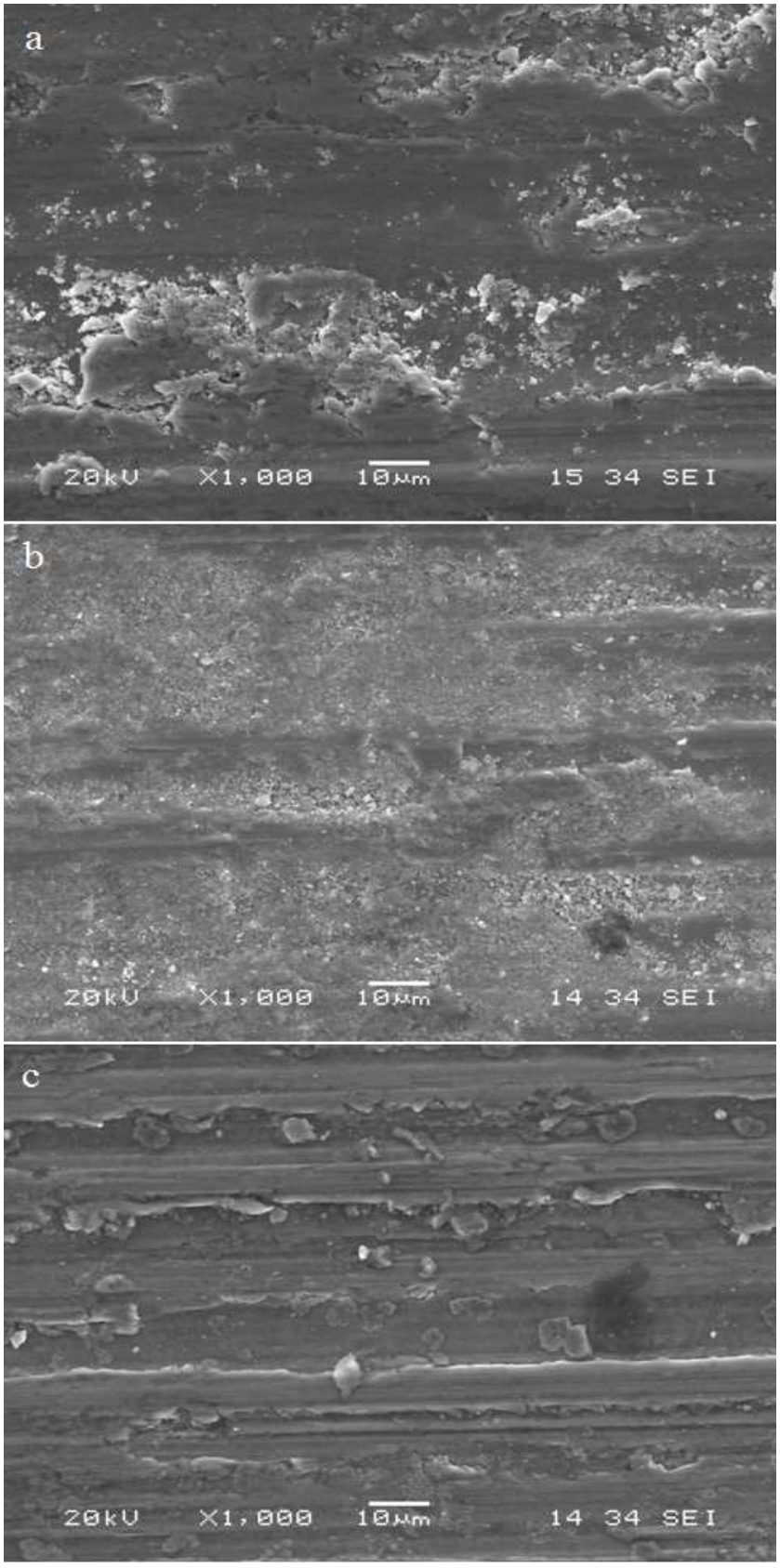
Şekil 4.34. 4 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında ve 100 m kayma mesafesi sonundaki SEM görüntüsü



Şekil 4.35. Şekil 4.34'teki aşınma dökütüsünün EDX analizi



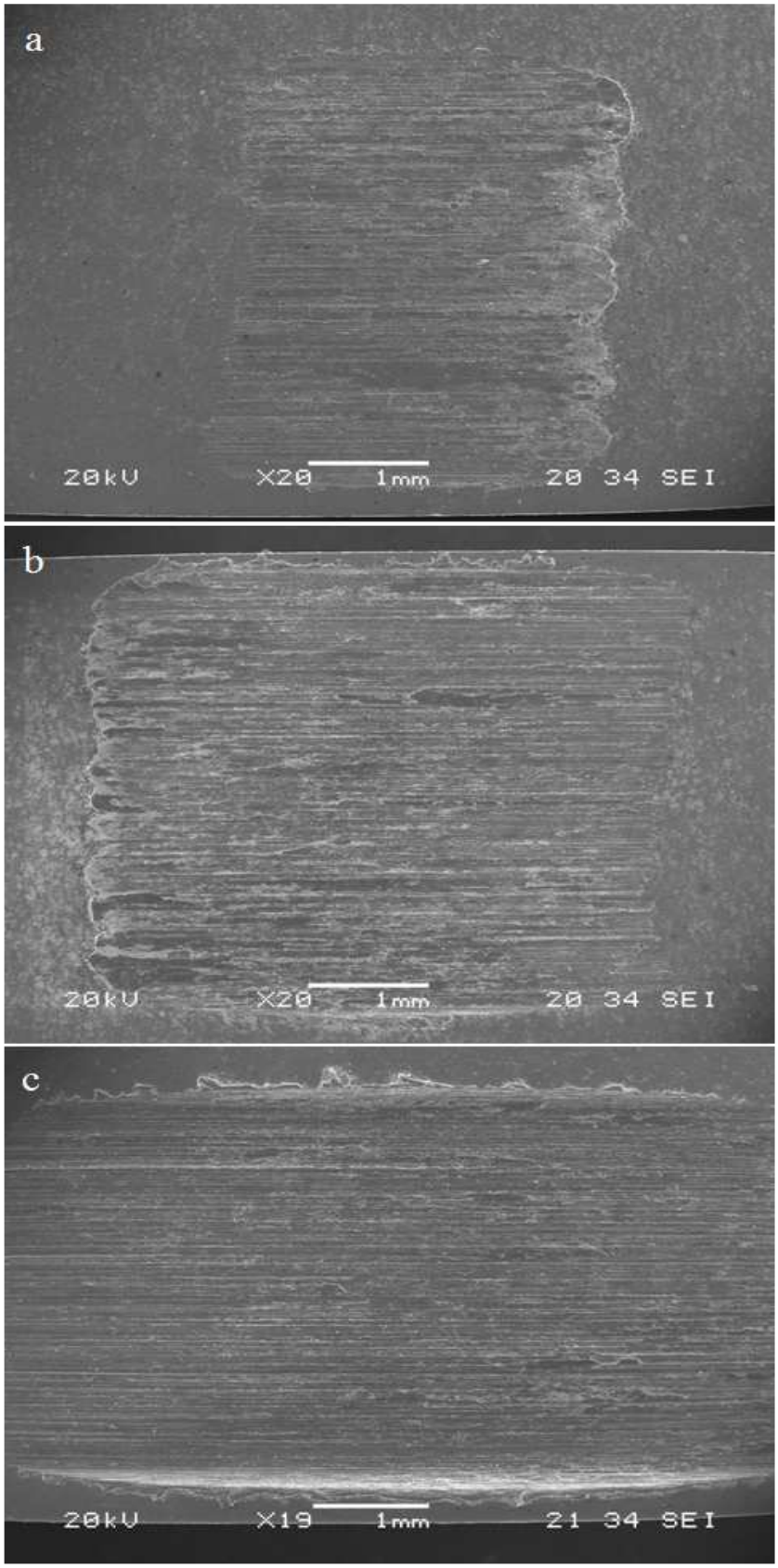
Şekil 4.36. 8 saat nitrürlenmiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X).



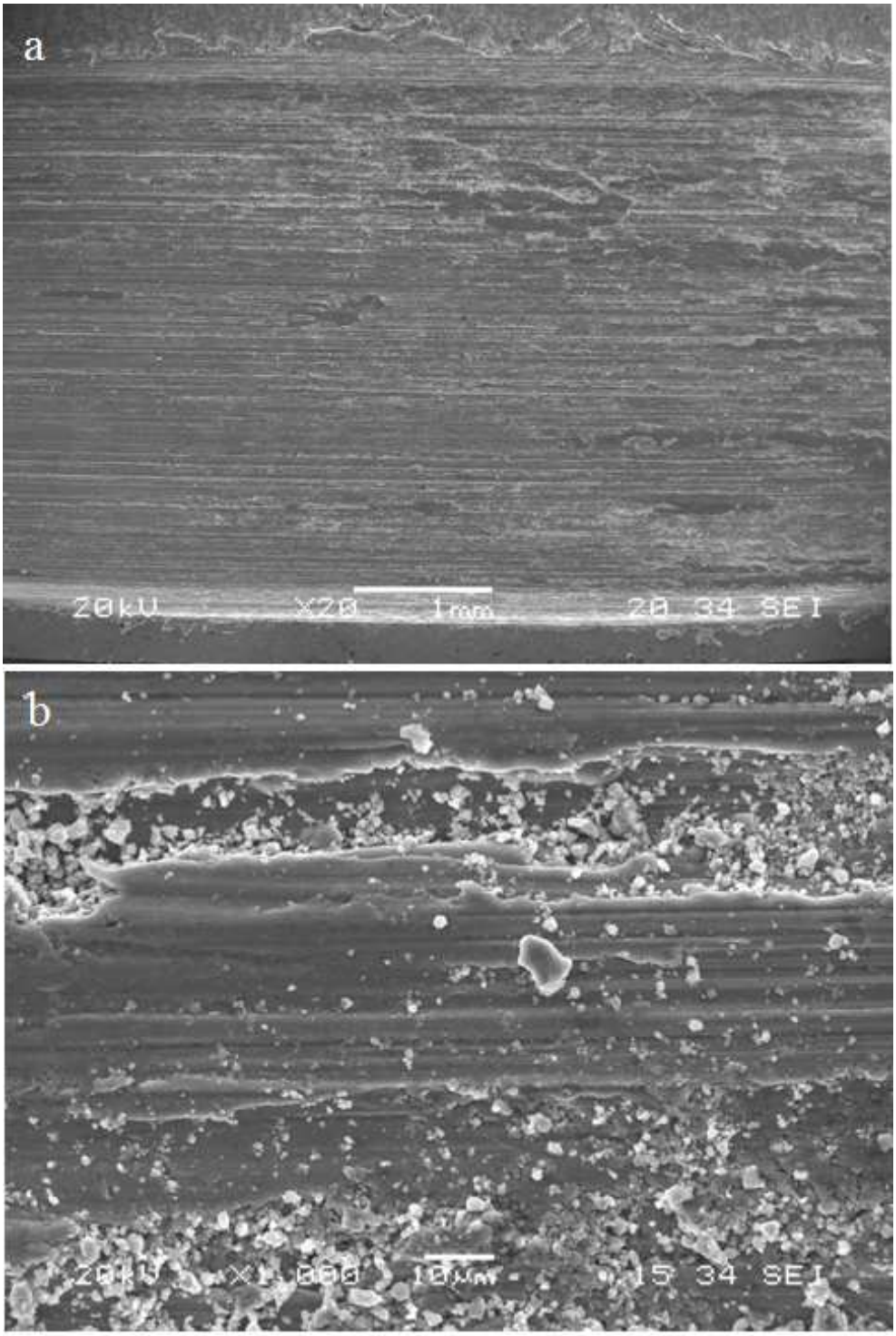
Şekil 4.37. 8 saat nitrürlenmiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X)

Şekil 4.36’da ve 4.37’de 8 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 6 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. Şekil 4.36 a’da görülen aşınma izinin nitrürlenmemiş numunenin aynı yük altındaki aşınma izi (Şekil 4.23 a) ile karşılaştırıldığında daha küçük olduğu görülmektedir. Nitekim 8 saat nitrürlenmiş numune nitrürlenmemiş numuneden daha az aşınma miktarı göstermiştir. Şekil 4.37’deki fotoğraflardan bu numunenin de aşınma mekanizmasının diğer numunelere benzer olarak mikroçatlama ve mikrosürme ile birlikte plastik deformasyon şeklinde olduğu görülmektedir. İlaveten yine bu numunede de diğer numunelerde olduğu gibi numune yüzeyinden kopan ve tekrar numune yüzeyine yapışan parçalar bol miktarda görülmektedir.

Şekil 4.38’de 8 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 12 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. Aşınma testinde 6 N’luk yükle kıyaslandığında uygulanan yükte artış olduğu için, numune 8 saat nitrürlenmiş olmasına rağmen ilk metrelerde yüzeyde çiziklerin oluştuğu görülür. Bu numunenin de mikroçatlama ve mikrosürme ile birlikte plastik deformasyon şeklinde aşınma mekanizmasına maruz kaldığı görülmektedir.



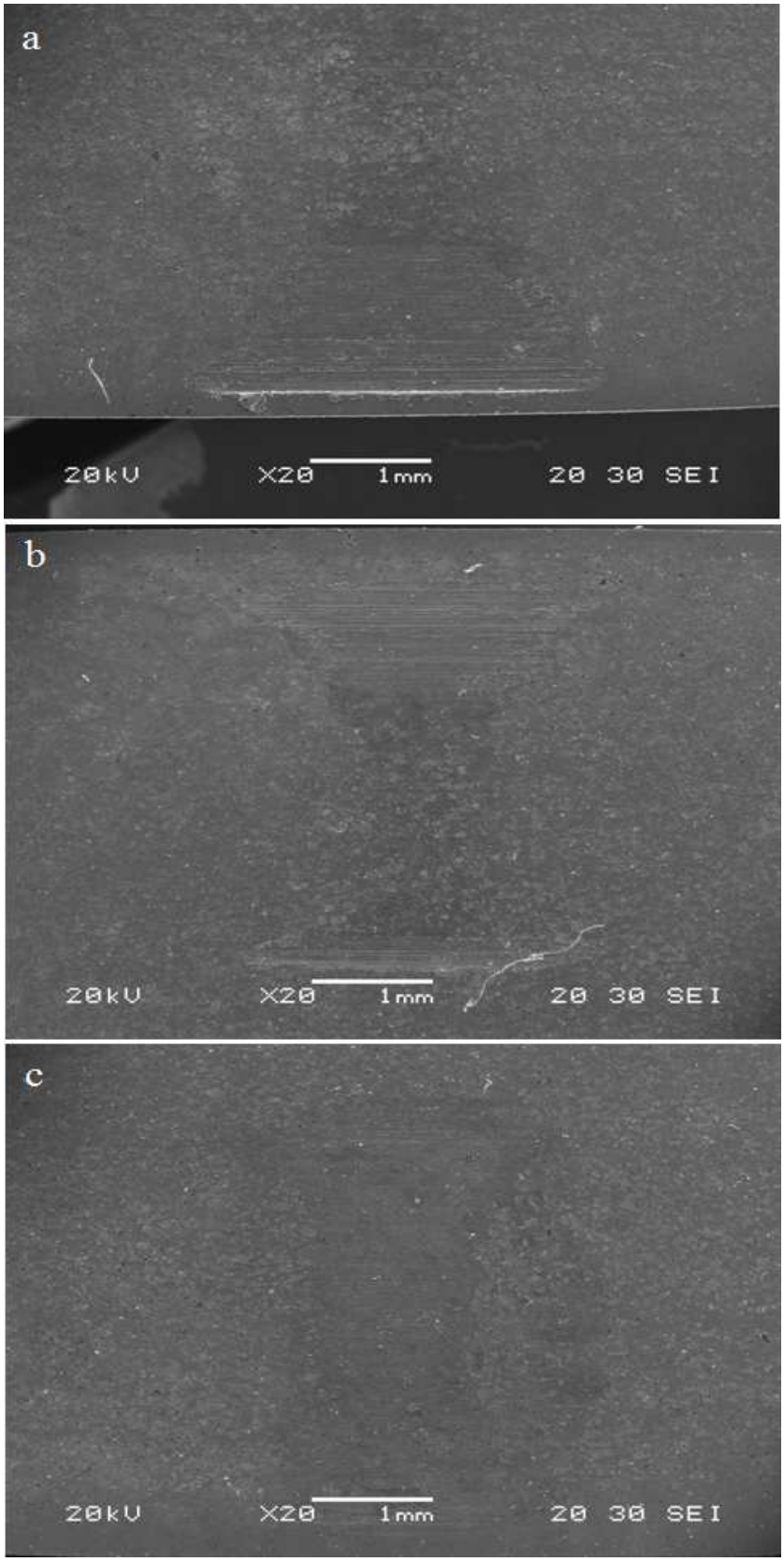
Şekil 4.38. 8 saat nitrürlenmiş numunenin 12 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X).



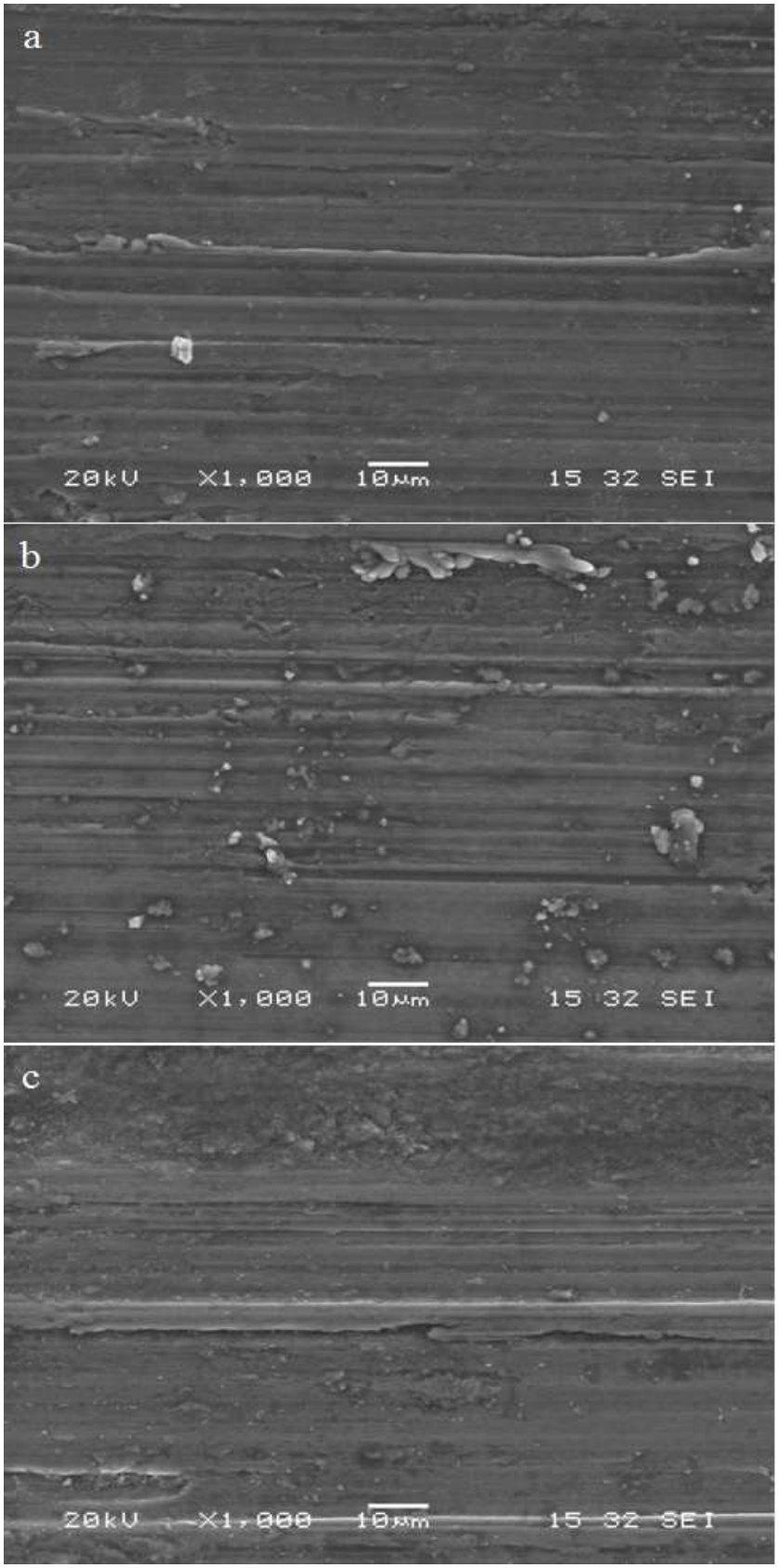
Şekil 4.39. 8 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında a) (20X) 1000 m b) (1000X) 1000 m kayma mesafesinde çekilen SEM görüntüsü

Şekil 4.39’da 8 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 18 N yük altında 1000 m kayma mesafesi sonrasında çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. Fotoğraflardan, plastik deformasyonla birlikte numune yüzeyinde meydana gelen derin oluk oluşumu ve az miktarda mikroçatlakların varlığı görülmektedir. Şekil 4.39 b’de numune yüzeyinde bol miktarda aşınma döküntülerinin olduğu görülmektedir.

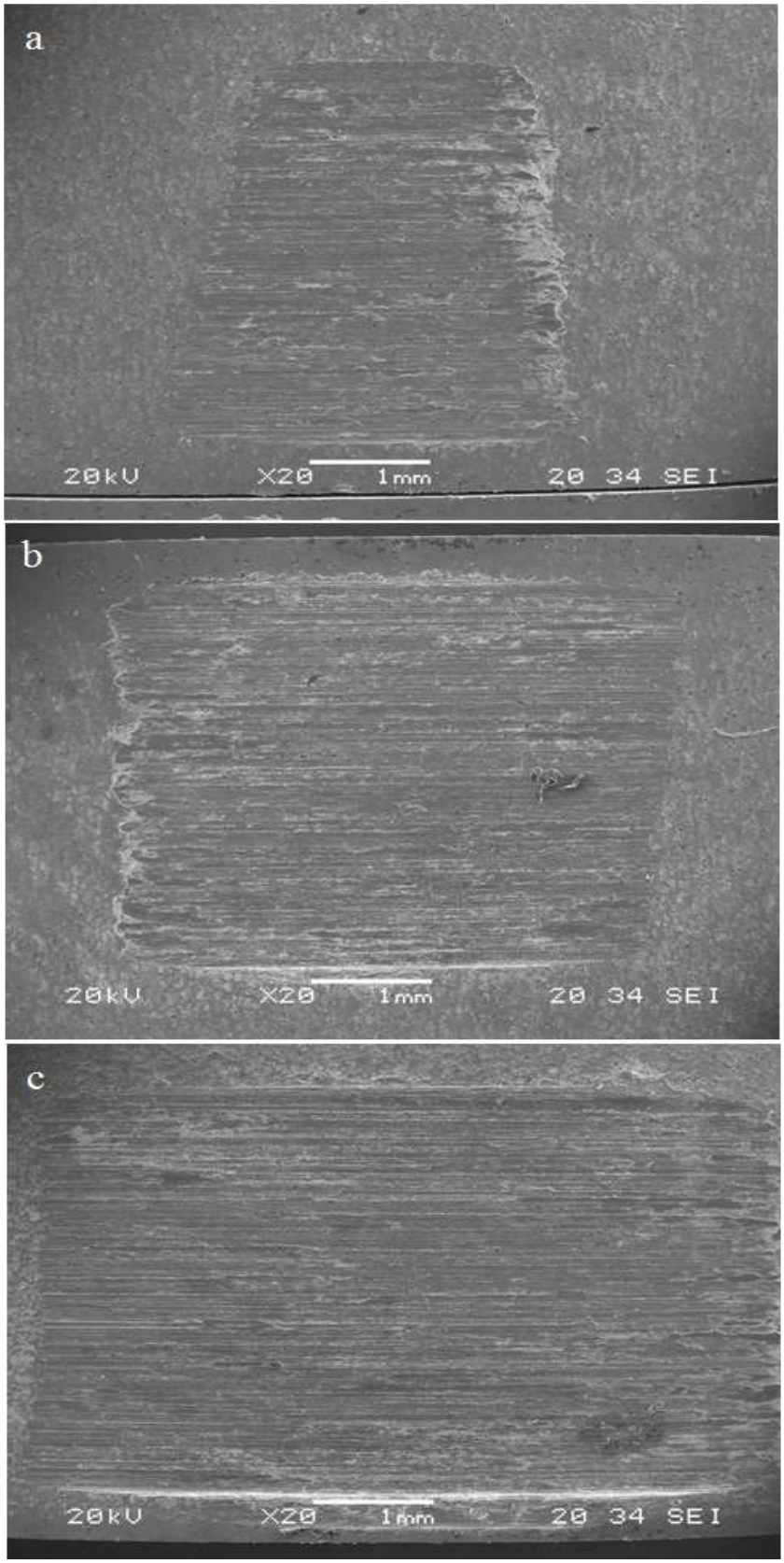
Şekil 4.40’ta ve 4.41’de 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 6 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. Nitrürleme süresinin yüksek olması ve aşınma testinde uygulanan yükün az olması sebebiyle numunede az miktarda aşınma meydana gelmiştir. Nitrürlenmemiş numunenin Şekil 4.23’teki fotoğrafları ile söz konusu numunenin Şekil 4.40’taki 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafelerindeki fotoğrafları karşılaştırıldığında bu numune yüzeyinde çizik oluşumu yok denecek kadar azdır. Bu numunede plastik deformasyon ile birlikte mikrosürme mekanizması şeklinde aşınma mekanizmasının olduğu görülmektedir (Şekil 4.41).



Şekil 4.40. 12 saat nitrürlenmiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X).



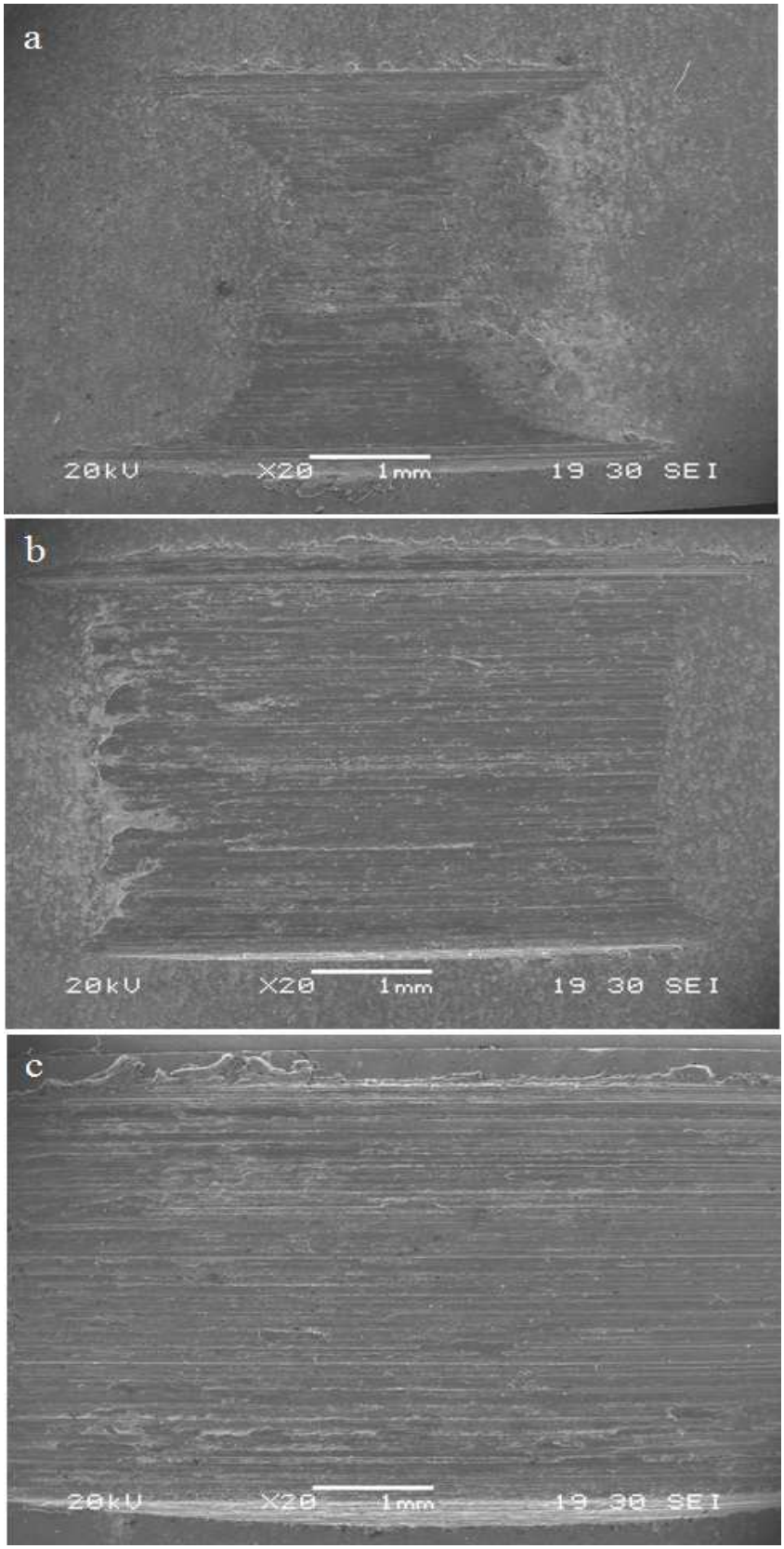
Şekil 4.41. 12 saat nitrürlenmiş numunenin 6 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X)



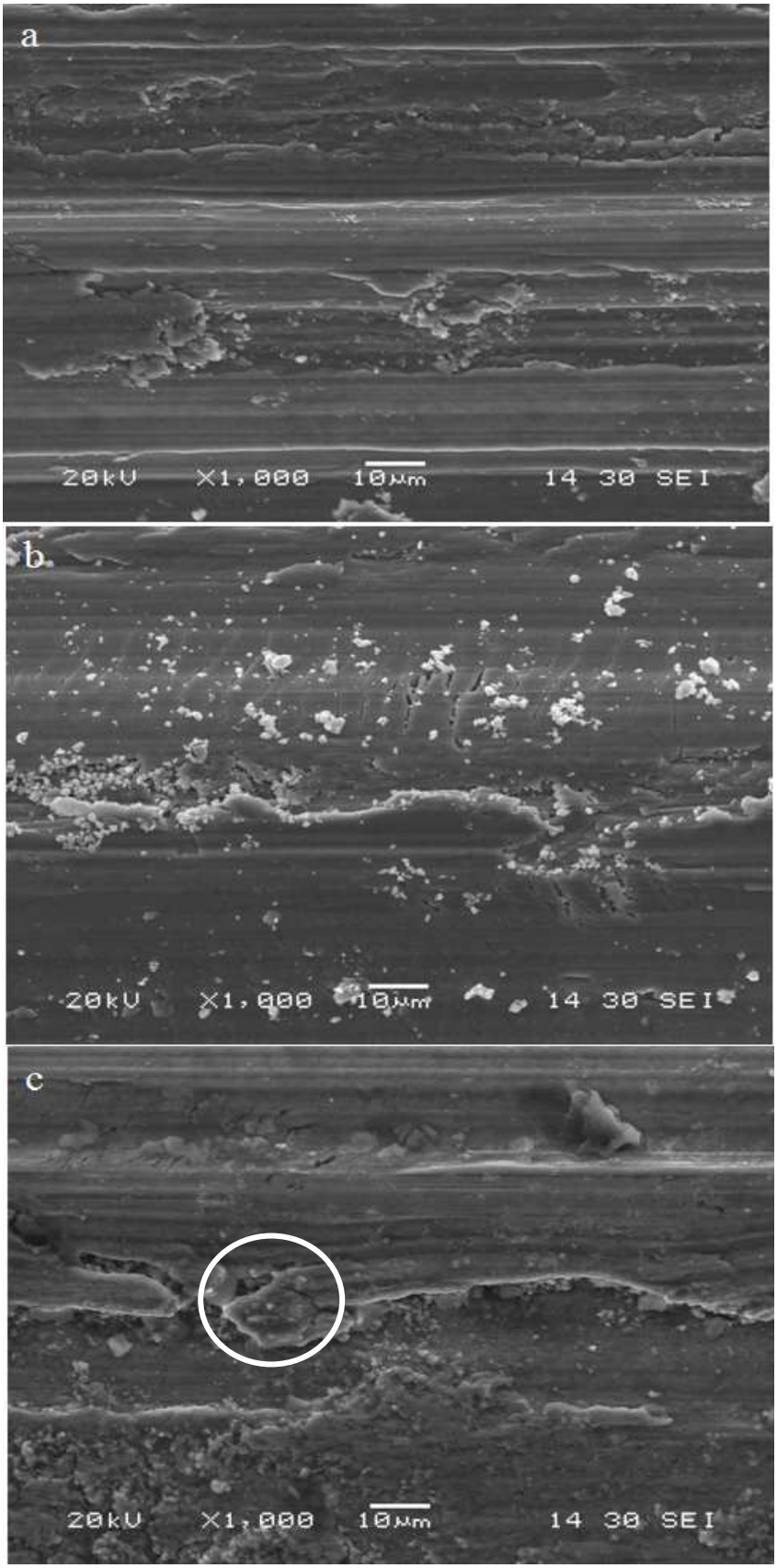
Şekil 4.42. 12 saat nitrürlenmiş numunenin 12 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X).

Şekil 4.42’de 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 12 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. Plazma nitrürleme süresinin fazla olmasına rağmen aynı numunenin 6 N yük altındaki fotoğraflarıyla (Şekil 4.41) kıyaslandığında aşınma testinde uygulanan yükün artması sebebiyle numune yüzeyinde daha fazla miktarda çizik ve olukların meydana geldiği görülmektedir. Kayma mesafesinin artmasıyla birlikte numune yüzeyinde oluşan çiziklerde artış meydana gelmektedir.

Şekil 4.43’te ve 4.44’te 12 saat plazma nitrürlenmiş numunelerin 18 N yük altında 100 m, 400 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrasında çekilmiş SEM fotoğrafları görülmektedir. Plazma nitrürleme süresinin fazla olmasına rağmen aynı numunenin 6 N ve 12 N yük altındaki fotoğraflarıyla (Şekil 4.41 ve 4.42) kıyaslandığında aşınma testinde uygulanan yükün artması sebebiyle numune yüzeyinde daha fazla miktarda çizik ve olukların meydana geldiği görülmektedir. Bu numunede plastik deformasyonla birlikte mikroçatlak, mikrosürme mekanizması şeklinde aşınma mekanizmasının olduğu görülmektedir. Diğer numunelerdekine benzer olarak aşınma döküntülerinin numune yüzeyine yapıştığı da görülmektedir. Şekil 4.44 c’de görülen SEM fotoğrafı üzerinde daire işareti ile mikroçatlak gösterilmiştir. Oluşan bu çatlaklar ilerleyen aşınma süresinde numune yüzeyinden koparak malzemenin aşınmasına neden olabilecektir.



Şekil 4.43. 12 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyine ait düşük büyütmeli SEM fotoğrafları (20X).



Şekil 4.44. 12 saat nitrürlenmiş numunenin 18 N yük altında a) 100 m, b) 400 m ve c) 1000 m kayma mesafelerinde çekilen aşınma yüzeyinin SEM fotoğrafları (1000X)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, AISI 52100 çeliğine karşı kayan plazma nitrürlenmiş Ti6Al4V titanyum alaşımının adhezif aşınma davranışı üzerine yük ve kayma mesafesinin fonksiyonu olacak şekilde nitrürleme zamanının etkisi incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- XRD analizi sonuçlarına göre nitrürlenmemiş numunenin yoğun biçimde α-Ti fazından oluştuğu görülmüştür. Buna karşın 4 ve 8 saat nitrürleme işlemlerinde α-Ti fazı ile birlikte ε- Ti_2N fazı, 12 saat nitrürleme işleminde ise α- Ti, ε- Ti_2N ve δ-TiN fazları gözlenmiştir.

- İşlem süresi dikkate alınmaksızın uygulanan plazma nitrürleme işlemi alaşımın yüzey sertliğini arttırmıştır. 4, 8 ve 12 saat plazma nitrürleme işlemi ile alaşımın yüzey sertlik değerleri sırası ile; 580, 610 ve 660 $HV_{0.01}$'dir. Bu değerlere göre nitrürlenmemiş numunenin yüzey sertliği (270 $HV_{0.01}$) 4, 8 ve 12 saat plazma nitrürleme işlemi ile sırası ile; 2.1, 2.3 ve 2.4 kat artmıştır. Bu sonuçlara göre plazma nitrürleme süresinin artmasıyla alaşımın yüzey sertliği artmaktadır.

- Vickers sertlik taraması sonucuna göre, 350 HV sertlik değeri referans alındığında 4 saat nitrürleme ile yaklaşık 12 µm, 8 saat nitrürleme ile yaklaşık 15 µm, 12 saat nitrürleme ile yaklaşık 20 µm sertlik derinliği elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre plazma nitrürleme süresinin artmasıyla daha fazla sertlik derinliğine ulaşılmıştır.

- Yüzey pürüzlülüğü (Ra) sonuçlarına göre; 4, 8 ve 12 saat plazma nitrürleme işlemi ile sırasıyla 0,060 µm, 0,112 µm ve 0,160 µm değerleri ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre plazma nitrürleme süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı görülmüştür. Bunun nedeni nitrürleme süresinin artmasıyla numunenin yüzeyinin daha fazla azot bombardımanına maruz kalmasına dayandırılabilir.

- Alaşımın aşınma direnci plazma nitrürleme süresinin artması ile arttarken uygulanan yükün artmasıyla azalmıştır. Alaşımın aşınma hacmi 18 N yük ve 12 saat

nitrürleme ile %57 oranında artarken 6 N yük ve 12 saat nitrürleme ile % 96 oranında artmıştır.

- Aşınma derinlikleri göz önüne alındığında, 12 ve 18 N yük altında yapılan deneylerde ilk 100 m kayma mesafesinde aşınmanın sert tabakanın geçilerek ana malzemede gerçekleştiği buna karşın 6 N yük altında ise ilk 100 m kayma mesafesinde aşınmanın sert tabaka dahilinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

- Aşınma testi sırasında numune yüzeyine etki eden basınç değerinin; artan yükle birlikte arttığı, buna karşın kayma mesafesinin artmasıyla yüzeyde oluşan aşınma izi alanının artması sebebiyle azaldığı belirlenmiştir. Ek olarak numune yüzeyine etki eden basınç değerinin, plazma nitrürleme süresinin artmasıyla arttığı belirlenmiştir. Bunun nedeni; nitrürleme süresinin artışıyla, aşınma direnci kazanan alaşımın yüzeyinde daha küçük iz alanı oluşmasına dayandırılabilir.

- SEM fotoğrafları göz önüne alındığıda; gerek nitrürlenmemiş ve gerekse de nitrürlenmiş tüm numunelerde plastik deformasyona ilaveten mikroçatlak ve mikrosürme şeklinde aşınma mekanizmaları görülmüştür. Ancak plazma nitrürleme işlemi uygulanmamış alaşımda ağır plastik deformasyon ve adhezif aşınma görülmesine karşın plazma nitrürleme işlemi uygulanmış alaşımda meydan gelen sert tabaka nedeniyle düşük aşınma miktarı ortaya çıkmıştır. Ek olarak aşınma testinin ilerleyen safhalarında aşınma döküntülerinin bir kısmının yüzeye yapıştığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak endüstride yaygın olarak kullanılan ve aşınma etkisi altında bulunan Ti6Al4V alaşımının; yüzey sertliği, sertlik derinliği ve aşınma direnci gibi yüzey karakterizasyonu plazma nitrürleme işlemi ile iyileştirilmiştir. Tez kapsamında alaşımın aşınma davranışı sabit sıcaklıkta farklı yükler altında incelenmiştir. İleriki çalışmalarda plazma nitrürleme işlem sıcaklığının ve/veya nitrürleme ortamının etkisi de incelenebilir. İlaveten aşınma direncinin yanında alaşımın korozyon ve yorulma direnci gibi özellikleri de incelenebilir.

KAYNAKLAR

[1] Yetim A. F., Yildiz F., Vangolu Y., Alsaran A., Celik A., Several plasma diffusion processes for improving wear properties of Ti6Al4V alloy, *Wear*, 2009, **267,** 2179-2185.

[2] Kashaev N., Stock H. R., Mayr P., Assessment of the application potential of the intensified glow discharge for industrial plasma nitriding of Ti-6Al-4V, *Surface & Coatings Technology*, 2005, **200,** 502-506.

[3] Fare S., Lecis N., Vedani M., Silipigni A. Favoino P., Properties of nitrided layers formed during plasma nitriding of commercially pure Ti and Ti-6Al-4V alloy, *Surface & Coatings Technology*, 2012, **206,** 2287-2292.

[4] Cassar G., Banfield S., Wilson J. C., Housden J., Matthews A., Leyland A., Tribological properties of dublex plasma oxidised, nitrided and PVD coated Ti-6Al-4V, *Surface & Coatings Technology*, 2011, **206,** 395-404.

[5] Vadiraj A., Kamaraj M., Effect of surface treatments on fretting fatigue damage of biomedical titanium alloys, *Tribology International*, 2007, **40,** 82-88.

[6] Erdoğan M., *Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri demir dışı alaşımlar* , Cilt 2, Nobel, Ankara, 2001.

[7] Boyer R., Welsch G., Collings E. W., *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, ASM International, Metals Park, USA, 1994.

[8] Destefani J. D., *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*, 10th. Ed., ASM, Ohio, 1770-1781, 1990.

[9] Leyens C., Peters M., *Titanium and Titanium Alloys*, Wiley-VCH, Germany, 2003.

[10] Kubiak K., Sieniawski J., Development of the microstructure and fatigue strength of two phase titanium alloys in the processes of forging and heat treatment, *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, **78,** 117–121.

[11] Bloyce A., Qi P.-Y., Dong H., Bell T., Surface modification of titanium alloys for combined improvements in corrosion and wear resistance, *Surface and Coatings Technology*, 1998, **107,** 125-132.

[12] Zeng L., Bieler T. R., Effects of working, heat treatment, and aging on microstructural evolution and crystallographic texture of α, α', α'' and β phases in Ti–6Al–4V wire, *Materials Science and Engineering A*, 2005, **392,** 403–414.

[13] Cai Z, Bunce N, Nunn M. E., Okabe T., Porcelain adherence to dental cast CP titanium:effect of surface modifications, *Biomaterials*, 2001, **22,** 979-986.

[14] Jiang X. P., Wang X. Y., Li J. X., Li D. Y., Man C.-S., Shepard M. J., Zhai T., Enhancement of fatigue and corrosion properties of pure Ti by sandblasting *Materials Science and Engineering A*, 2006, **429,** 30–35.

[15] Tian Y. S., Chen C. Z., Chen L. B., Chen L. X., Study on the microstructure and wear resistance of the composite coatings fabricated on Ti–6Al–4V under different processing conditions, *Applied Surface Science*, 2006, **253,** 1494–1499.

[16] Donachie M. J., *Titanium A Technical Guide*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2000.

[17] Ezugwu E. O., Wang Z. M., Titanium alloys and their machinability, *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, **68,** 262-274.

[18] Berberich F., Matz W., Richter E., Schell N., Kreißig U., Möller W., Structural mechanisms of the mechanical degradation of Ti6Al4V alloys in situ study during annealing, *Surface and Coatings Technology*, 2000, **128-129,** 450-454.

[19] Fujii H., Strengthening of α + β titanium alloys by thermomechanical processing, *Materials Science and Engineering A*, 1998, **243,** 103–108.

[20] Lauer G., Wiedmann-Al-Ahmad M., Otten J. E., Schmelzeisen R., Schilli W., The titanium surface texture effects adherence and growth of human gingival keratinocytes and human maxillar osteoblast-like cells in vitro, *Biomaterials*, 2001, **22,** 2799-2809.

[21] http://www. titanium.org, (Ziyaret tarihi: 02 Mayıs 2013).

[22] Anselme K., Bigerelle M., Topography effects of pure titanium substrates on human osteoblast long-term adhesion, *Acta Biomaterialia*, 2005, **1,** 211–222.

[23] Brunette D. M., Tengvall P., Textor M., Thomsen P., *Titanium in Medicine*, Springer Verlag, Heidelberg, 2001.

[24] Yılmazer H., Titanyum ve titanyum alaşımlarnın yüzey özelliklerinin plazma (iyon) nitrürleme ile geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 246796.

[25] Zhecheva A., Sha W., Malinov S., Long A., Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods, *Surface & Coatings Technology*, 2005, **200**, 2192–2207.

[26] Niinomi M., Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications, *Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2008, **1**, 30-42.

[27] Bacci T., Borgioli F., Galvanetto E., Galliano F. Tesi B., Wear resistance of Ti- 6Al–4V alloy treated by means of glow-discharge and furnace treatments, *Wear*, 2000, **240**, 199–206.

[28] Galliano F., Galvanetto E., Mischler S. Landolt D., Tribocorrosion behavior of plasma nitrided Ti-6Al-4V alloy in neutral NaCl solution, *Surface and Coatings Technology*, 2001, **145**, 121-131.

[29] Fleszar A., Wierzchon, T., Kim S. K., Sobiecki J. R., Properties of surface layers produced on the Ti-6Al-3Mo-2Cr titanium alloy under glow discharge conditions, *Surface and Coatings Technology*, 2000, **131**, 62-65.

[30] Taktak Ş., Plazmada nitrürlenmiş Ti-6Al-4V alaşımının difüzyon kinetiği ve aşınma davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2002, 129132.

[31] Molinari A., Straffelini G., Tesi B., Bacci T., Pradelli G., Effects of load and sliding speed on the tribological behaviour of Ti-6Al-4V plasma nitrided at different temperatures, *Wear*, 1997, **203 204,** 447-454.

[32] Yildiz F., Yetim A. F., Alsaran A., Çelik A., Plasma nitriding behaviour of Ti6Al4V orthopedic alloy, *Surface & Coatings Technology*, 2008, **202,** 2471–2476.

[33] Yılbas B. S., Sahin A Z., Al-Garni A. Z., Said S. A. M., Ahmed Z., Abdulaleem B. J., Sami M., Plasma nitriding of Ti-6Al4-V alloy to improve some tribological properties, *Surface and Coatings Technology*, 1996, **80,** 287-292.

[34] Ali M. M., Raman S. G. S., Pathak S. D., Gnanamoorthy R., Influence of plasma nitriding on fretting wear behaviour of Ti-6Al-4V, *Tribology International*, 2010, **43,** 152–160.

[35] Taktak S., Akbulut H., Dry wear and friction behaviour of plasma nitrided Ti–6Al–4V alloy after explosive shock treatment, *Tribology International*, 2007, **40,** 423-432.

[36] Hosseini S. R., Ahmadi A, Evaluation of the effects of plasma nitriding temperature and time on the characterisation of Ti 6Al 4V alloy, *Vacuum*, 2013, **87,** 30-39.

[37] Straffelini G., Andriani A., Tesia B., Molinari A., Galvanetto E., Lubricated rolling–sliding behaviour of ion nitrided and untreated Ti–6Al–4V, *Wear*, 2004, **256,** 346-352.

[38] Nolan D., Huang S. W., Leskovsek V., Braun S., Sliding wear of titanium nitride thin films deposited on Ti-6Al-4V alloy by PVD and plasma nitriding processes, *Surface & Coatings Technology*, 2006, **200,** 5698–5705.

[39] Ucun İ., Aslantaş K., Sertleştirilmiş 52100 takım çeliğinin tornalanmasında karbürlü kesici takımın performansının araştırılması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Gül O.,** Sarı N. Y., Sınmazçelik T., The Effect Of Low Temperature Plasma Nitriding On Wear Resistance Of Ti6Al4V Alloy, 3rd International Advences in Applied Physics and Material Science Congress APMAS, Antalya, Turkey, 24-28 April 2013.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini İstanbul Beykoz Deri Kundura İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Kocaeli Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2007 yılında Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi İşletme Bölümü'ne kayıt oldu. Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılı bahar döneminde mezun oldu. İşletme Bölümü'ndeki eğitimini 2012 yılında tamamladı. 2010 yılı güz döneminde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2011 yılı Eylül ayından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.