KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALUMİNYUM EKSTRÜZYONUNDA KALIP MALZEMESİ OLARAK KULLANILAN SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN YÜZEY İŞLEMLERİ VE TRİBOLOJİK KARAKTERİZASYONU

GÜLŞAH AKTAŞ

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALUMİNYUM EKSTRÜZYONUNDA KALIP MALZEMESİ OLARAK KULLANILAN SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN YÜZEY İŞLEMLERİ VE TRİBOLOJİK KARAKTERİZASYONU

GÜLŞAH AKTAŞ

Yrd.Doç.Dr. Şeyda POLAT
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. Ahmet KARAASLAN
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr. Ş. Hakan ATAPEK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 23.07.2014

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmama yön veren ve bu yolda desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Şeyda POLAT'a, ilerlemem için beni destekleyen ve tezime büyük katkı sunan hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ş. Hakan ATAPEK'e içten ve sonsuz teşekkür ederim.

Tez sürecinde deneysel çalışmaların başlamasında ve ilerlemesinde önemli katkısı olan Sayın Emine DENİZKUŞU'na, deneysel çalışma için gerekli ısıl işlem ve nitrasyon işlemlerinin gerçekleşmesini sağlayan Schmolz-Bickenbach Çelik A.Ş. bünyesinde çalışan Sayın Ali BİBER'e ve kaplama işlemlerinin yapılmasını sağlayan Ionbond Tinkap Yüzey Teknolojileri San. Tic. A.Ş.ailesine teşekkürlerimi sunuyorum.

Yüksek lisans çalışmalarımda arka planda bana tüm desteğini sunan ve tez için tasarlanan aşınma cihazını oluşturan canım ağabeyim Mehmet AKTAŞ'a ve bu süreçte kahrımı çeken sevgili eşi Büşra AKTAŞ'a, deneysel çalışma sürecinde lojistik destek sunan Ali ÖZÜREDİ veAktaş Lazer Kesim ailesine, lisans eğitimimizden beri birlikte yol aldığımız sevgili arkadaşım Ümran ERTEN'e gönülden teşekkür ederim.

Stresimi çeken, çözüm arayışında hep yanımda olan Özgür ÇELİK'e ve bu süreçte onunla birlikte bana desteklerini sunan ÇELİK ailesine gönülden teşekkür ederim. Son olarak hayatımın her anında yanımda olan, sevincimi, üzüntümü, heyecanımı paylaşan, her kararımda arkamda duran ve beni desteklediklerini her daim gösteren canım annem Gülay AKTAŞ'a ve canım babam Nazmi AKTAŞ'a sonsuz teşekkür ediyorum.

Haziran – 2014 Gülşah AKTAŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ x
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR xii
ÖZET xiv
ABSTRACT xv
GİRİŞ 1
1. SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ 4
1.1. Alaşım Elementlerinin Sıcak İş Takım Çeliklerinin Özelliklerine Etkisi 5
1.2. Sıcak İş Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması 6
1.2.1. Kromlu sıcak iş takım çelikleri 9
1.2.2. Tungstenli sıcak iş takım çelikleri 9
1.2.3. Molibdenli sıcak iş takım çelikleri 10
1.3. Sıcak İş Takım Çeliklerine Uygulanan Isıl İşlemler 11
1.3.1. Östenitleştirme 11
1.3.2. Su verme 14
1.3.3. Temperleme 15
1.4. Sıcak İş Takım Çeliklerine Uygulanan Yüzey İşlemleri 17
1.4.1. Nitrasyon 19
1.4.1.1. Gaz nitrasyon 23
1.4.1.2. Sıvı nitrasyon 24
1.4.1.3. Plazma nitrasyon 24
1.4.2. Fiziksel buhar biriktirme 24
1.4.2.1. Mekanizma 25
1.4.2.2. Kaplama morfolojisi ve büyüme modelleri 28
1.4.2.3. İnce film kaplamaların mekanik özellikleri 30
2. SÜRTÜNME VE AŞINMA 32
2.1. Sürtünme 32
2.2. Aşınma 35
2.2.1. Abrasif aşınma 37
2.2.2. Adhesif aşınma 39
2.2.3. Yorulma aşınması 40
2.2.4. Tribokimyasal aşınma 41
2.3. Aşınma Test Düzenekleri 42
2.4. Uygulanan İşlemlerin Aşınma Üzerine Etkisi 45
2.4.1. Isıl işlemin etkisi 45
2.4.2. Nitrasyonun etkisi 46
2.4.3. İnce film kaplamaların etkisi 50
2.4.3.1. Kaplama sertliğinin etkisi 51
2.4.3.2. Kaplama kalınlığının etkisi 53
2.4.3.3. Pürüzlülüğün etkisi 54
2.5. İnce Film Kaplamaların Aşınma Davranışları 55

3. MALZEME VE YÖNTEM 59
3.1. Malzeme Seçimi 59
3.2. Malzemelerin Kodlama Sistematiği 60
3.3. Isıl İşlem Uygulamaları 62
3.4. Yüzey İşlem Uygulamaları 62
3.4.1. Nitrasyon 63
3.4.2. Katodik ark fiziksel buhar biriktirme 63
3.5. Metalografik İşlemler ve Mikroyapısal İncelemeler 64
3.6. Sertlik Ölçümleri 65
3.7. Aşınma Çalışmaları 66
3.7.1. Kuru sürtünme testleri 66
3.7.2. Sıcak aşınma testleri 68
3.8. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi 69
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 70
4.1. Mikroyapısal Karakterizasyon 70
4.1.1. Isıl işlem sonrası malzeme karakterizasyonu 70
4.1.2. Kesit incelemeleri 71
4.2. Sertlik Ölçümleri 77
4.3. Aşınma Test Verilerinin Değerlendirilmesi 79
4.3.1. Kuru sürtünme testleri 80
4.3.1.1. Sertleştirilmiş çelik bilya ile aşınma 80
4.3.1.2. Seramik bilya ile aşınma 86
4.3.2. Sıcak aşınma testleri 101
4.4. Aşınma Yüzeylerinin Mikroskopik İncelenmesi 105
4.4.1. Kuru sürtünme testleri sonrası yüzey incelemeleri 105
4.4.1.1. Sertleştirilmiş çelik bilya ile aşınma 106
4.4.1.2. Seramik bilya ile aşınma 115
4.4.2. Sıcak aşınma 124
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 137
KAYNAKLAR 141
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 146
ÖZGEÇMİŞ 148

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. AISI H11 sıcak iş takım çeliğinden üretilmiş ekstrüzyon kalıbı 4
Şekil 1.2. Sıcak iş takım çeliklerine uygulanan ısıl işlem kademelerinin şematik gösterimi 11
Şekil 1.3. Alaşım elementlerinin ötektoid sıcaklığa etkisi 13
Şekil 1.4. Alaşımsız %0,8 C içeren ötektoid çelikte perlitik yapının östenite dönüşümü 13
Şekil 1.5. M_s ve M_f sıcaklıklarına, a) karbon miktarının, b) 1% C değerinde alaşım elementlerinin etkisi 15
Şekil 1.6. 1025 °C' de 2 saat östenitleştirilmiş ve havada su verilmiş (HS) H13 çeliğinin sertlik değererinin temperleme sıcaklığı ile değişimi 16
Şekil 1.7. Yüzey işlemlerinin sınıflandırılması 19
Şekil 1.8. Nitrasyon işleminde elde edilen tabakalar 20
Şekil 1.9. Çelik yüzeyinde γ′ ve ε-nitrürlerin çekirdeklenmesinin şematik gösterimi 21
Şekil 1.10. Alaşım elementlerinin a) nitrasyon sonrası çeliğin sertliğine, b) nitrasyon tabakasının derinliğine etkisi (Çelik bileşimi: 0,35 %C, 0,30 % Si, 0,70% Mn) 22
Şekil 1.11. H13 çeliğinden yapılmış aluminyum ekstrüzyon kalıbının şematik gösterimi 23
Şekil 1.12. Sputterleme prosesinin şematik gösterimi 26
Şekil 1.13. Katodik ark fiziksel buhar biriktirme yönteminin çalışma mekanizması 26
Şekil 1.14. Büyüme prosesinin şematik gösterimi 28
Şekil 1.15. Kaplama morfolojileri 28
Şekil 1.16. Büyüme sırasında gerçekleşen atomik olaylar 29
Şekil 1.17. İnce film büyüme modelleri 30
Şekil 2.1. Kayma sürtünmesini oluşturan mekanizmalar, a) adhezyon, b) kazıma/pulluklama, c) pürüzlerin deformasyonu 33
Şekil 2.2. Kayma sisteminde oluşan üç aşınma basamağı 33
Şekil 2.3. Kayma sisteminde ilk kayma periyodunda oluşan sürtünme mekanizmasının altı adımı 34
Şekil 2.4. Aşınma katsayısının sürtünme katsayısı ile değişimi 36
Şekil 2.5. Aşınma mekanizmaları, a) adhesif aşınma, b) abrasif aşınma, c) yorulma aşınması, d) tribokimyasal aşınma 37
Şekil 2.6. İki boyutlu ve üç boyutlu abrasif aşınma 38
Şekil 2.7. Abrasif aşınma türleri, a) düşük gerilmeli, b) yüksek gerilmeli, c) oyuklu, d) cilalama abrasif aşınması 39
Şekil 2.8. Yorulma aşınması 41
Şekil 2.9. Tribokimyasal aşınma sırasında oluşan mekanizmalar 42
Şekil 2.10. Kayma aşınması test düzeneklerinin geometrik gösterimleri, a), b), c) simetrik test düzenekleri, d) block on cylinder, e) ve f) pin on disc 43

Şekil 2.11. "Block on cylinder" test düzeneğinde a) uyumsuz, b) uyumlu temas 44
Şekil 2.12. Yüzeyden uzaklaştıkça nitrasyon tabakasının abrasif ve adhesif aşınma direncinin değişimi 46
Şekil 2.13. Porlu bölgenin a) adhesif aşınmaya ve b) abrasif aşınmaya etkisi..... 48
Şekil 2.14. Beyaz tabakadaki ε faz bileşiminin a) adhesif aşınmaya, b) yüzey yorulma direncine etkisi 48
Şekil 2.15. Altlık malzemenin mukavemetinin difüzyon tabakasının a) adhesif aşınma direncine, b) abrasif aşınma direncine etkisi..... 49
Şekil 2.16. Nitrasyon derinliğinin a) adhesif aşınma direncine etkisi, b) aşınma direncine ve parça ömrüne etkisi, $dn_1<dn_2<dn_3<dn_4$..... 49
Şekil 2.17. Difüzyon tabakasının kompozisyonunun a) abrasif, adhesif aşınma direncine etkisi, b) yüzey yorulması aşınmasına direncine etkisi 50
Şekil 2.18. Dört ana parametrenin, kaplama-numune sertlik ilişkisi, kaplama sertliği, kalınlığı ve pürüzlülüğünün aşınma mekanizmalarına etkisi..... 51
Şekil 2.19. Altlık sertliğinin temas alanına ve sürtünme kuvvetine etkisi. 52
Şekil 2.20. a) Sert aşındırıcı yumuşak yüzey üzerinde oluşturduğu kazıma, b) kazıma yumuşak altlık üzerine sert kaplama yapılarak engellenmesi, c) sürtünmeyi azaltmak için sert kaplama üzerine yapılan yumuşak mikrofilm kaplama 52
Şekil 2.21. Sert aşındırıcı bilyanın sert kaplama ile kaplanmış yumuşak altlık üzerinde hareketi, a) kalın kaplama, b) ince kaplama 53
Şekil 2.22. Sert pürüzlü aşındırıcının sert kaplama ile kaplanmış yumuşak altlık mazeme ile teması; a) kalın kaplamada temas alanın azalması ve pürüzlerin kilitlenmesi, b) ince kaplamada pürüz yorulması 55
Şekil 3.1. Numunelere uygulanan kodlama sistematiği 60
Şekil 3.2. Mikroyapısal karakterizasyonda kullanılan a) Nikon Eclipse L150A model ışık mikroskobu, b) Jeol JSM 6060 model taramalı elektron mikroskobu, c) Jeol JSM 6060LV model taramalı elektron mikroskobu..... 65
Şekil 3.3. Wilson Hardness model mikro sertlik cihazı 66
Şekil 3.4. "Ball on disc" tipi aşınma deney cihazının şematik gösterimi..... 67
Şekil 3.5. Deneysel çalışmada kullanılan "block on cylinder" tipi aşınma cihazı 68
Şekil 3.6. Deneysel çalışmada kullanılan KLA Tencor P-6 model profilometre..... 69
Şekil 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan sıcak iş takım çeliklerine ait IM ve SEM görüntüleri; a) ve b) 3100, c) ve d) 7100, e) ve f) 9100..... 71
Şekil 4.2. Nitrasyon uygulanmış 9150 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri 72
Şekil 4.3. AlTiN kaplanmış 7101 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri 73
Şekil 4.4. CrN kaplı 3102 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri..... 73
Şekil 4.5. CrN/AlTiN kaplı 7103 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri 74

Şekil 4.6. Nitrasyon/AlTiN kaplanmış 7151 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri 75
Şekil 4.7. Nitrasyon/CrN kaplı 3152 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri 76
Şekil 4.8. Nitrasyon/CrN/AlTiN kaplı 9153 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri 77
Şekil 4.9. Çelik türüne bağlı olarak uygulanan kaplamalara ait sertlik diyagramı a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama 79
Şekil 4.10. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış 3100, 7100, 9100 çeliklerine ait 100Cr6 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı 82
Şekil 4.11. Nitrasyon uygulanmış 3150, 7150, 9150 çeliklerine ait 100Cr6 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı 83
Şekil 4.12. 1.2343 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 100Cr6 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı-mesafe diyagramı 84
Şekil 4.13. 1.2367 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 100Cr6 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı-mesafe diyagramı 85
Şekil 4.14. 1.2999 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 100Cr6 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı-mesafe diyagramı 86
Şekil 4.15. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış 3100, 7100, 9100 çeliklerine ait Al_2O_3 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı 89
Şekil 4.16. Nitrasyon uygulanmış 3150, 7150, 9150 çeliklerine ait Al_2O_3 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı 89
Şekil 4.17. 1.2343 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin Al_2O_3 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı-mesafe diyagramı 90
Şekil 4.18. 1.2367 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin Al_2O_3 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı-mesafe diyagramı 91
Şekil 4.19. 1.2999 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin Al_2O_3 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı-mesafe diyagramı 91
Şekil 4.20. Isıl işlem uygulanmış numunelere ait aşınma verileri; a) aşınma izi derinlik – genişlik ilişkisi, b) sertlik – sürtünme katsayısı, c) sertlik – hacim kaybı, d) sertlik – aşınma hızı 93
Şekil 4.21. Nitrasyon uygulanmış numunelere ait aşınma verileri; a) aşınma izi derinlik – genişlik ilişkisi, b) sertlik – sürtünme katsayısı, c) sertlik – hacim kaybı, d) sertlik – aşınma hızı 94
Şekil 4.22. Kaplanmış 1.2343 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma izi derinlik – genişlik ilişkisi; a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama 95

Şekil 4.23. Kaplanmış 1.2343 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma verileri; a) sertlik – sürtünme katsayısı, b) sertlik – hacim kaybı, c) sertlik – aşınma hızı 96
Şekil 4.24. Kaplanmış 1.2367 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma izi derinlik – genişlik ilişkisi; a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama 97
Şekil 4.25. Kaplanmış 1.2367 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma verileri; a) sertlik – sürtünme katsayısı, b) sertlik – hacim kaybı, c) sertlik – aşınma hızı 98
Şekil 4.26. Kaplanmış 1.2999 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma izi derinlik – genişlik ilişkisi; a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama 99
Şekil 4.27. Kaplanmış 1.2999 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma verileri; a) sertlik – sürtünme katsayısı, b) sertlik – hacim kaybı, c) sertlik – aşınma hızı 100
Şekil 4.28. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış 3100, 7100, 9100 çeliklerine ait 450 °C'de 6080 Al alaşımı karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı 102
Şekil 4.29. Nitrasyon uygulanmış 3150, 7150, 9150 çeliklerine ait 450 °C'de 6080 Al alaşımı karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı 102
Şekil 4.30. 1.2343 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 450 °C'de 6080 Al alaşımı karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı 103
Şekil 4.31. 1.2367 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 450 °C'de 6080 Al alaşımı karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı 104
Şekil 4.32. 1.2999 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 450 °C'de 6080 Al alaşımı karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı 105
Şekil 4.33. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış çeliklerin aşınma izlerine ait IM görüntüleri; a) 1.2343, b) 1.2367, c) 1.2999 106
Şekil 4.34. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış 3100 kodlu numunenin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri 107
Şekil 4.35. Nitrasyon uygulanmış çeliklerin aşınma izlerine ait IM görüntüleri; a) 1.2343, b) 1.2367, c) 1.2999 108
Şekil 4.36. 3150 kodlu numunenin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri 108
Şekil 4.37. Nitrasyon uygulanmış 3150 kodlu numunenin aşınma izinin a) çizgi spektrumun gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgi spektrum sonucu 109
Şekil 4.38. Kaplanmış 1.2343 numunelere ait ışık mikroskop aşınma yüzey görüntüleri; a) 3101, b) 3151, c) 3102, d) 3152, e) 3103, f) 3153 110
Şekil 4.39. 3152 kodlu numuneye ait aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri 111
Şekil 4.40. 3152 kodlu numuneye ait aşınma izinin a) çizgi spektrumun gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgi spektrum sonucu 111
Şekil 4.41. Kaplanmış 1.2367 numunelere ait ışık mikroskop aşınma yüzey görüntüleri; a) 7101, b) 7151, c) 7102, d) 7152, e) 7103, f) 7153 112
Şekil 4. 42. 7101 kodlu numunenin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri 113

Şekil 4.43. 7101 kodlu numuneye ait aşınma izinin a) çizgi spektrumun gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgi spektrum sonucu 113
Şekil 4.44. Kaplanmış 1.2999 numunelere ait ışık mikroskop aşınma yüzey görüntüleri; a) 9101, b) 9151, c) 9102, d) 9152, e) 9103, f) 9153 114
Şekil 4.45. 9103 kodlu numunenin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri 115
Şekil 4.46. 9103 kodlu numuneye ait aşınma izinin a) çizgi spektrumun gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgi spektrum sonucu 115
Şekil 4.47. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış çeliklerin aşınma izlerine ait IM görüntüleri; a) 1.2343, b) 1.2367, c) 1.2999..... 116
Şekil 4.48. Nitrasyon işlemi uygulanmış çeliklerin aşınma izlerine ait IM görüntüleri; a) 1.2343, b) 1.2367, c) 1.2999 117
Şekil 4.49. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası kaplanmış 1.2343 numunelerin aşınma yüzeylerine ait IM görüntüleri; a) 3101, b) 3151, c) 3102, d) 3152, e) 3103, f) 3153..... 118
Şekil 4.50. 3101 kodlu numunenin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri 119
Şekil 4.51. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası AlTiN kaplanmış 3101 kodlu numunenin yüzeyinde elde edilen aşınma izinin a) çizgisel analizin gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgisel analiz sonucu 119
Şekil 4.52. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası kaplanmış 1.2367 numunelerin aşınma yüzeylerine ait IM görüntüleri; a) 7101, b) 7151, c) 7102, d) 7152, e) 7103, f) 7153..... 120
Şekil 4.53. a) ve b) 7102 kodlu numuneye ait, c) ve d) 7152 kodlu numuneye ait aşınma izinin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri..... 121
Şekil 4.54. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası a) 7102 numunesinin aşınma izine ait çizgi analizin gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgi analiz sonucu**,** c) 7152 numunesinin aşınma izine ait çizgi analizin gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, d) çizgi analiz sonucu..... 122
Şekil 4.55. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası kaplanmış 1.2999 numunelerin aşınma yüzeylerine ait IM görüntüleri; a) 9101, b) 9151, c) 9102, d) 9152, e) 9103, f) 7153..... 123
Şekil 4.56. 9153 numunesinin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri 124
Şekil 4.57. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası nitrasyon/CrN/AlTiN kaplanmış 9153 kodlu numunenin yüzeyinde elde edilen aşınma izinin a) çizgisel analizin gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgisel analiz sonucu..... 124
Şekil 4.58. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelere ait sıcak aşınma sonrası alansal EDS analizlerinin alındığı yüzey görüntüleri a) 3100, b) 7100, c) 9100 126
Şekil 4.59. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelere ait sıcak aşınma sonrası kesit görüntüleri; a) ve b) 3100, c) ve d) 7100, e) ve f) 9100 127
Şekil 4.60. Nitrasyon uygulanmış numunelere ait sıcak aşınma sonrası alansal EDS analizlerinin alındığı yüzey görüntüleri; a) 3150, b) 7150, c) 9150..... 128
Şekil 4.61. Sıcak aşınma sırasında numune yüzeylerine aluminyum sıvanmasını gösteren SEM görüntüleri; a) 3152, b) 3103, c) 7152 d) 7153, e) 9102, f) 9103 130

Şekil 4.62. Sıcak aşınma sırasında kaplama yüzeylerinde intermetalik nedenli oluşan çizilmeyi gösteren SEM görüntüleri; a) AA6080 alaşımı ile kaplanmış 7100 yüzeyi ve intermetalikler, b) 3102, c) 3152, d) 7151, e) 9151 131
Şekil 4.63. Sıcak aşınma sırasında kaplama yüzeylerinde oluşan droplet ayrışmasını gösteren SEM görüntüleri a) 3101, b) 3153, c) 7101, d) 7151, e) 9103 133
Şekil 4.64. Sıcak aşınma sırasında oluşan kaplama çatlaklarını gösteren SEM görüntüleri a) 3101, b) 7102, c) 7103, d) 9102 134
Şekil 4.65. Sıcak aşınma sırasında oluşan kaplama ayrışmasını gösteren SEM görüntüleri a) 3101, b) 3151, c) ve d) 7101, e)7103, f) 9151 135

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Sıcak iş takım çeliklerinin kompozisyon aralıkları 7
Tablo 1.1. (Devam)Sıcak iş takım çeliklerinin kompozisyon aralıkları 8
Tablo 1.2. Sıcak iş takım çeliklerinin sertliğinin sıcaklık ile değişimi 8
Tablo 1.3. Nitrasyon işleminin özellikleri 20
Tablo 3.1. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan sıcak iş takım çeliklerinin kimyasal kompozisyonları (ağ. %) 60
Tablo 3.2. Numunelere uygulanan işlemler 61
Tablo 3.3. Sıcak iş takım çeliklerine uygulanan ısıl işlemler ve matriks sertlik değerleri 62
Tablo 3.4. Sıcak iş takım çeliklerine uygulanan gaz nitrasyon parametreleri 63
Tablo 3.5. Numunelere uygulanan PVD kaplama parametreleri 64
Tablo 3.6. "Ball on disc" tipi tribometre ile yapılan aşınma testinde kullanılan aşınma parametreleri 67
Tablo 3.7. "Block on cylinder" tipi tribometre ile yapılan aşınma testinde kullanılan parametreler 69
Tablo 4.1. 9150 kodlu numunenin Şekil 4.2'de verilen kesitinde işaretlenen noktalara ait EDS analiz sonuçları (ağ. %) 72
Tablo 4.2. 7101 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %) 73
Tablo 4.3. 3102 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %) 74
Tablo 4.4. 7103 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %) 74
Tablo 4.5. 7151 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %) 75
Tablo 4.6. 3152 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %) 76
Tablo 4.7. 9153 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %) 77
Tablo 4.8. Numune yüzeylerine ait sertlik değerleri 78
Tablo 4.9. 1.2343 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve 100Cr6 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri 81
Tablo 4.10. 1.2367 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve 100Cr6 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri 81
Tablo 4.11. 1.2999 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve 100Cr6 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri 82
Tablo 4.12. 1.2343 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve Al_2O_3 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri 87
Tablo 4.13. 1.2367 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve Al_2O_3 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri 88
Tablo 4.14. 1.2999 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve Al_2O_3 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri 88
Tablo 4.15. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelere ait EDS spektrum sonuçları (ağ. %) 126
Tablo 4.16. Nitrasyon uygulanmış numunelere ait EDS spektrum sonuçları (ağ. %) 129
Tablo 4. 17.Şekil 4.61a'da verilen görüntüye ait EDS spektrum sonuçları (ağ. %) 131

Tablo 4.18. Şekil 4.62a'da verilen intermetaliğe ait EDS spektrum sonuçları (ağ. %) 132
Tablo 4.19. Şekil 4.65a, b ve c' de verilen numune yüzeylerine ait EDS spektrumsonuçları (ağ. %)..... 136

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

μ	: Sürtünme katsayısı
τ	: Kayma gerilmesi, (N/mm^2)
A	: Temas alanı, (mm^2)
A_1	: Ötektoid sıcaklığı, (°C)
A_3	: Ötektoid altı çeliklerde tam östenit alanına geçiş sıcaklığı, (°C)
d	: Aşınma izi genişliği, (mm)
d_n	: Nitrasyon derinliği, (mm)
F	: Sürtünme kuvveti, (N)
h	: Bilya izi derinliği, (mm)
H	: AISI sisteminde sıcak iş takım çeliği grubu
m	: Toplam sürtünme mesafesi, (m)
M_s	: Martenzit başlangıç sıcaklığı, (°C)
M_f	: Martenzit bitiş sıcaklığı, (°C)
N	: Normal yük, (N)
p	: Sabit basınç, (atm)
r	: Bilya yarıçapı, (mm)
R	: Aşınma izi yarıçapı, (mm)
T1	: Bölge 1'den bölge 2'ye geçiş sıcaklığı, (°C)
T2	: Bölge 2'den bölge 3'e geçiş sıcaklığı, (°C)
T_m	: Ergime sıcaklığı, (°C)
V	: Hacim kaybı, (mm^3)
W_r	: Spesifik aşınma hızı (oranı), (mm^3/Nm)
W_R	: Aşınma direnci

Kısaltmalar

AA6080	: Aluminum Association 6080 Alloy (Aluminyum Birliği 6080 Alaşımı)
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ASTM	: American Society for Testing Materials (Amerika Test Etme ve Malzeme Topluluğu)
CAPVD	: Cathodic Arc Physical Vapor Deposition (Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme)
CVD	: Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
EDS	: Energy Dispersive Spectrometer (Enerji Dağılım Spektrometresi)
FV	: Frank-van der Merwe
HMT	: Hacim Merkez Tetragonal
HRC	: Hardness of Rockwell C (Rockwell C Sertliği)
HS	: Havada Su Verme
HV	: Hardness of Vickers (Vickers Sertliği)
IM	: Işık Mikroskopu

PVD	: Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
rpm	: Revolutions Per Minute (Dakikadaki Dönüş Sayısı)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopu)
sccm	: Standard Cubic Centimeters Per Minute (Dakika Başına Akan Standart Santimetreküp)
VW	: Volmer – Weber
YMK	: Yüzey Merkez Kübik

ALUMİNYUM EKSTRÜZYONUNDA KALIP MALZEMESİ OLARAK KULLANILAN SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN YÜZEY İŞLEMLERİ VE TRİBOLOJİK KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Sıcak iş takım çelikleri genellikle enjeksiyon, ekstrüzyon ve dövme gibi yüksek sıcaklık proseslerinde kalıp malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çalışma koşullarında yüksek termomekanik ve tribolojik gerilmelere maruz kalan kalıplarda, aşınma, plastik şekil değiştirme ve termal yorulma gibi hasarlar meydana gelir. Hasarların önlenebilmesi için sıcak iş takım çeliklerinde alaşım kompozisyonu, ısıl işlem ve yüzey işlemleri önemli parametreleri oluşturmaktadır. İyi tasarlanmış alaşım kompozisyonuna sahip sıcak iş takım çelikleri çalışma sıcaklıklarında mekanik özelliklerini korurken, kalıp yüzeylerine uygulanan yüzey işlemleri sayesinde şekillenen metalin aşındırıcı etkisine karşı korunurlar.

Çalışma kapsamında, konvansiyonel olarak ısıl işlem uygulanmış farklı alaşım kompozisyonlarına sahip sıcak iş takım çeliklerinin yüzey işlemleri ile aşınma davranışlarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla farklı alaşım kompozisyonlarına sahip DIN 1.2343, DIN 1.2367 ve DIN 1.2999 sıcak iş takım çelikleri seçilmiştir. Çeliklere öncelikle konvansiyonel olarak ısıl işlem uygulanmış ve ardından seçili numunelere nitrasyon ve fiziksel buhar biriktirmeyöntemi ile CrN, AlTiN tek kaplamalar ve CrN/AlTiN çift kaplamalar uygulanmıştır. Uygulanan işlemlerin ardından numunelerin aşınma davranışları oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta incelenmiştir. Oda sıcaklığında yapılan aşınma testlerinde çelik ve seramik aşındırıcılar kullanılmıştır. AA6080 alaşımının ekstrüzyon koşullarında, çelik yüzeylerinin davranışlarını belirlemek amacıyla, testler 450 °C'de AA6080 alaşımına karşı gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonrasında aşınma yüzeyleri profilometre, ışık mikroskopu, taramalı elektron mikroskopu ve enerji dağılım spektrometresi ile karakterize edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Isıl İşlem, Sıcak İş Takım Çelikleri, Yüzey İşlemleri.

SURFACE TREATMENT PROCESSES AND TRIBOLOGICAL CHARACTERIZATION OF HOT WORK TOOL STEELS USED AS DIE MATERIAL IN ALUMINUM EXTRUSION

ABSTRACT

Hot work tool steels are used as die materials in high temperature forming processes like injection, extrusion and forging. Failures like wear, plastic deformation and thermal fatigue occurinthe dies that are exposed to thermomechanical and tribological stresses under working conditions. Alloy composition, heat and surface treatment processes are important parameters for the prevention of such failures in hot work tool steels. While a well designed alloy composition protects their mechanical properties at high working temperatures, surface treatmentsapplied on the die surfaces protectsthem against wear during metal forming.

In this study, it is aimed to improve the wear behavior of conventionally heat treated hot work tool steels, by applying various surface treatment processes. DIN 1.2343, DIN 1.2367 and 1.2999 hot work tool steels having different alloy compositions were chosen for this purpose. Conventional heat treatment processes were applied to the steels first and thensurface treatment processes were applied to the selected samples, like nitridingand CrN, AlTiN single coatings, CrN/AlTiN duplex coatings by physical vapor deposition. Wear behavior of the samples were investigated at room temperature and elevated temperature, after these treatments. Steel and ceramic counterpart materials were used for the wear tests performed at room temperature. High temperature wear tests, on the other hand, were performed at 450 °C against AA6080 alloy, in order to simulate the conditions in aluminum extrusion and to evaluate the performance of die material. Worn surfaces were characterized after the tests using profilometer, light microscope, scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer.

Key Words: Wear, Heat Treatment, Hot Work Tool Steels, Surface Treatment.

GİRİŞ

Malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan dövme, ekstrüzyon, enjeksiyon gibi şekillendirme yöntemlerinde çoğu zaman sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır. Şekillendirme işleminin yapılabilmesi için çıkılan sıcaklıklarda kullanılan takımın şeklini ve sertliğini koruyabilmesi gerekmektedir. Oluşan bu tip yüksek sıcaklık ve yüklenme koşullarında çalışabilecek takım malzemesi olarak sıcak iş takım çelikleri geliştirilmiştir. Genel olarak sıcak iş takım çelikleri AISI sınıflandırma sisteminde H grubu olarak gösterilmekte ve 200-1000 °C sıcaklık aralığında kullanılabilecek farklı alaşımlı çeliklerden oluşmaktadır. Alaşım kompoziyonuna göre sıcak iş takım çeliklerinin sertlik, mukavemet, tokluk gibi mekanik özellikleri değişmekte, bu mekanik özellikler de çeliklerin kullanılabileceği çalışma koşullarını belirlemektedir [1-6].

Sıcak iş takım çeliklerinin çalışırken maruz kalacağı koşullar şekillendirme yöntemine göre değişmektedir, çünkü her yöntem kendine özgü çalışma koşulları üretmektedir. Örneğin enjeksiyon ile şekillendirme yönteminde kısa süreli sıcaklık çevrimi ve tekrarlı yüklenme oluşurken, ekstrüzyon yönteminde uzun süreli yüksek sıcaklık, mekanik yüklenme ve tribolojik zorlama söz konusudur. Koşullar farklılık gösterse de kalıp olarak kullanılan sıcak iş takım çeliklerinden genel olarak beklenen özellikler, kullanım sıcaklığında sertliğini koruması, plastik şekil değişimine uğramaması, aşındırıcı etkiye karşı şeklini muhafaza etmesi, mekanik ve termal çevrimlere kırılmadan uzun süre dayanabilmesidir [1,2]. İstenilen bu özelliklerin bir arada elde edilmesi ancak uygun alaşım kompozisyonuna sahip sıcak iş takım çeliklerine ısıl işlem ve bazı durumlarda yüzey sertleştirme işlemlerinin uygulanmasıyla mümkün olmaktadır [1-11].

Sahip olduğu orta derecede karbon miktarının yanında Cr, Mo, V, W gibi karbür yapıcı alaşım elementlerinin sayesinde, sıcak iş takım çeliklerine sertleştirme ve temperleme kademelerinden oluşan ısıl işlemin ardından yüksek sertlik ve yeterli

tokluk kazandırılmaktadır [1-8]. Elde edilen yüksek sertlik şekillenen malzemenin aşındırıcı etkisine karşı direnç oluşmasını, yüksek sıcaklıkta plastik şekil değişiminin engellenmesini sağlarken, temperleme ile edilen tokluk özelliği, termal ve mekanik çevrimlerde takımın yorulma ömrünü arttırarak kırılmadan uzun süre çalışabilmesini sağlamaktadır [1-3]. Temperleme sıcaklığının üzerine çıkıldığı koşullarda takım sertliğini ve mukavemetini kaybettiği için temperleme işlemi ile takımın kullanılabileceği limit sıcaklık belirlenmektedir. Kalıp şeklinin korunabilmesi için çoğu zaman ısıl işlem ile elde edilen sertlik yeterli olmamaktadır. Yüzey sertleştirme ya da kaplama işlemi ile yüzeyleri sertleştirilen kalıplar, şekillenen malzemenin aşındırıcı etkisine, yüksek sıcaklığın neden olduğu yumuşamaya, sıcaklık değişimi nedeniyle oluşan termal yorulmaya karşı daha dirençli hale gelmektedirler. Kalıbın iç kısımlarının tok, yüzeyinin sert istenildiği durumlarda da yüzey sertleştirme ya da kaplama işlemleri ile sertleştirilmektedir [2].

Ekstrüzyon yönteminde olduğu gibi kalıpların uzun süreli sıcaklığa ve malzeme akışına maruz kaldığı yöntemlerde, kalıplar aşınma ve aşırı ısınma nedeniyle deforme olmakta şekillerini kaybetmektedir. Yine benzer şekilde dövme yönteminde kalıplar, yüksek mekanik zorlanmalar altında çatlamakta ve bir yandan da yüzeyleri aşınmaktadır. Kalıp yüzeylerinde oluşan bu hasarlar bir yandan kalıbın ömrünü azaltırken diğer yandan da ürün özelliklerini etkilemekte ve maliyet artışına neden olmaktadır. Bu nedenle uzun vadede kalıpta hasarın, deformasyonun engellenmesini sağlayan, kalıp ömrünü uzatan işlemlere önemli yatırımlar yapılmaktadır [1-2]. Örneğin, ekstrüzyon kalıplarına ısıl işlem ile tokluk kazandırılırken düşen sertliği arttırmak, yüzeyi aşınmaya ve yüksek sıcaklık nedenli plastik deformasyona karşı daha dirençli hale getirmek için yüzeylere nitrasyon gibi termokimyasal işlemler, lazer ışınları ile sertleştirme ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) veya kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleriyle kaplama işlemi gibi farklı yüzey sertleştirme işlemleri uygulanmakta ve geliştirilmektedir [1-2,11-16].

Yüzey sertliğini ve aşınma direncini arttırmak için yapılan çalışmalarda son zamanlarda PVD ile yapılan CrN, TiN, AlTiN, AlCrN gibi ince sert kaplamalara ağırlık verilmektedir [12, 16-21].Birol ve Yüksel gaz nitrasyonlu ve PVD ile AlTiN kaplanmış H13 sıcak iş takım çeliği yüzeylerinin aluminyum ekstrüzyonu koşullarında aşınma değerlerini kıyasladıklarıçalışmalarında kaplamanın nitrasyona

göre daha iyi sonuç verdiğini raporlamışlardır [18].Seramik kaplamanın yüzeydeki yapışması, sertliği ve oksidasyon direnci kaplamanın aşınma direncini etkilemektedir. Pellizzari kaplamanın yapışmasının, kaplamanın nitrasyon işlemi ile elde edilen difüzyon tabakasının üzerine yapılması ile arttırıldığını bildirmiştir [22].

Tez çalışması kapsamında, farklı kimyasal kompozisyona sahip üç sıcak iş takım çeliğine ısıl işlem ve nitrasyon uygulanmış ve CrN, AlTiN, CrN/AlTiN ile kaplanmıştır. Yapılan ısıl işlem ve yüzey işlemleri sonucunda çeliklerin oda sıcaklığında ve AA6080 alaşımının ekstrüzyon sıcaklığında aşınma davranışları incelenmiştir.

1. SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ

Sıcak iş takım çelikleri, metal ve metal dışı malzemelere yüksek sıcaklıkta form verilmesi için kullanılan enjeksiyon, ekstrüzyon ve dövme gibi plastik şekil verme yöntemlerinde kalıp olarak kullanılmaktadır. AISI sisteminde H grubu olarak gösterilen sıcak iş takım çelikleri 200 °C sıcaklığın üzerinde termal, mekanik ve tribolojik gerilmelerin oluşturduğu kombinasyonadayanabilecek özellikte tasarlanmışlardır [1]. Şekil 1.1'de aluminyum ekstrüzyonunda kullanılan AISI H11 sıcak iş takım çeliğinden üretilmiş kalıp örnekleri verilmiştir [23].



Şekil 1.1. AISI H11 sıcak iş takım çeliğinden üretilmiş ekstrüzyon kalıbı [23]

Orta derecede karbon (%0,35-0,45) ve %6-25 oranında krom, molibden, vanadyum, tungsten gibi alaşım elementleri içeren alaşım kompozisyonu sayesinde sıcak iş takım çelikleri, ısıl işlem uygulaması ile 44-50 HRC sertliğe, yeterli tokluğa, yumuşama direnci, şok direnci, aşınma direnci gibi mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Sıcak iş takım çeliklerine kazandırılan özellikler ve çalışma koşullarında sağladığı faydalar aşağıda belirtilmiştir [1-4, 7].

Yumuşama direnci; çalışma sıcaklığında oluşan deformasyona karşı direnç olarak da söylenebilir ve sıcak iş takım çeliklerini diğer takım çeliklerinden ayıran en önemli özelliktir. Temperleme işlemi ile kazandırılan bu özellik, yüksek sıcaklık ve

deformasyon koşullarında çeliğin mukavemetini ve sertliğini kaybetmeden başka bir ifadeyle plastik deformasyona uğramadan çalışmasını sağlamaktadır [1].

Şok direnci; kalıp olarak kullanılan sıcak iş takım çeliklerinde ani sıcaklık değişiminin ve mekanik yüklenmelerin etkisiyle oluşabilecek ısıl çatlakların ve kırılma hasarının önlenebilmesini sağlamaktadır [1]. Şekillendirme işleminde takım olarak kullanılan sıcak iş takım çelikleri çalışma koşullarında oda sıcaklığından 800 °C'ye kadar değişen sıcaklıklarda sıcak metal ile temas halindedir. Bu temasla birlikte takım yüzeyinden iç kısma doğru sıcaklık farklılığı oluşmaktadır. Sıcaklık farklılığı katmanlarda farklı basma gerilmeleri oluşmasına neden olur. Şekillendirme işlemi ardından takıma uygulanan soğutma sonrasında ise basma gerilmeleri çekme gerilmelerine dönüşmektedir. Takım çeliği içinde gelişen gerilme farklılıkları nedeniyle çelikte çatlak ağları meydana gelmekte ve ısıl çatlaklar oluşmaktadır. Bu nedenle sıcak iş takım çeliklerinin şok direnci başka bir deyişle ısıl çatlama direncine sahip olması gerekmektedir. Çatlaklardan kaçınmak için sıcak iş takım çeliğinin iyi derecede sıcak mukavemete ve tokluğa sahip olması gerekir [7].

Aşınma direnci; yüksek sıcaklıkta şekillendirilen malzemenin yarattığı tribolojik gerilmelere karşı sıcak iş takım çeliklerinin gösterdiği dirençtir. Aşınma, kalıp olarak kullanılan sıcak iş takım çeliğinde en fazla malzeme kaybına neden olan ve çalışma ömrünü azaltan hasar mekanizmasıdır. Yüksek sıcaklık aşınmasına karşı direnç kazandırılması ile sıcak iş takım çeliklerinin çalışma ömrü uzamaktadır [1].

1.1. Alaşım Elementlerinin Sıcak İş Takım Çeliklerinin Özelliklerine Etkisi

Karbon, çeliğin sertleşebilirliğini sağlayan temel alaşım elementidir. Karbon demir ile ve diğer önemli alaşım elementleri ile karbürler oluşturmaktadır. Oluşturduğu karbürler çeliğin sıcak dayanımını, temper direncini ve aşıma direncini kontrol etmektedir [1,2].

Silisyum miktarındaki artış, akma dayanımını ve kırılma dayanımını arttırmakta ancak tokluğu düşürmektedir [1,2].

Magnezyumun az miktarda ilavesi bile soğuma hızını düşürmekte ve böylece sertleşebilirliği arttırmaktadır. Ayrıca magnezyum, Fe-C faz diyagramında perlit noktasını da sola kaydırmaktadır[1,2].

Nikel, tokluğu önemli ölçüde düşürmeden kesitçe sertleşmeyi ve sıcak dayanımı sağlar. Buna ek olarak magnezyuma benzer şekilde, kritik soğuma hızını düşürür ve tane inceltici olarak rol oynar. Nikel karbür oluşturmaz ve temper gevrekliği oluşturma eğilimi vardır. Bu eğilim diğer elementler ile bastırılabilir[1,2].

Krom takım çeliğinde en önemli olan alaşım elementidir. Kritik soğuma hızını düşürür ve karbon ile beraber sertliği ve böylece mukavemeti ve aşınma direncini kontrol eder. Krom sertleşebilirliği destekler, kalın kesitlerde bile kesitçe sertleşmeyi arttırır. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda temper direncinin geliştirilmesini, korunması sağlar [1,2].

Molibden özel karbürler oluşturur ve böylece sıcak dayanımı ve yorulma direncini arttırır. Küçük miktarlarda ilavesinde bile temper gevrekliğine karşı en önemli etkiyi gösteren elementtir. Bunlara ek olarak kesitçe sertleşme üzerine büyük etkisi vardır ve çeliğin tokluk özelliklerini geliştirir[1,2].

Vanadyum sıcaklık direnci olan kararlı karbürler oluşturur ve V_4C_3 olarak çökelmesiyle ikincil sertliği destekler. Ancak bu karbürlerin 600 °C'nin üzerinde kabalaşması sertlikte ve mukavemette önemli ölçüde azalmaya neden olurlar[1,2].

Tungsten düşük çözünürlüklü karbür $(FeW)_6C$ oluşturur. Karbür çökelmesiyle yüksek sıcaklıkta ikincil sertlik elde edilmesini destekler. Buna ek olarak, tungsten sıcak iş takım çeliğinde ince tane oluşumunu destekler ve aşınma direnci ile birlikte sıcak dayanımı arttırır [1,2].

1.2. Sıcak İş Takım Çeliklerinin Sınıflandırılması

Sıcak iş takım çeliklerinin farklı şekillendirme yöntemlerinin oluşturduğu farklı çalışma koşullarında çalışabilmeleri için farklı sıcak sertlik, sıcak akma mukavemeti, yüksek sıcaklık direnci, şok direnci ve tokluk değerlerine sahip olmaları gerekmektedir. Sıcak iş takım çeliklerinin kullanılacağı her koşula göre ihtiyaç duyulan özellikleri iyi şekilde belirlenmelidir. Bu sayede çalışma koşulunun

gerektirdiği özellikler uygun alaşım kompozisyonu ve uygun ısıl işlem parametreleri ile elde edilebilmektedir [1,7].

İhtiyaç duyulan farklı özelliklerin elde edilebilmesi için sıcak iş takım çelikleri üç gruba ayrılmıştır. Tablo 1.1'de gruplara ayrılmış sıcak iş takım çeliklerinin alaşım kompozisyonları verilmektedir.

1. Kromlu sıcak iş takım çelikleri
2. Tungstenli sıcak iş takım çelikleri
3. Molibdenli sıcak iş takım çelikleri

Sıcak iş takım çeliklerinin seçimi çalışma sırasında oluşan sıcaklık, uygulanan yük ve soğutma koşuluna bağlı olarak yapılır. Örneğin, karbon ve düşük alaşımlı çeliklerin sıcak sertliği 230 °C'den sonra hızla düşmektedir. Kromlu sıcak iş takım çeliklerinin sertliği 425 °C'ye kadar fazla değişiklik göstermezken tungstenli sıcak iş takım çeliklerinin sertliği 620 °C'ye kadar sabit kalmaktadır [1].

Tablo 1.1.Sıcak iş takım çeliklerinin kompozisyon aralıkları [1]

	Kompozisyon (ağ.%) *								
AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
				Kromlu sıcak iş takım çelikleri					
H10	0,35-0,45	0,25-0,70	0,80-1,20	3,00-3,75	< 0,30	2,00-3,00	-	0,25-0,75	-
H11	0,33-0,43	0,20-0,50	0,80-1,20	4,75-5,50	< 0,30	1,10-1,60	-	0,30-0,60	-
H12	0,30-0,40	0,20-0,50	0,80-1,20	4,75-5,50	< 0,30	1,25-1,75	1,00-1,70	<0,50	-
H13	0,32-0,45	0,20-0,50	0,80-1,20	4,75-5,50	<0,30	1,10-1,75	-	0,80-1,20	-
H14	0,35-0,45	0,20-0,50	0,80-1,20	4,75-5,50	<0,30	-	4,00-5,25	-	-
H19	0,35-0,45	0,20-0,50	0,20-0,50	4,00-4,75	<0,30	0,30-0,55	3,75-4,50	1,75-2,20	4,00-4,50

Tablo 1.2. (Devam)Sıcak iş takım çeliklerinin kompozisyon aralıkları [1]

Tungstenli sıcak iş takım çelikleri									
H21	0,26-0,36	0,15-0,40	0,15-0,50	3,00-3,75	<0,30	-	8,50-10,00	0,30-0,60	-
H22	0,30-0,40	0,15-0,40	0,15-0,40	1,75-3,75	< 0,30	-	10,00-11,75	0,25-0,50	-
H23	0,25-0,35	0,15-0,40	0,15-0,60	11,00-12,75	< 0,30	-	11,00-12,75	0,75-1,25	-
H24	0,42-0,53	0,15-0,40	0,15-0,40	2,50-3,50	< 0,30	-	14,00-16,00	0,40-0,60	-
H25	0,22-0,32	0,15-0,40	0,15-0,40	3,75-4,50	< 0,30	-	14,00-16,00	0,40-0,60	-
H26	0,45-0,55	0,15-0,40	0,15-0,40	3,75-4,50	< 0,30	-	17,25-19,00	0,75-1,25	-
Molibdenli sıcak iş takım çelikleri									
H42	0,55-0,70	0,15-0,40	-	3,75-4,50	< 0,30	4,50-5,50	5,50-6,75	1,75-2,20	-

* Cu maks. 0,25 %, P ve S maks. %0,03.

Tablo 1.2'de bazı kromlu ve tungstenli sıcak iş takım çeliklerin ısıl işlem sonrası sertliklerinin sıcaklıkla değişimi verilmektedir. Tungstenli sıcak iş takım çeliklerinin daha yüksek temper direncine/yumuşama direncine ve daha yüksek sıcaklıklarda sıcak sertliğe sahip olduğu görülmektedir [3].

Tablo 1.3. Sıcak iş takım çeliklerinin sertliğinin sıcaklık ile değişimi [3]

AISI	Başlangıç sertliği (HRC)	100 saat bekletildikten sonraki sertlik değerleri (HRC)					
		480 °C	540 °C	595 °C	650 °C	705 °C	760 °C
H13	50,2	48,7	45,3	29,0	22,7	20,1	13,9
H21	49,2	48,7	47,6	37,2	27,4	19,8	15,2
H23	40,8	40,0	40,6	40,8	38,6	33,2	25,8
H26	51,0	50,6	50,3	47,1	38,4	26,9	21,3

Kalıp olarak kullanılan sıcak iş takım çeliklerinin çalışma sırasında yumuşamalarını önlemek için su ile soğutulması gerekiyorsa tungstenli sıcak iş takım çelikleri yerine kromlu sıcak iş takım çelikleri tercih edilmektedir. Bunun nedeni kromlu sıcak iş takım çeliklerinin şok direncinin daha yüksek olmasıdır. Bu özelliği sayesinde kromlu sıcak iş takım çeliklerine kırılma hasarı oluşmadan su ile soğutma yapılabilmektedir [1].

1.2.1. Kromlu sıcak iş takım çelikleri

Kromlu sıcak iş takım çelikleri (H10-H19) döküm, dövme, ekstrüzyon uygulamalarında geniş kullanım alanına sahiptir. Aluminyum dökümü için geliştirilen kromlu sıcak iş takım çelikleri günümüzde Al, Mg, Zn dökümünde döküm kalıbı olarak, plastik şekil verme yöntemlerinde kalıp ve takım malzemesi olarak, dövme kalıbı, ekstrüzyon kalıbı ve sıcak kesme makası olarak kullanılmaktadır [1,4].

Kromlu sıcak iş takım çelikleri orta değerdeki Cr bileşimi ve Mo, W, V, gibi karbür yapıcı elementlerin ilavesi sayesinde ısı nedenli oluşan yumuşamaya karşı dirence sahiptir. Düşük C miktarı ve düşük alaşım bileşimi normal çalışma sertliğinde (40-55 HRC) tokluğu desteklemektedir.Yüksek Mo ve W bileşimi sıcak mukavemeti arttırmakta ancak toklukta bir miktar düşüşe neden olmaktadır. V, yüksek sıcaklık aşınmasına karşı direnci geliştirmek için katılmaktadır. Si miktarındaki artış oksidasyon direncini arttırmaktadır [3].

Kromlu sıcak iş takım çeliklerinde krom ve molibden kombinasyonu östenitin difüzyon kontrollü dönüşümünü engellemektedir. Başka bir deyişle perlitik dönüşüm eğilimi azalmakta ve martenzit başlama sıcaklığının yükselmesiyle martenzit dönüşüm eğilimi artmaktadır. Alaşım elementleri sayesinde kromlu sıcak iş takım çelikleri düşük östenitleştirme sıcaklıklarından havada soğutularak sertleştirilebilmektedir [3].

Kromlu sıcak iş takım çeliklerinin öne çıkan önemli özellikleri; yüksek tokluk değerleri ve termal şok dirençleridir. Sıcak sertlik değerleri diğer grup sıcak iş takım çeliklerinden düşük olmasına rağmen kromlu sıcak iş takım çelikleri şok direncinin yüksek olması sayesinde özellikle kalıpların su ile soğutulmasının gerektiği uygulamalarda tercih edilmektedir [1].

1.2.2. Tungstenli sıcak iş takım çelikleri

Tungstenli sıcak iş takım çelikleri sıcak şekillendirme için kullanılan ilk yüksek alaşımlı çeliklerdir. % 9-19 W, düşük miktarda karbon ve orta değerde Cr, V

bileşimine sahiptir (Tablo 1.1). Grupta yer alan H26 çeliği T1 kodlu yüksek hız takım çeliğinin düşük karbonlu modifikasyonu olarak geliştirilmiştir [1,3].

Tungstenli sıcak iş takım çelikleri diğer sıcak iş takım çeliklerine göre daha yüksek sıcak sertliğe sahiptir. Bu özelliği sayesinde yumuşamaya karşı direnci oldukça yüksektir. Ancak yüksek sertliği sağlayan ve yüksek oranda karbür içeren mikroyapısı aynı zamanda düşük tokluğa ve gevrek kırılma eğilimine neden olmaktadır. Bu durumu engellemek için tungstenli sıcak iş takım çelikleri az miktarda karbon içermektedir [1]. Düşük C miktarına rağmen tungstenli sıcak iş takım çelikleri kromlu sıcak iş takım çeliklerine göre düşük termal şok direncine sahiptir. Bu nedenle su soğutması gereken koşullarda kullanılmaları sonucu hasara uğramaktadırlar. Tungstenli sıcak iş takım çelikleri maksimum sıcak mukavemetin ve yumuşamaya karşı direncin gerektiği aynı zamanda termal şok direncinin arka planda kaldığı yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir [3].

Karbon miktarı ve alaşım kompozisyonunun yanında ısıl işlem parametrelerine bağlı olarak tungstenli sıcak iş takım çelikleri birçok farklı yüksek sıcaklık aşınma direncine ve tokluk değerlerine sahip olmaktadır [1,3].

1.2.3. Molibdenli sıcak iş takım çelikleri

Molibdenli sıcak iş takım çelikleri grubunda aktif olarak kullanılan iki çelik vardır, H42 ve H43. En geniş kullanıma sahip olan çelik ise H42 çeliğidir. İkinci Dünya Savaşı zamanı tungstene getirilen kısıtlama ile birçok molibdenli sıcak iş takım çeliği geliştirilmiş, ancak zamanla bu çeliklerin kullanımı azalmıştır [1,3].

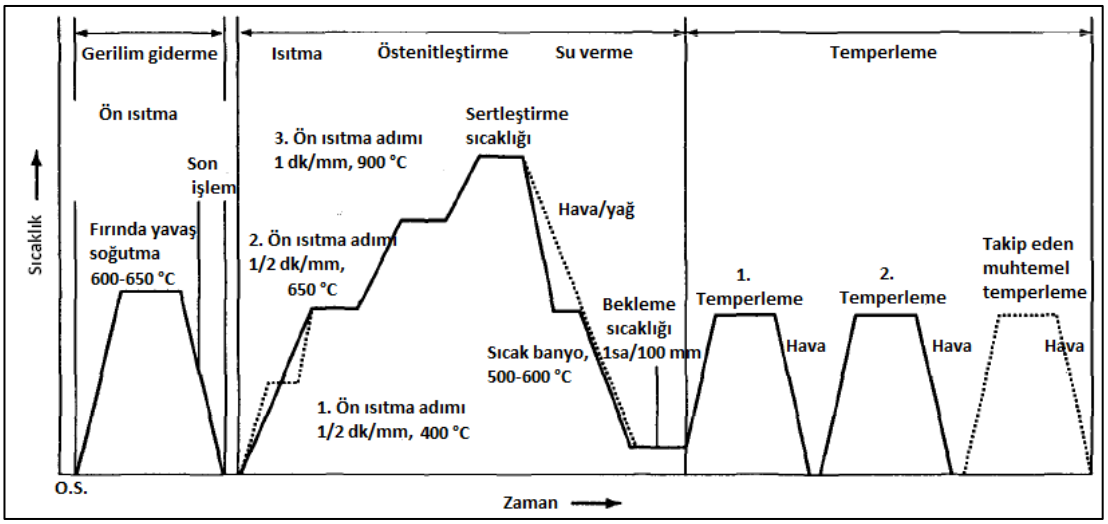
Molibdenli sıcak iş takım çelikleri özellikleri bakımından kromlu ve tungstenli sıcak iş takım çeliklerinin arasında yer almaktadır. Maliyet söz konusu olduğunda H42, tungstenli çeliklerin alternatifi olarak kullanılmaktadır [1,3].

Molibdenli sıcak iş takım çelikleri Mo, Cr, V, C ve farklı miktarlarda W içermektedir. Tungstenli çeliklere benzer özelliklere ve kullanım alanına sahiptir. Farklı olarak sıcalık değişiminden kaynaklı termal şoka karşı daha yüksek dirence sahiptir [1].

1.3. Sıcak İş Takım Çeliklerine Uygulanan Isıl İşlemler

Sıcak iş takım çelikleri döküm yöntemi ile belirli alaşım kompozisyonuna göre üretilirler. Üretiminden sonra kullanılacağı alana göre şekillendirilen sıcak iş takım çeliklerine nihai özellikler ise ısıl işlem ile kazandırılır [1].

Sıcak iş takım çeliklerinin ısıl işlemi üç aşamada gerçekleşir. Birinci aşama çeliğin östenit alanına ısıtıldığı östenitleştirme, ikinci aşama östenitleştirme sıcaklığından soğutularak östenitin martenzite dönüşümünün sağlandığı su verme ve üçüncü aşama kalıntı östenitin giderildiği ve ikincil karbürlerle sertliğinyanında tokluğun da elde edildiği temperleme işlemidir [8]. Şekil 1.2'de sıcak iş takım çeliklerine uygulanan ısıl işlem kademeleri görülmektedir. Şekil 1.2'de görülen gerilim giderme tavlaması termomekanik proses, talaşlı işleme ve taşlama sırasında oluşan kalıntı gerilmelerin giderilmesi için tercih edilmektedir [1]. Ön ısıtma ise, parçanın her bölgesinin östenitleştirme sıcaklığına homojen olarak ulaşmasını ve böylece termal şok ve lokal boyutsal değişikliklerin minimize edilmesini sağlamaktadır [5].



Şekil 1.2. Sıcak iş takım çeliklerine uygulanan ısıl işlem kademelerinin şematik gösterimi [1]

1.3.1. Östenitleştirme

Takım çeliklerinde sertleştirme ısıl işleminin ilk basamağı olan östenitleştirme işleminde amaç,çeliğin ötektoid sıcaklığının (A_3) üzerinde bir östenitleştirme sıcaklığına ısıtılarak homojen östenit fazının elde edilmesidir. Çıkılan sıcaklıkta çeliğin karbür-ferrit mikroyapısında ferrit östenit fazına dönüşmekte ve karbürler

östenit içinde çözünmektedir. Östenitleştirme ile su verme ve temperleme kademeleri için birçok kritik fonksiyonun elde edilmesi sağlanır [1,5-7,9].

Östenitleştirme işlemi;

1. Çözeltiye alınan karbür miktarına ve östenit tane boyutuna bağlı olarak sertleşebilirliği belirler. Östenit fazı içinde çözünen alaşım karbürlerinin artması ve östenit tane boyutundaki sınırlı artış sertleşebilirliği arttırmaktadır[5].

2. Çözeltiye alınan karbür miktarı ve östenit tane boyutu perlit, beynit dönüşümü için gereken kuluçka süresini değiştirir. Denge dönüşümü için gerekli çekirdeklenme yöreleri olan tane sınırlarının ve karbürlerin azalmasıyla kuluçka süresi artar. İzotermal dönüşüm diyagramında dönüşüm eğrilerini sağa kaydırarak denge dönüşümlerini erteler [5].

3. Martenzit başlama sıcaklığını (M_s) belirler. Artan sıcaklık ile daha fazla karbür çözünmesi sağlanır ve böylece östenit daha kararlı hale gelerek daha düşük sıcaklıklarda martenzite dönüşür [5].

4. Östenitin kararlı hale gelme durumunu belirlediği için su verme sonrası kalıntı östenit miktarına da etki etmiş olur. Kararlı hale gelen östenit, M_s sıcaklığının düşmesiyle su verme sırasında dönüşmeden kalır [5].

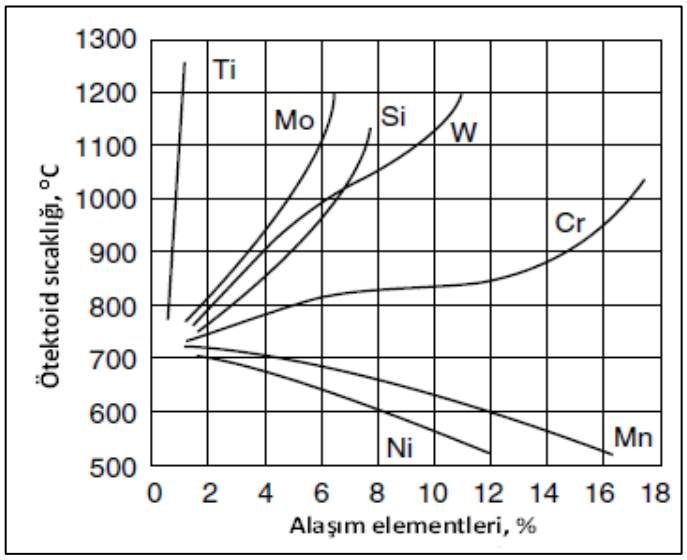
5. Östenit fazında daha fazla alaşım elementinin çözünmesini böylece temperleme sırasında aşırı doymuş martenzitten ikincil sertlik getiren karbürlerin çökelmesini sağlar [1].

6. Östenit tane boyutlarını kontrol ederek tane kabalaşmasını önler ve kırılma direncini arttırır [1].

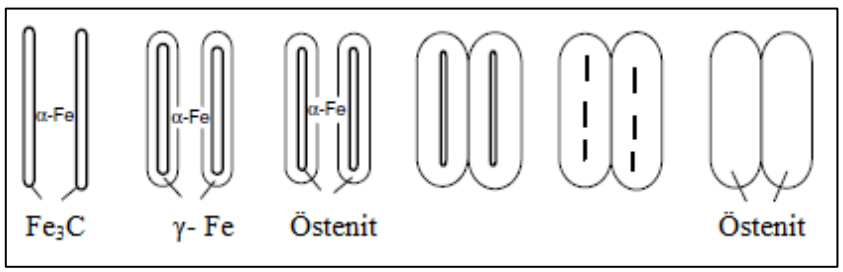
7. Aşınma direncinin arttırılabilmesi için çözünmemiş alaşım karbürlerinin belirli hacimsel oranda elde edilmesini sağlar [1].

Östenitleştirme sıcaklığı çeliğin alaşım kompozisyonuna göre belirlenmektedir. Alaşım elementleri ötektoid sıcaklığın üzerinde arttıcı ya da azaltıcı etki yaptığı için ötektoid sıcaklık her alaşım için farklılaşmaktadır. Alaşım elementlerinin ötektoid sıcaklığa etkileri Şekil 1.3'te görülmektedir [5]. Bu sıcaklıkta östenit dönüşümü

difüzyonun bir fonksiyonudur vedönüşüm zamana bağlı olarak gerçekleşir. Östenitleştirme sıcaklığında bekleme süresi ise çıkılan sıcaklığa ve alaşım kompozisyonuna göre belirlenir. Bekleme süresi istenilen miktarda karbür çözünmesini sağlamalı, östenit tanelerinin kabalaşmasını engellemelidir [1]. Alaşım karbürlerinin östenit fazında çözünmesi Şekil 1.4'te gösterilen Fe_3C lamellerinin çözünme mekanizmasıyla aynıdır. Ferritin östenite dönüşmesiyle sementit lamelleri östenit fazı ile çevrelenir ve sementitten östenite karbon difüzyonu gerçekleşir. Karbon difüzyonu sayesinde sementit lamelleri çözünerek gittikçe incelir ve sonuçta homojen östenit fazı elde edilir. Karbür çözünmesinin kontrol edilmesi ile östenit bileşimi ve dolayısıyla karbürlerin hacimsel oranı, çeliğinsertleşebilirliği, M_s sıcaklığı, su verme sonrası kalıntı östenit miktarı ve ikincil sertlik potansiyeli belirlenir [5-7].



Şekil 1.3. Alaşım elementlerinin ötektoid sıcaklığa etkisi [5]



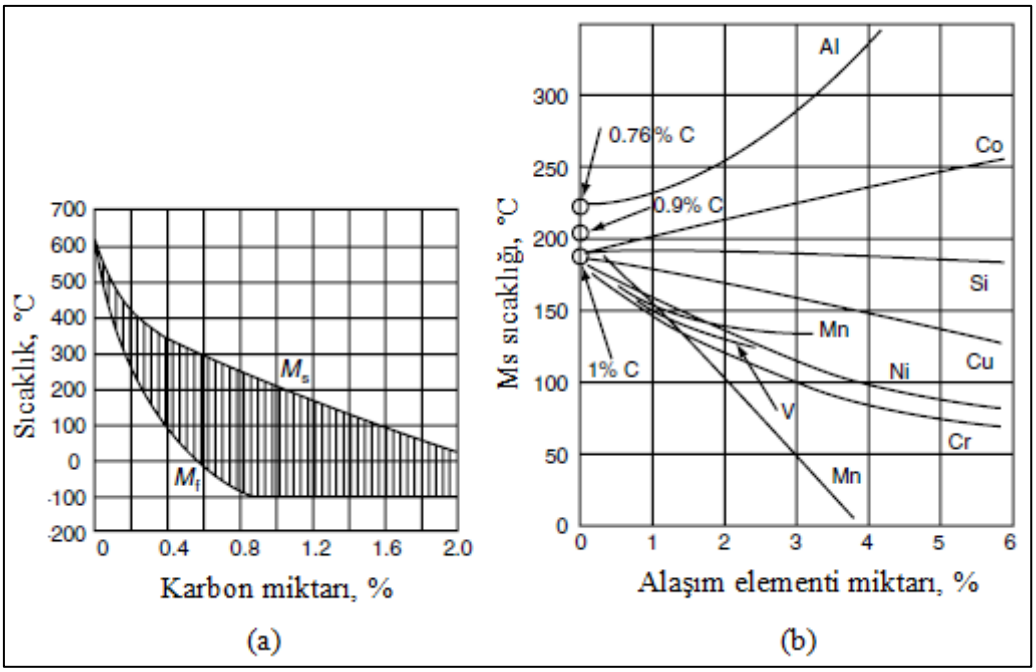
Şekil 1.4. Alaşımsız %0,8 C içeren ötektoid çelikte perlitik yapının östenite dönüşümü [5]

1.3.2. Su verme

Su verme sertleştirme işleminde oldukça sert olan martenzit fazının elde edilerek çeliğe ilk sertliğin kazandırıldığı aşamadır. Su verme, östenitleştirme sırasında elde edilen östenitin martenzite dönüşmesini sağlayacak soğuma hızlarında gerçekleştirilir. Dönüşüm sonrasında yapıda martenzit fazının yanında bir miktar kalıntı östenit bulunabilmektedir [1,9].

Gerekli soğuma hızısağlandığında östenit kristal kafesinde olan karbon atomları difüze olamaz. Difüzyonun engellenmesiile östenitinyüzey merkezli kübik (YMK) kristal kafesi deformasyona uğrayarakhacim merkezli tetragonal (HMT) kristal kafese dönüşür. Başka bir ifadeyle martenzit fazı oluşur. Alaşım elementleri, martenzit başlama sıcaklığı (M_s) ve martenzit bitiş sıcaklığı (M_f) aralığını genişletir (Şekil 1.5), Fe-C denge diyagramına ait zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramlarında denge fazlarının oluştuğu burnu sağa öteler ve bu sayede martenzit dönüşümü için daha uzun vakit kazanılmasını sağlar. Sağladıkları bu etki ile alaşım elementleri yavaş soğuma hızlarında ve kalın kesitlerde martenzit dönüşümünü desteklemektedir [9,24].

Uygulamada takım çeliğininkimyasal kompozisyonuna ve kesit kalınlığına bağlı olarak su verme ortamları su, su buharı, tuz banyosu, yağ, inert gaz ya da hava olabilmektedir. Sıcak iş takım çeliklerinde yaygın olarak kullanılan su verme ortamları ise hava ve su buharıdır [1,2].



Şekil 1.5. M_s ve M_f sıcaklıklarına, a) karbon miktarının, b) 1% C değerinde alaşım elementlerinin etkisi [5]

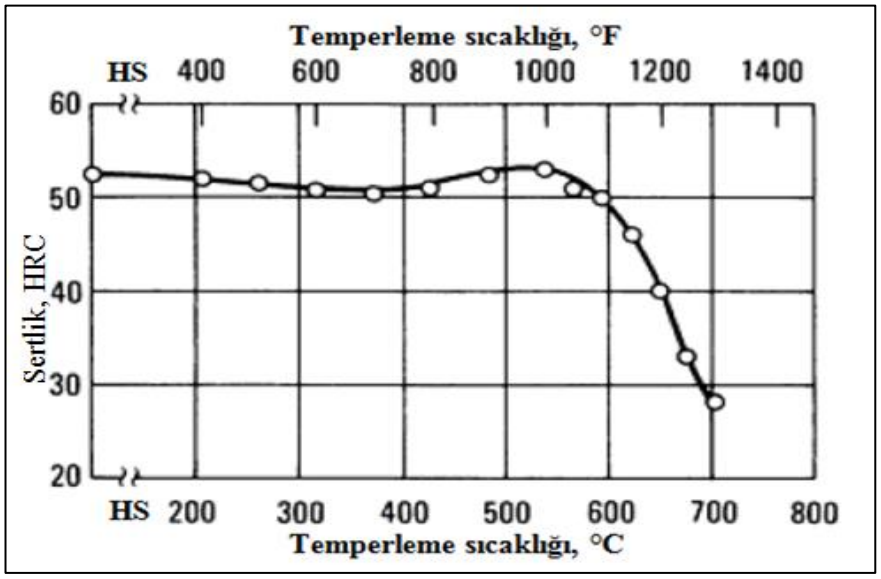
1.3.3. Temperleme

Temperleme, martenzitik yapıya sahip sertleştirilmiş çeliğin A_1 sıcaklığının altında bir sıcaklığa ısıtılarak nihai özelliklerinin kazandırıldığı son ısıl işlem adımıdır. Su verme işlemi ile elde edilen martenzit oldukça sert ancak gevrek bir yapıya sahiptir. Kafesinde bulundurduğu aşırı karbon atomu nedeniyle oluşan kafes distorsiyonu, su verme sırasında karbür oluşması, su verme sonucu oluşan kalıntı gerilmeler nedeniyle martenzit fazı düşük tokluğa sahiptir. Bu nedenle temperleme işleminin temel amacı su verme ile sertleştirilmiş çeliğin kırılganlığını azaltmak ve tokluğunu arttırmaktır. Temperleme işleminde martenzitik yapı ferrit matriksi içinde küresel karbürlerin çökeldiği temper martenzitik yapıya dönüşmektedir [1,9].

İstenilen bu dönüşümsıcak iş takım çeliklerindedört basamakta gerçekleşir. Birinci basamakta, 100-200 °C'nin üzerinde, martenzit kristal kafesinden karbon difüzyonu gerçekleşir ve ε-karbür çökelir. Karbon difüzyonu nedeniyle martenzit tetragonalitesini kaybetmeye başlar. İkinci basamakta, 200-350 °C arasında,düşük alaşımlı çeliklerde kalıntı östenit ferrit ve sementite dönüşür. Daha yüksek alaşımlı çeliklerde ise kalıntı östenit soğutma sonucu martenzite dönüşür ve tamamen gidermek için iki veya üç kademeli temperleme yapmak gerekir. Üçüncü basamakta,

300-450 °C arasında; ε-karbür sementite dönüşür. Martenzit tetragonalitesini kaybeder ve kübik kristal kafese geçer. Dördüncü basamakta ise, 500 °C'nin üzerinde; alaşım karbürleri çökelir. Sementit küresel hale gelir [1,24].

Temperleme işleminde nihai özellikleri belirleyen önemli faktör alaşım karbürlerinin çökelmesidir. Sıcak iş takım çeliklerinde bulunan alaşım elementleri, Cr, Mo, V, W ve Ti termodinamik olarak sementitten daha kararlı karbür yaparlar. Bu yüzden yeterli miktarda güçlü karbür yapıcı elementler bulunduğunda sementit yerine alaşım karbürleri oluşmaktadır. Ancak bu alaşım elementleri demir kafesinde yer alan atomlara sahiptir. Bu atomların karbür çekirdeklenmesini sağlayacak hızda difüze olabilmeleri için yüksek sıcaklık gereklidir. 500-600 °C sıcaklığa çıkıldığında karbür çekirdeklenmesini sağlayacak difüzyon hızlarına ulaşırlar ve ince yapılı karbür oluştururlar. Ferritik matrikste çekirdeklenen bu karbürler temperleme sırasında martenzitin tetragonalitesini kaybetmesiyle sertliği düşen çeliğe yeniden sertlik kazandırırlar.Temperleme sırasında çökelen bu alaşım karbürlerine ikincil karbürler ve bu karbürler sayesinde elde edilen sertliğe ikincil sertlik denilmektedir. İkincil sertlik zamana ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Şekil 1.6'da H13 çeliği için ikincil sertliğin elde edildiği sıcaklık ve ikincil sertlik piki görülmektedir [1, 24].



Şekil 1.6.1025 °C'de 2 saat östenitleştirilmiş ve havada su verilmiş (HS) H13 çeliğinin sertlik değererinin temperleme sıcaklığı ile değişimi [3]

İkincil sertlik gösteren H13 sıcak iş takım çeliğine 500-600 °C sıcaklıkları arasında temperleme yapıldığında daha düşük sıcaklılarda temperleme yapılmasıyla elde edilen mukavemet değerlerinden daha yüksek mukavemet değerleri ve daha iyi süneklik elde edilir. Bununla birlikte ikincil sertlik gösteren çeliklerin en önemli avantajı, 500-600 °C sıcaklıkları arasında oluşan alaşım karbür dispersiyonu sayesinde, çeliklerin yapısının 500 °C'nin üzerinde kararlı olmaya devam etmesidir. Bu sayede yumuşama direnci kazanan çelikler yüksek sıcaklıkta yüksek gerilmeler altında mekanik özelliklerini koruyarak çalışabilmektedir [3, 24]. Çeliklerinin çalışabileceği en yüksek sıcaklığı belirleyen faktör ikincil sertliğin kazandırıldığı temperleme sıcaklığıdır. Temperleme sıcaklığının aşılmasıyla yapıdaki karbürler kabalaşmaya başlar ve mekanik özellikler düşer [1].

İkincil sertliğin elde edildiği sıcaklık ve mekanik özellikler çeliğin alaşım kompozisyonuna bağlı olarak değişir. Başlıca karbür yapıcı alaşım elementi olarak Cr, Mo, V içeren sıcak iş takım çeliklerinde alaşım elementinin miktarına göre oluşan karbür türü ve karbürlerin oluştuğu sıcaklık değişmektedir [24].

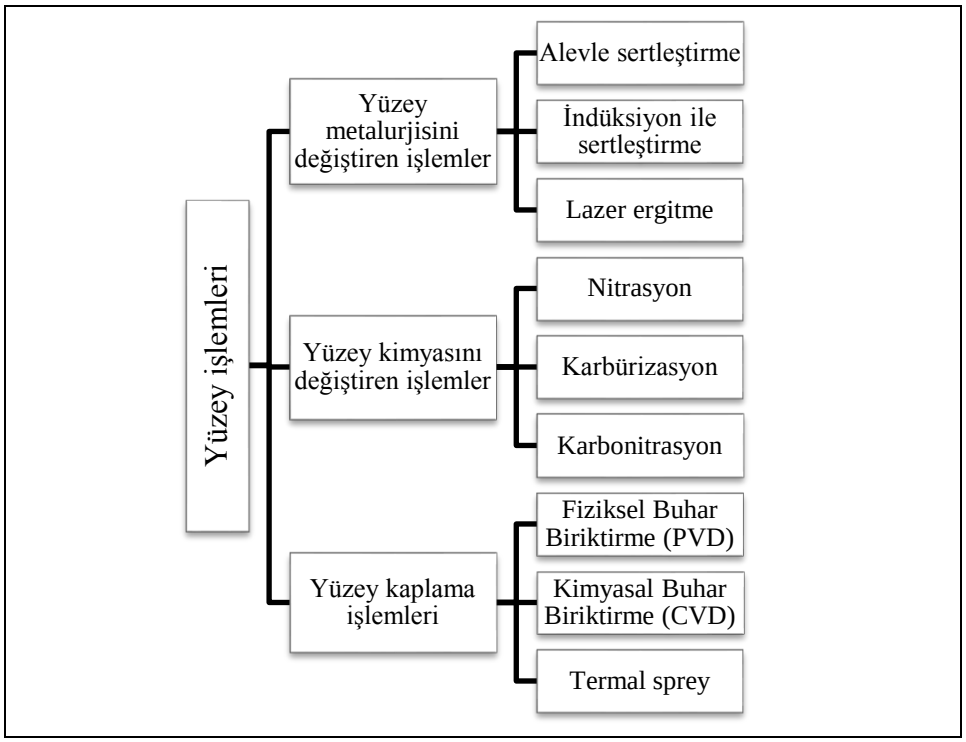
Sıcak iş takım çeliklerinde ikincil sertlik başlıca vanadyumdan sonrasında ise krom ve molibdenden gelmektedir. Vanadyum, sementitten, krom karbürden ve molibden karbürden daha kararlı MC tipi VC oluşturur. Vanadyum karbür 550-650 °C civarında çeliğe ikincil sertlik kazandırır. Kromca zengin M_7C_3 tipi Cr_7C_3 temperleme sırasında çökelen diğer alaşım karbürüdür. Hızlı kabalaşma eğiliminde olan Cr_7C_3, vanadyum ilavesi sayesinde 550-650 °C civarında ince dağılımlı ve kararlı kalır ve yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerin korunmasını destekler. Cr_7C_3 yanında, ağırlıkça %7'den az Cr içeren çeliklerde molibdenin ilavesi ile $Cr_{23}C_6$ çökelmesi görülebilir. Molibden M_6C tipi Mo_6C oluşturarak, W ise M_2C tipi karbür oluşturarak ikincil sertliği ve yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerin korunmasını desteklemektedir. Mangan karbür yapıcı olarak görev almasa dasementitin kabalaşmasını engeller böylece yüksek sıcaklıkta yumuşama direncini arttırarak mekanik özelliklere katkı sağlar [1,9,24].

1.4. Sıcak İş Takım Çeliklerine Uygulanan Yüzey İşlemleri

Sıcak iş takım çelikleri çalışma koşullarında yüksek sıcaklık ve yüksek yüklerin yanında şekillenen malzemenin yarattığı yüksek tribolojik gerilmelere maruz kalırlar.

Alaşım kompozisyonu, termomekanik prosesleme ve ısıl işlem sayesinde sıcak iş takım çeliklerine yüksek mukavemet, sertlik ve tokluk kazandırılarak çalışma koşullarının yıpratıcı etkilerine karşı dayanabilecek özellikte üretilirler. Ancak yüzeyden iç kısımlara kadar aynı özelliği gösteren sıcak iş takım çelikleri, çalışma koşullarında şekillenen malzemenin yarattığı tribolojik gerilmeler nedeniyle iç kısımlara göre daha fazla ısıya ve gerilmeye maruz kalır. Yüzeyde oluşan ısı ve tribolojik gerilmeler ise kılcal çatlaklara, aşınma hasarına ve dolayısıyla malzeme kaybına ve kalıpta boyutsal değişime neden olur. Çalışma koşullarının yarattığı bu olumsuzlukları giderebilmek amacıyla 1930'lu yıllardan bu yana çeliklerin yüzey özelliklerini geliştirici çalışmalar yapılmaktadır [1].

Günümüzde takım çeliklerinin yüzey performansını iyileştirmek için birçok yüzey modifikasyon tekniği geliştirilmiştir. Yüzey işlemleri Şekil 1.7'de görüldüğü gibi üç ana gruba ayrılır.Yüzey metalurjisini değiştiren işlemlerde yüzey alevle, indüksiyonla ya da lazer ile ısıtılır ve ardından su verilerek yüzeyde sert martenzit fazı elde edilir ve böylece yüzeyin sertleşmesi sağlanır. Yüzeyin kimyasal kompozisyonunu değiştiren işlemlerde ise yüzeyde karbon, azot gibi ara yer atomlarının difüzyonunu sağlayacak bir ısıl işlem uygulanır. Difüzyonu sağlanan elemente göre bu işlemler karbürizasyon, nitrasyon, karbonitrasyon olarak adlandırılır. Sıcak iş takım çeliklerinde en çok uygulanan işlem nitrasyondur. Yüzeye kaplama yapılarak gerçekleştirilen yüzey işlemlerinde çelik altlık olarak kullanılır ve yüzey özelliği değiştirilmeden yüzeye istenilen mekanik, tribolojik ya da kimyasal özelliği gösteren ince bir film kaplanır. Fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve termal sprey yöntemleri yüzey kaplama işlemlerinin gerçekleştirildiği yöntemlere örnek olarak gösterilebilir. Yüzey kaplama işlemleri malzemenin en çok istenilen özelliklere sahip olmasını sağlar. Altlık malzeme tokluk ve sertlik açısından tasarlanırken, kaplama aşınma, korozyon ve termomekanik gerilmelere karşı direnç gösterir. Kaplamanın türü ve kaplama prosesi çalışma koşullarının gerektirdiği özelliklere göre belirlenir. Örneğin TiC, Al_2O_3 genellikle kesici takımlarda kullanılırken, CrN, AlTiN gibi kaplamalar sıcak iş takım çeliklerinde tercih edilir [1,14].



Şekil 1.7. Yüzey işlemlerinin sınıflandırılması

Sıcak iş takım çeliklerinde tercih edilen en yaygın yüzey işlemi nitrasyondur. Yüzey özelliklerinin aşınmaya karşı daha fazla korunmasını sağlamak için PVD ile sert ince film kaplamaları da son zamanlarda yaygınlaşmaya başlamıştır. Deneysel çalışma kapsamında nitrasyon ve PVD kaplamaların incelenecek olması nedeniyle bu bölümde diğer yöntemlerden ziyade nitrasyon ve PVD işlemi detaylı olarak anlatılacaktır.

1.4.1. Nitrasyon

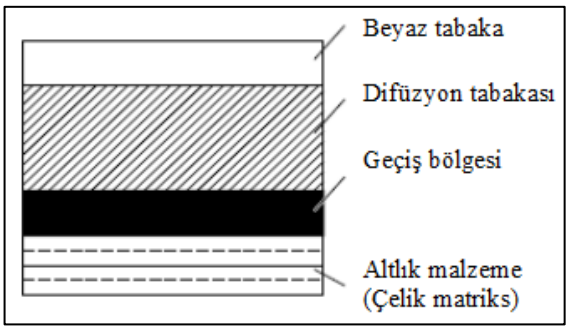
Nitrasyon, çeliğin yüzeyine azotun difüze olarak sert bir tabaka yarattığı yüzey işlemidir. Azot, çelik yüzeyine Ac_1 sıcaklığının altında 500-550 °C arasında gönderilir. Bu sıcaklıkta östenit dönüşümü gerçekleşmediği için azot ferritik matriks içine difüze olur. Östenit dönüşümünün ve su vermenin gerçekleşmediği bir işlem olması sayesinde nitrasyon minimum distorsiyon ve mükemmel boyut kontrolü ile sonuçlanır [14]. Nitrasyondan önce çelikler sertleştirilmeli ve temperlenmelidir. Nitrasyon işleminde uygulanan sıcaklığın temperleme sıcaklığının altında olması sayesinde çeliğin iç kısımları ısıl işlem ile kazandırılan sertlik ve tokluk özelliklerini korurken yüzey yüksek sertliğe ulaşır [10]. Bu sayede nitrasyon işlemi ile çeliğin aşınma direnci, yorulma direnci, korozyon direnci arttırılır. Nitrasyon işlemi gaz, sıvı

(tuz) ve plazma (iyon) nitrasyon olarak sınıflandırılır. Tablo 1.3'te nitrasyon işlemlerinin genel özellikleri verilmiştir [14].

Tablo 1.4. Nitrasyon işleminin özellikleri [14]

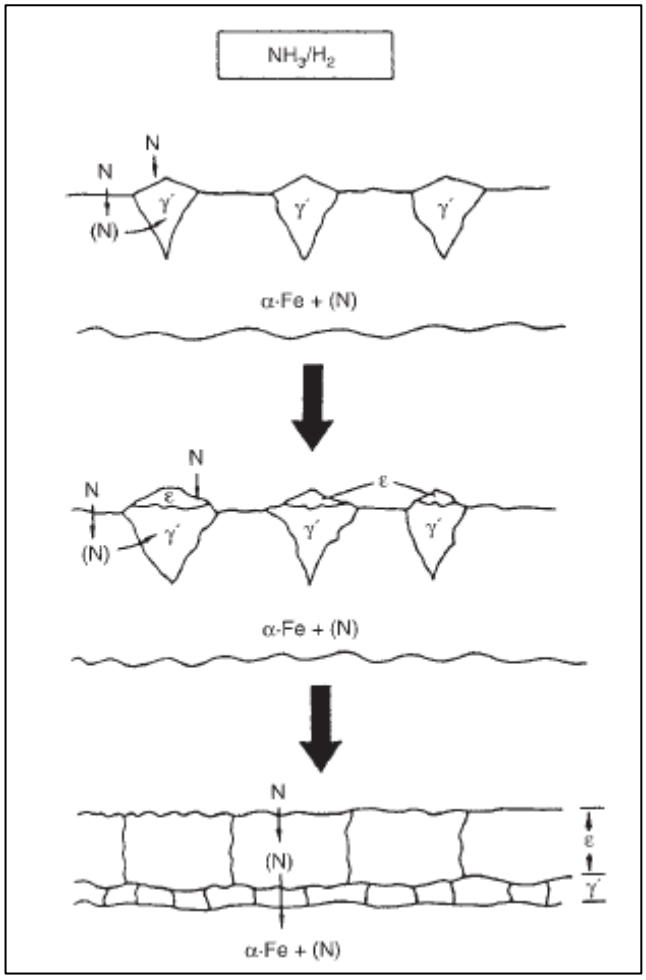
Proses	Proses sıcaklığı (°C)	Nitrasyon tabakasının derinliği	Sertlik (HRC)	Proses özellikleri
Gaz	480-590	125µm-0,75mm	50-70	Amonyak gazında gerçekleştirilir.
Sıvı (Tuz)	510-565	2,5 µm-0,75 mm	50-70	Siyanür veya siyanat içeren erimiş tuz banyosunda gerçekleştirilir.
Plazma (İyon)	340-565	75 µm- 0,75 mm	50-70	Vakum altında yüksek elektrik akımı ile oluşturulan plazma ortamında gerçekleştirilir.

Tüm yöntemlerde amaç azot atomlarının çeliğin yüzeyine ve yüzeyinden içeriye difüze olmasını sağlamaktır. Yüzeye difüze olan azot atomları birikerek ε ve γ′ fazlarını oluştururlar.Beyaz tabaka olarak adlandırılan bu bölge oldukça sert ancak kırılgandır. Beyaz tabaka çeliğin içine difüze olmaz, yüzeyde kalarak zaman, sıcaklık ve gaz kompozisyonuna bağlı olarak kalınlaşır. Azot atomları yüzeyden içeriye difüze olduklarında ferritik matriks içinde kararlı demir ve alaşım nitrürleri oluştururlar [8,14]. Difüzyon tabakası olarak adlandırılan bu bölgenin sertliği ana metalin sertliğinden daha yüksektir. Difüzyon bölgesinin hemen altında ise çelik ana malzeme, çelik matriksi bulunur [11]. Şekil 1.8'de azotun difüzyonu ile elde edilen tabakalar görülmektedir. Nitrasyon tabakası yüzeyden içeriye doğru beyaz tabaka, difüzyon tabakası, geçiş bölgesinden oluşur. Sertlik değeri de yüzeyden içeriye doğru azalır. Böylece yüzeyde yüksek sertliğin, iç kısımda tokluğun elde edildiği bir yapı oluşturulur [10].



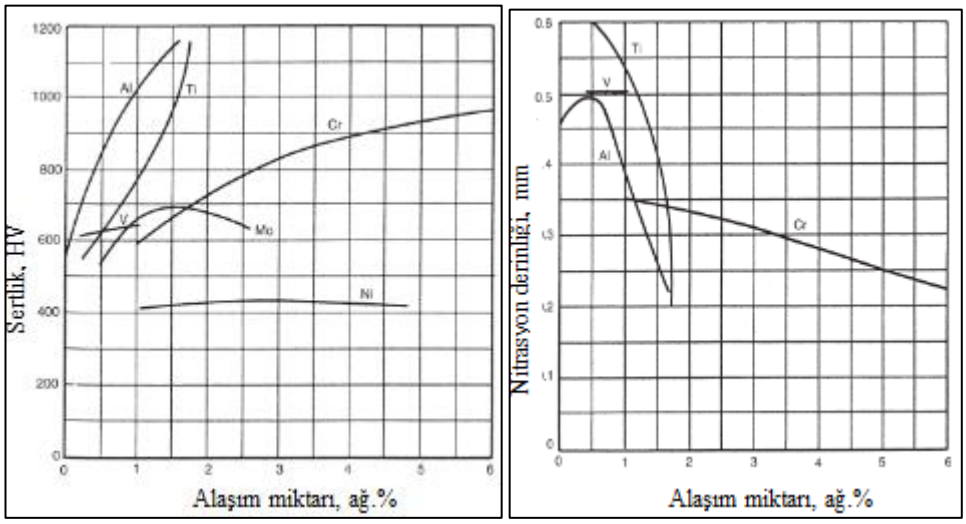
Şekil 1.8. Nitrasyon işleminde elde edilen tabakalar [10]

Beyaz tabaka, iki fazdan oluşan bileşim tabakasıdır. Nitrasyonlu kesit nital ile dağlanıp mikroskopta incelendiğinde en üstte oluşan bileşim tabakası beyaz göründüğü için beyaz tabaka olarak nitelendirilmiştir [14]. Beyaz tabaka $Fe_{2-3}N$ bileşiminde ε fazı ve Fe_4N bileşiminde γ′ fazından oluşmaktadır. Fazların çekirdeklenmesi şematik olarak Şekil 1.9'da gösterilmektedir. Azot atmosferi ile temasta olan çelik yüzeyinde önce γ′ fazı çekirdeklenir. Bu çekirdeklenme ε fazı çekirdeklenene kadar devam eder. Çeliğin karbon miktarının baskın faz üzerinde önemli etkisi vardır. Karbon miktarındaki artış ε fazını arttırken, azalış γ′ fazını destekler. Tabakanın kalınlığı ise zaman, sıcaklık, basınç ve gaz konsantrasyonunun fonksiyonudur. Karbon miktarı beyaz tabakanın bileşimini belirlese de kalınlığı üzerinde önemli bir etkisi yoktur [10].



Şekil 1.9. Çelik yüzeyinde γ′ ve ε-nitrürlerin çekirdeklenmesinin şematik gösterimi [10]

Beyaz tabakanın altında oluşan difüzyon tabakasında azot, ferritik matriks içinde demir ve kararlı nitrür yapıcı aluminyum, molibden krom, titanyum, vanadyum ve silisyum elementleri ile nitrür bileşikleri oluşturur. Nitrür bileşikleri sayesinde difüzyon tabakasının sertliği ve nitrasyondan etkilenen bölgenin derinliği artar. Şekil 1.10a'da alaşım elementlerinin 0,35 %C, 0,30 % Si, 0,70 % Mn bileşimli çeliğin nitrasyon sonrası sertliğine etkisi,Şekil 1.10b'de ise 520 °C'de 8 saat nitrürleme sonrası nitrasyondan etkilenmiş bölgenin derinliği üzerine etkisi gösterilmektedir [10].

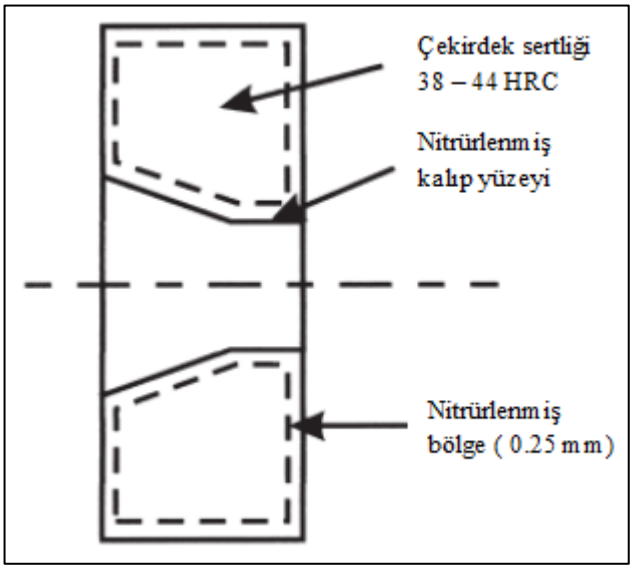


(a) (b)

Şekil 1.10. Alaşım elementlerinin a) nitrasyon sonrası çeliğin sertliğine, b) nitrasyon tabakasının derinliğine etkisi (Çelik bileşimi: 0,35 %C, 0,30 % Si, 0,70% Mn) [10]

Kalıp olarak kullanılan sıcak iş takım çeliklerinde nitrasyon yaygın olarak kullanılır. Kalıpların merkezindeki tokluğun ve 44-47 HRC sertliğin korunması, yüzeyinin ise plastik deformasyona ve aşınmaya karşı yüksek sertliğe aynı zamanda yüzey çatlaklarının oluşmasına karşı tokluğa, esnekliğe sahip olması istenir. Difüzyon tabakasının derinliği, beyaz tabakanın kalınlığı ve bileşimi sertlik ve tokluk dengesi için önemli parametreleri oluşturur. Difüzyon tabakasının kalın olması yüzeyin tokluğunu, esnekliğini kaybetmesine, yüzey çatlaklarının oluşmasına neden olur. Aynı zamanda beyaz tabakanın kalınlığı ve bileşimi de yüzeyin özelliklerini etkiler. Kalınlığı artan beyaz tabaka yüzeyin gevrek davranış göstermesine neden olur. Bu nedenle nitrasyondan etkilenmiş bölgenin ince olması istenir. Şekil 1.11'de aluminyum ekstrüzyonunda kullanılan AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin nitrasyon

sonrası elde edilen özellikleri şematik olarak gösterilmiştir. Nitrasyon tabakasının kalınlığının %10'unu beyaz tabakanın oluşturması ve toplam kalınlığın 0,25 mm olması gerekir [10,13].



Şekil 1.11. H13 çeliğinden yapılmış aluminyum ekstrüzyon kalıbının şematik gösterimi [10]

1.4.1.1. Gaz nitrasyon

Gaz nitrasyon azot kaynağı olarak amonyak gazının kullanıldığı nitrasyon işlemidir. Nitrasyon işlemi tüm çelikler için 480-590 °C arasında uygulanır. Isıtma sırasında amonyak gazı aşağıdaki reaksiyonlar sonucu ayrışır [14]:

$$NH_3 \rightarrow 3H + N \quad (1.1)$$

$$2N \rightarrow N_2 \quad (1.2)$$

$$2H \rightarrow H_2 \quad (1.3)$$

Isıtma sonucu amonyak Eşitlik (1.1)'deki reaksiyonla azot ve hidrojen atomlarına ayrışır. Ancak bu ayrışma sonucu elde edilen bileşenler kararsızdır ve Eşitlik (1.2) ve Eşitlik (1.3)'teki reaksiyonlarla moleküler yapıya geçerler. Azot çelik yüzeyinden difüze olarak beyaz tabakayı ve difüzyon tabakasını oluşturur [10].

1.4.1.2. Sıvı nitrasyon

Sıvı nitrasyon da gaz nitrasyonun yapıldığı sıcaklıklardan daha yüksek sıcaklıklarda uygulanır (Tablo 1.3). Siyanür ya da siyanat içeren ergimiş tuz banyolarında gerçekleştirildiği için ergiyik tuz banyosunda nitrasyon olarak da adlandırılır.Kritik sıcaklıkların altında uygulandığı için boyutsal kararlılık sağlanır [10].

1.4.1.3. Plazma nitrasyon

Plazma kullanılarak azot atomlarının yüzeye difüzyonunun sağlandığı nitrasyon yöntemidir. Vakum altında yüksek elektrik akımı kullanılarak elde edilen plazma, azot iyonlarını altlık malzemeye doğru hızlandırır. İyon bombardımanı parçayı ısıtır yüzeyi temizler ve azotu aktifleştirir. İyon nitrasyon olarak da bilinen bu proses ile gaz nitrasyona göre daha iyi yüzey kimyası, homojen nitrasyon tabakası ve daha iyi boyutsal kararlılık sağlanır [10].

1.4.2. Fiziksel buhar biriktirme

PVD prosesi elektronik, optik, dekorasyon uygulamalarında ve takım çeliklerinin korozyon ve aşınma direncini geliştirmek için kullanılır. Ekstrüzyon, dövme, enjeksiyon kalıbı olarak kullanılan sıcak iş takım çelikleri çalışma koşullarında en fazla aşınma hasarından etkilenir. Yüzeyde oluşacak aşınmayı engelleyebilmek için yüksek tribolojik gerilmelere dayanabilecek ve yüksek sıcaklıkta kararlılığını koruyabilecek yüzey özelliklerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulur. Bu nedenle çeliklerin yüzeyi sertliği 90 HRC'nin üzerinde ve kalınlığı 3-5 μm olan, yüksek sıcaklıklarda ve korozif ortamlarda kararlılığını koruyabilen CrN, TiN, AlTiN, TiBN, AlCrN gibi ince sert seramik filmler ile kaplanır [11-13, 25, 26]. PVD TiN, (Ti,Al)N ve CrN kaplamaların sürtünmeyi azalttığı, abrasif aşınma direncini yükselttiği ve takım ömrünü % 50-100 aralığında arttırdığı bildirilmiştir [21]. Kaplama sırasında ısıl işlem ile çeliğe kazandırılan mekanik özelliklerin korunabilmesi için kaplama işleminin temperleme sıcaklığının altında yapılması gerekir. Nispeten düşük sıcaklıklarda kaplama yapılmasına ise PVD prosesi imkan sağlar. PVD prosesi yüksek vakum altında 95-540 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirildiği için sıcak iş takım çeliklerinin ince sert film kaplanması için ideal işlem olarak tanımlanabilir [11-13, 25, 26].

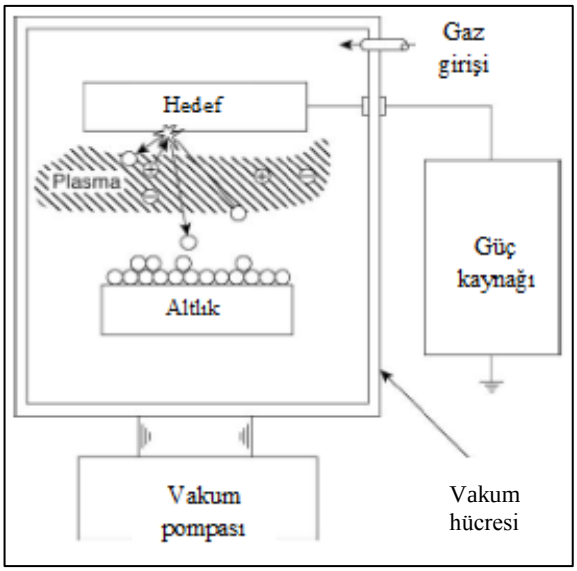
Katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi (CAPVD) PVD teknolojisinde filmlerin katodik ark ile üretilmesi yönetimi muhtemelen en eski yöntemdir. Katodik ark metal ve bileşim filmlerin yüksek hızda kaplanmasına imkan sağlaması, kaplamalarının yüksek adhezyona sahip olması, sitokiometrik filmlerinin kullanılabilir kısmi basınçlar altında oluşturması özelliklerinden dolayı kaplama camiasının dikkatini üzerine çekmiştir. Fakat katodik ark ile gerçekleştirilen evoparasyonun olumsuz özelliği ise makroparçacıkların oluşması ve bunların kaplama kalitesini bozmasıdır [16, 17, 26-29].

1.4.2.1. Mekanizma

Fiziksel buhar biriktirme işlemi atomların, iyonların ya da moleküllerin bir altlık malzemeye fiziksel olarak birikmesiyle gerçekleşir. Bu işlem dört önemli adımda gerçekleşir:

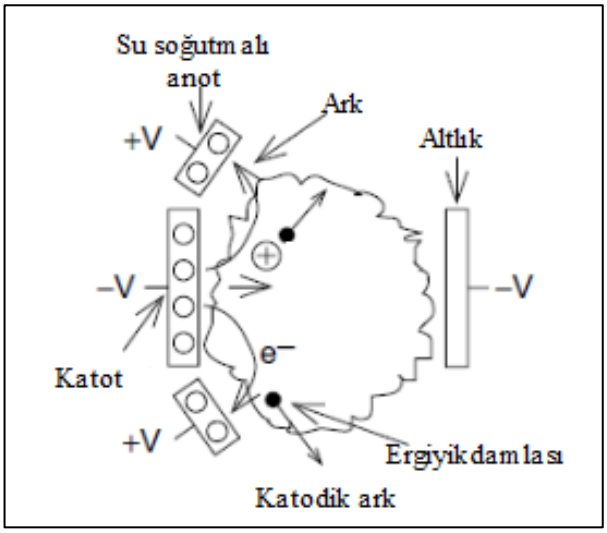
1. Buhar bileşiminin fiziksel proses (evaporasyon ya da sputterleme) ile üretilmesi,
2. Gaz fazındaki kaplama malzemesi (hedef/kurban malzeme) atomlarının altlık malzemeye transferi,
3. Atomların altlık malzeme üzerine birikmesi,
4. Altlık malzeme yüzeyinde biriken atomların kaplama tabakasına dönüşmesi [14].

Hedef malzeme iki yöntem ile buhar haline getirilir; evaporasyon ve sputterleme. Evaporasyon sisteminde hedef malzeme ısıtılarak atomik olarak buharlaştırılır. Hedef malzeme ısıtıldığında buhar basıncı artar. Buhar basıncı ortam basıncını geçtiğinde malzeme buharlaşmaya başlar. Tüm elementler için artan sıcaklıkla beraber buhar basıncı artar. Fakat malzemenin ergime sıcaklığı ile buhar basıncı arasında kuvvetli bir ilişki vardır. Bu bilgiye dayanarak malzemenin ergime sıcaklığına çıkılmadan 10^{-6}-10^{-5} torr vakum altında düşük sıcaklıklarda hedef malzeme buhar fazına geçirilebilir.Sputterleme prosesinde ise hedef malzeme argon iyonu gibi ağır iyonlar ile bombardıman edilir ve bu iyonlardan momentum kazanan hedef malzeme atomları gaz fazına geçer. Bombardıman plazma ya da iyon demeti sayesinde vakum altında gerçekleştirilir (Şekil 1.12). Örneğin katot sputterleme 10^{-2}-10^{-1} torr basınçları arasında gerçekleştirilir [26].



Şekil 1.12. Sputterleme prosesinin şematik gösterimi [26]

CAPVD yönteminde buharlaştırma işlemi katot noktasında metal plazma oluşturularak gerçekleştirilir. Vakum ortamında iki elektrot birbirine yakın olarak konumlandırıp düşük basınç altında yüksek yoğunluklu akım uygulandığında, oluşan yüksek ısı nedeniyle elektrot yüzeyinde buharlaşma meydana gelir ve elektrotla buharlaşmış malzeme arasında bir plazma oluşur (Şekil 1.13). Eğer buharlaşma öncelikli olarak katot yüzeyinde ark erozyonu ile gerçekleşiyorsa bu sisteme katodik ark kökenli denir [27].

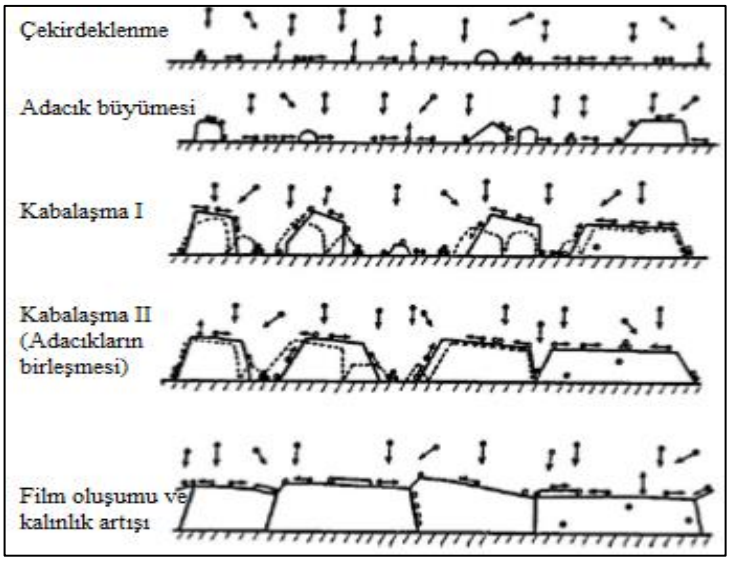


Şekil 1.13. Katodik ark fiziksel buhar biriktirme yönteminin çalışma mekanizması [27]

Arkın katot yüzeyindeki hareketi elektromanyetik alanlar ile kontrol edilir. Ark katot yüzeyinde uzun süre aynı noktada kalırsa katot ergiyebilir ve makropartiküllerin, dropletlerin oluşmasına neden olur. Katottaki ark hareketi gaz kompozisyonu, basınç, katot malzemesi ve safsızlığı ve manyetik alanın varlığı tarafından etkilenir. Manyetik alanın bulunmadığı koşullarda ark tamamen rastgele hareket etme eğilimi gösterir. Kararlı bir ark oluşması için ark boyunca minimum akım geçmesi gereklidir. Bakır ve titanyum için minimum 5-10 A aralığında değişen ark akımları, tungsten gibi refrakter malzemeler için ise 300-400 A aralığında değişen ark akımları kullanılır. Ark voltajındaki düşüş en fazla katot yüzeyinde meydana gelir. Ark voltajı ise katot yüzeyinden anot yüzeyine giden elektronların hareketine bağlı olarak 15 ve 100 volt arasında değişir [27].

Yüzeyde kaplamanın oluşması kaplama atomlarının yüzeye çarpmasıyla başlar. Şekil 1.14'te film oluşumunun aşamaları gösterilmektedir. Atomların yüzeye çarpmasıyla birincil çekirdeklenme başlar. Yüzeye çarpan atomlar yüzeyde de difüze olur ve çekirdeklenmenin yanında kristal büyümesi, adacık oluşumu başlar. Yüzeyde difüzyonun devam etmesiyle kristal büyümesi devam eder ve aynı zamanda adacıklar içinde difüzyon gerçekleşerek kabalaşma başlar. Adacıkların üzerine gelmeye devam eden atomlarla ise ikincil çekirdeklenme gerçekleşir. Adacıkların kabalaşması, ikincil çekirdeklenme ve yüzeyde atom difüzyonu ile adacıklar büyümeye ve birleşmeye başlar. Birleşen adacıklar film tabakasını oluşturur ve kalınlık devam eder [26].

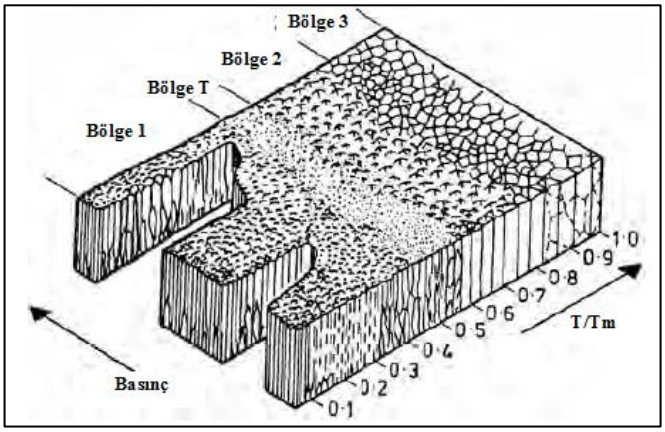
Yüzeye çarpan atomun hareketi altlık yüzeyin sıcaklığına veya atom enerjisine bağlıdır. Evaporasyonla üretilmiş atomların enerjisi düşüktür ve ilk çaptıkları yerde birikir. Bu sebeple evaporasyon yönteminin kullanıldığı kaplamalar genellikle porozludur, hatalıdır ve kötü mekanik özelliklere sahiptir. Sputterlenmiş yüksek enerjili atomun mobilitesi daha yüksektir ve aynı altlık malzemede, aynı sıcaklıkta daha yoğun kaplamalar üretir. Ancak yüksek sıcaklığa çıkılmadan poroziteli yapıyı engellemek mümkün değildir. Bu problemi aşmanın genel bir yolu iyon kaplama adı verilen birikim sırasında iyon bombardımanı uygulanması yöntemidir [26].



Şekil 1.14. Büyüme prosesinin şematik gösterimi [26]

1.4.2.2. Kaplama morfolojisi ve büyüme modelleri

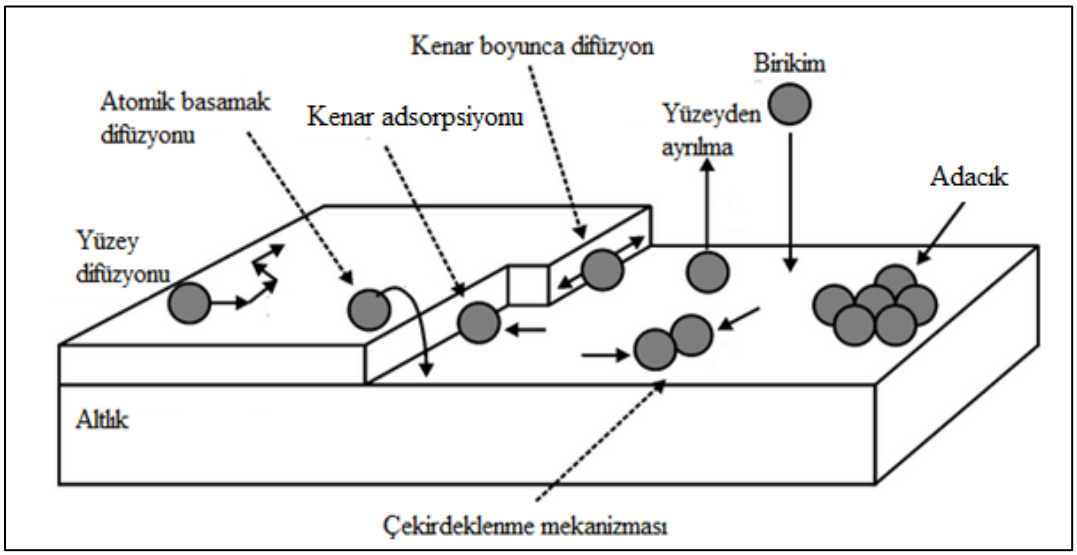
Kaplamada oluşan morfolojiler şematik olarak Şekil 1.15'te verilmiştir. Düşük sıcaklıklarda atomların yüzeye çarptıktan sonraki enerjileri düşük olduğundan kristal yapı sınırlı sayıda çekirdekten oluşur ve konik yapıdadır. Yoğun değildir ve konik kristaller arasında dikey porozlar içerir. Kalıntı gerilme ve dislokasyon yoğunluğu çok fazladır. Böyle bir yapıya 'botryoidal' yapısı denir ve bölge 1'deki yapı gibidir. Altlık sıcaklığının artmasıyla birlikte yüzeydeki atom mobilitesi artar ve yapı morfolojisi ilk önce zayıf tane sınırlarına sahip sıkıca paketlenmiş fiberimsi tanelere dönüşür (bölge T). Daha sonra ise bölge 2 deki gibi çok yoğun kolonsal taneler meydana gelir. Sıcaklığın daha da artması ile ise kolonsal taneler büyür ve daha yüksek yoğunluğa sahip eş eksenli taneler oluşur (bölge 3) [12, 16, 25, 26].



Şekil 1.15. Kaplama morfolojileri [12, 16, 25, 26]

Saf metaller ve tek fazlı alaşımlar için bölge 1 ve bölge 2 arasındaki geçiş sıcaklığı T1, bölge 2 ve bölge 3 arasındaki geçiş sıcaklığı ise T2 olarak isimlendirilir. Movchan ve Demchishin'in modeline göre T1 metaller için 0.3 T_m, oksitler için ise 0.22-0.26 T_m'dir. T2 ise 0.4-0.45 T_m'dir. Düşük biriktirme sıcaklıklarında bölge 2 yüksek mukavemet, düşük süneklik gösterirken sıcaklığın artmasıyla mukavemet düşer, süneklik artar. Konik yapılı bölge 1'in sertliği en yüksek değere sahipken bölge 3'e doğru artan sıcaklık ve birikim hızıyla beraber sertlik düşer [26].

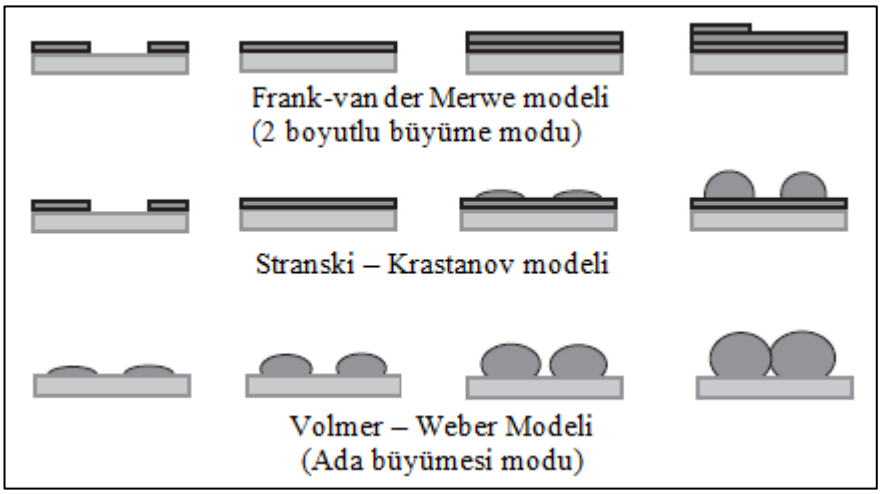
İnce film kaplamalarda filmin altlık üzerinde rastgele büyümesi istenmez. İstenilen morfolojinin ve özelliklerin elde edilmesi için filmin altlık yüzeyi ile uyumlu olarak atomik düzende büyümesi sağlanır. Oluşturulan düzenli büyümeye "epitaksiyel büyüme" denir. Düzenli büyüyen filmlere ise "epitaksiyel ince filmler" denir. Büyüme sırasındaki atomik olaylar Şekil 1.16'da verilmiştir[28].



Şekil 1.16. Büyüme sırasında gerçekleşen atomik olaylar [28]

Kaplama atomlarının altlık yüzeyindeki hareketinin kontrol edilmesiyle film büyüme modelleri belirlenmiştir. Bu modellere göre film iki boyutlu, üç boyutlu ya da her iki boyutu da kapsayacak şekilde büyür. Şekil 1.17'de film büyüme modelleri verilmiştir. Frank-Van der Merwe (FV) modelinde film büyümesi katman katmandır. Bir katman tamamlanmadan diğeri meydana gelmez. Kristaller mükemmel değildir ve dislokasyon gibi hatalar içerir. Büyüme iki boyutludur. Adatomlar altlık üzerine sıkı bağlıdır. Katmanlı film üretimine imkan sağlar.Volmer-Weber (VW) büyüme modelinde ise ilk aşamada yüzeyde adatomlar tarafından

adacık oluşturulur. İkinci aşamada ise bu adacıklar yayılırlar. Büyüme üç boyutludur. Adatomlar birbirine sıkı bağlıdır. Altlık üzerinde başka sert kaplamalar da birikebilir. Son olarak Stranski-Krastanovbüyüme modeli Volmer-Weber ve Frank-van der Merwe modellerinin ikisini de içerir. Bu nedenle altlık ve film latisleri arasında uyuşmazlık mevcuttur ve altlık üzerinde gerilim meydana gelir. İlk önce FV büyüme modeliyle film oluştuktan sonra kritik katman kalınlığı aşılır ve VW modelindeki adacıklar şeklinde birikim meydana gelir. Büyüme iki ve üç boyutludur [12, 26, 27].



Şekil 1. 17. İnce film büyüme modelleri [12]

1.4.2.3. İnce film kaplamaların mekanik özellikleri

TiN ve CrN gibi PVD kaplamalar takım çeliklerine ve kalıplara yüksek sertlik, iyi aşıma direnci ve yüksek kimyasal kararlılık kazandırarak takımların ve kalıpların çalışma ömrünü ve performansını arttırırlar [12, 22, 30, 31]. Son zamanlarda aluminyum ekstrüzyonu, plastik üretimi, haddeleme ve dövme gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında, sertliğini ve kimyasal kararlılığını koruyabilen kaplamalar kullanılmaktadır. Örneğin, CrN kaplamanın yüksek sıcaklık özellikleri incelendiğinde, aşınma testinde aşınma izlerinin 300 °C'den önce oksitlenmediği 500 °C'ye kadar ise sertliğini koruduğu bildirilmiştir [31]. Kaplamalardan istenenözellikler çalışma koşullarına göre belirlenir. Kaplamanın sertliği, tokluğu, yüksek sıcaklık korozyon direnci, kimyasal kararlılığı, aşınma direnci, kaplamanın maruz kaldığı sıcaklığa, etkiyen gerilmenin cinsine ve büyüklüğüne göre önem kazanır [32].

CrN kaplamalar yüksek sıcaklık oksidasyon direncine ve yüksek korozyon direncine sahiptirler. CrN kaplamalar korozyona ve adhesif aşınmaya karşı korumanın istendiği uygulamalarda tercih edilir [33]. CrN kaplamanınözelliklerini geliştirmek için bileşimine başka bir element ilave edilerek çok bileşimli kaplama yapılmaktadır. Bu mantıkla CrN'e Al ilave edilerek daha yüksek sertliğe, aşınma direncine ve yüksek sıcaklık oksidasyon direncine sahip olan AlCrN oluşturulmaktadır [32]. Aynı şekilde TiN'e Al ilavesi ile sertlikte ve yüksek sıcaklık oksidasyon direncinde önemli derecede artış meydana gelmektedir. CrN ve TiN kaplamalara ilave edilen Al içeriğinin artması her iki kaplamanın da oksidasyon direncinin artmasını sağlar [34]. AlTiN kaplama yüksek sıcaklık oksidasyon direncinin gerektiği koşullarda tercih edilir. AlTiN kaplamanın oksidasyon direnç sıcaklığı 800 °C ile TiN ve CrN kaplamalardan yüksektir [33]. TiN'e %65'ten daha fazla Al ilavesi kaplamanın kristal yapısını kübikten daha yumuşak olan sıkı paket hegzagonal kristal kafese dönüştürür [16, 17, 34].Diğer taraftan CrN esaslı kaplamalar AlCrN kristal kafes yapısını değiştirmeden daha fazla aluminyum içerebilir. Bu yüzden son zamanlarda AlCrN kaplamalar takım çeliği parçalarında yüksek ilgi çekmektedir [35].

Yüksek sıcaklıkta kuru sürtünme koşullarında krom ve aluminyum oksitler sürtünme katsayısını azaltırken, titanyum oksit sürtünme katsayısını arttırmakla beraber yüksek aşınma kayıplarına neden olmaktadır [34].

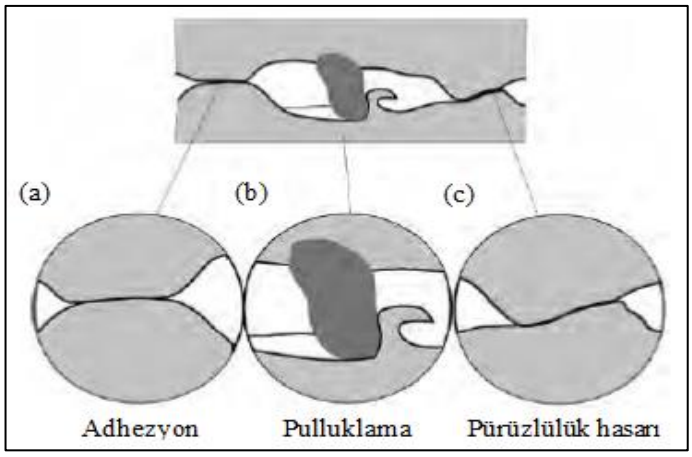
2. SÜRTÜNME VE AŞINMA

2.1. Sürtünme

Sürtünme, bir yüzeyin başka bir yüzey üzerindeki hareketine karşı koyan dirençtir. Bu yüzden sürtünmebir malzeme özelliği değil, harekete karşı oluşan gücün yarattığı bir sistemdir. Eşitlik (2.1)'de verilen sürtünme katsayısı (μ), teğetsel sürtünme kuvvetinin (F), temas eden yüzeye dik olarak etkiyen normal yüke (N), bölünmesiyle elde edilir [16].

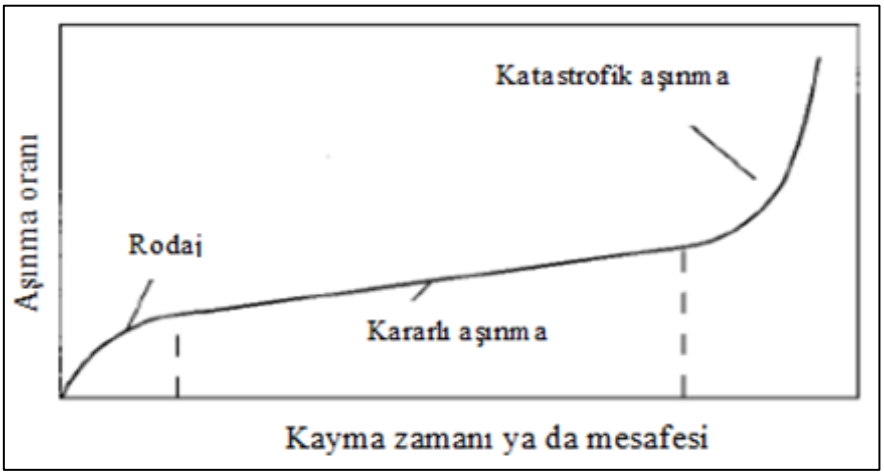
$$\mu = F/N \tag{2.1}$$

Sürtünme kuvveti, temasta olan iki yüzeyin yüzey özelliklerinden ve birbirleriyle olan etkileşimlerinden etkilenmektedir. Bowden ve Tabor yüzey özelliklerinin ve birbirleriyle etkileşiminin sürtünme kuvveti üzerindeki etkisini incelemişler ve kabul gören sonuçlar çıkarmışlar. Bowden ve Tabor'a göre kayma sistemlerinde her iki yüzeydeki pürüzler birbirleriye temas etmeye zorlanırlar ve aralarındaki adhezyondan dolayı birbirlerine kaynaklanırlar (Şekil 2.1a). Bir yüzey hareket ettiğinde ise pürüzler arasında oluşan mikrokaynaklı bağlantılar kırılır ancak kayma mukavemeti harekete karşı direnç oluşturur. Bu nedenle kayma sırasında sürekli olarak mikro kaynaklı bağlantılar oluşur ve kırılır. Sürtünme kavramında etkisi olan diğer mekanizma ise kazıma/pulluklamadır (Şekil 2.1b). Sert bir pürüz ya da partikül daha yumuşak bir yüzeye nüfuz eder ve yumuşak yüzeyde oluşan plastik akma sonucu yüzeyde kazıma yaparak oyuk açarsa, yüzey harekete karşı direnç gösterir. Diğer bir mekanizma ise pürüzlerindeformasyonudur (Şekil 2.1c). Pürüzler birbirleri üzerinden kaymaları sırasında plastik olarak deforme olduklarında harekete karşı gösterdikleri direnç artar. Ancak yapılan çalışmalar pürüzlerin plastik deformasyonunun yüzey pürüzlülüğünü azalttığını bunun sonucunda temas parametrelerinin azaldığını göstermiştir [16].



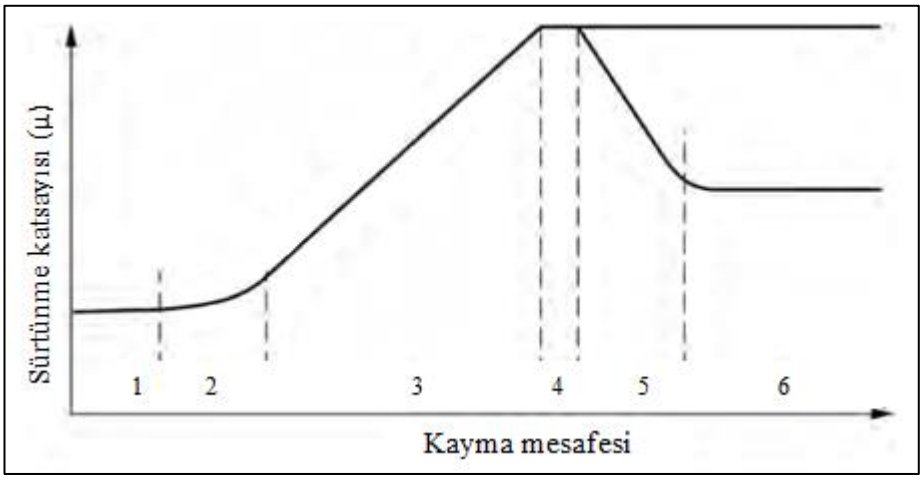
Şekil 2.1. Kayma sürtünmesini oluşturan mekanizmalar, a) adhezyon, b) kazıma/pulluklama, c) pürüzlerin deformasyonu [16]

Kayma sisteminde yüzeylerin etkileşimi sonucu ortaya çıkan aşınma, sürtünme kuvvetinden, sürtünme katsayısından bağımsız düşünülemez. Yüzey teması sırasında oluşan sürtünme sisteminde adhezyon, kazıma ve pürüz deformasyonu mekanizmaları sonucu meydan gelen aşınma üç basamağa ayrılır [36]. Birinci basamak rodaj (running-in) ya da alışma olarak adlandırılır. Bu basamak yüzeylerin birbirine teması ile başlar. Sürtünme mekanizmalarının etkin olduğu bölgede sürtünme katsayısı Şekil 2.2'de görüldüğü gibi sabit değildir. Aşınma miktarı ise artar. İkinci basamak kararlı hal aşınmasıdır (steady-state). Bu basamakta sürtünme katsayısı sabittir ve aşınma hızı düşüktür. Son olarak yüzeyde en büyük aşınma hasarının oluştuğu katastrofik aşınma basamağı gerçekleşir [36].



Şekil 2.2. Kayma sisteminde oluşan üç aşınma basamağı [36]

Kayma sisteminde ilk olarak oluşan alışma basamağında sürtünme katsayısı yüzeyde gerçekleşen sürtünme mekanizmalarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Kararlı hal aşınmasına geçilene kadar gerçekleşen mekanizmalar ve sürtünme katsayısının değişimi Şekil 2.3'te detaylı olarak verilmiştir [16].



Şekil 2.3. Kayma sisteminde ilk kayma periyodunda oluşan sürtünme mekanizmasının altı adımı [16]

Birinci aşama: İlk başta sürtünme kuvvetinin büyük bölümü yüzeydeki pürüzlerin oluşturduğu kazıma kuvvetinin bir sonucudur. Yüzey kirliliği sebebiyle adhezyon önemli bir rol oynamaz. Pürüzlerin deformasyonu meydana gelir, yüzey kolayca parlatılır ve bu statik sürtünme katsayısını etkiler. Sonuç olarak başlangıçtaki sürtünme katsayısı büyük oranda malzeme bileşimine, yüzey ve çevre koşullarına bağlıdır [16].

İkinci aşama: Birinci aşamadaki parlatma aşınmasında yüzeydeki kirlilikler uzaklaştırılır ve malzeme yüzeyi açığa çıkar, bunun sonucunda adhezyon devreye girer ve sürtünme katsayısında az bir artış meydana gelir [16].

Üçüncü aşama: Sürtünme katsayısı kayma yüzeyleri arasında sıkışan aşınma partiküllerinin sayısındaki hızlı artış ile birlikte artar. Pürüzlerin deformasyonu devam eder ve oluşan yeni yüzeylerin sonucunda adhezyon kuvveti artar. Bazı aşınma parçacıkları yüzeyler arasında kalır ve kazımaya sebep olur. Eğer her iki metal yüzeyinin sertliği birbirine eşitse bu parçacık her iki yüzeye de penetre olur ve kazıma sürtünmesi maksimum değere ulaşır [16].

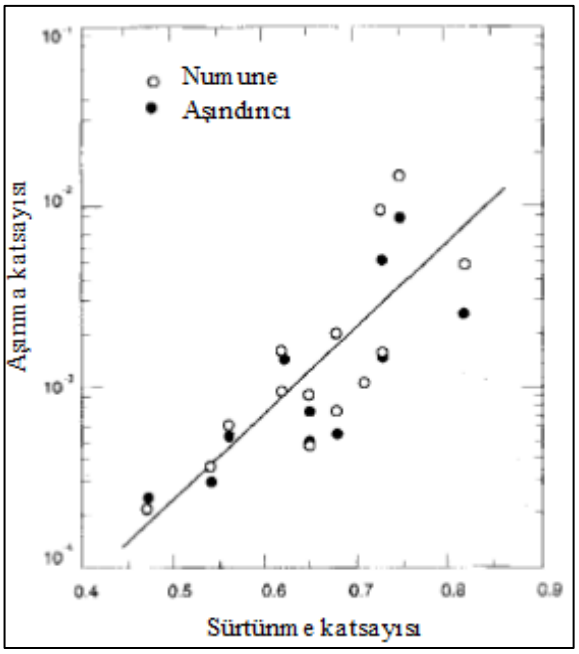
Dördüncü aşama: Bu aşamada yüzeyler arasındaki aşınma parçacıklarının sayısı sabit kalır. Çünkü yüzeye giren ve yüzeyi terk eden parçacıkların sayısı eşitlenmiştir. Adhezyonun sürtünmeye katkısı sabit kalır fakat kat ayrılma aşınması sebebiyle yeni engebeli yüzeyler meydana gelir ve pürüzlerin deformasyonu sürtünme katsayısını etkilemeye devam eder. Dördüncü aşama birbiriyle özdeş iki malzemenin birbiri üzerinde kayması durumunda ya da beşinci bölgenin kayda değer olmadığı durumlarda sabit aşınma bölgesini temsil eder [16].

Beşinci aşama: Sert bir malzemenin yumuşak bir numune üzerinde kaydığı gibi bazı durumlarda sert yüzeydeki pürüzler yavaş yavaş uzaklaşır ve ayna gibi pürüzsüz bir yüzey oluşur. Parlatılmış yüzeyde aşınma parçacıkları kolayca tutunamadığından pürüz deformasyonu ve kazıma azalır ve bu sürtünme kuvvetlerinin azalmasına sebep olur [16].

Altıncı aşama: Sert yüzey olabileceği maksimum ayna gibi pürüzsüz yüzeye ulaştıktan sonra yumuşak yüzey de ayna görünümüne ulaşır ve sürtünme katsayısı azalarak sabit aşınma değerine düşer[16].

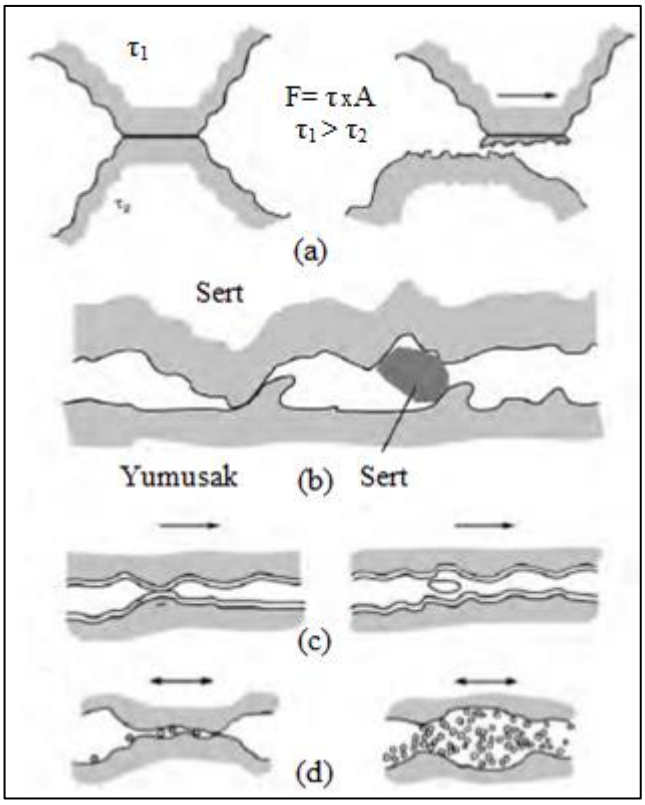
2.2. Aşınma

Aşınma, birbiri üzerinde hareket eden iki yüzey arasındaki temas sonucunda malzemenin yüzeyden uzaklaşması olarak tanımlanabilir. Bu sebeple aşınma ve sürtünme bu iki yüzey arasındaki tribolojik temasın eş zamanlı bir sonucudur. Aşınma ve sürtünme arasındaki bu ilişki tam olarak anlaşılabilmiş değildir fakat düşük sürtünmenin düşük aşınmaya yüksek sürtünmenin ise yüksek aşınmaya sebep olduğu bilgisi yaygındır. Şekil 2.4 yapılan deneylerin aşınma ve sürtünme ile ilişkili sonuçlarını göstermektedir. Fakat bu genel bir kural değildir ve bunun aksini gösteren örnekler mevcuttur [16].



Şekil 2.4. Aşınma katsayısının sürtünme katsayısı ile değişimi [16]

Aşınma iki farklı şekilde sınıflandırılabilir. Birincisi ortamın yağlayıcılı olup olmadığına göre, ikincisi ise mekanizmasına göre yapılan sınıflandırmadır. Fakat mekanizmasına göre sınıflandırmak çok karışıktır. Çünkü aynı anda birkaç aşınma mekanizması gerçekleşebilir. Bunun sonucunda aşınma mekanizmaları esas alınarak farklı aşınma sınıflandırma şemaları geliştirilmiştir ve hiç birisi uluslararası kabul görmemiştir ve bu sınıflandırmaların çoğu benzer özelliklere sahiptir [16]. Aşınma prosesi harekete bağlı olarak kayma aşınması, çarpma aşınması ve dönme aşınması olarak üçe ayırılırken, aşınma mekanizmasına göre abrasif, erozyon, adhezif ve yüzey yorulması olarak sınıflandırılmıştır. Farklı yapılan sınıflandırmalara ortak dil oluşturabilmek için DIN 50320 standardında genel bir sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre aşınma, abrasif aşınma, adhesif aşınma, tribokimyasal aşınma ve yüzey yorulması olarak 4 sınıfa ayrılmıştır (Şekil 2.5) [16, 36].



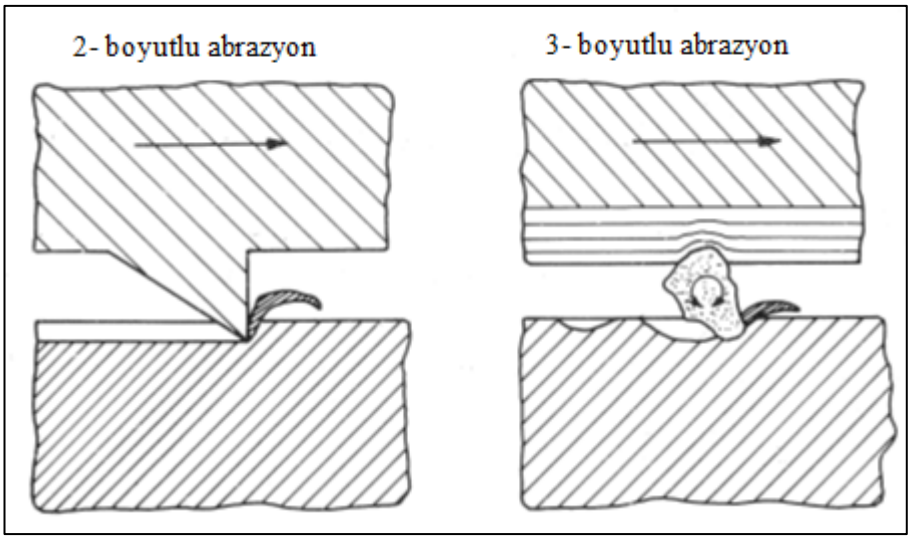
Şekil 2.5. Aşınma mekanizmaları, a) adhesif aşınma, b) abrasif aşınma, c) yorulma aşınması, d) tribokimyasal aşınma [16]

2.2.1. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma, malzeme yüzeyinin birinin diğerinden çok daha sert olduğu durumlarda meydana gelir. Sert yüzeydeki pürüz ya da parçacık yumuşak olan malzeme yüzeyine batar ve burada plastik deformasyon meydana getirir. Malzeme hareket ettiğinde ise bu sert yüzey yumuşak olan malzemeyi çizer veya malzemede oyuk açar [16].

Sert olan malzeme yüzeyinin geometrisine ve penetrasyonun derinliğine bağlı olarak, yumuşak yüzeydeki malzeme kaybı yarılma,çizilme ya da kesilme şeklinde olabilir [16].

Abrasif aşınma temas çeşidine göre iki boyutlu ve üç boyutlu aşınma olarak ayrılabilir. İki boyutlu aşınmada abrasif parça yumuşak yüzey üzerinde bir çizgi boyunca rahatça hareket eder. Üç boyutlu aşınmada ise aşındırıcı parça bir arayüzey gibi davranır (Şekil 2.6). İki boyutlu aşınma diğerine göre 10 ile 1000 kat daha fazla malzeme kaybına sebep olabilir [14, 37].

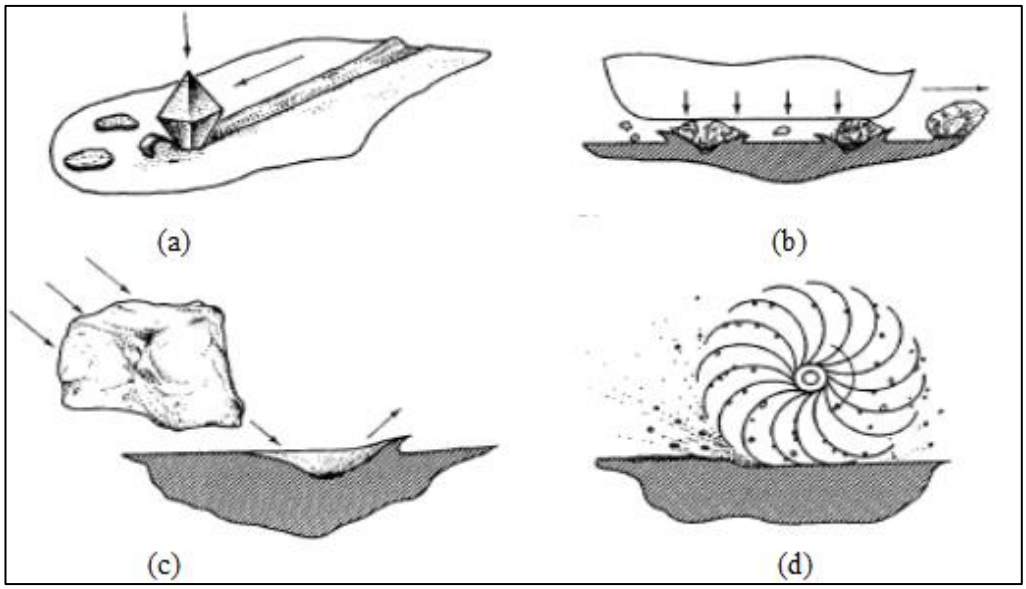


Şekil 2.6. İki boyutlu ve üç boyutlu abrasif aşınma [37]

İki ve üç boyutlu olarak sınıflandırmanın abrasif aşınma yüksek gerilme abrasif aşınması, düşük gerilme abrasif aşınması, oyuklu abrasif aşınma ve cilalama abrasif aşınması olarak sınıflandırılabilir. Şekil 2.7'de sırasıyla bu abrasif aşınma mekanizmaları görülmektedir [14].

Şekil 2.7a'da görülen düşük gerilme abrasif aşınması aşındırıcı parçaların metal yüzeyine hafifçe sürtmesi olarak düşünülebilir. Buradaki kriter yüklerin aşındırıcıyı parçalayacak kadar fazla olmamasıdır. Aşınma genelde çizik olarak gözlemlenir ve yüzey altı deformasyonu minimumdur. Şekil 2.7b'de verilen yüksek gerilme abrasif aşınmasında yükler aşındırıcıyı parçalayacak kadar fazladır. Malzeme yüzeyinde önemli ölçüde pekleşme meydana gelir [14].

Oyuklu abrasif aşınma terimindeki oyuk kelimesi aşınan yüzeyde oyuk oluşacak kadar yüksek gerilmenin meydana geldiğini ifade etmek için kullanılmıştır. Öğütücülerdeki çekiçler aşındırıcı olarak buna örnektir. Yüzeyde oluşan oyuk sonucu pekleşme ve plastik deformasyon meydana gelir. Şekil 2.7d'de verilen cilalama aşınması aşınma çeşidinin çok ılıman olanıdır. Mikro pürüzler ya da kimyasal korozyon ürünleri plastik olarak sıvanabilir. Cilalama abrasif aşınmasında yüzey pürüzsüzleşir ve parlaklaşır fakat bu yüzeyden malzeme kaybı ile gerçekleşir [14].



Şekil 2.7. Abrasif aşınma türleri, a) düşük gerilmeli, b) yüksek gerilmeli, c) oyuklu, d) cilalama abrasif aşınması [14]

Uygun malzeme seçimi ya da yüzey işlemleri ile abrasif aşınmadan korunmak mümkündür. Seramikler, karbürler, krom karbür içeren beyaz dökme demirler, sertleştirilmiş alaşımlı çelikler gibi malzemeler abrasif aşınmaya direnci yüksek olan malzemelerdir. Yüzey sertleştirme, plazma sprey ile seramik kaplama, krom kaplama ya da TiN gibi sert kaplamaları buhar biriktirme yöntemi ile uygulamak, abrasif aşınmadan korunmak için uygulanan yüzey işlemlerinden bazılarıdır [14].

2.2.2. Adhesif aşınma

Temas halindeki iki yüzeyin pürüzlü olduğu bölgelerde bölgesel basınç çok fazladır ve bu yüksek basınç pürüzlerde plastik deformasyon meydana getirir. Şekil 2.5.a' da görüldüğü gibi plastik deformasyon sonucunda ise bu pürüzler birbiriyle yapışır ve bir bağlantı oluşturur. Nispeten teğetsel olan hareket sonucunda ise bu bağlantı kopar ve yumuşak olan malzemede bir kayıp söz konusu olur. Pürüzler arasında meydana gelen yapışma için teoriler geliştirilmiştir. Bunlar; mekanik teori yani mikro ergime sonucunda bağ oluşumu, difüzyon teorisi atomların karşıklıklı olarak difüze olması, elektronik teori elektron alış verişi sonucunda elektronik bağ oluşması, adsorbe olma teorisi van der Waals bağları gibi ikincil bağlar ile oluşması teorileridir [36, 37].

Adhezif aşınmada yüzeyi koruyucu filmler ya da yüzey kirlilikleri önemli rol oynar. Uygulanan yük eğer aşınma sonucu malzeme kaybının bulunduğu bölgede oksit

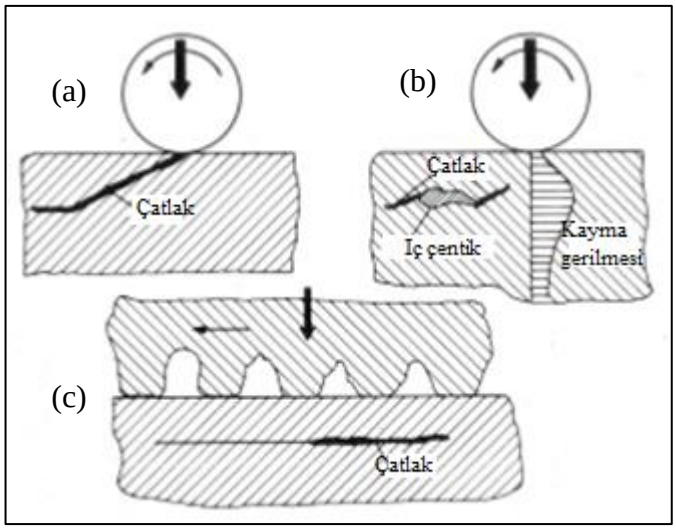
tabakası oluşmasına imkan verecek kadar düşükse, oluşan metal oksit yağlayıcı olarak davranır ve aşınma oranı nispeten düşüktür. Fakat uygulanan yük fazlaysa koruyucu oksit tabakası büyüyemeden parçalanır ve aşınma oranı yüksek olur [14].

Adhesif aşınmayı önleyebilmek için; birbirine benzeyen malzeme çifti kullanmaktan kaçınmak, yüzey yorulması sorun yaratmıyorsa sert malzeme kullanmak, malzemenin yapısında bulunan sert fazları göz önünde bulundurmak ve yağlayıcı kullanmak gerekir [14].

2.2.3. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması yüzeydeki tekrarlı yüklerin etkisiyle malzemede çatlak ya da pullanmanın oluşmasıyla meydana gelen malzeme kaybıdır. Dönme hareketinde oluşan yorulma için iki tür model vardır. Birinci modele göre (Şekil 2.8a) çatlak temas yüzeyinde basma ve çekme yüklerinin etkisiyle oluşur. Yüzeydeki kalıntılar, üretim sırasındaki ya da sonradan oluşan çentikler tarafından da bu çatlağın oluşması desteklenir. Çatlak yüzeyde oluşur ve malzemenin içine doğru ilerler. Yağlayıcı bulunan ortamlarda bu çatlağa yağlayıcı dolar ve tekrar basma yükü bu bölgeye etki ettiğinde hidrostatik basıncın da etkisiyle çatlak daha da genişler. Diğer modelde ise çatlak yüzeyin altındadır. Aşırı yükle birlikte malzemedeki kalıntılar ya da büyük karbürler yüzey altında çatlak oluşumuna sebep olurlar (Şekil 2.8b). Bu çatlakların çoğalmasıyla yüzeyde çukurlar meydana gelir [37].

Yüzey yorulması birbiri üzerinde kayma hareketi yapan iki malzeme yüzeyi açısından da önemlidir. Adhezif ya da abrasif aşınmayla birlikte malzemede çok düşük yükler altında bile çatlak oluşumu meydana gelebilir (Sekil 2.8c). Bu çatlakların büyüyerek yüzeye ulaşmasıyla birlikte malzeme pullanarak yüzeyden kopar [37].

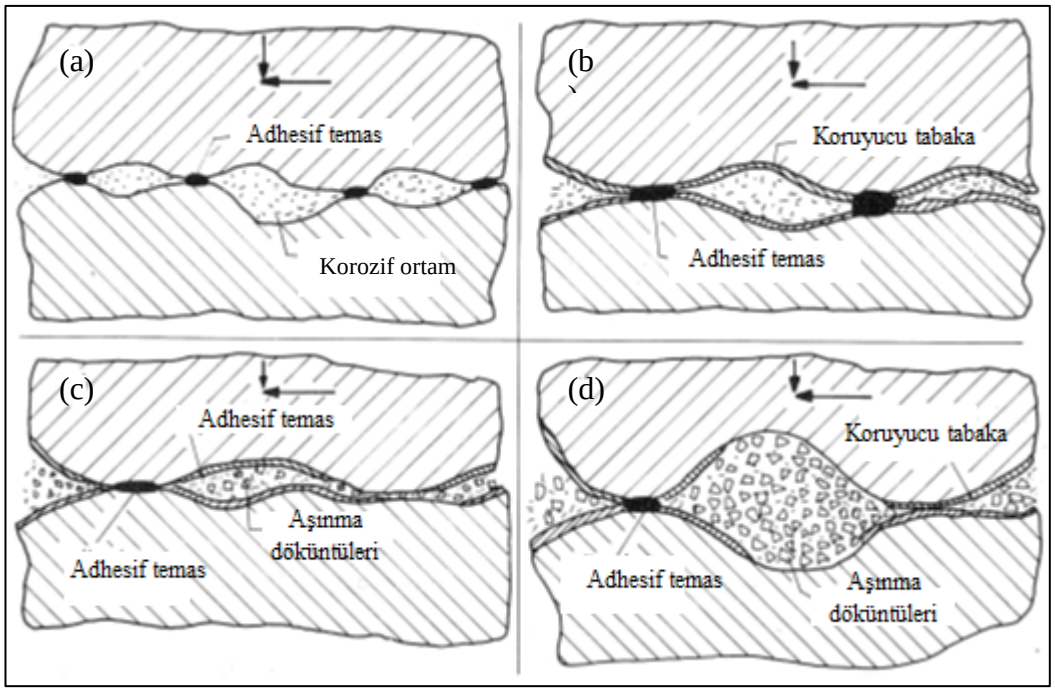


Şekil 2.8. Yorulma aşınması [37]

2.2.4. Tribokimyasal aşınma

Tribokimyasal aşınma, birbirileriyle temasta olan yüzeylerin bulundukları ortam ile etkileşmesi sonucu gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar nedeniyle meydana gelir. Korozif ortam olarak nitelendirilen bu ortam gaz ya da sıvı olabilir. Aşınma prosesi, reaksiyon tabakasının oluşması, kırılıp uzaklaştırılması ve yeniden oluşması döngüsüyle ilerler. Atmosferik oksijen bulunması durumunda aşınmış parçacıklar büyük ölçüde oksitlenir ve oksitlenmiş parçacıklar aşınma döngüsü sırasında hareket ederler. Korozif ortamın kimyasal etkisi dışında sert, oksitli parçacıkların abrasif etkisi de ortaya çıkar [37].

Tribokimyasal aşınma metalin ve kimyasal reaksiyon ürünlerinin, oksitli parçacıklar gibi, yüzeyden uzaklaştırılması sonucu oluşur. Şekil 2.9'a göre tribokimyasal aşınma dört gruba ayrılabilir. Şekil 2.9a' da gösterildiği gibi metalik temasta olan pürüzler adhesif aşınma sonucu yüzeyden koparlar. Kopan küçük metalik parçacıklar oksitlenirler. Metallerin ortam ile oluşturdukları kimyasal reaksiyon sonucu yüzeylerde koruyucu tabaka oluşur ve metalik temas azalır (Şekil 2.9b). Koruyucu yüzey tabakası, bölgesel yüksek basınçlardan dolayı ya da mikroyorulma sonucu kırılır ve metalik olmayan parçacıklar oluşur (Şekil 2.9c). Metalik ve metalik olmayan aşınma parçacıkları abrasif partikül gibi davranırlar ve temas ettikleri yüzeyde abrasif aşınmaya neden olurlar (Şekil 2.9d). Yeniden oluşan koruyucu tabaka yüzeyin daha pürüzsüz olmasını sağlar [37].



Şekil 2.9. Tribokimyasal aşınma sırasında oluşan mekanizmalar [37]

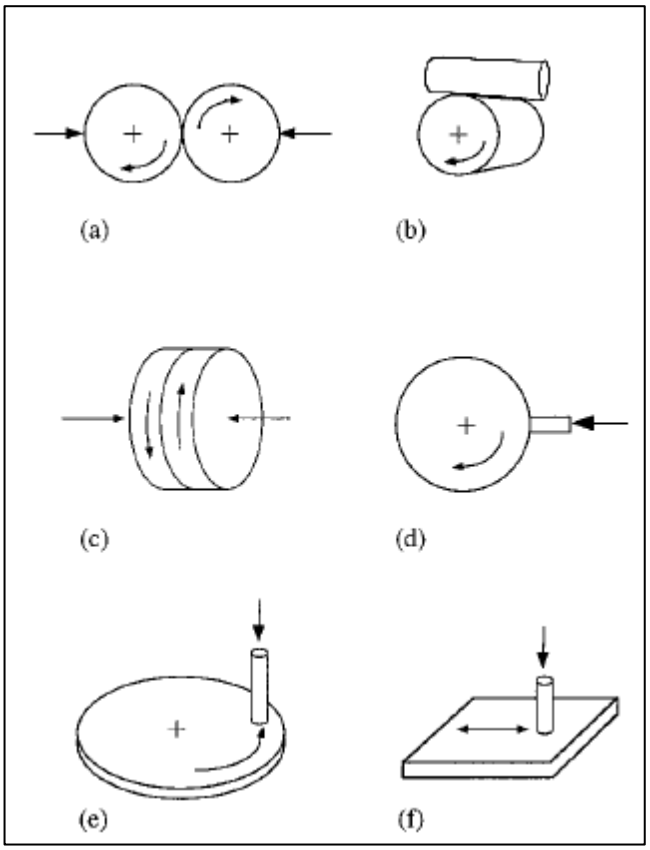
2.3.Aşınma Test Düzenekleri

Aşınma mekanizmalarının, aşınma hasarının ve sürtünme katsayısının etkilendiği birçok parametre vardır. Seçilen test düzeneğinin yüzeylerin temas edeceği gerçek koşulları yansıtması alınacak sonuçların doğruluğu için oldukça önemlidir. Yüzeylerin teması sırasında oluşan gerilme, ortamın sıcaklığı, kayma hızı, aşındırıcının sertliği, kimyasal kararlılığı ve ortamın kimyasal özellikleri kayma ve dönme aşınmalarında önemli test parametreleridir [36, 38].

Kayma aşınması testi Şekil 2.10'da verilen geometrik düzenlerde gerçekleştirilebilir. Test düzeneğinde kullanılacak malzemelerin konumlarının simetrik ya da asimetrik olarak ayrılması test düzeneğinin seçimini kolaylaştırır. Şekil 2.10a, b ve c'de verilen düzenekler simetrik konumlu test düzenekleridir. Asimetrik konumlu düzenekler ise Şekil 2.10d, e ve f'de gösterilmiştir. 'Pin on disc' düzeneği ile 'ball on disc' düzeneği aynı geometrik gösterime sahiptir (Şekil 2.10e). 'Pin on disc' düzeneğinde düz yüzeyli pin kullanılırken, 'ball on disc' düzeneğinde aşındırıcı olarak bilya kullanılır. Aşınma testlerinde aşındırıcı olarak seçilen malzemenin sertliği numunenin aşınma davranışının belirlenebilmesi açısından önemlidir. Polcar ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada aşındırıcı olarak seçilen 100Cr6 bilya aşınarak CrN, TiN ve TiCN kaplama yüzeylerine sıvanmıştır. Kaplama sertliğinden daha düşük sertliğe sahip

aşındırıcı seçilmesi sonucunda gerçek sürtünme katsayısı ve numuneye ait özgül aşınma hızı bulunamaz. Si_3N_4 gibi kimyasal kararlılığı ve sertliği yüksek aşındırıcı bilya ile yapılan testler ise gerçek sonuçlara ulaşılmasını sağlar [39].

Şekil 2.10.d'de 'block on cylinder' düzeneği verilmiştir. Bu düzenekte kare kesitli parça silindirin dairesel yüzeyi ile temas eder. Bu düzenekte silindir aşındırıcı, blok numune olarak kullanılır [36].

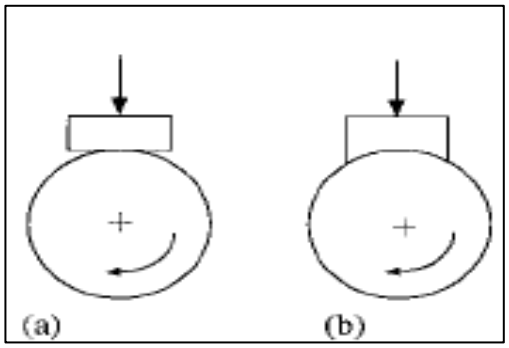


Şekil 2.10. Kayma aşınması test düzeneklerinin geometrik gösterimleri, a), b), c) simetrik test düzenekleri, d) block on cylinder, e) ve f) pin on disc [36]

'Block on cylinder' test düzeneğinde blok silindire, Şekil 2.11' de görüldüğü gibi iki şekilde temas edebilir. Uyumsuz temasta aşınma noktasal ya da çizgisel başlar ve çizgisel olarak devam eder. Uyumlu temasta ise aşınma geniş bir yüzey alanında gerçekleşir ve aşınma bitene kadar temas belirlenen alanda gerçekleşir [36].

'Block on cylinder' ekstrüzyon koşullarının elde edilmesini sağlayabilen bir test düzeneğidir. Aluminyum ekstrüzyonunda kalıp olarak kullanılan sıcak iş takım

çeliklerinin aluminyum karşısında gösterdiği aşınma davranışının belirlenmesi için en çok tercih edilen yöntemdir. Bu sistemde aluminyum alaşımından yapılmış silindir belirlenen ekstrüzyon sıcaklığında blok olarak kullanılan sıcak iş takım çeliğinin üzerinde hareket eder [17].



Şekil 2.11. "Block on cylinder" test düzeneğinde a) uyumsuz, b) uyumlu temas [36]

Aşınma testlerinde, sürtünme katsayısının kayma mesafesi boyunca değişimi elde edilir. Kantitatif ölçümler sonucu ise aşındırılan malzemelerin hacimsel kayıpları ve özgül aşınma hızları belirlenir [36].

Malzeme tasarımı ve geliştirmesi amaçlanırken bazı uluslararası kantitatif aşınma parametreleri olması gereklidir. Kullanılan aşınma testindeki koşullar farklılık gösterdiğinden aşınan malzeme hacmini kullanarak aşınma miktarını vermek yerine özgül aşınma hızı (oranı) hesaplanır [21]. Holm ya da Archard aşınma ilişkisi kullanışlı ve daha yaygın olduğundan özgül aşınma hızı (spesifik wear rate) hesaplanırken sık sık kullanılır. Eşitlik (2.2)' de verildiği gibi aşınma oranı W_r, kayıp hacmin, V, normal yük, N, ile toplam sürtünme mesafesi, m, çarpımına bölünmesiyle bulunur. Birimi ise $mm^3/N.m$ dir [36].

$$W_r = V/N.m \tag{2.2}$$

Aşınmada oluşan kayıp hacim ise kullanılan test düzeneğine bağlı olarak belirlenir. ASTM standardlarında düzeneklere göre kullanılabilecek eşitlikler belirlenmiştir. "Ball on disc" tipi bir cihazda bilya ile temas eden yüzeyde meydana gelen hacimsel kayıp ASTM G133-05 standardına göre Eşitlik (2.3) kullanılarak hesaplanır. R, aşınma izi yarıçapı, d, aşınma izi genişliği, r, bilya yarıçapıdır [40].

$$V = 2\pi R[r^2 \sin^{-1}(d/2r) - (d/4)(4r^2-d^2)^{1/2}] \quad (2.3)$$

Bilyada oluşan hacimsel kayıp ise Eşitlik (2.4) kullanılarak hesaplanır [41].

$$V = (\pi h/6)[3d^2/4+h^2] \quad (2.4)$$

$$h = r - (r^2 - d^2/4)^{1/2} \quad (2.5)$$

2.4. Uygulanan İşlemlerin Aşınma Üzerine Etkisi

2.4.1. Isıl işlemin etkisi

Östenitleştirme sıcaklığı arttıkça karbürlerin çözünmesinden dolayı östenit bileşimindeki karbon ve alaşım elementi miktarı artar bu yüzden çeliğin su verilmiş sertliği artar. Ancak östenitleştirme sıcaklığındaki artış östenit tane boyutunun kabalaşmasına ve sertliğin düşmesine neden olur. Bu durum Hall-Petch eşitliği ile açıklanabilir. Hall-Petch eşitliğine göre tane boyutu artışı malzemenin mukavemetini/sertliğinin azalmasına neden olur. Aşınma direnci öncelikli olarak çeliğin sertliğine bağlıdır. Bu nedenle östenitleştirme sıcaklığının çeliğin aşınma direncine etkisi yüksektir [1,7,42]. Wei ve arkadaşları 920-1220 °C arasında yaptıkları östenitleştirme işleminde sıcak iş takım çeliğinin sertliğinin arttığını, 920 °C'den 1120 °C'ye aşınma direncinin arttığını, 1120-1220 °C arasında ise östenitleştirme sıcaklığındaki artışın aşınma direnciniazalttığını belirtmişlerdir [43].

Östenit tane boyutunun yanında mikroyapının da aşınma direncini etkilediği raporlanmıştır [44]. Koneshlou ve arkadaşları H13 çeliğine uyguladıkları sıfıraltı işlem sonucu oluşan homojen martenzit latalarının ve homojen dağılmış küresel ikincil karbürlerin çeliğin aşınma direncini arttırdığını bildirmişlerdir [45].

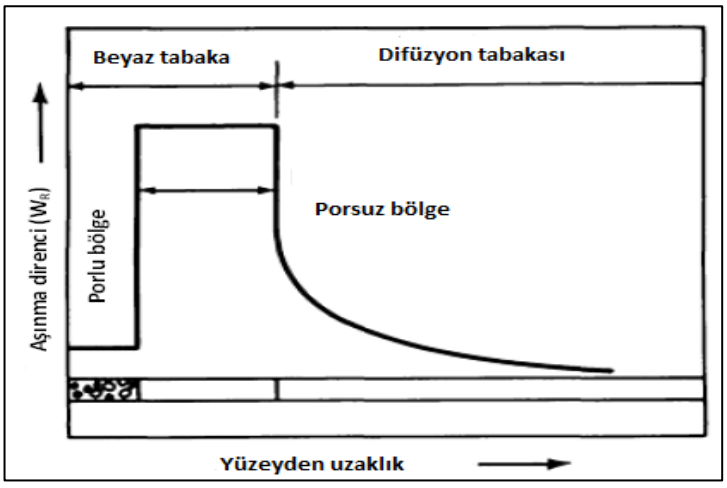
Temperleme işlemi krom, vanadyum, molibden gibi alaşım elementlerinin oluşturduğu ikincil karbürler sayesinde yüksek sertliği, tokluğu ve dolayısıyla aşınma direncini destekler [1,5,7].

Temperleme sıcaklığının H13 sıcak iş takım çeliğinin aşınma direncine olan etkisi üzerine yaptıkları çalışmada Wei ve arkadaşları temperleme sıcaklığının çeliğin sertliğine ve tokluğuna doğrudan etki ettiğini ve bu değerlerin değişmesinin de çelik yüzeyinin aşınma karakteristiğini değiştirdiğini belirtmişlerdir. Düşük sıcaklıkta (200

°C) temperlenen çelik yüksek sıcaklıkta kullanıldığında mikroyapısal olarak kararlılığını koruyamaz. Bu durum altlık ile oksit tabakası arayüzeyindeki gerilmeleri arttırır. Bu da oksitlerin delaminasyonuna neden olarak aşınma hızının artmasına yol açar. 500 °C temperlenen çelik en yüksek sertliğe ancak en düşük tokluğa sahiptir. Düşük tokluğu nedeniyle çelik yüzeyinde çatlak oluşumu başlar. Çatlaklar çökelmiş karbürler boyunca ilerleyerek aşınma hızının artışına neden olur. 700 °C'de temperlenen çelik ise en yüksek tokluğa ancak en düşük sertliğe sahiptir. Yumuşak altlık, oksit tabakasını destekleyemez ve yüzeyde plastik deformasyon meydana gelir. Plastik deformasyon sonucu meydana gelen aşınmada ağırlık kaybı en yüksek değere sahiptir [46].

2.4.2. Nitrasyonun etkisi

Nitrasyon tabakasının aşınma direnci yüzeyden uzaklaştıkça değişir (Şekil 2.12). Aşınma direnci beyaz tabakanın porlu bölgesinde, düşük yorulma mukavemeti, düşük yoğunluk ve porların çentik etkisi oluşturması nedeniyle düşüktür. Beyaz tabakadaki porsuz bölgenin aşınma direnci ise difüzyon tabakasından ve altlık/çekirdek malzemeden önemli ölçüde yüksektir. Beyaz tabakanın homojen yapıya sahip olduğu durumda aşınma direnci tüm tabakada sabit kalır. Difüzyon tabakasında ise aşınma direnci yüzeyden çekirdek malzemeye doğru gittikçe azalır. Bu durumun nedeni nitrür çökelti yoğunluğunun ve azotça aşırı doymuş matriksin yüzeyden merkeze doğru gidildikçe azalmasıdır [11].



Şekil 2.12. Yüzeyden uzaklaştıkça nitrasyon tabakasının abrasif ve adhesif aşınma direncinin değişimi [11]

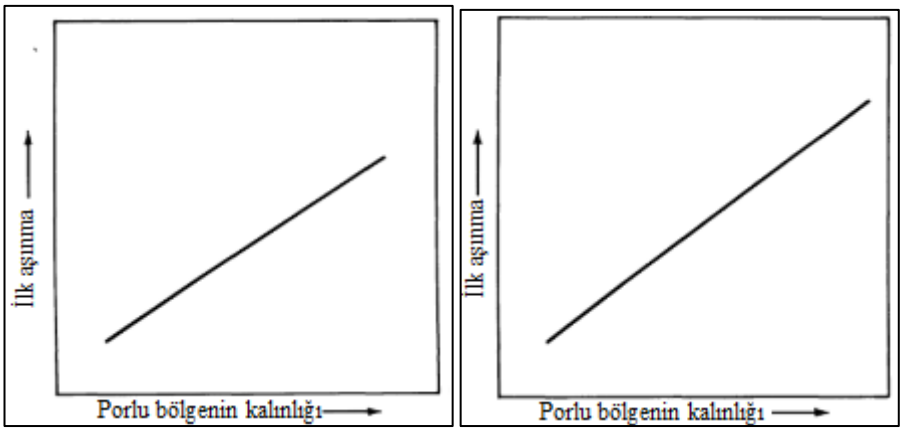
Adhesif aşınmada, beyaz tabakanın aşınma direnci nitrürlenmemiş parçalara oranla daha yüksektir. Bunun sebebi parçanın dış yüzeyinde elektron konfigürasyonundaki değişim nedeniyle mikrokaynaklanma eğiliminin azalmasıdır. Difüzyon tabakasında da azot içeren koruyucu tabakanın oluşması nedeniyle adhesif aşınma direnci yüksektir [11].

Abrasif aşınma incelendiğinde beyaz tabakanın yapısı sadece az miktarda plastik deformasyona izin verdiği için beyaz tabaka yüksek aşınma direncine sahiptir. Nitrürlenmemiş çeliklerle kıyaslandığında, difüzyon tabakasının katı ergiyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi mekanizmaları ile artan yorulma mukavemeti sayesinde abrasif aşınma direnci daha yüksektir [11].

Tribokimyasal aşınmada beyaz tabakanın tribooksidasyon direnci temas noktasındakoruyucu tabakanın oluşmasına bağlıdır. Sürtünme kaynaklı koruyucu tabakanın oluşum hızı eş zamanlı ilerleyen çökeltihızından büyük ise aşınma direnci artar. Difüzyon tabakasının aşınma direncinde de aynı bağımlılık geçerlidir [11].

Yüzey yorulmasında, beyaz tabakanın kristal yapısının değişmesinin plastik deformasyonu engellemesi sayesinde nitrürlenmiş parçaların aşınma direnci nitrürlenmemiş parçalara göre daha yüksektir. Difüzyon tabakasında katı ergiyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi mekanizmaları sayesinde plastik deformasyon azalır ve bu sayede yüzey yorulma direnci artar [11].

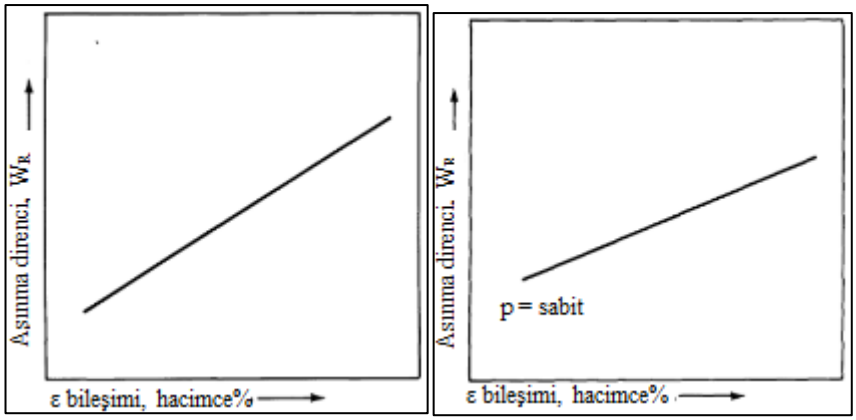
Beyaz tabakanın aşınma direncini etkileyen değişkenler Şekil 2.13 ve Şekil 2.14' te sıralanmıştır. Porlu bölge abrasif ve adhesif aşınma oluşumunda başlangıç aşınma miktarını arttırır. Tribooksidasyon ana aşınma mekanizması ise aşınma direncinde önemli ölçüde artış gerçekleşir. Yüzey yorulmasında beyaz tabaka kalınlığından ziyade porlu bölgenin kalınlığı etkilidir. Porlu bölgenin kalınlığındaki artış maksimum gerilmenin yüzeyden uzaklaşmasına ve yüzey yorulmasına karşı direncin azalmasına neden olur [11].



(a) (b)

Şekil 2.13. Porlu bölgenin a) adhesif aşınmaya ve b) abrasif aşınmaya etkisi [11]

Beyaz tabakanın yapısı ve kompozisyonu da aşınma direncini etkiler. Araştırmalar, beyaz tabakanın adhesif aşınma direncinin ε nitrür hacimsel miktarından önemli derecede etkilendiğini göstermiştir. Birçok durumda aşınma direnci ε nitrür miktarının artması ile artmıştır. Aynı durum abrasif aşınma mekanizmasının etkin olduğu koşullarda da geçerlidir (Şekil 2.14). Yüzey yorulmasında ise yüzey basıncının sabit olduğu durumda beyaz tabakadaki ε nitrür fazı aşınma direncini arttırıcıetkide bulunur [11].



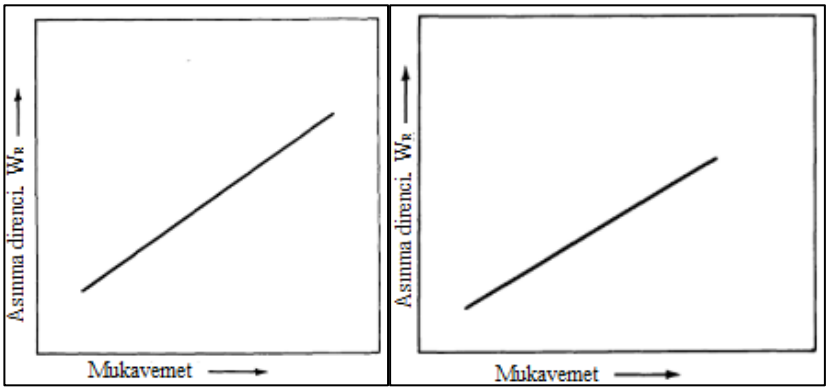
(a) (b)

Şekil 2.14. Beyaz tabakadaki ε faz bileşiminin a) adhesif aşınmaya, b) yüzey yorulma direncine etkisi [11]

Beyaz tabakanın bileşiminin aşınma direncini arttırıcı yönde etkisi olduğu gözlenmesine rağmen uygulamalarda yüzey aşınmasına karşı yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Birol'un nitrasyonlu ekstrüzyon kalıbı üzerine yaptığı çalışmada

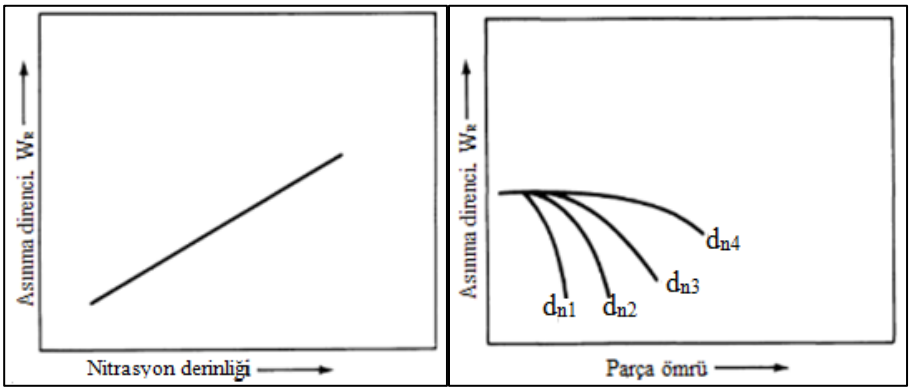
ekstrüzyon döngüsü sonrasında kalıp yüzeyindeki beyaz tabakanın tamamen aşındığı görülmüştür [47].

Altlık malzemenin mukavemeti difüzyon tabakasının aşınma direncini etkilemektedir. Altlık malzemenin mukavemetindeki artış nitrasyon işlemi ile elde edilen difüzyon tabakasının aşınma direncini arttırır (Şekil 2.15). Nitrasyon sırasında difüzyon tabakasında gerçekleşen çökelti sertleşmesi mekanizmaları sayesinde difüzyon tabakasının sertliği, abrasif, adhesif ve yorulma aşınması dirençleri artar [48]. Daha büyük nitrasyon derinlikleri de aşınma direncini arttıran etkiye sahiptir (Şekil 2.16). Nitrasyon derinliğindeki (d_n) artış başlangıç yüksek abrasif aşınma direncinin daha uzun sürelerde devam etmesini sağlar ve böylece parçanın çalışma ömrünü arttırır [11].



(a) (b)

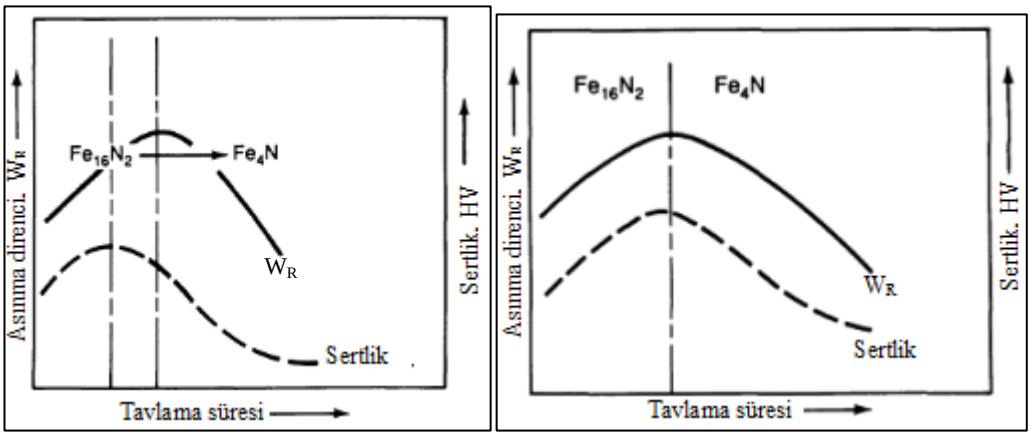
Şekil 2.15. Altlık malzemenin mukavemetinin difüzyon tabakasının a) adhesif aşınma direncine, b) abrasif aşınma direncine etkisi [11]



(a) (b)

Şekil 2.16. Nitrasyon derinliğinina) adhesif aşınma direncine etkisi, b) aşınma direncine ve parça ömrüne etkisi, $dn_1<dn_2<dn_3<dn_4$ [11]

Difüzyon tabakasında çökelen nitrürlerin adhesif ve abrasif aşınma direncine etkisi Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Difüzyon tabakasındaki nitrür çeşidi ve dağılımı nitrasyon sonrası yapılan tavlama işlemleri ile değiştirilebilir ve bu işlem aşınma direncini önemli ölçüde etkiler (Şekil 2.17). Aynı sıcaklıkta farklı sürelerde yapılan yaşlandırma işleminde nitrasyonlu parçaların sertlikleri birbirinden oldukça farklılaşır. İyi şekilde dağılmış $Fe_{16}N_2$ nitrürleri kaba Fe_4N nitrürlerinden daha iyi aşınma direnci gösterir [11].



(a) (b)

Şekil 2.17. Difüzyon tabakasının kompozisyonunun a) abrasif, adhesif aşınma direncine etkisi, b) yüzey yorulması aşınmasına direncine etkisi [11]

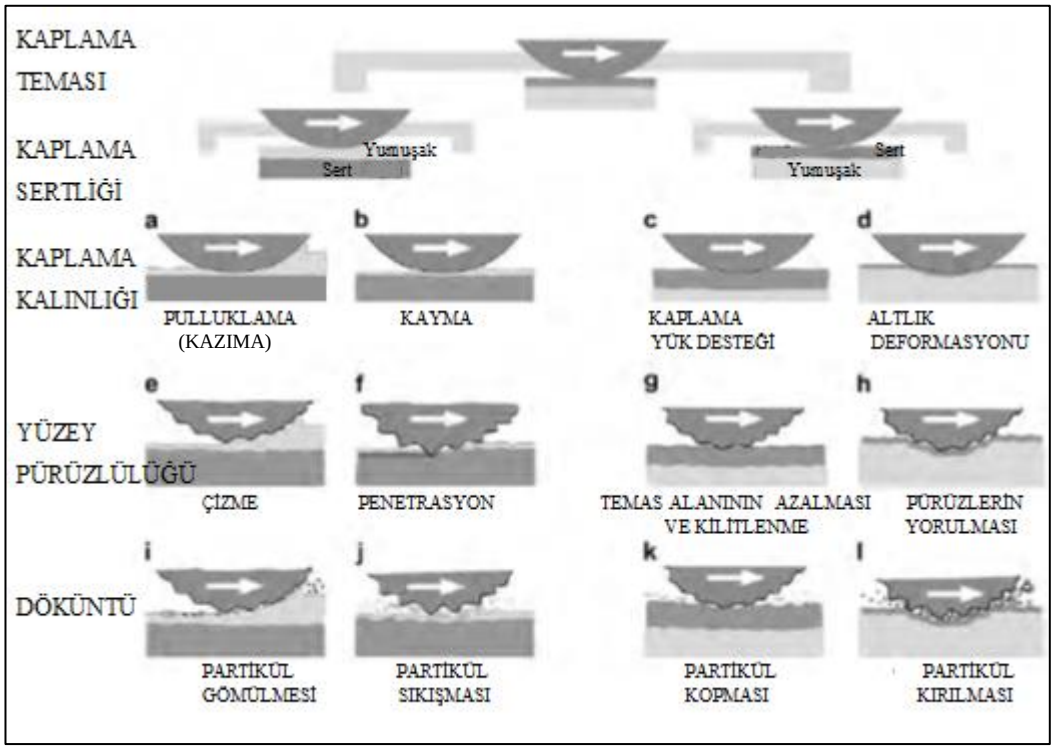
Nitrürlerin yüzey yorulması üzerine olan negatif etkisi ise Birol'un yaptığı çalışmada tespit edilmiştir. Azot atomlarının tane sınırları boyunca daha hızlı difüze olmasından dolay kırılgan nitrürlerin bulunduğu tane sınırları,çatlak oluşumuna neden olarak yüzey yorulması üzerine negatif etki meydana getirirler [47].

2.4.3. İnce film kaplamaların etkisi

Temas yüzeyinin biri ya da ikisinin kaplı olduğu durumlarda tribolojik temas prosesini kontrol eden dört temel parametreden söz edilebilir. Bunlar;

1. Kaplama ve numune sertlik ilişkisi
2. Kaplama kalınlığı
3. Yüzey pürüzlülüğü
4. Debris (döküntü) sertliği

Bu dört parametre arasındaki ilişki sonucunda tribolojik temas mekanizmaları tarafından karakterize edilen farklı temas koşulları meydana gelmiştir. Sert küresel kaydırıcının kaplı yüzeye temas ettiği 12 tipik tribolojik örnek Şekil 2.18'de gösterilmiştir [16].

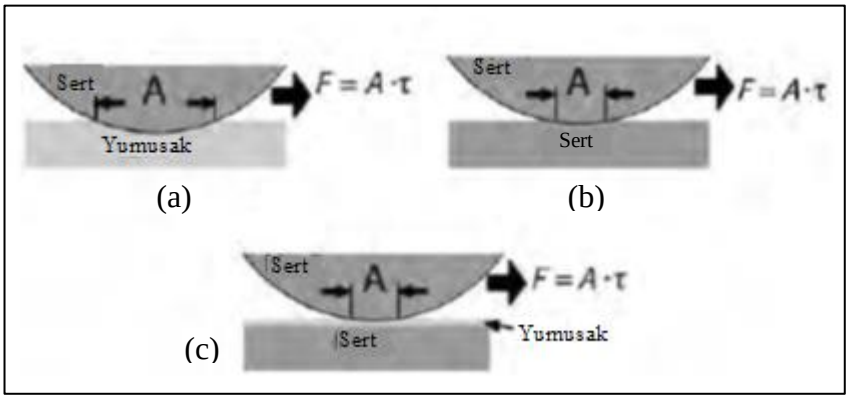


Şekil 2.18. Dört ana parametrenin, kaplama-numune sertlik ilişkisi, kaplama sertliği, kalınlığı ve pürüzlülüğünün aşınma mekanizmalarına etkisi [16]

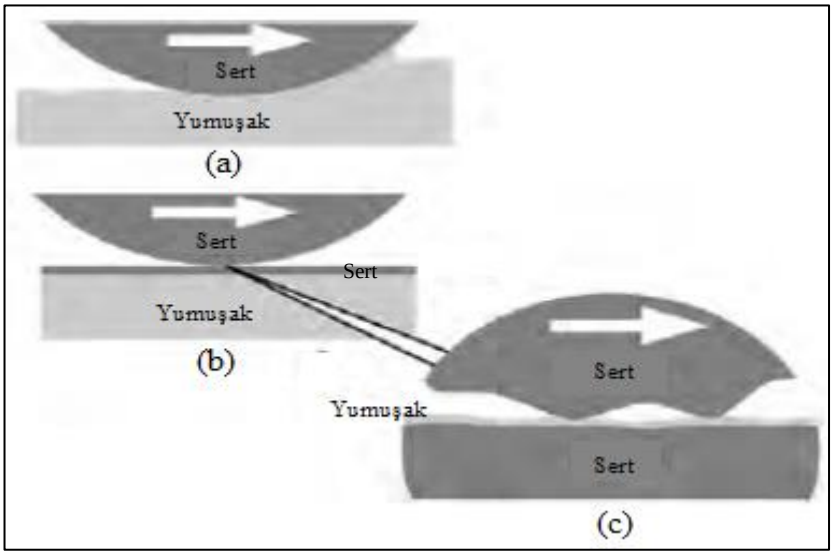
2.4.3.1. Kaplama sertliğinin etkisi

Kaplanmış yüzeyin tribolojik davranışını ve altlık sertliği ile olan ilişkisini etkileyen en önemli faktörlerden birisi kaplama sertliğidir. Bilyanın yüzey üzerinde kaydığı durumdaki temas yüzeyi ve kayma mukavemetinden doğan sürtünme kuvveti Şekil 2.19a ve Şekil.19b'de gösterilmiştir. Sert kaplama yüzeyinde temas alanı yumuşak kaplamaya oranla daha azdır ancak sertliğin yüksek olması nedeniyle kayma mukavemeti artar. Kayma mukavemetinin artması sonucunda ise sert kaplamalarda sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı artar. Sürtünmede azalmayı sağlamak için yüzey üzerine yumuşak ince film kaplanır, böylece temas yüzeyi ve ara yüzey kayma mukavemeti azalır (Şekil 2.19c). Yumuşak kaplamanın avantajı sürtünmeyi azaltmak olsa da Şekil 2.20a'da görüldüğü gibi yumuşak kaplamalar kazıma (pulluklama) nedenli aşınmaya uğrarlar. Yumuşak altlık üzerine sert kaplama uygulaması

sürtünmeyi arttırsa da her iki yüzeyde de makro ve mikro ölçekli kazımayı azalttığından aşınmayı azaltır (Şekil 2.20b). Bu yüzden sert kaplamalar özellikle abrasif ortamlarda kullanışlıdır. Düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direnci, sert kaplama üzerine düşük kayma mukavemetli bir mikrofilm oluşturularak elde edilebilir. Böylelikle kayma mikrofilm üzerinde meydana gelecek ve yük ise sert kaplama tarafından desteklenecektir (Şekil 2.20c). Örneğin, BN sert kaplamaları üzerine MoS_2 kaplanarak 0.005 kadar düşük bir sürtünme katsayısı elde edilmiştir [16].



Şekil 2.19. Altlık sertliğinin temas alanına ve sürtünme kuvvetine etkisi [16]

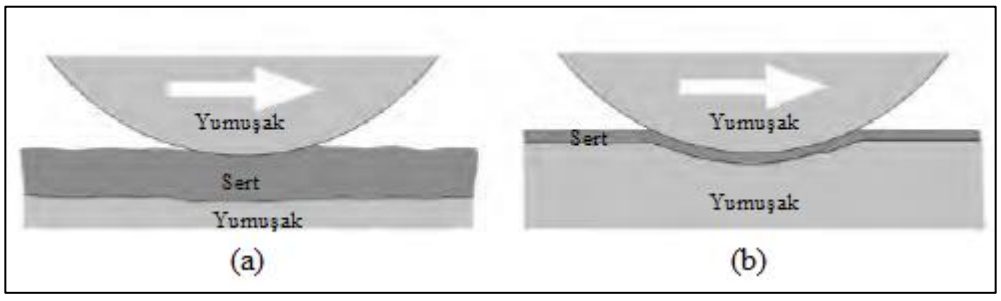


Şekil 2.20. a) Sert aşındırıcı yumuşak yüzey üzerinde oluşturduğu kazıma, b) kazıma yumuşak altlık üzerine sert kaplama yapılarak engellenmesi, c) sürtünmeyi azaltmak için sert kaplama üzerine yapılan yumuşak mikrofilm kaplama [16]

2.4.3.2. Kaplama kalınlığının etkisi

Yüzeyin sürtünme ve aşınma özelliklerini etkileyen diğer parametre kaplama kalınlığıdır. Kaplama kalınlığı yüzeydeki gerilmeleri, aşınma ve sürtünmeyi etkileyen önemli bir faktördür. Kaplama kalınlığını biriktirme prosesi sırasında kontrol etmek genellikle kolaydır fakat temas mekanizmasının karmaşıklığı hangi kaplama kalınlığının optimum olduğunu belirlemeyi zorlaştırmaktadır [16].

Yumuşak altlık üzerine sert kaplama yapılmış yüzey sert bilya ile temas ettiğinde kaplamanın kalınlığına bağlı olarak Şekil 2.21'de görüldüğü gibi iki farklı durum ortaya çıkar. Sert kaplama kalınlaştığı zaman yük taşıma kapasitesi artar ve altlık deformasyonu azalır (Şekil 2.21a).Eğer kaplama çok inceyse yükü taşıyamaz ve altlık deformasyonuna neden olur (Şekil 2.21b). [16]. Bu yüzden çift katmanlı kaplamalar geliştirilmiştir. Optimum tribolojik özellikleri sağlamak için nitrasyon üzerine PVD ince film kaplama yapılır. Kaplamanın hemen altında sert difüzyon tabakası oluşturularak yük taşıma kapasitesi arttırılır. Altlık deformasyonunun engellenmesi ile aşındırıcının kazıma etkisi azalır. Kaplamada yüksek sertlik ve aşındırıcı yüzey arası temas alanı ile aşındırıcının kaplamaya gömülmesi engellenerek yüzeyde kazıma oluşması engellenebilir. Kazımanın engellenmesi sürtünmeyi ve aşınmayı azaltır ancak sert kaplama kayma mukavemetini arttırır ve sürtünmesinin artmasına neden olur. Kazımanın engellenmesiyle sürtünme katsayısındaki azalış, kayma mukavemetinin neden olduğu artıştan daha azdır. Bu nedenle sert kaplamalarda kaplama kalınlığındaki artış sürtünme katsayısını arttırır [12, 16].



Şekil 2.21. Sert aşındırıcı bilyanın sert kaplama ile kaplanmış yumuşak altlık üzerinde hareketi, a) kalın kaplama, b) ince kaplama [16]

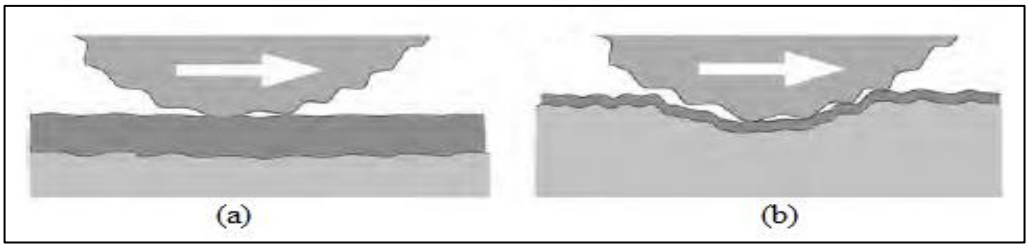
Kaplama kalınlığı da malzemenin sürtünme katsayısını ve aşınma davranışını etkileyen önemli bir parametredir. CrN kaplanmış altlık malzemenin sürtünme ve aşınma davranışı üzerine yapılan çalışmalarda özellikle kaplama kalınlığının 1μm olması halinde yükü taşıyamayarak kaplamanın yırtıldığı ve altlık malzemenin aşındığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, daha kalın kaplamalarda kaplamanın yükü taşıyabildiği, yırtılmadığı da belirtilmiş olup 5 ve 10 μm kalınlıktaki kaplamaların sürtünme katsayısını arttırdığı bildirilmiştir [16].

PVD ince film kaplamalarda kaplama kalınlığının, yük altında kaplamanın ve altlığın deforme olmasını engelleyecek optimum kalınlıkta olması gerekir. Bununla birlikte kaplama kalınlığının PVD prosesinde kaplama morfolojisini değiştirdiği unutulmamalıdır. Kalınlık artışı kaplamanın tane boyutunu arttırır ve yüzeye yapışmasını azaltarak kayma yükleri altında aşınmasına neden olur [16].

2.4.3.3. Pürüzlülüğün etkisi

Pürüzlü altlık yüzeyi kalın sert kaplama ile kaplandığında yüzey pürüzlülüğü sabit kalır ve kaplamayı da pürüzlü hale getirebilir. Yüzeyde kalan pürüzlülükler aşındırıcı ile esas malzeme arasındaki temas alanını belirler. Sert yüzey pürüzlükleri sert aşındırıcı ile temas ettiğinde gerçek yüzey teması birkaç pürüzlülük üzerinde gerçekleşir (Şekil 2.22a). Sayıca az olan bu temas noktalarında basınç çok yüksektir. Basınca elastik ve plastik deformasyona uğramadan dayanabilen pürüzlükler üzerinde kayma mukavemeti düşükse sürtünme katsayısı önemli ölçüde düşer [16].

Yumuşak altlığın sert kaplama ile kaplı olduğu yüzeyler sert pürüzlü bir aşındırıcı ile temasta olduğunda iki durum meydana gelir. Birinci durumda altlık malzemede plastik ve elastik deformasyon oluşurken (Şekil 2.22b) ikinci durumda yüzey pürüzlerinde deformasyon meydana gelir. Karşılıklı iki yüzeydeki pürüzlerin kilitlenmesi ve plastik deformasyonu sonucu sürtünme katsayısı önemli ölçüde artar [16].



Şekil 2.22. Sert pürüzlü aşındırıcının sert kaplama ile kaplanmış yumuşak altlık mazeme ile teması; a) kalın kaplamada temas alanın azalması ve pürüzlerin kilitlenmesi, b) ince kaplamada pürüz yorulması [16]

2.5. İnce Film Kaplamaların Aşınma Davranışları

Kaplamaların aşınma davranışları kaplamanın sertliği, kalınlığı ve pürüzlülüğünün yanında kaplamanın türünden, mikroyapısından, yük taşıma kapasitesinden, altlık ile arasındaki adhezyondan, aşındırıcının sertliğinden, ortamın sıcaklığı ve kimyasal özelliklerinden etkilenir. Tüm bu parametrelerin kombinasyonu kaplamanın sürtünme katsayısını ve aşınma hızını belirler [12, 16, 25].

Mo ve Zhu'nun yaptıkları çalışmada kaplamanın sertliğindeki artışın sürtünme katsayısını arttırdığı belirtilmiştir. Bu çalışmada yük değiştirildiği halde CrN'e göre daha sert olan AlCrN kaplamanın sürtünme katsayısının kararlı aşınma bölgesinde daha yüksek olduğu bulunmuştur [49].Yapılan diğer bir çalışma da yüksek sertliğe sahip (Ti,Al)N kaplamanın sürtünme katsayısının daha düşük sertliğe sahip CrN kaplamadan yüksek olduğunu göstermiştir [50]. Abrasif aşınma direnci için de sertlik önemli bir parametredir. Sertlik ile çizmeye, pulluklamaya ve abrasif aşınmaya direnç oluşturulurken plastik deformasyonun engellenebilmesi için düşük elastik modüle ihtiyaç duyulur. Abrasif aşınma testinde AlCrN, AlTiN ve CrN kaplamalı numunelerden en fazla aşınan kaplama CrN olarak rapor edilmiştir. SiC aşındırıcı ile yapılan testte kaplama sertliğinin aşındırıcıdan daha düşük olması nedeniyle CrN kaplamada plastik deformasyon, mikroçatlaklar, mikrodelaminasyon oluşmuştur [32].

Altlık sertliği kaplama aşınmasında ve sürtünme özelliğinde önemli bir etkiye sahiptir. Düşük altlık sertliği düşük yük taşıma kapasitesine sebep olur ve bu durum AlTiN ve CrN gibi sert kaplamaların çatlamasına ve parçalanmasına yol açar. Eriksson ve Olsson yaptıkları çalışmada TiAlN ve CrN kapladıkları iki farklı sertlikteki çelik altlığın kaplamanın aşınma davranışına etkisini incelemişlerdir. Daha

sert olan çelik altlığın daha yumuşak olan çelik altlığa göre daha iyi performans sergilediğini bildirmişlerdir. Yumuşak olan çelik altlığında kaplama gevrek kırılma mekanizması gösterirken, sert altlık üzerindeki kaplamada abrasif ve adhesif aşınma mekanizmaları meydana gelmiştir [50]. CrN kaplamanın daha sert altlık üzerinde daha yüksek aşınma direnci gösterdiği Vite ve arkadaşları tarafınca bildirilmiştir [51].

Aşınma testlerinde kullanılan aşındırıcının sertliğine bağlı olarak kaplamaların sürtünme katsayıları ve aşınma hızları değişir. Polcar ve arkadaşları CrN kaplamanın aşınma davranışını farklı aşındırıcı bilyalar kullanarak incelemişler ve aşındırıcının sertliğindeki artışın CrN kaplamanın sürtünme katsayısını arttırdığını belirtmişlerdir [31]. Aynı çalışmada ve yaptıkları benzer bir başka çalışmada 100Cr6 aşındırıcı bilya ile yapılan aşınma testinde bilyanın sertliğinin kaplama sertliğinden düşük olması nedeniyle bilyanın aşındığını ve kaplama yüzeyine sıvandığını kaydetmişlerdir [31, 39]. Aşındırıcının kaplama karşısındaki kimyasal kararlılığı da alınan sonuçlar açısından önemlidir. Yapılan bir çalışmada AlTiN kaplama WC bilya ile aşındırıldığında tribokimyasal etkileşimden dolayı AlTiN bileşimindeki Ti, bilya yüzeyine bağlanmış ve sürtünme katsayısı diğer kaplamalara göre yüksek bulunmuştur [32]. Aşındırıcının kimyasal kararlılığı ortam sıcaklığından da etkilenir. Birol, CrN, AlCrN ve AlTiN kaplamaların 550°C'de aluminyum alaşımı karşısındaki aşınma davranışlarını incelemiş ve sürtünme katsayılarının sırasıyla 1.83, 1.68, 1.41 gibi yüksek değerlere sahip olduğunu bildirmiştir. Aluminyumun ikili ve üçlü nitrürlerdeki çözünürlüğü ve ıslatma davranışı kaplama ve aluminyum silindir arasındaki etkileşimde kritik role sahiptir. Aluminyum tane sınırları boyunca difüze olur. Bu difüzyon aluminyum disk ile kaplamanın adhezyonuna neden olarak sürtünme katsayısını arttırır. CrN'ün aluminyum çözünürlüğünün yüksek olması daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olmasına neden olur [17]. Aynı zamanda tane sınırları boyunca difüze olan aluminyum, kaplama ile altlık arasındaki kohezyon kuvvetini azaltır ve kaplamanın kalkmasına sebep olur [17, 52]. Hardell ve Prakash tarafından 400 °C'de TiAlN kaplamave çelik bilya ile yapılan aşınma testinde kaplamadan aşındırıcı yüzeye malzeme transferi ve kayma yüzeyleri arasında oksit oluşumu sebebiyle kararsız ve yüksek sürtünme davranışı görülmüştür [19].

Ortam sıcaklığının 500-700 °C aralığına çıkması kaplamaların sürtünme katsayılarının artışına neden olur. Bu durum, kaplamanın yumuşaması, kayma sırasında daha fazla plastik deformasyon meydana gelmesi ve oksit oluşumuyla açıklanmaktadır. Yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça kaplama ile altlık arasındaki sertlik farkı daha fazla önem kazanır. Altlığın yumuşaması yetersiz yük taşınmasına ve kaplamanın ani hasarına neden olur. Dupleks sistemler, nitrasyon üzerine kaplama yapıldığında, yüksek sıcaklıklarda daha yüksek performans gösterirler [19]

Kaplamanın sertliği, kalınlığı ve yük taşıma kapasitesi kaplama altında oluşturulan nitrasyon tabakası ile arttırılır [19]. Yük taşıma kapasitesinin yanında kaplama altındaki nitrasyon tabakası sertliği arttırarak çizilmeye karşı direnci yükseltir. Aynı zamanda nitrasyon tabakası, seramik kaplama ile çelik yüzeyi arasındaki sertlik farkını azaltır [53]. Rodriguez ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada tek kaplama sistemin sınırlı yük taşıma kapasitesi sebebiyle, altlığın plastik deformasyonu sonucunda (Ti,Al)N PVD kaplama gevrek kırılmış ve hacimsel olarak yüksek aşınma göstermiştir. Buna karşılık, gaz nitrürlenmiş yüzey ortalama beş kat daha fazla aşınma direnci gösterirken dupleks kaplama sistemi ise neredeyse aşınmamıştır [53]. Sadece nitrasyon tabakasının yük taşıma kapasitesi tek katmanlı kaplamadan daha yüksektir [19]. Ancak yüksek sıcaklık uygulamalarında aluminyumun demir karşısındaki afinitesinin yüksek oluşu nitrürlenmiş çelik yüzeyi ile aluminyum billeti arasında yüksek adhezyona, yüksek sürtünme katsayısına ve yüksek aşınmaya neden olur [22]. Bu yüzden nitrürlenmiş çelik yüzeyinin modifiye edilmesi gerekir. Bunun sonucunda dupleks kaplamalar ile örneğin, nitrür tabakası üzerine PVD ile kaplama yapılarak, yüzeye optimum tribolojik özellikler kazandırılır. Optimum tribolojik özellikler kaplamanın altındaki difüzyon tabakasının yük taşıma kabiliyeti ve aluminyum karşısında daha yüksek kimyasal kararlılığa sahip ince film kaplama sayesinde elde edilir [22]. Nitrasyon uygulamasının başka bir nedeni ise sert kaplamalar için önemli bir hasar mekanizması olan yumurta kabuğu şeklinde dökülmelerin önlenmesidir. Bu tür hasarda altlık deforme olduğunda kaplama da hasara uğrar ve dökülür. Kaplamanın altında oluşturulan nitrasyon tabakası ile bu tür hasarlar engellenebilir [54]. Kaplama ile altlık arasındaki adhezyon, kaplanmış takım çelikleri için hayati öneme sahiptir. Nitrürleme üzerine ince film kaplaması yapıldığında nitrasyon tabakası kaplamanın adhezyonunu arttırır [55]. Nitrasyon

üzerine yapılan kaplama uygulamalarında nitrürlenmiş çelik ile kaplama arasında iyi bir adhezyon sağlanması için nitrür tabakasında demir nitrürün yani beyaz tabakanın kaldırılması gerekir [54]. Kaplamanın yük taşıma kapasitesi, nitrasyon işlemi ile arttırılır. Batista ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada nitrasyon işlemi ile kaplamaların adhezyon testinde daha yüksek kritik yüke sahip oldukları belirlenmiştir [56].

3. MALZEME VE YÖNTEM

Yüksek lisans çalışması kapsamında,aluminyum ekstrüzyonu gibi yüksek sıcaklıkta metallere plastik şekil verme uygulamalarında kalıp malzemesi olarak kullanılan sıcak iş takım çelikleri test malzemesi olarak seçilmiştir. Seçilmiş malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirerek aşınma davranışlarını iyileştirmek hedeflenmiştir.

Bu hedef doğrultusunda farklı alaşım kompozisyonlarına sahip üç adet sıcak iş takım çeliği seçilmiş olup, bu çeliklere başlangıçta konvansiyonel ısıl işlemler (östenitleştirme, su verme ve temperleme) uygulanmıştır. Isıl işlemler sonrasında çeliklerin yüzey özelliklerinin geliştirilebilmesi için nitrasyon ve PVD ince film kaplama işlemleri uygulanmıştır. Yüzey işlemlerinin çeliklerin aşınma davranışlarına etkisinin anlaşılabilmesi için ise çeliklere hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıkta aşınma testleri uygulanmış ve aşınan yüzeyler mikroskobik teknikler ile incelenmiştir.

3.1. Malzeme Seçimi

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan sıcak iş takım çelikleri Schmolz-Bickenbach Çelik A.Ş'dentemin edilmiştir.Temin edilen çeliklerden ikisiDIN standardında 1.2343 ve 1.2367 olarak bilinentipik sıcak iş takım çelikleridir. Diğer bir çelik ise firmanın patentli ürünü olan ve Thyroterm 1.2999 EFS Supra olarak adlandırılan sıcak iş takım çeliğidir.Çeliklerin, üretici tarafından bildirilen, kimyasal kompozisyonları Tablo 3.1'de verilmiştir. Bu tür alaşımların kompozisyonları bilindiği üzere martenzitik bir matriks oluşturacak şekilde tasarlanır. 1.2343 ve 1.2367 sıcak iş takım çeliklerinde ikincil sertlik baskın olarak Cr'ca zengin alaşım karbürlerinden elde edilirken, daha yüksek Mo içeriğine sahip 1.2999 çeliğinde sertlik Mo'ce zengin alaşım karbürlerince sağlanır. Aynı zamanda 1.2999 çeliğinde artan C ve V miktarı ile kesitçe sertleşebilirlik arttırılır ve yüksek sıcaklık davranışı geliştirilir [1].

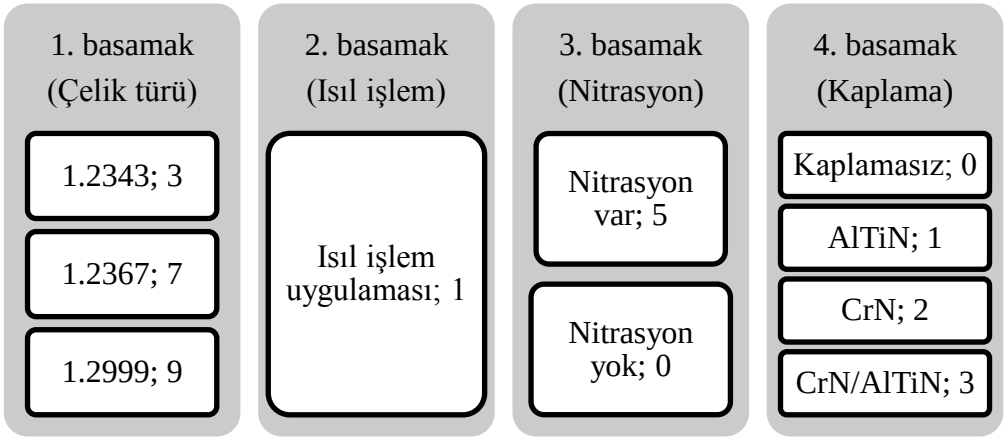
Tablo 3.1. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan sıcak iş takım çeliklerinin kimyasal kompozisyonları (ağ. %)

Malzeme	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
1.2343	0,38	0,30	1,00	5,30	1,30	0,40
1.2367	0,38	0,30	0,30	5,00	3,00	0,60
1.2999	0,45	0,30	0,30	3,00	5,00	1,00

Deneysel çalışma için her bir çelik türüne ait kütükten 20mm x 20mm x 20mm boyutlarında numuneler kesilmiştir. Yüzey işlemleri ve aşınma testleri için her bir çelik türünden 32 adet numune kullanılmıştır. Tüm numunelerin yüzeyleri ısıl işlem ve nitrasyon işlemi öncesinde 120 ve 320 ve 600 mesh'lik zımparalar ile zımparalanmıştır.

3.2. Malzemelerin Kodlama Sistematiği

Kullanılan numuneler için dört basamaktan oluşan kodlama sistemi oluşturulmuştur. Bu sistemde birinci basamak; çelik türünü, ikinci basamak; ısıl işlem uygulamasını, üçüncü basamak; nitrasyon uygulamasını, dördüncü basamak; kaplama uygulamasını göstermektedir. Kodlama sistematiği Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu yöntemde birinci basamakta 1.2343 çeliği için 3, 1.2367 çeliği için 7, 1.2999 çeliği için 9 rakamı kullanılmıştır. İkinci basamakta ısıl işlem uygulandığını göstermek için 1 rakamı kullanılmıştır. Üçüncü basamak için nitrasyon işlemi söz konusu ise 5, değil ise 0 kullanılmıştır. Dördüncü basamakta ise AlTiN kaplama için 1, CrN kaplama için 2, CrN/AlTiN kaplama için 3 kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Numunelere uygulanan kodlama sistematiği

Örneğin; ısıl işlem ve nitrasyon uygulanmış, AlTiN kaplanmış 1.2343 sıcak iş takım çeliğine 3151 kodu, ısıl işlem uygulanmış ve CrN kaplanmış 1.2367 sıcak iş takım çeliğine 7102 kodu verilmiştir. Tablo 3.2'de numune kodları, numunelere uygulanan işlemler ile birlikte gösterilmiştir. Uygulanan işlem sütununda "/" işareti ile yapılan gösterimler numuneye sırasıyla belirtilen işlemlerinyapıldığını gösterir. "Isıl işlem/CrN/AlTiN kaplama" ifadesi, ısıl işlem sonrası CrN üzerine AlTiN kaplamanın yapıldığını belirtir.

Tablo 3.2. Numunelere uygulanan işlemler

Numune kodu	Uygulanan işlem
3100	Isıl işlem
3101	Isıl işlem/AlTiN kaplama
3102	Isıl işlem/CrN kaplama
3103	Isıl işlem/CrN/AlTiN kaplama
3150	Isıl işlem/Nitrasyon
3151	Isıl işlem/Nitrasyon/AlTiN kaplama
3152	Isıl işlem/Nitrasyon/CrN kaplama
3153	Isıl işlem/Nitrasyon/CrN/AlTiN kaplama
7100	Isıl işlem
7101	Isıl işlem/AlTiN kaplama
7102	Isıl işlem/CrN kaplama
7103	Isıl işlem/CrN/AlTiN kaplama
7150	Isıl işlem/Nitrasyon
7151	Isıl işlem/Nitrasyon/AlTiN kaplama
7152	Isıl işlem/Nitrasyon/CrN kaplama
7153	Isıl işlem/Nitrasyon/CrN/AlTiN kaplama
9100	Isıl işlem
9101	Isıl işlem/AlTiN kaplama
9102	Isıl işlem/CrN kaplama
9103	Isıl işlem/CrN/AlTiN kaplama
9150	Isıl işlem/Nitrasyon
9151	Isıl işlem/Nitrasyon/AlTiN kaplama
9152	Isıl işlem/Nitrasyon/CrN kaplama
9153	Isıl işlem/Nitrasyon/CrN/AlTiN kaplama

3.3. Isıl İşlem Uygulamaları

Aluminyum ekstrüzyonunda kullanılan sıcak iş takım çeliklerine ısıl işlem uygulamaları ile yüksek sertlik ve yeterli tokluk değerleri kazandırılır. Deneysel çalışma kapsamında da sıcak iş takım çeliklerine ısıl işlemler uygulanmış ve çalışma şartlarında gerekli olan özellikler kazandırılmıştır. Isıl işlem uygulamaları Tablo 3.3'te verilen parametrelerde Schmolz-Bickenbach Çelik A.Ş.'ye ait ısıl işlem ünitelerinde gerçekleştirilmiştir. Tablo aynı zamanda ısıl işlemler sonrası matriks sertliklerini de göstermektedir. Malzemelerden 1.2343 çeliği, 1.2367 çeliği ile eşdeğer karbon içermektedir. 1.2343 çeliğinin 1.2367 çeliğine göre daha düşük Cr+Mo+V içermesi, sertlik değerlerinden anlaşılacağı gibi, daha düşük sertleşebilirliğinin olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan 1.2367 çeliğine göre daha yüksek karbon ve sertleşebilirlik sağlayan alaşım elementleri içeren 1.2999 çeliği ise proses koşullarından dolayı daha düşük sertliktedir.

Tablo 3.3. Sıcak iş takım çeliklerine uygulanan ısıl işlemler ve matriks sertlik değerleri

Malzeme	Ön ısıtma I	Ön ısıtma II	Östenitleştirme	Su verme	Temperleme*	Sertlik, $HV_{0.01}$
1.2343			1030°C, 30 dak.		585°C, 120 dak.	480± 5
1.2367	600-650 °C, 60 dak.	800-850 °C, 60 dak.	1050 °C, 30 dak.	Hava (4 Bar)	560°C, 120 dak.	538 ± 2
1.2999			1080 °C, 30 dak.		560°C, 120 dak.	504 ±2

*Temperleme işlemi üç kademede gerçekleştirilmiştir.

3.4. Yüzey İşlem Uygulamaları

Deneysel çalışma kapsamında ısıl işlem görmüş çeliklere yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla nitrasyon ve yüzey kaplama işlemleri uygulanmıştır. Nitrasyon işlemi Schmolz-Bickenbach Çelik A.Ş. nitrasyon tesislerinde, yüzey kaplama işlemleri ise Ionbond Tinkap Yüzey Teknolojileri San. Tic. A.Ş. PVD kaplama ünitelerinde gerçekleştirilmiştir.

3.4.1.Nitrasyon

Deneysel çalışma kapsamında çelik yüzeylerine nitrasyon işlemi uygulanmış olup bu işlem ile aşınma direncinin arttırılması hedeflenmiştir. Aynı zamanda bu işlem ile Bölüm 3.4.2'de detaylıca anlatılacak olan PVD ince film kaplamaların yüzeye tutunmasının ve altlık malzemenin yük taşıma kapasitesinin arttırılması amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak, kontrol çalışmalarında, ısıl işlem uygulanmış çelik numunelerin yarısı doğrudan ince film kaplanmış olup, diğer yarısına kaplama işleminden önce Tablo 3.4'te verilen parametreler ile gaz nitrasyon uygulanmıştır. Nitrasyonu takiben kaplanacak olan numunelerin yüzeylerinde oluşan beyaz tabaka 800 ve 1000 mesh zımparalar ile ince zımparalama yapılarak kaldırılmış ve yüzey sırasıyla 3 ve 1 μm'lik elmas pastalar ile parlatılmıştır. Nitrasyonsuz numune yüzeyleri de kaba ve ince zımparalama işlemleri sonrasında 3 ve 1 μmlik elmas pastalar ile parlatılmıştır.

Tablo 3.4. Sıcak iş takım çeliklerine uygulanan gaz nitrasyon parametreleri

Numune kodu	Nitrasyon sıcaklığı	Nitrasyon süresi	Soğutma
3150 3151 3152 3153 7150 7151 7152 7153 9150 9151 9152 9153	585 °C	6 saat	Hava (1,1 Bar)

3.4.2.Katodik ark fiziksel buhar biriktirme

Çalışma kapsamında sadece ısıl işlem uygulanmış ve ısıl işlem sonrasında nitrasyon uygulanmış numunelere CAPVD yöntemi ile AlTiN, CrN, CrN/AlTiN ince filmler kaplanmıştır. Kaplama parametreleri Tablo 3.5'te verilmiştir. AlTiN ve CrN kaplamalar Novatech NVT-11 manyetik alan odaklamalı katodik ark buharlaştırma PVD sistemiile; CrN/AlTiN kaplama ise Sinoarc SA-14C-P katodik ark buharlaştırma PVD sistemi ile yapılmıştır.

Tablo 3.5. Numunelere uygulanan PVD kaplama parametreleri

Parametre	AlTiN	CrN	CrN-AlTiN
Katot	3 adet Al-Ti alaşımlı katot (%70 Al + %30 Ti)	3 adet krom katot (%99,6 saflık)	6 adet krom + 6 adet Al-Ti alaşımlı (%70+%30) katot
Katot ark akımı	50 A	60 A	CrN; 80 A AlTiN; 60 A
Bias voltajı	200 volt	110 volt	CrN; 120 V AlTiN; 100 V
Kaplama süresi	30 dakika	70 dakika	CrN; 60 dak. AlTiN; 60 dak.
Başlangıç vakum değeri	$5x10^{-5}$ torr	$5x10^{-5}$ Torr	$4x10^{-5}$ torr
Kaplama azot kısmi basıncı	8 mTorr	6,5 mTorr	CrN; 6,5 mtorr AlTiN; 7 mtorr
Azot akış	95-100 sccm	90-95 sccm	350-400 sccm (CrN ve AlTiN için)

3.5. Metalografik İşlemler ve Mikroyapısal İncelemeler

Deneysel çalışma kapsamında mikroyapısal incelemeler üç farklı amaç için gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

- Isıl işlem uygulanmış numunelerin matriks yapısını belirlemek,
- Nitrasyon uygulanmış ve PVD kaplama yapılmış numunelerin kesitini incelemek ve nitrasyon derinliği ile kaplama kalınlıklarını tayin etmek,
- Aşınma testinden sonra elde edilen aşınma yüzeylerini inceleyerek aşınma karakteristiğini belirlemek.

Numunelerin matriks karakterizasyonu ve kesit incelemesinin yapılabilmesi için numuneler metalografik olarak hazırlanmıştır. Numunelerin kesitleri sırasıyla 120, 320, 600, 800 ve 1000 mesh'lik zımparalar ile zımparalanmış ardından 3 μm'lik ve 1 μm'lik elmas solüsyon ile parlatılmıştır. Mikroyapıya ait detayların belirlenebilmesi için parlatılmış yüzeyler %3'lük nital ile dağlanmıştır. Mikroyapısal karakterizasyon için Nikon Eclipse L150A model ışık mikroskobu (IM) (Şekil 3.2a), Jeol JSM 6060 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Şekil 3.2b) veJeol JSM 6060LV model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 3.2c). Numune yüzeylerinden alınan elementel analizler IXRF model enerji dağılım x-ışın spektrometresi (EDS) ile gerçekleştirilmiştir.



(a) (b)



(c)

Şekil 3.2. Mikroyapısal karakterizasyonda kullanılan a) Nikon Eclipse L150A model ışık mikroskobu, b) Jeol JSM 6060 model taramalı elektron mikroskobu, c) Jeol JSM 6060LV model taramalı elektron mikroskobu

3.6. Sertlik Ölçümleri

Çelik matrikslerinin ve yüzey kaplamalarının sertlik ölçümleri Şekil 3.3'te verilen Wilson Hardness model mikro Vickers sertlik cihazıile 0,01 kgf yük altında ölçülmüştür.



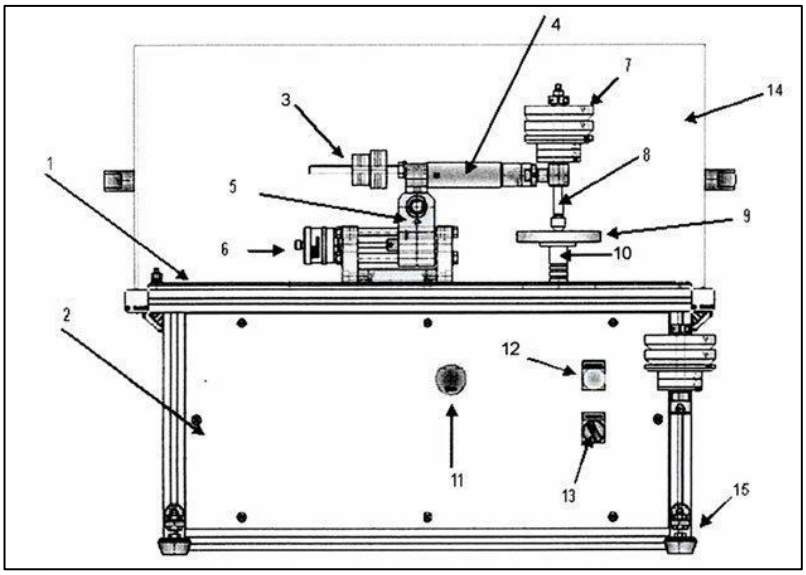
Şekil 3.3. Wilson Hardness model mikro sertlik cihazı

3.7. Aşınma Çalışmaları

Deneysel çalışma kapsamında ısıl ve yüzey işlemlerinin sıcak iş takım çeliklerininin aşınma davranışı üzerine etkisini inceyebilmek için numunelere farklı aşındırıcılar ileoda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta (450 °C) aşınma testleri uygulanmıştır.

3.7.1. Kuru sürtünme testleri

Kuru sürtünme aşınma testleri,şematik gösterimi Şekil 3.4'te verilen Nanovea model bir "ball on disc" tipi tribometre ile gerçekleştirilmiştir. "Ball on disc" tipi tribometre ile oda sıcaklığında yapılan aşınma testlerinde kullanılan parametreler Tablo 3.6'da verilmiştir. Numune yüzeylerinin farklı aşındırıcılar karşısındaki aşınma davranışını incelemek amacıyla aşınma testlerinde farklı sertliklerde olan 100Cr6 ve Al_2O_3 esaslı bilyalar kullanılmıştır.



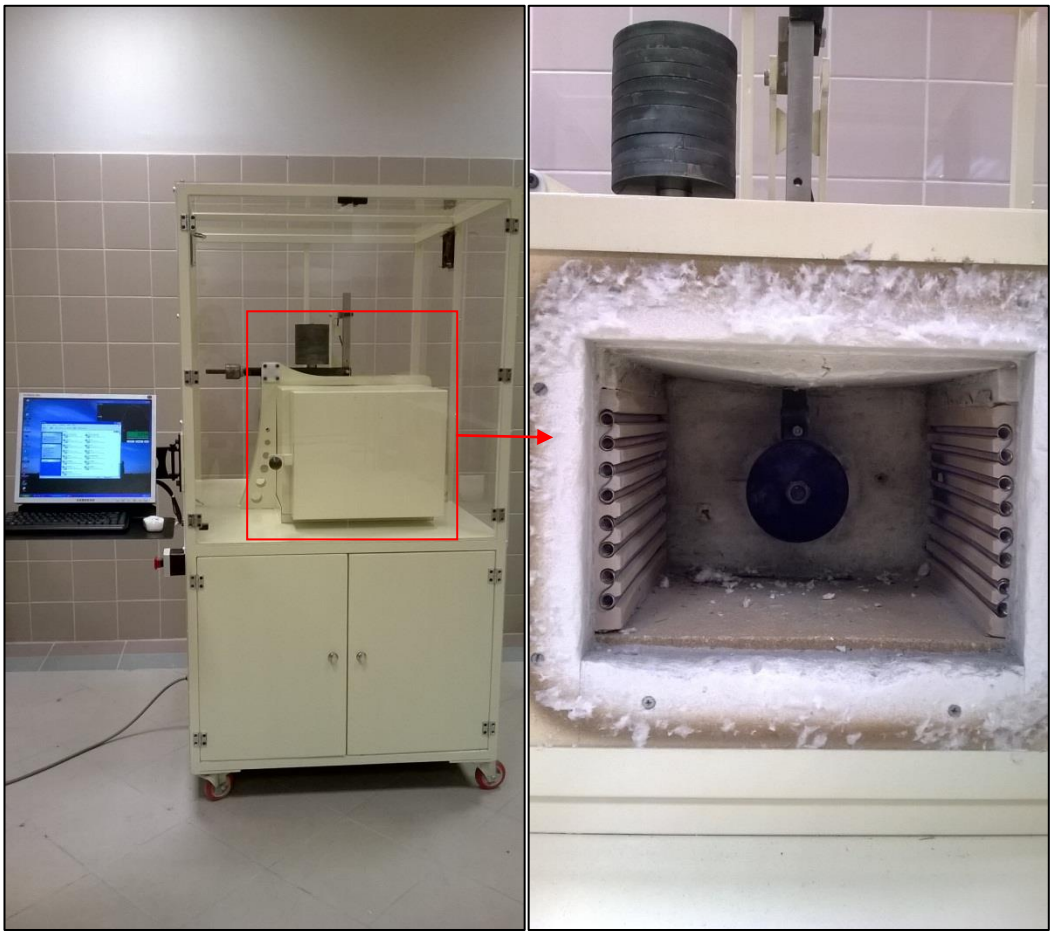
Şekil 3.4. "Ball on disc" tipi aşınma deney cihazının şematik gösterimi;1-Taban tezgahı, 2-Taban tezgahı ve deney tezgahının ön paneli, 3-Denge sağlamak için kullanılan ağırlıklar, 4-Geçici güç ölçümü ve uzama kolu için yük hücresi, 5-Güç taşıyıcı, 6-Mikrometre ve yarıçap seçimi için doğrusal kızak, 7-Uzama çubukları ve deney ağırlıkları takımı, 8-Bilya tutturacı, 9-Döner disk, 10-Tribometre ekseni, 11-Acil durumda durdurma düğmesi, 12-Güç lambası, 13-Güç anahtarı, 14- Koruma haznesi, 15-Tezgah ayağı[57]

Tablo 3.6. "Ball on disc" tipi tribometre ile yapılan aşınma testinde kullanılan aşınma parametreleri

Aşındırıcı bilya	Aşındırıcı bilya sertliği	Bilya çapı	Dönme hızı	Normal yük	Toplam kayma mesafesi
100Cr6	65 HRC	5 mm	150 rpm	5 N	150 m
Al_2O_3	9 (Moh's sertlik değeri)	5 mm	150 rpm	20 N	150 m

3.7.2. Sıcak aşınma testleri

Yüksek sıcaklık aşınma testleri Şekil 3.5'te verilen "block on cylinder" tipi bir tribometre ile gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek test çalışması kapsamında literatürde yer alan çalışmalar göz önüne alınarak imal ettirilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.5. Deneysel çalışmada kullanılana) "block on cylinder" tipi aşınma cihazı, b) aşınmanın gerçekleştirildiği fırın düzeneği

Bilindiği üzere çalışmaya konu olan 1.2343, 1.2367 ve 1.2999 çelikleri aluminyum ekstrüzyonunda kalıp malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ekstrüzyon işlemi 450 °C gibi bir sıcaklıkta gerçekleştirilmekte olup kalıp malzemesi sıcak aşınmaya maruz kalmaktadır. Bu tür bir proseste sıcak aşınmayı ve aşınma nedenli kalıp yüzeyhasarlanmalarını inceleyebilmek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Sıcak aşınma deneylerinde Mg ve Si ile alaşımlandırılmış AA6080 billet malzemesi kullanılmıştır. Billetten 30 mm kalınlığında 100 mm çapında diskler kesilerek aşındırıcı diskler elde edilmiştir. Aşınma testlerinde, hazırlanan diskler ile numuneler

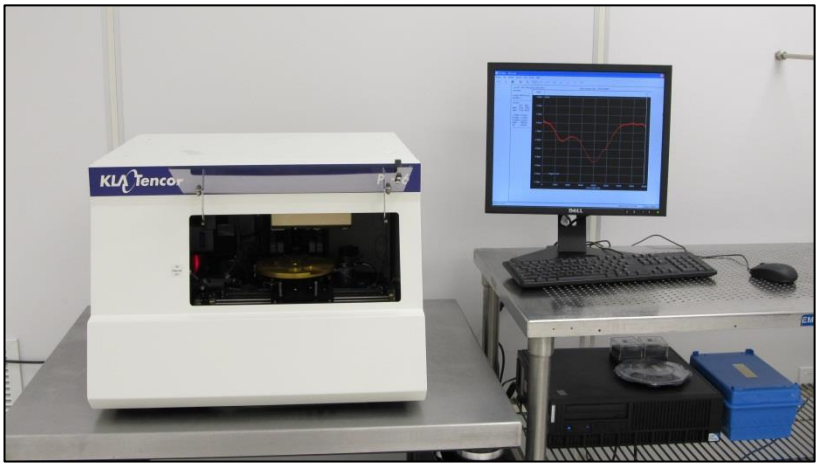
ekstrüzyon sıcaklığı olan 450 °C'de kayma koşullarında Tablo 3.7'de verilen parametrelerde 2000 m boyunca temas ettirilmiştir.

Tablo 3.7. "Block on cylinder" tipi tribometre ile yapılan aşınma testinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı disk malzemesi	Aşındırıcı disk çapı	Test sıcaklığı	Dönme hızı	Normal yük	Toplam kayma mesafesi
AA6080	100 mm	450 °C	0,27 m/s	70 N	2000 m

3.8. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Aşınma testlerinden sonra aşınma karakteristiğinin belirlenebilmesi için numunelerin aşınmış yüzeyleri Nikon Eclipse L150A model ışık mikroskobu ve Jeol JSM 6060 model taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir (Şekil 3.2). "Ball on disc" tipi tribometre ile elde edilen aşınma izlerinin derinlikleri ve genişlikleri ise Şekil 3.6'da verilen KLA Tencor P-6 model profilometre ile ölçülmüştür.



Şekil 3.6. Deneysel çalışmada kullanılan KLA Tencor P-6 model profilometre

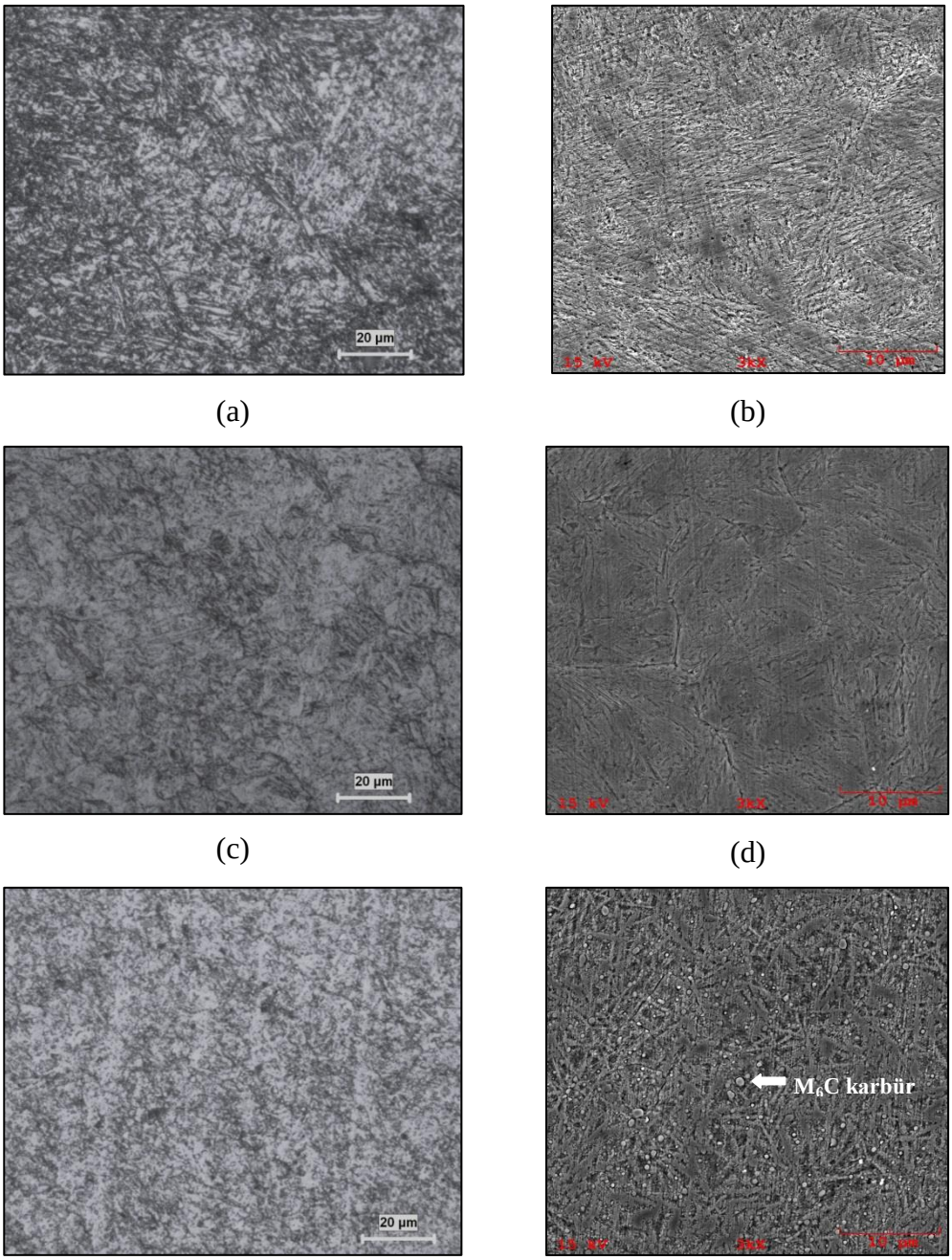
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Mikroyapısal Karakterizasyon

Deneysel çalışma kapsamında yapılan mikroyapısal karakterizasyon, ısıl işlem uygulanmış numunelerin mikroyapısını gözlemlemek ilenitrasyon ve kaplama uygulanmış numunelerin kesitlerini incelemek üzere iki ayrı aşamada gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ise iki ayrı başlık altında değerlendirilmiştir.

4.1.1. Isıl işlem sonrası malzeme karakterizasyonu

Şekil 4.1'de deneysel çalışmada kullanılan sıcak iş takım çeliklerinin ısıl işlem uygulamaları sonrası görüntülenen mikroyapıları sunulmuştur. Isıl işlem basamaklarında östenitleştirme ve su verme adımları ile elde edilen martenzit fazının oluşumu sonrası çoklu temperleme işlemleri ile temper martenzitik yapı elde edilmiştir. Şekil 4.1'de verilen üç çelik mikroyapısında da temper martenzitik yapı gözlenmektedir. Çeliklerin içerdiği karbür yapıcı alaşım elementlerine bağlı olarak temperleme işlemi sırasında oluşturdukları ikincil karbürlerin türü ve dağılımı farklılık göstermektedir. Deneysel çalışmada kullanılan çelikler arasında en büyük kompozisyon farklılığı Mo miktarından gelmektedir ve bu farklılığın etkisiyle 1.2999 sıcak iş takım çeliğinin mikroyapısında yoğun, küresel M_6C (Mo'ca zengin) karbür çökeltileri görülmektedir.



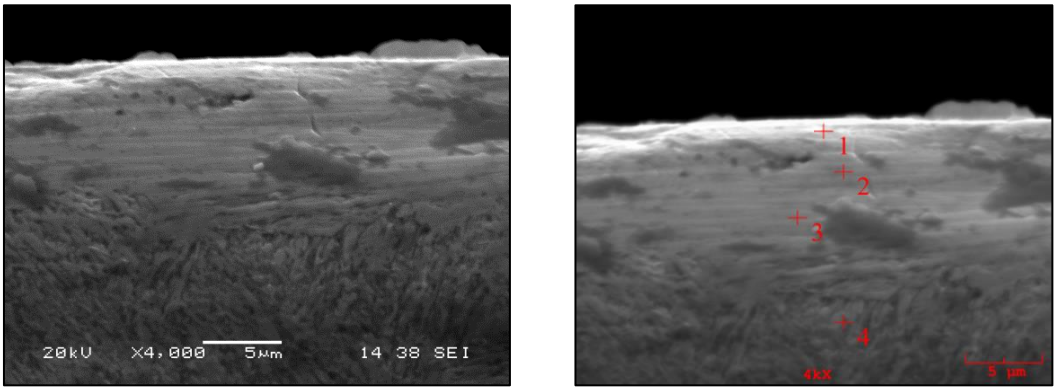
Şekil 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan sıcak iş takım çeliklerine ait IM ve SEM görüntüleri; a) ve b) 3100, c) ve d) 7100, e) ve f) 9100

4.1.2. Kesit incelemeleri

CAPVD yöntemi ile ince film kaplamalar 4µm'den daha ince olacak şekilde gerçekleştirilir. Deneysel çalışma kapsamında Jeol JSM 6060LV model taramalı elektron mikroskopu ile gerçekleştirilen kesit incelemelerinde kaplama kalınlıkları 2

µm seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Numunelere uygulanan nitrasyon işleminde isebeyaz tabaka yaklaşık 8µm iken difüzyon tabakası 10µm civarındadır.

Şekil 4.2'de ısıl işlem sonrası nitrasyon uygulanmış 9150 kodlu numunede beyaz tabaka ve difüzyon tabakası görülmektedir. Nitrasyon işlemi ile yüzeyde beyaz tabaka olarak bilinen vegama+epsilon fazlarını içeren oldukça sert bir bileşen oluşur.Beyaz tabakanın altında çoğunlukla nitrür çökeltilerinin yer aldığı ve martenzitik bir hacmin baskın olduğu bir difüzyon tabakası vardır.Bilindiği üzere yüzeyden merkeze doğru nitrasyon etkisi azalmakta olup azot konsantrasyonu azalır [5]. Bu durum Tablo 4.1'de verilen EDS analizi sonuçlarında da gözlenmektedir. Analiz sonuçları numune yüzeyinden merkeze doğru gidildikçe Fe oranının arttığını ve N oranının azaldığını göstermektedir.



(a) (b)

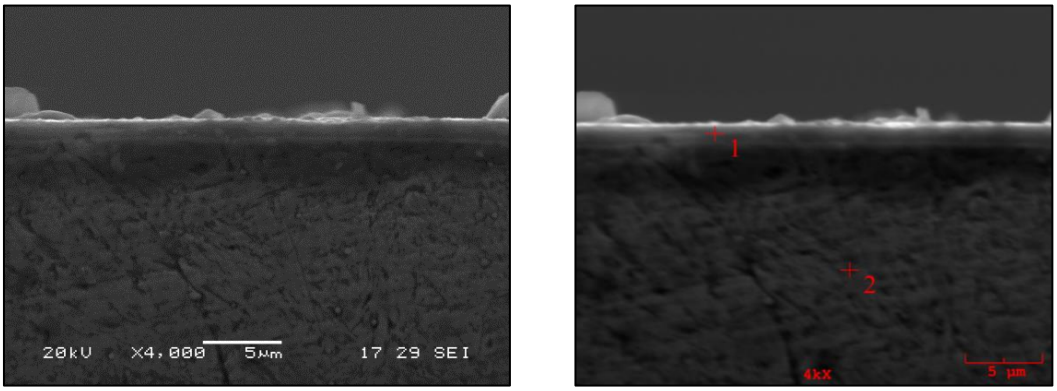
Şekil 4.2. Nitrasyon uygulanmış 9150 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri

Tablo 4.1. 9150 kodlu numunenin Şekil 4.2'de verilen kesitinde işaretlenen noktalara ait EDS analiz sonuçları (ağ. %)

Analiz noktası	Fe	N	Diğer elementler
1	90,176	9,824	-
2	90,946	9,054	-
3	91,970	8,030	-
4	94,001	-	5,999

Şekil 4.3'te AlTiN kaplanmış 7101 kodlu numunenin kesit görüntüsü verilmiştir. Yaklaşık 2 µm kalınlığındaki kaplamanın farklı noktalarından alınan EDS

analizlerinin sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir. Benzer olarak Şekil 4.4'te CrN kaplanmış 3102 kodlu numuneye ait kesit görüntüsü ve Tablo 4.3'te bu kesite ait EDS sonuçları sunulmuştur.

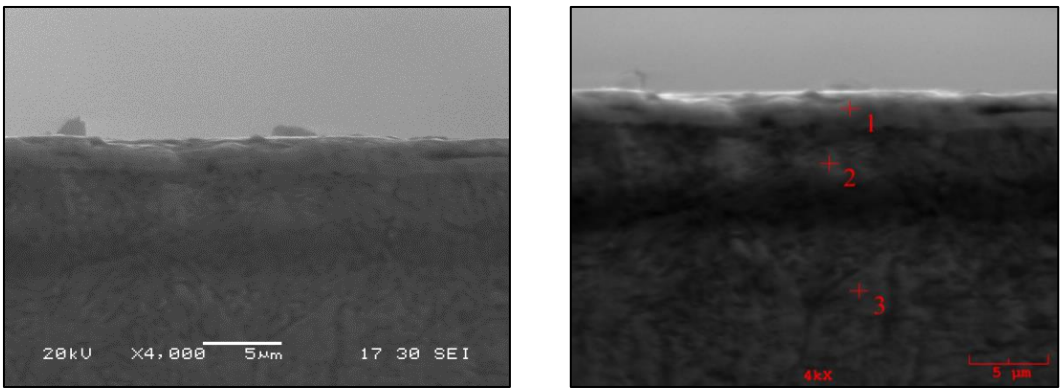


(a) (b)

Şekil 4.3. AlTiN kaplanmış 7101 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri

Tablo 4.2. 7101 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %)

Analiz noktası	Al	Ti	N	Fe	Diğer elementler
1	35,655	23,026	35,655	-	5,664
2	-	-	-	91,220	8,788



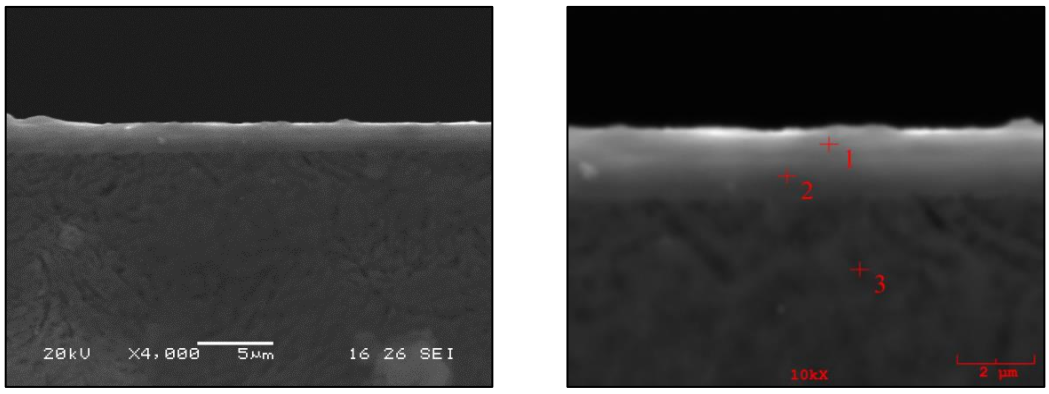
(a) (b)

Şekil 4.4. CrN kaplı 3102 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri

Tablo 4.3. 3102 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %)

Analiz noktası	Fe	Cr	N	Diğer elementler
1	-	77,880	22,120	-
2	92,657	4,936	-	2,407
3	92,790	5,268	-	1,942

Şekil 4.5'te CrN/AlTiN çift kaplama yapılmış 7103 kodlu numuneye ait kesit görüntüsü verilmiştir. Kaplama, 1µm kalınlıkta CrN (alt tabaka) ve 1µm kalınlıkta AlTiN (üst tabaka) içermektedir. Kaplamanın kesitine ait EDS sonuçları Tablo 4.4'te sunulmuştur.



(a) (b)

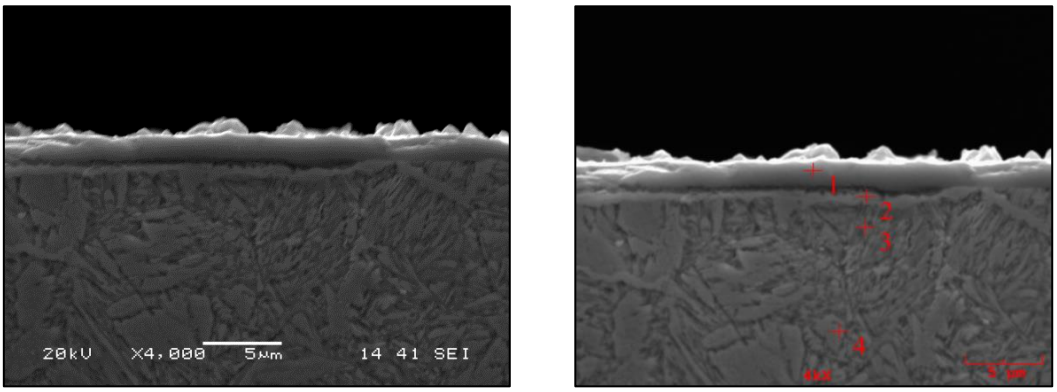
Şekil 4.5. CrN/AlTiN kaplı 7103 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri

Tablo 4.4. 7103 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %)

Analiz noktası	Fe	Al	Ti	Cr	N	Diğer elementler
1	-	38,934	21,274	13,258	26,534	-
2	7,242	6,663	1,492	72,760	11,843	-
3	90,067	-	-	5,455	-	4,477

Nitrasyon ile yüzeyde oluşan beyaz tabaka yüzeyde yeni bir tabakanın oluşumunu engellemektedir. Bu bariyeri aşmak için çoğunlukla yüzeyden beyaz tabaka mekanik işlemler ile giderilir. Bu tür bir işlem Bölüm 3.4.1'de açıklanmıştır.Nitrasyon uygulanmış numune yüzeyinden beyaz tabakanın kaldırılıp difüzyon tabakası üzerine

AlTiN kaplanmış bir numunenin kesit örneği ise Şekil 4.6'daverilmiştir. 7151 kodlu numunenin kesitine ait olan EDS analizleri ise Tablo 4.5'te sunulmuştur.



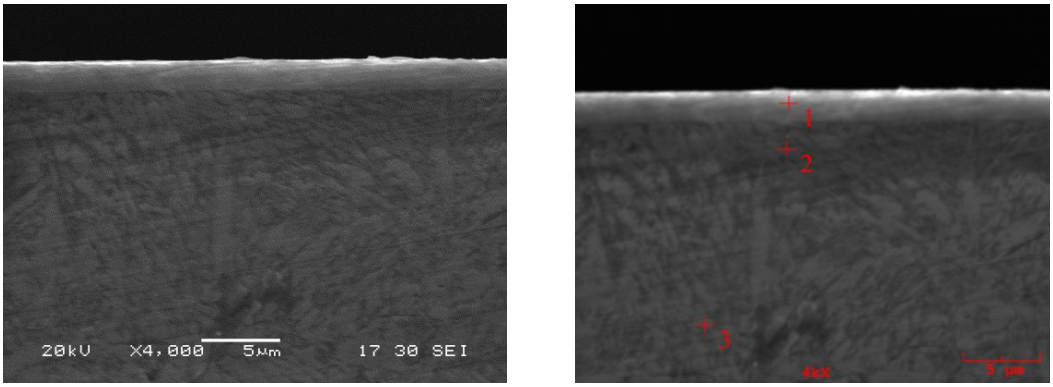
(a) (b)

Şekil 4.6. Nitrasyon/AlTiN kaplanmış 7151 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri

Tablo 4.5. 7151 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %)

Analiz noktası	Fe	Al	Ti	N	Diğer elementler
1	-	39,080	25,473	35,447	-
2	75,516	8,367	2,101	6,697	7,319
3	88,750	-	-	1,520	9,730
4	89,685	-	-	2,343	7,972

Şekil 4.7'de nitrasyon sonrası beyaz tabakası giderilmiş ve difüzon tabakası üzerine CrN kaplanmış 3152 kodlu numunenin kesit mikroyapısı ve Tablo 4.6'da ise kesitte gerçekleştirilen EDS analiz sonuçları verilmiştir.



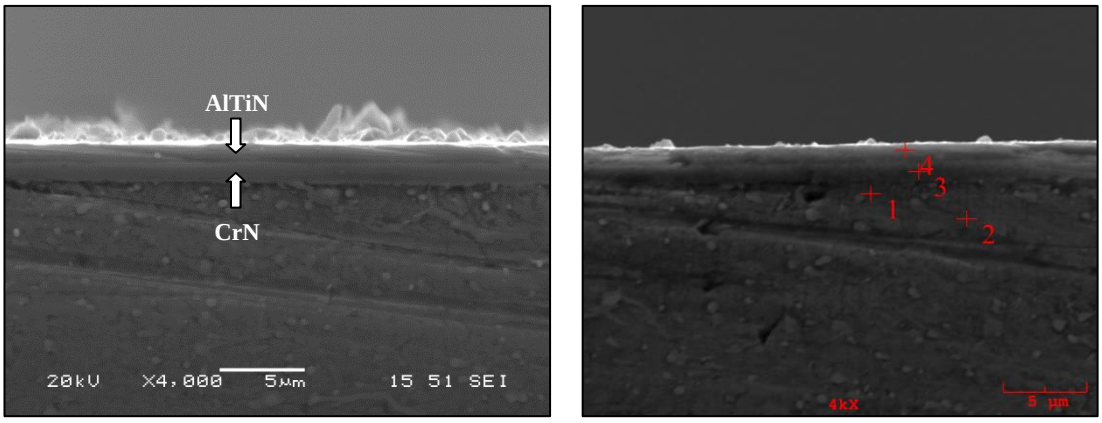
(a) (b)

Şekil 4.7. Nitrasyon/CrN kaplı 3152 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri

Tablo 4.6. 3152 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %)

Analiz noktası	Fe	Cr	N	C	Diğer elementler
1	-	75,197	24,803	-	-
2	84,050	4,570	0,508	8,494	2,377
3	88,053	4,425	0,595	5,094	1,833

Şekil 4.8'de ise nitrasyon/CrN/AlTiN olarak üç yüzey işlemi uygulanmış numune kesit mikroyapısı verilmiştir. Yüksek büyütmenin avantajı ile AlTiN ve CrN katmanları net olarak farkedilmektedir. Tablo 4.7'de verilen EDS sonuçları ile yüzeyden merkeze doğru AlTiN kaplamanın, CrN kaplamanın, difüzyon tabakasının ve çelik altlığın olduğunu belirlenmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.8. Nitrasyon/CrN/AlTiN kaplı 9153 kodlu numune kesitine ait; a) SEM görüntüsü, b) SEM görüntüsü üzerinde noktasal EDS analizlerinin yerleri

Tablo 4.7. 9153 kodlu numunenin kesitine ait EDS analiz sonuçları (ağ. %)

Analiz noktası	Fe	Al	Ti	N	Cr	Diğer elementler
1	74,736	-	-	6,097	15,785	3,382
2	89,597	-	-	0,545	3,184	6,669
3	9,186	5,584	1,239	16,165	66,726	1,100
4	-	37,577	22,781	34,983	4,659	-

4.2. Sertlik Ölçümleri

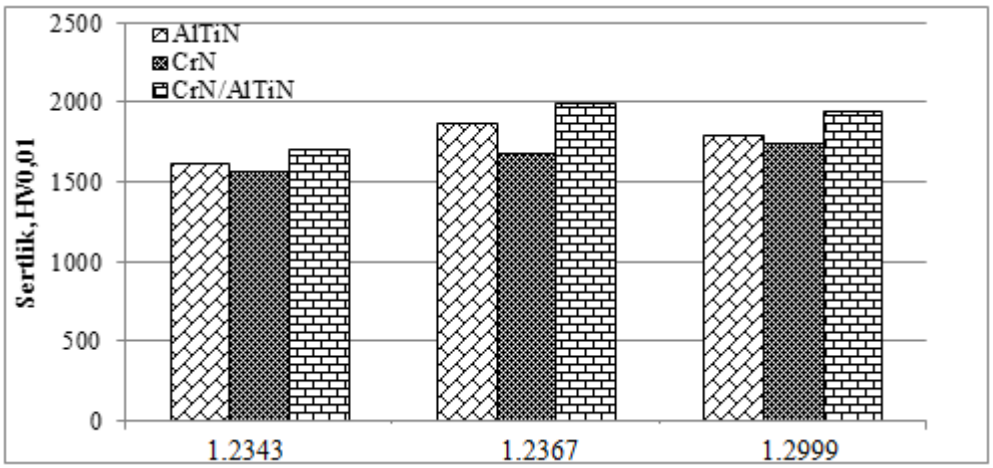
Tablo 4.8'de numune yüzeylerinden alınan sertlik değerleri, numune kodu ve kaplama türü ile birlikte verilmiştir. Şekil 4.9'da ise altlık malzeme – kaplama sonrası yüzey sertliği sütun grafik olarak sunulmuştur. En düşük C, Mo ve V içeriğine sahip olan 1.2343 çeliğinin ısıl işlem sonrası matriks sertliğinin 1.2367 ve 1.2999 çeliklerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Daha yüksek karbon içermesine rağmen 1.2999 çeliği 1.2367 çeliğinden daha düşük sertlik değerine sahiptir. Bunun nedeni 1.2367 çeliğinde Cr miktarının 1.2999 çeliğine kıyasla daha yüksek değerde olup krom karbür çökeltilerinin temperleme aşamasında çeliğe ikincil sertlik kazandırmasıdır.

Nitrasyon uygulanmış çeliklerin yüzey sertliği ısıl işlem görmüş olanlara göre daha yüksektir. CrN ile kaplama nitrasyon işlemine göre yüzeyde daha yüksek sertlik değeri verirken, AlTiN kaplama sertliği daha da arttırmıştır. CrN/AlTiN çift kaplama

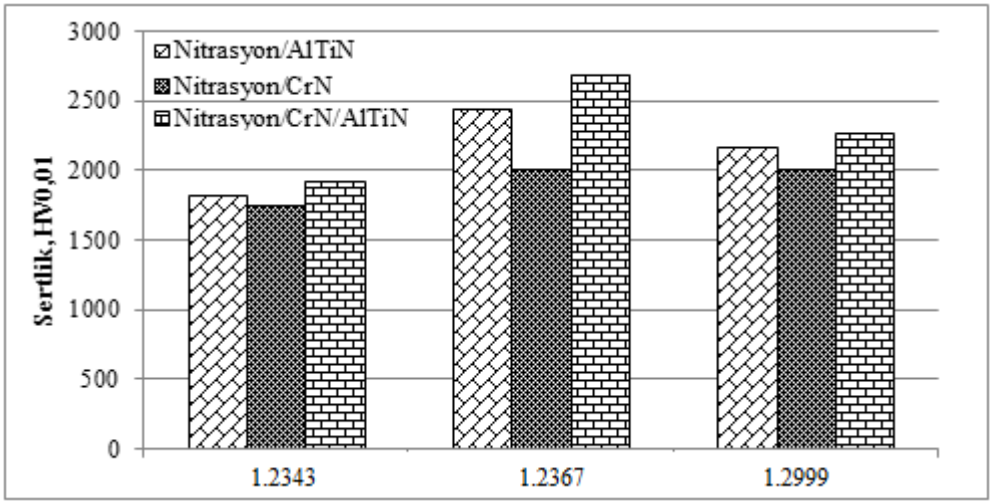
ise tek katmanlı kaplamalara göre daha yüksek sertlik sergilemektedir. Nitrasyon sonrası yapılmış tüm kaplamaların sertliği nitrasyon yapılmaksızın kaplanan yüzeylere göre daha yüksektir. Tablo 4.8 ve Şekil 4.9 göz önüne alındığında yüzey sertlik değerlerinin her üç altlık malzemede de nitrasyon/CrN/AlTiN kaplama sonrası en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Yapılan bu kaplamalar ile sıcak iş takım çeliğinin yüzey sertliğiarttırılarak aşınmaya karşı direnç sağlanabilecektir. Bu tür bir katkı Bölüm 4.3'te açıklanacaktır.

Tablo 4.8. Numune yüzeylerine ait sertlik değerleri

Numune kodu	Kaplama türü	Sertlik, HV0.01
3100	-	480± 5
3101	AlTiN	1615± 3
3102	CrN	1560± 4
3103	CrN-AlTiN	1703± 4
3150	Nitrasyon	730± 6
3151	Nitrasyon-AlTiN	1825± 3
3152	Nitrasyon-CrN	1755± 3
3153	Nitrasyon-CrN-AlTiN	1923± 4
7100	-	538± 3
7101	AlTiN	1869± 2
7102	CrN	1670± 4
7103	CrN-AlTiN	1987± 3
7150	Nitrasyon	804± 3
7151	Nitrasyon-AlTiN	2446± 2
7152	Nitrasyon-CrN	2010± 3
7153	Nitrasyon-CrN-AlTiN	2692± 3
9100	-	504± 2
9101	AlTiN	1782± 4
9102	CrN	1739± 2
9103	CrN-AlTiN	1940±3
9150	Nitrasyon	755± 3
9151	Nitrasyon-AlTiN	2167±2
9152	Nitrasyon-CrN	2018±2
9153	Nitrasyon-CrN-AlTiN	2272± 1



(a)



(b)

Şekil 4.9. Çelik türüne bağlı olarak uygulanan kaplamalara ait sertlik diyagramı a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama

4.3. Aşınma Test Verilerinin Değerlendirilmesi

Deneysel çalışma kapsamında numunelere oda sıcaklığında ve 450 °C'de aşınma testleri uygulanmıştır.Numuneler oda sıcaklığında 100Cr6 çelik bilya ve Al_2O_3 seramik bilya ile aşındırılırken, 450 °C' de AA6080 alaşımından yapılmış disk ile aşındırılmıştır. Farklı düzeneklerde gerçekleştirilen aşınma testlerinde elde edilen veriler iki farklı başlık altında değerlendirilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan testler "kuru sürtünme testleri" ve 450 °C sıcaklıkta yapılan testler "sıcak aşınma testleri" başlıkları altında açıklanmıştır.

4.3.1. Kuru sürtünme testleri

4.3.1.1.Sertleştirilmiş çelik bilya ile aşınma

100Cr6 bilya ile gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası her bir malzeme grubu için elde edilen ortalama sürtünme katsayıları, bilyahacim kayıpları ve bilya aşınma hızlarıTablo 4.9, Tablo 4.10 ve Tablo 4.11'de verilmiştir.Bilya hacim kayıpları ASTM 133-05 standardına göre verilen Eşitlik(2.4) ve Eşitlik (2.5)'e göre, bilya aşınma hız değerleri Eşitlik(2.2)'ye göre hesaplanmıştır.

Aşınma testlerinden sonra yapılan ağırlık ölçümlerinde numunelerde beklenen ağırlık kaybı gözlenmemiştir. Numune yüzeyleri incelendiğinde sertliği numune yüzeylerine göre düşük olan 100Cr6 bilyanın aşınarak numune yüzeylerine yapıştığıbelirlenmiştir. Bu yapışma tabakalarının varlığı Bölüm 4.4.1.1' de aşınma yüzey görüntülerinde gösterilecektir. Yüzeyde var olan yapışma nedeniyle aşınma verileri aşındırıcı olarak kullanılan bilyalar üzerinden değerlendirilmiştir.

Tablo 4.9, Tablo 4.10 ve Tablo 4.11'de verilen ortalama sürtünme katsayıları daha sonra Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14' te değerlendirilecek olan sürtünme katsayısı–mesafe diyagramlarındaki eğrilerin "steady-state" konumlarının ortalama değerlerini yansıtmaktadır. Ortalama sürtünme katsayıları incelendiğinde ise sertlik ile ortalama sürtünme katsayıları arasında doğrudan bir ilişki kurulamamıştır. 100Cr6 bilyanın yüzeye yapışması nedeniyle beklenen kaplama-çelik aşınma çifti yerine çelik-çelik aşınma çifti etkileşim halindedir. Bu etkileşim nedeniyle sertlik–ortalama sürtünme katsayısı ilişkisi ortaya konulamamıştır.

Tablolar, bilya üzerindeki aşınma izi çaplarınınkaplama sertliğinin artması ile arttığını göstermektedir. Aynı zamanda bilyada aşınma nedenli görülen hacim kaybı ve belirlenen aşınma hızı değerleri de kaplama sertliğinin artması ile artmaktadır.

Tablo 4.9. 1.2343 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve 100Cr6 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri

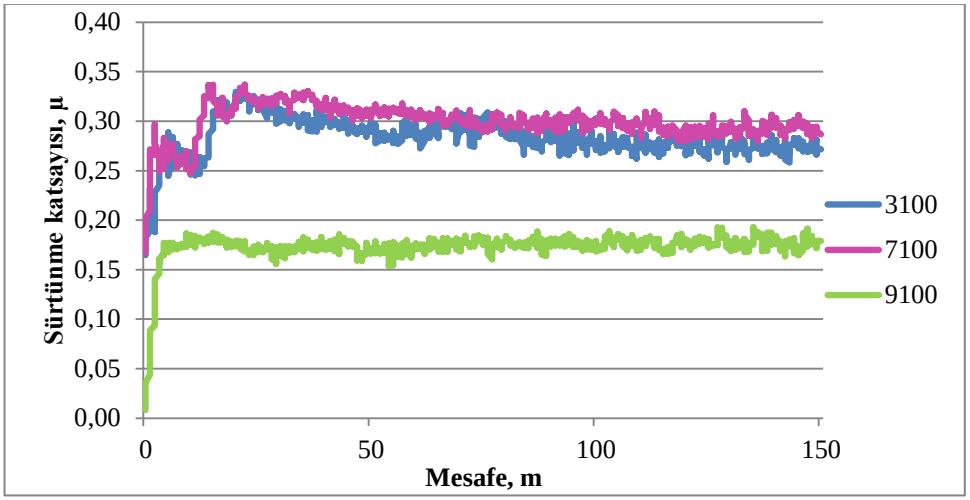
Numune kodu	Sertlik, HV0,01	Ortalama sürtünme katsayısı,μ	Bilya üzerindeki aşınma izi çapı, μm	Bilya hacim kaybı, mm^3	Bilya aşınma hızı, $x10^{-6}$ mm^3/Nm
3100	480	0,29	870	0,0113	15,0
3101	1615	0,15	897	0,0128	17,0
3102	1560	0,20	883	0,0120	16,0
3103	1703	0,35	916	0,0139	18,5
3150	730	0,31	992	0,0192	25,6
3151	1825	0,19	1200	0,0415	55,3
3152	1755	0,30	1116	0,0309	41,2
3153	1923	0,32	1310	0,0592	78,9

Tablo 4.10. 1.2367 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve 100Cr6 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri

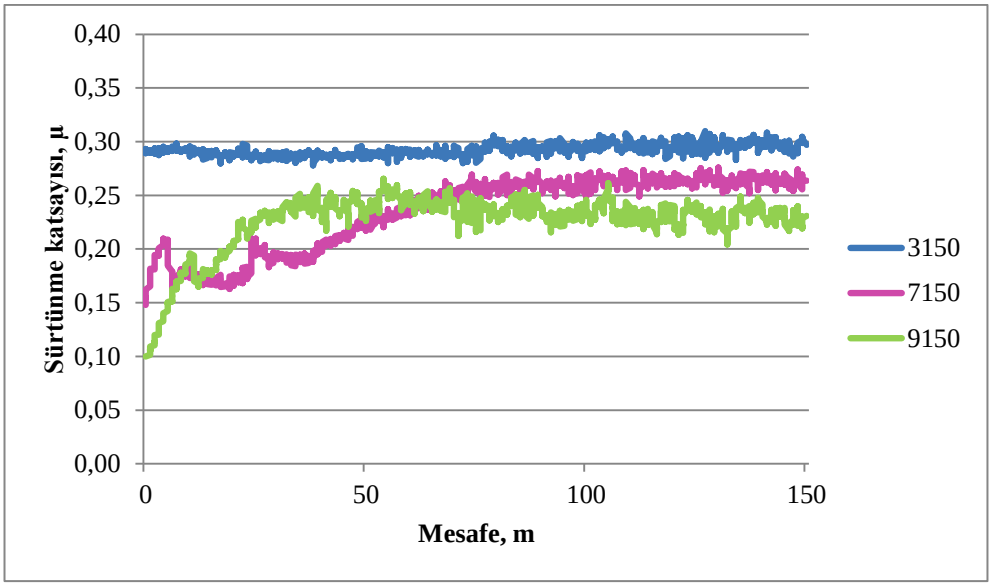
Numune kodu	Sertlik, HV0,01	Ortalama sürtünme katsayısı,μ	Bilya üzerindeki aşınma izi çapı, μm	Bilya hacim kaybı, mm^3	Bilya aşınma hızı, $x10^{-6}$ mm^3/Nm
7100	538	0,30	945	0,0158	21,0
7101	1869	0,35	1002	0,0200	26,6
7102	1670	0,34	970	0,0176	23,4
7103	1987	0,15	1014	0,0210	28,0
7150	804	0,25	978	0,0181	24,1
7151	2446	0,22	1050	0,0242	32,2
7152	2010	0,32	1033	0,0226	30,1
7153	2692	0,33	1078	0,0269	35,8

Tablo 4.11. 1.2999 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve 100Cr6 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri

Numune kodu	Sertlik, HV0,01	Ortalama sürtünme katsayısı,μ	Bilya üzerindeki aşınma izi çapı, μm	Bilya hacim kaybı, mm^3	Bilya aşınma hızı, $x10^{-6}$ mm^3/Nm
9100	504	0,19	910	0,0136	18,1
9101	1782	0,26	984	0,0186	24,8
9102	1739	0,10	967	0,0173	23,0
9103	1940	0,32	998	0,0197	26,2
9150	755	0,25	923	0,0144	19,2
9151	2167	0,10	1027	0,0221	29,4
9152	2018	0,32	1012	0,0208	27,7
9153	2272	0,20	1038	0,0231	30,8



Şekil 4.10. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış 3100, 7100, 9100 çeliklerine ait 100Cr6 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı

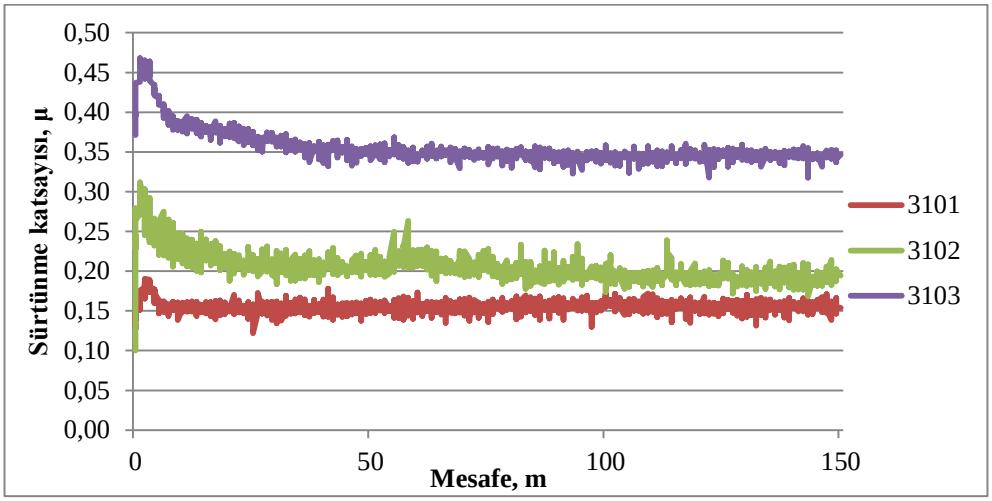


Şekil 4.11. Nitrasyon uygulanmış 3150, 7150, 9150 çeliklerine ait 100Cr6 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı

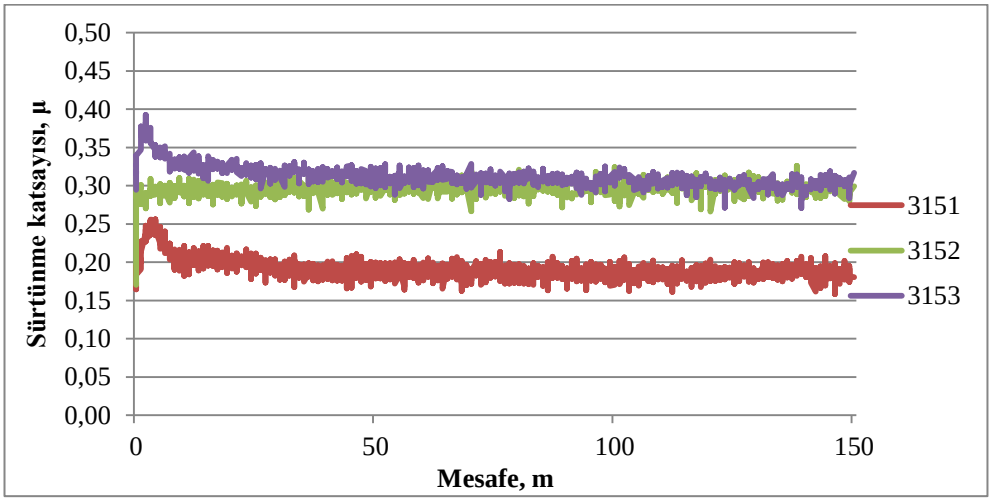
Şekil 4.10'da konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış 3100, 7100 ve 9100 kodlu takım çeliklerinin kuru sürtünme testleri sonrası sürtünme katsayısı – mesafe diyagramları verilmiştir. Diyagramlardan da görüleceği üzere, yaklaşık olarak 50 metre sonrasında sürtünme katsayısı değişimleri "steady–state" konumundadır. En düşük sertliğe sahip olan 3100 çeliğinin sürtünme katsayısı 0,25 – 0,30 arasındadır. En yüksek sertlikte olan 7100 çeliğinde ise bu aralık 0,28 – 0,32'dir. Bölgesel plastik deformasyonun gerçekleşmesi ve malzemenin giderek pekleşmesi neticesinde 3100 çeliğinin sürtünme katsayısı 7100 çeliğine göre daha düşük bir aralıkta yer almıştır. Bunun dışında 7100 çeliğine göre daha düşük sertlikte ancak daha yüksek oranda alaşım karbürü içeren 9100 çeliğinde sürtünme katsayısı 0,15 – 0,20 gibi en düşük aralıktadır. Matriksine göre daha yüksek sertlikte olan bu alaşım karbürleri, çizilmeye karşı direnç gösterebilmekte ve çoğunlukla sürtünme katsayısını düşürmektedir [11, 37].

Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'tekaplanmış numunelere ait sürtünme katsayısı-mesafe diyagramları verilmiştir.Literatürde yer alan birçok çalışma yüzey kaplamalarının farklı karşıt yüzeylerle olan tribolojik etkileşiminde konvansiyonel ısıl işlem görmüş /nitrürlenmiş altlıklarına göre daha düşük sürtünme katsayısı ve bunun paralelinde daha yüksek aşınma direnci gösterdiğini ortaya koymuştur [16, 22, 30]. Oda sıcaklığında 100Cr6 ile yapılan kuru sürtünme testleri birçok yönü ile bu

sonucu destekler tarzdadır. Ancak yüzeyde oluşan yapışma tabakaları birçok test sonucunda doğrudan ilişki kurulmasını engellemektedir. Özellikle 100Cr6 çeliğine göre daha yüksek sertlikte olan tekli ya da çoklu kaplama yüzeylerinde daha fazla yapışma tespit edilmesi sonuçların değerlendirilmesini güçleştirmiştir. Ancak 100Cr6 çeliğine göre daha sert olan seramik esaslı bilya ile yapılan testler tribolojik etkileşimlerde doğrudan fonksiyon teşkil eden sertliğin, kayma mukavemetinin, temas alanının etkilerini ortaya koyacak sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar Bölüm 4.3.1.2'de anlatılacaktır.

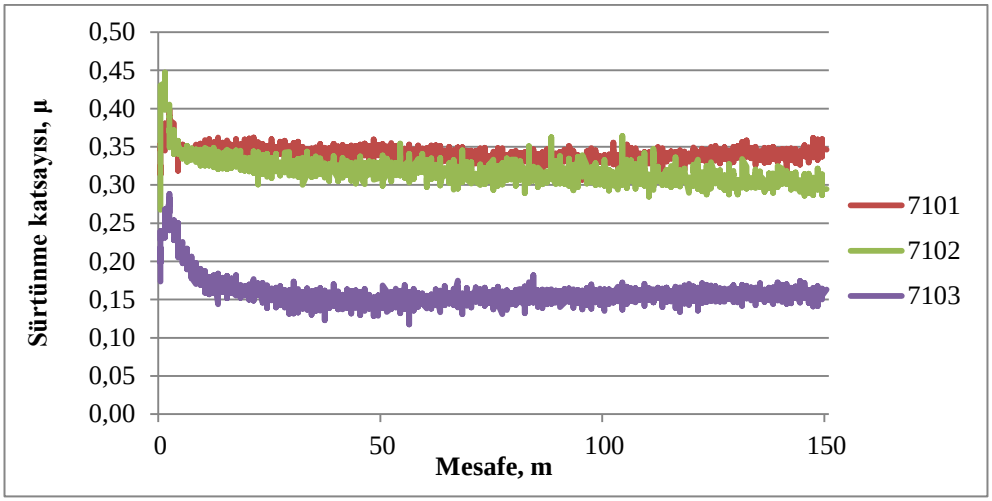


(a)

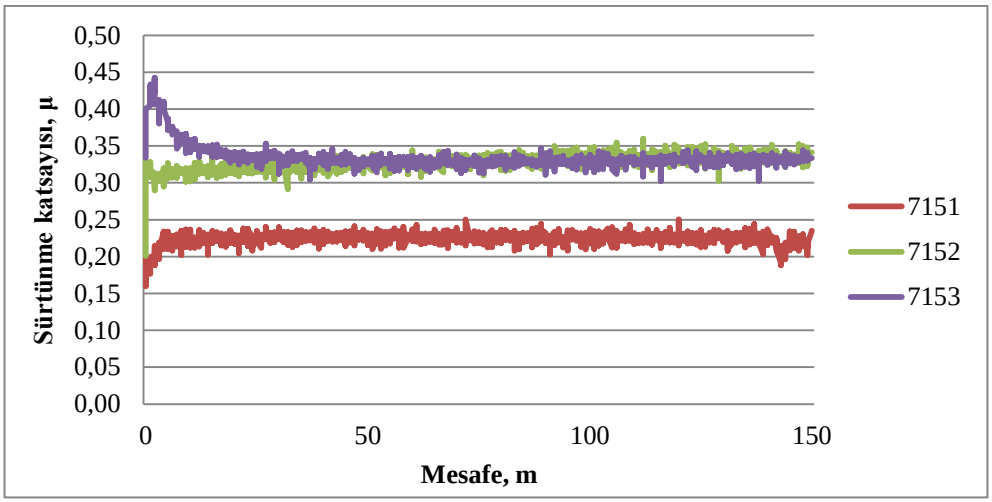


(b)

Şekil 4.12. 1.2343 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 100Cr6 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı - mesafe diyagramı

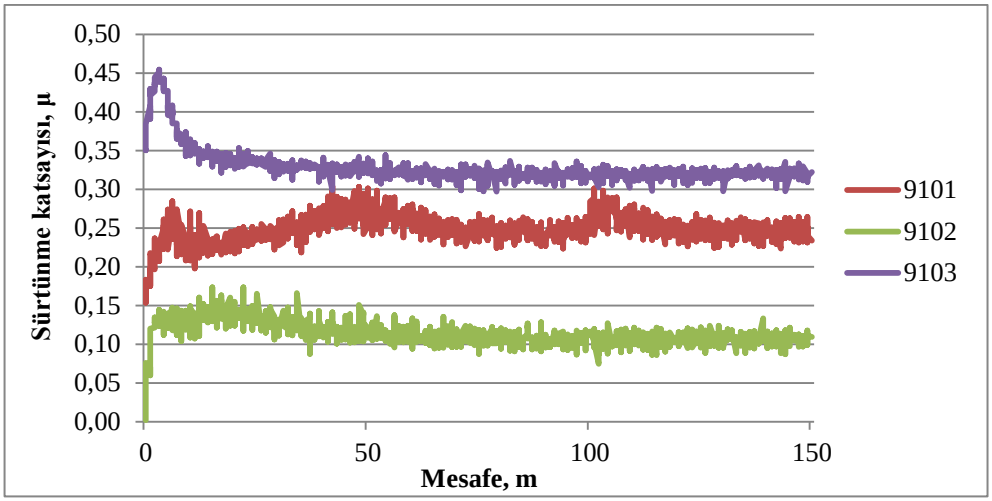


(a)

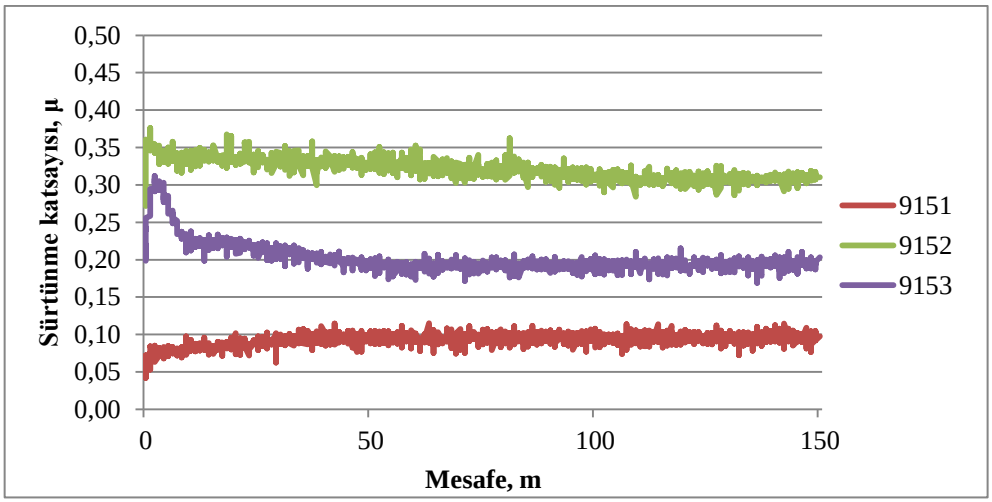


(b)

Şekil 4.13. 1.2367 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 100Cr6 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı - mesafe diyagramı



(a)



(b)

Şekil 4.14. 1.2999 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 100Cr6 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı - mesafe diyagramı

4.3.1.2. Seramik bilyaile aşınma

Tablo 4.12, Tablo 4.13 ve Tablo 4.14'te Al_2O_3 bilya ile gerçekleştirilen aşınma testlerinde elde edilen ortalama sürtünme katsayıları, hacim kayıpları ve aşınma hızı değerleri verilmiştir. Hacim kayıpları, profilometre ile ölçülen iz alanı ile aşınma iz çevresinin çarpılması ile hesaplanmıştır.

Al_2O_3 bilyanın sertliği incelenen tüm numunelerin yüzey sertliklerinden daha yüksektir. Bu nedenle yapılan aşınma testlerinde bilyada ağırlık kaybı gerçekleşmeden numune yüzeylerinde malzeme kaybı oluşmuştur. Aşınma verileri

incelendiğinde kaplanmış numune yüzey sertliğindeki artışınnumunede oluşan hacim kaybını ve aşınma hızını azalttığı görülmektedir. Yüzey sertliğinin arttırılması ile aşındırıcı bilyanın yüzeye batıp pulluklama yapması ve yüzeyi çizmesi engellenir dolayısıyla abrasif aşınma direnci arttırılır. Abrasif aşınma direncinin yanında altlık/kaplama sisteminin yük taşıma kapasitesininbarttırılmasıyla da sistemin plastik deformasyona karşı direnci arttırılır [12, 16].

Kaplama öncesinde yapılan nitrasyon işlemi ile oluşturulan difüzyon tabakası sayesinde altlık malzemenin sertliği arttırılarak altlığın plastik deformasyon direnci ve sistemin yük taşıma kapasitesi arttırılır [16]. Yapılan aşınma testleri nitrasyon uygulanmış ve sonrasında kaplama yapılmış numunelerin hacim kayıplarının ve aşınma hızlarının konvansiyonel ısıl işlemlenmiş veya nitrasyon uygulanmadan kaplanmış numunelere göre daha düşük olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar nitrasyon işleminin kuru sürtünme koşullarında ve seramik esaslı bilya ile olan tribolojik etkileşiminde yük taşıma kapasitesini arttırdığını açıkça ortaya koymaktadır.bAynı zamanda yüzeylerin kaplama ile daha yüksek sertliğe sahip olması abrasif aşınma direncini arttırmıştır.

Tablo 4.12. 1.2343 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve Al_2O_3 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri

Numune kodu	Sertlik, HV0,01	Ortalama sürtünme katsayısı,μ	Hacim kaybı, mm^3	Aşınma hızı,x 10^{-6} mm^3/Nm
3100	480	0,25	0,0840	28,0
3101	1615	0,23	0,0370	12,3
3102	1560	0,10	0,0500	16,7
3103	1703	0,27	0,0226	7,5
3150	730	0,19	0,0360	12,0
3151	1825	0,30	0,0061	2,0
3152	1755	0,20	0,0073	2,4
3153	1923	0,40	0,0019	0,63

Tablo 4.13. 1.2367 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve Al_2O_3 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri

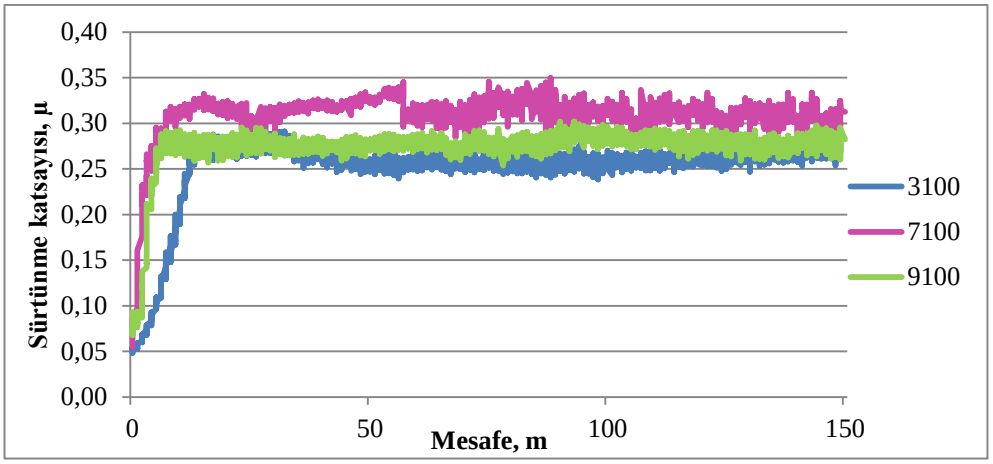
Numune kodu	Sertlik, HV0,01	Ortalama sürtünme katsayısı,μ	Hacim kaybı, mm^3	Aşınma hızı, $x10^{-6}$ mm^3/Nm
7100	538	0,32	0,0380	12,60
7101	1869	0,22	0,0221	7,36
7102	1670	0,20	0,0336	11,20
7103	1987	0,26	0,0219	7,30
7150	804	0,29	0,0321	10,70
7151	2446	0,25	0,0233	7,76
7152	2010	0,21	0,0287	9,57
7153	2692	0,33	0,0054	1,80

Tablo 4.14. 1.2999 çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri ve Al_2O_3 bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen aşınma verileri

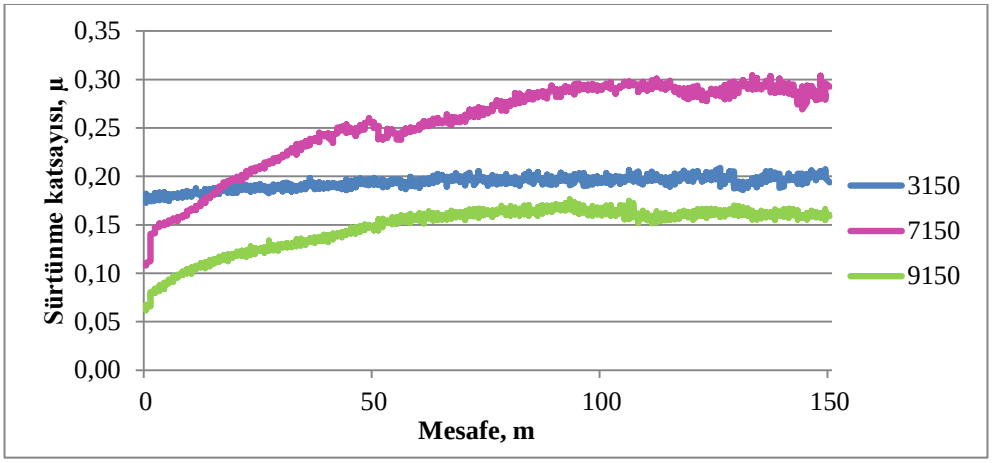
Numune kodu	Sertlik, HV0,01	Ortalama sürtünme katsayısı,μ	Hacim kaybı, mm^3	Aşınma hızı, $x10^{-6}$ mm^3/Nm
9100	504	0,27	0,0426	14,20
9101	1782	0,26	0,0254	8,46
9102	1739	0,25	0,0271	9,03
9103	1940	0,37	0,0189	6,30
9150	755	0,16	0,0325	10,80
9151	2167	0,33	0,0041	1,36
9152	2018	0,29	0,0121	4,03
9153	2272	0,39	0,0002	0,06

Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da numunelere ait sürtünme katsayısı – mesafe ilişkisi verilmiştir. Daha önce Bölüm 2'de tartışıldığı üzere sürtünme katsayısı (μ), sürtünme kuvvetinin (F) normal kuvvete (N) oranıdır ($\mu=F/N$). Sürtünme kuvveti aynı zamanda temas alanı (A) ve kayma gerilmesinin (τ) çarpımına eşittir ($F=A\tau$).

Grafiklerden görüleceği üzere kaplama yüzey sertliğinin artması ile birlikte sürtünme katsayıları artmıştır. Yüzey sertliğinin artması temas alanını azalttığı halde kayma gerilmesini arttırarak tribolojik etkileşimde sürtünme kuvvetinin artmasına neden olacaktır. Böylece artan sürtünme kuvveti ile sürtünme katsayısı artacaktır.



Şekil 4.15. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış 3100, 7100, 9100 çeliklerine ait Al_2O_3 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı

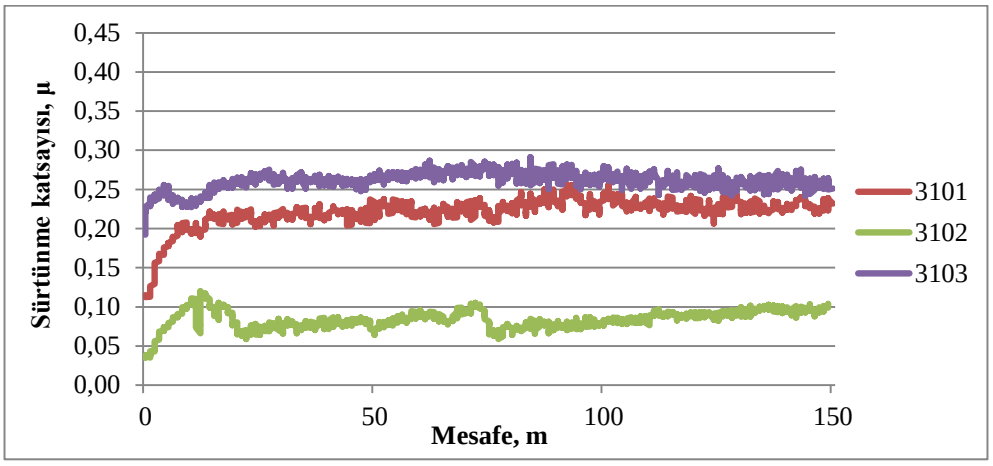


Şekil 4.16. Nitrasyon uygulanmış 3150, 7150, 9150 çeliklerine ait Al_2O_3 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı

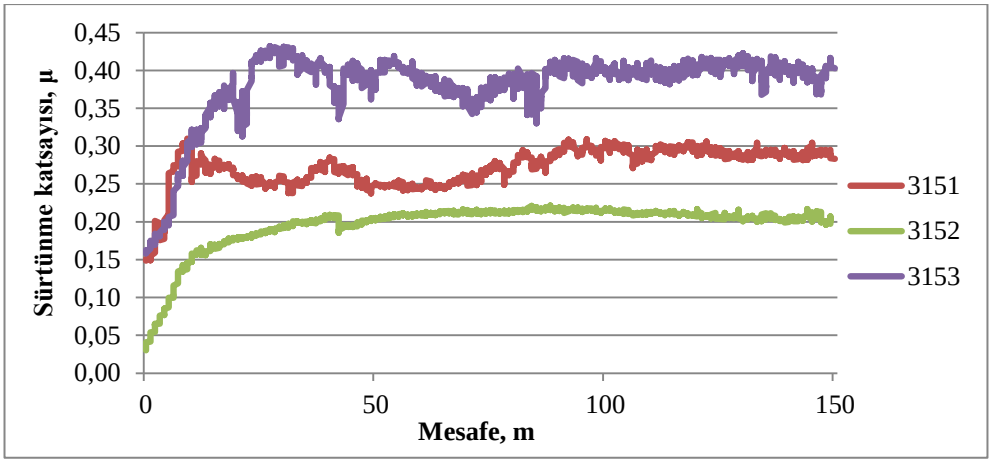
Şekil 4.17a ve b'de 1.2343 takım çeliğinin tüm prosesler sonrası seramik bilya ile aşındırılması sonucu elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı verilmiştir. Diyagramdan da görüleceği üzere yukarıda verilen koşullar söz konusu iken bu malzeme için yüzeydeki bir sertlik artışı sürtünme katsayısının artmasına neden olmaktadır. Katsayıdaki bu artış nitrasyon uygulanmış ve sonrasında kaplanmış numunelerde nitrasyon uygulanmamış olanlara göre daha belirgin olarak gözlenmiştir. Sürtünme katsayısı nitrasyon uygulanmamış 3101 numunesi için 0,20–0,25 aralığında iken, nitrasyon uygulanmış 3151 numunesi için 0,27 – 0,30 aralığındadır. Yüzey sertliği 3102 numunesine göre daha yüksek olan 3152 numunesinin de sürtünme katsayısı daha yüksek bir aralıktadır. Benzer olarak en yüksek sertlik değerine sahip olan 3153 numunesinde de sürtünme katsayısı aralığı

nitrasyon uygulanmamış konumuna göre daha yüksek olup bu aralık 0,23 – 0,28 aralığından 0,35 – 0,42 aralığına değişmiştir.

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da 1.2367 ve 1.2999 çeliklerine ait sürtünme katsayısı – mesafe diyagramları da, Şekil 4.17'de 1.2343 çeliğine ait sürtünme katsayısı – mesafe diyagramlarına benzer bir davranış göstermiştir. Kendi kıyas grubunda her bir malzemenin sürtünme katsayısı, artan yüzey sertliği ile artmıştır. Aynı zamanda nitrasyon uygulanmış olan numuneler nitrasyon uygulanmayanlara göre daha yüksek sürtünme katsayı değerleri sergilemiştir.

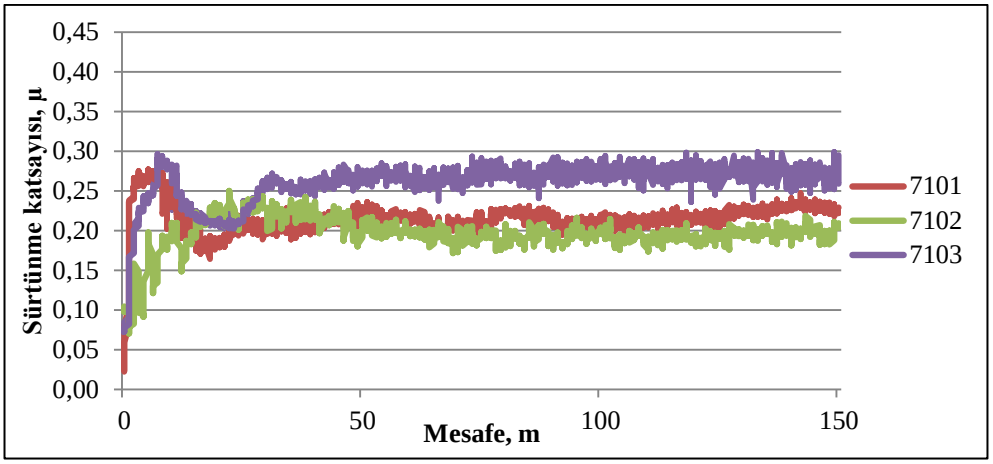


(a)

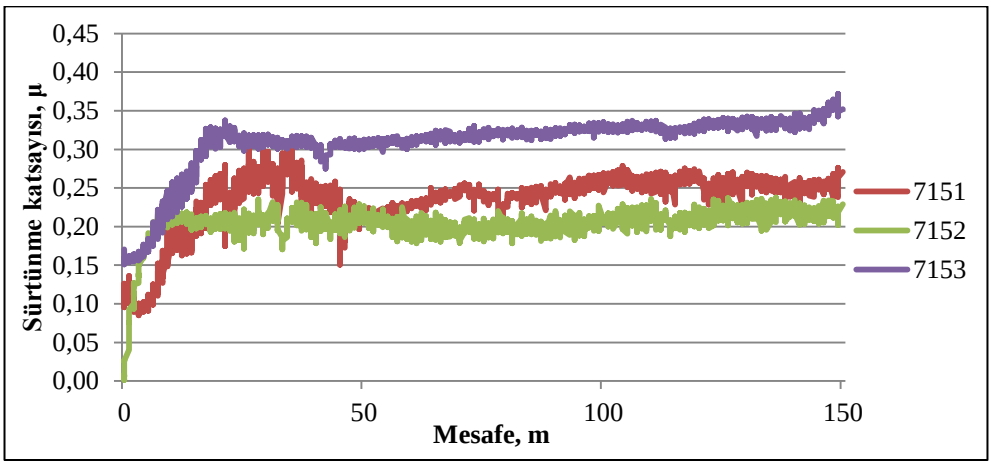


(b)

Şekil 4.17. 1.2343 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin Al_2O_3 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı - mesafe diyagramı

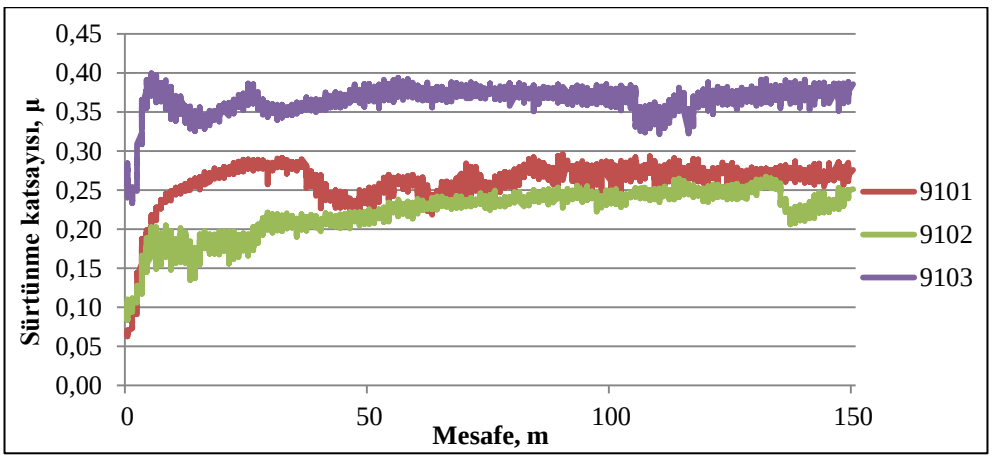


(a)



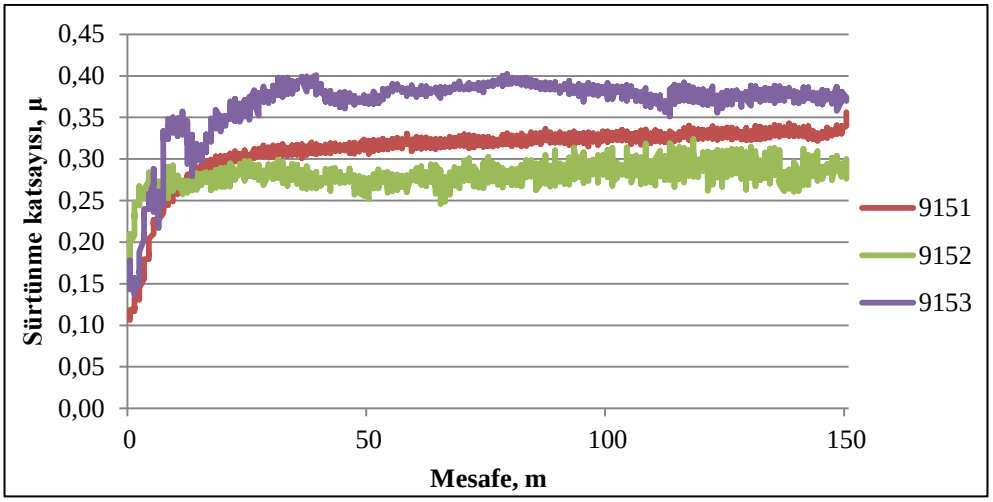
(b)

Şekil 4.18. 1.2367 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin Al_2O_3 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı - mesafe diyagramı



(a)

Şekil 4.19. 1.2999 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin Al_2O_3 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı - mesafe diyagramı

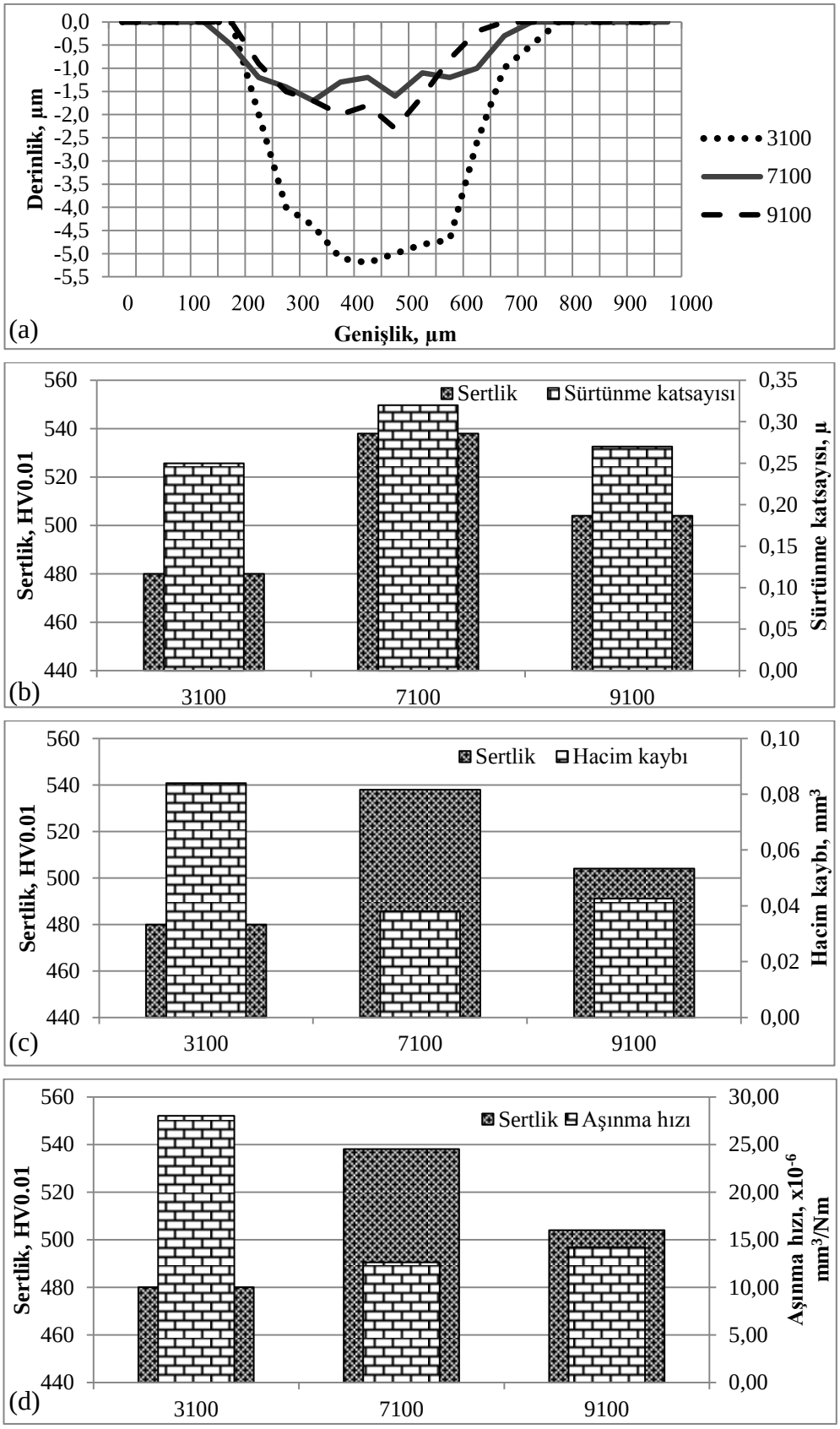


(b)

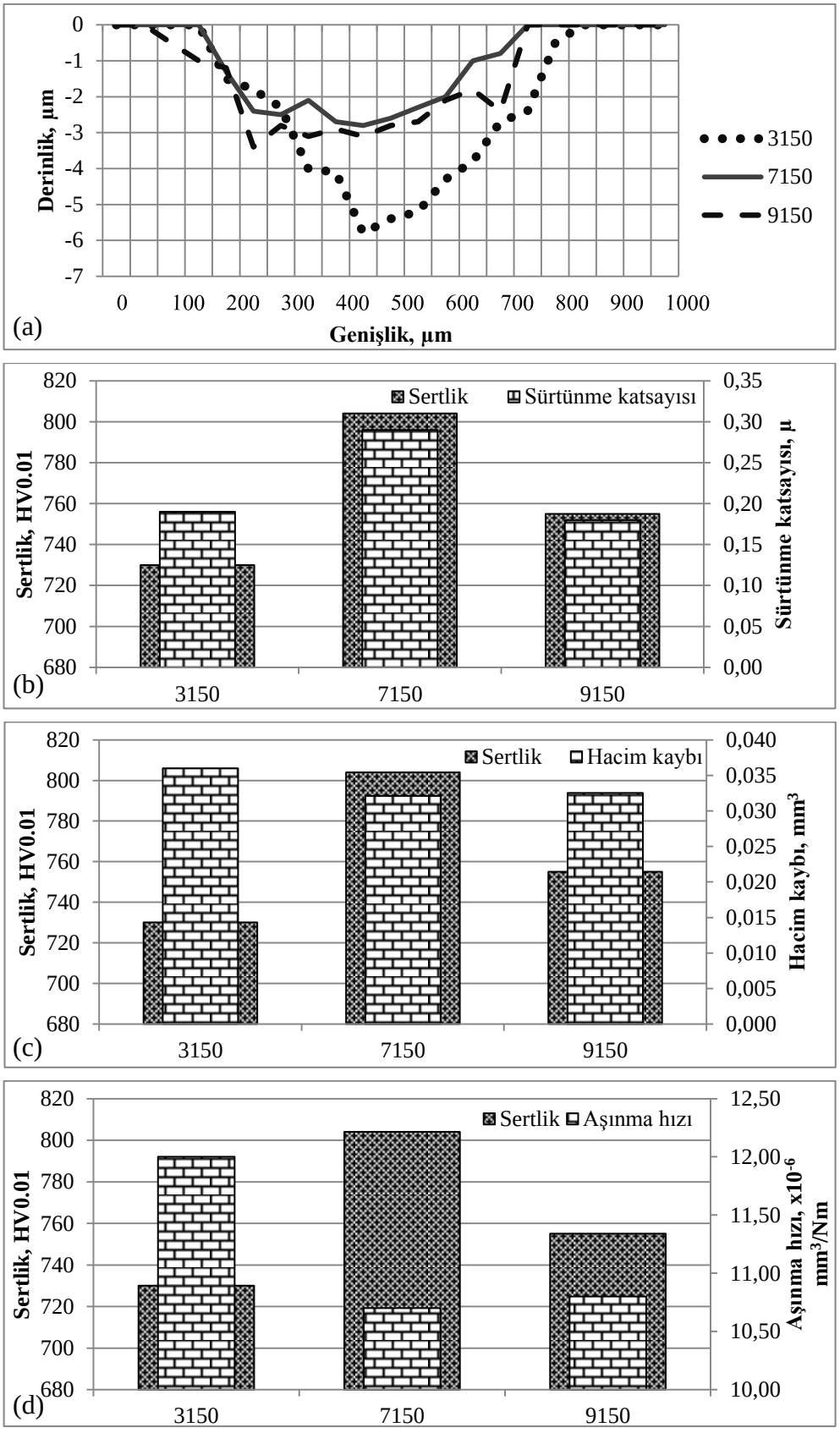
Şekil 4.19. (Devam) 1.2999 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin Al_2O_3 bilya karşısında elde edilen sürtünme katsayı - mesafe diyagramı

Bilindiği üzere sürtünme katsayı değerleri malzemenin aşınma direncinin anlaşılması için bir göstergedir. Ancak çalışmaya konu olan malzemelerin aşınma direncinin daha iyi anlaşılması için yüzeyde profilometrik ölçümlerin yapılması ve hacim kayıpları üzerinden aşınma hızlarının hesaplanması gerekmektedir.

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 sırası ile konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış ve nitrasyon uygulanmış takım çeliklerinin seramik bilya ile aşındırılmasısonrasında aşınma yüzeylerine ait profilometrik ölçüm sonuçları, sertlik-sürtünme katsayısı, sertlik-hacim kaybı ve sertlik-aşınma hızı ilişkilerini gösteren grafikleri verilmiştir. Profilometre, aşınma izine ait derinlik ve genişlik değerlerini ortaya koymuş olup 1.2343 çeliğinin daha yüksek sertlikte olan 1.2367 ve 1.2999 çeliklerine göre daha derin aşınma izine sahip olduğunu göstermiştir. Profilometrik ölçümler malzemede meydana gelen hacim kayıplarının hesaplanmasını mümkün kılmıştır. Hacim kayıpları belirlenen malzemeler için aşınma hızı değerleri ise Archard denklemi ile (Eşitlik 2.2) hesaplanmıştır.Sertliğin bir fonksiyonu olarak hacim kayıpları ve aşınma hızları değerlendirikdiğinde Şekil 4.21b ve c'de verilen sonuçlar nitrasyon işleminin konvansiyonel ısıl işleme kıyasla takım çeliklerinin aşınma direncini iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Tablo 4.12, Tablo 4.13, Tablo 4.14).

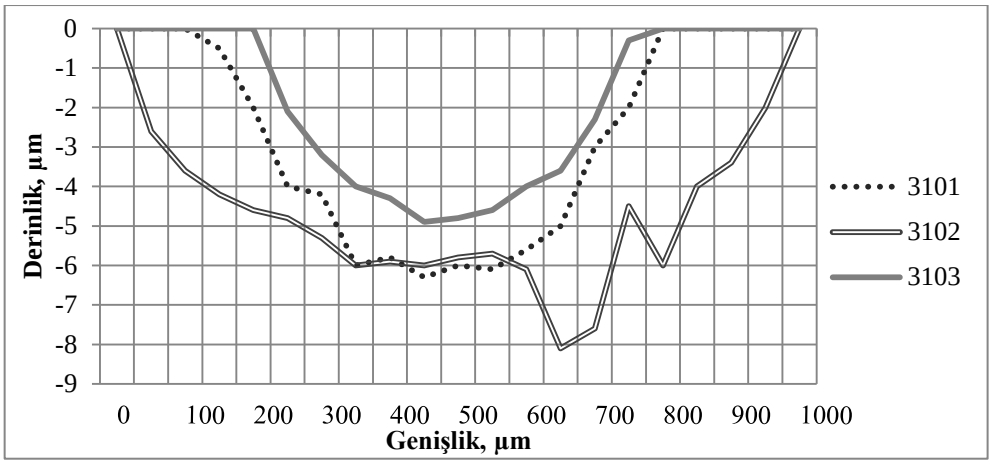


Şekil 4.20.Isıl işlem uygulanmış numunelere ait aşınma verileri; a) aşınma izi derinlik – genişlik ilişkisi, b) sertlik – sürtünme katsayısı, c) sertlik – hacim kaybı, d) sertlik – aşınma hızı

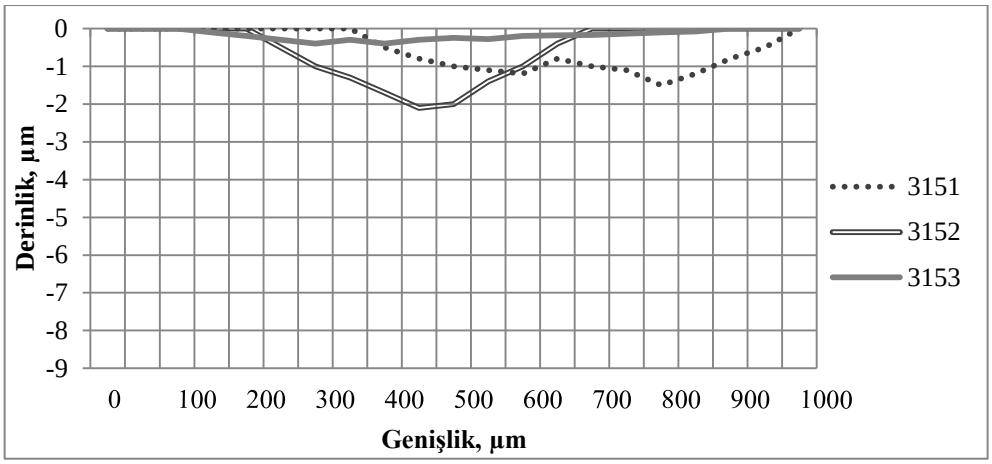


Şekil 4.21. Nitrasyon uygulanmış numunelere ait aşınma verileri; a) aşınma izi derinlik – genişlik ilişkisi, b) sertlik – sürtünme katsayısı, c) sertlik – hacim kaybı, d) sertlik – aşınma hızı

Kaplama proseslerinin seramik bilya ile olan tribolojik etkileşimde hem konvansiyonel ısıl işleme hem de sadece nitrasyon işlemine göre sağladığı direnci tespit etmek için benzer ölçümler yapılmıştır. Şekil 4.22'de kaplanmış 1.2343 numunlerinin aşınma yüzeylerine ait profilometre ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekil 4.23'te verilen profilometrik ölçümler ve sonrasında hesaplanan hacim kaybı ve aşınma hız değerleri, nitrasyonu takiben yapılan kaplamaların yapılan tüm işlemler içerisinde en yüksek aşınma dirençlerine sahip olduğunu göstermiştir.Aynı zamanda kaplamalar içerisinde çift kaplama yapısının en üstün özellik sergilediğini aşınma test sonuçları ortaya koymuştur. 1.2343 çelik grubunda en yüksek aşınma direnci nitrasyonu takiben çift kaplama yapılmış 3153 malzemesine aittir (Tablo 4.12).

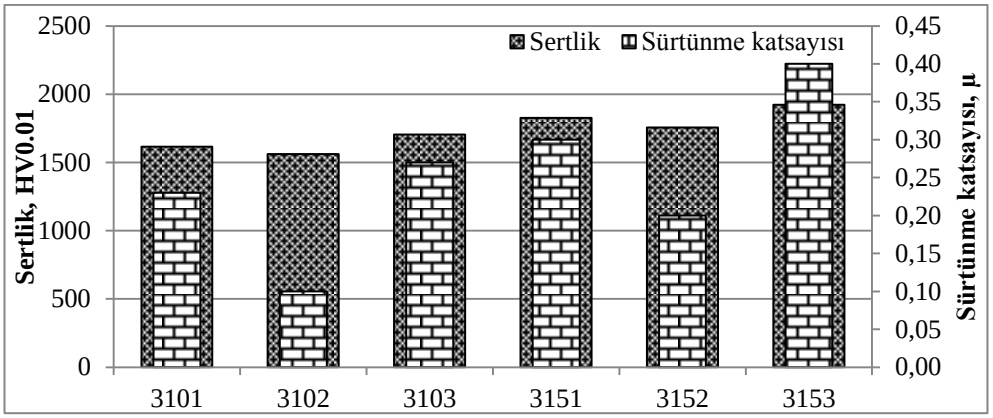


(a)

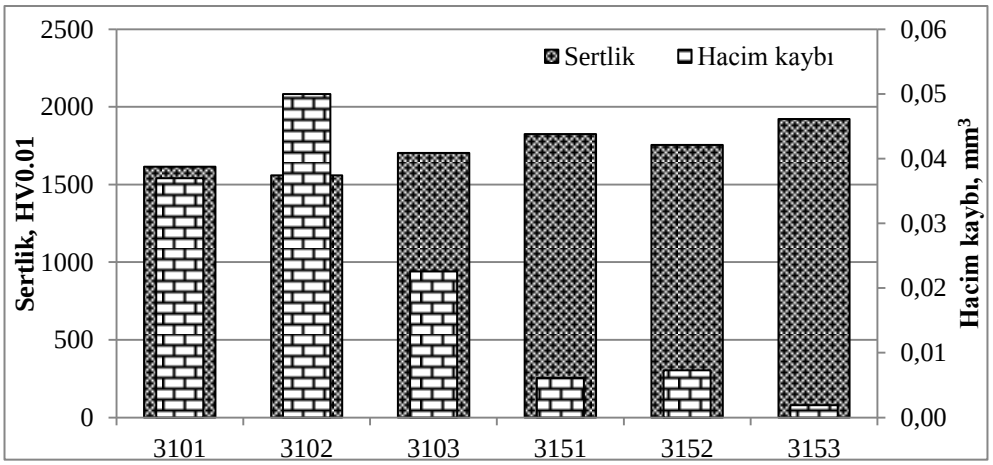


(b)

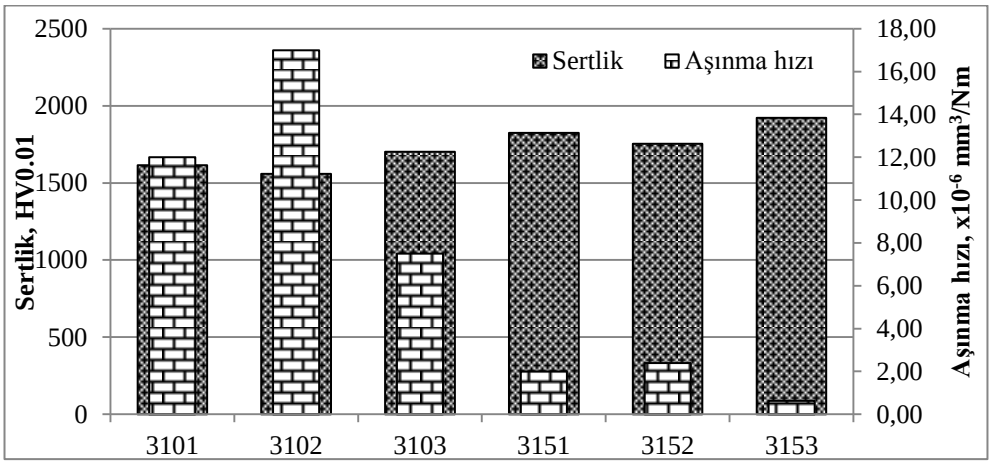
Şekil 4.22. Kaplanmış 1.2343 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma izi derinlik – genişlik ilişkisi; a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama



(a)



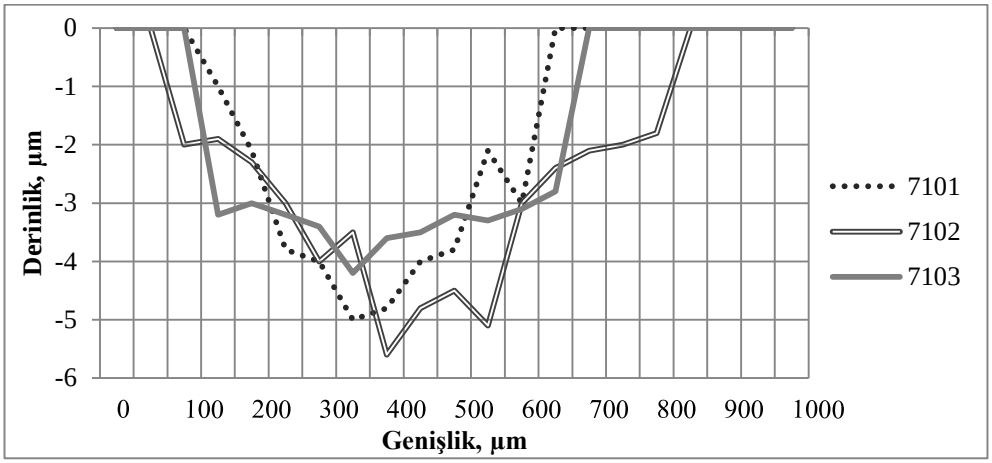
(b)



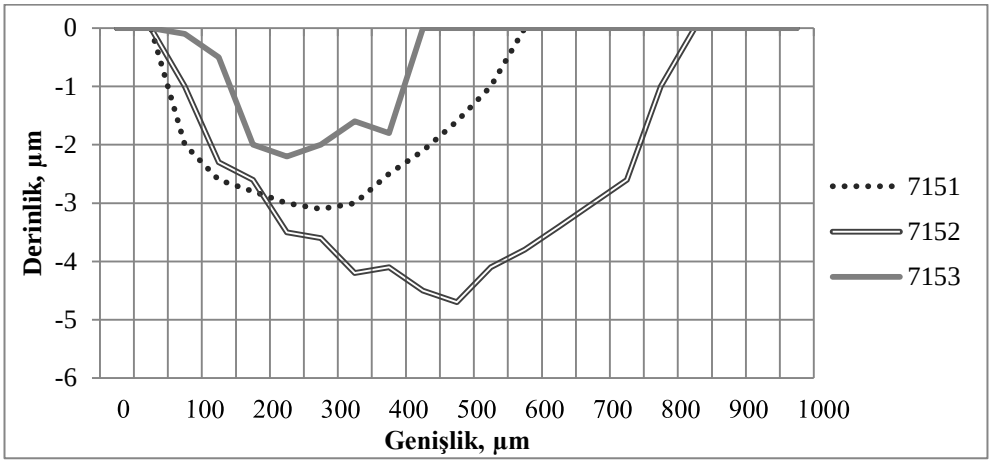
(c)

Şekil 4.23. Kaplanmış 1.2343 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma verileri; a) sertlik – sürtünme katsayısı, b) sertlik – hacim kaybı, c) sertlik – aşınma hızı

1.2367 numunelerinin aşınma yüzeylerine yapılan profilometrik ölçüm sonuçları Şekil 4.24'te, profilometrik ölçümler sonrasında hesaplanan hacim kayıpları ve aşınma hız değerleri Şekil 4.25'te verilmiştir. Verilen sonuçlar 1.2343 çelik grubuna benzer olarak çift kaplamaların kaplamalar içerisinde en iyi aşınma direnci sergilediğini ve kaplama öncesinde uygulanan nitrasyon işleminin kaplamaların aşınma direncini arttırdığını göstermiştir.1.2367 çelik grubunda en yüksek aşınma direnci ise nitrasyonu takiben çift kaplama yapılmış 3153 malzemesine aittir (Tablo 4.13).

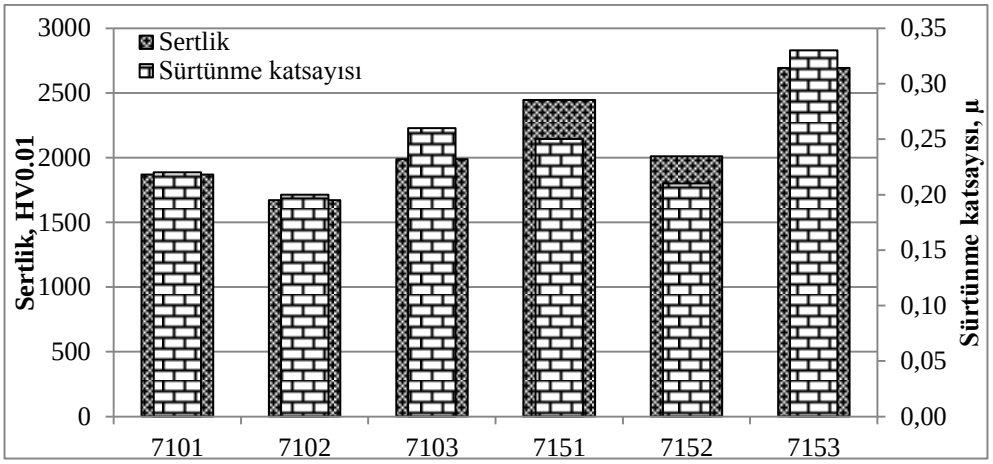


(a)

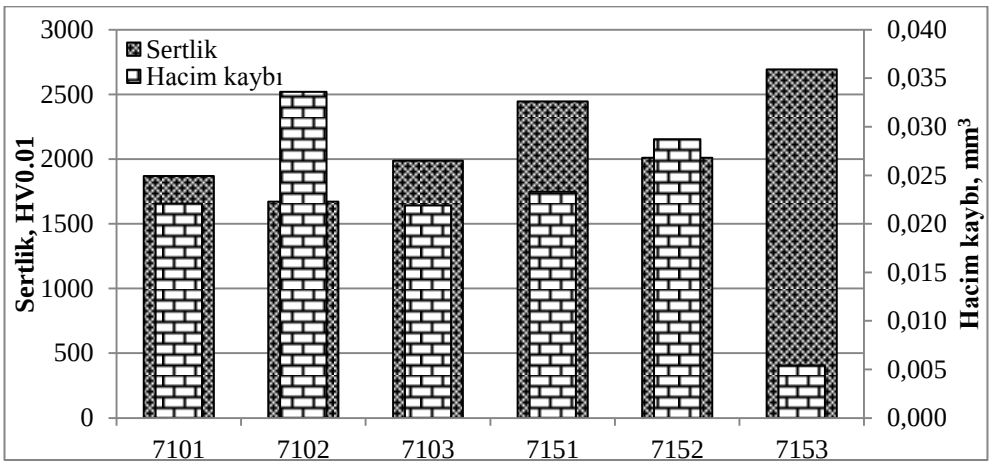


(b)

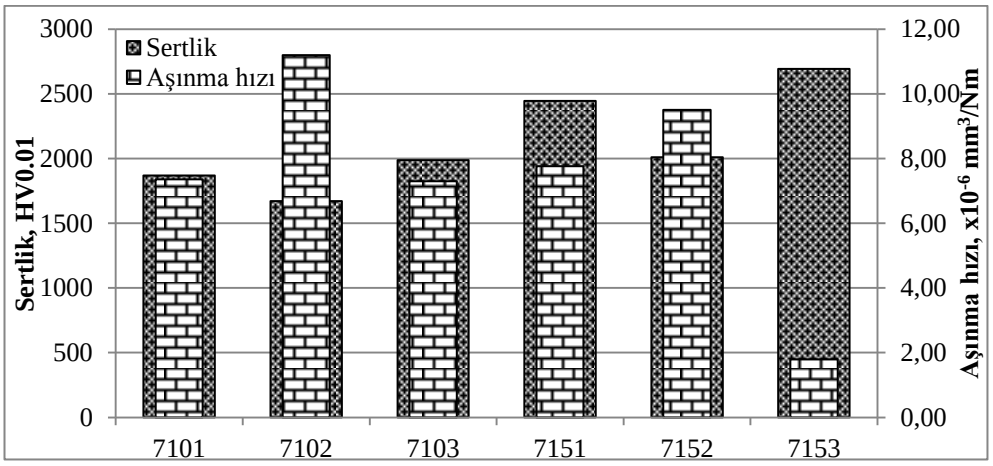
Şekil 4.24. Kaplanmış 1.2367 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma izi derinlik – genişlik ilişkisi; a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama



(a)



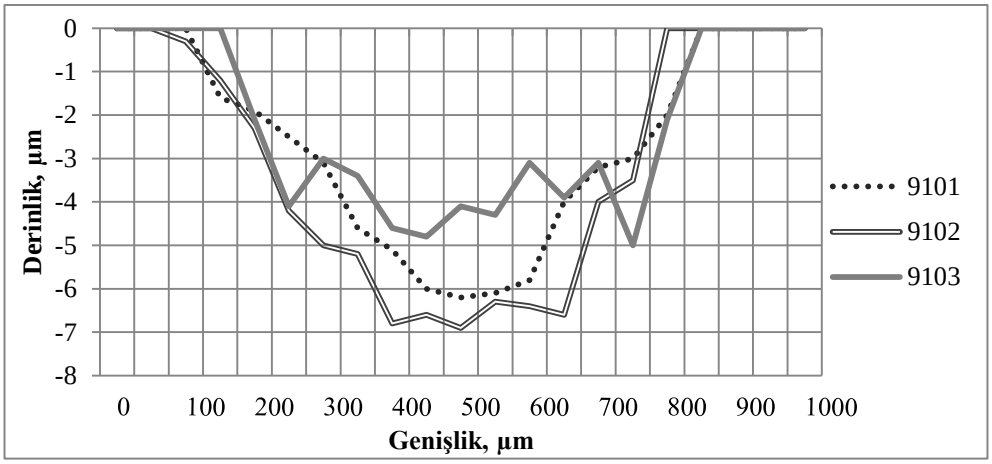
(b)



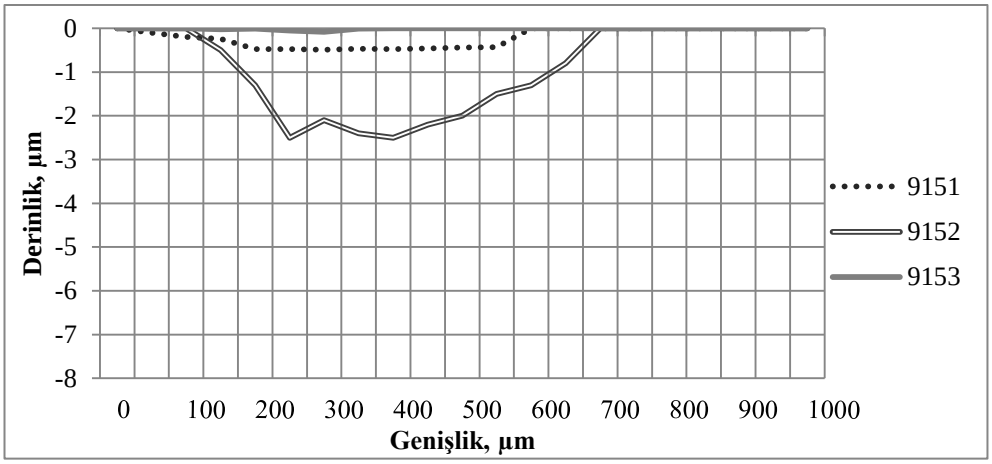
(c)

Şekil 4.25. Kaplanmış 1.2367 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma verileri; a) sertlik – sürtünme katsayısı, b) sertlik – hacim kaybı, c) sertlik – aşınma hızı

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de 1.2999 numunelerine ait profilometre ölçüm sonuçları ile profilometre sonuçlarına göre hesaplanan hacim kaybı ve aşınma hız değerleri verilmiştir. Nitrasyonu takiben yapılmış kaplamalar daha yüksek aşınma dirençlerine sahiptir. En iyi aşınma direnci ise nitrasyonu takiben çift kaplama yapılmış 9153 malzemesine aittir (Tablo 4.14).

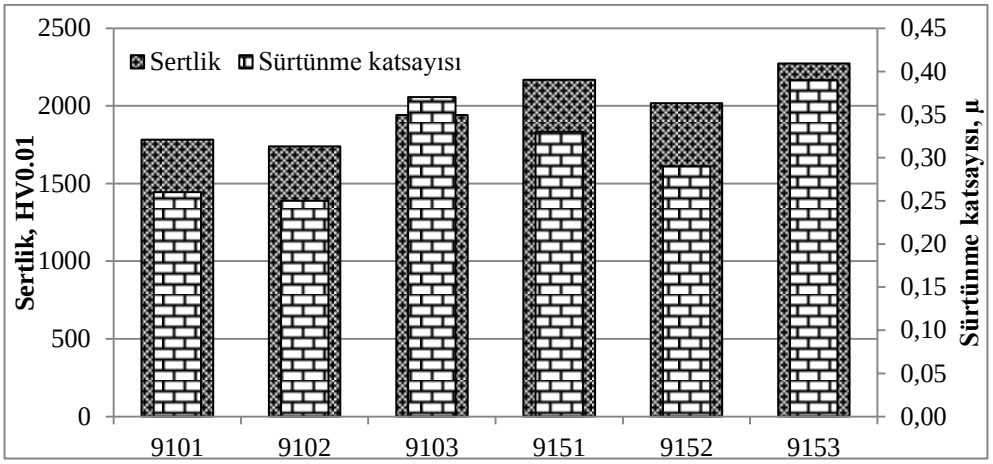


(a)

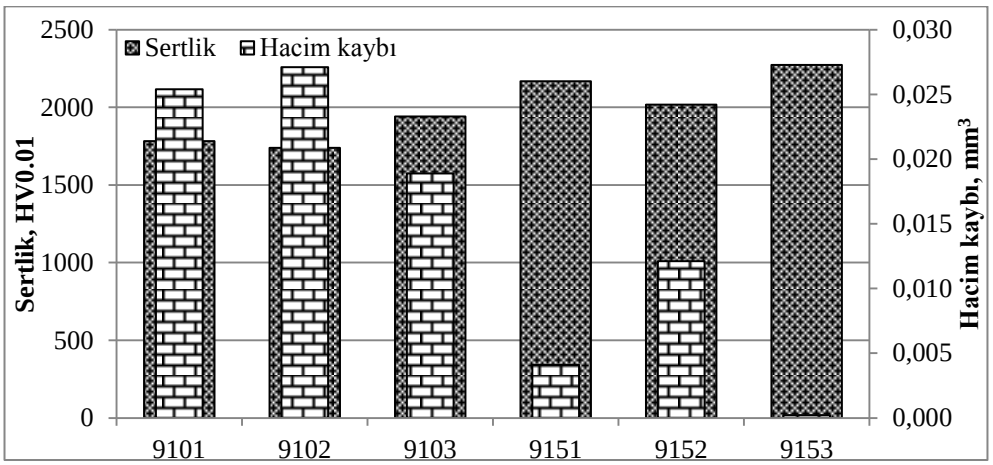


(b)

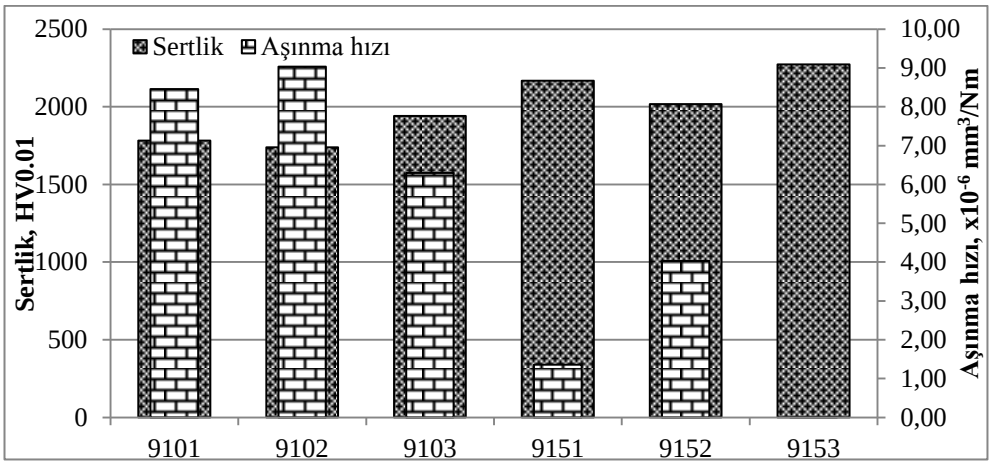
Şekil 4.26. Kaplanmış 1.2999 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma izi derinlik – genişlik ilişkisi; a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.27. Kaplanmış 1.2999 sıcak iş takım çeliği numunelerine ait aşınma verileri; a) sertlik – sürtünme katsayısı, b) sertlik – hacim kaybı, c) sertlik – aşınma hızı

Profilometrik ölçüm sonuçları, hacim kaybı ve aşınma hız değerleri,en düşük sertliğe sahip olan 1.2343 çeliğinin en yüksek aşınma hızına sahip olduğunu göstermiştir. Bu sürtünme koşullarında 1.2367 ve 1.2999 takım çeliklerinin 1.2343 çeliğine göre aşınmaya daha dirençli olduğu tespit edilmiştir (Tablo 4.12, Tablo 4.13, Tablo 4.14). Kaplamalar kıyaslandığında,nitrasyonu takiben yapılan kaplamaların yapılan tüm işlemler içerisinde en yüksek aşınma dirençlerine sahip olduğugörülmüştür. Aynı zamanda kaplamalar içerisinde çift kaplama yapısının en üstün özellik sergilediğini aşınma test sonuçları ortaya koymuştur. Kuru sürtünme koşullarında, nitrasyonu takiben çift kaplama yapılmış 9153 malzemesi en yüksek aşınma direncine sahiptir.

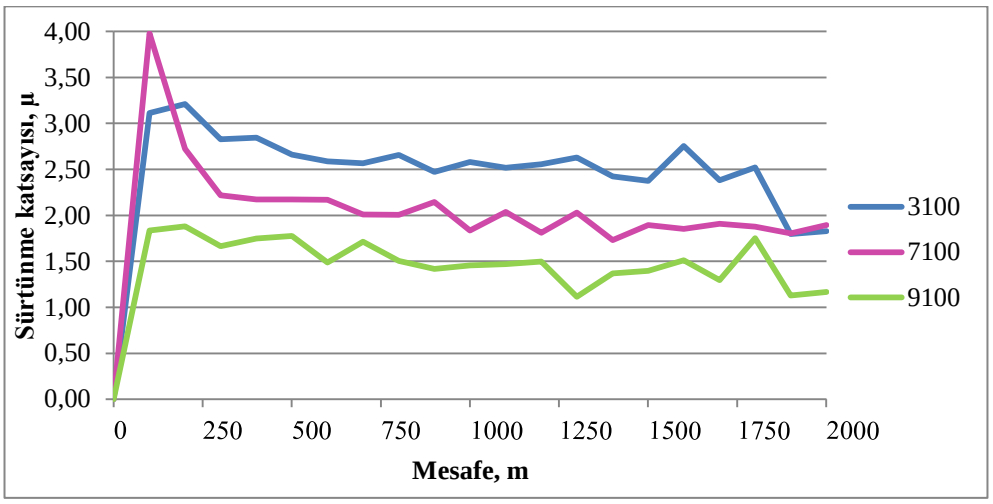
4.3.2. Sıcak aşınma testleri

Sıcak aşınma testleri, 450 °C'de "block on cylinder" aşınma düzeneğinde AA6080 alaşımına karşı yapılmıştır. Testler sonrası elde edilen sürtünme katsayısı– mesafe diyagramları tüm malzeme grupları için Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32'de verilmiştir. Diyagramlarda sürtünme katsayılarının kuru sürtünme değerlerine göre yüksek ve "1" değerinin üzerinde çıkmasının sebebi test sıcaklığında aluminyumalaşımının yüzeye yapışmasıdır. Test boyunca sürtünme kuvvetine ek olarak adhezyon nedenli kuvvetler de triblojik etkileşime dahil olmuştur.

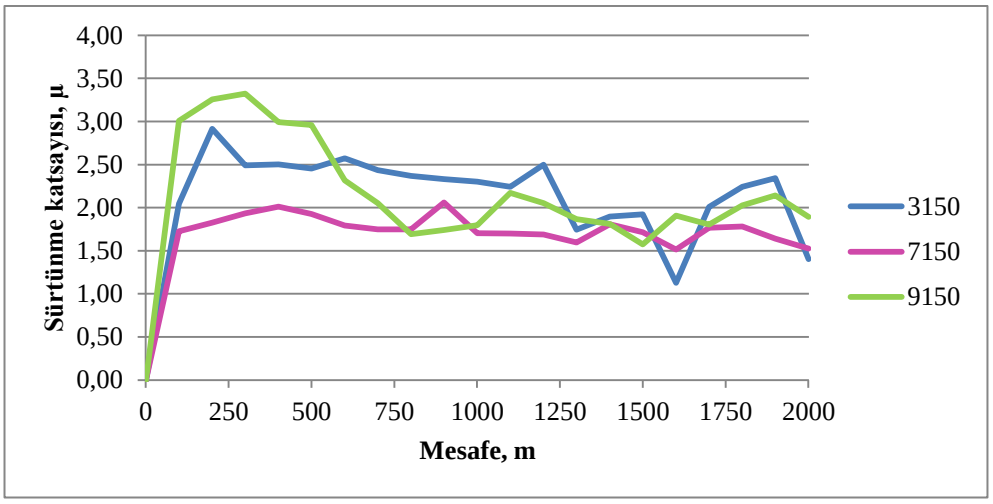
Aşınma testleri sonrasında tüm numunelerde ağırlık artışı tespit edilmiştir.Yüzeyin NaOH çözeltisine daldırılıpetkileştirilmesi ile makro bir temizlik yapılmış olmasına rağmen yüzey tamamen yapışma tabakasından arındırılamamıştır. Bu nedenle bu işlem ağırlık kaybının belirlenmesi için yeterli değildir. Yüzeyde meydana gelen yapışma aynı zamanda belirgin bir profilometrik ölçümü de mümkün kılmamıştır. Yüzeydeki yapışma tabakaları nedeniyle karşıt yüzey ile malzeme arasında beklenen tribolojik etkileşim gerçekleşmemiştir. Bu nedenle yüzeylerin aşınma karakteristiği SEM incelemeleri ile değerlendirilmiştir (Bölüm 4.4.2).

Şekil 4.28'de konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış çeliklerin aşınma davranışları kendi içerisinde verilmiştir. Diyagramlarda yer alan eğrilerdeki keskin azalma ve artmalar iki yüzey arasında yapışma tabakasının ayrılması ve yeniden oluşması nedenlidir. Sürtünme katsayı aralıkları göz önüne alındığında 9100 malzemesinin en düşük katsayı aralığında (1,3 – 1,6) olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise bu

malzemenin alaşım kompozisyonunun sunmuş olduğu alaşım karbürlerini içeren mikroyapısının test sıcaklığında en stabil halde olmasıdır.

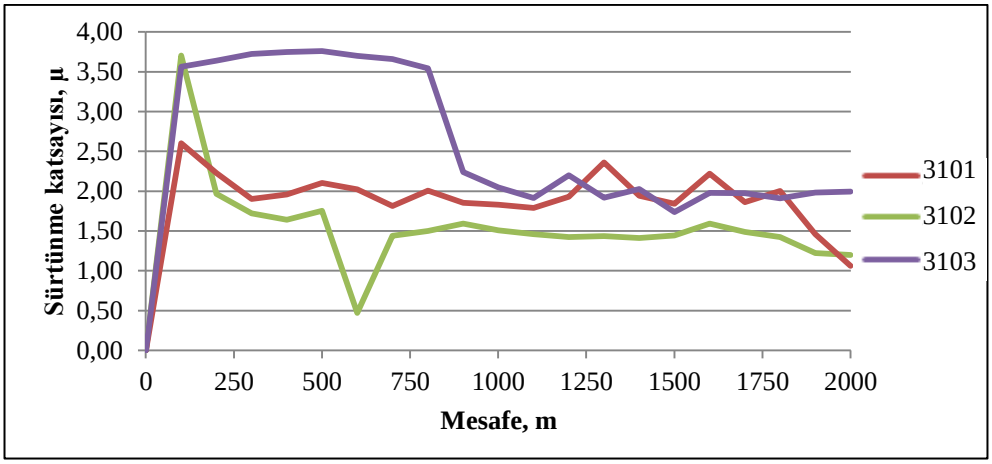


Şekil 4.28. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış 3100, 7100, 9100 çeliklerine ait 450 °C'de 6080 Al alaşımı karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı

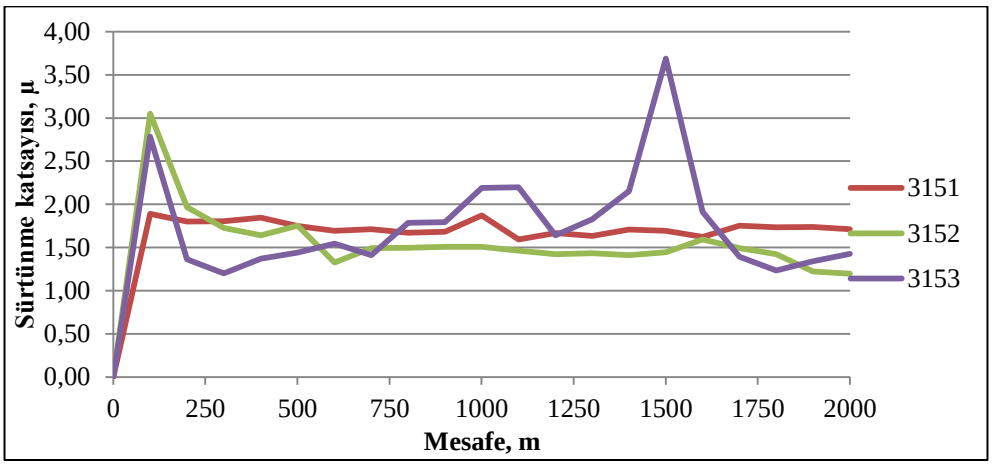


Şekil 4.29. Nitrasyon uygulanmış 3150, 7150, 9150 çeliklerine ait 450 °C'de 6080 Al alaşımı karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı

Nitrasyon uygulanmış malzemelerin sıcak aşınma testi sonrası sürtünme katsayı değişim aralıkları konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış olanlara kıyasla daha düşüktür (Şekil 4.29). Yüzeydeki kaplama ile elde edilen seramik yapı test sıcaklığında altlık malzemeye aşınma direnci kazandırmıştır. Elde edilen bulgular kuru sürtünme koşullarına göre benzer karakteristiktedir.

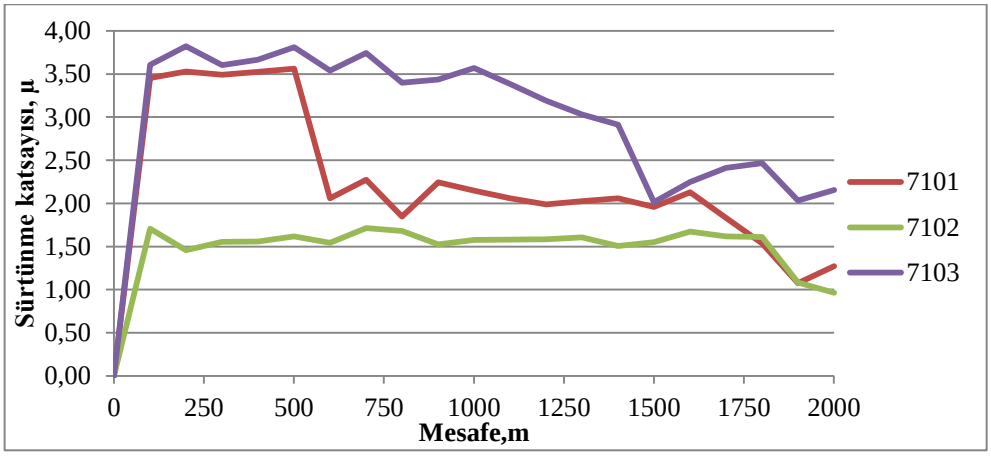


(a)



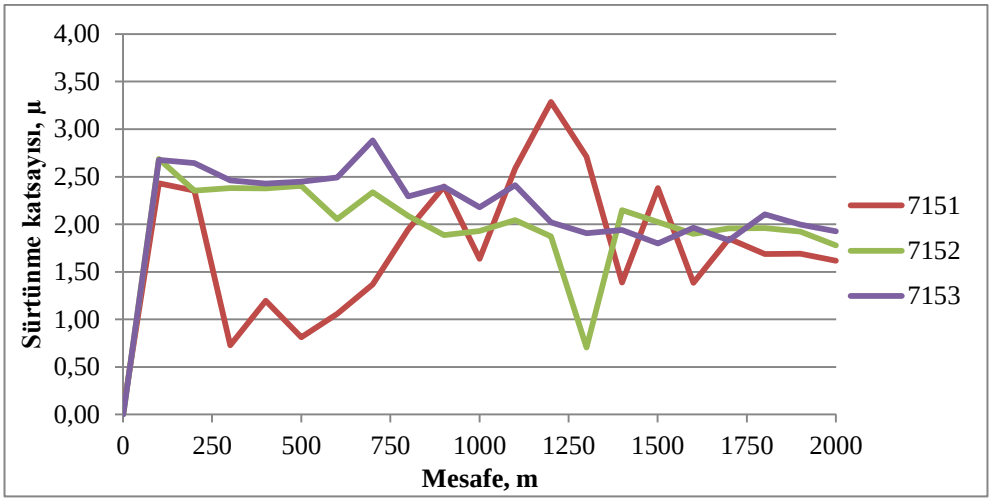
(b)

Şekil 4.30. 1.2343 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 450 °C'de 6080 Al alaşımı karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı



(a)

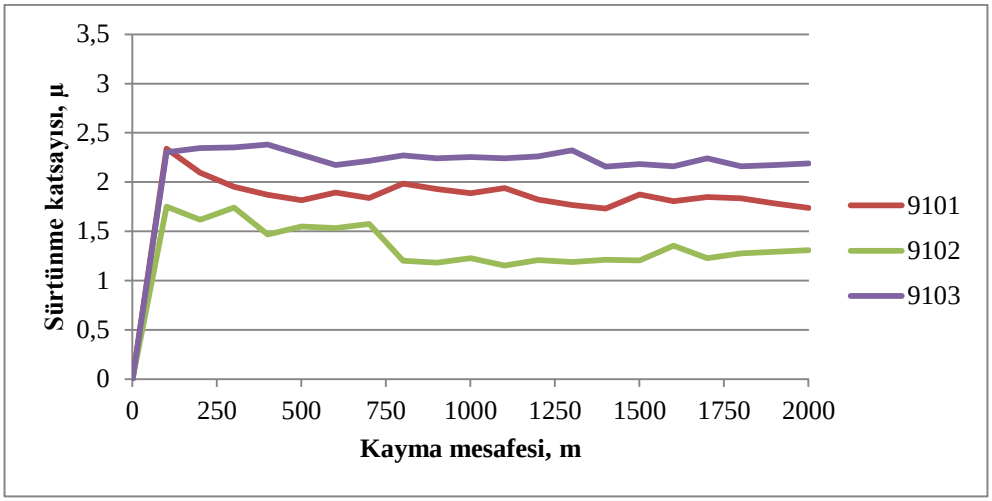
Şekil 4.31. 1.2367 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 450 °C'de 6080 Al alaşımı karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı



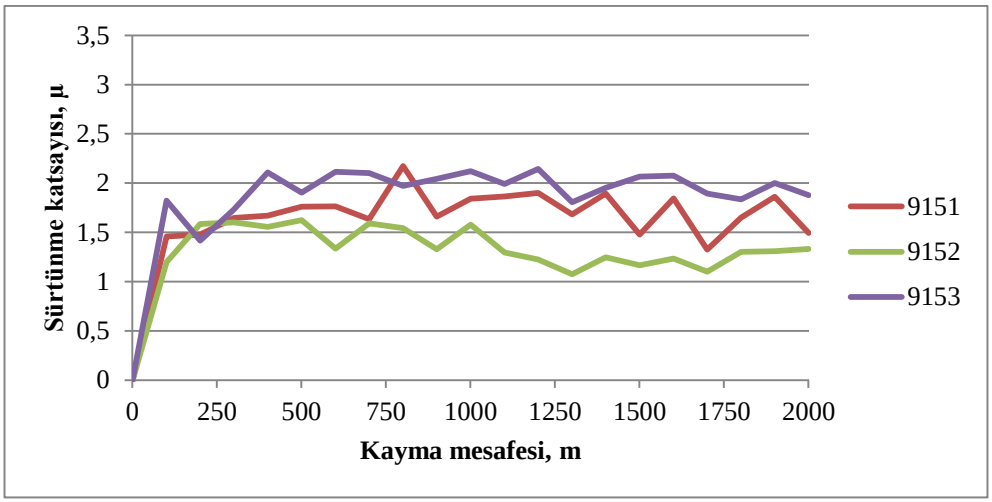
(b)

Şekil 4.31. (Devam)1.2367 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 450 °C'de 6080 Al alaşımı karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı

Tek ve çift kaplanmış numuneler gerek konvansiyonel ısıl işlem gerekse de nitrasyon uygulanmış numunelere göre nispeten daha düşük sürtünme katsayısı aralıklarına sahiptir (Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32). Yüzeyin daha kararlı seramik yapıya sahip olması daha az adhezyona neden olur. Bu ise test sıcaklığında kararlılığını koruyan seramik yüzeye karşı aluminyum alaşımının tribolojik etkileşimini arttırır. BöyleceŞekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de verilen mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değişimleri kuru sürtünme testlerinde alumina ile olan etkileşime benzerlik göstermektedir. Daha önceden de üzerinde durulduğu gibi 100Cr6 ile yapılmış testlere göre alumina ile yapılan kuru sürtünme testlerinde yüzeyde yapışmanın olmaması sonucu yüzey ile seramik bilya arasında doğrudan temas sağlanmıştır. Bu durumda yüzeydeki sert seramik yapı daha düşük sürtünme katsayısı değişimi göstermiştir. Nitrasyonu takiben yapılan kaplamalar alumina ile yapılan kuru sürtünme testlerine göre de benzerlik göstermiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.32. 1.2999 sıcak iş takım çeliğine ait a) kaplama, b) nitrasyon/kaplama uygulanmış numunelerinin 450 °C'de 6080 Al alaşımı karşısında elde edilen sürtünme katsayısı – mesafe diyagramı

4.4. Aşınma Yüzeylerinin Mikroskopik İncelenmesi

Bu bölümde, gerçekleştirilen tüm aşınma testleri sonrası aşınma yüzeyleri ışık ve taramalı elektron mikroskopları ile incelenerek değerlendirilmiştir. Yüzey incelemeleri kuru sürtünme testleri için Bölüm 4.4.1'de verilmiştir. Bölüm 4.4.2 ise sıcak aşınma testleri sonrası aşınma yüzey görüntülerini içermektedir.

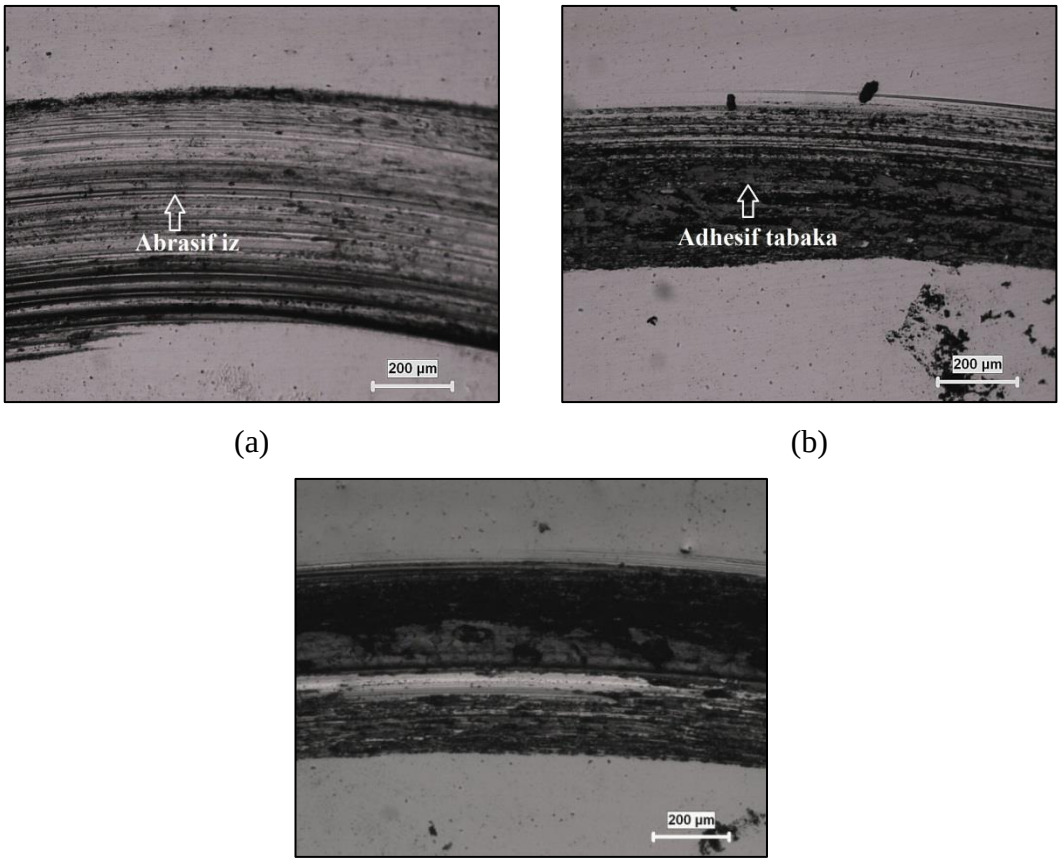
4.4.1. Kuru sürtünme testleri sonrası yüzey incelemeleri

Kuru sürtünme koşullarında oda sıcaklığında aşınma testleri sertleştirilmiş çelik ve seramik bilyalar ile gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.4.1.1'de çelik bilya ile olan

tribolojik etkileşim sonrası elde edilen aşınma yüzey görüntüleri değerlendirilmiştir. Bölüm 4.4.1.2'de ise 450 °C'de AA6080 alaşımı ile aşındırılmış yüzey görüntüleri verilmiştir.

4.4.1.1. Sertleştirilmiş çelik bilya ile aşınma

Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelere ait aşınma izlerinin görüntüleri verilmiştir. Görüntüler aşınma yüzeyinde abrasif ve kısmen adhesif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir (Şekil 4.33). Abrasif izler aşınma yüzeyinde çizikler olarak belirgin bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.34a). Yapışma tabakası olarak bilinen adhesif tabakalar soğuk kaynaklanma ile yüzeye tutunurlar. Sürtünme koşullarında bu tabakalar zamanla yorularak ayrılmaya başlarlar. Bu ayrılma soğuk sertleşen yapışma tabakasında çatlak oluşumu ve çatlağın ilerlemesi sonucunda oluşur (Şekil 4.34b).

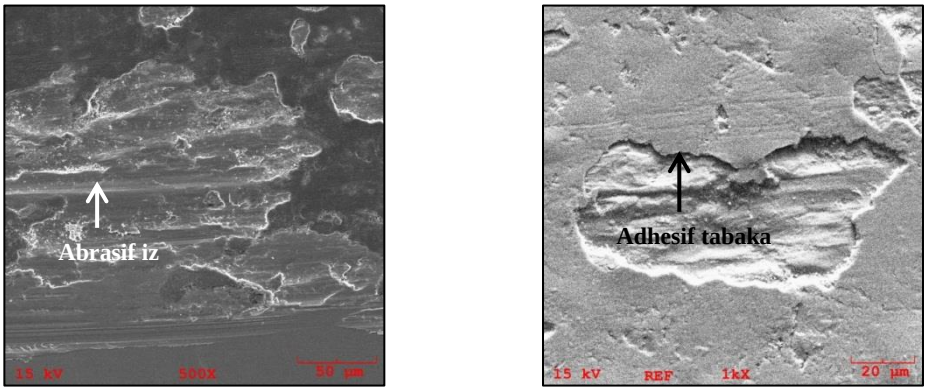


(a) (b)

(c)

Şekil 4.33. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış çeliklerin aşınma izlerine ait IM görüntüleri; a) 1.2343, b) 1.2367, c) 1.2999

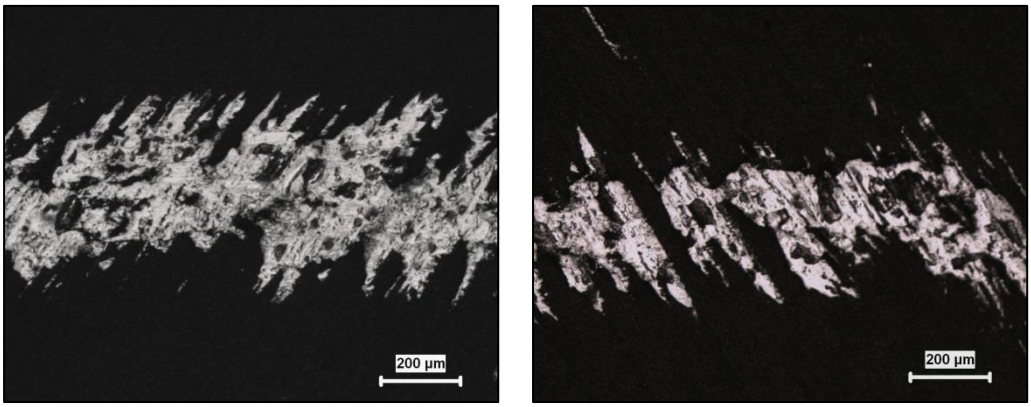
Şekil 4.34'te ısıl işlem uygulanmış 3100 kodlu çeliğin aşınma izi görüntüleri verilmiştir. Yüzeyde nitrasyon ya da kaplama olmadığı için iz boyunca çizgisel analiz alınmamıştır. Yüzeyde abrasif izler ve adhesif tabakalar görülmektedir.



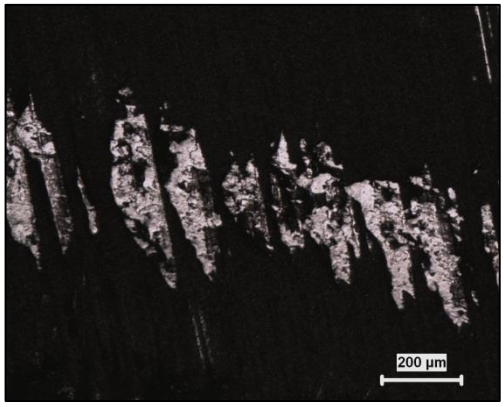
(a) (b)

Şekil 4.34. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış 3100 kodlu numunenin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri

Nitrasyon uygulanmış numunelerin aşınma testleri sonrası yüzey görüntüleri Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da verilmiştir. Yüzeyde konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelere kıyasla zig-zag şekilli izler görülmektedir (Şekil 4.35). Bu izler yüzeydeki pürüzlülükten kaynaklanmaktadır. Nitrasyon işlemi öncesinde yüzeylerin parlatılmamasıbu pürüzlülüğe neden olmuştur. Yüzeyde adhesif tabakalar yer almaktadır (Şekil 4.36). Bu tabaka SEM ile incelenmiş olup Şekil 4.37a'da verildiği gibi ana matrikse göre daha koyu kontrastta görülmektedir. Nitrasyon işleminin karşıt malzeme ile olan tribolojik etkileşimde yüzeye aşınma direnci sağlayıp sağlamadığını belirlemek için yüzeyde ize dik bir çizgi spektrumu alınmıştır.Şekil 4.37b'de verilen spektrum demir içeriğinin ana matriksten adhesif tabakaya doğru çok fazla bir değişim göstermediğini ortaya koymuştur. Azot ve oksijen içeriğinin ise spektrum çizgisinin bölgesel konumuna göre değiştiği tespit edilmiştir. Daha açık kontrastta olan ana matrikste özellikle azot miktarı daha koyu kontrastta olan bölgeye (adhesif tabaka) göre daha yüksektir. Ancak çizgi spektrumu oksijen içeriği için bunun tam tersini göstermektedir. Bu durum yüzeyin aşındığını ve oksitlendiğini ortaya koymaktadır.

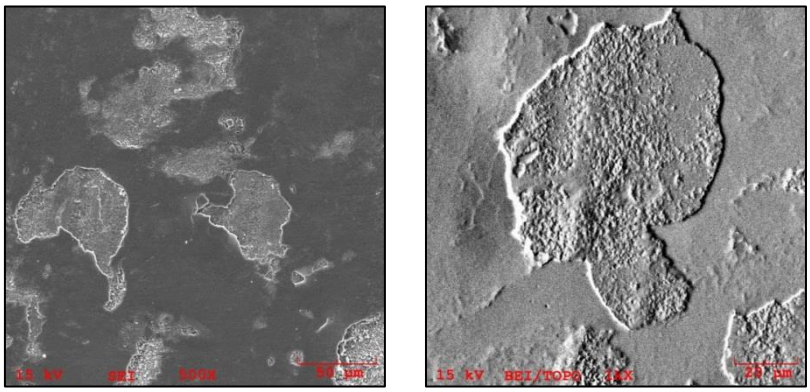


(a) (b)



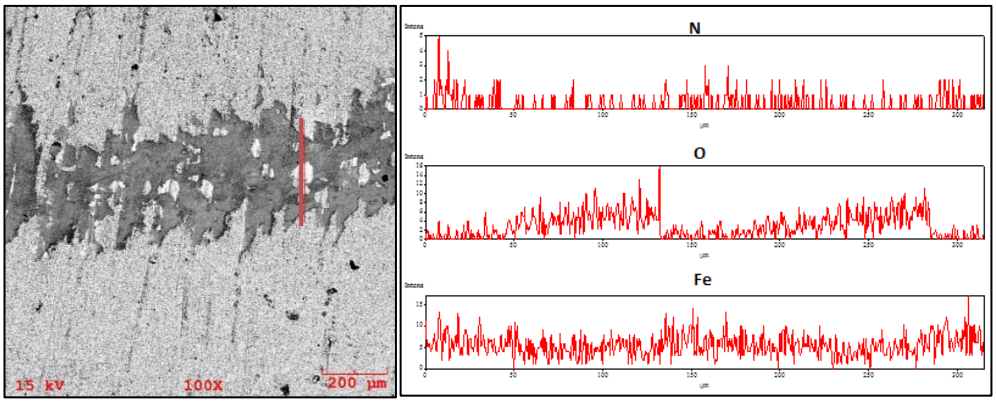
(c)

Şekil 4.35. Nitrasyon uygulanmış çeliklerin aşınma izlerine ait IM görüntüleri; a) 1.2343, b) 1.2367, c) 1.2999



(a) (b)

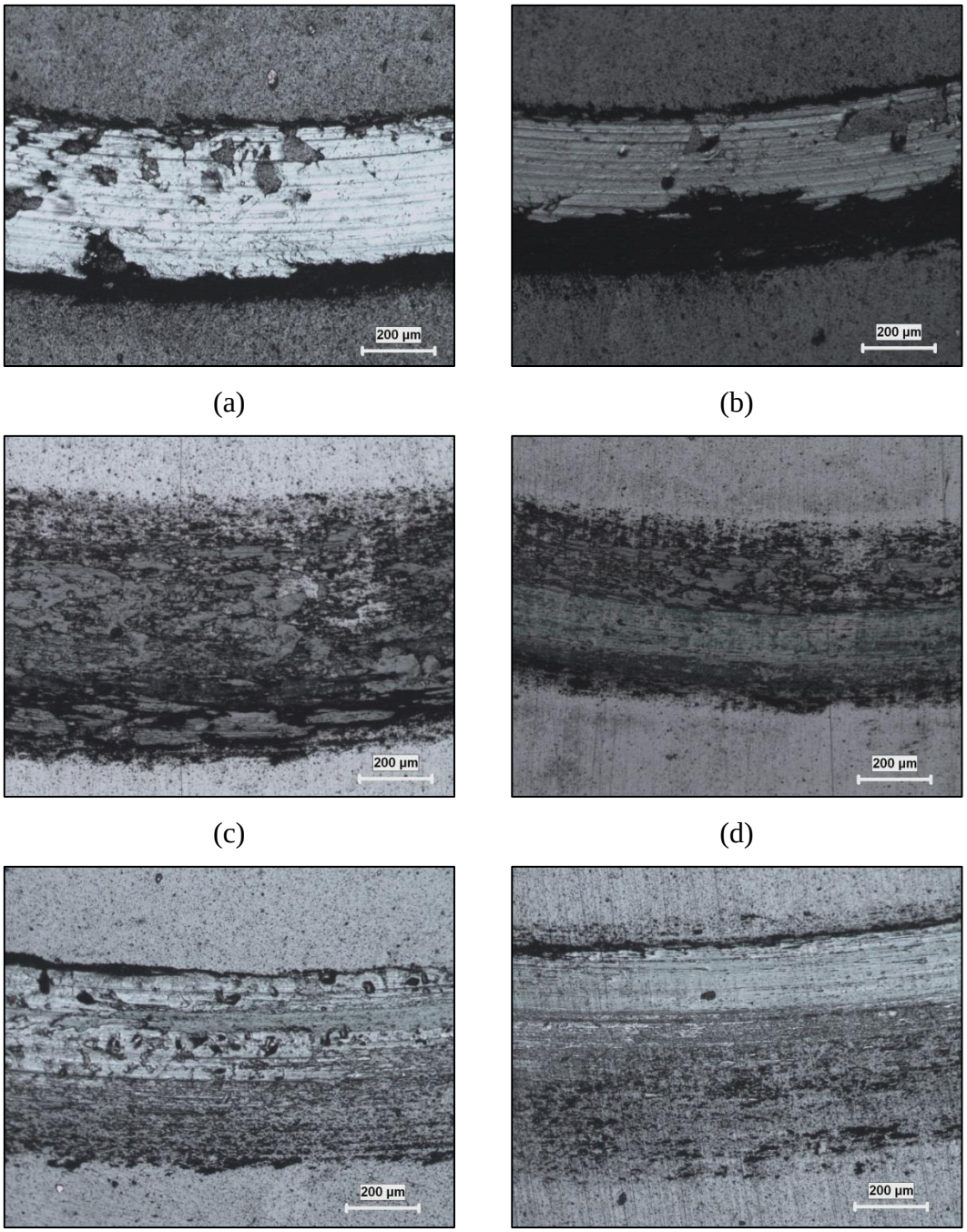
Şekil 4.36. 3150 kodlu numunenin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



(a) (b)

Şekil 4.37. Nitrasyon uygulanmış 3150 kodlu numunenin aşınma izinin a) çizgi spektrumun gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgi spektrum sonucu

Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da 1.2343 takım çeliğinin farklı koşullarda kaplanmış numunelerine ait aşınma testleri sonrası yüzey görüntüleri verilmiştir. Yüzeylerde belirgin ve geniş adhesif tabakalar gözlenmiştir (Şekil 4.38). Şekil 4.39'da verilen SEM görüntüleri bu adhesif tabakaları detaylı bir şekilde göstermektedir. Kaplanmış malzemelerin yüzey sertliğinin karşıt yüzeye göre daha yüksek olması sonucunda tribolojik etkileşimde aşındırıcı bilya kendisini aşındırarak yüzeye sıvanmıştır. Şekil 4.40a'daverilen yüzey görüntüsü üzerinden alınan çizgi spektrumu bu sıvamayı açıklamaktadır. Şekil 4.40a'da verilen aşınma yüzeyinde çift kontrastlı bölgeler vardır. Açık kontrastta görülen bölgeler kaplama malzemesini, daha koyu kontrastta görülen bölgeler ise bilyanın aşınması ile oluşan adhesif tabakayı göstermektedir. Çizgi boyunca açık ve koyu kontrastlı bölgeler göz önüne alınacak olunursa CrN kaplamanın kararlı olduğu bölgeler açıkça görülebilmektedir. Koyu görülen tabaka üzerinde kaplamaya ait elementler bulunmamaktadır. Demir içeriğinin koyu tabaka üzerinde baskın olması sertleştirilmiş çelik bilyanın aşınarak yüzeye sıvandığını kanıtlamaktadır.

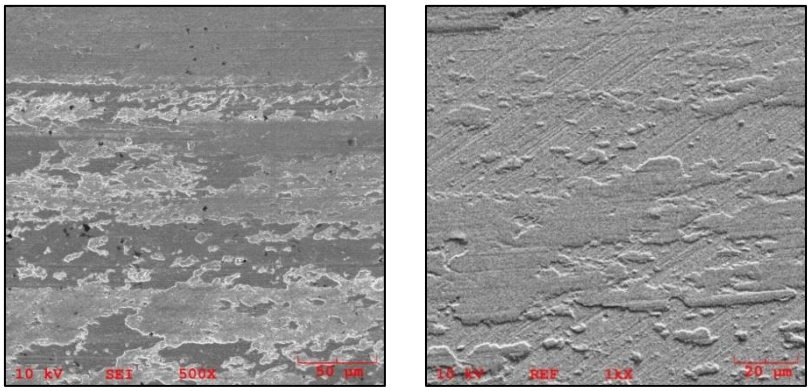


(a) (b)

(c) (d)

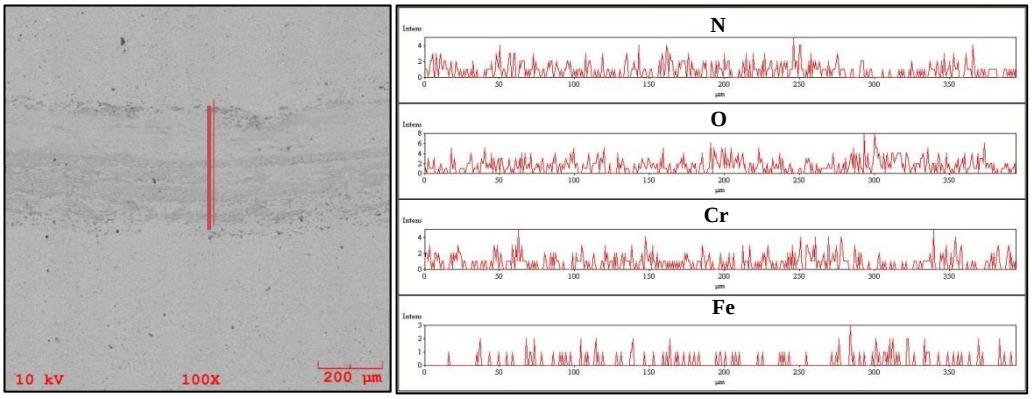
(e) (f)

Şekil 4.38. Kaplanmış 1.2343 numunelere ait ışık mikroskop aşınma yüzey görüntüleri; a) 3101, b) 3151, c) 3102, d) 3152, e) 3103, f) 3153



(a) (b)

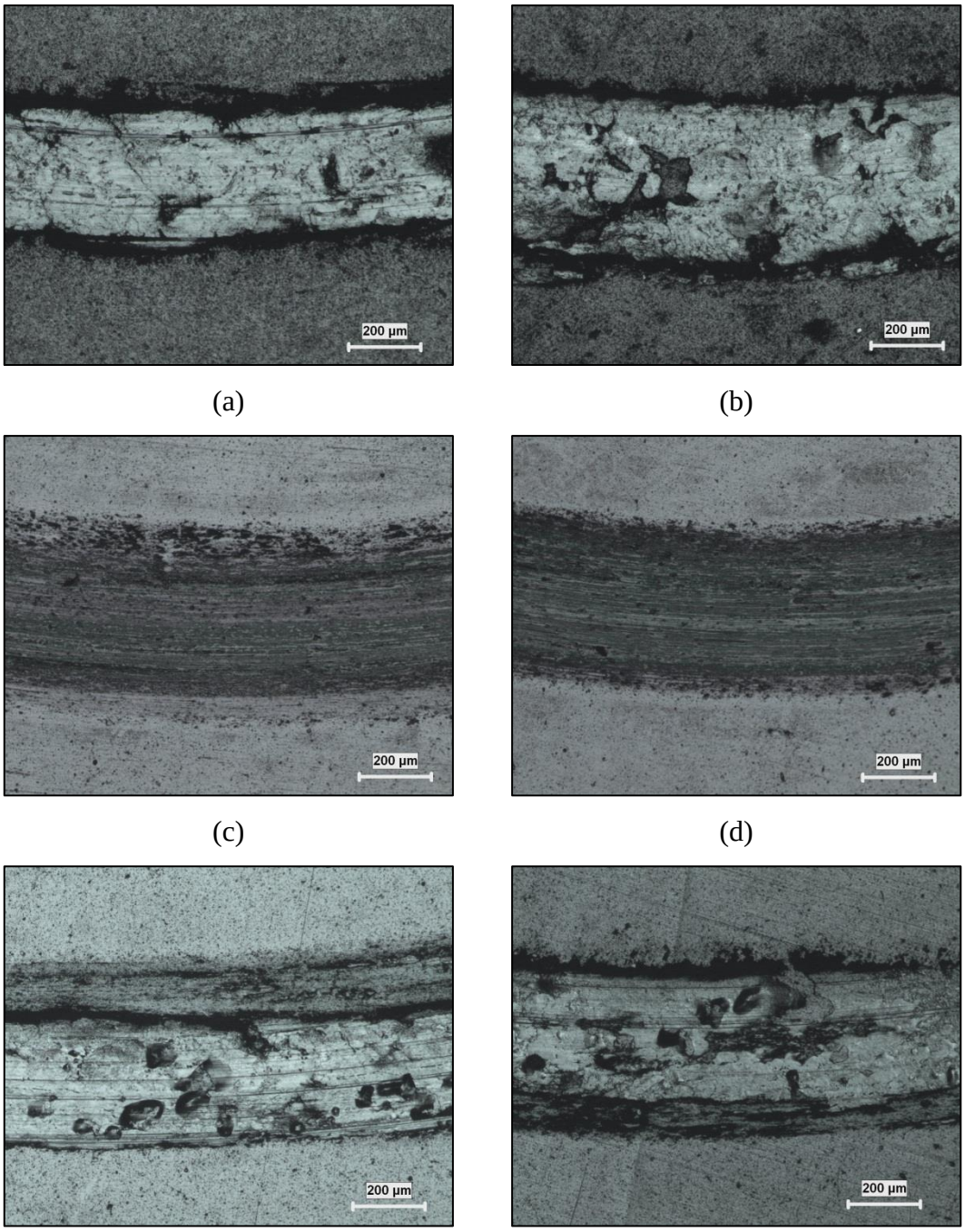
Şekil 4.39. 3152 kodlu numuneye ait aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



(a) (b)

Şekil 4.40. 3152 kodlu numuneye ait aşınma izinin a) çizgi spektrumun gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgi spektrum sonucu

Sertleştirilimiş çelik bilya ile yapılan aşınma testleri sonrası yüzey incelemeleri kaplanmış 1.2367 takım çeliğinde de gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.41 ve Şekil 4.42). Aşınma yüzeyleri kaplanmış 1.2343 takım çeliğinin aşınma yüzey karakteristiklerine benzerdir. Yüzeyde parlak görülen adhesif tabaka çizgi spektrumu ile karakterize edilmiştir (Şekil 4.43a). Çizgi boyunca tabakanın kaplama elementlerini (Al, Ti, N) içermediği belirlenmiştir (Şekil 4.43b). Demir içeriğinin parlak tabaka içerisinde baskın olması 1.2343 çeliğine benzer şekilde bilyanın aşınarak sıvandığını ortaya koymaktadır.

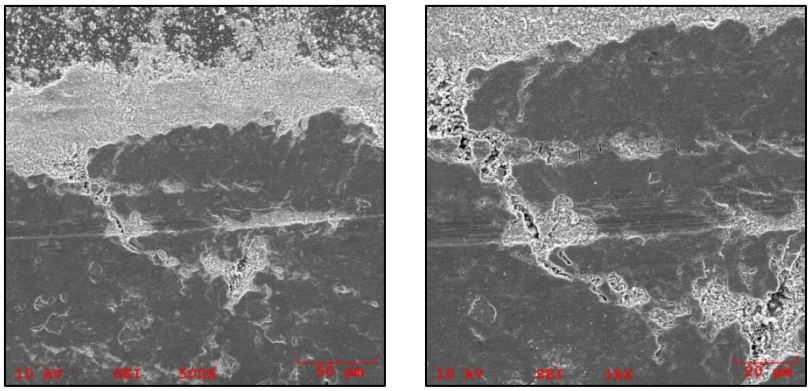


(a) (b)

(c) (d)

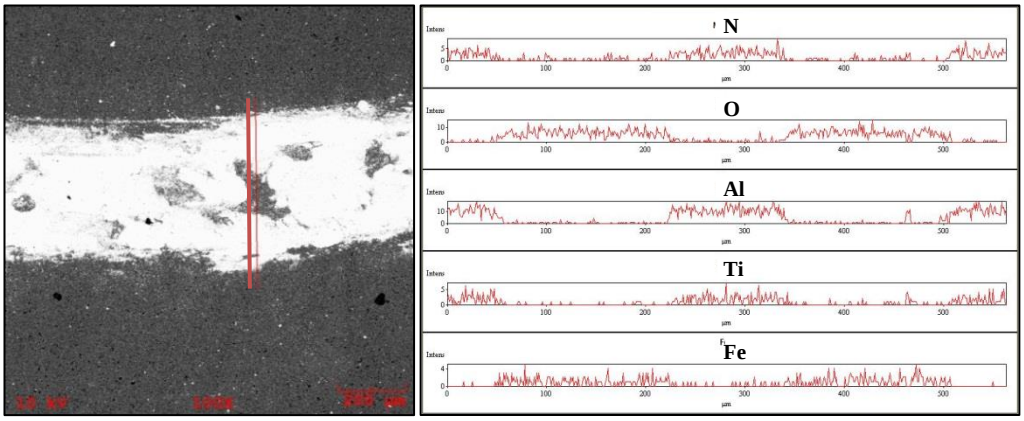
(e) (f)

Şekil 4.41. Kaplanmış 1.2367 numunelere ait ışık mikroskop aşınma yüzey görüntüleri; a) 7101, b) 7151, c) 7102, d) 7152, e) 7103, f) 7153



(a) (b)

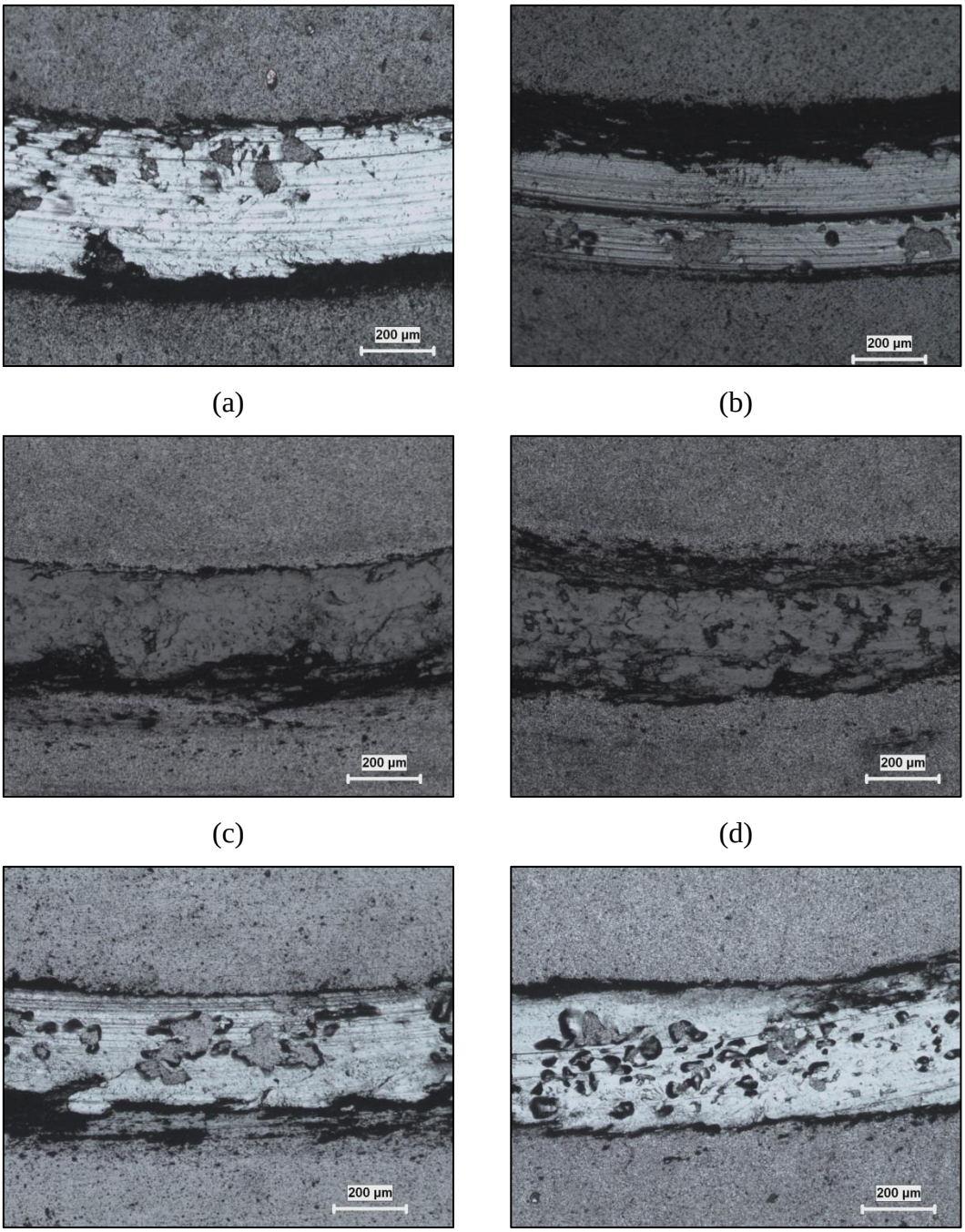
Şekil 4.42. 7101 kodlu numunenin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



(a) (b)

Şekil 4.43. 7101 kodlu numuneye ait aşınma izinin a) çizgi spektrumun gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgi spektrum sonucu

Şekil 4.44 ve Şekil 4.45 kaplanmış 1.2999 takım çeliklerinin aşınma testleri sonrası yüzey görüntülerini göstermekte olup, yüzeyler kaplanmış 1.2343 ve 1.2367 takım çeliklerine benzer aşınma özellikleri sergilemektedir. Bu takım çeliğinde de kaplanmış yüzeyin yüksek sertliği çelik bilyanın aşınarak yüzeye sıvanmasına neden olmuştur. Diğer çelik gruplarının yüzey karakterizasyonuna benzer olarak alınan çizgi spektrumu bu sıvamayı net bir şekilde ortaya koymaktadır (Şekil 4.46).

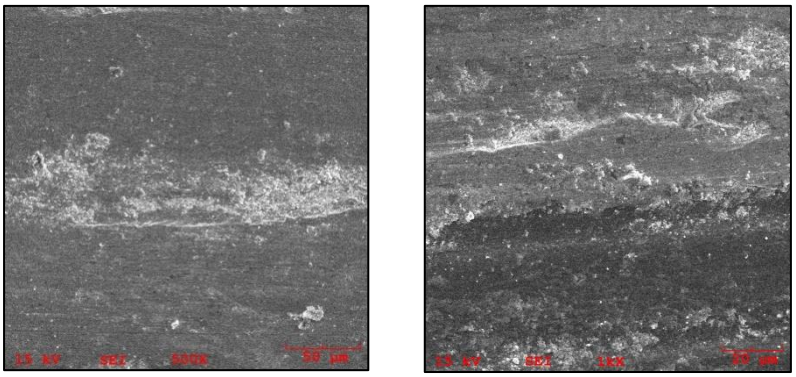


(a) (b)

(c) (d)

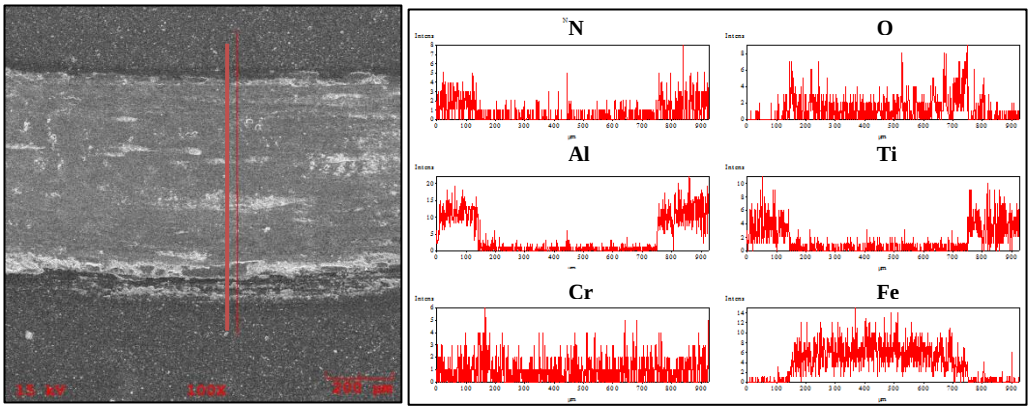
(e) (f)

Şekil 4.44. Kaplanmış 1.2999 numunelere ait ışık mikroskop aşınma yüzey görüntüleri; a) 9101, b) 9151, c) 9102, d) 9152, e) 9103, f) 9153



(a) (b)

Şekil 4.45. 9103 kodlu numunenin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



(a) (b)

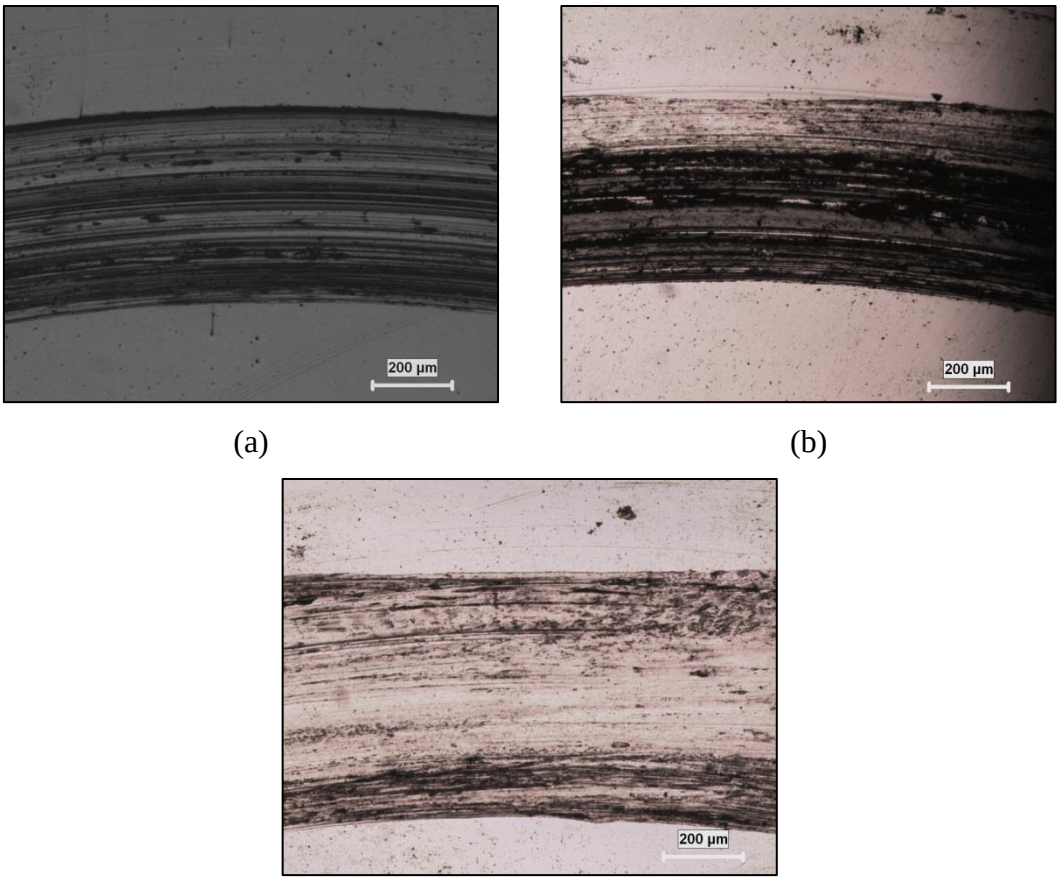
Şekil 4.46. 9103 kodlu numuneye ait aşınma izinin a) çizgi spektrumun gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgi spektrum sonucu

4.4.1.2. Seramik bilya ile aşınma

Al_2O_3 bilya ile yapılan kuru sürtünme aşınma testleri sonrasında çelik bilya ile yapılan aşınma testlerinin aksine bilyada ağırlık kaybı gerçekleşmeden numunelerde ağırlık kaybı oluştuğu belirlenmiştir. Aşınma yüzeylerinde yapılan profilometre incelemeleri sonucunda yüzeyde oluşan izin genişliği, derinliği belirlenmiş ve bunlara bağlı olarak hacim kayıpları hesaplanmıştır (Tablo 4.12, Tablo 4.13 ve Tablo 4.14). Yüzeylerde meydana gelen aşınma ise ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskopu ile karakterize edilmiştir.

Şekil 4.47'de ve Şekil 4.48'de sırası ile konvansiyonel ısıl işlem ve nitrasyon uygulanmış numunelere ait aşınma izlerinin sadece ışık mikroskop görüntüleri verilmiştir. Görüntüler aşınma yüzeyinde 100Cr6 ile aşındırılmış yüzeylere kıyasla

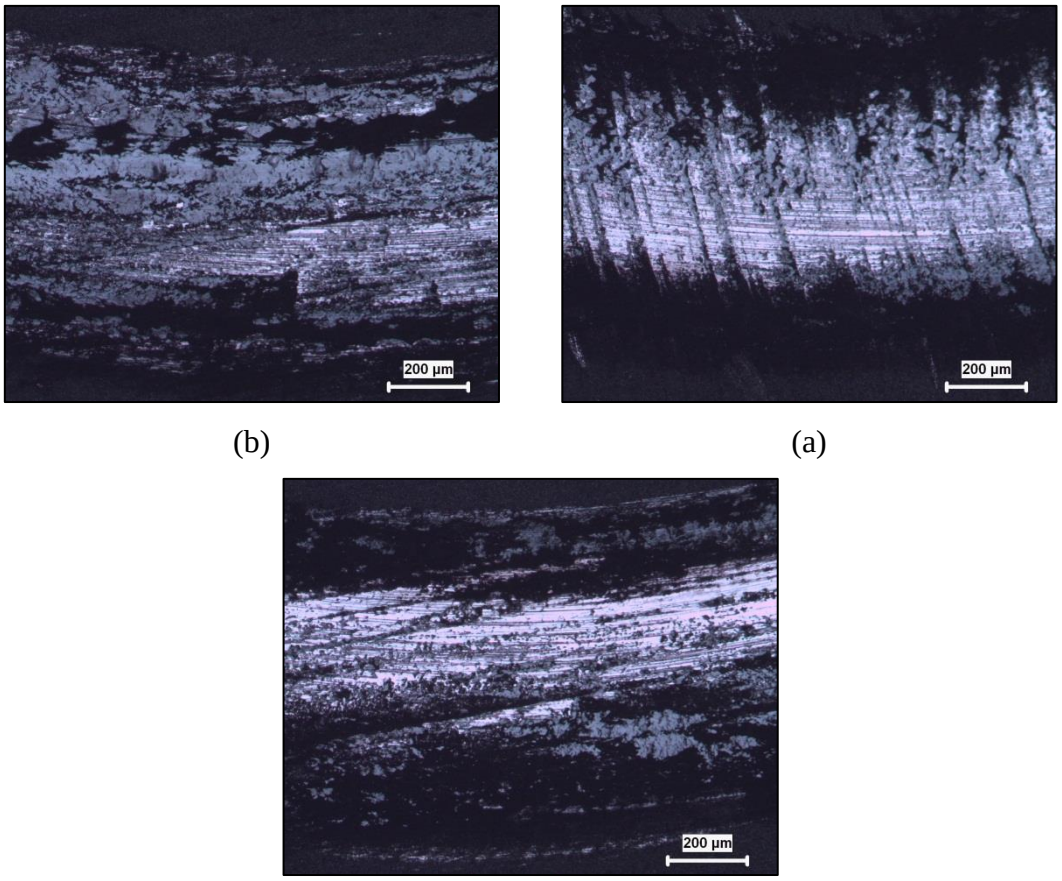
yoğun abrasif ve kısmen adhesif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Yüzeyde yapılan karakterizasyon takım çeliklerinin aşınma dirençlerinin karşılaştırılmasını sınırlamaktadır. Ancak daha önce Bölüm 4.3.1.2'de verilen profilometrik ölçümler en düşük sertliğe sahip 3100 numunesinin daha sert olan 7100 ve 9100 numunelerine göre daha çok aşındığını göstermiştir (Şekil 4.20d).



(a) (b)

(c)

Şekil 4.47. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış çeliklerin aşınma izlerine ait IM görüntüleri; a) 1.2343, b) 1.2367, c) 1.2999



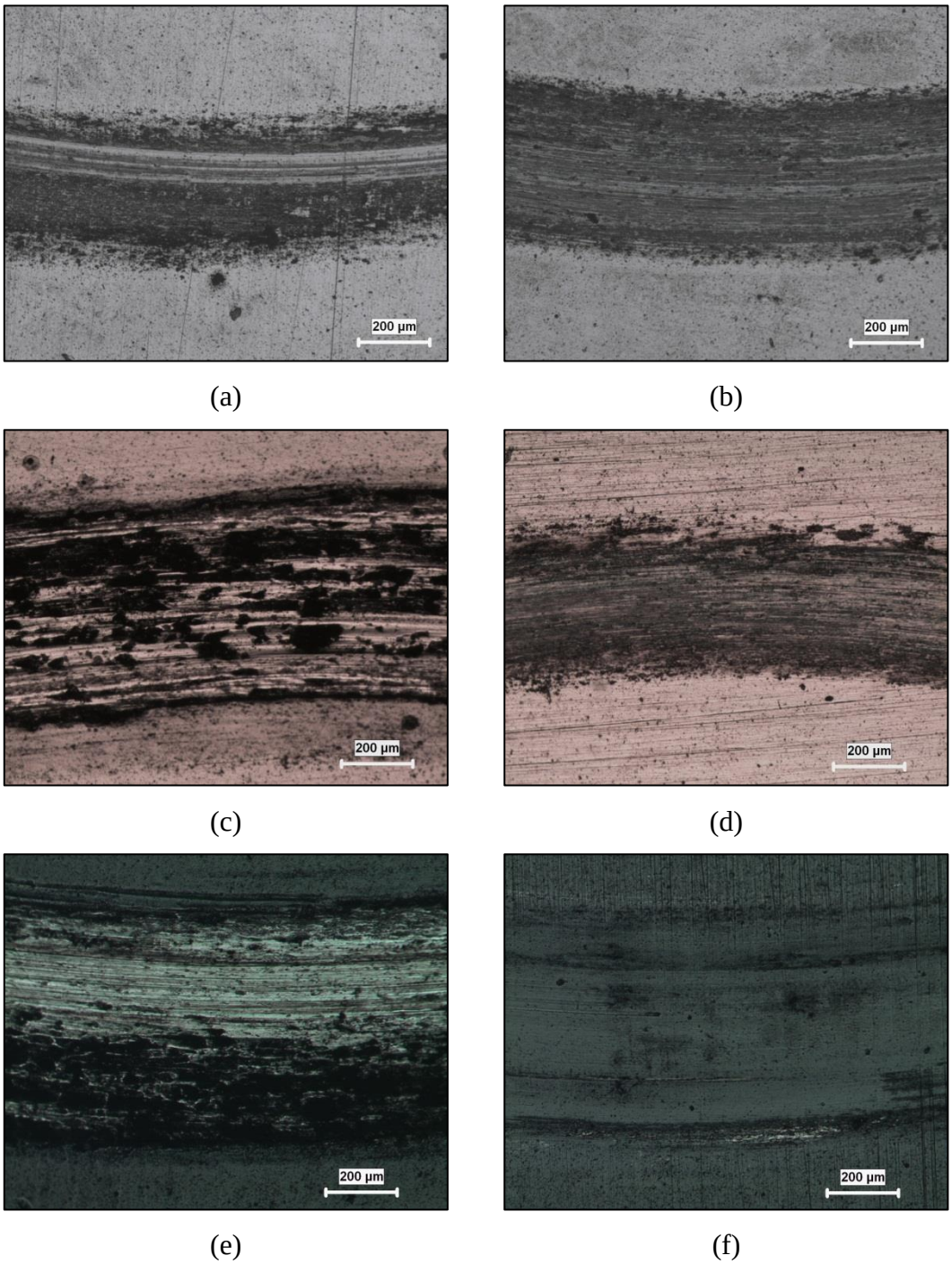
(b) (a)

(c)

Şekil 4.48. Nitrasyon işlemi uygulanmış çeliklerin aşınma izlerine ait IM görüntüleri; a) 1.2343, b) 1.2367, c) 1.2999

Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'de 1.2343 takım çeliğinin farklı koşullarda kaplanmış numunelerine ait aşınma testleri sonrası yüzey görüntüleri verilmiştir. Yüzeyler tipik abrasif izler ve adhesif tabakalar içermektedir (Şekil 4.49). Şekil 4.50'de verilen SEM görüntüleri bu adhesif tabakaları ve bu tabakaların kendi içerisinde ayrıştığını detaylı bir şekilde göstermektedir. Isıl işlemi takiben yapılan kaplamalar ile yüzey sertliği arttırılmış olup en yüksek sertliğe sahip CrN/AlTiN kaplanmış 3103 numunesi en dar aşınma izine sahiptir (Şekil 4.49). Nitrasyonu takiben yapılan kaplamalar, artan yüzey sertliğinin bir fonksiyonu olarak seramik bilya ile olan tribolojik etkileşimde yüzey pürüzlülüğünü kaybetmiş ve aşınmıştır. Bölüm 4.3.1.2'de verilen profilometre sonuçlarına dayanarak kaplanmış numunelerdeki aşınma miktarları artan sertlik ile azalmıştır (Şekil 4.22).Profilometrik ölçümler nitrasyonu takiben yapılan kaplamaların aşınma miktarlarının daha da azaldığını göstermiştir. Şekil 4.51'de verilen çizgi spektrumu yüzeydeki kaplamanın seramik bilyaya karşı tribolojik etkileşimini örneklemektedir. Isıl işlem sonrası AlTiN ile

kaplanmış 3101 numunesinin çizgi spektrumu, tribolojik etkileşim sonrası adhesif tabaka içerisinde kaplama elementlerinin düşük oranda olduğunu göstermektedir.

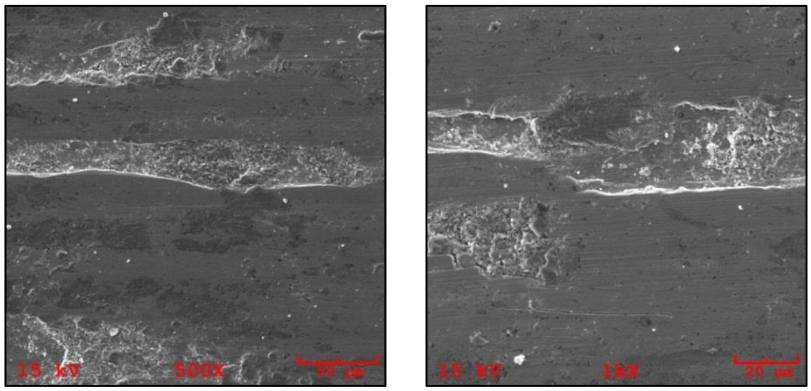


(a) (b)

(c) (d)

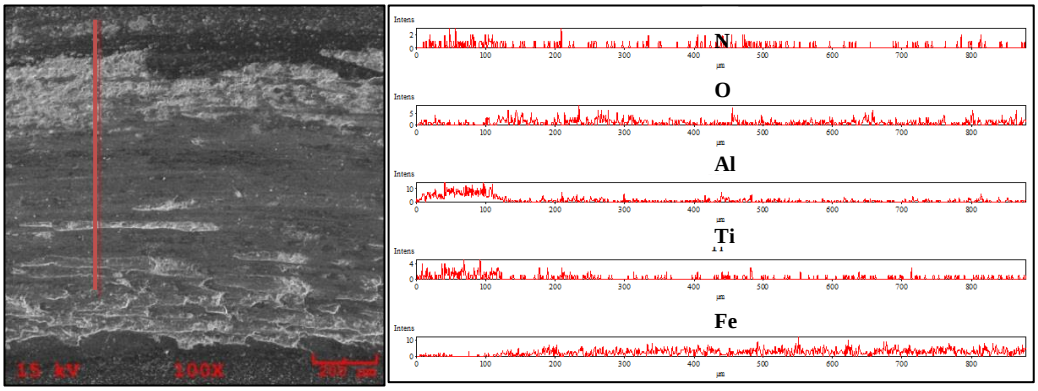
(e) (f)

Şekil 4.49. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası kaplanmış 1.2343 numunelerin aşınma yüzeylerine ait IM görüntüleri; a) 3101, b) 3151, c) 3102, d) 3152, e) 3103, f) 3153



(a) (b)

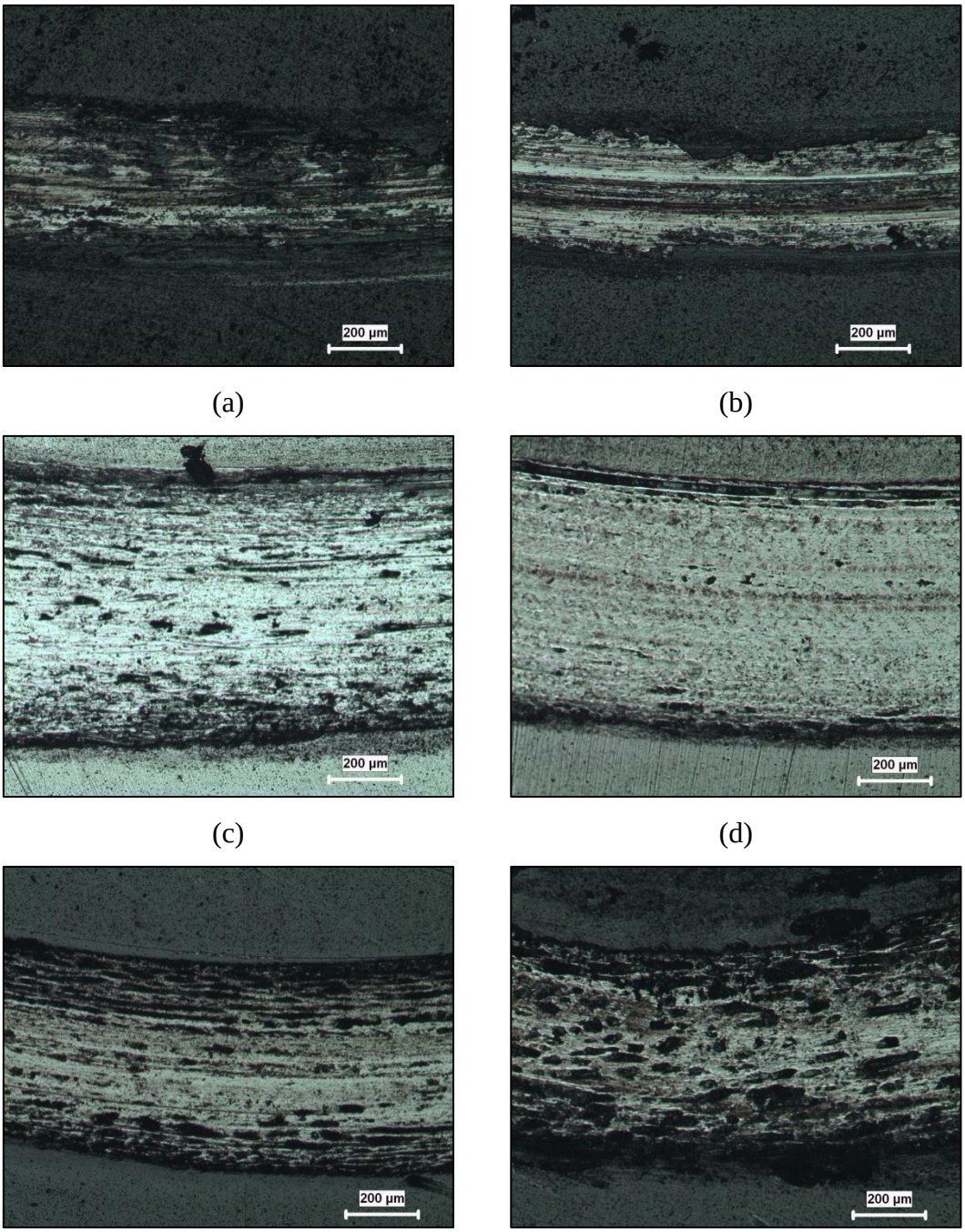
Şekil 4.50. 3101 kodlu numunenin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



(a) (b)

Şekil 4.51. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası AlTiN kaplanmış 3101 kodlu numunenin yüzeyinde elde edilen aşınma izinin a) çizgisel analizin gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgisel analiz sonucu

Seramik bilya ile yapılan aşınma testleri sonrası yüzey incelemeleri kaplanmış 1.2367 takım çeliğinde de gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.52 ve Şekil 4.53). Aşınma yüzeyleri kaplanmış 1.2343 takım çeliğinin aşınma yüzey karakteristiklerine benzerdir. Isıl işlem sonrası kaplanmış ve nitrasyon sonrası kaplanmış numunelerin yüzeyinde görülen adhesif tabaka çizgi spektrumları ile karakterize edilmiştir (Şekil 4.54a ve c). Çizgi boyunca tabakaların kaplama elementlerini (Cr, N) düşük oranda içerdiği belirlenmiştir (Şekil 4.54b ve d). Demir içeriğinin tabaka içerisinde baskın olması yüzeyin aşındığını göstermektedir. Profilometrik ölçüm sonuçları 1.2343 çeliğine benzer şekilde yüzey sertliğinin artması ile birlikte aşınma miktarının azaldığını göstermektedir (Şekil 4.24).

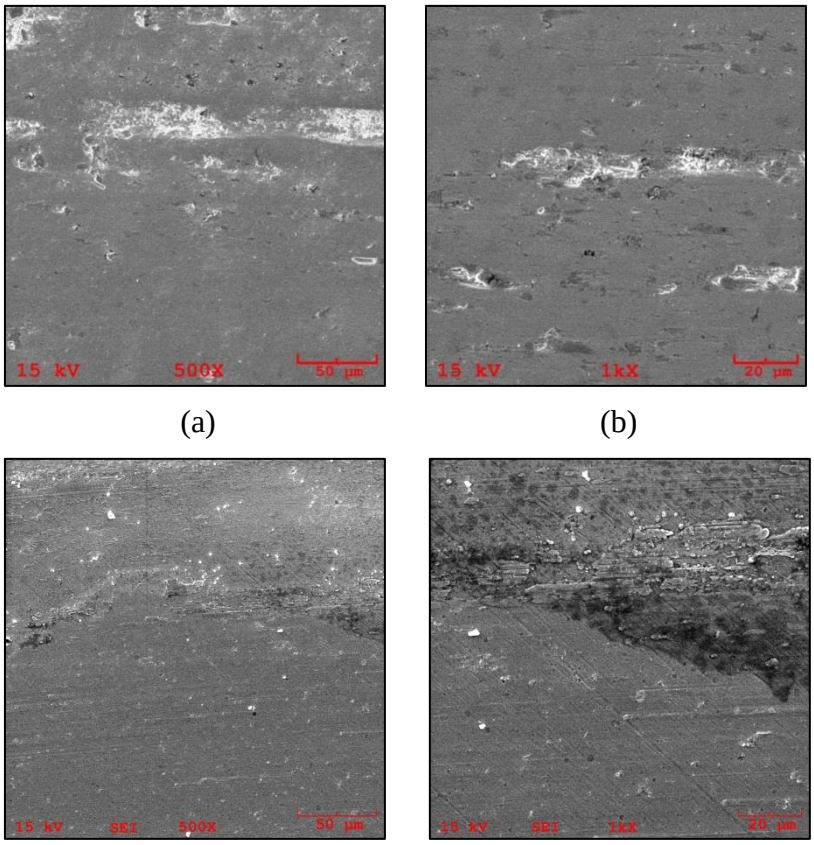


(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

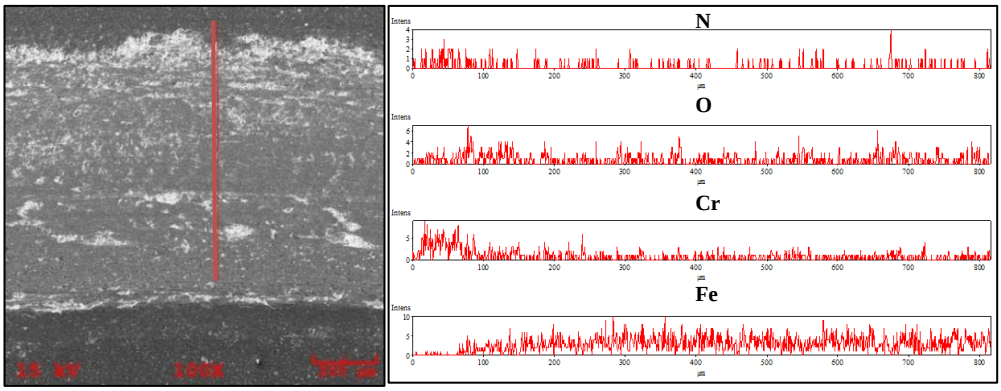
Şekil 4.52. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası kaplanmış 1.2367 numunelerin aşınma yüzeylerine ait IM görüntüleri;a) 7101, b) 7151, c) 7102, d) 7152, e) 7103, f) 7153



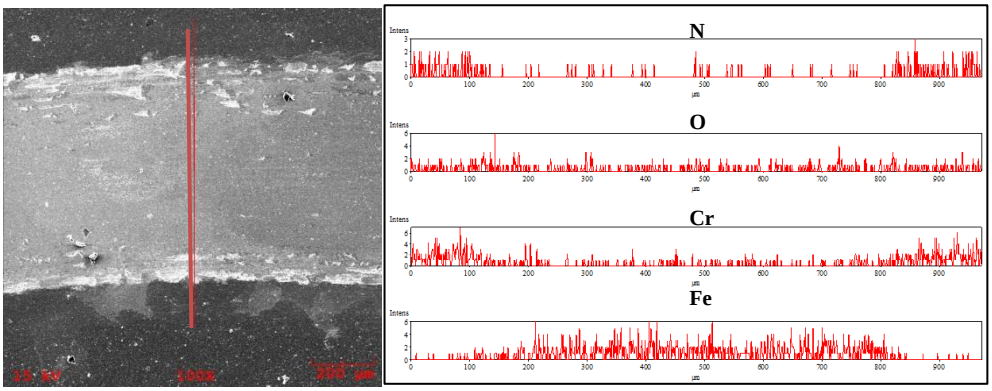
(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.53. a) ve b) 7102 kodlu numuneye ait, c) ve d) 7152 kodlu numuneye ait aşınma izinin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



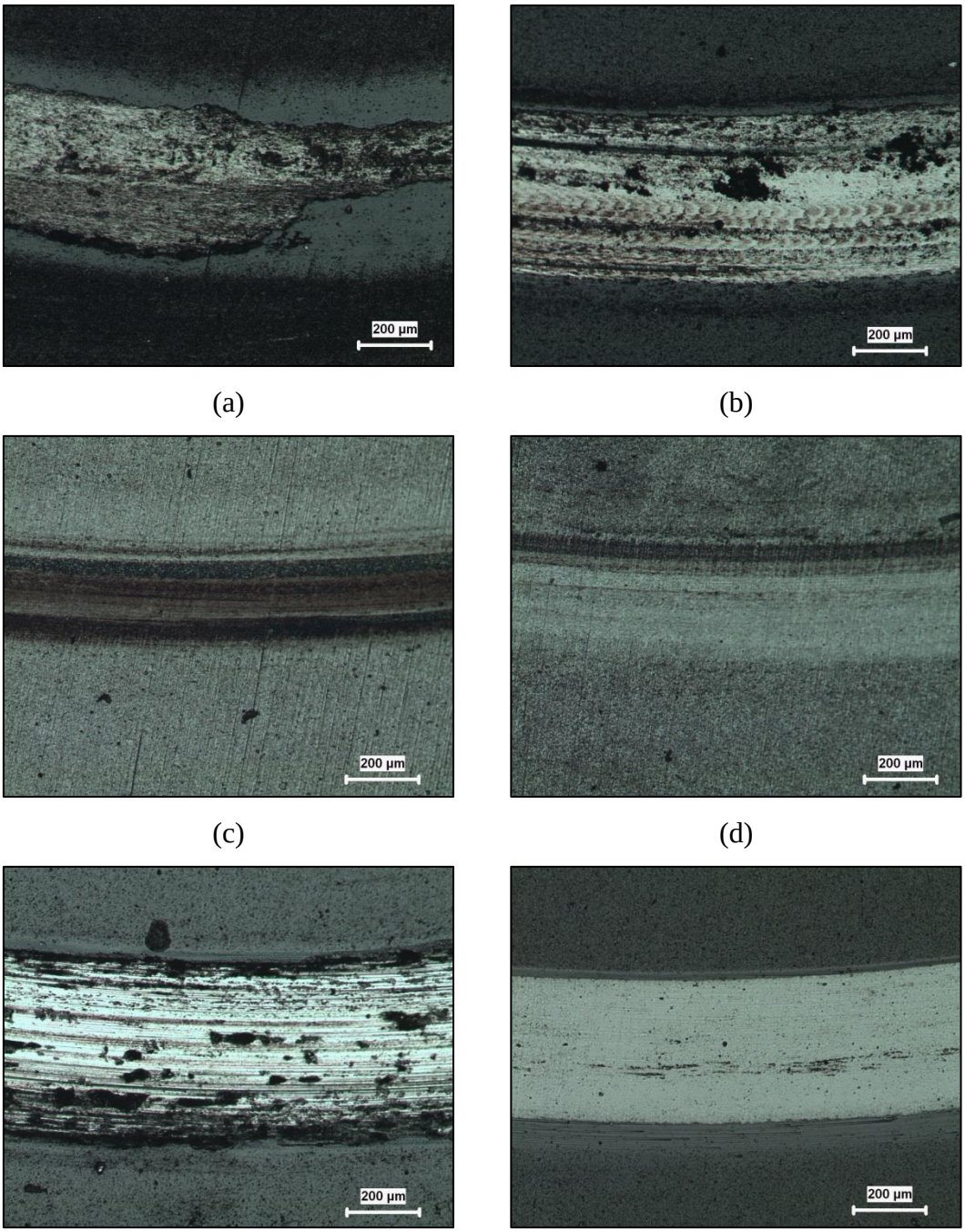
(a) (b)



(c) (d)

Şekil 4.54. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası a) 7102 numunesinin aşınma izine ait çizgi analizin gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgi analiz sonucu**,** c) 7152 numunesinin aşınma izine ait çizgi analizin gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, d) çizgi analiz sonucu

Şekil 4.55 ve Şekil 4.56 kaplanmış 1.2999 takım çeliklerinin aşınma testleri sonrası yüzey görüntülerini göstermekte olup, yüzeyler kaplanmış 1.2343 ve 1.2367 takım çeliklerine benzer aşınma özellikleri sergilemektedir. Isıl işlemi takiben yapılan kaplamaların aşınma yüzeylerinde belirgin abrasif izler gözlenmiştir. Ancak nitrasyonu takiben kaplanmış takım çeliklerinin aşınma yüzeyleri, yüzey pürüzlülüğü giderilmiş görünümdedir (Şekil 4.55). Şekil 4.56'da verilen SEM görüntüleri nitrasyonu takiben CrN/AlTiN kaplanmış numunenin aşınma yüzeyinde aşınmanın yüzeysel olduğunu göstermektedir. Yüzeysel aşınma Şekil 4.26'da verilen profilometrik ölçümlerde de belirgin bir şekilde görülmüştür. Şekil 4.57'de 9153 numunesinin çizgi spektrumu bu yüzeysel aşınmanın gerçekleştiğini CrN tabakasının ortaya çıkmasıyla göstermektedir.

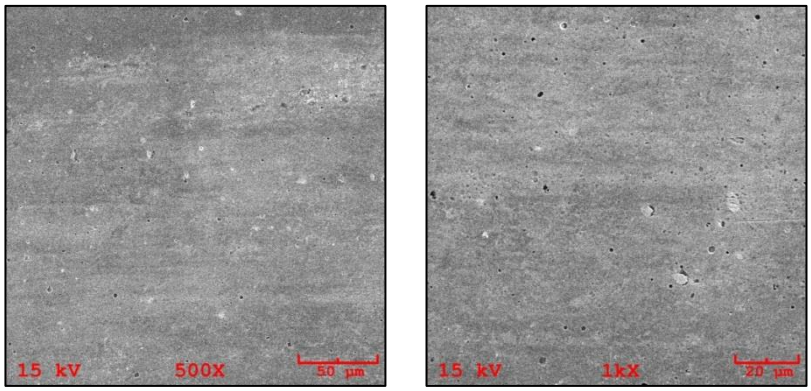


(a) (b)

(c) (d)

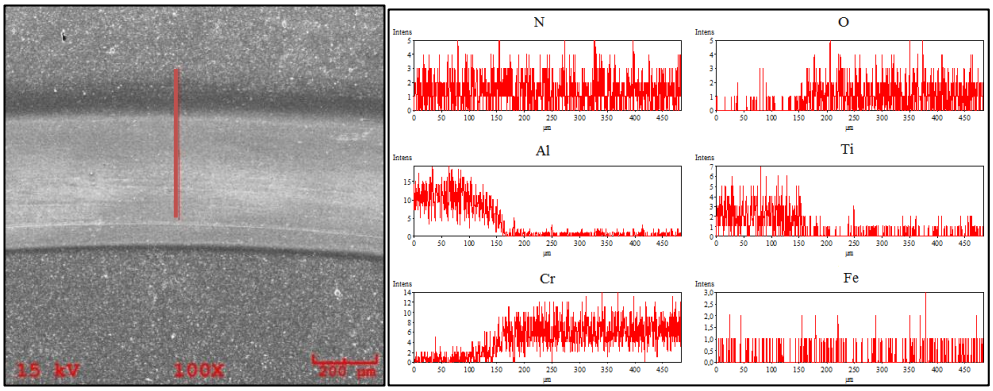
(e) (f)

Şekil 4.55. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası kaplanmış 1.2999 numunelerin aşınma yüzeylerine ait IM görüntüleri;a) 9101, b) 9151, c) 9102, d) 9152, e) 9103, f) 7153



(a) (b)

Şekil 4.56. 9153 numunesinin aşınma izine ait farklı büyütmelerde SEM görüntüleri



(a) (b)

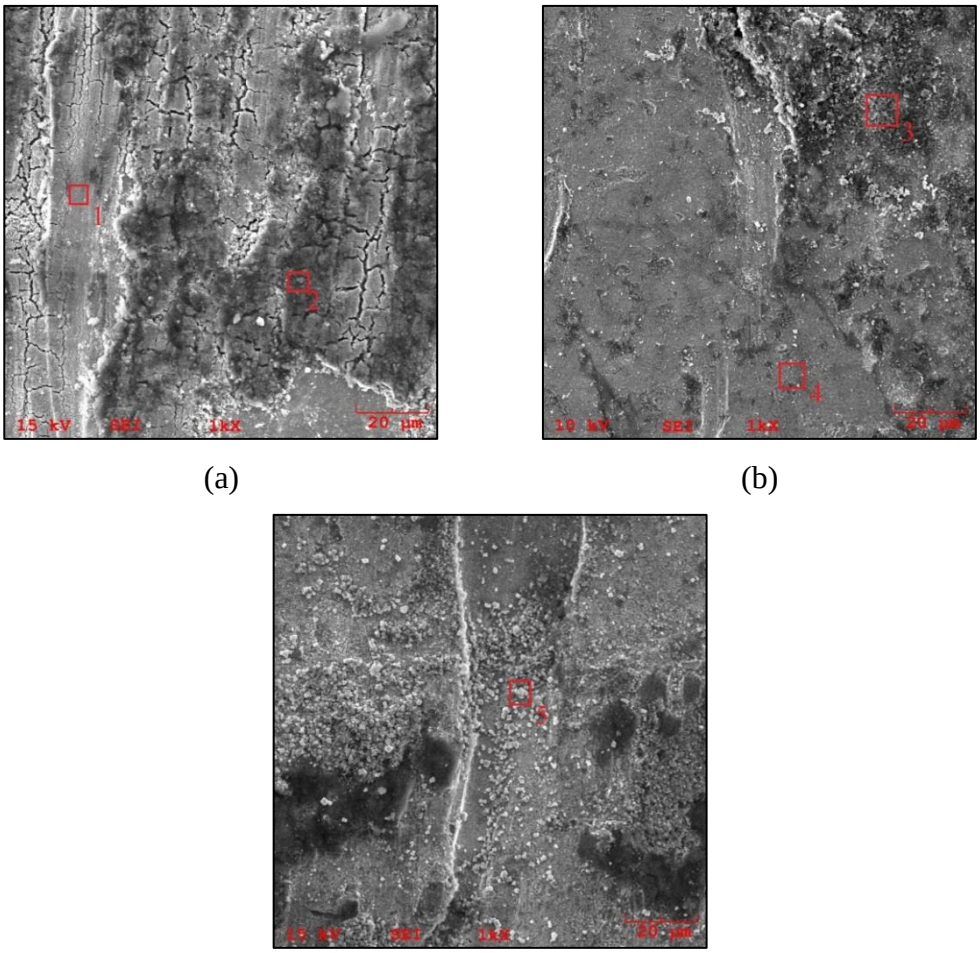
Şekil 4.57. Al_2O_3 ile yapılan aşınma testi sonrası nitrasyon/CrN/AlTiN kaplanmış 9153 kodlu numunenin yüzeyinde elde edilen aşınma izinin a) çizgisel analizin gerçekleştirildiği SEM görüntüsü, b) çizgisel analiz sonucu

4.4.2. Sıcak aşınma

Sıcak iş takım çelikleri aluminyum ekstrüzyonunda kalıp malzemesi olarak tercih edilen çeliklerdir. Tez çalışması kapsamında seçilen 1.2343, 1.2367 ve 1.2999 çelikleri çoğunlukla bu amaçla kullanılır ve bu çelikler endüstriyel üretim koşullarında yaklaşık 400 – 500 °C aralığında iş görür. Konvansiyonel ısıl işlemi takiben yapılan yüzey işlemleri bu malzemelerin pratikte çoğunlukla karşılaştıkları aşınma problemini azaltabilmektedir. Bu bölümde SEM incelemeleri ile sıcak iş takım çeliklerinin 450 °C'de yapılan aşınma testleri sonrası aşınma karakteristikleri yorumlanmıştır.

Şekil 4.58 konvansiyonel olarak ısıl işlemlenmiş sıcak iş takım çeliklerinin yüksek sıcaklık testleri sonrası yüzey görüntüleri verilmiştir. Koruma atmosferin olmaması ve sıcaklığın etkisi ile oksidasyon tabakasının varlığı tüm görüntülerde gözlenmektedir. Şekil 4.58a'da 1.2343 çeliğinin yüzeyinde iç içe geçmiş, kırılmış oksit ve sürtünme nedeniyle yüzeye yapışmış aluminyum alaşımı içerikli tabakalar gözlenmektedir. SEM görüntüsü yoğun çatlak içeren ve kırılmış tabaka yapısını göstermektedir. Şekil 4.58b'de verilen aşınma yüzey görüntüsü 1.2367 çeliğine ait olup yüzey tipik oksit tabakaları içermektedir. Yüzeyde aynı zamanda derin abrasif çizilmeler vardır. Bu çizilmeye yüksek sertlikte bir bileşen neden olmuş olabilir. Benzer incelemeler 1.2999 çeliğine de yapılmış olup Şekil 4.58c'de verildiği üzere yüzey oksit tabakaları ve partikülleri ile abrasif çizilmeler içermektedir. Tablo 4.15'te yüzeyde görülen tabaka/partikülün alansal/noktasal elementel EDS analizleri verilmiştir.

Sıcak aşındırılmış takım çeliklerinin aynı zamanda tribolojik etkileşime maruz kalan kesitleri metalografik olarak hazırlanmış ve SEM ile incelenmiştir. Şekil 4.59a-f'de gösterildiği üzere çelikler farklı derecede plastik akış sergilemişlerdir. Plastik davranış, en düşük sertliğe sahip olan 1.2343 çeliğinde daha yüksek sertlikte olanlara kıyasla, aşınma yüzeyinin altında geniş bir aralıkta daha yoğundur. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış çeliklerden 1.2999 çeliği 1.2367 çeliğine göre sıcak aşınma testi öncesinde daha düşük sertliğe sahip olmasına rağmen test sıcaklığında temperleme etkisinin devam etmesi nedeniyle ikincil sertliğe ulaşarak test sonrasında en yüksek sertliğe sahip olmuştur (Şekil 4.59g). Sertlik artışı nedeniyle 1.2999 çeliği 1.2367 çeliğine göre aşınma yüzeyinin altında daha az plastik davranış sergilemiştir.Bu tür bir davranış Bölüm 4.3.2'de verilen mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değişim diyagramlarında neden 1.2999 çeliğinin daha düşük sürtünme katsayısı aralığında olduğunun kanıtıdır.



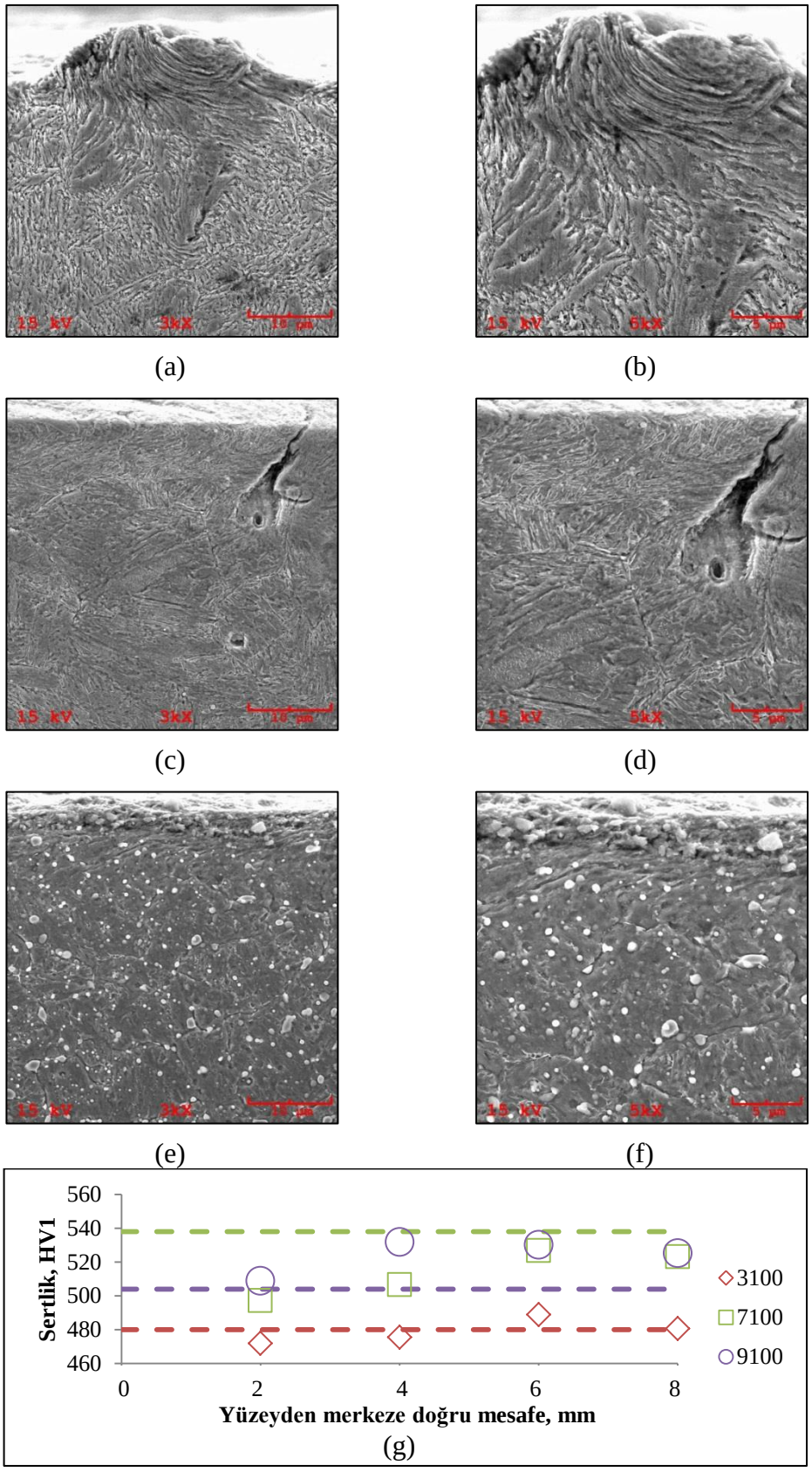
(a) (b)

(c)

Şekil 4.58. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelere ait sıcak aşınma sonrası alansal EDS analizlerinin alındığı yüzey görüntüleri a) 3100, b) 7100, c) 9100

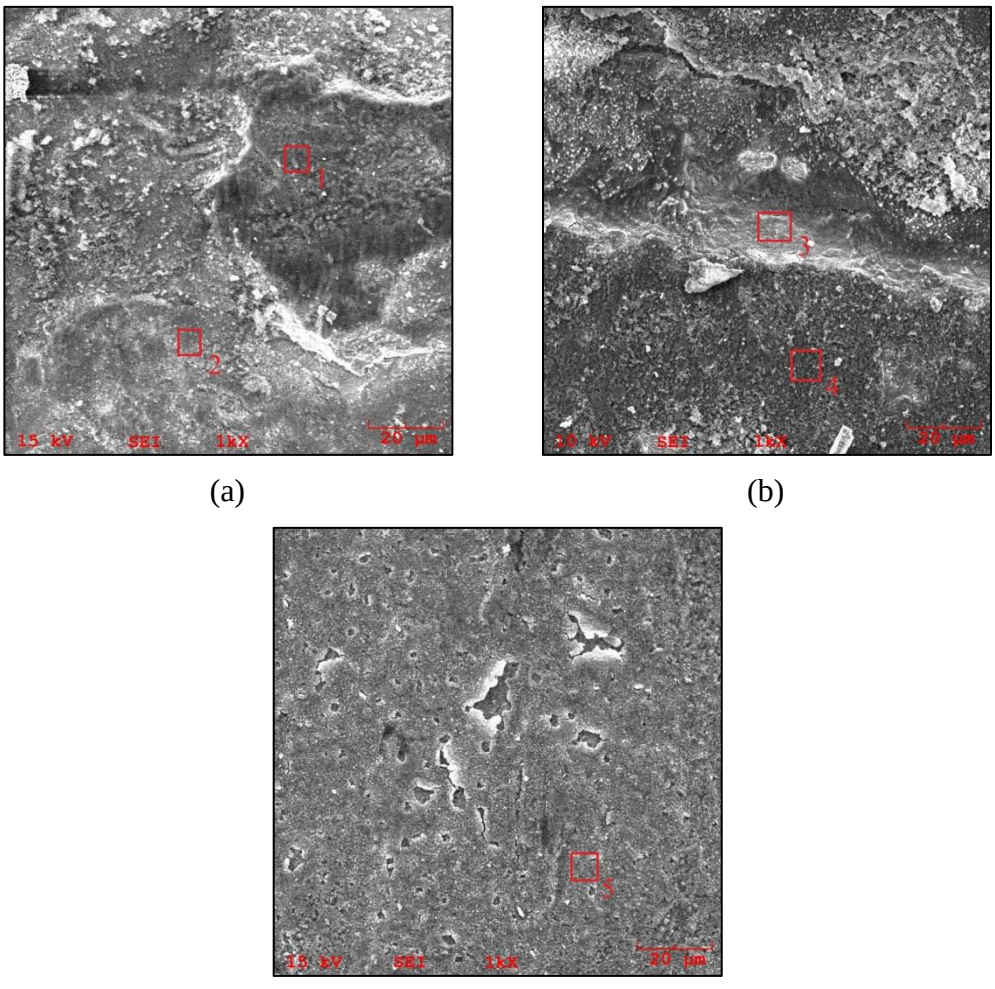
Tablo 4.15. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelere ait EDS spektrum sonuçları (ağ. %)

Numune kodu	Analiz noktası	Fe	Cr	O	Mg	Al	Si	Mo
3100	1	76,234	-	16,809	1,407	4,280	1,270	-
	2	59,879	-	25,376	4,322	8,517	1,906	-
7100	3	25,174	2,510	38,183	13,432	19,431	1,270	-
	4	79,869	5,760	12,606	0,451	0,906	0,408	-
9100	5	73,147	0,949	16,919	0,204	0,861	0,706	7,219



Şekil 4.59. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış numunelere ait sıcak aşınma sonrası kesit görüntüleri; a) ve b) 3100, c) ve d) 7100, e) ve f) 9100, g) yüzeyden merkeze doğru sertlik değişimi

Şekil 4.60'ta nitrasyon uygulanmış takım çeliklerinin sıcak aşınma testleri sonrası yüzey görüntüleri verilmiştir. Yüzeydeki oluşumlar konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış çeliklerin yüzey karakterizasyonunda gözlemlenenlere benzerdir. Yüzeyde oksit tabakaları, sert partikülün çizmesiyle oluşan abrasif izler ve aluminyumca zengin, NaOH çözeltisi ile yüzeyden giderilememiş, tabakalar gözlenmiştir. Malzemelerin yüzeylerinde yapılan EDS analizlerinin sonuçları Tablo 4.16'da verilmiştir. Analizler hem altlık malzemenin hem karşıt malzemenin kimyasal kompozisyonunda yer alan elementlerden oluşmaktadır.



(a) (b)

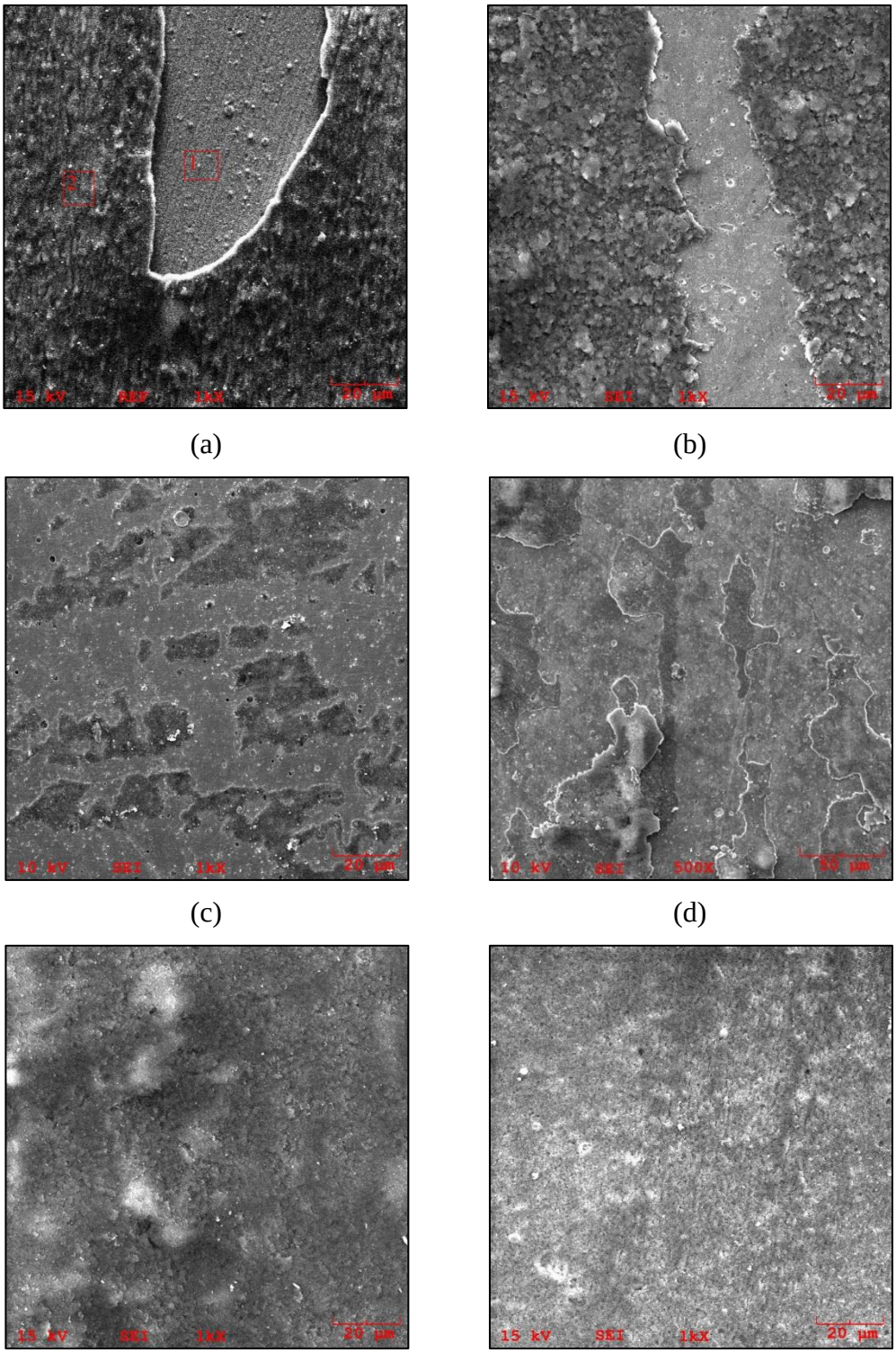
(c)

Şekil 4.60. Nitrasyon uygulanmış numunelere ait sıcak aşınma sonrası alansal EDS analizlerinin alındığı yüzey görüntüleri; a) 3150, b) 7150, c) 9150

Tablo 4.16. Nitrasyon uygulanmış numunelere ait EDS spektrum sonuçları (ağ. %)

Numune kodu	Analiz noktası	Fe	N	Cr	O	Mg	Al	Si	Mo
3150	1	39,132	-	-	34,175	8,130	16,444	2,119	-
	2	51,623	-	-	22,289	8,447	15,171	2,469	-
7150	3	46,219	-	3,023	26,297	2,360	17,980	1,602	2,520
	4	8,267	-	1,162	31,829	3,862	50,940	3,869	0,070
9150	5	66,204	2,345	5,056	23,228	-	3,167	-	-

Kaplanmış numunelerin yüzeyinde de, yüzeye göre daha koyu kontrastta olan ve karşıt aluminyum alaşımından kaynaklanan yapışma tabakaları gözlenmiştir. Şekil 4.61 seçili bazı numune yüzeylerinde var olan bu yapışma tabakalarını göstermektedir. Bu yapışma tabakaları aşınma testleri sonrası NaOH ile yapılan temizleme işlemine rağmen yüzeyde sürekli/süreksiz olarak yer almaktadır. Tablo 4.17'de verilen EDS spektrum değerleri kaplama üzerindeki yapışma tabakasına ait elementleri içermektedir. Bu yapışma tabakaları aynı zamanda AA6080 alaşımının mikroyapısında yer alan intermetalikleri de içermektedir (Şekil 4.62a ve b). Yapılan EDS çalışması bu intermetaliğin tipik Mg_2Si yapısında olduğunu göstermiştir (Tablo 4.18). Alaşım içerisinde yer alan bu intermetalikler α- Al yapısına göre daha sert olup Şekil 4.62'de gösterildiği gibi kaplama tabakasını çizebilmektedir.



(a) (b)

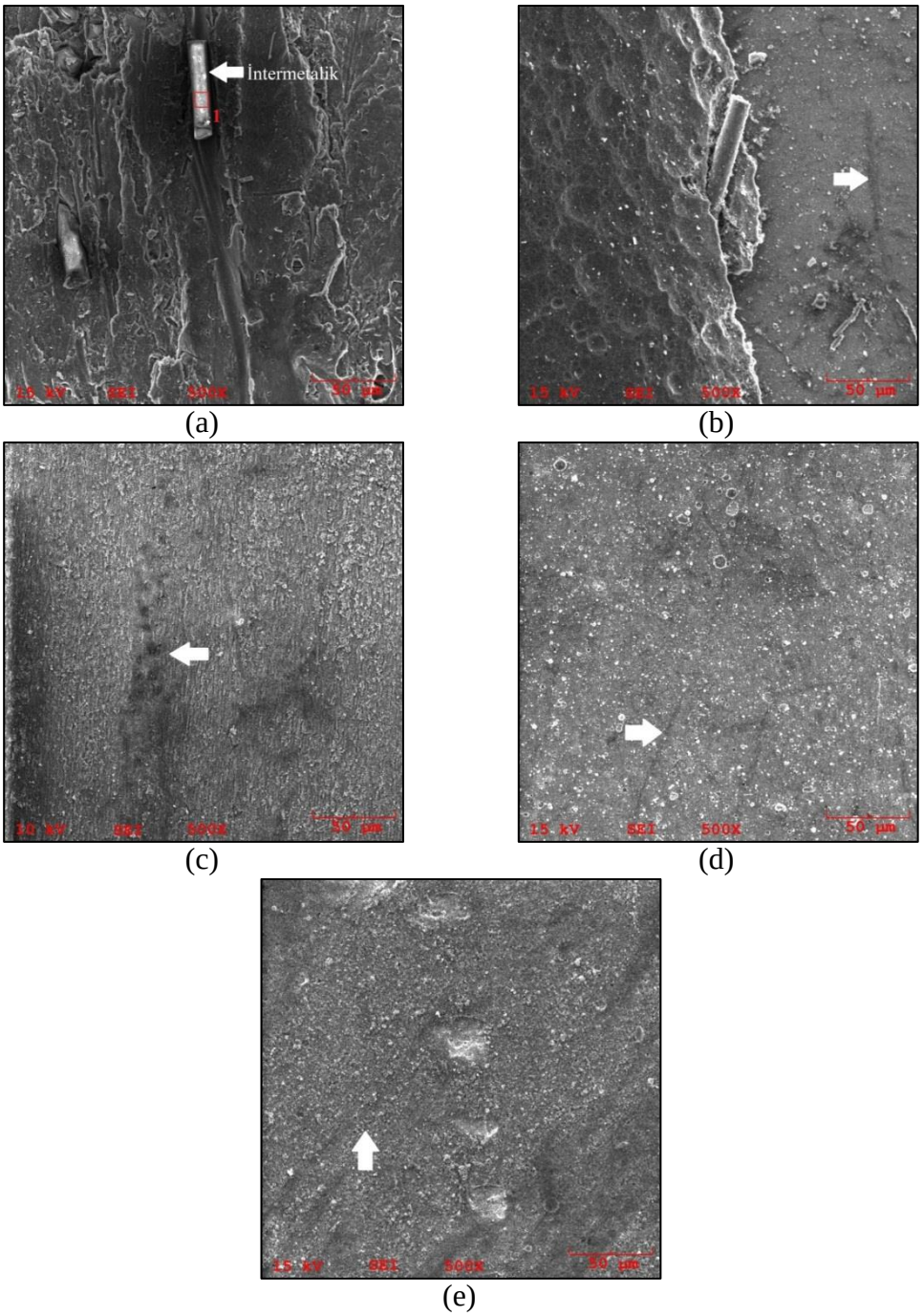
(c) (d)

(e) (f)

Şekil 4.61. Sıcak aşınma sırasında numune yüzeylerine aluminyum sıvanmasını gösteren SEM görüntüleri; a) 3152, b) 3103, c) 7152 d) 7153, e) 9102, f) 9103

Tablo 4. 17. Şekil 4.61a'da verilen görüntüye ait EDS spektrum sonuçları (ağ. %)

Analiz noktası	Cr	N	O	Al	Mg	Si
1	80,211	12,077	5,145	1,753	0,678	0,136
2	-	-	43,200	36,398	20,072	0,330



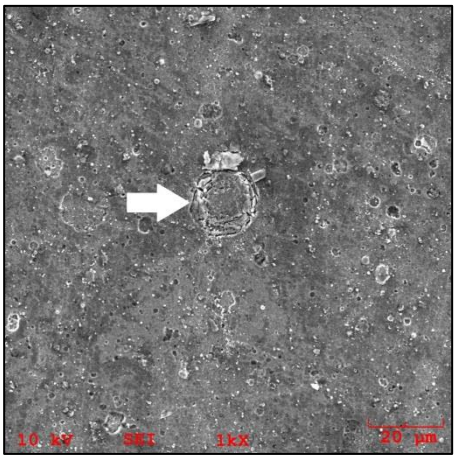
Şekil 4.62. Sıcak aşınma sırasında kaplama yüzeylerinde intermetalik nedenli oluşan çizilmeyi gösteren SEM görüntüleri; a) AA6080 alaşımı ile kaplanmış 7100 yüzeyi ve intermetalikler, b) 3102, c) 3152, d) 7151, e) 9151

Tablo 4.18. Şekil 4.62a'da verilen intermetaliğe ait EDS spektrum sonuçları (ağ. %)

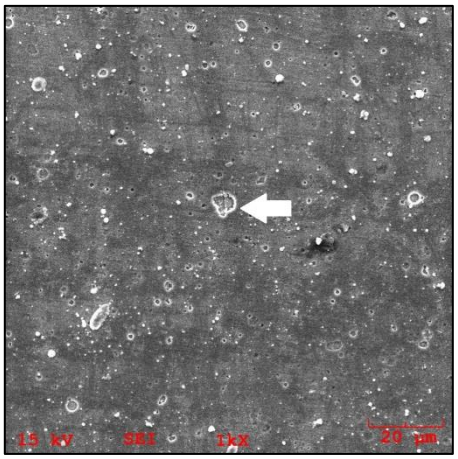
Analiz noktası	Al	Mg	Si	O
1	33,820	5,938	17,383	42,859

Şekil 4.63'te ısıl işlemi ve nitrasyonu takiben kaplanmış çeliklerin yüzeylerinde meydana gelen hasar yöreleri ok uçları ile gösterilmiştir. Şekil 4.63a, b ve Şekil 4.63c, d'de görüldüğü üzere hem 1.2343 hem de 1.2367 çeliklerinde kaplama tabakasının yer yer ayrıştığı gözlenmiştir. Bu ayrışma ağırlıklı olarak kaplamanın doğası gereği yüzeyde var olan dropletlerin arayüzeyleri boyunca gerçekleşmiştir. Bu hasar 1.2999 çeliğinde de benzer olarak gözlenmiştir (Şekil 4.63e).

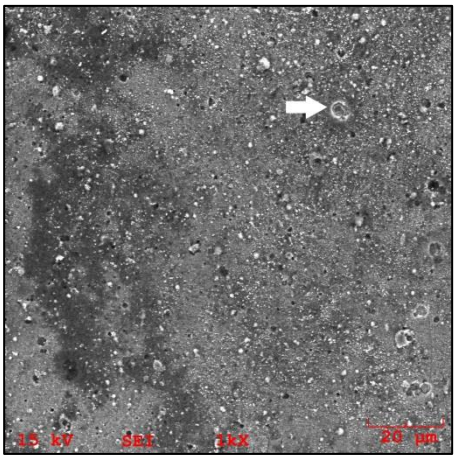
Tribolojik etkileşimlerde sert kaplama yapısının kararlılığı aşınma direnci açısından önemlidir. Bu kaplama yapısının çatlamadan yüzeyi koruması bu dirence katkı sağlar. Şekil 4.64'te görüldüğü gibi yüzeylerdeki kaplama yapıları çatlayarak hasara uğramıştır.



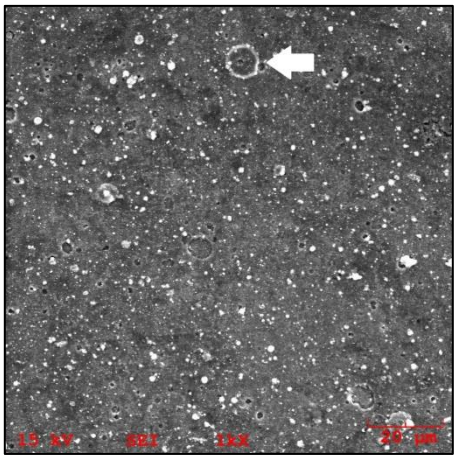
(a)



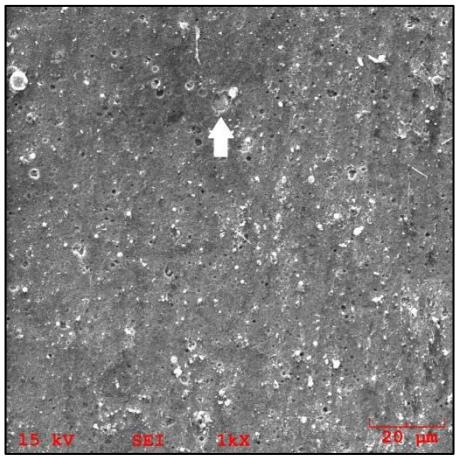
(b)



(c)

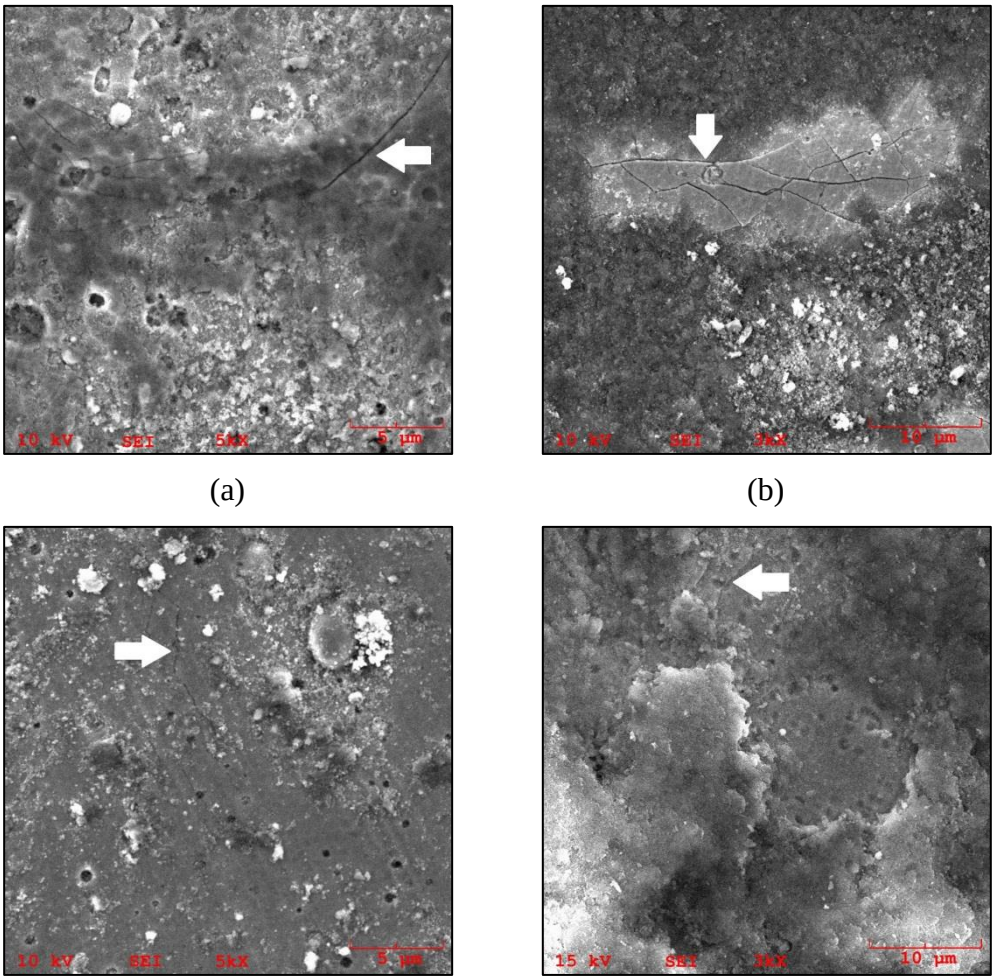


(d)



(e)

Şekil 4.63. Sıcak aşınma sırasında kaplama yüzeylerinde oluşan droplet ayrışmasını gösteren SEM görüntüleri a) 3101, b) 3153, c) 7101, d) 7151, e) 9103



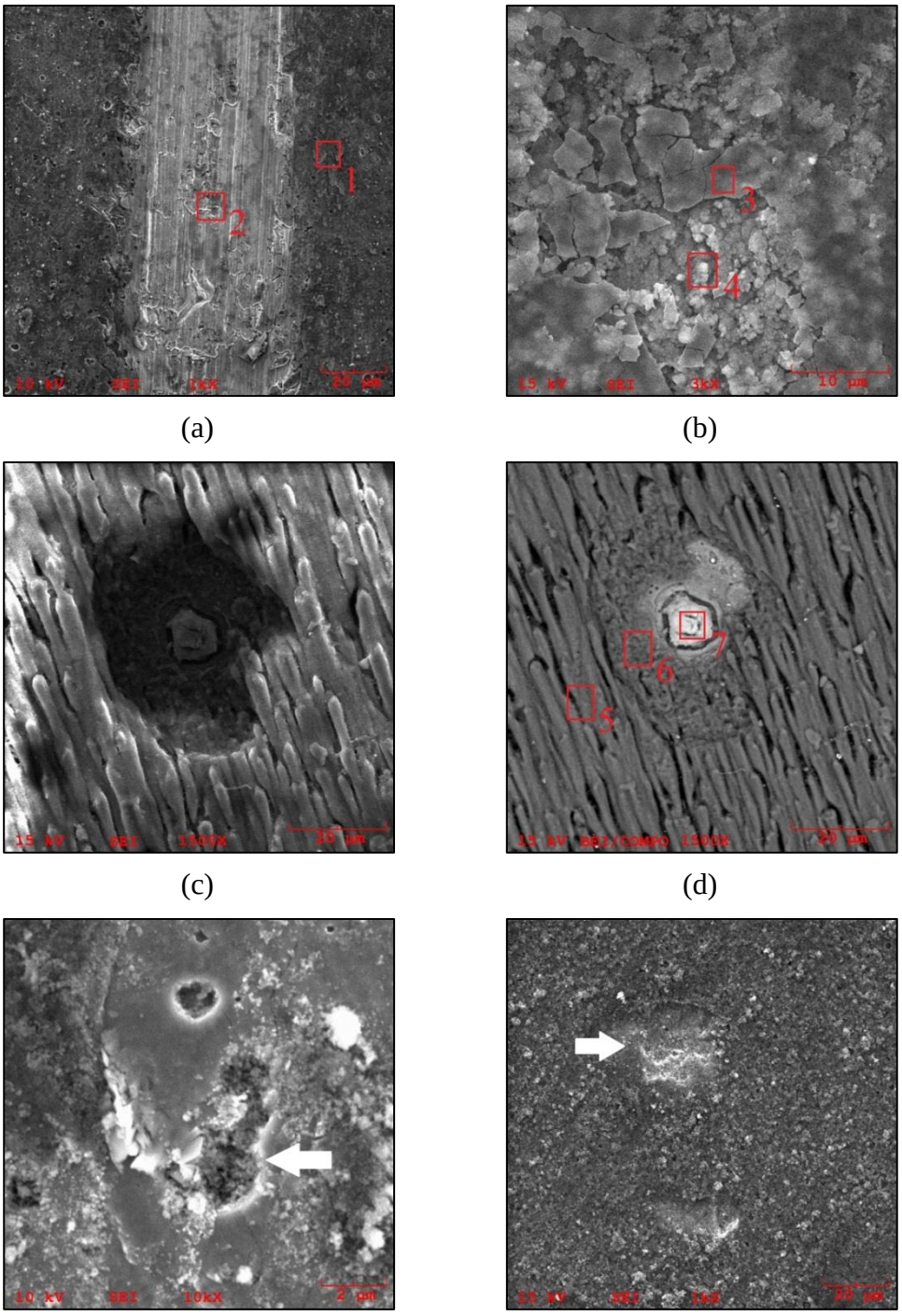
(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.64. Sıcak aşınma sırasında oluşan kaplama çatlaklarını gösteren SEM görüntüleri a) 3101, b) 7102, c) 7103, d) 9102

Aşınma testleri sonrası kaplanmış yüzeylerde kaplama yapısının tamamen ayrıştığı bölgeler de gözlenmiştir. Şekil 4.65a'da 3101 numunesinin yüzeyinde abrasif bir iz boyunca kaplama yapısının hasara uğradığı örneklenmiştir. Açık kontrastta görülen abrasif iz üzerinden alınan EDS spektrum sonuçları Tablo 4.19'da verilmiş olup sonuçlar altlık malzemeye ait elementleri içermektedir. Kaplamanın ayrışmasına yönelik iyi bir örnek Şekil 4.65b'de verilmiştir. Kaplama tabakasının farklı alanlarında yapılan EDS çalışmaları kaplamanın tribolojik etkileşimde işlevselliğini yitirdiğini göstermektedir (Tablo 4.19). Sıvanan tabakanın hemen altında 7101 numunesinde gerçekleşen kaplama ayrışması Şekil 4.65c'de verilmiştir. Şekil 4.65d'de verilen görüntü Şekil 4.65c'de verilen bölgeye ait olup bu bölge ikincil elektronlarla görüntüleme (topografik kontrast) yerine geri saçılmış elektronlarla (materyal kontrast) görüntülenmiştir.Bu bölgenin farklı alanlarında yapılan EDS

çalışmaları yüzeyde aluminyum sıvanmasının yanında kaplama yapısında meydana gelen hasarı da kanıtlamaktadır (Tablo 4.19). Yüzeyde meydana gelen kaplama ayrışmasına ait örneklemeler 7103 ve 9151 numuneleri için de verilmiştir. Bu kaplama ayrışmaları her iki numune için verilen SEM görüntülerinde ok ucu ile gösterilmiştir (Şekil 4.65e ve f).



(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

Şekil 4.65. Sıcak aşınma sırasında oluşan kaplama ayrışmasını gösteren SEM görüntüleri a) 3101, b) 3151, c) ve d) 7101, e)7103, f) 9151

Tablo 4.19.Şekil 4.65a, b ve c' de verilen numune yüzeylerine ait EDS spektrumsonuçları (ağ. %)

Numune kodu	Analiz noktası	Al	Ti	N	Fe	O	Mg	Diğer elementler
3101	1	37,543	26,520	15,237	9,226	8,594	-	2,880
	2	1,136	1,061	-	86,452	2,056	-	9,295
3151	3	29,932	4,287	-	32,106	33,675	-	-
	4	34,515	14,963	-	16,341	34,181	-	-
7101	5	36,401	-	-	-	42,982	19,971	0,646
	6	46,862	11,095	0,275	1,735	32,588	7,330	0,113
	7	4,269	2,737	-	57,396	25,747	0,734	9,117

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ısıl işlem, nitrasyon ve PVD kaplama uygulanmış 1.2343, 1.2367 ve 1.2999 sıcak iş takım çeliklerinin oda sıcaklığında ve 450 °C'de aşınma davranışları incelenmiştir. Oda sıcaklığında yapılan testlerde 100Cr6 çelik bilya ve Al_2O_3 seramik bilya aşındırıcı olarak seçilmiştir. 450 °C'de yapılan aşınma testlerinde ise karşıt yüzey olarak AA6080 alaşımı kullanılmıştır.

Konvansiyonel ısıl işlem uygulamalarısonrası tüm sıcak iş takım çeliklerinin temper martenzitik matrikse sahip olduğu gözlenmiştir. En yüksek alaşım elementi içerikli 1.2999 çeliği en yoğun alaşım karbür dağılımına sahip iken, 1.2367 çeliğinde daha az miktarda ve daha ince karbür dağılımı gözlenmiştir. 1.2343 çeliğinde ise belirgin olarak alaşım karbürü gözlenmemiştir (Şekil 4.1). Sertlik değerleri kıyaslandığında en yüksek sertliğe 1.2367 çeliği sahip olup 1.2343 çeliği en düşük sertlik değerine sahiptir (Tablo 4.8). Yüksek alaşım içeriğine rağmen 1.2999 çeliğinin en yüksek sertlik göstermemesinin nedeni proses koşullarından kaynaklanmaktadır.

Nitrasyon işlemi ile yüzeyde tipik beyaz tabaka ve bu tabakanın hemen altında difüzyon tabakası gözlenmiştir (Şekil 4.2). Bu işlem ile malzemelerin yüzey sertlikleri daha da arttırılmış olup sertlik sıralaması konvansiyonel ısıl işlem uygulaması sonrası belirlenen sertlik sıralamasına benzerdir (Tablo 4.8).

PVD kaplamalar ısıl işlem sonrasında çelik yüzeye ve nitrasyon işlemi sonrasında difüzyon tabakası üzerine uygulanmıştır. Tüm çelik yüzeylerine uygulanan CrN, AlTiN tek kaplamalar ve CrN/AlTiN çift kaplamaların kalınlığı yaklaşık 2 µm seviyesindedir (Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8). Yapılan kaplamalar hem konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış olanlara hem de nitrasyon uygulanmış olanlara göre daha yüksek yüzey sertlikleri sağlamıştır. Isıl işlemi takiben yapılan kaplamaların sertlik artışı sırası ile CrN, AlTiN, CrN/AlTiN şeklindedir. Nitrasyonu takiben yapılan kaplamalar daha da sert olup benzer bir

sıralama göstermiştir. Tüm bu sıralamalar göz önüne alındığında çift kaplama ile çeliklerin yüzey sertlikleri en yüksek seviyeye ulaşmıştır (Tablo 4.8).

Kuru sürtünme testleri sonrası 100Cr6 bilyanın konvansiyonel ısıl işlemuygulanmış ve nitrasyon uygulanmış çelikleri doğrudan aşındırdığı tespit edilmiştir. Ancak çelik bilya kaplanmış numuneleri aşındıramamış kendisi aşınarak yüzeye yapışmıştır. Bilyanın hacim kaybı üzerinden hesaplanan aşınma hız verileri bilyanın nitrasyon uygulanmış çeliklerle olan tribolojik etkileşimde konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış olanlara göre daha yüksek derecede aşındığını göstermiştir. Bu aşınma derecesi kaplanmış çeliklerde daha da artmıştır. Nitrasyonu takiben yapılan çift kaplamalar en yüksek aşınma hız verilerini ortaya koymuştur (Tablo 4.9, Tablo 4.10 ve Tablo 4.11). Çelik bilya ile yapılan testler aşınma direncinin malzemenin yüzey sertliğine bağlı olduğunu ve sertlik arttıkça aşınma direncinin arttığını göstermiştir. Yüzeyde var olan yapışmalar nedeniyle elde edilen sürtünme katsayı değerleri sertlik ile beklenen doğrusal ilişkiyi göstermemektedir. Bunun nedeni ise bilya çelik yüzeyden ziyade yapışma tabakası ile tribolojik etkileşimdedir.

Çelik bilyanın yüksek sertlikteki yüzeylere karşı yapışma göstermesinden dolayı, kuru sürtünme testlerinde daha sert olan seramik bilya kullanılmıştır. Aşınma hız verileri seramik bilyanın malzeme yüzeyinde oluşturduğu izler kullanılarak belirlenmiş olup konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış çeliklerin sadece nitrasyon uygulanmış ve kaplanmış çeliklere göre aşınma direncinin oldukça düşük olduğunu göstermiştir (Tablo 4.12, Tablo 4.13, Tablo 4.14). Yüzeylerin aşınma derecesi profilometrik ölçümlerle de değerlendirilmiş olup hız verileri ile saptanan derecelendirme ile uyumludur (Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.24 ve Şekil 4.26). Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış olan çeliklerde aşınma direnci üzerine matriks sertliğinin yanı sıra var olan alaşım karbürlerinin etkisi de gözlenmiştir. Daha sert olan 1.2367 çeliği daha yumuşak olan 1.2343 çeliğine göre daha düşük sürtünme katsayısına ve aşınma hızına sahiptir. Daha yoğun alaşım karbürü içeren 1.2999 çeliği 1.2367 çeliğine göre daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir, düşük sertliğinden dolayı daha çok aşınmıştır. Nitrasyon işlemi tüm çeliklerin konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış olanlarına göre daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma hızı göstermiştir (Tablo 4.12, Tablo 4.13, Tablo 4.14). Kaplanmış numunelerin sürtünme katsayısı ve aşınma hız verileri değerlendirildiğinde yüzey

sertliğinin belirgin etkisi ortaya çıkmıştır. Yüzey sertliği arttıkça aşınma hacim kaybı ve dolayısıyla aşınma hızı azalırken, sürtünme katsayıları artmıştır. Bu artışın nedeni ise sertlik ile birlikte kayma gerilmesindeki artışın temas alanındaki azalmaya göre daha yüksek olmasıdır.

Sıcak aşınma testleri sonrası elde edilen sürtünme katsayı değişim aralıkları kuru sürtünme test sonuçlarına göre daha yüksek değerde olup 1'den fazladır. Test sıcaklığı daha yumuşak karşıt malzeme olan AA6080 alaşımının numune yüzeylerine sıvanmasına olanak vermiştir. Bu ise yüksek sürtünme katsayı değerlerine neden olmuştur. Konvansiyonel ısıl işlem uygulanmış çeliklerin kesit incelemeleri, 450 °C'deki sürtünme katsayı değerlerindeki değişimlerin açıklanmasına katkı sağlamıştır. Matrikslerin plastik deformasyon kabiliyetleri göz önüne alındığında daha kararlı bir mikroyapıya sahip olan 1.2999 çeliğinin neden en düşük sürtünme katsayısına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Nitrasyon uygulanmış çelikler arasında 1.2343 çeliğine göre daha sert olan 1.2367 ve 1.2999 çelikleri beklenildiği üzere daha düşük sürtünme katsayı değişim aralıkları göstermiştir. Kaplanmış yüzeyler ile yapılan çalışmalarda sertliğin sürtünme katsayısı üzerine etkisini ortaya koymuş olup artan sertlik ile birlikte daha düşük sürtünme katsayı değerleri elde edildiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32).

Aşınma testleri sonrası yapılan yüzey incelemeleri kuru sürtünme koşullarında test edilmiş numunelerde tipik abrasif izler ile yapışma tabakalarının varlığını göstermiştir (Şekil 4.33). Çelik bilya ile olan etkileşimde özellikle numune yüzey sertliğinin artması ile yapışma tabakalanmasının arttığı gözlenmiştir. Bu yapışma tabakaları çoğunlukla çelik bilyanın aşınması ile oluşmuştur (Şekil 4.34). Seramik bilya ile olan tribolojik etkileşimde yapışma tabakası aşındırıcı bilyadan ziyade altlık malzemenin aşınması ile oluşmuştur.

Sıcak aşınma testleri sonrasında da yapılan yüzey incelemelerinde çoğunlukla AA6080 alaşımının malzeme yüzeylerine sıvandığı tespit edilmiştir (Şekil 4.61). Yüzeylerde bu sıvanmanın yanı sıra çizilme Şekil (Şekil 4.62), droplet ayrışması (Şekil 4.63), kaplama çatlaması (Şekil 4.64) ve ayrışması (Şekil 4.65) gibi hasarlar da gözlenmiştir.

Tez çalışması kapsamında yapılan tüm çalışmalar nitrasyon işlemini takiben yapılan çift kaplamalar ile sıcak iş takım çeliklerinin farklı tribolojik etkileşimlerinde en iyi aşınma direnci sergilediğini göstermiştir. Bu tür bir ısıl ve yüzey işlem prosedürü sıcak iş takım çeliklerine tribolojik etkileşimlerinde yüksek yük taşıma kapasitesi sağlayarak aşınma performanslarını geliştirmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Roberts G., Krauss G., Kennedy R., *Tool steels*, 5th ed., ASM International, Materials Park, Ohio, 1998.

[2] Bauser M., Sauer G., Siegert K., *Extrusion*, 2nd ed., ASM International, Materials Park, Ohio, 2006.

[3] ASM International Handbook Committee, *Properties and selection: irons, steels and high performance alloys*, ASM Handbook, Vol. 1, ASM International, Materials Park, Ohio, 1993.

[4] Davis J. R., *Tool Materials*, ASM Specialty Handbook, ASM International, Materials Park, Ohio, 1995.

[5] Totten G. E., *Steel heat treatment handbook*, 2nd ed., Taylor & Francis Group, London, 2006.

[6] Chandler H, *Heat treaters guide: practices and procedures for irons and steels*, 2nd ed., ASM International, Ohio, 1995.

[7] Prabhudev K. H., *Handbook of heat treatment of steels*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1992.

[8] ASM International Handbook Committee, *Heat treating*, ASM Handbook, Vol. 4, ASM International, Materials Park, Ohio, 1991.

[9] Krauss G., *Steels processing, structure and performance*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2005.

[10] Pye D., *Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2003.

[11] Davis J. R., *Surface hardening of steels*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2002.

[12] Mellor B. G., *Surface coatings for protection against wear*, Woodhead Publishling Limited, Cambridge, 2006.

[13] ASM International Handbook Committee, *Surface Engineering*, ASM Handbook, Vol. 5, ASM International, Materials Park, Ohio, 1994.

[14] Davis J. R., *Surface engineering for corrosion and wear resistance*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2001.

[15] ASM International Handbook Committee, *Friction, lubrication and wear technology*, ASM Handbook, Vol. 18, ASM International, Materials Park, Ohio, 1992.

[16] Holmberg K., Matthews A., *Coatings tribology, properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering*, 2nd ed., Elsevier, Oxford, 2009.

[17] Birol Y., Sliding wear of CrN, AlCrN and AlTiN coated AISI H13 hot work tool steels in aluminium extrusion, *Tribology International*, 2013, **57**, 101-106.

[18] Birol Y., Yüksel B., Performance of gas nitrided and AlTiN coated AISI H13 hot work tool steel in aluminium extrusion, *Surface & Coatings Technology*, 2012, **207**, 461-466.

[19] Hardell J., Prakash B., Tribological performance of surface engineered tool steel at elevated temperature, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2010, **28**, 106-114.

[20] Adamiak M., Dobrzanski L. A., Microstructure and selected properties of hot work tool steel with PVD coatings after laser surface treatment, *Applied Surface Science*, 2008, **254**, 4552-4556.

[21] Dobrzanski L. A., Polok M., Panjan P., Bugliosi S., Adamiak M., Improvement of wear resistance of hot work steels by PVD coating deposition, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **155-156**, 1995-2001.

[22] Pellizzari M., High temperature wear and friction behaviour of nitrided, PVD-duplex and CVD coated tool steel against 6082 Al alloy, *Wear*, 2011, **271**, 2089-2099.

[23] http://www.eksenal.com/index-en.html, (Ziyaret Tarihi: 05 Temmuz 2014).

[24] Bhadeshia H. K. D. H., Honeycombe R. W. K., *Steels microstructure and properties*, 3rd ed., Elsevier, Oxford, 2006.

[25] Tracton A. A., *Coatings technology handbook*, 3rd ed., Taylor & Francis Group , Boca Raton, 2006.

[26] Martin P. M., *Handbook of deposition technologies for films and coatings*, 3rd ed., Elsevier, Oxford, 2010.

[27] Mattox D. M., *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, 2nd ed., Elsevier, Oxford, 2010.

[28] http://www.physik.uni-kl.de/hillebrands/research/methods/molecular-beam-epitaxy/,(Ziyaret Tarihi: 08 Temmuz 2014)

[29] Suresha S. J., Bhide R., Jayaram V., Biswas S. K., Processing, microstructure and hardness of TiN/(Ti,Al)N multilayer coatings, *Materials Science and Engineering A*, 2006, **429**, 252-260.

[30] Dobrzánski L. A., Polok M., Adamiak M., Structure and properties of wear resistance PVD coatings deposited onto X37CrMoV5-1 type hot work steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **164-165**, 843-849.

[31] Polcar T., Parreira N. M. G., Novák R., Friction and wear behaviour of CrN coating at temperatures up to 500 °C, *Surface & Coatings Technology,* 2007,**201**, 5228-5235.

[32] Mo J. L., Zhu M. H., Leyland A., Matthews A., Impact wear and abrasion resistance of CrN, AlCrN and AlTiN PVD coatings, *Surface & Coatings Technology*, 2013, **215**, 170-177.

[33] Rodríguez R. J., García J. A., Medrano A., Rico M., Sánchez R., Martínez R., Labrugère C., Lahaye M., Guette A., Tribological behaviour of hard coatings deposited by arc-evaporation PVD, *Vacuum*, 2002, **67**, 559-566.

[34] Mo J. L., Zhu M. H., Tribological oxidation behaviour of PVD hard coatings, *Tribology International*, 2009, **42**, 1758-1764.

[35] Aihua L., Jianxin D., Haibing C., Yangyang C., Jun Z., Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, **31**, 82-88.

[36] Bhushan B., *Modern tribology handbook, principles of tribology*, Vol. 1., CRC Press, Boca Raton, 2001.

[37] Gahr K. H. Z., *Microstructure and wear of materials*, Elsevier, New York, 1987.

[38] Buckley D. H., *Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication*, Vol. 5, Elsevier, Amsterdam, 1981.

[39] Polcar T., Kubart T., Novák R., Kopecký L., Široký P., Comparision of tribological behaviour of TiN, TiCN and CrN at elevated temperatures, *Surface & Coatings Technology*, 2005, **193**, 192-199.

[40] ASTM G133-05, *Standard test method for linearly reciprocating ball-on-flat sliding wear*,ASM International, 2010.

[41] ASTM G99-05,*Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus,* ASM International, 2010.

[42] Polat Ş., Atapek Ş. H., Türedi E., Aktaş G., Wear behavior of heat treated hot work tool steels under dry sliding conditions, *MP Materials Testing-Materials and Components Technology and Application*, 2013, **55**, 163 –167.

[43] Wei M. X., Wang S. Q., Wang L., Cui X. H., Chen K. M., Selection of heat treatment process and wear mechanism of high wear resistant cast hot forging die steel, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, **19**, 50-57.

[44] Wei M. X., Wang S. Q., Wang, L., Chen, K. M., Effect of microstructure on elevated-temperature wear resistance of a hot working die steel, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2011, **18**, 47-53

[45] Koneshlou M., Asl K. M., Khomamizadeh F., Affect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel, *Cryogenics*, 2011, **51**, 55-61

[46] Wei M. X., Wang S. Q., Wang L., Cui, X. H., Chen K. M., Effect of tempering conditions on wear resistance in various wear mechanisms of H13 steel, *Tribology International*, 2011, **44**, 898-905

[47] Birol Y., Analysis of wear of a gas nitrided H13 tool steel die in aluminium extrusion, *Engineering Failure Analysis*, 2012, **26**, 203-210.

[48] Castro G., Fernández-Vicente A., Cid J., Influence of the nitriding time in the wear behaviour of an AISI H13 steel during a cranckshaft forging process, *Wear*, 2007, **263**, 1375-1385.

[49] Mo J. L., Zhu M. H., Sliding tribological behaviors of PVD CrN and AlCrN coatings against Si_3N_4 ceramic and pure titanium, *Wear*, 2009, **267**, 874-881.

[50] Eriksson J., Olsson M., Tribological testing of commercial CrN, (Ti,Al)N and CrC/C PVD coatings – Evaluation of galling and wear characteristics against high strength steels, *Surface & Coatings Technology*, 2011, **205**, 4045-4051.

[51] Vite M., Moreno-Ríos M., Gallardo Hernández E. A., Laguna-Camacho J. R., A study of the abrasive resistance of sputtered CrN coatings deposited on AISI 316 and AISI H13 steel substrates using steel particles, *Wear*, 2011, **271**, 1273-1279.

[52] Björk T., Westergard R., Hogmark S., Bergström J., Hedenqvist P., Physical vapor deposition duplex coatings for aluminium extrusion dies, *Wear*, 1999, **225-229**, 1123-1130.

[53] Rodríguez-Baracaldo R., Benito J. A., Puchi-Cabrera E. S., Staia M. H., High temperature wear resistance of (TiAl)N PVD coating on untreated and gas nitrided AISI H13 steel with different heat treatments, *Wear*, 2007, **262**, 380-389.

[54] Hoy R., Kamminga J. D., Janssen G. C. A. M., Scratch resistance of CrN coatings on nitrided steel, *Surface & Coatings Technology*, 2006, **200**, 3856-3860.

[55] Škoric B., Kakaš D., Rakita M., Bibić N., Peruškob D., Structure, hardness and adhesion of thin coatings deposited by PVD, IBAD on nitrided steels, *Vacuum*, 2004, **76**,169-172.

[56] Batista J. C. A., Godoy C., Pintaúde, G., Sinatora A., Matthews A., An approach to elucidate the different response of PVD coatings in different tribological tests, *Surface and Coatings Technology*, 2003, **174-175**, 891-898.

[57] Nanovea Series, "Ball-on-disc" Tribometer User Manuel, V1.0, *Micro Photonics Inc*., 2006.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

[1] Polat Ş., Atapek Ş. H., Türedi E., **Aktaş G.**, Wear behavior of heat treated hot work tool steels under dry sliding conditions, *MP Materials Testing-Materials and Components Technology and Application*, 2013, **55**, 163 – 167.

[2] **Aktaş G.**, Polat Ş., Atapek Ş. H., High temperature wear characteristics of surface treated AISI H11 tool steel, *6. Metallurgical Conference*, Ohrid, Macedonia, 29 May-1 June 2014.

[3] **Aktaş G.**, Polat Ş., Atapek Ş. H, Comparison of the structures, properties and wear characteristics of heat treated hot work tool steels used as die materials , *6. Metallurgical Conference*, Ohrid, Macedonia, 29 May-1 June 2014.

[4] **Aktaş G.**, Polat Ş., Atapek Ş. H., Improvement of the wear resistance of DIN 1.2367 hot work tool steel by single and duplex coating, *Euro Friction, Wear and Wear Protection Symposium*, Karlsruhe, Germany, 6-8 May 2014.

[5] **Aktaş G.**, Polat Ş., Atapek Ş. H., Investigation of the performance of nitrided, CrN coated and nitrided-CrN coated DIN 1.2343 hot work tool steels, *Euro Friction, Wear and Wear Protection Symposium*, Karlsruhe, Germany, 6-8 May 2014.

[6] **Aktaş G.**, Polat Ş., Atapek Ş. H., Wear behavior of surface treated X45MoCrV5-3-1 tool steel at room and elevated temperatures, *4. The International Advances ın Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition*, Fethiye, Turkey, 24-27 April 2014.

[7] **Aktaş G.**, Atapek Ş. H., Polat Ş., Türedi E., Investigation of heat treatment effect on the wear resistance of AISI H11 hot work tool steels, *7th International Advanced Technologies Symposium*, Istanbul, Turkey, 30 October-1 November 2013.

[8] **Aktaş G.**, Türedi E., Atapek Ş. H., Polat Ş., The effect of heat treatments on the wear behavior of AISI H11 hot work tool steel, *3rd International Conference of Engineering Against Failure*, Kos, Greece, 26-28 June 2013.

[9] **Aktaş G.**, Polat Ş., Atapek Ş. H., Türedi E., Farklı ısıl işlem uygulamaları sonrası AISI H11 sıcak iş takım çeliğinin kuru sürtünme aşınma davranışının incelenmesi, *21. Ulusal Elektron Mikroskopi Kongresi*, Mersin, Türkiye 28-31 Mayıs 2013.

[10] **Aktaş G.,** Ş. H., Polat Ş., 42Cr5MoSiV sıcak iş takım çeliğinin mekanik özelliklerine ısıl işlem etkisi, *MakinaTek*, 2012, **174**, 294-302.

[11] **Aktaş G.**, Atapek Ş. H., Polat Ş., Bir sıcak iş takım çeliğinde ısıl işlem uygulamaları ve mikroyapısal karakterizasyon, *MakinaTek*, 2012, **182**, 222-230.

[12] Polat Ş., Atapek Ş. H., Türedi E., **Aktaş G.**, Wear behavior of heat treated hot work tool steels under dry sliding conditions, *International Iron and Steel Symposium*, Karabük, Turkey, 2-4 April 2012.

[13] **Aktaş G.**, Atapek Ş. H., Türedi E., Polat Ş., AISI H11 sıcak iş takım çeliğinin aşınma davranışı üzerine ısıl işlem ve mikroyapı etkisi, *III. İleri Teknolojiler Çalıştayı*, İstanbul, Türkiye, 4-6 Ekim 2012.

[14] Polat Ş., Atapek Ş. H., **Aktaş G.**, ESR yöntemi ile üretilmiş sıcak iş takım çeliklerinin ısıl işlemi ve mikroyapısal karakterizasyou, *II. İleri Teknolojiler Çalıştayı*, İstanbul, Türkiye, 9 Aralık 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Gülşah Aktaş 1989 Biga / Çanakkale doğumlu olup ilköğretimini doğduğu kasabada tamamlamış, lise hayatına Biga Atatürk Anadolu Lisesi'nde devam etmiştir. 2007 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nü 2011 yılında bölüm birincisi olarak tamamlamıştır. Eğitimine 2011 güz döneminde Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans Eğitimine başlayarak devam etmiştir. Ekim 2012'de Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır. Mart 2014'ten itibaren bu göreve Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde devam etmektedir.