

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CAM ŞEKİLLENDİRME MAKİNALARINDAKİ AŞINAN PARÇALARA
UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİNİN PERFORMANSA ETKİLERİ**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Ali Yüksel SOYKUT

Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı: Malzeme Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. E. Sabri KAYALI

EYLÜL 2007

ÖNSÖZ

Bu çalışmamda, kıymetli fikir, öneri ve eleştirileriyle bana yol gösteren, tezimin her aşamasında ilgisini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. E. Sabri KAYALI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Prof.Dr.Hüseyin ÇİMENOĞLU'na deneysel çalışmalarımı yapmam için sağladıkları ortam ve destekleri için teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında çeşitli fikir, öneri ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, tezimin hazırlanması ve yorumlanmasında katkılarını esirgemeyen Dr.C.Fahir ARISOY'a teşekkür ederim.

Çalışmamı ortak yürüttüğüm, değerli zamanını ve enerjisini benimle paylaşan Yük.Müh.Burak SARICA'ya teşekkür ederim.

Yoğun iş yaşamımda tezimin hazırlanması sırasında, bana verdiği destek ve gösterdiği anlayış için Paşabahçe Cam Sanayii A.Ş. İş Geliştirme Müdürü Yük.Müh.Tuğrul MİSOĞLU'na, deney çalışmalarımda ilgi, destek ve dostluğu ile benim yanımda olan Kırklareli Cam Fabrikası Bakım Onarım Mühendisi Kaan SAY'a ve değerli fikir ve tecrübelerini benimle paylaşan Dr.Hakan SESİGÜR'e teşekkür ederim.

Bana hep güvenen, tüm hayatım boyunca beni en iyi şekilde yetiştiren ve desteklerini esirgemeyen annem Gülgün SOYKUT'a, tüm yoğunluğuna rağmen kendisine ayırması gereken zamanlarını bana ayıran kardeşim Pınar'a, verdiği destek, gösterdiği sabır ve anlayış için eşim Didem'e ve en son olarak beni doktora yapmam konusunda yönlendiren hayattaki en büyük yol göstericim olan babam Yük.Müh.A.Ertan SOYKUT'a çok teşekkür ederim.

Eylül, 2007

A.Yüksel SOYKUT

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	viii
TABLO LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1 GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
1.2 Cam Üretiminin Türkiye’deki Durumu ve Paşabahçe	2
1.3 Cam Sanayisindeki Durum	4
1.4 Cam Şekillendirme Makinalarında Yaşanan Sıkıntılar	5
2 TRİBOLOJİ	7
2.1 Tribolojik Sistem	7
2.2 Yüzey Karakteristikleri	11
3 KATI CİSİMLERİN TEMASI: SÜRTÜNME VE AŞINMA	14
3.1 Sürtünme Katsayısının Tarihsel Gelişimi ve Sürtünme Kavramının Modellenmesi	15
3.2 Pürüzsüz Yüzeylerin Teması	17
3.3 Pürüzlü Yüzeylerin Teması	18
3.4 Makina Parçalarının Yüzey Kalitesi	19
3.5 Kayma Sürtünmesi	20
3.5.1 Kuru sürtünme	21
3.5.2 Sınır sürtünmesi	26
3.5.3 Sıvı sürtünmesi	27

3.6	Aşınma	27
3.6.1	Aşınmanın tanımı	28
3.7	Aşınma Türleri	31
3.7.1	Adhezif aşınma (Yapışma aşınması)	32
3.7.2	Abrazif aşınma	34
3.7.3	Yorulma aşınması	36
3.7.4	Korozif aşınma	37
3.7.5	Kazımalı (Fretting) aşınma	38
3.7.6	Erozif aşınma	39
3.7.7	Kavitasyonla korozif aşınma	40
3.7.8	Elektrik ark akımlı aşınma	41
3.8	Aşınmanın Önlenmesi	42
4	CAM ŞEKİLLENDİRME	44
4.1	Cam Nedir?	44
4.2	Cam Üretiminin Tarihçesi	44
4.3	Cam Ev Eşyası Üretim Yöntemleri	45
4.4	Cam Şekillendirme Makinaları	46
4.4.1	Presleme prosesi	46
4.4.2	Üfleme-üfleme prosesi	50
4.4.3	Presleme-üfleme prosesi	52
4.5	Cam Üretiminde Kullanılan Makina Parçaları	54
4.5.1	Üfleme-üfleme ve pres-üfleme prosesinde kullanılan kalıp parçaları	54
4.5.2	Pres prosesinde kullanılan kalıp parçaları	56
4.5.3	Kalıp nedir?	57
4.6	Cam Üretiminde Kullanılan Kalıp ve Kalıp Kolu Çiftleri	59
4.6.1	Kalıp ve kollarının sahip olması istenilen özellikler	62
4.7	Kalıp ve Kalıp Kolu Çiftlerinde Kullanılan Malzemeler	66
4.7.1	Paslanmaz çelik	67
4.7.2	Bakır esaslı alüminyum bronzu	67
4.7.3	Nikel esaslı kalıp alaşımları	68
4.7.4	Seramik esaslı kalıp malzemeleri	68
4.7.5	Dökme demir kalıp malzemeleri	69

5	METALLERE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ	70
5.1	Sert Krom Kaplama	72
5.2	Akımsız Nikel Kaplama	73
5.3	Nitrokarbürleme	74
5.4	Borlama	76
5.4.1	Borlama prosesleri	81
5.4.2	Borlama işleminin avantajları	82
5.4.3	Borlama işleminin dezavantajları	83
5.5	Borlama Yöntemleri	83
5.5.1	Kutu borlama	84
5.5.2	Pasta borlama	85
5.5.3	Sıvı borlama	85
5.5.4	Gaz borlama	87
5.5.5	Plazma borlama	88
5.6	Borlama ve Diğer Yayınma İşlemlerinin, Yüzeylerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarına Etkileri	89
6	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	94
6.1	Aşınma Deneyleri	95
6.1.1	Aşınma deney numuneleri	95
6.1.2	Aşınma deney numunelerine uygulanan yüzey işlemleri	96
6.1.3	Nem ve sıcaklık	97
6.1.4	Aşınma deney parametreleri	97
6.2	Metalografik Çalışmalar	101
7	DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ	103
7.1	Metal-Metal Aşınma Deneyleri	113
7.2	Metal-Abrazif Aşınma Deneyleri	127
7.3	İleri-Geri Aşınma Deneyi	135
8	GENEL SONUÇLAR	137
9	KAYNAKLAR	139

EKLER

- Ek A: Deneý Numuneleri Kimyasal Bileşim ve Mekanik Özellikleri
- Ek B: Deneý Numuneleri Kaplama Kalınlıkları
- Ek C: Deneý Numuneleri Sertlik ($HV_{0,2}$) Deęerleri
- Ek D: İncelenen Kalıp Kollarından Örnekler
- Ek E: Deneý Numune Kesitlerinin Parlatılmış ve Dağlanmış Görüntüleri
- Ek F: Disk Üstünde Aşınan Pim Deneý Numuneleri Aęırlık ve Yükseklik Verileri
- Ek G: 2000 m Kayma Mesafesinde Deneý Numunelerinde Meydana Gelen Aęırlık Kaybı Grafikleri
- Ek H: 6000 m Kayma Mesafesinde Deneý Numunelerinde Meydana Gelen Aęırlık Kaybı Grafikleri
- Ek I: Disk Üzerinde Aşınan Pim Deneý Numune Fotoęrafları
- Ek J: Metal-Abrazif Aşınma Deneý Sonuç Tabloları
- Ek K: 16.5 m Kayma Mesafesinde Deneý Numunelerinde Meydana Gelen Aęırlık Kaybı Grafikleri
- Ek L: 16.5 m Kayma Mesafesinde Deneý Numunelerinde Meydana Gelen Yükseklik Kaybı Grafikleri
- Ek M: Abrazif Aşınma Deneý Numunelerinde 5.5-11-16.5 m Kayma Mesafelerinde 10x ve 60x Büyütmelerde Görülen Yüzey Fotoęrafları
- Ek N: İleri- Geri Aşınma Deneý Verileri
- Ek O: Aşınma İz Alanı
- Ek P: Sürtünme Katsayısı Grafikleri
- Ek R: Aşınma Testi Sonuçunda Elde Edilen Top Fotoğrafları

Ek S: Yüzeyleri Borlanmış Numunelerin SEM Görüntüleri

Ek T: Deneylede Kullandığımız Malzemelerin Yüzey Pürüzlük Değerleri

Ek U: CD-ROM

ÖZGEÇMİŞ

KISALTMALAR

PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
ASTM	: American Society for Testing of Materials
RAO	: Rölâtif Aşınma Oranı
HV	: Vickers Sertliği

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1 : Maliyetlerin toplam içindeki payı.....	4
Tablo 2.1 : Triboloji: Disiplinler arası bir yaklaşım.....	11
Tablo 3.1 : Sürtünmeye ait kronolojik gelişim.....	16
Tablo 3.2 : Çalışma koşulları ve aşınma türleri arasındaki ilişkiyi gösteren akış şeması.....	30
Tablo 3.3 : Aşınma mekanizmalarının göreceli önem dereceleri	31
Tablo 3.4 : Sıvı çarpmasına, çarpma açısının malzeme tepkisi üzerindeki etki.....	40
Tablo 3.5 : Aşınma prosesi üzerinde etkin malzeme özellikleri.....	42
Tablo 5.1 : Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması.....	77
Tablo 5.2 : Sıvı borlamada kullanılan çeşitli bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri	87
Tablo 5.3 : Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri	88
Tablo 5.4 : Yayınma işlemine ait bazı özellikler.....	89
Tablo 5.5 : Kromlama ve borlama uygulanmış çeliklerin sürtünme katsayıları	90
Tablo 7.1 : Aşınma deneylerinde 2000 m kayma mesafesinde incelenen dört farklı kalite çeliğin farklı türdeki kaplanmış durumlarında % ağırlık kaybı değerlerine göre hesaplanan rölatif aşınma oranı değerleri.....	114
Tablo 7.2 : Aşınma deneylerinde 5.5 m kayma mesafesinde incelenen dört farklı kalite çeliğin farklı türdeki kaplanmış durumlarında % ağırlık kaybı değerlerine göre hesaplanan aşınma oranı değerleri.....	134

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Tribolojik sistemin elemanları.....	8
Şekil 2.2	: Kaplanmış yüzeyin değişik bölgelerinde tribolojik olarak önemli özellikler.....	9
Şekil 2.3	: Kaplanmış yüzeylerin malzeme özelliklerini etkileyen faktörler.....	10
Şekil 2.4	: Bir yüzeyin şekli, a) yüzey topoğrafyası ve b) yüzey profili tarafından karakterize edilir. Temasta bulunan iki yüzey için c)'de gösterilen gerçek temas alanı, gözle görülebilen temas alanından oldukça düşüktür.....	12
Şekil 2.5	: Mühendislik sistemlerindeki gerçek temas koşullarının şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.6	: Bir metal yüzeyi; deformasyona uğramış bir tabaka, işlenmiş tabaka, bir oksit tabakası, absorblanmış gaz tabakası ve kirliliği bir tabaka içerir. Oksit tabakası, metale bağlı olarak taban malzemesi içine işleyebilir.....	13
Şekil 3.1	: Katı cisimlerin ideal teması.....	17
Şekil 3.2	: Malzemenin görünen ve gerçek temas alanı.....	19
Şekil 3.3	: Kuru sürtünme.....	21
Şekil 3.4	: Sürtünme katsayısının a) kayma hızı ve b) temas süresi ile ilişkisi....	22
Şekil 3.5	: Gerçek yüzey temasının şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.6	: Temas yüzeyindeki oksit tabakası.....	24
Şekil 3.7	: Adsorbe olmuş yağ film tabakası.....	26
Şekil 3.8	: Sıvı sürtünme geometrisi.....	27
Şekil 3.9	: Tribolojinin ilgi alanı.....	29
Şekil 3.10	: Adhezif aşınmanın en genel çalışma şekli.....	33
Şekil 3.11	: İki elemanlı abrazyon aşınma.....	34
Şekil 3.12	: Üç elemanlı abrazyon aşınma.....	35
Şekil 3.13	: Abrazyon aşınma mekanizması.....	35
Şekil 3.14	: Yorulma aşınmasının şematik gösterilişi.....	36

Şekil 3.15	: Eroziyon aşınmadaki tipik olaylar.....	39
Şekil 3.16	: Sıvı kabarcıklarının çarpmasına bağlı olarak oluşan kaviteasyon erozyonunun şematik gösterimi.....	41
Şekil 4.1	: Camın preslenmesinde kullanılan başlıca parçalar.....	47
Şekil 4.2	: Cam presleme prosesinde işlem sırası.....	48
Şekil 4.3	: Otomatik Pres Makinası	48
Şekil 4.4	: On-istasyonlu bir makinenin tipik bir istasyon sıralaması.....	49
Şekil 4.5	: Üfleme-üfleme üretim makinası temsili çizimi.....	50
Şekil 4.6	: Üfleme-üfleme prosesine ait üretim aşamaları gösterilmiştir.....	52
Şekil 4.7	: Pres-üfleme cam üretim prosesine ait üretim aşamaları gösterilmiştir.....	53
Şekil 4.8	: Tipik H-28 makinasının yan görünüşten teknik çizimi.....	54
Şekil 4.9	: Cam ev eşyası üretiminde kullanılan kalıp ve aksesuarları.....	55
Şekil 4.10	: Pres mamuller için kalıp donanımları.....	56
Şekil 4.11	: Cam mamul imaltında kullanılan tek parça kalıp ve parçaları.....	57
Şekil 4.12	: Çift parça kalıp çalışma prensibi.....	58
Şekil 4.13	: Kalıp-kalıp kolu mekanizması açık ve kapalı olarak görünüşü.....	61
Şekil 4.14	: Kalıp kolu mekanizması ve kalıp baskı bölgeleri.....	62
Şekil 4.15	: Aşınma ve korozyona uğramış durumdaki kullanılmış bir kalıp kolu.....	63
Şekil 4.16	: Kalıp-kalıp kolu üstüne oturmasının teknik çizimle gösterilmesi.....	64
Şekil 4.17	: Kullanılmış ve hurdaya ayrılmış AISI 420 kalıp kolu.....	65
Şekil 4.18	: Yaygın olarak kullanılan bazı cam kalıpları alaşımlarının ısıl geçirgenliklerin sıcaklıkla değişimi.....	66
Şekil 5.1	: Isıl ve Kimyasal Yüzey İşlemlerinin Sınıflandırılması.....	70
Şekil 5.2	: Yüksek karbonlu çelikte yüzeyde oluşan nitrokarbür yapısı.....	75

Şekil 5.3	: Borlanan malzemeye kesitten bakıldığında, yapının üç farklı bölgeden oluştuğu görülür: a) FeB ve Fe ₂ B fazlarını içeren borür katmanı, b) Geçiş bölgesi, c) Matris.....	78
Şekil 5.4	: Farklı karbon bileşimlerine göre yüzeyde oluşan borür tabakalarının morfolojisi ve kalınlıkları	79
Şekil 5.5	: Konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması (a) Çekirdeklenme aşaması (b) ve (c) <001> oryantasyonunda büyüme aşaması.....	79
Şekil 5.6	: Lia ve Van'ın çalışmaları ile oluşturulan Fe-B ikili faz diyagramları.....	80
Şekil 5.7	: 42CrMo4 Çeliğin Taşlama Diski Testi Sonucundaki Abrazif Aşınma Miktarı	92
Şekil 6.1	: Cam şekillendirme makinası kalıp kolu a), b).....	95
Şekil 6.2	: ASTM G 99 standardına göre hazırlanan aşınma deneyi numunesi..	96
Şekil 6.3	: (a) Metal-Metal (b) Metal-Abrazif deney düzeneğinin şematik gösterilişi.(1) Dengeleyici ağırlık (2) yük (3) numune (4) aşındırıcı disk (5) iletici silindir (6) abrazif bant (7) çelik destek plakası.....	98
Şekil 6.4	: Aşınma Deneylerinde Disk Üstünde Pim Deney Düzeneği.....	98
Şekil 6.5	: Metal-abrazif aşınma deney düzeneği.....	99
Şekil 6.6	: ASTM G133 standardında (ASTM G133-05, 2005) tanımlanan ileri-geri aşınma deney cihazı.....	100
Şekil 6.7	: İleri-geri aşınma deney düzeneği.....	101
Şekil 7.1	: AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama öncesi ve farklı kaplamalar sonrasında elde edilen yüzey sertlikleri.....	104
Şekil 7.2	: AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama kalınlıkları (µm).....	105
Şekil 7.3	: AISI 1040 kalite çeliğin akımsız nikel kaplanmış durumundaki kesit görüntüsü	106
Şekil 7.4	: AISI 420 kalite çeliğin akımsız nikel kaplanmış durumundaki kesit görüntüsü	106
Şekil 7.5	: AISI 5140 kalite çeliğin sert krom kaplanmış durumundaki kesit görüntüsü (dağlanmış).....	107

Şekil 7.6	: AISI 420 kalite çeliğin sert krom kaplanmış durumdaki kesit görüntüsü (dağlanmış).....	107
Şekil 7.7	: AISI 4140 kalite çeliğin nitrokarbürleşmiş durumdaki kesit görüntüsü (dağlanmış).....	108
Şekil 7.8	: AISI 5140 kalite çeliğin nitrokarbürleşmiş durumdaki kesit görüntüsü	108
Şekil 7.9	: AISI 1040 kalite çeliğin borlanmış durumdaki kesit görüntüsü	109
Şekil 7.10	: AISI 420 kalite çeliğin borlanmış durumdaki kesit görüntüsü	109
Şekil 7.11	: Borlanmış AISI 1040 kalite çeliğin SEM görüntüsü.....	110
Şekil 7.12	: Borlanmış AISI 420 kalite çeliğin SEM görüntüsü.....	110
Şekil 7.13	: Borlanmış AISI 4140 kalite çeliğin optik mikroskop kesit görüntüsü (dağlanmış).....	111
Şekil 7.14	: Borlanmış AISI 4140 kalite çeliğin kesit SEM görüntüsü.....	111
Şekil 7.15	: AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama türlerine göre 2000 m kayma mesafesinde gösterdikleri ağırlık kaybı değerleri.....	113
Şekil 7.16	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	115
Şekil 7.17	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	116
Şekil 7.18	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 4140 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	116
Şekil 7.19	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 4140 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	117
Şekil 7.20	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 5140 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	117
Şekil 7.21	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 5140 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	118
Şekil 7.22	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	119
Şekil 7.23	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	120

Şekil 7.24	: Yüzeyi borlanmış AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	120
Şekil 7.25	: Yüzeyi borlanmış AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	121
Şekil 7.26	: Yüzeyi akımsız nikel kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	122
Şekil 7.27	: Yüzeyi akımsız nikel kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	122
Şekil 7.28	: Yüzeyi nitrokarbürleşmiş AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	123
Şekil 7.29	: Yüzeyi nitrokarbürleşmiş AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	124
Şekil 7.30	: Yüzeyi sert krom kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	125
Şekil 7.31	: Yüzeyi sert krom kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	125
Şekil 7.32	: R.A.O.göre en çok aşınan ve en az aşınan pim numunelerinin 60x stereo mikroskop görüntüleri	126
Şekil 7.33	: AISI 1040 – AISI 4140 – AISI 5140 – AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama türlerine göre metal-abrazif aşınma deneylerinde 5.5 m kayma mesafesinde gösterdikleri ağırlık kaybı değerleri.....	127
Şekil 7.34	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040 kalite çelik malzemenin abrazif aşınma deneylerinde Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	128
Şekil 7.35	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 4140 kalite çelik malzemenin abrazif aşınma deneylerinde Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	129
Şekil 7.36	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 5140 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	130

Şekil 7.37	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.....	130
Şekil 7.38	: Yüzeyi borlanmış AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	131
Şekil 7.39	: Yüzeyi akımsız nikel kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	132
Şekil 7.40	: Yüzeyi nitrokarbürleşmiş AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	132
Şekil 7.41	: Yüzeyi sert krom kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.....	133
Şekil 7.42	: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemenin (Aşınma iz alanı (mm ²)) grafiği...	135
Şekil 7.43	: Farklı yüzey işlemleri görmüş çelik malzemeler içinde öne çıkan numenelerin sürtünme katsayısı grafiği.....	136

SEMBOL LİSTESİ

F_s	: Sürtünme Kuvveti
F_n	: Normal Kuvvet
μ	: Sürtünme Katsayısı
A_g	: Gerçek Temas Alanı
A	: Geometrik Alan
HB	: Temasta Olan Yumuşak Malzemenin Sertliği
ΔH	: Aşınma Sonrasındaki Yükseklik Kaybı
ΔG	: Aşınma Sonrasındaki Ağırlık Kaybı
ΔW_R	: Referans Deney Numunesi Aşınma Hızı
ΔW_t	: Diğer Deney Numunesinin Aşınma Hızı

CAM ŞEKİLLENDİRME MAKİNALARINDAKİ AŞINAN PARÇALARA UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİNİN PERFORMANSA ETKİLERİ

ÖZET

Malzeme sektörü son yıllarda ülkemizde çok önemli gelişmeler kaydetmiş ve gelişmiş ülkelerde kullanılan birçok teknolojiyi rahatlıkla uygulayabilir hale gelmiştir. Cam üretim sektörü de artan rekabet ve müşteri talepleri doğrultusunda en iyi ürünü en ucuza üretmek için cam makinalarını ve tabii ki parçalarını geliştirmek zorundadır. Bunun sonucu olarak cam makine üretiminde kullanılan malzemelerin seçimi ve bu malzemelere uygulanan yüzey işlemleri de teknolojiye paralel olarak oldukça gelişmiştir.

Yüzey işlemleriyle malzemenin sertlik, süneklik ve yorulma gibi mekanik özellikleri yanında sürtünme ve aşınma, oksidasyon ve korozyona karşı dayanıklılık özellikleri geliştirilmektedir. Sürtünerek çalışan makina elemanlarında belirli bir süre sonra ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak için birçok yüzey iyileştirme teknikleri uygulanmaktadır. Yaşanan malzeme ve ürün kayıplarını, cam şekillendirme makinalarında minimuma indirmek ve söz konusu bu nedenlerden kaynaklanan duruş ve üretim kayıplarını azaltmak amacı ile gerçekleştirilen bu çalışmada; kalıp kolu malzemelerine alternatif malzeme ve kaplama türleri denenmiştir.

Sürtünerek çalışan makina elemanlarında belirli bir süre sonra ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak için birçok yüzey iyileştirme teknikleri uygulanmaktadır. Cam şekillendirme makinalarında mevcut kalıp kolu malzemesi olan AISI 420'ye alternatif olarak seçilen yüzeyi kaplanmış (nitrokarbürleme, sert krom kaplama, akımsız nikel kaplama ve borlama) üç farklı kalitede çelik (AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 5140 kalite çelikler) malzeme, kalıp kollarındaki gerçek aşınma şartlarını simule edebilecek şekilde tasarlanan laboratuvar deneyleri için standart numuneler olarak hazırlanmıştır. Bu malzemelerin seçilmesinde kolay temin edilebilirlik, kolay işlenebilirlik, uygun fiziksel ve kimyasal özellikte olmasına ilave olarak maliyet faktörü de göz önünde bulundurulmuştur.

Hazırlanan numunelere metal-abrazif, metal-metal ve ileri-geri aşınma deneyleri yapılarak aşınma davranışları incelenmiştir. Oda sıcaklığında yapılan deneylerde nem ve sıcaklık sabit tutulmuştur. Metal-metal aşınma deneyleri, M2 kalite takım çeliği üzerinde, metal-abrazif aşınma deneyleri ise 240 grid'lik SiC abrasif bantlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. İleri-geri aşınma deneyinde ise aşındırıcı olarak alümina bilye kullanılmıştır ve deney sonucunda aşınma iz alanları yardımıyla yüzey pürüzlülükleri ve sürtünme katsayıları elde edilmiştir.

Metal-metal aşınma deneyleri için Rölatif Aşınma Oranları, deney numunelerinin ağırlık kaybı değerlerinden ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bunun sonucunda 2.000 m kayma mesafesindeki ağırlık kaybı olarak aşınma değerleri ise; AISI 420 kalite çelikte kaplamasız iken 0.0552 gr, sert krom kaplı iken 0.0056 gr olurken, bor kaplı AISI 4140 çeliğinde sadece 0.003 gr değerinde olmuştur. Bu durum bor kaplı AISI 4140 kalite çelik malzemenin aşınma oranının sert krom kaplı AISI 420'ye oranla yaklaşık 18.67 kat daha az olduğunu gösterir. Borlanmış AISI 4140 kalite çeliğin aşınma hızı referans alınarak diğer deney numunelerinin RAO değerleri mukayese edildiğinde, borlanmış AISI 4140 kalite çelik deney numunesinin mevcut durumda kullanılan AISI 420 kalite çeliğin sert krom kaplı durumuna kıyasla 18,67 kat, kaplamasız durumuna kıyasla 184 kat daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Metal-abrazif aşınma deneyleri sonucunda metal-metal deney sonuçlarını doğrulayan sonuçlar elde edilmiş ve yine bor kaplı AISI 4140 kalite çeliğin aşınmaya karşı en dayanıklı olduğu görülmüştür. Buna ilave olarak borlama işlemi sonrası AISI 4140, 1400 HV sertlik değerine ulaşır ve yüzeyinde oluşabilecek darbe kaynaklı yaralanmalara karşı korunması kolaylaşır.

Aşınma deneylerinin sonucunda AISI 4140 malzeme üzerine borlama ön plana çıkmış ve cam şekillendirme makinalarının çalışma koşullarında aşınmaya en dayanıklı kaplama ve taban malzemesi olarak borlanmış AISI 4140 kalite çelik tayin edilmiştir.

Bu ömür artışı üretim esnasında doğabilecek kalıp kollarının aşınması ve üretimin durdurulması problemlerini azaltacağı gibi, yeni kalıp kolu alımı, stok tutma maliyetlerinde de önemli oranda tasarruf sağlayacaktır. Kaplamanın kalıp kolu maliyetine getirdiği ek yük, bu kazançlar yanında önemsiz kalmaktadır.

Yapılan deneyler sonucunda bor kaplı AISI 4140 çeliğinden kalıp kolu imal edilmesinin yararlı olacağı sonucuna varılmıştır.

THE PERFORMANCE INCREASING EFFECT OF SURFACE TREATING AT WORN PARTS OF GLASS FORMING MACHINES

SUMMARY

The materials science in our country has provided significant developments in recent years. We started to use most of the high technology which are being used at developed countries. Glass industry has also needed to develop its glass forming machines and their parts for manufacturing the high quality with low price in this competitive environment for being in line with the demands of customers. As a result of this change in the business environment, the selection of materials being used in glass forming machines and the surface treatments applied on these materials have developed in accordance with the technology.

Friction wear, oxidation and corrosion properties of materials can be improved in addition to an increase of the ductility, hardness and fatigue properties of materials by using surface treatment.

At glass forming machines, the mechanism which provides the mould to adapt into the glass machine, is called as the arm mould. Although mould and arm mould materials show similar properties, the responsibilities they undertake are totally different from each other. If the expectation from mould material can be described as resistivity to heat and surface roughness at metal glass interface, then the expectation from arm mould can be limited as resistivity to wearing and general suitability to the machine's material. The aim of this thesis to find an alternative material to the arm mould material as coated or uncoated conditions which are used at the glass forming machines in order to decrease the loss of discarded materials and product at glass machines.

As alternatives to the existing arm mould material AISI 420, various kinds of steels (AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140) were coated with different kinds of coatings as nitrocarburizing, hard chrome coating, boronizing and electroless nickel coating. The selection criterias for these materials can be stated as; easy to find at hardware market, easy to machine, appropriate physical and chemical properties and the cost effectiveness of these materials.

Metal-metal, metal-abrasive and reciprocating wear tests are applied on specimens and their wearing behavior is analyzed. At metal-metal wearing tests, specimens were tested on M2 steel. At metal-abrasive tests, specimens were tested on 240 grid SiC abrasive belts. At reciprocating tests, alumina ball is used as abrasive and at the end of this test, with the help of worn dot spots, surface roughness and friction coefficients are obtained. To simulate the real working condition of arm moulds at the laboratory conditions, standard specimens are prepared for pin on disc tests. Specimens were at standard of ASTM G99 with.. Specimens and disc are always

cleaned at each test and dry friction conditions are provided. During laboratory tests, humidity and room temperature is controlled at $50\pm 5\%$ and $20\pm 2^\circ\text{C}$ respectively.

At metal-metal tests, specimens as a pin are fixed on a steel disc with a fixed load where the disc rotates at a constant speed. Tests are applied on M2 steel disc with 0.52 m/s sliding speed, under 5 kg load and at a total sliding distance of 6.000 m. Before and after each wear test, the differences at specimens in terms of height (ΔH) and weight (ΔG) are measured with a sensitivity variance of 0.01 mm and 0.1 mg respectively at every 2.000 m sliding distance.

Steel specimens without any surface treatment have surface hardness values in the range of 170 and 210 HV. After the surface treatment (nitrocarburizing, hard chrome coating and electroless nickel coating) processes, these specimens surface hardness increased up to 800 HV_{0.2}. However, after the boronizing process, specimens' surface hardness increased to the higher values up to 1110–1495 HV.

The results of wear tests are analyzed according to the weight loss of the materials. The relative wear ratio (RWR) is defined as the ratio of the weight loss of a specimen to the weight loss of the reference material, which is defined as the most wear resistant specimen at the wear tests. The most wear resistant material was found as the boronized AISI 4140 steel specimen from the weight loss values.

From the results of the pin on disc tests, the specimens' weight losses are calculated to identify the relative wear ratio values. Non-coated AISI 420 specimen had the weight loss of 0.0552 gr, hard chrome coated AISI 420 specimen had the weight loss of 0.0056 gr, boronized AISI 4140 specimen had the weight loss of 0.003 gr at 2.000 m sliding distance. From the comparison of the RWR values of the studied steels, it is found that the boronized AISI 4140 steel has highest wear resistance material. The RWR values show that the boronized AISI 4140 steel is 18,67 times better than hard coated state and 184 times better than uncoated state in terms of wear resistance according to their weight loss as in the wear test.

After implementing the metal-abrasive tests, the results as weight loss again confirmed that the boronized AISI 4140 is the most resistant specimen against wearing. In addition to these ratios, after coating the specimens used in the tests, boronized AISI 4140 has reached to 1400 HV hardness which is the highest reached hardness degree among other specimens at coating operations which lets the specimen to protect himself better against surface scratches and impacts.

As the results of the wear tests, the boronized AISI 4140 steel is determined as the most wear resistant material in the our studied steels and suitable to use as the arm mould material in the glass forming machines.

Providing increase at lifecycle of arm moulds do not only decrease the wearing frequency of arm moulds and stops during production, it also going to decrease the frequency of purchasing new arm moulds, stock sufficiency and cost issues at manufacturing sites. The cost of coating arm moulds is not considerable when compared with the provided cost savings.

1. GİRİŞ

Yüzey mühendisliği, aşınma problemine çözüm üretmek için son yıllarda endüstriyel alanlarda geniş uygulama alanı bulmuştur. Yüzey işlemleriyle malzemenin sertlik, süneklik ve yorulma gibi mekanik özellikleri yanında sürtünme ve aşınma, oksidasyon ve korozyon özellikleri geliştirilmektedir. Sürtünerek çalışan makina elemanlarında belirli bir süre sonra ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak için birçok yüzey iyileştirme teknikleri uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden karbürleme, nitrokarbürleme, borlama, sert krom kaplama ve çeşitli yüzey kaplama teknikleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Amerikan Ulusal Teknoloji Enstitüsü'nün araştırmasına göre korozyon ve aşınmadan dolayı meydana gelen zararın, gayri safi milli hasılanın %7'sini teşkil ettiği görülmüş ve bu yönde çalışmalara ağırlık verilmesi önerilmiştir. Buna malzemenin korozyon sonucu bozulması ile meydana gelen kayıpları da eklersek, bu oran %10-12 civarına yükselmektedir. Aşınma ve korozyona dayanıklı malzemelerin pahalı olması nedeni ile, kullanılan parçaların sadece yüzeylerinin kaplanmasıyla istenilen özelliğe sahip malzemeler elde edilerek maliyetlerin düşürülmesi yoluna gidilmektedir[1].

Yüzey işlemleri ve mühendisliği son yıllarda hızlı olarak gelişmesine rağmen yüzey işlemlerine dair pratik bilgiler oldukça eskidir. İ.Ö. 880 yıllarında Homer'in Odysseus'un da, demirci ustalarının kılıç ve baltalarının yüzeyini sertleştirdiklerine dair bilgiler yer almaktadır[2]. Odysseus'un Tepegözü öldürmek için kullandığı zeytin dalından yapılmış silahını sertleştirmek için yaptığı işlemler detaylı olarak anlatılmıştır. Alman keşiş-yazar Theofilus karbürizasyonla yüzey sertleştirmesi işlemlerinden bahsetmiştir. 11.yy'da Çinlilerin silahların mukavemetini artırmak için soya fasulyesinin parçalanmasından (ayırışması) faydalandığı bilinmektedir[3]. Bütün bunlara rağmen 20.yy başlarına kadar yüzey işlemleri bir disiplin olarak ele alınmamıştır.

1.1 Amaç

Malzeme sektörü son yıllarda ülkemizde çok önemli gelişmeler kaydetmiş ve gelişmiş ülkelerde kullanılan birçok teknolojiyi rahatlıkla uygulayabilir hale gelmiştir. Makine üretiminde kullanılan malzemelerin seçimi ve bu malzemelere uygulanan ısı işlemler de teknolojiye paralel olarak oldukça gelişmiştir.

Klasik ısı işlemlerin yanı sıra güncel yüzey işlemleri de başarıyla uygulanmaktadır. Yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısıyla, aşınma dayanımı artmakta ve korozif ortama dayanıklı farklı yüzey kaplamaları kullanılabilir.

Bu çalışmanın amacı, aşınma nedeni ile önemli sorunlar yaratan kalıp kollarının aşınmaya karşı daha dayanıklı malzeme ve kaplama çifti ile değiştirilmesidir.

Bu tez çalışmasında; kalıp kollarının mevcut malzemesine (AISI 420) alternatif malzeme olarak seçilen malzemelere farklı yüzey işlemleri uygulanarak aşınmaya daha dirençli hale getirilmesi konusu incelenmiştir. Esas amacı; maliyeti düşürmek ve cam ev eşyası üretim prosesinden beklenen kalitede yüzey elde etmek olan bu çalışmada, mevcut çelik kalıp kollarının yerine, daha ucuz alt malzeme ile birlikte daha iyi performansla çalışılabilecek yüzey kaplama yöntemleri belirlenmeye çalışılmıştır.

1.2 Cam Üretiminin Türkiye'deki Durumu ve Paşabahçe

Atatürk'ün Türkiye'de cam sanayiini kurma ve geliştirme talimatları doğrultusunda kurulduğu semtin adını marka olarak Paşabahçe'ye veren ve tüm cam üretim tesislerinin de öncüsü olan Beykoz Fabrikasının Atatürk'ün imzaladığı kararname ile 17 Şubat 1934 yılında Türk cam sanayiini kurma görevini üstlenen İş Bankası tarafından 14 Ağustos 1934 yılında temeli atılmış ve 4 Temmuz 1935'te, 400 çalışanıyla üretime başlamıştır.

Ülkemizde cam sanayini kurmak ve ileri düzeye ulaştırmak topluluğun ana hedeflerinden bir tanesidir. Şişecam, cam sanayinin kurulması ve yurt içi talebin karşılanması devrini çoktan aşmıştır. Yeni hedefi "yurt dışına yönelik olarak büyümek ve dünya pazarlarından daha büyük pay almak" olmuştur.

Topluluk, 1935'ten bu yana, cam sektöründeki en ileri teknoloji kullanımı ve araştırma geliştirme faaliyetleriyle ülkenin tüm temel cam ürünleri gereksinimini

karşıl原因 yatırım ve üretimleri gerçekleştirmektedir. 1960'lı yılların başından itibaren ise dünya pazarlarına da yönelerek sürekli büyüyen ve bugün ulaştığı boyutlarla, ihtisaslaşması ve rekabet gücü yüksek faaliyetleriyle sahasında Avrupa'nın ve dünyanın seçkin üreticileri arasında yer almaktadır[4].

Şişecam Cam Ev Eşyası, Cam Ambalaj, Düzcamlar ve Kimyasallar gruplarıyla camın tüm temel alanlarında ihtisaslaşmış olup, Paşabahçe, topluluğun cam ev eşyası grubu olarak hizmet vermektedir.

Paşabahçe Cam San. ve Tic. A.Ş.; Beykoz Paşabahçe'de 1935 yılında el üretimi yöntemiyle soda camı ev eşyası üretimine başlamış, 1955 yılında bugünkü otomatik üretim teknolojisinin ilk aşaması olarak kabul edilen makine üretimini gerçekleştirmiş, 1974 yılında ise ısıya dayanıklı cam ev eşyası üretimine başlamıştır. İlk ihracat, 1961 yılında gerçekleştirilmiştir. 1980-2000 yılları arasında, artan yurtiçi talebini karşılamanın yanı sıra ihracata yönelik büyüme stratejisini benimseyen Paşabahçe'nin, soda camı ve ısıya dayanıklı cam ev eşyası üretiminde yeni kapasiteleri, yeni fabrikaları devreye alarak hızlı bir büyüme dönemine girdiği görülmektedir. Başta Avrupa olmak üzere bu sektörde üretimi ve tüketimiyle gelişmiş olan pazarlara yönelen "Paşabahçe", pazarların gerektirdiği kalite ve verimlilik artışına yönelik teknolojik gelişmelere de hız vermiştir. Türkiye'de soda camı ve ısıya dayanıklı otomatik cam ev eşyasında Kırklareli, Mersin ve Eskişehir'deki fabrikalarında, soda camı ve kristal el üretimi ürünlerinde Denizli fabrikasında üretimini sürdürmektedir.

Dünyadaki yerini güçlendirmek amacı ile Türkiye dışında pazarlama-satış örgütlenmesini sürdüren, Avrupa'da lojistik ambarları oluşturan "Paşabahçe", son yıllarda yurtdışında üretim amaçlı yatırım hamlelerini de başlatmıştır. Bu doğrultuda, 2003 yılında Rusya Federasyonu'nda bir cam ev eşyası fabrikası satın alınmış, Bulgaristan'da komple yeni bir otomatik cam ev eşyası fabrikası kurmak üzere 2004 yılı ortasında yatırıma başlanmış olup, 2005 Temmuz ayında üretime başlamıştır.

Cam Ev Eşyası üretiminde 1 milyar 300 milyon adetlik üretimle Avrupa'nın ikinci, dünyanın üçüncü büyük üreticisi olan Paşabahçe yurtiçinde 4 ve yurtdışında 2 tesiste ürettiği cam ürünlerini 110 ülkeye ihraç etmektedir.

1.3 Cam Sanayisindeki Durum

Sektörün önemli maliyet kalemleri, hammadde, yakıt-enerji, işçilik, ambalaj ve amortismandan oluşmaktadır(Tablo 1.1).

Tablo: 1.1: Maliyetlerin Toplam İçindeki Payı (1998)[5].

Üretim Girdileri	Toplam Giderler İçindeki Payı %			
	Düzcamlar	Ambalaj	Cam Ev Eşya.	Cam Elyaf
Hammadde	26	25	17	33
Enerji	10	9	6	11
İşçilik	15	22	22	22
Diğer	48	44	55	34

Cam sanayiinin kullandığı hammaddeler (silis kumu, soda, vb.) çoğunlukla yurtiçinden temin edilmektedir. Bu her ne kadar stratejik bir avantaj gibi görülsede, madenlerimizin kalitesinin nispeten düşük olması, maden işleme maliyetlerini yükseltmektedir. Bu da maden taşıma giderleri ve/veya ek maden işleme giderlerinin toplam maliyetler içine eklenmesine neden olmakta ve maliyetleri yükseltmektedir.

Türkiye’de hemen hemen tek enerji üreticisi kamu, enerji fiyatını rakiplerimizin üzerinde bir düzeyde belirlemektedir. Türk cam sanayii, rakiplerine kıyasla enerjiyi %20-30 daha pahalı kullanmaktadır. Sektörün izabe (eritme) teknolojisine dayalı olması, fiyatlara karşı olan hassasiyeti arttırmaktadır.

İşçilik giderleri gelişmiş batı ekonomileri ile kıyaslandığında bir maliyet avantajı olarak belirlemektedir. Ancak bazı Doğu Avrupa ülkeleri ve Uzak Doğu ekonomileri ile kıyaslandığında aynı maliyet kalemi dezavantaj oluşturmaktadır. Çünkü bu ekonomilerde 3-30 kat daha ucuza işçi istihdam edilebilmektedir. Bu nedenle Türk cam sanayiinin gelişme perspektifi ucuz emeğe dayalı olmaktan çok, katma değer arttırmaktan ve emeğin üretim verimliliğini yükseltmekten geçmektedir[6].

Hızlı bir büyüme trendi içerisinde olan sektör kapasite artışı, modernizasyon ve yenileme yatırımlarına büyük kaynaklar ayırmak zorundadır. Bu da amortisman gider kaleminin nispi büyüklüğüne neden olan önemli bir faktördür.

Küreselleşme ve çok hızlı teknoloji değişimleri her sektörü etkilediği gibi cam sektörünü de etkilemiştir. Bu hareketlilik cam sektörünü büyük bir rekabet ortamına itmiştir. Cam sektörü incelendiğinde özellikle Cam Ev Eşyası sektörünün gider kalemlerinden en büyük olanın diğer diye adlandırılan kalem olduğu görülmektedir.

Maliyetin yarısından büyük olan bu kalem içindeki farkı üretim kayıpları ve ambalaj yaratmaktadır. Üretim kayıplarının sebepleri arıza-bakım duruşları ve ürün değişimi duruşlarıdır. Ortalama bir ürünün bir makinada çalışma süresi genel olarak 3-4 gün arasında değişmektedir. Ürünün randımanlı olarak çalışması için 4-6 saat süreye ihtiyaç vardır. Cam üretimin doğası olarak cam akışı kesilemediği için üretim esnasında meydana gelebilecek duruşlar bize üretim kaybı olarak yansımaktadır[7].

Cam sanayinde, aşınmaya uğrayan metal malzemeler üretim sırasında önemli problemler yaratmaktadır. İmalatçıların üretim ve üretim stratejilerini değiştirme gereklilikleri rekabetçi yeni malzemelerin ve farklı imalat teknolojilerinin gelişmesi ile daha da artmıştır. İmalatçılar bu yeni proseslerle bazı yeni avantajlara ve dezavantajlara sahip olmuşlardır. Fakat bu yöntemler teknolojik parametrelerin ve bu malzemelerin işlenebilirliğini basit hale getirememiştir. Her bir spesifik işlenebilirlik kriteri ve işleme uygulaması için farklı parametrelerin seçilmesi gerekmektedir[8].

Metal malzemenin seçimi sıcaklık, korozyona dayanım, kayganlık, makine hızına uyum, maliyet özellikleri göz önüne alınarak yapılmaktadır. Metal-metal etkileşiminin yoğun yaşandığı kalıp-kalıp kolu yüzeylerinin performanslarının artırılması ve daha iyi kontrol edilebilir özellikler için çeşitli yüzey iyileştirme çalışmaları da yapılmaktadır.

1.4 Cam Şekillendirme Makinalarında Yaşanan Sıkıntılar

Cam şekillendirme makinelerinde maliyete yansıyan en önemli parametre makinenin kalıp kolu ve buna benzer parçalarının değişmesi için durmasıdır. Birçok parçanın makine çalışırken değiştirme imkanı varken kalıp kolu değişimi için makinenin durdurulması gerekmekte ve doğrudan üretim kaybına neden olmaktadır. Duruşların azaltılması ile kayıp süreler azaltılarak maliyete doğrudan olumlu etki sağlanmaktadır.

Cam kalıp kollarının, birbiri üzerinde çalışan veya kalıp ile temas eden yüzeylerinde aşınma ve korozyon gibi etkilerle malzeme, ürün ve işgücü kayıpları oluşmaktadır. Bu kayıpların önüne geçilebilmesi, dolayısıyla verimliliğin artırılabilmesi için aşınma veya korozyon mekanizmalarının işleyişini bozacak yöntemler uygulanmalıdır.

Uygulamada aşınma ve korozyona dayanıklı olan malzemelerin kullanılması ekonomik açıdan imkansız, birçok uygulama için ise sakıncalıdır. Bu durumda malzemeyi değiştirip bu tür hasarlara dayanıklı malzeme seçimi verimliliği artırmayacaktır. Geriye temas yüzeylerinin aşınmaya karşı direncinin geliştirilmesi kalmaktadır. Genel anlamıyla aşınmaya karşı uygulanan tüm geliştirmeler triboloji bilimi ışığında incelenmektedir.

2. TRIBOLOJİ

İstenmeden meydana gelen aşınma, çeşitli makina ve teçizatın kullanımı sırasında kırılma kadar önemli bir problem olmasa bile, çok büyük ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Bu konu, makina dizaynlarında çok önemlidir. Çünkü temas eden yüzeylerde, sürtünme kuvvetleri güç kaybına; aşınma ise, işleme toleranslarının kötüleşmesine neden olmaktadır. Bu yüzden de aşınma, göz önüne alınması gereken çok önemli etkenlerden biridir.

Triboloji, Yunanca “Tribo” sözcüğünden gelen bir terimdir[2]. “Tribo”, sürtünme ve aşınma; “Triboloji” de sürtünme ve aşınma bilimi anlamına gelir. Diğer bir deyişle triboloji; temas halinde birbirine göre hareket eden yüzeylerin etkileşimlerini inceleyen bilim ve teknoloji dalıdır. Triboloji; sürtünme, yapışma, aşınma ve yağlamanın tümünü içine alan OECD’nin sürtünme ve aşınmanın azaltılmasıyla ilgili önemli ekonomik tasarruf kararlarını almasıyla 1966 yılında doğmuş oldukça genç bir bilim dalıdır[3].

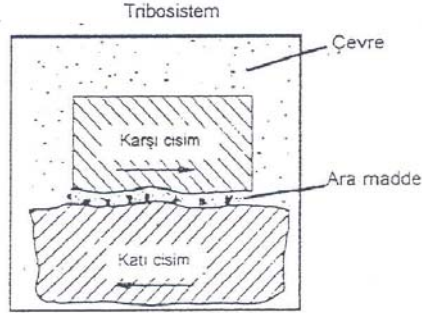
Triboloji, “bir izafi hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların bilimi veya tekniği” olarak tanımlanır[9]. Triboloji, aşınma problemlerinin çözümü ile ilgilenen ve malzeme bilimi, kimya, fizik ve mühendislik bilimleri gibi çeşitli bilim dallarını içeren bir bilimdir.

2.1 Tribolojik Sistem

Bir katı madde yüzeyinden; göreceli olarak hareketli ve temas eden katı, sıvı veya gaz halindeki karşı madde tarafından mekanik etkiyle madde taşınımına aşınma denir[10-13]. Aşınmayı, aşınmaya etki eden faktörlerin bileşik etkilerini dikkate alarak incelemek gerekir. Yani aşınma, bir sistem bütünlüğü içerisinde ele alınmalıdır. Aşınma özelliği veya mukavemeti, sertlik veya çekme mukavemeti gibi spesifik bir malzeme özelliği değil, bir sistem özelliğidir[14]. Aşınma genel olarak; triboloji, sürtünme ve yağlama terimiyle birlikte kullanılmaktadır. Triboloji; bütün bu terimleri kapsayan bilim dalı olarak tanımlanmaktadır[10-15]. Aşınma olayının sistematik olarak incelenebilmesi için tribolojik sistemden söz etmek gerekir.

Bu sisteme tribolojik sistem denilmektedir. Şekil 2.1’de tribolojik bir sistemin ana elemanları görülmektedir.

Tribolojik sistemi oluşturan karakteristik bileşenler:



- a) Malzeme,
- b) Karşı Malzeme,
- c) Ara Yüzey/Bölge/Ortam,
- d) Çevre/Ortam

Şekil 2.1: Tribolojik sistemin elemanları[14].

Aşınma çiftini oluşturan ana cisim ve karşı cisim aralarında belli bir ara malzeme varken az veya çok yük altında hareket ettiklerinde aşınma başlar. Sistemi meydana getiren elemanlardan ana malzeme metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç gibi aşınma karakteristiğine önem verilen katı cisimdir. Aşındıran (karşı eleman) eleman; katı, sıvı veya gaz halinde olabilir. Bu iki eleman tribolojik sistemi meydana getirmede yeterli olabilirlerse de çevre etkisi sistemde her zaman olacağından, tam “kuru sürtünme” sağlanamaz. Çünkü sürtünme sırasında ara madde olabileceği gibi çok iyi temizlenmeyen yüzeylerde yağlayıcı özellik gösteren ara maddeler olabilir[14,15]. Ara madde ise; katı, sıvı, gaz fazlarından birinde veya bunların karışımı şeklinde olabilir. Hareket; kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe gibi biçimlerde olabilir. Yük ise gerilmenin az veya çok olmasının yanı sıra sabit, değişken, artan, azalan ve darbeli olabilir[14,16-18].

Endüstrileşmiş toplumlarda makineler ve sistemlerin ömrünü uzatmak, motor ve cihazları daha verimli hale getirmek, enerji tasarrufu yapmak ve güvenilirliği arttırmak gibi çeşitli nedenlerle sürtünme ve aşınmayı azaltmak veya kontrol altına almak için artan bir ihtiyaç vardır.

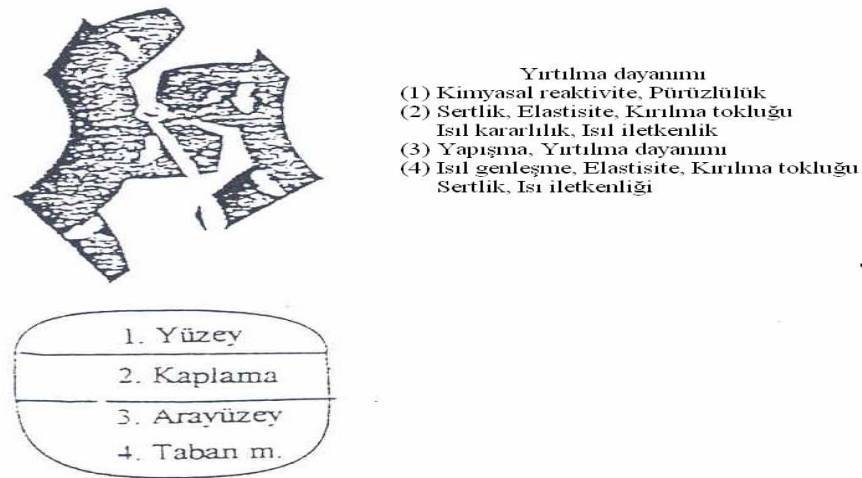
Sürtünme ve aşınmanın kontrolü önce tasarım değişiklikleriyle, daha gelişmiş malzeme seçimiyle veya yağlama tekniklerinin kullanımıyla elde edilmiştir. Son zamanlarda tribolojistler, sürtünme ve aşınma kontrolüne karşı başka bir yaklaşımın

– yüzey işlemleri ve kaplaması uygulaması – kullanımının büyük oranlarda artmasını sağlamışlardır. Bu ise, yüzey mühendisliği adı verilen yeni bir bilim dalının gelişmesine yol açmıştır. Bu gelişme, başlıca iki faktör arasından teşvik edilmiştir. Birincisi, daha önceleri elde edilmemiş olan kaplama karakteristiklerini ve tribokimyasal özellikleri sağlayan yeni kaplama ve işlem yöntemlerinin gelişimi olmuştur. Bu alandaki gelişmeye neden olan ikinci faktör ise, mühendisler ve malzeme bilimcileri tarafından yüzeyin, birçok mühendislik parçasında en önemli unsur olduğunun anlaşılmasıdır. Çünkü birçok hasar, ya aşınma, ya da korozyon sonucu yüzeydeki gelişmelerden kaynaklanmaktadır.

Mekanik parçalar ve aletler, bugün daha yüksek performanslara ihtiyaç duymaktadır. Yüzey kaplamalarının kullanımı, en çok ihtiyaç duyulan yerde spesifik özelliklerin sağlanmasına yol açmıştır. Taban malzemesi mukavemet, tokluk amacıyla tasarlanırken, kaplama ise aşınmaya karşı direnç, ısı yükleri ve korozyondan sorumludur.

Tribolojik kaplamalar denince, taban malzemesinin sürtünme ve aşınma performansını belirlemede rol oynadığı bilinen yeteri kadar ince kaplamalar anlaşılmalıdır. Bu yüzden, tribolojik davranış üzerinde taban malzemesinin çok az veya hiç etkili olmayan çok kalın kaplamaları bu konunun dışında tutmak gerekir.

Kaplama prosesleri, kaplanan fazın haline göre genel olarak dört gruba ayrılabilir- gaz, çözelti, sıvı ve katı. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi, herbiri değişik özelliklere sahip dört değişik bölge ayırılabilir[19].

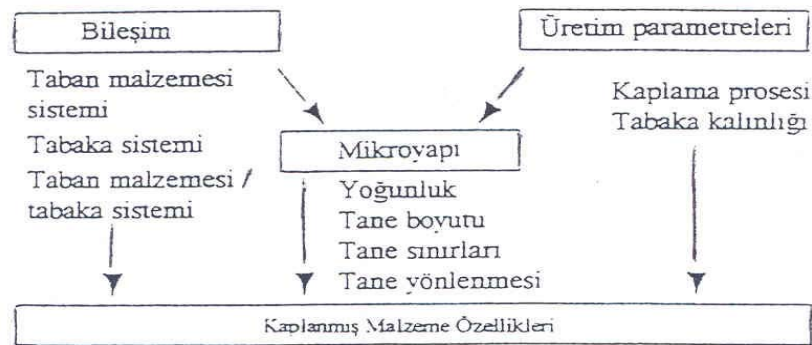


Şekil 2.2: Kaplanmış yüzeyin değişik bölgelerinde tribolojik olarak önemli özellikler[19].

Tribolojik gereksinimleri karşılayabilmek için kaplanmış yüzey, örneğin sertlik, elastisite, kayma dayanımı, kırılma tokluğu, ısıl genleşme ve yapışma gibi özelliklerin uygun bir birleşimine sahip olmalıdır.

Alt malzeme ve kaplamanın ihtiyaç duyduğu özellikler, malzemenin bileşimini ve mikroyapısını, bunların yanısıra porozitesi ve homojenliği tarafından belirlenen malzeme mukavemeti ve ısıl özelliklerini içerir. Aralarındaki arayüzeyde, birleşme yerinin yapışması ve kayma dayanımı önemli yer tutar. Kaplamanın yüzeyinde ise, kayma dayanımının yanısıra kimyasal reaktiflik ve pürüzlülük göz önüne alınmalıdır.

Yüzey tasarımında başlıca problem, kaplama taban malzemesi ara yüzeyinde iyi yapışma ve karşı yüzeyle hiçbir yüzey etkileşimi olmaması veya kaplamanın yüksek sertlik ve tokluğu gibi birçok istenen özelliğin kolaylıkla aynı zamanda elde edilemez olmasıdır. Sertlik ve mukavemet artışına, çoğunlukla tokluğun ve yapışmanın azalması eşlik eder. Bu yüzden son kaplama tasarımı, kaplama sisteminin özellikleriyle ilgili birçok değişik teknik ihtiyaç ve kaplamanın ürün üzerine kaplanmasıyla ilgili ekonomik gereksinimler arasında her zaman bir uyum oluşturur. Kaplama malzemesi özelliklerini belirleyen faktörler Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, kaplama prosesi ve kalınlığı gibi malzeme sisteminin ve üretim parametrelerinin birleşimidir. Bunların herbiri, örneğin yoğunluk, tane boyutu, tane sınırları ve tane yönelmesi kaplamanın mikroyapısını belirler[19].



Şekil 2.3: Kaplanmış yüzeylerin malzeme özelliklerini etkileyen faktörler[19].

Triboloji, kesinlikle disiplinler arası yaklaşımlara gereksinim duymaktadır. Farklı ilgi alanlarına sahip insanlar sürtünme ve aşınma üzerinde çalıştıkları zaman, sahip oldukları bilgiyi en iyi şekilde topluca yansıtabilirler (Tablo 2.1)[2].

Tablo 2.1: Triboloji: Disiplinler arası bir yaklaşım[20].

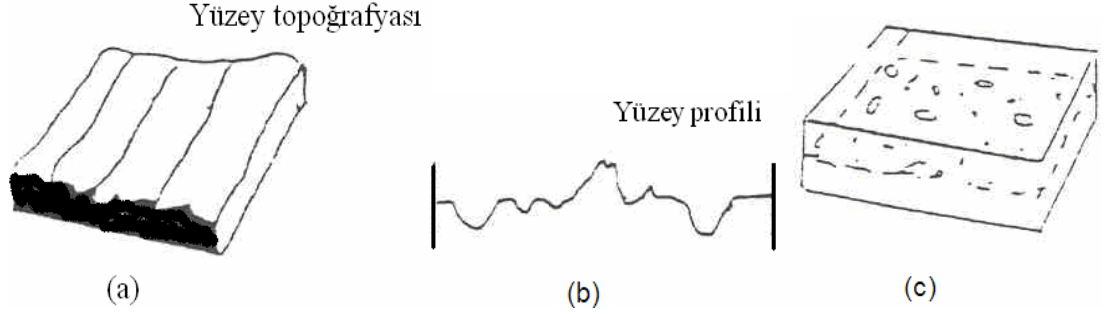
Makina mühendislerinden elde edinilen bilgiler <ul style="list-style-type: none">• Sürtünme katsayısı, aşınma hızı• Elastisite modülü• Poisson oranı• Isıl genleşme katsayısı• Isıl iletkenlik, yoğunluk, spesifik ısı• Çekme dayanımı, yorulma sınırı	Tribolojist'ten elde edinilen bilgiler <ul style="list-style-type: none">• Gerilme ve sıcaklık bölgeleri• Yük taşıma prosesi
Malzeme bilimcisinden elde edinilen bilgiler <ul style="list-style-type: none">• Bileşim, sertlik• Matris- ikinci faz partiküllerin yapışması• Kristallografik yapı, iç gerilme profili	Yüzey bilimcisinden elde edinilen bilgiler <ul style="list-style-type: none">• Kaplama prosesi, kaplama kalınlığı• Kaplama- taban malzemesi sertliği• Kaplama-taban malzemesi yapışması, arayüzü

2.2 Yüzey Karakteristikleri

Mühendislik amaçlarıyla kullanılan tipik bir metal yüzeyi, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi girintiler ve çıkıntılar içeren, eğimlerin yaklaşık 5° civarında olduğu ve ender olarak 30°'den dik olduğu bir yüzey profiline sahiptir. Bir girintinin dibinden bir çıkıntının en üstüne kadar olan yükseklik farkı, tipik olarak 0.1-3 µm arasındadır.

Mühendislikte bir yüzeyin pürüzlülüğünü ölçmek için en yaygın olarak kullanılan parametre, ortalama yüzey pürüzlülüğü R_a veya merkez çizgi ortalaması değeridir. Basit olarak, profilin orta çizgiden aritmetik ortalamasının sapmasıdır. Bunun dışında birkaç yüzey pürüzlülüğü parametresi daha kullanılmaktadır. Örneğin, grinti-çıkıntı arası yükseklik değeri R_1 gibi. Bunların farklı açılardan tribolojideki faydaları, Whitehouse, Moore, Czichos, Williamson ve O'Connor tarafından tartışılmıştır[20]. Fakat yüzey pürüzlülüğünü, sürtünme ve aşınma üzerindeki etkisine göre tam olarak karakterize etme ihtiyacını tam olarak karşılayan uygun bir parametre bulmak çok

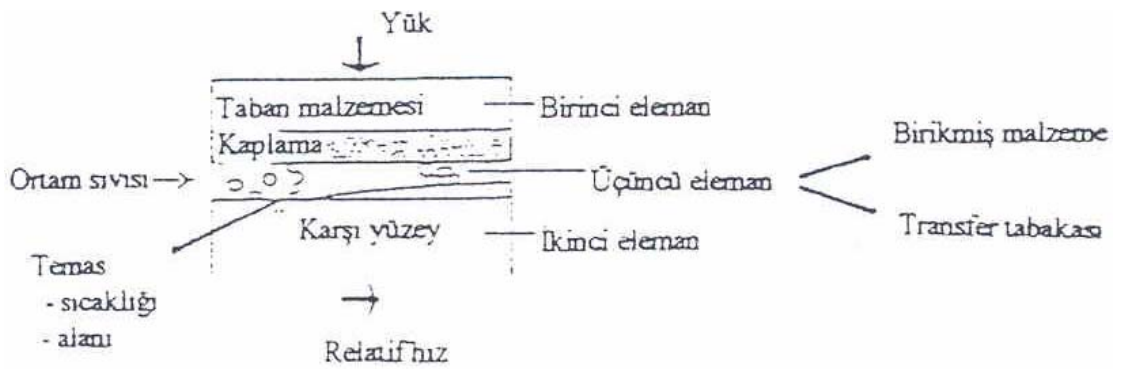
zor olmuştur. Özellikle yağlamalı temaslarda, yüzeyde bulunan olukların yönü gibi topoğrafik görünümü de göz önüne alma gerekliliği vardır[20].



Şekil 2.4: Bir yüzeyin şekli, a) yüzey topoğrafyası ve b) yüzey profili tarafından karakterize edilir. Temasta bulunan iki yüzey için c)'de gösterilen gerçek temas alanı, gözle görülebilen temas alanından oldukça düşüktür[20].

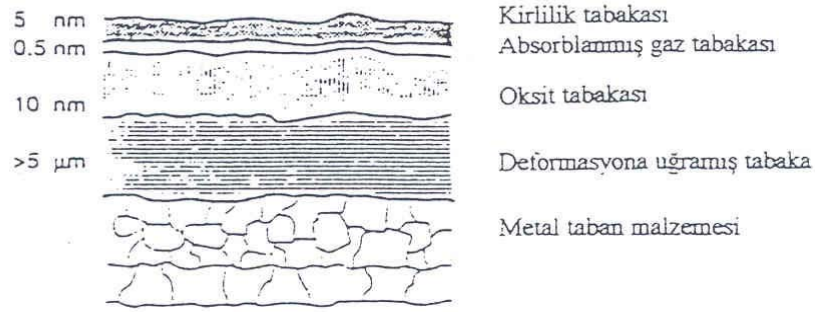
Bir yüzey, diğeri üzerine konulduğu zaman yüzeyler arasında ilk temas, yüzeyler üzerinde bulunan en yüksek çıkıntıların üst noktalarında meydana gelecektir. Birbirleri üzerine bastırılmış iki metalik yüzey, Şekil 2.4 c'de gösterildiği gibi, yüzey alanlarının belki de sadece %10'u kadar gerçek bir temas alanına sahiptirler.

Şekil 2.5'te ise, ilk iki cisim ve içinde bulunulan ortam arasındaki bir etkileşim sonucunda meydana gelen üçüncü bir cismin, temas koşullarında değişiklikler ortaya çıkarabileceği görülmektedir.



Şekil 2.5: Mühendislik sistemlerinde gerçek temas koşullarının şematik gösterimi[2].

Bir yüzeyin kimyasal ve fiziksel yapısı, malzemenin bileşimine ve içinde bulunduğu ortama bağlıdır. Mühendislik sistemlerinde bulunan gerçek malzeme yapısı, şematik olarak Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Bir metal yüzeyi; deformasyona uğramış bir tabaka, bir oksit tabakası, absorblanmış gaz tabakası ve kirli bir tabaka içerir. Oksit tabakası, metale bağlı olarak taban malzemesi içine yayınabilir[19].

İşlenmiş mekanik parçalar, işleme prosesine bağlı olarak kitlesel halde bulunan malzemelerden farklı özelliklerde bir yüzey tabakasına sahiptirler. İşleme sırasında yakın yüzey bölgesine giden enerji, deformasyon sertleşmesine, yeniden kristalleşmeye ve tekstür yapısında değişikliğe yol açar. Metal yüzeylerinin deformasyona uğramış tabakası üzerinde metalik bir oksit olabilir; örneğin Fe; Fe_2O_3 , Fe_3O_4 veya FeO. Bir alaşım yüzeyinde bulunan oksitler, alaşım elementlerinin bileşimine, oksijene olan afinitesine, oksijenin yüzey tabakalarına yayılma kabiliyetine ve alaşım bileşiklerinin yüzeydeki segregasyonuna bağlıdır. Oksit tabakası üzerinde, absorblanmış gazların meydana getirdiği bir tabaka oluşur ve onun üzerinde ise bir kirli tabaka vardır. Yüzeylerin fiziksel ve kimyasal yapısı, Buckley ve Suh tarafından çok detaylı bir şekilde açıklanmıştır[19]. Elipsometri gibi yeni teknikler, kalınlığın istenilen bir anda ölçülebilmesine ve bir yüzeyin en üst tabakasının temas bölgesinde ortaya çıktığı anda bileşiminin analizine olanak sağlamıştır[19].

3. KATI CİSİMLERİN TEMASI: SÜRTÜNME VE AŞINMA

Bilindiği gibi, iki malzeme birbirlerine temas edecek şekilde yerleştirilirse, bu malzemelerden birini diğeri üzerinde kaydırmak için uygulanan kuvvete sürtünme kuvveti direnç gösterir.

Sürtünme de, birbiri üzerinde hareket eden malzemelerden birinin diğere karşı gösterdiği dirençtir. İki malzeme arasında sürtünmeyi ifade eden terim sürtünme katsayısıdır[9].

Kaymayı başlatan kuvvet (F_s) ile, temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (F_n) arasında :

$$F_s = \mu_s \cdot F_n \quad (3.1)$$

bağıntısı mevcuttur. Burada μ_s , statik sürtünme katsayısıdır.

Kayma başladıktan sonra, sürtünme kuvvetinde bir azalma olur ve bu durumda :

$$F_k = \mu_k \cdot F_n \quad (3.2)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada $\mu_k (< \mu_s)$ kinetik sürtünme katsayısıdır.

Sürtünme alanına sahip olan katı cisimlerin (makina parçalarının) karşılıklı etkileri ancak karşı karşıya bulunan parçaların yüzey geometrilerinin hesaba katılması ile anlaşılabilir. Pürüzlü yüzeylerin temas teorisi elastik ve plastik temas için sorunların klasik çözümlerine dayanmakta, temas eden yüzeylerin “kalitesi” önemli olmaktadır. Bu teoride genellikle katı cisimlerin doğru geometrik şekil ve ideal fiziko-mekanik niteliklere sahip oldukları farz edilir; oysa ki gerçekte makina parçaları ideal yüzey özelliklerine sahip değildir[21].

3.1 Sürtünme Katsayısının Tarihsel Gelişimi ve Sürtünme Kavramının Modellenmesi

Sürtünme Latince “fricare” kelimesinden gelmektedir ve kronolojik olarak bakıldığında sürtünmeyle ilgili çalışmalar ilk olarak Leonardo da Vinci tarafından yapılmıştır[11,22,23]: Bulunan kavramlar sürtünmenin temel kanunları olarak kabul edilebilir[11,23]:

- a) Statik sürtünme dinamik sürtünmeden büyüktür,
- b) Sürtünme kayma hızından bağımsızdır,
- c) Sürtünme kuvveti uygulanan normal kuvvetle doğru orantılıdır,
- d) Sürtünme kuvveti görünen temas alanından bağımsızdır.

Sürtünmeye ait kronolojik sıra Tablo 3.1.’de gösterilmiştir[23]. Sürtünmeyle ilgili iki okul ortaya çıkmış ve sürtünmeyle ilgili gelişmeler bu iki okul tarafından gerçekleştirilmiştir: Bu okullar, İngiliz ve Fransız okullarıdır[11].

Fransız okulu 1699’da Amontons’un çalışmalarıyla ortaya çıkmıştır[11]. Amontons cisimleri rijit kabul ederek, sürtünmenin izahını, “Kayma esnasında parçaları, yüzey pürüzleri yüksekliğince kaldırmak için gerekli enerji” şeklinde yapmış ve bütün cisimler için sürtünme katsayısını 1/3 olarak vermiştir[24].

İsveç’li matematikçi ve teolog Euler; Amontons kanunlarını analitik anlamda formüle etmeye çalışmıştır. Sürtünme katsayısı olarak “ μ ” kavramını ilk kullanan Euler’dir. Aynı zamanda; Euler, statik ve dinamik sürtünme katsayısı kavramları arasındaki farkları da ortaya koymuştur. Fransız fizikçi ve mühendis Coulomb, Amontons’un kanunlarını deneysel olarak ispatlamıştır. Coulomb 1785’te, Amontons’un bulduğu sonuçları doğrulamış ve ayrıca sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu da gözlemlemiştir. Bunlara ilaveten “Coulomb Kanunu” adı verilen teoriye göre Coulomb, statik sürtünme katsayısını kaymayı başlatma kuvveti, kinetik sürtünme katsayısını da hareketi devam ettirme kuvveti olarak tarif etmiştir[9]. İngiliz okul, yine bir Fransız tarafından, Desaguliers’in çalışmalarıyla başlamıştır. Tribolojik çalışmalara önce kohezif, daha sonra da adhezyon olarak geçen olayın kavramlarını açıklamıştır. Metaller arasındaki sürtünme olayları, basit gibi görünmekle beraber, aslında çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu olayları, izah ve formüle etmek için tarihsel gelişim içerisinde, bir çok teori ileri sürülmüştür [25].

Tomlinson (1929) ve Hardy (1936) sürtünmeyi yüzey tesirleri ile izah etmek üzere moleküler teoriyi, Schurman (1961) elektrostatik teoriyi ileri sürmüşlerdir. Her iki teori de büyük aşınma parçalarını izah edememektedir. Yeni yapılan araştırmalar sürtünme esnasında yüzeyden itibaren moleküler boyutlara nazaran büyük derinliklerde aşınma etkilerinin olduğunu göstermiştir[9].

Tablo 3.1: Sürtünmeye ait kronolojik gelişim[23].

Bilim Adamı	Tarih	Bulgu
Leonardo da Vinci	1495	Sürtünme kuvveti görünür alandan bağımsızdır. Sürtünme kuvveti uygulama kuvvetiyle doğru orantılıdır. Sürtünme katsayısı malzemeler için 0.25'dir.
Robert Hooke	1685	Yüksek elastik modüllü karşı malzemeler sürtünmeyi azaltır.
Isaac Newton	1687	Yağlı sistemlerdeki sürtünme yağlayıcının özelliğine bağlıdır.
Guillame Amontons	1699	Sürtünmenin alandan bağımsızlığı bir kez daha ispatlanmıştır. Farklı malzemelerin farklı sürtünme karakteristikleri vardır. Sürtünme yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanmaktadır.
J.T.Desagulies	1725	Sürtünmeyle ilgili ilk veri tabanı oluşturulmuştur. Yüzeyler arasındaki adhezyonun etkisi anlaşılmıştır.
Lonnard Euler	1750	μ sembolünün sürtünme katsayısı olarak kullanılması. Statik sürtünme katsayısı kavramının açıklanması
A.Coulomb	1785	Amontons kanunlarını deneysel olarak ispatlamıştır.
G.Rennie	1825	Metal-Metal çiftlerinin sürtünme katsayısının 1/6 olduğu. Yumuşak metallerin sürtünme katsayısının daha yüksek olduğu. Yağlı metallerin sürtünme katsayısının yağlayıcıya bağlı olduğu tezleri ortaya atıldı.

Tomlinson ve Hardy moleküler kuvvetler kavramını geliştirmişlerdir. Daha sonra Bowden ve Tabor çalışmalarını sürtünmenin ana nedeni olan adhezyon üzerinde yoğunlaştırmışlardır[11]. Günümüze kadar, kuru sürtünme hali için ileri sürülen teoriler içerisinde en çok benimsenen teori, deney sonuçları ile büyük ölçüde uygunluk gösteren ve üzerinde en fazla durulan, Bowden ve Tabor'un (1950) "Kaynama-Kesme-Sürme" teorisidir[24]. Bowden ve Tabor[26], sürtünmenin meydana gelmesinde en büyük etkenin, yüzeylerin birbirine değen tepciklerindeki adhezif veya kohezif bağlar olduğunu, bunlara ilaveten tepciklerdeki deformasyonların da direnç artırıcı etkilerinin bulunduğunu ileri sürmüşlerdir.

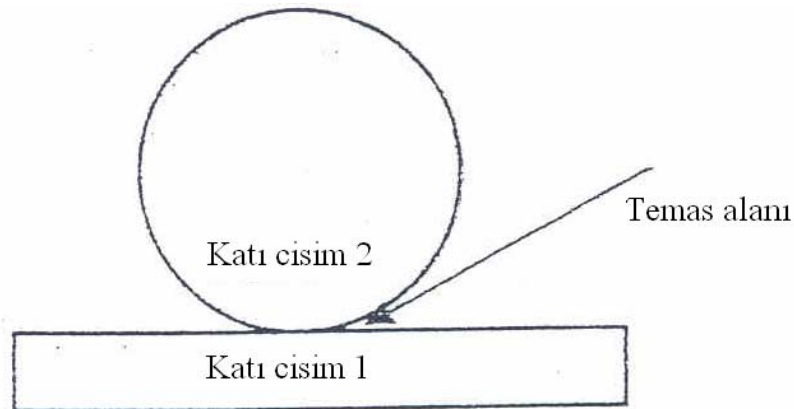
3.2 Pürüzsüz Yüzeylerin Teması

Temas alanında gerilme değerine bağlı olarak, iki katının teması ya elastik, ya da plastik olur. Şekil 3.1'de, iki farklı katı cismin ideal teması gösterilmiştir.

Elastik katılarda temas şekil değiştirmeleri teorisinin iki durumu göz önüne alınır. İlki, başlangıç temasının bir noktada, diğeri bunun bir çizgi boyunca olduğu haldir.

Sorunlar, aşağıdaki varsayımlara göre çözülür:

- Temas eden cisimler pürüzsüz ve homojendir,
- Temas alanında sadece elastik şekil değiştirmeler meydana gelir,
- Temas kuvvetleri birleşme yüzeyine dikeydir,
- Temas alanı, temas eden yüzeylere göre küçüktür.



Şekil 3.1: Katı cisimlerin ideal teması[27].

Yüzey etkileşim davranışına etkili olan parametreler, temas eden cisimlere ait kütleli niteliklere, bu cisimlerin temas eden yüzeylerinin niteliklerine bağlıdır[28].

Kütleli nitelikler arasında en önemlisi, akma mukavemeti ve nüfuz etme sertliği plastik mukavemet parametreleridir. Daha sonra malzemenin gevrekliğini gösteren, örneğin çelikte kırılma gerilmesinin basmada akma gerilmesine oranı, ya da çekmede plastik şekil değiştirme miktarı önemli olmaktadır. Yüksek hızlarda kaymada, ısıl nitelikler de önem kazanmaktadır.

Yüzey nitelikleri arasında ilk önce kimyasal reaktivite ya da yüzeyin alt tabanından farklı kimyasal bileşimde bir yüzey filmi (örneğin alüminyumun alüminyumoksit yüzey filmi gibi) edinme eğilimi önemlidir. Diğer bir husus ta cisimlerin bulunduğu ortamla etkileşimidir. Örneğin, çevreden moleküller absorbe etmesidir (H absorpsiyonu).

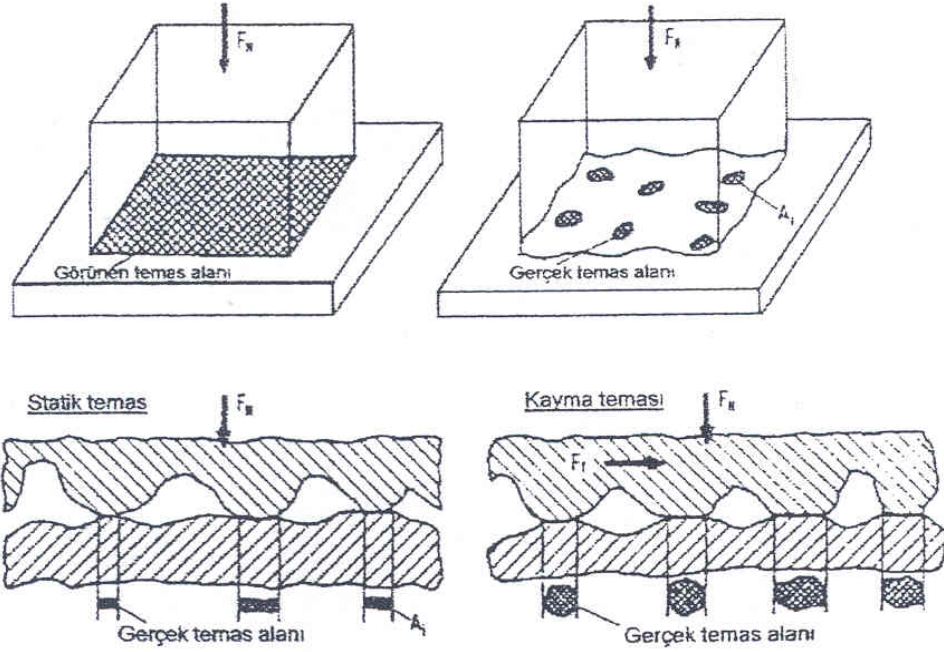
Bu temel parametreler arasındaki yakın ilişki, sürtünme ve aşınmaya karşı makina tasarımında seçilecek malzeme cinslerinde ciddi sınırlandırmalar getirir.

3.3 Pürüzlü Yüzeylerin Teması

Üzerlerinde normal bir yükün bulunduğu iki pürüzlü yüzey temas haline geldiğinde, ilk temasa geçen noktalar yüzey üzerindeki düzensizliklerin doruk noktalarıdır. (Şekil 3.2). Yük arttıkça daha düşük yükseklığe sahip doruklarda temasa geçerler. Temasa geçtikten sonra, yüzey doruklarının şekilleri değişir. Bu şekil değişikliği başlarda elastik olur. Yük, belli bir kritik değeri aştığında, şekil değiştirme plastik olmaya başlar. Temas halinde en yüksek doruk çiftleri en fazla şekil değiştirecekken, ortalamasının altındaki doruklar temas etmemiş olacaklardır.

Değen yüzeylerin farklı sertliklere sahip olması durumunda ise, daha sert yüzeyin dorukları, daha yumuşak düzeye dalarlar. Yumuşak olan cismin dorukları ezilir ve şekilleri değişir. Temasın özellikleri sert malzemenin yüzey şekil hatalarından ve yumuşak malzemenin mekanik özelliklerinden etkilenecektir.

Değen yüzeyler birbirlerinin üzerlerinde kayarlarsa, önce birbirlerine alışırlar, geometrileri değişir. Bu değişimler sırasında bazı dorukların (özellikle sert ve gevrek olan malzemenin) kırılması ile aşındırıcı ikinci elementler (aşındırıcı parçacıklar) sisteme katılmış olur.



Şekil 3.2: Malzemenin görünür ve gerçek temas alanı[17].

3.4 Makina Parçalarının Yüzey Kalitesi

Bir makina parçasının yüzey tabakasının nitelikleri, parçanın yapıldığı malzemenin hacimsel niteliklerinden epeyce farklıdır. Dış tabaka atomlarının meydana getirdiği kuvvet alanı, yüksek bir absorpsiyon kabiliyetine sahiptir; bunun sonucu olarak yüzey genel olarak absorbe olmuş, hava, su ve çeşitli organik madde tabakaları ile kaplı olur. Absorbe olmuş yüzey-aktif maddeler, yüzeyde sıralanmış atomlar arasındaki etkileşimi zayıflatma yönünde etki ederler. Mikroçatlaklar içerisine nüfuz eden yüzey-aktif maddeler bir basınç meydana getirirler. Böylece çatlakların daha genişlemesine sebep olarak dış tabakanın mukavemetini zayıflatırlar.

Bir metal yüzeyi mutlak olarak bir oksit filmiyle kaplı olup, bunların oluşumları özellikle yüksek sıcaklıklarda daha da şiddetlidir.

3.5 Kayma Sürtünmesi

Temasta olan ve birbirlerine göre izafi hareket yapan iki katı cismin temas eden yüzeyleri arasında sürtünme ve buna bağlı olarak oluşan aşınma ile sıcaklık yükselişi ve enerji kaybı meydana gelir. Bu olayların etkisinin azaltılması, modern teknolojinin önemli bir problemidir.

Sürtünmenin her türlü oluşumu günlük hayatımızda daima görülür. Yürüyebilmemiz bile sürtünmeye bağlıdır. Roketler istisna edilirse, bütün nakil vasıtaları sürtünme sayesinde çalışabilmektedir. Bilhassa, yol stabilizesi ve frenleme bakımından otomobil tekerleklerinin yola olan sürtünmelerinin fazla olması gerekmektedir. Her türlü mekanizma ve makinalarda veya hareketin bulunduğu her yerde sürtünme mevcuttur. Prof. Vogelpohl, dünyada üretilen enerjinin 1/3-1/2 arasındaki oran kadar sürtünmeye harcadığını tahmin etmektedir[17].

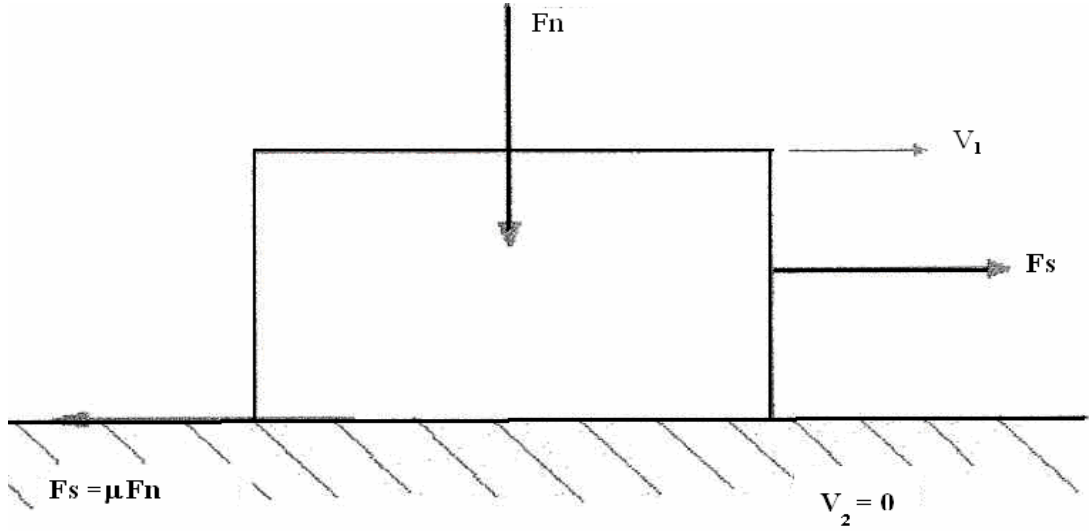
Kavrama, fren, sürtünmeli çarklar, metal haddeleme merdaneleri vs. gibi bilhassa sürtünme ile çalışan makina elemanları bir kenara bırakılırsa, bütün izafi hareket yapan yüzeylerde olabildiğince sürtünmenin, dolayısıyla aşınmanın, azaltılması gerekmektedir. Bu sebeple, bu yüzeylerin uygun yağlayıcı maddelerle yağlanmalarına çalışılır. Yağlayıcı maddeler çalışma şartlarına bağlı olarak katı, sıvı ve gaz (örneğin hava) olabilir. Sürtünme neticesinde meydana gelen ve daha sonraki konularda izah edilecek olan muhtelif aşınma mekanizmaları ile makine parçaları kısa zamanda aşınıp kullanılamaz hale gelmektedir.

Sürtünmenin ve aşınmanın makine ömrü ile bu yakın ilgisinden dolayı konstrüksiyonlarda kullanılacak malzeme ve uygun yüzey işlemin veya yağlama şartlarının çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. İzafi hareketin kaymadan ibaret olması durumunda 3 tür sürtünmeden bahsedilir[29].

- Kuru sürtünme
- Sınır sürtünmesi
- Sıvı sürtünmesi

Genel anlamda kuru sürtünme, birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya (arada yağlayıcı madde bulunmadan) temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir (Şekil 3.3). Atmosfer içinde bulunan bütün madeni parçaların yüzeylerinde oksit, su buharı, endüstriyel buharlar vs. gibi yüzey filmleri mevcuttur.

Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulursa iki durum ortaya çıkar; her iki yüzey yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılırsa sıvı sürtünme, yağlayıcı tarafından tamamen ayrılmaz ise sınır sürtünmesi meydana gelir.



Şekil 3.3: Kuru sürtünme[30].

Aslında yukarıda bahsedilen sürtünme tiplerinden sadece sıvı sürtünme diğerlerinden teorik ve analitik bakımdan tam olarak ayrılabilir. Kuru ve sınır sürtünmesine gelince, bunlar fiziksel olarak birbirlerinden farklı olan geniş sürtünme bölgelerini kapsarlar. Bu iki bölge arasında belirli bir sınır olmamakla beraber; yüzeyler arasına istenilerek bir yağlayıcı madde konulur ve sıvı sürtünme şartları oluşturulamazsa sınır sürtünmesi; yağlayıcı madde konulmadığı hallerde ise kuru sürtünme hali ortaya çıkar.

3.5.1 Kuru sürtünme

Teorik olarak kuru sürtünmeyi ifade etmek için Şekil 3.3'te görülen model kullanılmaktadır.

Buna göre izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin (F_n) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasındaki harekete karşı

$$F_s = \mu \cdot F_n \quad (3.3)$$

değerinde bir sürtünme kuvveti (F_s) oluşur. Burada; μ - sürtünme katsayısıdır.

Genel ifadeye göre sürtünme, izafi hareket yapan veya hareket yapabilme olanağına sahip olan yüzeylerde oluşur. Şekil 3.3'teki cisimlerin herhangi birine teğetsel bir F kuvveti tatbik edilirse, iki durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda F kuvvetine rağmen cisimler birbirini üzerinde kaymazlar. Bu durumda Newton kanununa göre F_s sürtünme kuvveti, F kuvvetine eşit ve ters yöndedir.

$$F_s = F \quad (3.4)$$

İkinci durumda F kuvvetinin etkisi altında yüzeyler birbirini üzerinde kayarlar. Kinematik veya doğrudan doğruya sürtünme denen bu halde F_s sürtünme kuvveti, F kuvvetinden daha küçüktür. Pratikte sürtünme denince akla gelen bu tür sürtünmedir, aşınma enerji kaybı ve sıcaklık yükselişi gibi olaylar bunun sonucunda oluşur[28, 30].

“Coulomb- Amontos kanunu olarak tanınan 3.1 bağıntısına göre[30]:

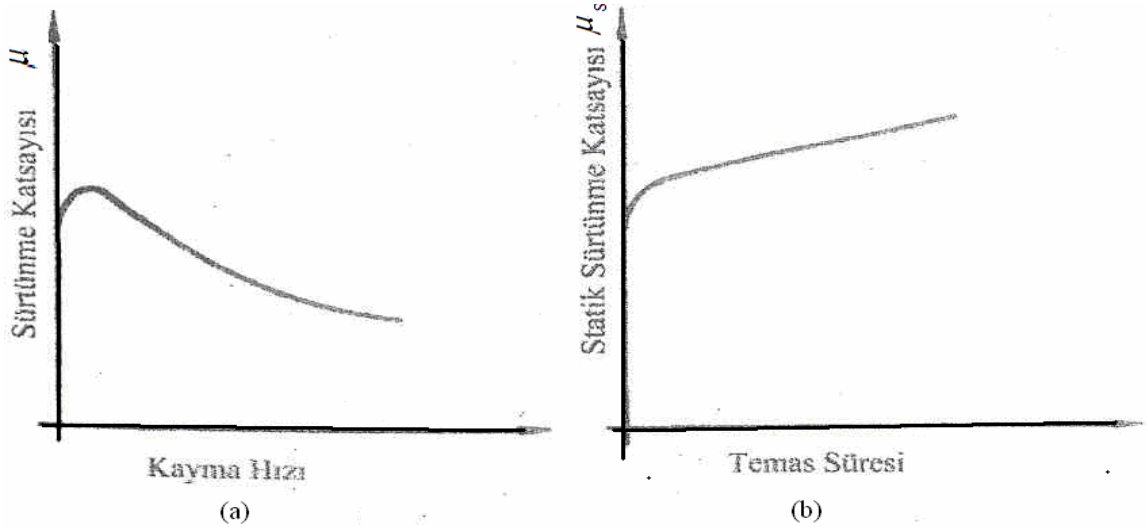
a) Sürtünme kuvveti normal kuvvetle orantılıdır; böylece sürtünme katsayısı

$$\mu = F_s / F_n \quad \text{olarak tanımlanır.} \quad (3.5)$$

b) Sürtünme kuvveti nominal temas alanına bağlı değildir.

c) Sürtünme kuvveti kayma hızından bağımsızdır.

d) Sürtünme katsayısı temastaki malzeme çiftine bağlıdır.

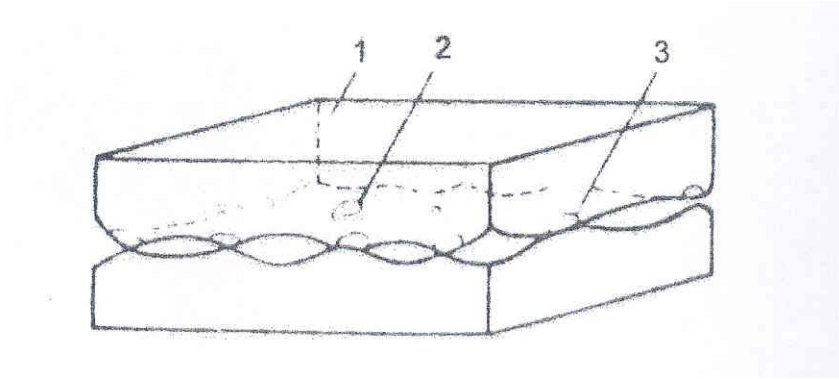


Şekil 3.4: Sürtünme katsayısının a) kayma hızı ve b) temas süresi ile ilişkisi[30].

Statik sürtünme katsayısı (μ_s), genellikle dinamik sürtünme katsayısından (μ_d) daha büyüktür. Kayma hızı arttıkça, dinamik sürtünme katsayısı, az da olsa, azalır. (Şekil 3.4 a). Buna karşılık normal kayma hızlarında hıza göre sürtünme katsayısının değişimi çok az olduğundan, sürtünme katsayısı sabit sayılabilir. (Şekil 3.4 a)'da görüldüğü gibi, sürtünme katsayısının en büyük değeri hareketin başlangıcıdır. Dinamik sürtünme katsayısı kayma hızının bir fonksiyonudur. Buna karşılık statik sürtünme katsayısı, temas süresinin bir fonksiyonudur (Şekil 3.4 b).

Sürtünme olayı incelenirken, yani bir kuru sürtünme teorisi kurulurken, modeldeki (Şekil 3.3) temas yüzeylerinin pürüzlü oldukları ve kimyasal olarak tam temiz olmadıkları dikkate alınmalıdır.

Temas yüzeylerinin pürüzlülüğü nedeniyle gerçek temas alanı A_g (Şekil 3.5) pürüzlülük mertebesinde küçük ve kısmi alanlardan ibaret olup temas yüzeyinin sınırlarını tayin eden geometrik alandan (A) çok daha küçüktür.



Şekil 3.5: Gerçek yüzey temasının şematik gösterimi[30].

Yapılan incelemeler gerçek yüzey alanının $A_g = (1/500-1/10.000)$ arasında değiştiğini göstermektedir. Gerçek temas yüzeyi, pürüzlülüğe bağlı olduğundan, bunun büyüklüğü yüzey işleme yöntemlerine bağlıdır. Bunun yanı sıra, gerçek temas yüzey üzerindeki F_n yükleme kuvveti büyük rol oynamaktadır. Kuvvet büyüdükçe, pürüzlerin deformasyonu nedeniyle temas yüzeyleri artar. Bowden ve Tabor'a göre temas yüzeylerini oluşturan pürüzlerin plastik deformasyon yaptıkları kabul edilirse, gerçek yüzey;

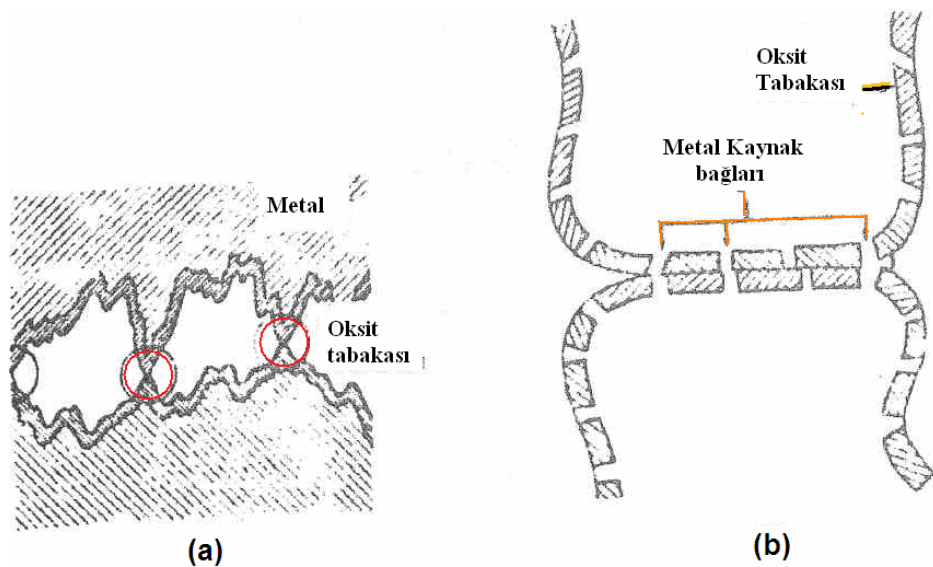
$$A_h = F_n / HB \quad (3.6)$$

olarak bulunur. Burada *HB*, temasta olan yüzeylerden yumuşak malzemenin yüzey sertliğidir.

Yüzeylerin durumuna gelince, yapılan inceleme ve deneylere göre kuru olarak tarif edilen katı cisimlerin, aslında ortam atmosferinin ve bu atmosferi teşkil eden elemanların etkisinde olduğunu, oksit, yağ, su buharı, pislik vs. gibi yüzey tabakaları ile kaplı olduğunu bilmeliyiz. Absorbsiyon yolu ile oluşan ve ancak elektron mikroskopları ile varlığı tespit edilebilen bu tabakalar katı yüzeylere kuvvetle bağlanabilmekte ve yalnız çok etkin kimyasal veya fiziksel yöntemlerle temizlenebilmektedir. Ayrıca yüzeylerde oksit tabakası çok hızlı oluşmaktadır, temizlenmiş yüzeyler atmosfere maruz kalırsa yüzeylerde derhal bir oksit tabakası oluşmaktadır[9,29].

Teknikte kullanılan malzemelerin yüzeyleri çeşitli kimyasal bileşikleri ihtiva eden, tabii bir absorbsiyon tabakası ile kaplıdır. Bunun sonucu olarak doğrudan doğruya temas eden yüzeyler arasında daima bu tabakalar bulunur.

Yukarıdaki olaylara dayanarak, sürtünme mekanizması şu şekilde ifade edilebilir. Şekil 3.6 a'da gösterildiği gibi yük tatbik edilmeden önce temas halindeki tabii tabakalar arasında bir bağlantı oluşur. Yük tatbik edildikten sonra tabakanın bir kısmı kopar (Şekil 3.6 b) ve buradaki küçük temas alanlarında metal kaynaklanması meydana gelir. İzafi hareket yapan yüzeylerde sürtünme, metal kaynak bağlar ile yüzey tabakaları arasındaki bağlantıların oluşturduğu dirençtir. Sürtünme kuvveti, hem kaynak bağlarını, hem de diğer yüzey bağlantılarını koparan kuvvettir.



Şekil 3.6: Temas yüzeyindeki oksit tabakası[30].

Sürtünme ile ilgili olarak;

- a. Sürtünme katsayısı, metal kaynak bağ teşkil etmiş olan temas noktalarının kayma mukavemetine ve bağlantıların bağ mukavemetine bağlıdır. Bağ mukavemetinin küçük, kayma mukavemetinin büyük olması halinde sürtünme katsayısı da küçük olur[28-30].
- b. Metal kaynak bağı teşkil etmiş olan temas noktalarının kayma mukavemeti, temas halindeki malzemelerin cinsine bağlıdır:
 - Birbiri ile kolayca alaşım yapabilen demir, krom ve nikel gibi sert malzemeler arasında kuvvetli kaynak bağları oluşmaktadır. Sürtünme katsayısı düzensiz olarak değişmekte, yüzeyler üzerinde izler oluşmakta ve bir yüzeyden diğerine malzeme transferi görülmektedir.
 - Benzemeyen ve birbiriyle ilgili olmayan malzemeler arasında daha hafif ve düzenli bir sürtünme oluşmakta ve yüzeyler üzerinde çok ince izler oluşmaktadır.
 - Birbiri üzerinde kayan malzemelerin biri sert, diğeri yumuşak (örneğin kalay, kurşun, indiyum ve bunların alaşımları) olduğu takdirde, yumuşak malzeme sert malzemeyi kendi parçacıklarından oluşan ince bir tabaka ile kaplar ve bu şekilde iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kaymış gibi olur. Yani yumuşak malzeme bir yağlayıcı madde gibi davranır. Pratikte kalay alaşımlarının çok iyi yatak malzemesi olması, bu olaya dayanır[29].

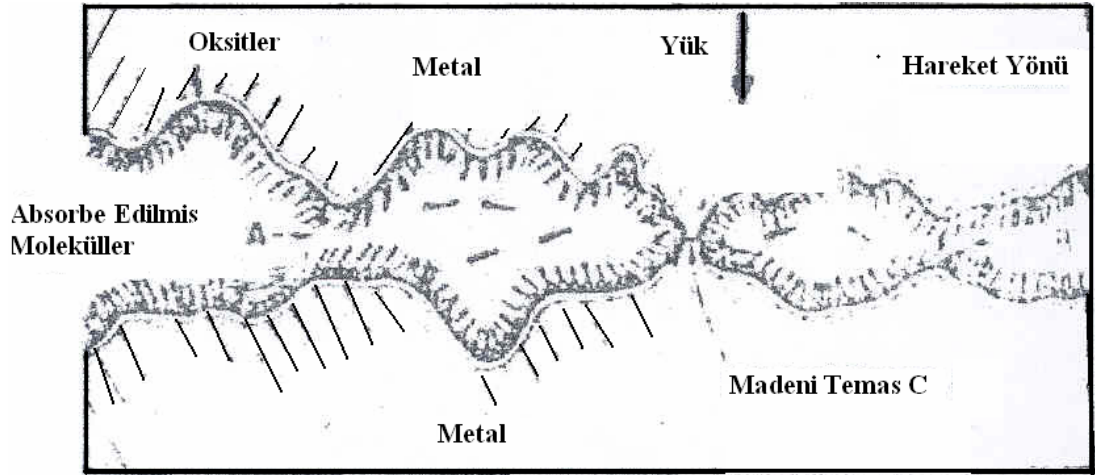
Şu halde, küçük bir sürtünme katsayısı elde etmek için malzemeler aynı veya birbiri ile kolayca alaşım yapabilen türde olmalıdırlar. Ayrıca, malzemelerin birinin sert, diğerinin yumuşak olması gerekir.

- c. Tabakanın kopma mukavemeti, sürtünme katsayısına büyük ölçüde etkili olur. Bu bakımdan, a ve b maddelerinde belirtilen hususlara göre çeşitli kimyasal bileşikler içeren yüzeyde esas olarak oksit tabakasının mukavemeti önemlidir.

3.5.2 Sınır sürtünmesi

Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok karşımıza çıkan sürtünme biçimidir.

Yüzeyler arasına bir bağlayıcı madde konulması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri, absorpsiyon olayının sonucu olarak metal yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışırlar (Şekil 3.7). Böylece yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kalınlığında absorpsiyon tabakaları oluşmaktadır. Yağın bu özelliğine ıslatma özelliği denir. Bu özellik yağ ve metal yüzeylerin karşılıklı etkilerine bağlıdır. Örneğin, çelik bir yüzeyi iyi bir şekilde ıslatmayan yağ, kalay yüzeylerde çok uygun sonuçlar verebilir.



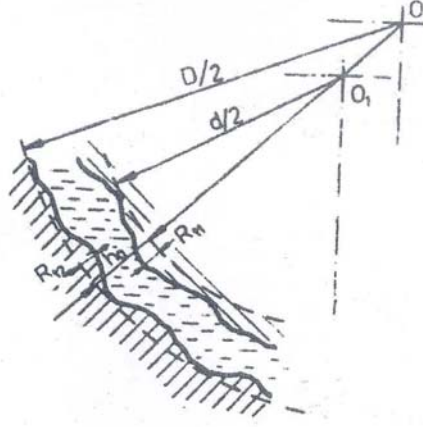
Şekil 3.7: Absorbe olmuş yağ film tabakası[30].

Yüzeyler üzerinde bir yağ tabakasının oluşmasında da, kuru sürtünmedeki tabii tabakanın oluşmasında olduğu gibi aynı olaylar rol oynar, fakat iki olay arasında nitelik olarak fark vardır. Tabii tabaka esas olarak oksit tabakasından meydana gelirken, sınır sürtünmesinde iki yüzey arasına konan yağ, film tabakası oluşturur. Yağ tabakasının oksit tabakaya göre kopma mukavemeti daha fazla olduğundan, doğrudan doğruya metal metale temas eden yüzeyler daha azdır[28].

3.5.3 Sıvı sürtünmesi

Sıvı sürtünmesinde metal yüzeyler arasındaki yağ tabakasındaki basınç, dış kuvveti dengeleyecek değere ulaşıncaya yüzeyler birbirinden tamamen ayrılır. Bu durum Şekil 3.8’de gösterilmiştir[31].

Böylece sıvı sürtünmesi esas itibari ile birbiri üzerinde kayan yağ tabakaları arasında oluşmakta ve tabakalar arasındaki kayma gerilmelerine bağlı olmaktadır.



Şekil 3.8: Sıvı sürtünme geometrisi[31].

3.6 Aşınma

Aşınma genellikle, temas eden yüzeylerden mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. Aşınma, katı hal temasında bulunan iki katı yüzeyin birinden veya her ikisinden malzeme kaybı prosesidir. Katı yüzeyler birbirlerine göre kayma veya yuvarlanma hareketi içine girdikleri zaman meydana gelir. İyi tasarlanmış tribolojik sistemlerde, malzeme kaybı çoğunlukla çok yavaş bir prosestir; fakat çok kararlı ve devamlıdır.

Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleşebilir. Bunlar; bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel anlamda oluşan ayrılmadır. Uygulamada aşınma kapsamına, daha çok yüzeyden fiziksel anlamda ayrılan malzemenin sebep olduğu hasarlar dahil edilmektedir[32-34].

Bir aşınma sisteminde, tribolojide belirtildiği gibi; Ana malzeme (aşınan), Karşı malzeme (aşındıran), Ara malzeme, Yük ve Hareket temel unsurlardır.

3.6.1 Aşınmanın tanımı

Aşınma, genellikle temas eden yüzeylerden mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. Standartlara, örneğin Alman DIN 50320 normuna göre aşınma, “Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulmasıdır” şeklinde tanımlanmaktadır. Benzer şekilde bir aşınma tanımı da aşınma ve erozyonla ilgili terminolojiyi içeren ASTM G40-93 standardında verilmektedir[35].

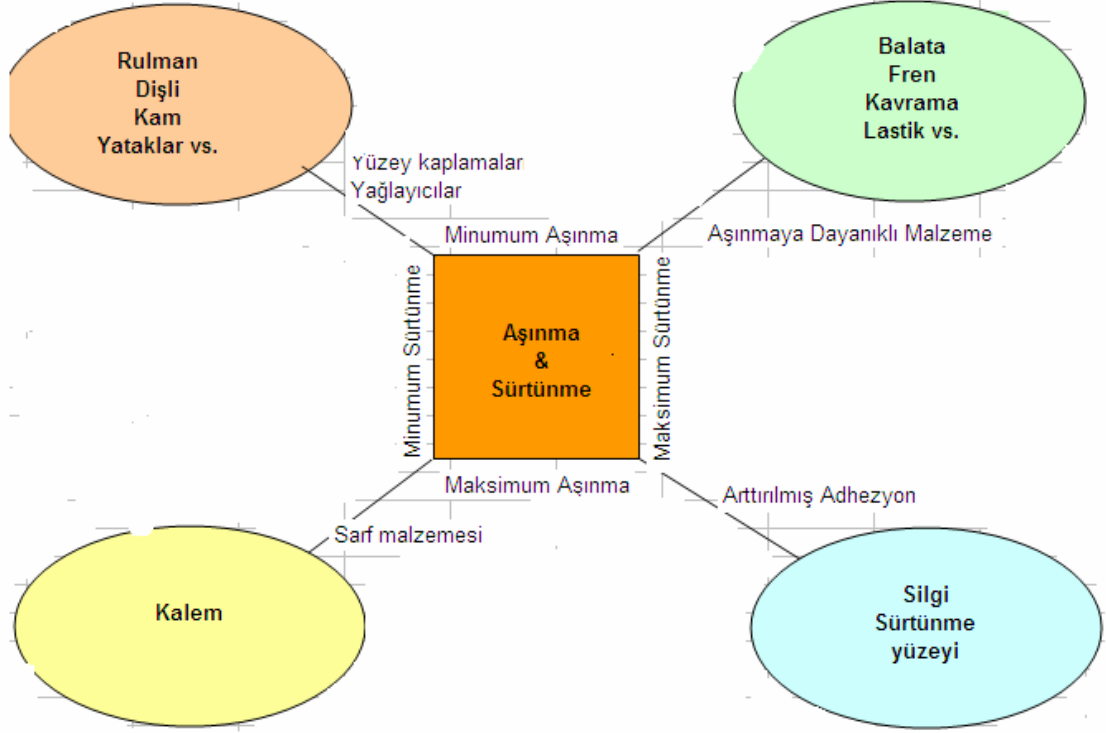
Bir aşınma sisteminde;

- 1) Ana malzeme (Aşınan),
- 2) Karşı malzeme (Aşındıran),
- 3) Ara malzeme,
- 4) Yük,
- 5) Hareket

aşınmanın temel unsurlarıdır. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte “Tribolojik Sistem” olarak adlandırılır. Bir tribolojik sistemin ilgi alanının şematik olarak gösterimi Şekil 3.9’da görülmektedir[36].

Bir aşınma sistemindeki önemli etkenlerden biri de, Şekil 3.9’da da görüldüğü gibi çevre şartlarıdır. Sistem elemanlarının nem veya korozyon etkileriyle karşı karşıya kalması, aşınmayı hızlandırır.

Aşınma, genellikle önceden bilinen bir hasar tipidir. Birbirleri ile temasta olan malzeme yüzeyleri oksit filmleri veya yağlayıcılar ile korunsalar bile, mekanik yüklemeler altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması, iki yüzeyin birbiriyle doğrudan temasına sebep olabilir. Bu temas sonucu oluşan sürtünme, malzemenin çalışma koşullarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya sebep olur. Bu hasar uygun yağlama, filtreleme, uygun malzeme seçimi ve uygun tasarım gibi faktörlerle en aza indirilebilir, fakat kesinlikle tümüyle önlenemez.



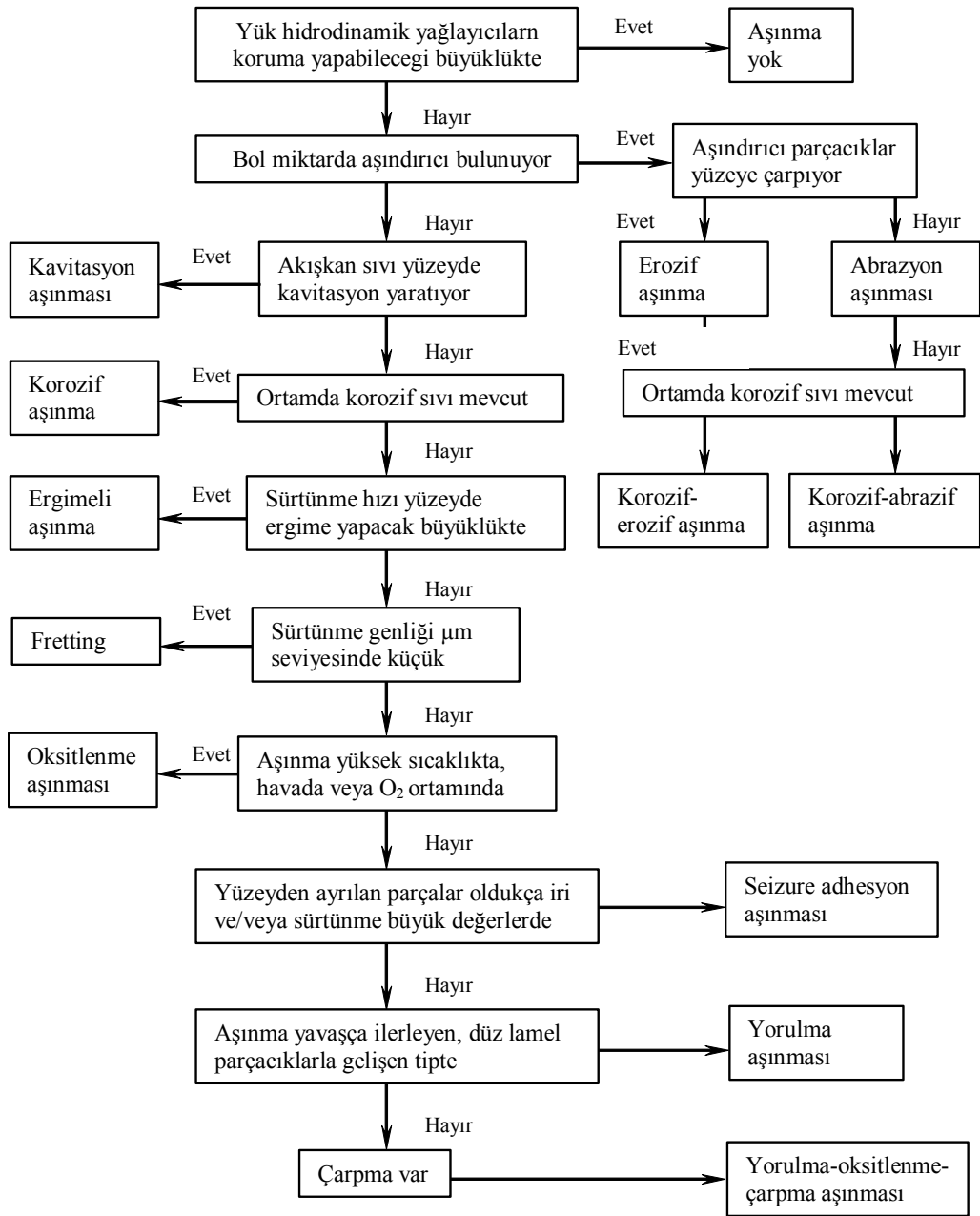
Şekil 3.9: Tribolojinin ilgi alanı[36].

Aşınma, çeşitli yönleri ile korozyona benzer. Bu iki hasar tipi de zamanla kendiliğinden gelişir, her ikisinin de oluşumu önceden bir derecede bilinebilir, her ikisinin de çeşitli tipleri vardır. Aşınma da korozyon gibi bir yüzey olayı olduğundan, yüzeyi etkileyen herşey aşınma davranışını da etkiler.

Aşınma, temelde bir yüzey hasarıdır. Aşınma hasarları kapsamına giren yüzeyden malzeme kaybı kayma, kırılma, talaş oluşumu, yorulma, kimyasal çözünme ve difüzyon yoluyla gerçekleşebilir.

Aşınma olayında, oluşan hasarı değerlendirmek oldukça önemlidir. Yüzeyde oluşan hasar tipleri ve herbir hasarı önlemek amacıyla kullanılacak koruma yöntemi, uygulamadan uygulamaya farklılık gösterir. Örneğin tüketilebilir veya zamanla tüketilmesi fazla önem taşımayan parçalarda, önemli olan sistemde baskın durumda bulunan aşınma mekanizmasını önlemektir. Bu durumda, yüzeyde oluşan aşınma parçacıkları çok fazla önem taşımaz. Fakat dönen yataklar, baskı silindirleri gibi yüzey topografyasının öneminin yüksek olduğu uygulamalarda, yüzeyde oluşan parçacıklar hatta yüzey çatlakları bile, çalışan parçanın verimini olumsuz yönde etkilerler.

Tablo 3.2: Çalışma koşulları ve aşınma türleri arasındaki ilişkiyi gösteren akış şeması[37].



İstenmeden meydana gelen aşınma olayı, çeşitli makina ve tehzizatın kullanımı sırasında çok büyük ekonomik kayıplara (enerji, işgücü, malzeme vs.) neden olmaktadır. Örneğin ABD’de, işleme maliyeti 70 milyar dolar/yıl ve takım maliyeti ise 900 milyon dolar/yıl (1978) gibi çok yüksek değerlere ulaşmaktadır[32].

3.7. Aşınma Türleri

Aşınma, üretim süreci sırasında kırılma hasarı kadar önemli bir hasar olmamasına karşın, malzeme ve enerji kaybı nedeniyle ekonomik olarak pahalı bir hasar mekanizmasıdır[34].

Aşınma çok değişik şekillerde sınıflandırılmıştır. Araştırmacılar genellikle mekanizmaları, oluşum şiddetleri ve sıklıklarına göre, dolayısıyla önem derecelerini göz önüne alarak sınıflandırmışlardır. Eyre ve Rabinowicz aşınma mekanizmalarını 4 ana başlıkta toplamıştır[1,38]:

- Adhezif Aşınma
- Abrazif Aşınma
- Korozyonlu Aşınma
- Yorulmalı Aşınma

Özellikle Rabinowicz diğer aşınma türlerini “marjinal” olarak kabul etmiştir[38].

Tablo 3.3: Aşınma mekanizmalarının göreceli önem dereceleri[1,38].

Aşınma mekanizmaları	Eyre (1976) %	Rabinowicz (1983) %
Abrazif Aşınma (Erozyonlu aşınma dahil)	58	36
Adhezif Aşınma (Kazımalı aşınma dahil)	23	45
Korozyonlu Aşınma	5	4
Yorulmalı Aşınma	14	15

Tablo 3.3'te görüldüğü gibi 1976 ile 1983 yılları arasındaki farklılık, abrazif ve adhezif aşınma mekanizmalarının önem derecelerinin değişmesidir. Tablo 3.3'teki verilere göre, yıllar geçtikçe adhezif aşınmanın önem derecesinin arttığı görülebilir. Ancak; abrazif aşınmanın daha hızlı gelişmesi ve ortaya çıkışının daha kolay

farkedilebilir olması, abrazif aşınma ile ilgili önlemlerin başarıya ulaşması sonucunda en az abrazif aşınma kadar etkili olan adhezif aşınma üzerine yapılan çalışma ve gözlemlerin artmaya başlaması, Eyre ve Rabinowicz'in bu değerlendirmeleri farklı kriterlere göre yapmaları gibi nedenlerden dolayı adhezif aşınmanın öneminin arttığı düşünülebilir[33].

Wulpi aşınmayı Aşınma 1 ve Aşınma 2 olarak;

Aşınma 1

Abrazif Aşınma

- Erozyonlu Aşınma
- Zımparalayarak Aşınma
- Oyuk Aşınması

Adhezif Aşınma

- Kazımalı Aşınma

Aşınma 2

Yorulma Aşınması

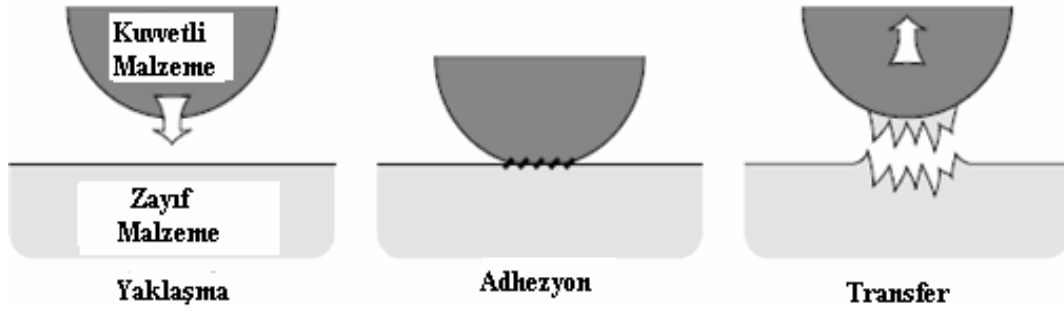
- Yüzealtı Yorulma Aşınması
- Yüzeyden Gelişen Yorulmalı Aşınma
- Kaviteyonlu Yorulma Aşınması olacak şekilde sınıflandırmıştır.

3.7.1 Adhezif aşınma (Yapışma aşınması)

Yapışma aşınması olarak ta adlandırılan adhezif aşınma, en sık rastlanılan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle hasarları hızlandırıcı etkide bulunmaz.

Adhezif aşınma en genel olarak, karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre hareket eden iki yüzeyin birinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye olan malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir[32-34].

Adhezif aşınma hasarları genellikle uygun olmayan malzemelerin seçilmesi veya yağlama sisteminin yeterli olmayışı sebebiyle meydana gelir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: Adhezif aşınmanın en genel çalışma şekli[39].

Adhezif aşınma çoğunlukla sürtme veya sürüyerek aşındırma (bu terimler bazen diğer tipteki aşınmaları kabaca açıklamada kullanılmasına rağmen) olarak tanımlanır.

Adhezif aşınma prosesleri, katı malzemelerin atomik boyutta temas halinde olmaları durumunda oluşan arayüzeysel adhezif birleşme noktaları tarafından başlatılırlar. Normal bir yük uygulandığı zaman, çıkıntılardaki bölgesel gerilme aşırı derecede yükselir. Bazı durumlarda akma gerilmesi aşılar ve gerçek temas alanı yeterli oranda yükselip uygulanan gerilmeyi destekleyene kadar, çıkıntılar plastik olarak deforme olur.

Yüzey filmlerinin olmaması durumunda, yüzeyler birbirine yapışacaktır; fakat çok düşük bir miktardaki yabancı madde tamamen normal yükleme durumunda yapışmayı en aza indirebilir ve hatta engelleyebilir.

Bununla beraber arayüzeydeki rölatif teğetsel hareket, temas noktasında yabancı madde filmlerini dağıtmada rol oynar ve birleşme noktalarında soğuk kaynaklaşma meydana gelebilir. Devam eden kayma, birleşme noktalarının yırtılmasına ve yeni birleşme noktalarının oluşmasına sebep olur.

Aşınma partiküllerinin meydana gelmesine yol açan olaylar zinciri, birbiriyle karşı karşıya bulunan yüzeylerin yapışmasını ve kırılmasını içerir[40,41].

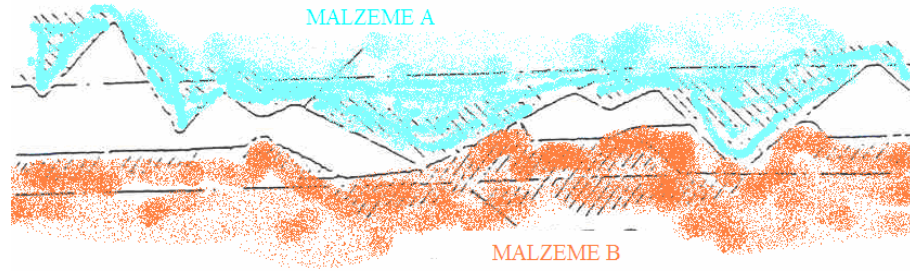
3.7.2 Abrazif aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak ta adlandırılan abrazif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür.

Abrazif aşınma, en genel olarak, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle basınç altında etkileşmesiyle, sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması şeklinde tanımlanabilir.

Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma şekli verilebilir[32-34].

Bu tip aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elemanlı (Şekil 3.11) ve üç elemanlı (Şekil 3.12) olmak üzere ikiye ayrılır.



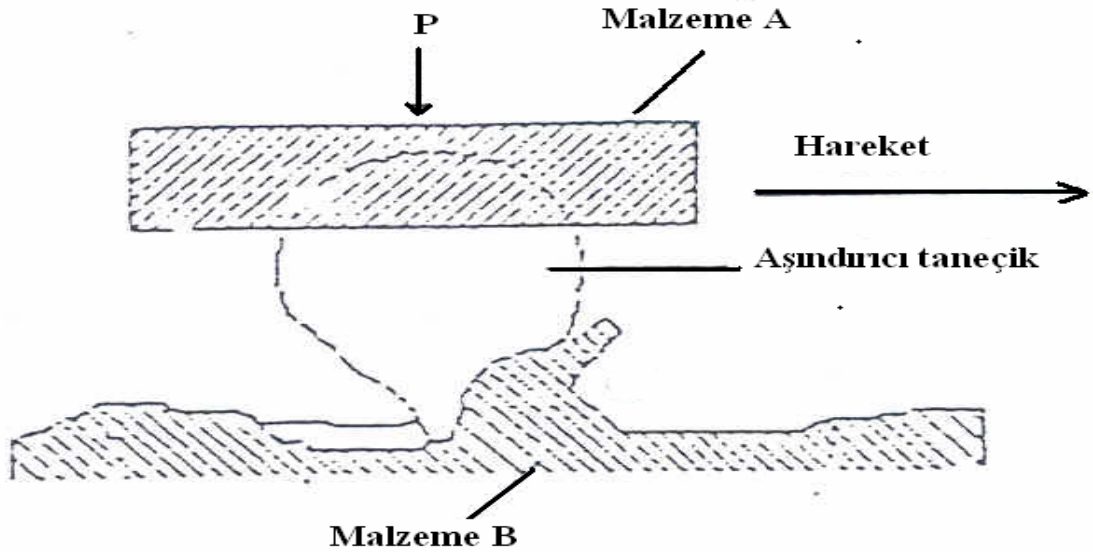
Şekil 3.11: İki elemanlı abrazif aşınma[32-34].

Abrazif aşınma, daha sert bir malzeme tarafından bir yüzeye yapılan hasar olarak açıklanabilir. Bazen de şiddet derecesine göre kazınma, çizilme veya oyuklanma olarak adlandırılır. Bu tip aşınmanın ortaya çıktığı genelde iki durum vardır:

Birinci durumda; sert yüzey, sürtünen iki yüzeyin en sertidir (iki elemanlı abrazyon). Örneğin; taşlama, kesme veya işleme gibi mekanik operasyonlar.

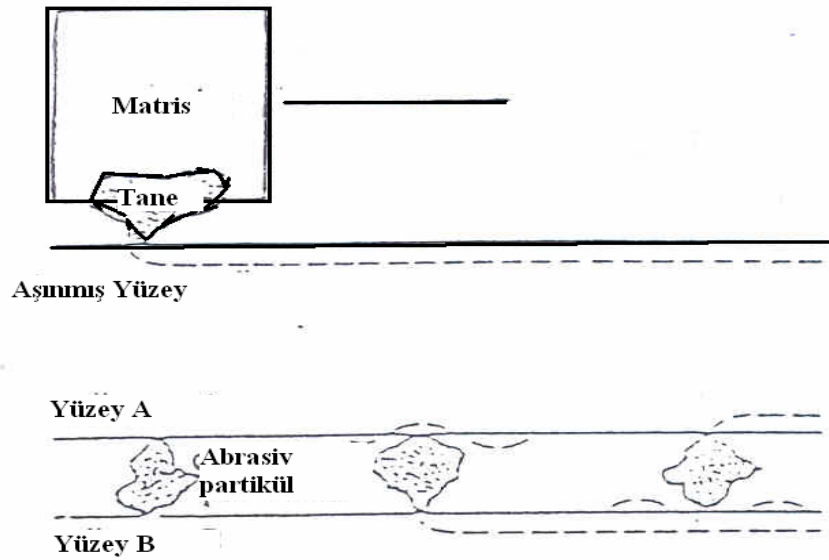
İkinci durumda; sert yüzey, üçüncü bir cisimdir. Diğer iki yüzey arasında sıkıştırılmış ve onlardan birini veya her ikisini birden aşındıracak kadar sert, genellikle küçük bir parça aşındırıcı veya taşıdır (üç elemanlı abrazyon)[2].

İki elemanlı abrazif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrazif aşınmada ise, ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir.



Şekil 3.12: Üç elemanlı abrazif aşınma[32-34].

Metal–metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrazif veya adhezif olarak başlayıp, üç elemanlı abrazif olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro talaşlar ve parçalanmış oksit parçacıkları üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturabilir. Serbest hale geçen mikro talaş parçacıkları, genellikle ana malzemeden daha sert olduklarından dolayı aşınmayı hızlandırır[40,41]. Şekil 3.13'te abrazif aşınma mekanizması, şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Abrazif aşınma mekanizması[32-34].

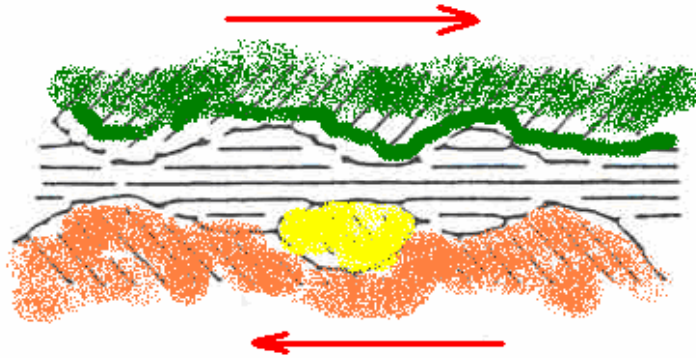
Abrazif aşınmayı etkileyen iki temel faktör, aşındırıcı partikül ile metal yüzeyi arasındaki sertlik farklılığı ve teması meydana getiren basıncın büyüklüğüdür. Abrazif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden normal yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak kaldırılması açısından daha az iz bırakması sağlanır.

Abrazif aşınma sırasında sert yüzeyin çıkıntılarının etrafında meydana gelen yumuşak yüzeyin plastik akışıyla birlikte, daha sert yüzeyin çıkıntıları daha yumuşak olan yüzeye baskı uygular. Teğetsel bir hareket üzerine yüklendiği zaman, daha sert olan yüzey yumuşak malzemeyi mikrosüpürme, mikrokese ve mikrokırmanın toplam etkileri ile ortadan kaldırır.

Khruschow, abrazif aşınma üzerinde malzeme özelliklerinin etkisini incelemiştir. Saf metallere ve metalik olmayan sert malzemelerin olması durumunda rölatif aşınma direnci ve sertlik arasında direkt bir orantının olduğunu göstermiştir. Bunun dışında, yapısal çeliklerin (normal sertleşen ve temperlenen) ısıl işleme uğratılmasının abrazif aşınma direncini geliştirdiğini belirtmiştir[40-41].

3.7.3 Yorulma aşınması

Değişken, tekrarlı yüklemeler sonucu meydana gelir. Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiğinden, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur[32-34] (Şekil 3.14).



Şekil 3.14: Yorulma aşınmasının şematik gösterilişi[32-34].

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde, plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Bu boşlukların zamanla yüzeye doğru ilerleyerek büyümesi, yüzeyde küçük çukurların ortaya çıkmasına sebep olur. Bu tür aşınma daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür[2].

Pratikte tüm makinalar, periyodik gerilme değişimlerine maruz kalırlar. Dönen bir shaftın yüzeyinin üzerindeki bir metal parçası, eğme gerilmelerinin tersine çevrilmesiyle karşı karşıya kalır; dönen bir temas milinin yatağı, devamlı olarak Hertz (elektromanyetik) gerilmesinin uygulanmasına ve boşalmasına maruz kalır. Konformal bir milin yüzeyi, dönme yüzeyindeki çıkıntılarının meydana getirdiği yol nedeniyle mikrosal düzeyde tekrarlayan gerilmelerle karşı karşıya kalır.

Dönme veya kayma temasındaki tüm bu tekrarlayan gerilmeler, aşınma hasarına yol açar. Bu etkiler, bahsedilen yüzeylerle direkt bir fiziksel temas gerektirmeden, esas olarak yüzeylerin içindeki veya altındaki gerilme hareketlerine dayalıdır. Bu, birbirini etkileyen yüzeylerin kalın bir yağ filmiyle birbirinden tamamen ayrıldığı çark mil yataklarında meydana gelen yüzey yorulma hasarının gözlemlenmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Yüzey altı ve yüzey yorulma aşınması, yuvarlanma-elemanlı millerde etkin olan hasar türleridir.

Saf bir yuvarlanma temasında (yüzeydeki teğetsel gerilmenin sıfır olduğu), yüzeyin belli bir mesafe altında yırtılma gerilmesi maksimum olduğundan dolayı hasar, yüzey altında oluşur. Yuvarlanma temasına eklenen ayrıca biraz da kayma teması vardır; yırtılma gerilmesinin maksimum olduğu yer, yani hasara uğrayan nokta yüzeye daha da yaklaşır. Fakat malzemeler çok nadiren kusursuzdur; bu yüzden de, hasarın kesin nihai pozisyonu inklüzyonlar, porozite, mikroçatlaklar ve diğer faktörler tarafından etkilenecektir.

Yorulma hasarı, belirli bir miktarda gerilme devir sayısı gerektirir ve çoğunlukla da bir parçanın uzun bir süre kullanımda olduğu durumlarda ortaya çıkar[40,41].

3.7.4 Korozyon aşınma

Adhezyon, abrazyon ve yorulmadan kaynaklanan aşınma, birbirleriyle karşı karşıya bulunan yüzeylerin deformasyon özellikleriyle ve gerilme etkileşimleriyle açıklanabilir; fakat korozyon aşınmada, çevre ve birbirleriyle karşı karşıya bulunan

malzeme yüzeyleri arasındaki dinamik etkileşim önemli bir rol oynar. Bu etkileşim çevrimsel bir kademeli prosesin oluşumuna yol açar:

- Birinci kademede, temas eden yüzeyler ortamla reaksiyona girerler ve yüzeyde reaksiyon ürünleri meydana gelir.
- İkinci kademede, malzemelerin temas noktalarında etkileşimin meydana geldiği bölgede, çatlak oluşumunun ve/veya abrazyonunun bir sonucu olarak, reaksiyon ürünlerinin sürtüşmesi ortaya çıkar.

Bu proses sıcaklık yükselmesi ve çıkıntılarının mekanik özelliklerindeki değişimler nedeniyle, çıkıntılarının reaksiyona girme kabiliyetlerinde bir artma ile sonuçlanır.

Razavizadeh ve Eyre alüminyum alaşımlarının oksidasyon davranışını incelemiş ve korozif aşınmanın, metal yüzeyindeki olukların içine sıkıştırılmış tabakaları meydana getirmek için oksidasyon, deformasyon ve kırılmanın birleşmiş bir prosesi ile oluştuğu sonucuna varmışlardır[40,41].

3.7.5 Kazımalı (Fretting) aşınma

Parçalar yüksek frekansta çok küçük rölatif titreşim hareketleriyle karşı karşıya kaldığı zaman, kazımalı (fretting) adı verilen, birbirini etkileyen bir tür aşınma ortaya çıkar; Bu aşınma adhezyon tarafından başlatılır, korozyon tarafından büyütülür ve abrazyonla da başlıca etkisini gösterir.

Bu tip aşınmaya uğrayacak parçalara örnek olarak çekilme parçaları, civatayla tutturmuş parçalar gösterilebilir.

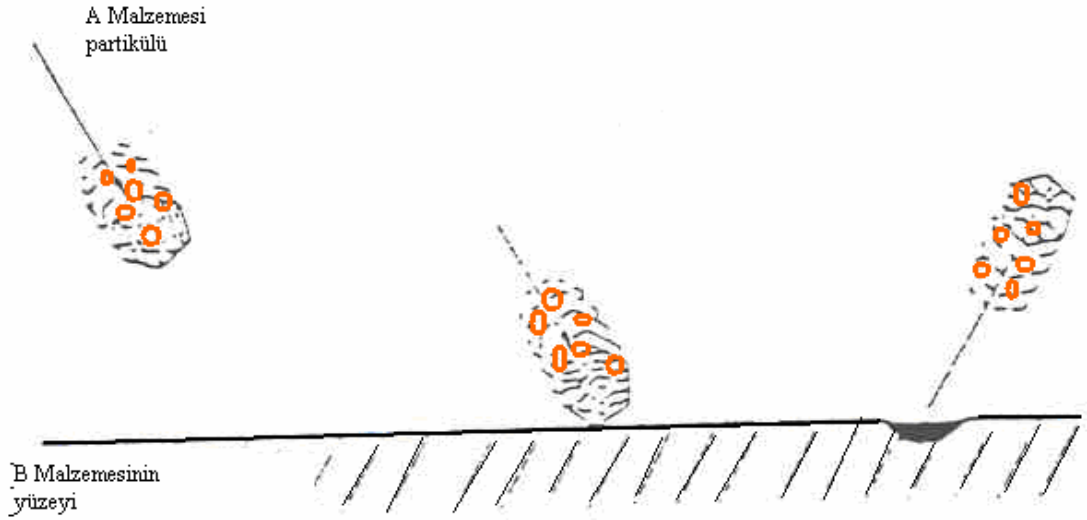
Kazımalı aşınma çoğunlukla, hareket etmeyen parçalar arasında meydana gelir. Kazınmaya maruz kalan yüzeyler, ferro metaller üzerinde kırmızı-kahverengi lekeler ve sert demir oksit birikmiş parçaları ile birbiri üzerine çakışmasından dolayı, fazla miktarda parlaklaşmış bitişik bölgelerden oluşan karakteristik bir görünüme sahiptir.

Kazınmaya uğrayan yüzeylerin aşınmasında, ortamın büyük bir rol oynadığı gözlenmiştir. Örneğin nemli bir atmosferde yenme aşınmasının miktarı, kuru bir atmosferdekine göre oldukça yüksektir[40,41].

3.7.6 Eroziyon aşınma

Eroziyon ortamlardaki sistemler için katı partiküllerin, küçük sıvı damlalarının veya gazların çarpması sonucu meydana gelen malzemelerin ve parçaların erozyonu (aşınması), ömrü sınırlandıran bir olaydır. Katı-partikül çarpışma aşınması, kömür dönüştürme fabrikalarının geliştirilmesi ve katı partiküllerin bu fabrikaların çeşitli bölümlerine taşınımı ve akışı nedeniyle son yıllarda büyük dikkat çekmektedir. Bu partiküllerin hareket eden pervane kanatlarına, valf parçalarına, boru birleşme noktalarına, dirseklere ve diğer yüzeylere çarpması şiddetli aşınmaya yol açmıştır.

Katı-partikül aşınması, helikopter kanatlarının kum aşınması, kum yenmesi, jet motor pervaneleri ve kanatlarının aşınmasını içeren hava ve uzay endüstrisi sistemlerinde ayrıca öneme sahiptir[40,41]. Bununla ilgili temel mekanizma, şematik olarak Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Eroziyon aşınma oluşumu[40,41].

Mühendislik malzemelerinin, katı partiküllerin veya sıvı damlalarının çarpmasına karşı gösterdikleri tepki, malzemenin türüne, o malzemelerin karşı karşıya kaldığı malzemelerin durumuna (termal yapısı, kalıntı gerilmeleri, yüzey işlemleri) ve çarpma hızı, çarpma açısı, partikül tipi ve boyutu gibi aşınma prosesi ile ilgili ortamsal parametrelere bağlı olarak büyük oranda değişiklik gösterir (Tablo 3.4).

Tablo 3.4: Sıvı çarpmasına, çarpma açısının malzeme tepkisi üzerindeki etkisi[40,41].

	Çarpma Açısı		
Malzeme Tipi	< 20°	45°	90°
Elastik	Etkisiz	Görülebilir bir etki yok	Yüzey deforme olur
Sünek	Maksimum “kesme aşınması”	Karışık sistem	Maksimum deformasyon aşınması
Gevrek	Çok düşük erozyon	İleri safhada erozyon	Maksimum erozyon

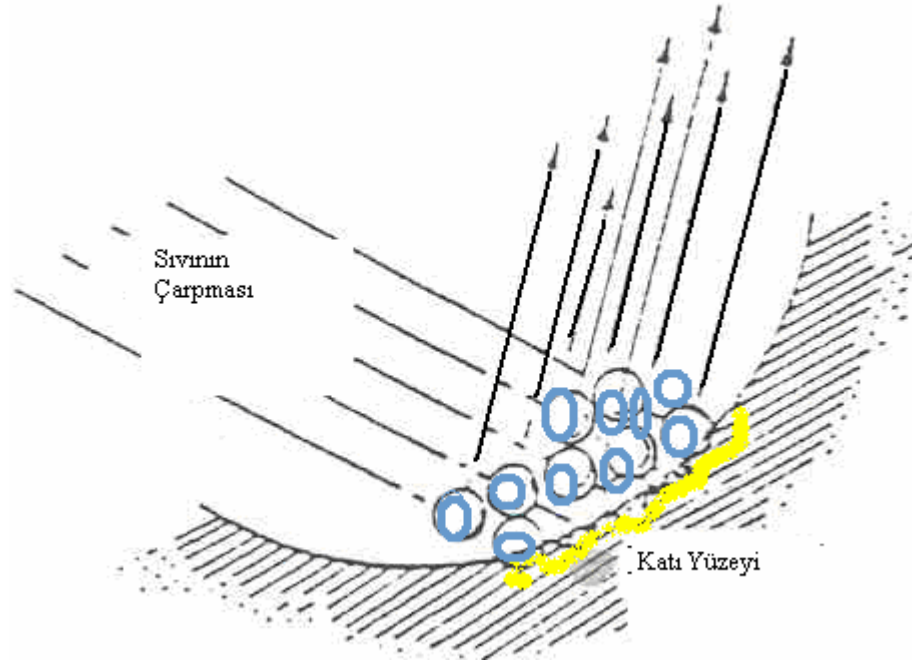
3.7.7 Kavitasyonla korozyon aşınma

Kavitasyon erozyonu, bir katı ve bir akışkanın rölatif harekette olduğu ve akışkanın içinde oluşan kabarcıkların kararsız hale geçmesi ve katının yüzeyine çarpmaları sonucu ortaya çıkar(Şekil 3.16).

Kavitasyon hasarı genellikle deniz taşıtlarının pervaneleri, kayarak su üzerinde giden küçük gemi, baraj, kanal kapakları ve diğer hidrolik türbünler gibi sıvı-tutucu makinalarda meydana gelir.

Kavitasyon erozyonunda çarpmayı gerçekleştiren sıvı, gaz halindeki kabarcıkları yüzeye nispeten yüksek hızlarda getirir. Kabarcıklar katı yüzeyine hızla çarparlar ve çarpma anında çökerler; çökmeleri katı yüzeyinde şok dalgaları yaratır ve yüzeyden malzemenin ayrılmasına neden olur[40,41].

Lord Rayleigh, bir kabarcığın çözülmesi nedeniyle sıvı içinde meydana gelen ani basıncı, sıvının sıkıştırılabilirliği ve ani yoğunluğu ile çökme hızına bağlamıştır. Wilson ve Graham, gümüşün ağırlık kaybının bu anlayışla çok iyi bir şekilde uyduğunu ve erozyon hasarının da yoğunluk nedeniyle ve sıvı içindeki ses hızıyla ilişkili olabileceğini ifade etmişlerdir[40,41].



Şekil 3.16: Sıvı kabarcıklarının çarpmasına bağlı olarak oluşan kavitasyon erozyonunun şematik gösterimi[2].

3.7.8 Elektrik ark akımlı aşınma

Bir kayma prosesinde, ince bir hava filminin öbür tarafına yüksek bir elektriksel gerilim uygulandığı zaman, arklılaşmaya yol açan dielektrik hasar meydana gelir. Arklılaşma sırasında çok kısa bir zaman periyodu içerisinde, yüksek bir güç yoğunluğu oluşur. Bunun sonucunda ise önemli oranda ergime, korozyon, sertlik değişimleri, diğer faz değişimleri ve hatta malzemenin direkt olarak erimesi meydana gelir.

Arklılaşma büyük kraterlere sebep olur, arktan sonra herhangi bir kayma veya titreşim, kırılma veya yırtılma meydana getirir. Abrazyon, korozyon, yüzey yorulması ve yenmeye yol açar. Bu yüzden arklılaşma, birçok çeşit aşınmayı başlatabilir. Elektrikle çalışan makinalarda felaketle sonuçlanabilen hasarların oluşmasına sebep olur[40,41].

3.8 Aşınmanın Önlenmesi

Aşınma olayına bağlı olarak, çok çeşitli problemler ortaya çıkabilir. Bunlar, aşağıda özetlenmiştir :

- Parçanın fonksiyonunu olumsuz yönde etkileyen malzeme kaybı (kesici takımlarda, takımın kesici kenarının körleşmesi gibi).
- Parça fonksiyonunu kötü yönde etkileyen yapı veya kompozisyon değişimleri (şekil verme kalıplarında, optik lenslerde oluşan yüzey pürüzlülüğü gibi).
- Parça fonksiyonunu olumsuz yönde etkileyen aşınma parçacıkları (abrazif aşınma, gıda endüstrisinde son ürünü kirleten parçalar gibi).

Yukarıda sayılan problemlerin önüne geçilebilmesi, yani aşınmanın önlenmesi, azaltılabilmesi veya geciktirilebilmesi için çalışma ortamı, bileşenler, çalışma şartları, sıcaklık gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışan ortamda kullanılan parçaların özelliklerinin iyi bilinmesi, aşınmayı önlemenin ilk adımıdır.

Tablo 3.5: Aşınma prosesi üzerinde etkin malzeme özellikleri[32].

Aşınma Türü	Malzeme Özelliği
Adhezif aşınma	Kayma esnasında, ara yüzeydeki termal yumuşamaya direnç
Abrazif aşınma	Abrazif ortamdan daha yüksek yüzey sertliği Düşük deformasyon sertleşmesi katsayısı
Yorulma aşınması	Ara yüzey deformasyonuna ve çatlak oluşumuna karşı direnç, yani yüksek sertlik ve tokluk
Korozif aşınma	Korozif ortama direnç
Kazımalı aşınma	Yumuşak korozyon ürünleri oluşturma yeteneği, yüksek abrazif direnç
Erozif aşınma	Yüksek sertlik, yüksek tokluk. Isıl işlemin etkisi yoktur.

Çeşitli aşınma mekanizmalarında etkin rol oynayan malzeme özellikleri, Tablo 3.5'te özetlenmiştir.

Aşınma kanunları hakkında araştırma yapan Siniawski, Harris ve Wang aşınmanın çok kompleks bir yapı olduğunu ve bu durumun saf olarak ne mekanik ne de deterministik perspektife oturtulmaması gerektiğini belirtmişlerdir. Elektron mikroskobu (SAM) görüntüleri ve istatistikler bir araya getirildiğinde, aşınma kinetiğinin anlaşılabilirliğinin geliştirilebildiğini söylemişlerdir[42].

Hareketli sistemlerde oluşan aşınma hasarları üzerinde malzeme özellikleri kadar ortam parametreleri de oldukça önemli bir rol oynar. Bir sistemde sadece bir tek aşınma mekanizmasının varlığından söz edilemez. Aşınma mekanizmalarından herhangi biri, beraberinde bir diğer mekanizmayı da baskın hale getirebilir. Aşınmayı tamamiyle önlemek mümkün değildir. Aşınma hasarının etkisini azaltabilmek için, malzeme ve ortamla ilgili alınacak önlemler kadar, sistemin tasarım aşamasında da gerekli önlemler alınabilir[32].

4. CAM ŞEKİLLENDİRME

4.1 Cam Nedir?

Cam kelimesinin tozu geçmiŐte cam yapımında kullanılan, latince adı "glastum" olan bir orman çiçeğinin adından türediği tahminleri yaygındır. Diğer bir yaklaşım ise, "cam" teriminin ingilizce (galcede) "glas sun" kelimesinden, bu kelimenin söz konusu lisanlardaki anlamı olan "kehribar" dan geldiğidir[43].

Cam sözlük anlamı olarak; kum ya da kumun çeşitli alkalilerle karıŐımını ergitmek suretiyle meydana gelen sert, saydam ya da az çok saydam olan, gayrimuntazam Şekillerde, abuk kırılabilen bir madde veya Cam ASTM C 162'de, ergimiş halden katı hale kristalleŐmeden soėumuŐ inorganik bir ürün olarak tanımlanmıŐtır[44]. Camın, genellikle üretimi yapılan bir malzeme olmasının yanısıra, doğada yaygın olarak bulunan bazı elementlerin bir araya gelmesiyle oluşmuş doğal formları da bulunmaktadır. Yapay camların kullanımı antik çağlara kadar uzanmaktadır.

4.2 Cam retiminin Tarihçesi

Camın yapay olarak elde edilmesinin başlangıç tarihi kesin olarak belli değildir. Cam yapımı, büyük olasılıkla M.. 3 bin yıllarının sonlarına doğru Bronz ağ'da keŐfedilmiŐtir. Camdan yapılmış kaplara ilk olarak M.. 16. yüzyıl sonlarına doğru rastlanılır. Her ne kadar, tarihlendirilebilir en erken örnek bugünkü Türkiye-Suriye sınırı yakınlarındaki Amik Ovasında yer alan Atchana (Antik Alalakh) yerleŐiminde bulunmuŐsa da, buluntuların dağılımı en erken cam kapların kuzey Mezopotamya'da Mitanni Krallığı sınırları içerisinde üretilmiş olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kapların hemen hepsi aynı Şekilde i kalıplama yöntemiyle küçük Şişe, bardak ve kadeh olarak üretilmiŐtir.

Modern camcılık, Haçlı Seferlerinin etkisi ile Bizans İmparatorluğunun çökmesi sonucu XI. yüzyılda Venedik'te gelişmeye başlamıştır. Venedik, drtyz yıl kadar Avrupada cam sanayinin merkezi olmuştur.

Pencere camının genel kullanımı ancak 15.y.y'da mümkün olmuştur. 16.y.y'a kadar ne Almanya'da, ne de İngiltere'de cam yapılmamıştır. Düz pencere camı, merdane ürünü olarak, 1688 yılında Fransa'da görülmeye başlanmıştır. Cam endüstrisi 1900 öncesine kadar tamamıyla bir sanat olarak kalmış, üretim prosesleri öncelikle deneyimlere dayanmış ve gizli formüller sıkı bir şekilde korunmuştur.

Türklerde camcılık: Türkler camı, Anadolu Selçukluları zamanından itibaren kullanmaya başlamışlardır. Fakat Türklerdeki cam sanayii, asıl 16. yüzyıldan itibaren büyük gelişmeler kazanmıştır[43].

4.3 Cam Ev Eşyası Üretim Yöntemleri

Cam ev eşyası üretiminin makinalaşması geniş ölçüde 1892'de olmuş, takip eden yıllarda birçok gelişme kaydedilmiştir. 1903 yılında ilk tam otomatik şişe üretim makinası Michael J. Owens tarafından Edward D. Libbey'e ait Toledo tesisinde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Ardından Hartford-Empire Company tarafından üfleme-üfleme makinası geliştirilmiştir. IS makinası olarak bilinen bu makina, şimdilerde "ayrılabilen parçalı" (ingilizcesi individual section) anlamını veren kelimelerle bağdaştırılsa da aslında IS makinası ismini mucitleri olan Ingersall ve Smith'den almaktadır[45].

Cam ev eşyası üretiminde kullanılan tipik cam tipi soda kireç camıdır. Cam bileşimi oluşturulurken bileşime uygun cam kırığı da ilave edilir ve harman oluşturularak ergitme fırınına şarj edilir. Ergitme fırınları ortalama 1500°C'de çalışırlar ve şarj edilen hammadde ergitme zonlarında sıvı faza geçer, oluşan gazlar sistemden ayrılır ve ergimiş camın bileşimi homojen hale gelir. Sıcaklığının homojen olduğu ve uygun viskozitede olan cam, fırının son kısımlarına ilerler. Bu bölgelere ulaşmış olan camın sıcaklığı 1250-1350°C'den ortalama 1150°C'ye düşmüştür. Fırının son bölümünü de aşan cam, küçük brülörler ile ısıtılan cam besleme oluğuna ulaşır ve bu bölgenin de sonunda cam damlasını oluşturan bir kol ve düşey mandrenden oluşan makinaya gelir. Cam sürekli ve viskoz olarak aşağıya akarken yatay ekseninde çalışan çelik makaslarla kesilir ve cam damlası olarak adlandırılan lapamsı ergimiş cam oluşur. Oldukça hızlı çalışan cam ambalaj makineleri için oluşan cam damlasının sıcaklık ve şekli, hatasız bir üretim için oldukça önemlidir ve damla sıcaklığı 1100°C civarında iken belirlenen sıcaklık için hassasiyet $\pm 1^\circ\text{C}$ üzerine çıkmamaktadır[45].

Kullanım amacına bağlı olarak özel olarak hazırlanan cam harmanı, ergitme sonrası fırınlardan ya el üretimi yapılmak üzere çeşitli el aletleri kullanılarak alınır ya da doğrudan otomatik şekillendirme makinelerinin besleme kanalları kullanılarak son şekillendirme işlemi makinede veya elde yapılır. Otomatik üretim, genellikle döner tablalı üfleme makineleri veya presler kullanılarak yapılır. İlk şekillendirmenin ardından ağız yakma, parlatma, tavlama veya sertleştirme işlemleri ile üretim süreci tamamlanır.

Günümüzde Cam Ev Eşyası Üretimi şekillendirilmesinde seri olarak üretim yapabilen otomatik makinalardan yararlanılmaktadır. Hızlı olarak üretim yapan bu makinalarda Cam Ev Eşyası Üretimi şeklini veren metal kalıplar kullanılmaktadır. Makinaya ergimiş halde gelen cam damlasının içi boşluklu bir ürün haline gelmesi, birincil kalıpta içindeki boşluğun oluşturulması ve kabaca ilk şeklinin verilmesinin ardından, ikincil kalıpta son şeklinin verilmesi olarak tanımlanabilir.

4.4 Cam Şekillendirme Makinaları

Günümüzde, silindirik şeklindeki cam damlasının cam ürüne dönüştüğü pek çok şekil verme makinası geliştirilmiştir. Bu makinalar, cam damlasını içi boş bir taşıyıcı kaba dönüşürken, aynı zamanda da cam damlasının ısını da transfer ederek ürünün kendi ağırlığı ile deforme olmasını engeller. Çalışma süreci tam otomatiktir[45].

Cam Ev Eşyası üretiminde temel üç üretim prosesi vardır. Bunlar:

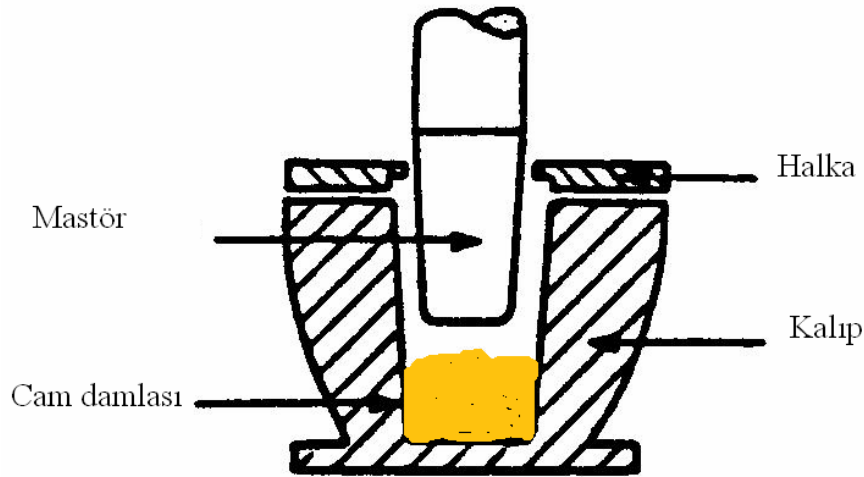
1. Presleme prosesi,
2. Üfleme - üfleme prosesi,
3. Presleme - üfleme prosesidir.

4.4.1 Presleme prosesi

Presleme metodu, üst kısmı, taban kısmından daha geniş olan ürünlerin üretiminde, ideal bir metoddur. Presleme ile üretilen cam eşyaların başlıcaları; kaseler, çanaklar, tabaklar, çay fincanları, kulplu bira bardakları, sigara tablaları, sinyal camları, çay ve su bardakları, vazolar, otomobil far camları ve yol aydınlatma reflektörleridir.

Presleme, genel olarak tek bir makine tablası üzerinde gerçekleşen tek aşamalı bir şekillendirme prosesidir. Makine tablası, el üretiminde hareketsiz, otomatik makinelerde ise dönerdir. Çok dar toleranslar konulmasına rağmen kalıp donanımı, şişe ve kavanoz gibi sınıai kap üretimi için kullanılan kalıplardan çok daha basittir.

Şekil 4.1: Kalıp donanımında kullanılan ana parçaları göstermektedir. Kalıp, mamulün dış formunu oluşturur, mastör ise mamulün iç formunu oluşturur. Ring, mamulün ağızını şekillendirmek için kullanılır[46].



Şekil 4.1: Camın preslenmesinde kullanılan başlıca parçaları[46].

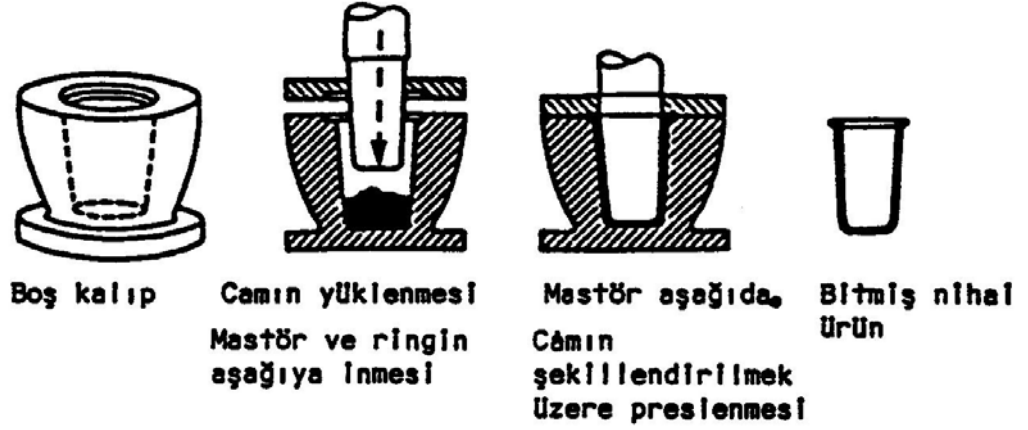
Presleme prosesinde, işlemlerin sırası (Şekil 4.2) aşağıda belirtildiği gibidir.

Boş kalıp, yerine yerleştirilir.

Kepçe ile alınan cam ya da cam damlası kalıba yüklenir. Ring ve mastör; ringin kalıp ağızına oturması sağlanıncaya kadar aşağı indirilir.

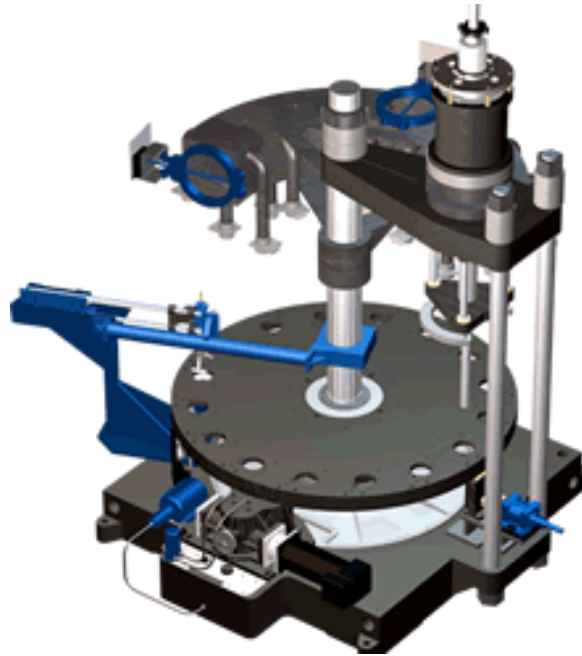
Sonra mastör, kalıbın içine gider, meydana gelen basınç, camın sıkışarak kalıp ile mastör arasındaki açıklığa doğru yayılmasını sağlar. Cam bu açıklığı doldurduktan sonra yukarıda, kalıbın ağızına temas eden ring boşluğuna gider[46].

Mastör ve ring yukarı doğru kaldırılarak kalıptan uzaklaştırılır ve mamul kalıptan çıkarılarak tavlama yapılır. Uygun cam ürünlerinin verimli üretimi için presleme prosesinin hızla gerçekleştirilmesi gerekir. Cam, çabuk sertleşebildiği için camdan süratle ısı alınarak soğutulmalıdır.



Şekil 4.2: Cam presleme prosesinde işlem sırası[46].

Büyük miktarlardaki mamul üretimi normalde otomatik olarak yapılır (Şekil 4.3). Makine kesikli olarak beslenir ve bir damla makasının altına yerleştirilir. Yükleme; mamul ağırlığına bağlı olarak ve damlanın doğrudan düşürülmesi ya da kaydırılarak damla yolu sisteminden geçirilmesi ile yapılır[46].



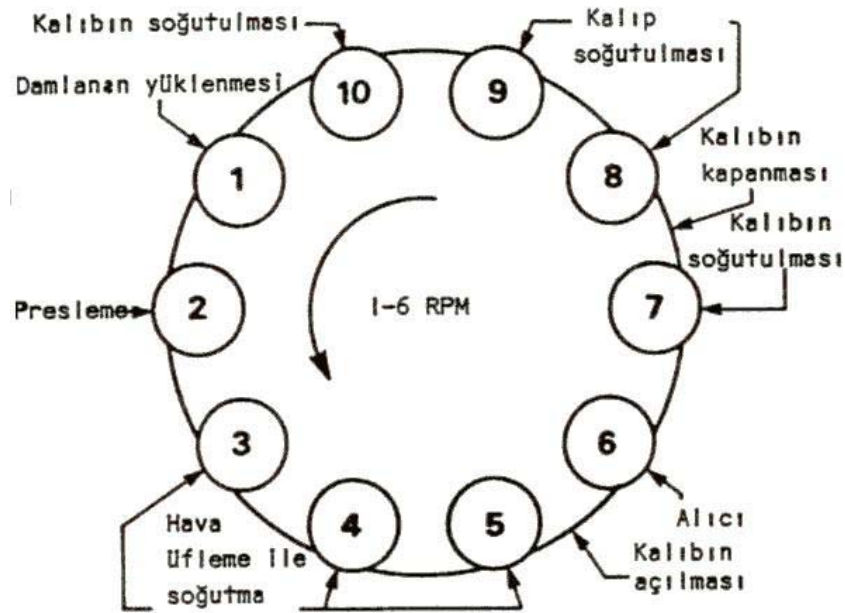
Şekil 4.3: Otomatik pres makinası[46].

Otomatik presler normal olarak tek tablalı makinelerdir. Üzerinde birkaç kalıbın bağlı bulunduğu tabla, eksenini etrafında duruşlu dönme hareketi yapar ve her bir makine istasyonunda presleme prosesinin belirli bir bölümü gerçekleştirilir.

Makine istasyonu fiili sıralaması, makine üzerindeki kalıp sayısına göre değişir. Farklılıklar, soğutma istasyonlarının sayısındadır. On-istasyonlu bir makinenin tipik bir istasyon sıralaması Şekil 4.4'teki gibidir[46].

Makina, eksenini etrafında döner ve boş kalıp, yükleme konumunda yerleşir. (1) Yükleme konumu, cam damlasının kalıba yüklendiği yerdir.

Tabla damla ile yüklenmiş kalıbın ikinci konumu olan mastörün altında yer alması amacı ile döner. (2) Bu konuma Pres Konumu adı verilir. Ring ve mastör; ring kalıp ile yakın temas geçinceye kadar hızla aşağı iner ve mastör camla temas eder.



Şekil 4.4: On-istasyonlu bir makinenin tipik bir istasyon sıralaması[46].

Mastör; yavaş ve düzgün bir hareketle kendi ilerleme sınırına kadar aşağıya inmeğe devam eder. Mastör hareketi ile cam, istenen şekle preslenmiş olur. Camdan ısı almasını sağlama amacı ile kısa bir süre camla temasta bırakılan mastör, camı terk edinceye kadar yavaşça yükselir ve sonra üst sınıra kadar hızla yükselir.

Makina; preslenmiş mamule düşük basınçlı soğutma havasının uygulandığı 3. 4. ve 5. istasyonlarda duruş yaparak döner.

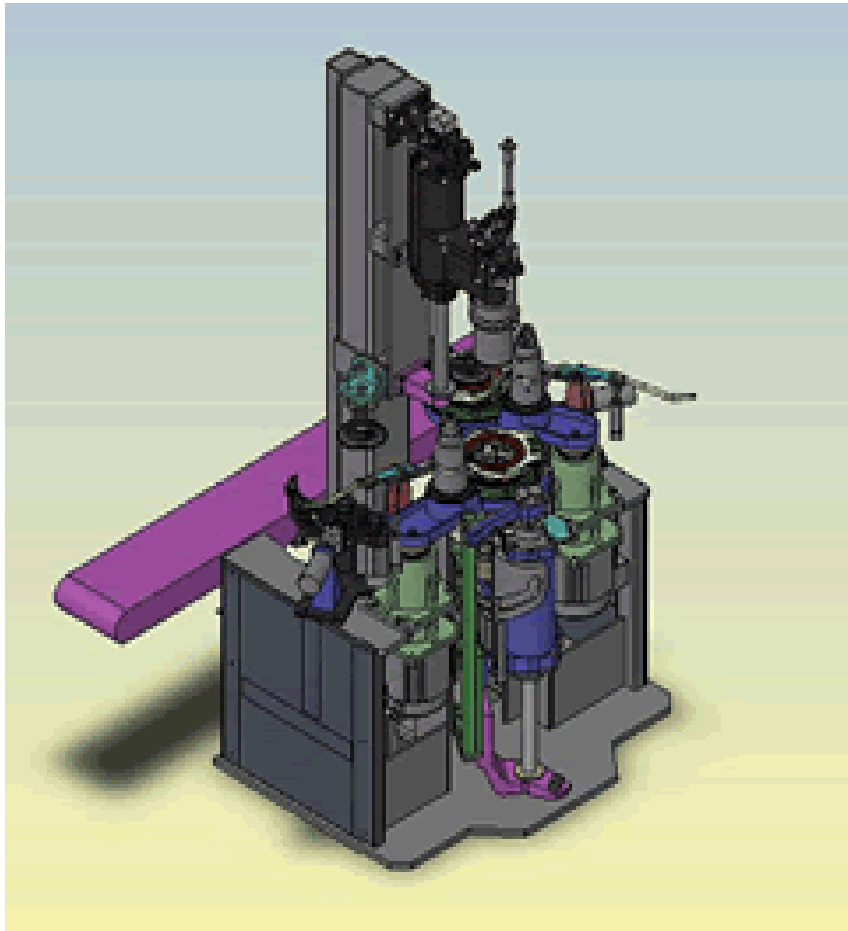
Makina; 5. ve 6. istasyonlar arasında dönerken kalıp açılır ve 6. istasyonda kullanılabilir rijitliğe gelmiş olan mamul, otomatik olarak kalıptan çıkar ve alev parlaticısına aktarılır.

Makina; dönmeye devam eder, 7. istasyonda açık alan kalıba soğutma havası uygulanır. 7. ve 8. istasyonlarda kalıp yarıları kapanır ve 8. 9. ve 10. istasyonlarda boş kalıba, ilave soğutma uygulanır[46].

Makina tablası dönmeye devam eder; kalıp, yükleme konumuna gelir ve çevrim tekrarlanır. Otomatik presin merkez kısmında, çapı 1 m'den 3 m'ye kadar değişen döner bir tabla bulunur.. Bir kalıp, 25 gramdan az, ya da birkaç kilogram olmak üzere, muhtelif ağırlıklarda cam alabilir.

4.4.2 Üfleme - üfleme prosesi

Her bir makine kolunun bağımsız olduğu ve her bir kolun bir cam mamulün yapımını kendi başına gerçekleştirdiği IS makinası 1925 yılında ortaya çıkmıştır ve şimdi şişe ve kavanoz üretiminde dünyanın her tarafında en çok kullanılan makinadır[47]. Modern IS makinasının temsili resmi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

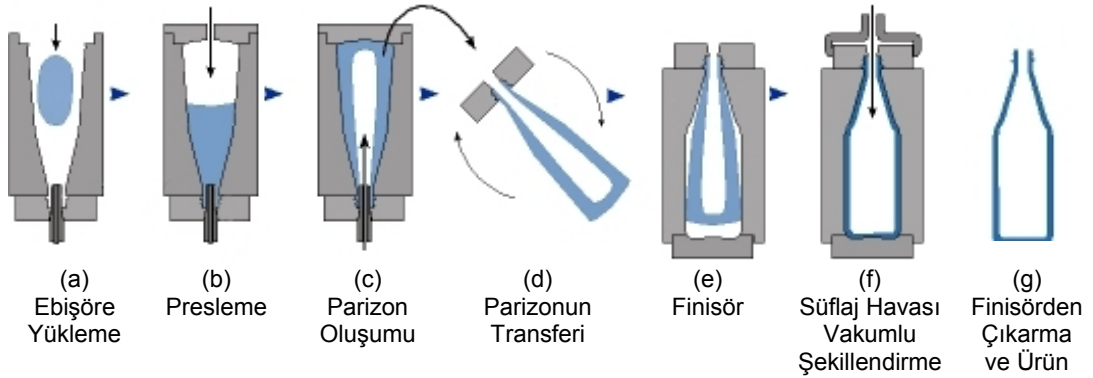


Şekil 4.5: Üfleme-üfleme üretim makinası temsili çizimi[49].

Üfleme - üfleme prosesinde üretim süreçleri aşağıda sırasıyla verilmiştir.

1. Cam damlası besleyiciden ebüşöre yüklenir ya da iletilir. Damla kalıba yukarıdaki ağız bölgesinden yüklenir. Ardından ebüşörün üzerindeki açıklık tampon ile kapatılır.
2. Tampondaki deliklerden verilen basınçlı hava, camı kalıbın ring kısmına doğru iterek şişe ağzının tam teşekkülü için yerleştirir. Ring kalıbının merkezinde içeri doğru bir mandren bulunur. Bu parça şişe ağzının kapalı kalmamasını sağlar, çapı; şişe ağzının iç çapını ve kafanın et kalınlığını belirleyecek şekildedir.
3. Mandren geri çekilir ve basınçlı hava camı tampona karşı geriye doğru şişirir. Ebüşör kalıbının iç boşluğu, parizon adı verilen mamulün taslak şeklini oluşturur.
4. Ebüşör kalıbı açılır ve müldebak tarafından tutulmakta olan parizon, finisör kalıbına transfer edilir. Transfer metodu makina tipine göre farklılıklar gösterir. Ancak her makinede parizon, yükleme aşamasından finisör kalıbına transfer sırasında şişenin kafa kısmı (ring) yukarıda olacak şekilde 180° çevrilir.
5. Finisör kalıbı parizonun etrafını saracak şekilde kapanır, müldebak açılır ve parizon, finisörün tepesine oturan kafanın (ring) alt kısmı ile tutularak finisör içinde asılı kalır. Parizon burada asılı iken parizonun yüzeyi ana cam gövdesinden ısı transferi ile tekrar ısınır.
6. Süflaj başlığı finisörün üzerine gelir, üfleme tüpü parizonun boynundan aşağı doğru iner ve basınçlı hava ile camı, üfleme kalıbının duvarlarına doğru şişirir.
7. Süflaj başlığı kalkar ve finisör açılır. Alıcı maşa üfleme kalıbı dışında ve dip tablası üzerinde duran şişeyi kaldırarak plaka üzerine nakleder buradan da makina konveyörüne transfer edilir. Finisörden konveyöre transfer metodu makina tipine göre farklıdır. Ancak her durumda şişelerin üzerinden yeterli miktarda ısıyı almak için bazı soğutma şekilleri uygulanır. Bu soğutma; makinadan tavlama fırınına transfer edilen ürünün taşınması esnasında deforme olmamasını sağlayacak mertebededir[48].

Şekil 4.6’da bu prosese ait üretim aşamaları gösterilmiştir[48].



Şekil 4.6: Üfleme-üfleme prosesine ait üretim aşamaları[48].

4.4.3 Presleme - üfleme prosesi

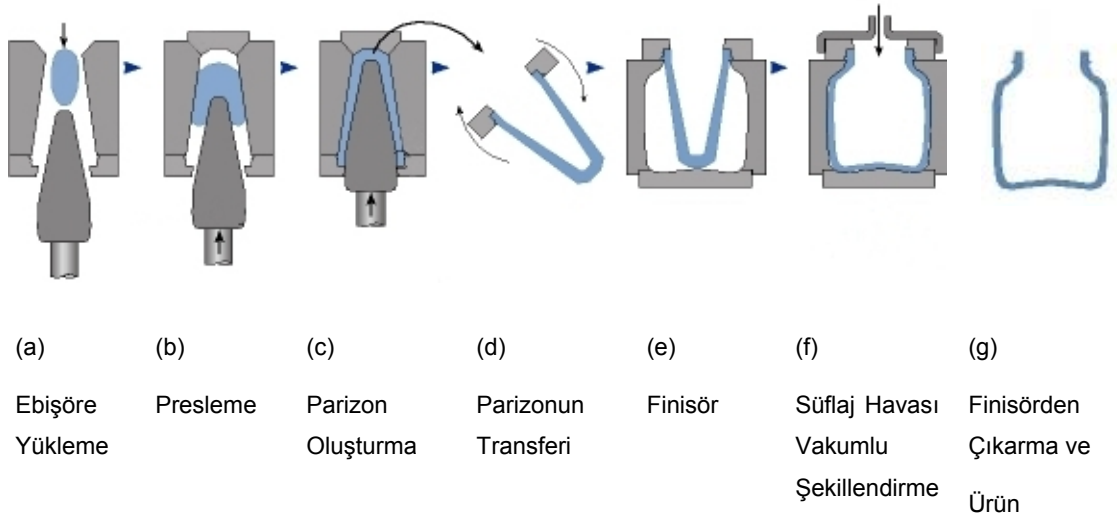
Presleme-Üfleme Prosesi su ve çay bardakları, ayaklı içki bardakları ve elektrik ampullerinin üretimini içerir. Cam endüstrisinin bu bölümünde yaygın kullanılan üç makina mevcuttur. Bunlar;

- Westlake kaplamalı kalıp makinası
- Hartford kaplamalı kalıp makinası
- Corning Ribbon makinası

Westlake ve Hartford makinaları, yüksek hacimli pazarlar için çay, su bardakları ve ayaklı içki bardaklarının yapımında kullanılır. Ribbon makinası da çay ve su bardağı yapabilir, ancak esas olarak elektrik ampulü yapımında kullanılır.

Hartford 28 Kaplamalı Kalıp Makinası; pres ve üfleme operasyonları kullanarak çay, su bardağı ve ayaklı bardakların hezne kısımlarını şekillendirir. Hartford 28 makinası, tek bir tablaya bağlı 12 ya da 18 kola sahiptir. Ekseni etrafında sürekli döner ve damla ile beslenir. Damla, makinaya bir yükleme oluğu vasıtası ile yüklenir. Oluk, ebişör ile kısa bir mesafede hareket ederek yükleme yapar ve sonra meteakip ebişörle hareket etmek üzere geri gelir[46,47].

Bu proste de bir ebüşör ve finisör kalıbı kullanılır. Cam makinaya aynı yöntem ile yüklenir ve ebüşörün üstü tampon vasıtası ile kapatılır. Ancak parizon üfleme yerine soğutmalı bir mastör vasıtası ile preslenerek şekillendirilir. Mastör ebüşöre ring merkezinden girer. Presleme işleminden sonra mastör geri gelir ve proses, üfleme-üfleme prosesindeki gibi devam eder. Şekil 4.7’de presleme - üfleme prosesinin akış şeması görülmektedir[48].



Şekil 4.7: Presleme-üfleme cam üretim prosesine ait üretim aşamaları[48].

Hartfort makinesinin operasyon sırasının bir özeti aşağıdadır:

Ebüşöre damla yüklenmesi

Ebüşörün müldebağa doğru yükselmesi

Mastörün aşağıya doğru preslemesi

Mastörün ve ebüşörün yükleme öncesi pozisyona geri gelmesi

Müldebak dönme hareketi

Üfleme başlığının finisör üzerine gelmesi

Finisörün, parizon üzerine kapanması

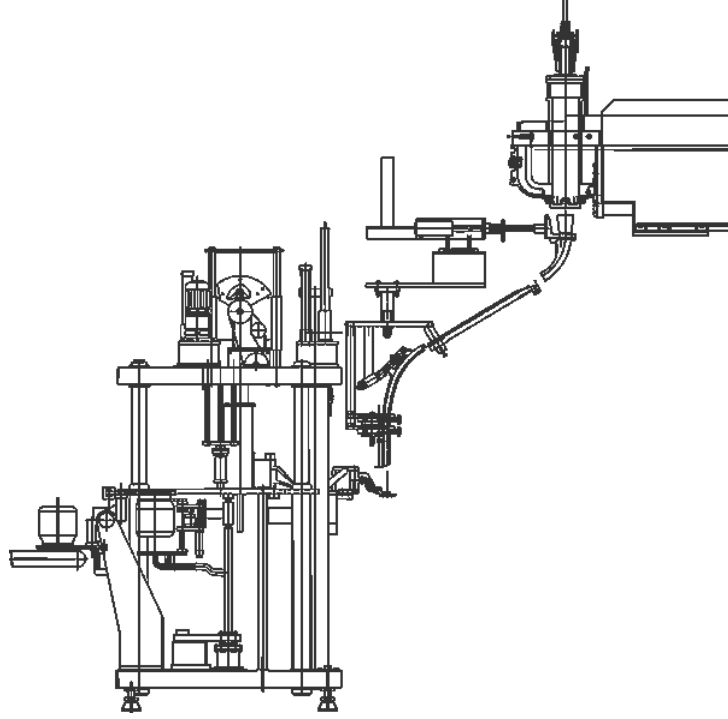
Üfleme başlığının finisör üzerinde kalkması

Finisörün açılması

Müldebağın açılıp alıcı maşalarının mamulü yakalaması

Sıcak kesme işleminin yapılması

İşlem döngüsü her ürün için bu şekilde devam eder. Tipik H-28 makinasının yan görünüşten teknik çizimi Şekil 4.8’de verilmiştir[49].



Şekil 4.8: Tipik H-28 makinasının yan görünüşten teknik çizimi[49].

4.5 Cam Üretiminde Kullanılan Makina Parçaları

Cam ev eşyası imalatında kullanılan makinalarda çeşitli imalat prosesleri vardır. Bu proseslerde kalıp ve aksesuar parçaları kullanılmakta olup, bunların görevleri aşağıdaki gibidir[47].

4.5.1 Üfleme-üfleme ve pres-üfleme prosesinde kullanılan kalıp parçaları

Üfleme-üfleme ve presleme-üfleme prosesinde kullanılan kalıp parçaları şunlardır:

- Huni : Damlanın ebüşör merkezine düşmesini sağlar.
- Ebüşör : Hazırlayıcı kalıp parçasıdır. Huniden gelen cama ilk formunu verir.
- Parizon : Ebüşörde ilk şeklini almış cam.
- Tampon : Görevi yerleştirme havasını vermek ve parizonun dibini yapmaktır.
- Müldebak : Kafa kısmının şeklini oluşturan kalıp parçasıdır.
- Ring : Ürünün ağız yüzeyini şekillendirir.

Mandren : Ağız delici. İlk boşluk şeklini veren kalıp parçasıdır.

Kovan : Mandrene yataklık eder.

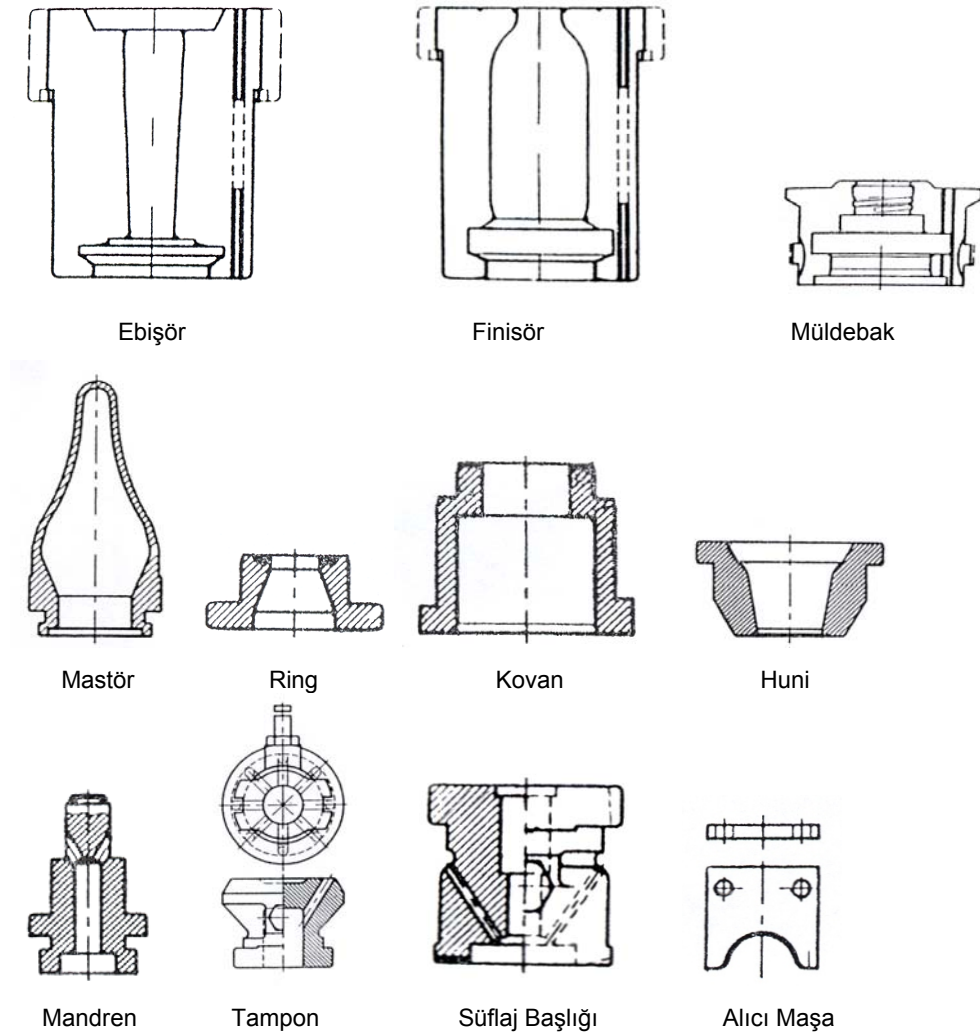
Finisör : Tamamlayıcı kalıp parçasıdır. Ebüşörde ilk şeklini alan cam parizon finisörde son şeklini alır. Finisörün iç duvarı, cam ürünün dış şekline sahiptir.

Müldefon : Dip yapıcı kalıp parçasıdır.

Süflaj Başlığı : Parizonu şişirip finisörün şeklini alması için gerekli havayı vermeye yarar.

Alıcı Maşa : Şişeleri kalıp finisör içinden almaya yarar.

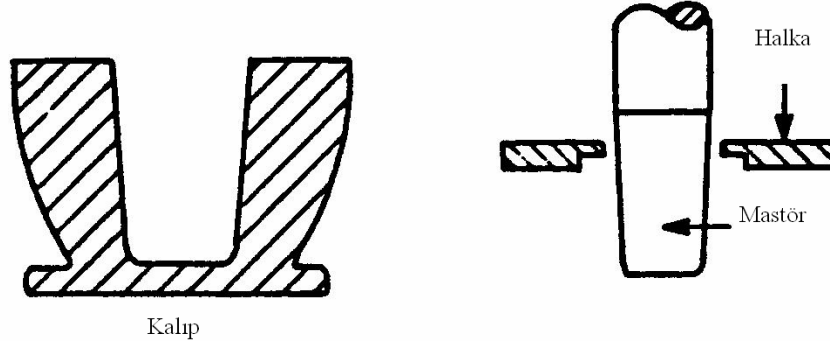
Şekil 4.9’da cam ambalaj üretiminde kullanılan çeşitli kalıp ve kalıp aksesuarları gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Cam ev eşyası üretiminde kullanılan kalıp ve aksesuarları[46,47].

4.5.2 Pres prosesinde kullanılan kalıp parçaları

Pres yöntemiyle cam mamul üretiminde ise ,kullanılan parçalar az sayıda ve genellikle kalıp ile ilgilidir. Bütün pres imalat metotlarında kullanılan kalıp parçaları üç ana bölümden ibarettir(Şekil 4.10). Bunlar, Kalıp Gövdesi, Ring ve Mastör'dür[46,47].



Şekil 4.10: Pres mamuller için kalıp donanımları[47].

Kalıp, mamulün dış formunu, mastör, iç formunu ve ring ise ağız formu ile ağız üstündeki cam dağılımını oluştururlar.

Ring genel olarak, yaylı bir kafese ya da mastör kafasına tespit edilen bir çerçeveye bağlanmıştır. Bu çerçeve şarj edilmiş olan ergimiş cama girmeye başlamadan önce, ringin kalıbın üstünde doğru olarak yerleşmesini temin eder. Mastör geri çıkmaya başladığında ring, kalıbın üzerinde kalarak kalıbın gövdesi ve ağız ile temasta olan preslenmiş mamulü, mastör kalıptan tamamen çıkıncaya kadar sabit tutar.

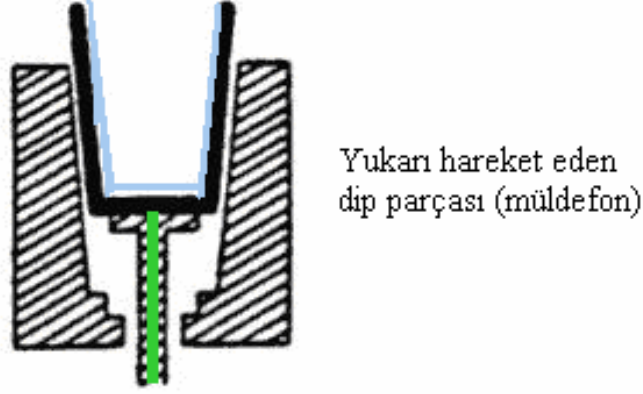
Ring yaylarının görevi, mastörün ring içinde hareket etmesini sağlamak ve aynı zamanda ringin kalıp üzerinde kalmasını temin etmektir. Ring, değişken ağırlıklardaki damlaların preslenebilmesini temin eder. Bu husus özellikle elle cam alınması durumunda önem kazanır.

Mastör tasarımı, presleme işleminin en önemli safhalarından biridir. Çünkü presleme işleminden sonra camdan kolayca çıkabilmesi için konik (aşağı doğru daralan) şekilde olmalıdır. Bu, presleme ile imal edilebilen ürün dizisini sınırlar. Mastör kesidinin şekli ne olursa olsun, daima yukarıdan aşağı doğru eğimli olması gerekir. Mastörün konik şeklinin eğiminin hiçbir suretle dışarı doğru çıkıntı yapmaması gerekir, çıkıntı yaptığı takdirde preslemeden sonra mastörün geri çıkması imkansız olur[47].

4.5.3 Kalıp nedir?

Kalıp gövdesi, cam mamulün şekline göre bir ya da daha fazla parçadan meydana gelebilir[46,47].

Tek parça kalıplar (Şekil 4.11) yaygın olarak, aşağıya doğru daralan vazolar, kaseler ve su bardakları gibi basit mamullerin üretiminde kullanılır.



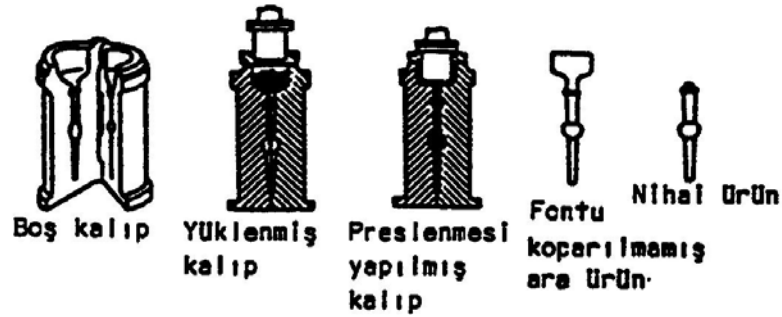
Şekil 4.11: Cam mamul imalatında kullanılan tek parça kalıp ve parçaları[47].

Bazen tek parça kalıplarda serbest bir dip merkezi parçası (müldefon) vardır. Preslenmiş cam mamulü yeterince soğuyup sabit şekle geldiğinde doğru zamanda yukarı doğru hafif bir hareketle kaldırır. Şekil 4.11’de yukarı hareket eden bir dip parçası görülmektedir. Yukarı doğru çıkma hareketini temin etmek için mamulün yeterli konikliğe sahip olması gerekir. Bu koşulda dip merkezi parçası (müldefon) mamulün kalıptan kolaylıkla çıkarılmasına yardım eder. Yukarı hareket eden dip parçasının presleme sırasında sıkıca genişmesine gerek olduğu, şekilden görülebilmektedir, ancak daha sonra mamulü çıkarabilmek için serbestçe hareket eder. Mamulün çıkışı genelde, kalıbın altından, dip istikametinde bölgesel soğutma ile temin edilir.

Açılır kalıplar iki, üç, dört ya da daha fazla parçadan yapılabilir. Tek parçalı kalıplarda çıkarılamayan karmaşık şekilli mamullerin kalıptan çıkarılabilmesi, bu tip kalıpların kullanılmasını gerektirir. Bu tip mamullere örnek olarak, kulplu ürünler (büyük içki bardağı ve sürahi) ya da üzerlerinde kabartma şekiller ya da yazılar olan mamuller verilebilir. İki parçalı kalıplar genellikle Ayrılabilir kalıp olarak adlandırılır. İki yarım parça halinde açılır, böylece yüzey gravürleri ya da kulp oluşturulma sağlanmış olur[47].

Otomatik preste, iki parçalı kalıplar daima menteşelidir. Kalıpların menteşeli olması makinanın operasyon devri sırasında otomatik olarak açılmasını ve tam olarak kusursuz kapanmasını sağlar. Menteşeli iki parçalı kalıplar çoğunlukla el presi ve yarı otomatik preslerde kullanılır.

Presleme yönetimi ile genelde basit dizaynlı ürünler üretilir. Bununla birlikte kalıplara yapılan iyi dizaynlar sayesinde şarap bardağı ayakları gibi daha kompleks şekiller de üretilebilir. Bu imalat metodu için kullanılan kalıplara ise Font kalıp adı verilir.



Şekil 4.12: Çift parça kalıp çalışma prensibi[47].

Şekil 4.12 bu tip presleme prensiplerini göstermektedir. Cam, kalıbın merkezinden duvarlarına doğru sıkıştırılır. İki parçalı kalıp kullanılması, preslenen ürünün tamamının kalıptan çıkarılabilmesine olanak sağlar. Tek parçalı içi dolu mamullerin fontları kırılarak alınır ve mamuldeki bu kırık izi sonradan taşlanarak ya da yakılarak parlatma ile giderilir. Şekil 4.12 bir kapaklar çemberini fontları koparılmadan önce göstermektedir. Burada damla kalıbın merkezini doldurur ve mastörün hareketi ile her bir ring kolunun içine doğru sıkıştırılır (preslenir). Kalıbın içindeki havanın doğru şekilde boşaltımlı olması önemlidir, çünkü kalıpta sıkışıp kalmış hava, camın, kalıbın uç noktalarına kadar yayılmasını engeller.

İki yarım parça ve bir dipten ibaret olan iki parçalı kalıplar, normal olarak menteşelidir. Kalıp ikiden fazla parçayı kapsıyorsa, diğer açma metodları kullanılmalıdır. En yaygın metod kalıp parçalarının kaydırılarak kapanması ve açılmasıdır.

Otomatik preslemede, hangi tipte kalıp kullanıldığı göz önünde tutulmaksızın, doğru kalıp parçalarının sırası ile açılıp kapanma koşulu sağlanmalıdır[47].

Kalıp parçaları presleme başlamadan önce sıkıca kapanıp kilitlenmelidir. Amaç, mastör presleme varken meydana gelen yüksek basınç altında camın kalıp bağlantı yerlerinden sızmasını önlemektir. Bu nedenle menteşelerin ve çiftleştirilen yüzeylerin aşınmadan doğan “minimum tolerans”ta kalmasını muhafaza etmek gereklidir.

4.6 Cam Üretiminde Kullanılan Kalıp ve Kalıp Kolu Çiftleri

Cam üretiminde kullanılan kalıp malzemeleri, sürekli olarak sıcak camla temas etmekte ve cama kendi iç boşluğundaki şeklini vermektedir. Metal kalıp sıcak camın ısısını alarak soğutucu kanallara iletirken, camı soğutarak sertleşmesini sağlamaktadır. Otomatik makinalarda saniyenin kesitleri içerisinde yapılan bu şekil verme süreci sürekli olarak tekrarlanmaktadır. Bu şartlarda çalışan kalıp malzemeleri belirli bir süre sonunda cama şekil verme özelliklerini yitirerek, cam mamullerin bozuk olarak üretilmesine neden olmaktadır. Kalıp malzemelerinin yüzeylerinde oluşan hasarlar kalıp malzemesinin kullanım ömürlerini belirler.

Kalıp üretim maliyetleri, cam ürünün fiyatının oluşmasında en yüksek paya sahiptir. Bu nedenle üretilen kalıpların kullanım ömürleri, hem cam ürünün kalitesine, hem de ürünün ucuzluğuna etki etmektedir. Cam ev eşyası üretiminde kullanılan kalıp malzemelerinin beklenen özellikleri sağlayan kalıp metalleri arasında en ucuz ve en kolay şekil verilebilen metal malzemelerden seçilmesi gereklidir.

Cam ambalaj ve cam ev eşyası üretiminde kullanılan dökme demir ve çelik kalıpların, yüksek sıcaklıktaki cam damlası ile sürekli teması sonucunda yüzeyleri hasara uğramakta ve bu hasarların sonucunda kalıplar kullanılamaz hale gelmektedir. Metalik kalıp malzemelerinin kalıp özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak, farklı yüzey kaplama işlemlerinin incelendiği birçok çalışma yapılmıştır.

Cam ambalaj ve cam ev eşyası üretiminde kullanılan farklı kalıp malzemeleri, üretim süreçlerinde oksitleyici hava atmosferinde, kimyasal olarak aktif karakterde olan sıcak camla temas ederek periyodik ısıl çevrimlere maruz kalmaktadırlar. Cam kalıbı malzemelerinin, sıcak camla teması sırasındaki davranışları cam mamul üretiminin en önemli aşaması olarak görülmektedir. Üretim prosesi sonunda elde edilen ürünün yeterli mukavemet değerlerine ve gerekli yüzey düzgünlüğüne sahip olmasını yakından etkileyen bu davranış üretim koşulları sırasında oluşan birçok faktörden

etkilenir. Oluşan mekanik ve ısı yüklemeler nedeniyle kalıp metali korozyona uğrayarak aşınır ve yüzeyinde oluşan bu hasarlar üretilen cam ürünün yüzeyine yansiyarak yüzey kalitesi ile mukavemet değerlerini düşürür[50].

Cam mamul üretiminde her zaman daha iyi bir kalıp malzemesi arayışı sürmüştür ve bu nedenle geliştirilen yeni malzemelere karşı sürekli bir ilgi olmuştur. Kalıp malzemelerinin oluşturulmasında en önemli konulardan biri, malzemenin cam ile teması sırasında nisbeten daha inert bir karakter göstererek, korozyona uğramayacak, cama yapışmayacak ve camla adhezif bir aşınma göstermeyecek bir yapıya sahip olmasıdır[50]. Kalıp malzemelerinden istenilen tüm bu özellikler, kalıp üreticilerini yeni malzemelerin denenmesinin yanında, bilinen malzemelerin camla temas eden yüzeyin geliştirilerek cam üretiminde servis ömürlerini arttırma arayışına yöneltmiştir. Günümüzde modern ark fiziksel buhar biriktirme tekniklerinden, sıcak toz püskürtme tekniklerine kadar birçok teknik denenmekte ve bunlardan bazıları üretim süreçlerine dahil edilebilmektedir[50,51].

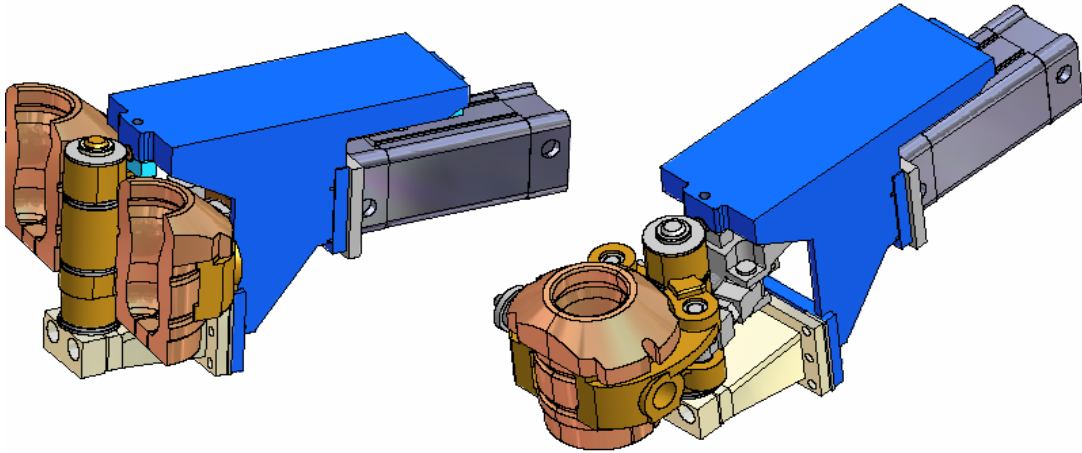
Manns ve arkadaşları bazı kalıp malzemelerinin ve kaplamaların camla temas sonrasında ayrılma yüklerini araştıran çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar dökme demir, nikel alaşımı ve sinter Si_3N_4 gibi farklı malzemelerle plazma nitrülenmiş çelik, galvanik krom kaplama, SiC sert kaplama, BN spreycaplama ve AlN, TiN, TiAlN fiziksel buhar biriktirme kaplamalar üzerinde çalışmışlardır. BN dışında tüm malzemelerde, sıcaklığa bağlı olarak oluşan ayrılma yükleri aynı karakteri gösterirken, BN kaplamalar farklı olarak yüksek sıcaklıklarda bile diğer malzemelerden oldukça düşük ayrılma yükleri sergilemişlerdir. Ayrıca çalışmada Pt-Ir ince film kaplamaların SiC sinter malzemenin daha yüksek servis süresine sahip olduğu belirtilmiştir[51].

Karagöz ve arkadaşının yaptığı çalışmada ise, TiAlN/TiN ince film kaplanmış düşük alaşımlı çelik mastörlerin aşınma davranışı gerçek üretim koşullarında denenecek belirlenmiştir. Üretim esnasında camın tercihi olarak yüzeyde kaplama sırasında oluşmuş olan metalik damla ve sıçramalar üzerine yapıştığı ve bunun ayrılma sırasında yüzeyden parçalar koparak kraterler oluşturduğu tespit edilmiştir. Tam yapışma meydana gelinceye dek bu aşınmanın adhezyon ile geliştiğini belirtmişlerdir[52]. Ayrıca yine aynı araştırmacılar yapmış oldukları diğer bir çalışmada, uyguladıkları düşük alaşımlı çelikler üzerine termal püskürtme yöntemleri

ile kalın WC-Co ve WC-Co-Ni türü kompozit sert metal kaplamaların, ısı yorulma mekanizmaları sonucu kırılma gösterdiklerini belirlemişlerdir[53].

Zhong ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalarda NiAl, Ni-Al-N, Ti-B-C ve Ti-B-C-N ince film kaplamaların ergimiş cam damlacığı ile oluşturdukları ıslatma karakterlerini incelemişlerdir. Çalışmalarda NiAl, Ni-Al-N, Ti-B-C ve Ti-B-C-N kaplamaların 304 paslanmaz çelik malzemeye göre daha iyi bir yapışmazlık özelliği gösterdiklerini belirtmişlerdir[54].

Kulikoy, yüzeyde pasivasyon ve fosfat karbürleme uygulamasını geliştirerek bu uygulanmanın cam üretiminde kullanılabileceğini belirtmiştir. Metal yüzeyinde oluşan fosfatların, sertliği ve aşınma karakterini geliştirmekte olduğunu belirterek, fosfat karbürleme işleminin gri dökme demir kalıplarda 950°C gibi bir sıcaklıkta erken ergiyen fosforca zengin ostenit, sementit ve ferrik fosfit bileşiklerinden oluşan üçlü bileşikler oluşturduğu ve bu üçlü bileşim noktalarının sertlik ve aşınma direncini arttırdığından bahsetmişlerdir[55].



Şekil 4.13: Kalıp-kalıp kolu mekanizması açık ve kapalı olarak görünüşü[49].

Günümüze değin kalıp yüzeylerine borlama ve nitrokarbürleme termokimyasal yüzey işlemlerinin uygulandığına ilişkin bilgiler literatürde yer almamaktadır. Kalıp malzemelerinin performansının artırılabilmesi için söz konusu konularda çalışmalar yapılmıştır. Fakat unutulmamalıdır ki kalıp, cam üretimin önemli elemanlarından biri olsa da günümüz cam üretiminde otomatik cam üretim makinalarının sadece bir parçasıdır. Kalıbın cam makinasına adeptasyonu sağlayan mekanizma kalıp kolu olarak adlandırılır. Şekil 4.13'te kalıp-kalıp kolu mekanizması açık ve kapalı olarak görülmektedir[49].

4.6.1 Kalıp ve kalıp kollarının sahip olması istenilen özellikleri

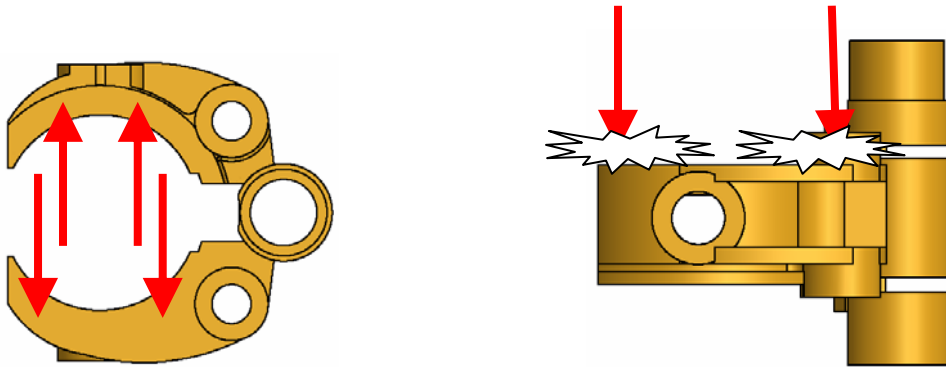
Cam sanayiinde üretim, bütün operasyonların kalbi niteliğindedir. Yapılacak operasyona, işlenecek ürünün cinsine ve büyüklüğüne göre kalıp-kalıp kolları farklıdır. Makinenin kol sayısına ve kalıp büyüklüklerine kısaca ürünün büyüklüğüne göre uygun kalıp-kalıp kolu çifti seçilir. Üretilecek ürünün kalıp dizaynı düşünülürken üretimde kullanılacak cam makinası ve üretim hızının da düşünülmesi gereklidir.

Cam imalatındaki gelişmeler, müşteri beklentileri ve üretim hızlarının da gün geçtikçe artırılması, üretimde değişik malzemeler kullanılmasını ve üretimin gelişimini zorunlu kılmaktadır.

Yapılacak üretime uygun makina seçimini de göz önüne alırsak, kalıp kollarından istenilen özellikler:

- uzun ömürlü olması
- istenilen işleme kalitesini ve ölçüsünü sağlaması
- parça başı takım maliyetinin uygun olması
- kolay temin edilebilir olması
- hafif olmasıdır.

Kalıp kolu değiştirme zamanları ve dolayısı ile işleme zamanları malzeme, makina ve işgücü maliyetlerinin yükselmesi nedeniyle, kalıp kolu malzemelerin aşınmaya karşı mukavemetli olması istenir (Şekil 4.14). Mevcut malzemelerin hem alaşım elementleri hem de yüzey işlemleri ile aşınma mukavemeti ve ömrünü artırmak mümkündür.



Şekil 4.14: Kalıp kolu mekanizması ve kalıp baskı bölgeleri[49].

Değişik kesme kuvvet ve zorlamalara maruz kalan kalıp kolu malzemeleri aşağıda belirtilen özelliklere sahip olmalıdır:

- sertlik ve basınç mukavemeti,
- eğilme mukavemeti ve süneklik,
- ısı mukavemeti,
- oksitlenmeye karşı koyabilme,
- yayılma eğiliminin az olması,
- sürtünmeye karşı dayanıklı olması,
- ayrıca ısı iletim katsayısı ve genleşmenin kullanım alanlarına göre uygun olması.

Cam imalat sektöründe kalıp kolunun oldukça önemli bir yeri vardır. Kullanılan kalıp kollarının %90'ından fazlasını ise 125 mm kalıp kolu oluşturmaktadır (Şekil 4.15). Dolayısıyla kullanılan kalıp kolu takım ömrünün artırılması sektörde önemli bir maliyet avantajı sağlayacaktır.



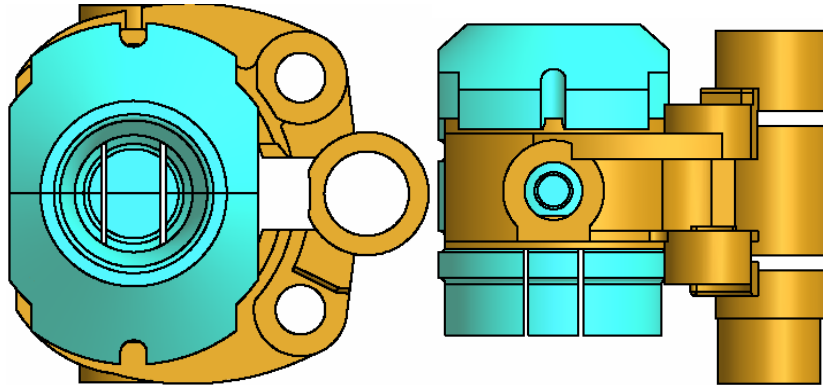
Şekil 4.15: Aşınma ve korozyona uğramış durumdaki kullanılmış bir kalıp kolu[49].

Cam kalıp malzemesinin seçiminde ise üretilecek cam mamulün kalite seviyesi, şekillendirme makinasının üretim hızı ve kalıp ömrü göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlardan birincisi olan mamul kalitesi; kalıp yüzeyinin parlatılabilme özelliği ve çalışma koşullarındaki sıcaklıklar karşısında boyutsal kararlılığı ile yakından ilgilidir.

Kalıp malzemesinin üretim hızı, malzemenin ısı iletkenlik özelliği ile ilişkilidir. Kalıp kolu üstüne yerleştirilmiş kalıbın yandan ve üstten görünüşü Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Kalıp ömrünü de, kalıbın çatlama, aşınma, yüzeyin bozulması gibi nedenlerle oluşacak hasarlar belirler. Bu üç ana konudaki olumsuzluklar ürün maliyetini artırmaktadır[48].

Bir cam kalıbının taşınması gereken özellikler şu şekilde sıralanabilir:

1. ucuz ve kolay temin edilebilir olması
2. homojen ve ince yapılı malzemedен üretilmiş olması
3. yüksek parlatılabilirlik özelliğine sahip olması
4. yüzey parlaklığını yüksek sıcaklıklarda koruyabilmesi
5. düşük toleranslarda iyi işlenebilmesi
6. mekanik özelliklerin yeterli olması
7. şeklini çarpılma olmadan koruyabilmesi
8. düşük ısı genleşmeye sahip olması
9. cam-metal yapışma sıcaklığının yüksek olması
10. ısı çatlamalara karşı dirençli olması
11. yüzey bozulmalarına karşı dirençli olması
12. oksidasyon ve korozyona dirençli olması
13. ısı iletkenliğin yüksek olması
14. kaynaklanabilirliğinin iyi olması.



Şekil 4.16: Kalıp-kalıp kolu üstüne oturmasının teknik çizimle gösterilmesi[49].

Bu özellikleri en iyi şekilde karşılayan bir kalıp malzemesi mükemmel olarak tarif edilebilir; ancak bu özelliklerin bazıları birbiri ile zıtlık gösterdiğinden, sonuçta mutlaka ürüne göre bir optimizasyon söz konusu olmaktadır[46,56].

Cam ev eşyası tasarımı belirlendikten sonra üretimde kullanılacak olan kalıpların oluşturulması safhasına geçilir. Genellikle kalıplar cam ambalaj kalıpların aksine dökme demir yerine çelik malzemeden yapılır.

Kalıp ve kalıp kolu özellikleri ortaklık gösterse de üstlendikleri görev açısından büyük farklılık göstermektedir. Kalıp malzemesinden beklenti metal-cam ilişkisinde ısıya karşı direnç ve yüzey pürüzlüğü olarak özetlenirse kalıp kolunda da aşınmaya karşı mukavemet ve genel makina malzemesine uygunluk olarak sınırlandırılabilir. Şekil 4.17’de kullanılmış ve hurdaya ayrılmış AISI 420 çelik malzemeden kalıp kolu görülmektedir.

Malzemelerin ömrünün artırılmasında aşınmaya dayanıklı sert kaplamalar sayesinde çok önemli gelişmeler sağlanmıştır. Bu gelişmelerle imalat hızının artırılması, maliyetlerinin azaltılması (sarf ve stok), işleme maliyetlerinin düşürülmesi ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi mümkün olmaktadır.



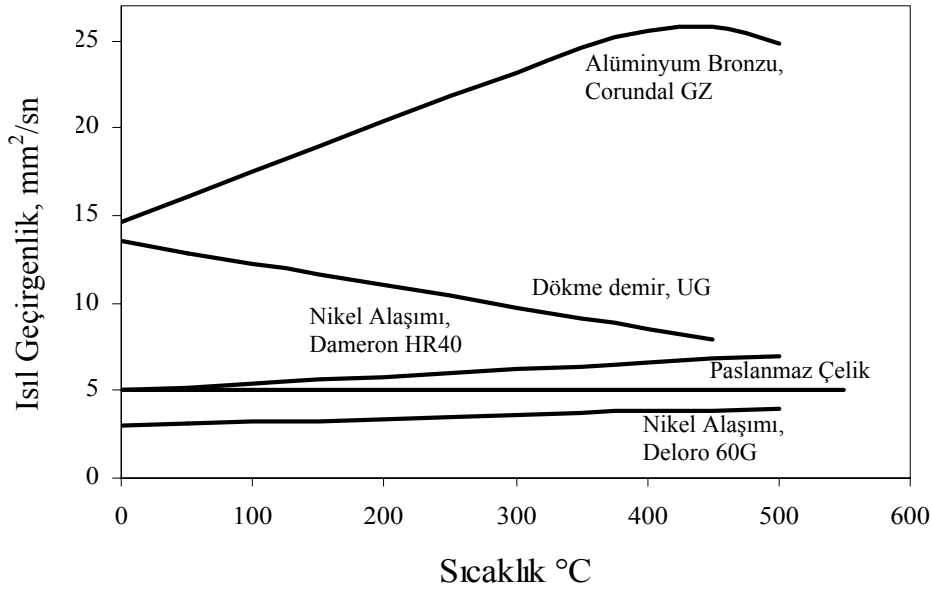
Şekil 4.17: Kullanılmış ve hurdaya ayrılmış AISI 420 kalıp kolu[49].

Bu iyileşmeden maksimum oranda faydalanabilmek için uygun kaplamanın seçilmesi, kaplama prosesinin doğru şekilde gerçekleştirilmesi, tüm bunların yanısıra uygun proses şartlarının seçilmesi önemlidir.

Cam sanayinde, bir kalıbın dizaynında ana kriter, uzun ömürlü kalıplarla, verimli ve hızlı ürünler üretmektir. Kriterler içerisinde şüphesiz dizaynın ekonomikliği de yer almaktadır. Bu nedenle kalıp tasarımında çalışma şartlarına uygun malzeme seçimi çok önemlidir.

4.7 Kalıp ve Kalıp Kolu Çiftlerinde Kullanılan Malzemeler

Cam ev eşyası ve ambalaj üretiminde kullanılan kalıpların genel olarak, yüzey özellikleri ve parlaklıklarının iyi, termal şok direncinin yüksek, yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılığa sahip, oksidasyona ve oksit ilerlemesine direncinin yüksek ve işlenebilirliğinin yüksek olması istenir. Kalıp parçalarının camla temas eden yüzeyleri, beklenenden erken hasara uğramadan, çalışma ömrünü rahatlıkla sürdürebilmelidir. Kalıp malzemesinde cam şekillendirme süreçlerinde, ısı birikiminin önlenmesi için kalıpta ısı yayımının yüksek olması istenir. Bu özellik malzemenin ısıl iletkenliğinin, özgül ısısının ve yoğunluğunun uygun değerlerde biraraya gelmesiyle oluşur. Farklı kalıp malzemelerine ait ısıl geçirgenlik değerleri Şekil 4.18’de verilmiştir[57].



Şekil 4.18: Yaygın olarak kullanılan bazı cam kalıbı alaşımlarının ısıl geçirgenliklerinin sıcaklıkla değişimi[57].

Beklenen özellikleri karşılması ve ucuzlukları ile cam kalıplarının imalatında dökme demirler en çok kullanılan malzemelerdir. Paslanmaz çelikler, bakır esaslı alüminyum bronzları nikel esaslı alaşımlar ve seramikler de yüksek maliyetlerinin yanısıra kullanılmaktadırlar[46].

4.7.1 Paslanmaz Çelik

Paslanmaz çelikler farklı alaşım elementleri ve farklı bileşimlerle oldukça geniş bir çelik türünü ifade etmektedir. Ancak sadece ostenitik ve martensitik yapıda AISI 430 (Cr: %12-%14) ve AISI 310 (Cr: %25-Ni: %20) paslanmaz çelikler, özel kalıp parçalarında kısıtlı olarak kullanılmaktadır[57,58]. Bu alaşımların yüksek sıcaklık dirençleri oldukça yüksek ancak ısı iletkenlikleri 0,03 ile 0,05 cm²/s arasındaki değerlerde oldukça düşüktür[13]. Beklenen özelliğin, yüksek sıcaklıkta yüksek oksidasyon direnci olduğu kalıp parçaları için tercih edilir. Örneğin mastör gibi yüksek sıcaklıklarda dayanıklılık gerektiren parçalarda kullanılırlar. Ancak bunların ısı iletkenlikleri dökme demirlerden çok düşük olduğundan özel soğutma sistemleri kullanılır[47]. Genellikle züccaciye üretimi kalıpları paslanmaz çelikten imal edilirler. Şişe üretiminde kullanımları genel olarak, yüksek sıcaklık dayanımlarının ve aşınma özelliklerinin yüksek olmasının istendiği küçük mastörlerle sınırlıdır[46].

Kalıp kolu malzemesi seçiminde de paslanmaz çelikler, gerek kolay temin edilebilmeleri gerekse rahat işlenebilmeleri ve amaca uygun olmalarından dolayı tercih edilen malzemelerdir. Paşabahçe Şişe Cam Fabrikalarında kalıp kolu olarak AISI 420 çelikten imal edilmiş kalıp kolları tercih edilmektedir.

4.7.2 Bakır esaslı alüminyum bronzu

Bu alaşımlar özellikle bakırın yüksek iletkenliğinden faydalanmak amacıyla tercih edilirler. Şişe imalatında yüksek devir yakalayabilmek amacıyla müldebak gibi kalıp parçalarında kullanılırlar[47]. Bu malzemelerin en yaygın olarak kullanılanı, %14-16 Ni, %8-10 Al ve %8-10 Zn içeren ve Corundal GZ, Minox, ABX ve XX gibi ticari isimlerle anılan alüminyum bronzudur. Bu malzemenin üretimindeki en önemli yenilik, ring yapımında kullanılan çubukların sürekli dökümü olmuştur.

Şekil 4.16'dan görüleceği gibi bu malzemenin en belirgin avantajı kalıp malzemelerinin çalıştığı sıcaklıklarda gösterdiği yüksek ısı geçirgenliğidir[57].

Bu özelliği üretim koşullarında diğer malzemelere göre camdan daha fazla ısının transfer edilebileceği anlamına gelmektedir ve bu nedenle tercih edilmektedir. İçeriğindeki nikel miktarının düşürülmesi yönünde yapılan çalışmalarla %1 Ni içeren AB1 ve %4 Ni içeren AB2 alaşımları geliştirilmiştir. Ancak bu alaşımlar cam üretimi şartlarında oyuklanmaya daha hassastırlar[56].

4.7.3 Nikel esaslı kalıp alaşımları

Yüksek sertliklerinden dolayı işlenebilirliğinin oldukça kötü olmasının yanı sıra, ana malzeme ile benzer özelliklerdeki kaynak malzemesi sayesinde iyi bir kaynaklanabilirliğe sahip bu alaşımların kalıp malzemesi olarak kullanımı, son yıllarda kabuk kalıp yöntemi ve hassas döküm yöntemleri ile üretimlerin yaygınlaşması ile oldukça artmıştır. Nikel alaşımları bor ve/veya krom ilavesi ile sertleştirilebilmektedir. Tipik bileşimleri %7,5 Cr, %0,3 C, %5,0 Fe, %4,0 Si, %1,2 B ve kalanı Ni olacak şekildedir. Üretilen alaşımlar sıcak toz püskürtme tekniklerinde kullanılan toz bileşimlerine benzer özelliktedirler. Günümüzde nikel esaslı alaşımlar, tampon, süflaj başlığı, müldefon ve ring gibi bir çok kalıp parçasının imalinde kullanılmaktadır[56,57].

4.7.4 Seramik esaslı kalıp malzemeleri

Seramikler; metal kalıp malzemelerine alternatif olarak geliştirilmekte olan malzemelerdir. Üretim esnasında oluşan termomekanik gerilimlerin bu malzemelerde erken hasar oluşturmamasından dolayı kullanımı sınırlıdır. Brauns ve arkadaşları metal kalıp malzemelerine alternatif olabilecek seramik malzeme geliştirilmesine yönelik olarak ZrO, SiC, Al₂O₃, Si₃N₄, AlN ve bir MgO, Al₂O₃, SiO₂ karışımı olan kordiyeritten üretilen mastörlerin, üretim şartlarındaki davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemişlerdir. ZrO, Al₂O₃ ve kordiyerit, ısı iletimlerinin düşük olması nedeniyle mastörler yüzeylerinde ısı biriktirerek 700°C'ye ulaşan sıcaklar ile çok yüksek sıcaklık gradyanı oluşturmuş ve kalıplar için iyi bir aday olamayacaklarını gösterirlerken, SiC, Si₃N₄ ve AlN iyi ısı iletkenlikleri ile IS Makinelerindeki üretimler için uygun davranış göstermişlerdir[48].

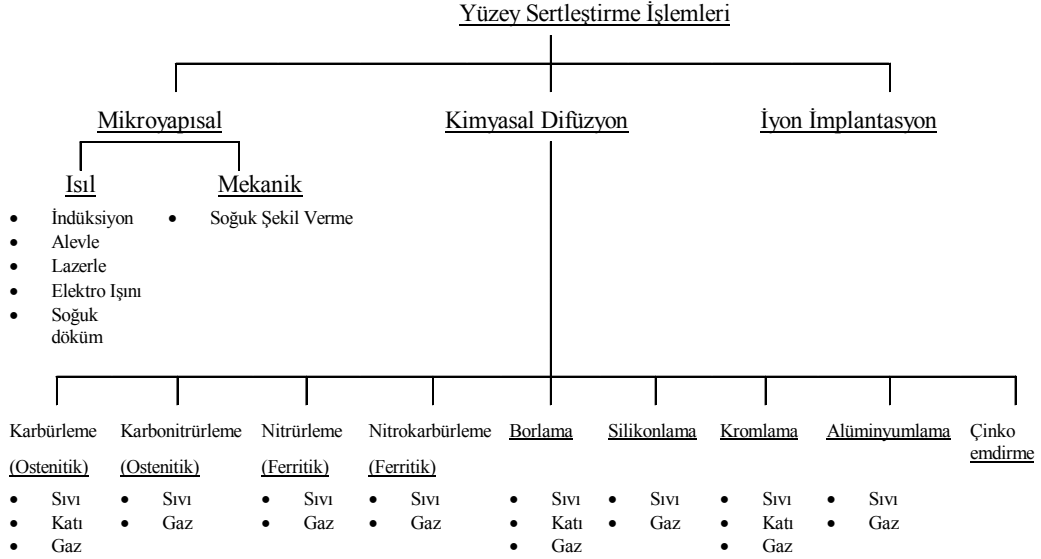
4.7.5 Dökme kemir kalıp malzemeleri

Gri dökme demirler, özellikle alaşımlı dökme demirler cam üretiminde tüm kalıp parçalarında kullanılabilen uzun dayanımları olan malzemelerdir. Cam kalıp malzemesi olarak gri dökme demirlerde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta grafit büyüklükleri ve dağılımı ile anayapıdır. Şekil 4.16'da ötektik katılaşma ardından meydana gelen grafit lamelinin temsili resmi ve lamel grafitli gri dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı gösterilmiştir.

Küresel grafitli dökme demirler, ısıl iletiminin düşük olmasından dolayı sadece ebüşör, tampon, mandrende kullanılmaktadır. Cam kalıplarında, beyaz ve temper dökme demirlerin kullanım alanı yoktur[56,57].

5. METALLERE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ

Yüzey sertliği, aşınma direnci ve yorulma dayanımını artırmak amacıyla kullanılan yüzey işlemleri, mikroyapısal, kimyasal yayılım ve iyon implantasyon yöntemleri olmak üzere üç grupta incelenebilir. İlk iki işlem çoğunlukla demir esaslı malzemelere uygulanır. Birinci kategoride, malzeme yüzeyinin mikroyapısı değişirken, malzemenin iç kısımlarında herhangi bir değişim olmamaktadır. İkinci kategoride, hem yüzeyin mikroyapısı hem de kompozisyonu değişmektedir. Üçüncü grup, ana malzeme ile alaşım oluşturan iyonik parçaların implantasyonu ile malzemenin üst yüzeyini (0,1 µm üzerinde) değiştiren implantasyon işlemini içerir (Şekil 5.1). Mikroyapısal işlemler, kimyasal yayılım işlemleri gibi ucuz ve özel malzeme gerektirmez. Fakat kimyasal difüzyon işlemi ile sertleştirme derinliği daha iyi kontrol edilerek yüksek sertlik ve malzemede daha az çarpılma elde edilir[40].



Şekil 5.1: Isıl ve kimyasal yüzey işlemlerinin sınıflandırılması[60].

Yüzey işlemleri; malzemenin sertlik, süneklik, yorulma, aşınma, korozyon, ısıl ve darbesel şok gibi mekanik ve tribolojik özelliklerinin bir veya birkaçını geliştirmek ve üretim maliyetini düşürmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu özellikler arasında

parçanın aşınma ve korozyona karşı direncinin artırılması; önem açısından ilk sırada yer almaktadır.

Aşınma ve korozyon her yıl önemli maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle son yıllarda malzemelerin çevre şartlarında ve çalışma koşullarında hasara uğramasını önleyecek kaplamaların geliştirilmesi konusunda yaygın çalışmalar yapılmaktadır. Oksit, borür, karbür, nitrür kaplamaların geliştirilmesi bu konudaki çalışmaların birkaçıdır[61].

Termokimyasal ısı işlemler, sementasyon, karbonitrüleme, nitrüleme, nitrokarbürleme, borlama ve metal difüzyonu prosesleridir. Malzeme yüzeyinin belirli metalik veya metalik olmayan elementlerle zenginleştirilmesi, difüzyon (yayınma) ile gerçekleşir. Bu olay daha çok yüzeyin sertliğini ve aşınma dayanımını artırırken ana malzemenin de yüzeyden gelişen etkenlere bağlı olarak dayanımını olumlu olarak etkiler[62,63].

Genel olarak termokimyasal işlemler katı, sıvı veya gaz ortamında gerçekleştirilir. Son yıllardaki gelişmelerle, bu işlemlerin çoğu için elektrikli boşalma (glow discharge) ortamı kullanılmaya başlanılmıştır. Bu yöntem günümüzde yaygın bir şekilde Avrupa, Amerika ve Japonya'da imalatçılar tarafından kabul görmüştür. Bilinen yüzey sertleştirme yöntemlerine göre, plazma ile yüzey sertleştirme işlemleri önemli avantajlara sahiptir[59]. Bunlar; güvenilirlik, çevresel temizlik, ekonomiklik, kısa işlem süresi, kolay maskeleme, mükemmel aşınma direnci, minimum distorsiyon, mikroyapının kontrol edilebilirliğidir.

Yüzey işlemleri, taban malzemeye kitlesel olarak sahip olmadığı nitelikleri kazandırmak, daha ucuz, daha kolay üretilen bir malzemeyi sadece yüzeyini değiştirerek istenilen amaca ulaşılabilmelerini sağlamak, konstrüksiyonlarda beklenen işlevi gösterebilmek için uygulanır.

Metallere uygulanan yüzey işlemleri çok geniş bir alana sahiptir. Uygun yüzey işlemi seçimi için, malzemenin kullanılacak alanının belirlenmesi, taban malzemesinin belirlenmesi ve seçimi, malzemenin konstrüksiyonda beklenen işlev ve aranılan özellik belirlenmelidir.

İstenilen fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmayan taban malzemesine uygun yüzey işlemi seçilir ve uygulanır. Böylece malzeme istenilen işlevi görece seviyeye getirilir.

Yüzey işlemleriyle malzemelere şu özellikler kazandırılabilir:

- Yüksek yüzey sertliği
- Yüksek aşınma direnci
- Yüksek sürtünme dayanımı
- Yüksek korozyona ve oksitlenmeye karşı direnç
- Yüksek çekme dayanımı
- Yüksek basma dayanımı
- Soğuk kaynak eğiliminin azaltılması
- Düzgün kesme kabiliyetinin artırılması
- Kayma özelliklerinin iyileştirilmesi
- Sıcak çatlak hassasiyetinin azaltılması[64].

5.1 Sert Krom Kaplama

Sert krom kaplama işlemi, metal yüzeyleri yüksek sertlikte ve korozyona karşı dayanıklı bir tabaka ile kaplama metodudur. Bu işlem uygulama alanı farklı olmasına rağmen çoğu zaman dekoratif krom kaplama ile karıştırılmaktadır. Sert krom kaplamayı dekoratif krom kaplamadan ayıran özellikler, kaplama metodu, yüksek tabaka sertliği ve yüksek kaplama kalınlığıdır[60].

10 mikrondan (0,01 mm) 500 mikrona (0,5 mm) kadar sert krom kaplanabilmektedir. Sert krom tabakasının düşük sürtünme katsayısı, kaplanan malzemeye üstün bir aşınma dayanımı kazandırır. Sert kromun uygulanmasının başlıca sebebi aşınmaya, yüzey yıpranmalarına ve korozyona karşı üstün dayanımıdır. Ayrıca sert krom kaplama ile ölçüden düşen veya hatalı işlenen, kalıpları ve diğer makina elemanlarını tamir etmek ve doğru ölçüsüne getirebilmek mümkün olmaktadır.

5 mm'den 300 mm çapa kadar olan parçaların tamir amaçlı, korozyona, aşınmaya veya kimyasallara karşı sert krom kaplanması maliyet açısından uygun bir çözüm olmaktadır. Sert krom kaplama bir çok çeşit metalin (dökme demir, çelik, paslanmaz çelik, bakır ve alüminyum) yüzey dayanımının artırılmasında, ısıl işleme alternatifidir. (850-1000 Vickers / 66 Rockwell C yüzey sertliğine ulaşılabilir).

Sert krom kaplama, bir kaplamadan beklenen düşük maliyet ve uygulama kolaylığının yanısıra yeterli performansı gösterdiğinden dolayı bugüne kadar alternatif bir kaplamanın gereği gündeme getirilmemiştir. Ancak sert krom kaplama işlemi sırasında kullanılan altı değerlikli kromun çevreye ve insan sağlığına zararlı etkileri dolayısıyla çevre ve sağlık örgütlerinin getirdiği kısıtlamalar bugün dünyada bu sektörde çalışanların çoğunun işlerini kaybetmelerine sebep olmaktadır. Uçak uzay sektöründe çok önemli bir yere sahip olan sert krom kaplama endüstrisi ekonomik yönden ve artan kısıtlamalarla ağır bir darbe alırken rakip kaplama metodlarının ortaya çıkmasıyla gelecekte değerini yitirme tehlikesiyle karşı karşıyadır[65].

5.2 Akımsız Nikel Kaplamalar

Elektrolitik, yani metal kaplama banyolarından akım geçirilerek elde edilen nikel kaplamalar, 19.yy'dan beri metal yüzeylerinin korozyondan korunması ve mühendislik özellikleri kazandırmak amacı ile kullanılmaktadır. Nikel üzerine kaplanan ince bir krom tabakası ise nikeli ortamın etkisinden daha uzun süre korur.

Son yıllarda aşınmaların yaşandığı pek çok alanda başarı ile uygulanmış bir yöntem olan akımsız olarak elde edilen nikel kaplamalar ise nikel sülfat, nikel klorür ve nikel asetat gibi tuzlardan elde edilen çözeltilerden nikelin fosfor ya da bor bazlı katalizörler yardımıyla redüklenerek bir yüzeye toplanması esasına dayanan, metalin açığa çıkması ile elektrik akımı gerektirmediği için akım kaynağına ihtiyaç göstermeyen, aşınma ve korozyon yaşandığı pek çok alanda başarı ile uygulanan bir yüzey iyileştirme yöntemidir.

Endüstriyel uygulamaları ancak 1950'lerin ortalarında başlayan bu kaplamaların üstünlükleri başlıca şu şekilde sıralanabilir:

- Çok az gözenekli ve yüksek korozyon dirençli olmaları
- Düzgün olmayan yüzeylere dahi eş kalınlıkta ve çözelti ile temas eden her bölgeye kaplanabilmeleri
- İstenilen her kalınlıkta kaplanabilmeleri
- Aşınmaya dirençli ve ısı işlemler sayesinde yüksek sertlik değerlerine ulaşabilmeleri

- Metal veya metal olmayan yüzeylere dahi belirli bir ön işlemten sonra kaplanabilmeleri
- Metalin açığa çıkması elektrik akımı gerektirmediği için akım kaynağına ihtiyaç göstermemeleri

Akımsız metal kaplamalar içinde nikel kaplamalar en önemli yeri tutar. Her yıl artan kullanım alanları ise üzerine kaplandıkları malzemenin, dekoratiften çok işlevsel özelliklerini değiştirmesine borçludur. Günümüzde özellikle korozyon ve aşınmaya yüksek dirençlerinin yanında; sertlikleri, süneklikleri, lehimlenebilirlikleri açısından da çok değişik uygulama alanları bulmuşlardır. Başta elektronik, kimya, uçak, uzay, otomobil olmak üzere birçok değişik alanlarda gittikçe artan boyutlarda kullanılmaktadır.

Akımsız nikel kaplamalar, büyük oranda yumuşak çeliklerin, alaşımlı çeliklerin veya dökme demirlerin kaplanmasında kullanılırlar. Takım çelikleri veya paslanmaz çeliklerin kaplanmasının payı ise genel olarak %10'dan azdır. Kaplama kalınlıkları 2-200 μ arasında değişmesine rağmen en çok rastlanan kalınlıklar 20-60 μ arasındadır.

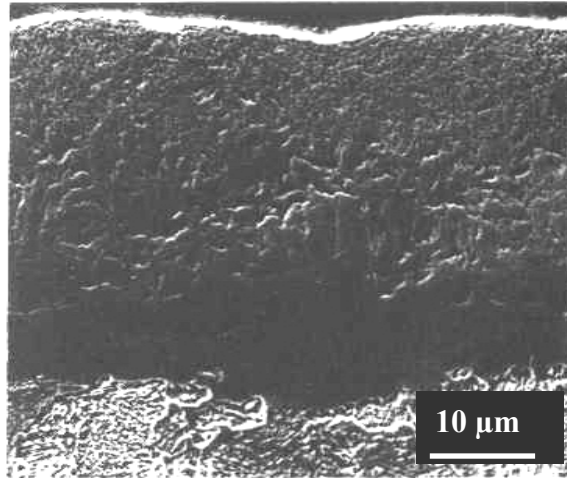
Kimyasal nikel kaplamalar olarak ta bilinen akımsız kaplamalar, kimyasal malzeme sarfiyatının fazla oluşu, yöntemin özel aksam gerektirmesi ve atık su temizleme sorunları nedeniyle pahalı bir kaplama türüdür[66].

5.3 Nitrokarbürleme

Nitrokarbürleme, karbonun azotla birlikte yüzeyde yayınarak yüzeyde karbonitrür ϵ fazının oluştuğu, 560-760°C sıcaklıkları arasında, karbon difüzyonu ile birlikte azotun kullanıldığı, bir termokimyasal işlemdir. Bu işlemde çok ince (10-20 μ m) bir demir nitrür tabakası elde edilir. Sert, gözenekli, aşınmaya ve korozyona dayanıklı bir yüzeydir. Bu işlem sırasında oksidasyon işlemi de uygulanarak, korozyon dayanımı artırılabilir. Çelik ve dökme demirlere uygulanabilir. Yüzeyde oluşan faz karbonitrür bazlı ϵ -demir nitrür (Fe_3N) fazıdır. Bu proses hem sodyum siyanür ve sodyum siyanatlı tuz banyolarında, hem de karbürleyici gaz ve amonyak karışımının bulunduğu gaz ortamlarında uygulanır. Karbonitrür tabakası adhezif aşınmaya karşı oldukça dirençlidir. Soğutma sırasında yüzeyde koruyucu oksit oluşturularak korozyon direnci yüksek bir yüzey elde edilebilir. Elde edilen tipik sert yüzey

oldukça incedir. Nitrokarbürleme atmosferlerinin ve tuzlarının emniyetli olarak depolanması ve kullanımı zordur[62,67].

Genel uygulama şekli, taban malzemesi oda sıcaklığından 350°C'ye ısıtılır, 1 saat süreyle havada oksidasyona maruz bırakılır. Taban malzemesinin cinsine göre değişmekle birlikte, gaz nitrokarbürlemede kullanılan gazlar farklı karışımlarda C₃H₈, N₂, NH₃ ve CO₂ gazlarıdır. Prenosil 580°C'de %50 NH₃ ve %50 C₃H₈ içeren gaz atmosferinde saf demirin yüzeyinde sert bir tabaka oluştuğunu bildirmesinin ardından yapılan araştırmalarda yüzeyde oluşan tabakanın karbonitrür fazı olduğu anlaşılmıştır[63,67]. Yüzeyde belirli bir miktar oksijen bulunmasının ε fazı oluşumunu hızlandırdığı sonraki araştırmalarda ortaya çıkarılmıştır. Gaz nitrokarbürleme işleminde yüzeyde oluşturulan manyetit fazı ile yüzeyde oluşturulan bölge siyah tabaka olarak adlandırılır ve oluşan poroz bölgeye penetrasyon kolaylaşırken difüzyon daha derinlere ilerler. Şekil 5.2'de yüksek karbonlu çelikte oluşan nitrokarbürü tabaka görülmektedir[63,67].



Şekil 5.2: Yüksek karbonlu çelikte yüzeyde oluşan nitrokarbür yapısı[66].

Nitrokarbürleme işlemleri içerisinde son yıllarda oldukça yaygınlaşan plazma ile nitrokarbürleme işlemi temelde, katı, sıvı veya gaz elektriksel boşalma şartlarında gerçekleştirilir. Günümüzde bu işlem hem sıvı hem de gaz atmosferinde çok sık olarak yapılmaktadır. Burada amaç istenen şartlara uygun tek fazlı ε-nitrür tabakasının oluşturulmasıdır. Ancak bu işlem yapılırken istenen şartların oluşmasında birçok zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu büyük çoğunlukla, işlem esnasında yüzeyden saçılan karbonun etkisi ile ilgilidir. Çünkü saçılan karbon, nitrürleme için seçilen gaz karışımına katılabilir. Çok fazla miktarda karbon bu gaz

karışımına katıldığı takdirde beyaz tabaka ϵ 'un içerisinde sementiti oluşturabilir. Bu durum ise, bu tabakanın işlevini tam olarak görmesini engelleyebilir. Plazma şartlarında gerçekleştirilen nitrokarbürleme, çevreye daha az zararlı atık vermesi ve uygun işlem değişkenleri ile tek fazlı ϵ -nitrür fazını elde etmenin kolay olması ve gaz ve enerji tüketiminin az olması nedeniyle tercih edilmektedir[69].

5.4 Borlama

Endüstride, makine üretiminde kullanılan malzemelerin seçimi kadar bu malzemelere uygulanan yüzey işlemleri de büyük önem taşımaktadır. Borlama farklı endüstri için yakın zamanda geliştirilmiş termo kimyasal prosestir[70].

Borlama, malzeme yüzeyinde istenen yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci ve iyi oksidasyon direnci sağlayan en elverişli yüzey sertleştirme işlemlerinden biridir. Bir termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemi olan borlamada, bor atomları metal yüzeyine termokimyasal olarak yayınarak sert bor tabakası oluştururlar. Bu yöntem, yaklaşık 900-1100°C sıcaklıkta, değişik ortamlarda (katı, sıvı, gaz veya plazma) alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, dökme demirlere, demir dışı metal ve alaşımlarına (Ni, Co, Mo, Ti), bu alaşımların toz metalurjisi yöntemiyle üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi birçok malzeme grubuna uygulanabilir. Ancak kullanım alanı olarak çelik malzemeler ilk sırayı alır[60].

Borlama prosesinin başarılı uygulanabilmesi için kinetik parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir[71]. Yüksek sıcaklıkta yapılan borlamanın difüzyon kontrollü bir proses olduğu bilinmektedir. İstenilen kalınlık ve sertlikteki bor katmanın oluşturulabilmesi için proses parametrelerinin doğru tayin edilmesi gerekmektedir [72].

Borlama sonucu oluşan borür fazlarının en önemli özelliği yüksek sertlik (1400-1500 HV) ve yüksek ergime sıcaklığına (1400-1550°C) sahip olmasıdır. Oluşan bu sertlik çelik türü demir esaslı malzemelerde 650°C'ye kadar kalıcıdır. Diğer yüzey sertleştirme teknikleriyle karşılaştırıldığında borlama yoluyla yüzeyde daha sert bir yapı elde edilir[61]. Tablo 5.1'de borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması verilmiştir. Farklı

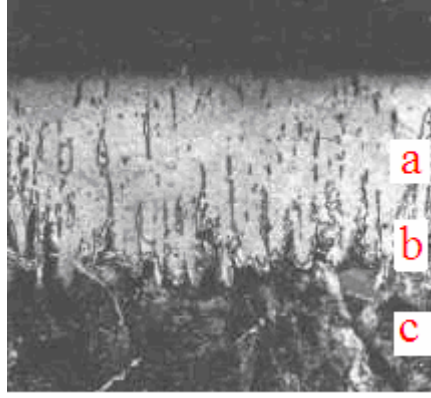
yüzey işlemleri ile borlamanın karşılaştırılması Tablo 5.1’de karbon içerikleri farklı çeliklerde oluşan borür yapıları Şekil 5.3’te verilmiştir[68].

Tablo 5.1: Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması[68].

Malzeme	Mikro sertlik (kg/mm ² veya HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1,600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1.800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1.900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Yüksek hız takım çeliği BM42	900-910
Nitrülenmiş çelik	650-1.700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1.000-1.200
Sementit karbürler, WC+Co	1.160-1.820(30kg)
Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ seramikler	1.483(30kg)
Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂ seramikler	1.730(30kg)
Sialon seramikler	1.768(30kg)
TiN	2.000
TiC	3.500
SiC	4.000
B ₄ C	5.000
Elmas	10.000

İşlem süresi ve sıcaklıktaki artış FeB daha da kalınlaşmasını sağlar[73,74]. Borlama sıcaklığı ve işlem süresine bağlı olarak bor katmanlarının 38,4 ile 225 µm arasında değiştiği gözlenmiştir. Özbek[75], Şen[76,77] ve Pelleg[78] çalışmalarında karbon çeliklerinin borlanması FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğunu belirtmişlerdir[79].

Borlama yüzey işlemi ile malzeme yüzeyinde borür tipi seramik fazlar oluşturulur (Şekil 5.3). Bu termo difüzyon işleminin uygulama sıcaklık aralığı 800-1000°C’dir ve borlama ortamı katı, sıvı veya gaz bor bileşiklerinden oluşmaktadır. Bu işlemle bor atomları demir içerisinde arayerlerde çözünür. Ancak bor atomları bu arada demirle FeB ve Fe₂B tipi arayer intermetalik bileşikleri oluşturur. Borlama işlemi esnasında süresine ve sıcaklığına bağlı olarak tek ya da çift fazlı katmanlar oluşur. Tek tip fazdan oluşan Fe₂B endüstriyel uygulamalar için çok daha avantajlıdır. Çünkü FeB fazı çok daha gevrek bir fazdır ve daha yüksek termal genleşme katsayısına sahiptir.

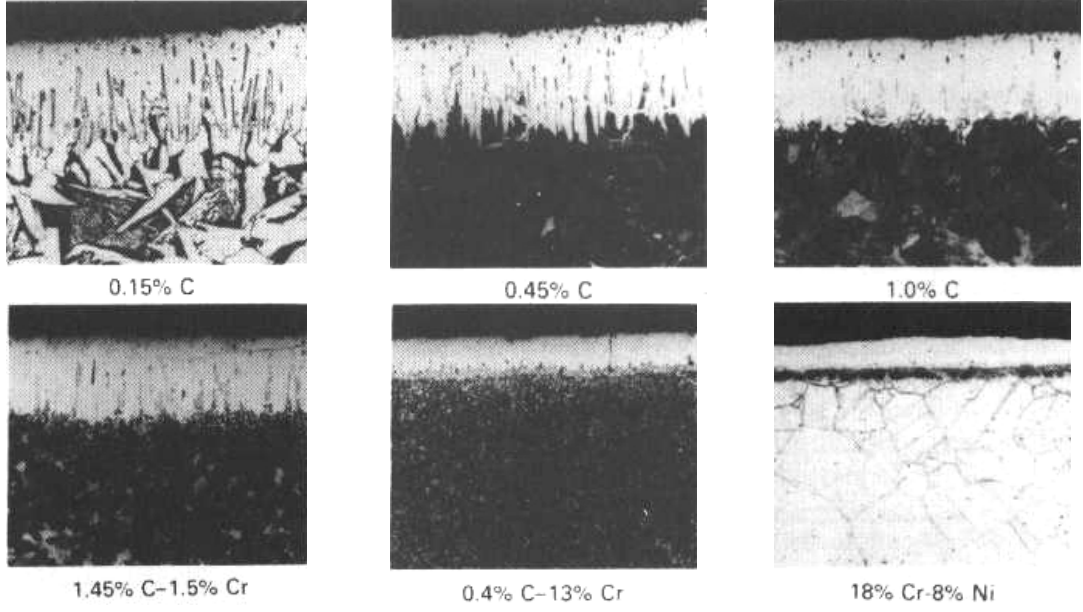


Şekil 5.3: Borlanan malzemeye kesitten bakıldığında, yapının üç farklı bölgeden oluştuğu görülür: a) FeB ve Fe₂B fazlarını içeren borür katmanı, b) Geçiş bölgesi, c) Matris[60].

Borür fazlarının özellikleri üç parametreye bağlıdır: Altlık malzemenin kompozisyonu, proses sıcaklığı ve süre. Borlanan malzemeye kesitten bakıldığında, yapının üç farklı bölgeden oluştuğu görülür: a) FeB ve Fe₂B fazlarını içeren borür katmanı, b) Geçiş bölgesi, c) Matris.

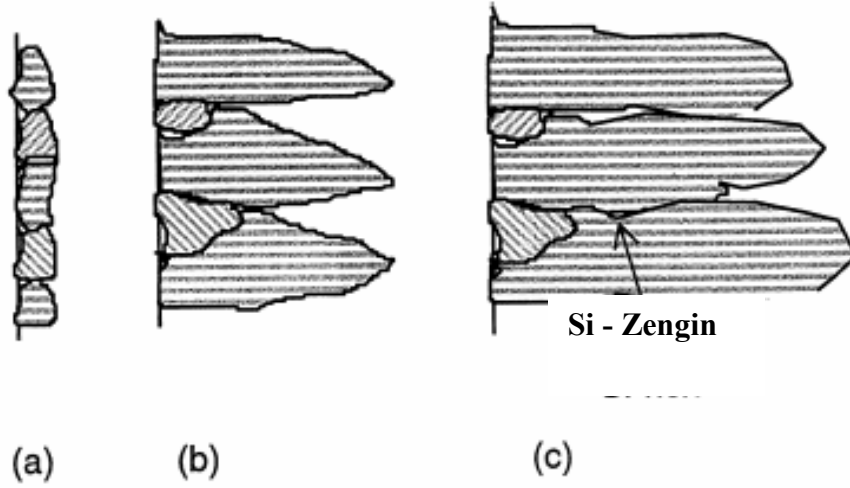
Özellikle geçiş metalleriyle oluşan borür fazlarının sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci daha yüksektir. Oluşan bu borür fazları matris yapıya güçlü kovalent bağlanma gösterip özellikle adhezif ve abrazif aşınma koşullarında iyi özellikler sağlamaktadır. Borürlerin oluşma serbest enerjileri genellikle yüksektir ve dolayısıyla borürlere ağır koşullar altında mükemmel termal ve kimyasal stabilite sağlamaktadır. Borlanmış demir alaşımlarının yüzeylerinde genellikle bor bileşimli katmanlar oluşur. Bu bileşim katmanlarında normal şartlarda iki alt katman oluşur. Alt ve üst katmanlar FeB ve Fe₂B bakımından zengindirler[80].

Borlama işlemi sonucunda oluşan borür fazları, borlama ortamının aktif bor konsantrasyonuna bağlı olarak, yüzey çizikleri ve pürüzlülükleri gibi makro hatalar, tane sınırları ve dislokasyonlar gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde başlamaktadır. Özellikle düşük aktif bor konsantrasyonunun bulunduğu ortamlarda, bu bölgeler borür fazının oluşabildiği yegane yerlerdir(Şekil 5.5). Yapılan araştırmalarda ilk oluşan borür fazının Fe₂B olduğu, tespit edilmesine karşın Mösbauer elektron spektroskopu ile yapılan ölçümlerde ilk oluşan borür fazının Fe₂B fazı üzerinde FeB fazının bulunduğu ve en dış yüzeyde ise FeB_{1+x} fazının yer aldığı tespit edilmiştir[69].



Şekil 5.4: Farklı karbon bileşimlerine göre yüzeyde oluşan borür tabakalarının morfolojisi ve kalınlıkları[63].

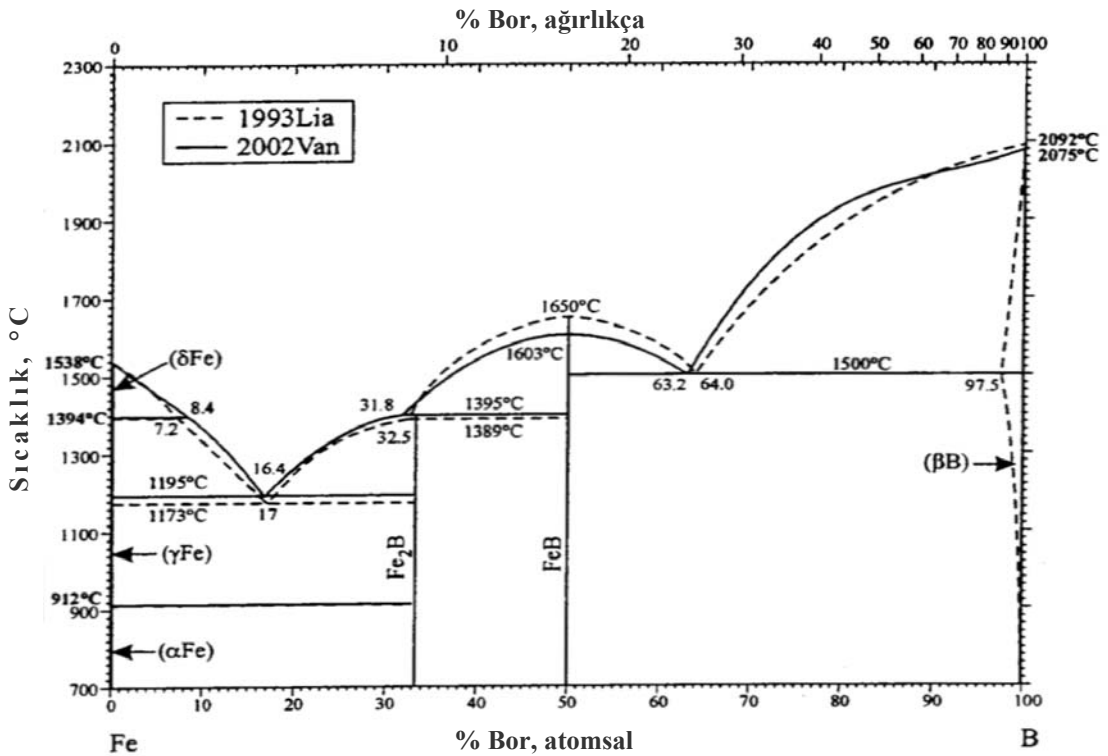
Fe-B ikili diyagramında artan bor yüzdeleriyle birlikte oluşan Fe_2B fazından FeB faz bölgesine geçilmektedir. Lia ve Van' ın deneysel olarak oluşturdukları Fe-B ikili faz diyagramları Şekil 5.6'da aynı şekil üzerinde verilmiştir[81,82].



Şekil 5.5: Konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması (a) Çekirdeklenme aşaması (b) ve (c) $\langle 001 \rangle$ oryantasyonunda büyüme aşaması[82].

Yapılan araştırmalarda, borür tabakasının oluşunu konusunda genel olarak savunulan nokta, işlemin difüzyon kontrollü olmasıdır. Bu sebeple, bazen termokimyasal terimi yerine termodifüzyon kelimesi de kullanılmaktadır. Fakat borlama ile ilgili farklı büyüme mekanizmaları da öne sürülmektedir[48].

Difüzyon yoluyla büyüme mekanizmasına göre; ortagonal prizma, bor atomlarının yayınmasını kolaylaştıracak en büyük ara kesite sahiptir ve Fe_2B kristalinde, $\langle 001 \rangle$ doğrultusunda, bor atomları bir yayınma kanalı oluşturur. Bor tabakasından borür ve esas metal ara yüzeyine sürekli olarak yayılan bor atomları, borlama tabakası yüzeyine dik doğrultuda Fe_2B kristalleri oluşturur ve bu kristaller kolonsal şekilde içeriye doğru büyür. Difüzyon kanallı büyüme mekanizmasında, Fe_2B 'u kuvvetli bir tercihli yönlenmeye sahip olmasına rağmen, Fe_2B/Fe ara yüzeyinde düşük ve ihmal edilebilir bir kolonlaşma göstererek büyümesini veya kristallografik bir tekstürün olmadığı durumda ara yüzeydeki kolonlaşmayı açıklamada yetersiz kalmaktadır. Bu konuda, uçtan büyüme mekanizmasının daha geçerli olduğu ileri sürülmektedir[85].



şekil 5.6: Lia ve Van'ın çalışmaları ile oluşturulan Fe-B ikili faz denge diyagramları[81].

Borun demir içerisindeki çözünürlüğü çok düşük olduğundan katman oluşumunun gerçekleştiği difüzyon alanı net bir görünüme sahip değildir. FeB fazı Fe₂B fazına göre daha kırılğan, sert ve daha yüksek termal genleşme katsayısına sahip olmasından dolayı çift fazlı bor katmanlarının bor katman kırılmaları sıklıkla gözlenmektedir[86].

Artan sıcaklıklarla birlikte borlanan metal yüzeylerde FeB fazının azalarak Fe₂B fazının arttığı bilinmektedir. FeB fazından Fe₂B fazına dönüşüm difüzyon tavlama ile mümkün olmaktadır. Tavlama uygulaması, NaCl ve KCl ötektiğinde oksijen bağlı bileşiklerin bor tabakasının oksitlenmesini önlediği şartlarda yapılabilmekte ve borürlü tabakada FeB fazı azalırken Fe₂B fazı artmaktadır. Borlamadan hemen sonra yapılan homojenleştirme işlemi ile, kırılğan olan FeB fazı bor difüzyonu ile Fe₂B fazına dönüşerek, iki fazlı borür tabakasının kırılğanlığı azaltılabilmektedir[83,84]. Çift fazlı bor katmanının kırılğanlığını azaltmak için farklı farklı ön veya ileri borlama işlemleri denenmiştir. Bunlardan bazıları karbürleme, lazer işlemleri, su verme, iyon implantasyonu ve gaz nitrürlemedir[87-89].

Günümüzde geleneksel borlama tekniklerinin yanında ark plazma sinterleme, iyon implantasyon, kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirme gibi ileri teknoloji gerektiren yüzey işlemleri ile de borlama yapılabilmektedir. Ayrıca yüzey işlemleri olarak farklı amaçlarla çeşitli uygulamalar da yapılmaktadır.

5.4.1 Borlama Prosesleri

Borlama, yüksek sıcaklıkta ana metalin yüzeyinde bor atomlarının difüzyonuyla borür tabakası oluşturulması işlemidir[90]. Borlama günümüzde yalnızca metallere değil, sermet ve seramik malzemelere de uygulanmaktadır. Bor kaplama, yüzeyde bileşik oluşturacak şekilde bor atomlarının difüzyonu olarak ta bilinmektedir[91].

Borlama işlemi, yüzeyi iyi temizlenmiş malzemelere 700-1000°C sıcaklık aralığında, 1-10 saat sürelerde katı, pasta, sıvı veya gaz gibi çeşitli ortamlarda uygulanabilmektedir[83,90]. Bir termo kimyasal difüzyon prosesi olan borlamanın demir, demir dışı ve bağzı süper alaşım gibi geniş bir malzeme üzerinde uygulaması yapılmaktadır[86,92,93]. Genel olarak ticari bor karışımlarında B₄C donör olarak KBF₄ aktivatör olarak ve SiC dengeleyici olarak ortamda bulunurlar[94].

Son teknolojik gelişmelerle birlikte, gaz ortamında termo-kimyasal borlama metodlarının dışında, plazma borlama ve akışkan yatakta borlama gibi yeni olan teknikler de kullanılmaktadır. Ayrıca, termo-kimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme yöntemleri de borlama amacıyla kullanılan yöntemlerdir[83,90].

Borlama, metal ve alaşımların yüzeylerinde sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini artırırken, aynı zamanda bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda korumak ve erozyon direncini de arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Borlama işlemi, endüstriyel olarak daha çok demir esaslı alaşımlara uygulanmaktadır[95].

5.4.2 Borlama işleminin avantajları

Borür tabakası çok yüksek sertlik (1450-5000 HV) ve ergime sıcaklığına sahiptir. Demir esaslı malzemelerde kaplama tabakasının sertliği, alt kritik sıcaklığa kadar (650°C) kalıcıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme teknikleri olan sementasyon ve nitrasyona göre çok daha yüksektir[68].

Borür tabakasının yüksek sertlik değeri ve düşük sürtünme katsayısı değerine sahip olması, aşınma direncinin oldukça yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu özellik, kalıp imalatında ana malzemenin işlenmesi sırasında kolaylık, maliyetinde ucuzluk ve orijinal yapıya göre mekanik özellikler açısından çok daha üstün özellikler sağlamaktadır[68,90].

Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda da (550-600°C) korunmaktadır[90]. Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksidan olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon direncini arttırmaktadır[90].

Borlanmış yüzeyler, çok yüksek sıcaklıklarda (850°C) orta özellikte oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyonuna sahiptir[90]. Borlanan parça, oksidan ve korozif ortamlarda üstün bir yorulma ömrüne sahiptir[90].

Borlama işlemi, yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk kaynaklanma eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedirler[90,96].

5.4.3 Borlama işleminin dezavantajları

Borlama işlemi, birçok avantajının yanında bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Bunlar sıralanacak olursa;

Borlama tekniği, esnek değildir ve gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre maliyeti daha yüksektir. Gaz karbürizasyonu ve plazma nitrasyonu daha esnek tekniklerdir. Bu teknikler, daha az işçilik ve daha düşük maliyet gerektirir. Ayrıca, bu işlemlerin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Bu sebeple, yüksek sertlik, dış ortamlara karşı yüksek aşınma direnci ve yüksek korozyon direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilmektedir[90].

Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25 µm'lik bir tabaka kalınlığı, 1,25-6,25 µm'lik bir büyümeye neden olmaktadır[68]. Bu kalınlık artışı, borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır.

Hassas toleranslarla çalışmak gerektiğinde elmas takımlarla kaplama işlenmekte, fakat yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi, kaplama tabakasında kırılmalara neden olmakta, kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır.

Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde sementasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği, dışı üretimine sınırlama getirmektedir[90].

Takımlar borlandıktan sonra çoğu zaman bir sertleştirmeye ve temperlemeye tabi tutulmaktadır. Bu işlemlerde, bor tabakasının özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum gerekmektedir.

5.5 Borlama Yöntemleri

Borlama işlemi esnasında bor kaynağı ve bor sağlayıcı bileşikler katı, sıvı veya gaz fazında olabilirler. Borür tabakalarının oluşumu için uygulanan yöntemler aşağıdaki şekilde belirtildiği gibi sınıflandırılabilir:

- Termo-kimyasal yöntemler (kutu, pasta, sıvı ve gaz borlama)
- Termo-kimyasal olmayan yöntemler (fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey kaplama ve iyon biriktirme).

Bu teknikler içerisinde en çok kullanılanları, termo- kimyasal yöntemlerdir. Termo-kimyasal bor kaplama işlemi, sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonuna dayanan bir kaplama yöntemidir.

Termo-kimyasal bor kaplama yöntemleri dört ana grup altında toplanmaktadır[90,97].

Kutu borlama

Pasta borlama

Sıvı borlama

- Elektrolitik sıvı borlama
- Elektrolizle sıvı borlama

Gaz borlama

Plazma Borlama

5.5.1 Kutu borlama

Kutu borlama işlemi, elle kolayca gerçekleştirilmesi, emniyetli olması, faz bileşimlerinin değişiminin çok az olması ve bu yöntemde çok az ekipmana gerek duyulması nedeniyle çok kullanılan bir tekniktir. Proses, kutulamayı, ısıtmayı ve temizlemeyi içermektedir. Kaplanacak malzeme 3-5 mm kalınlıkta toz karışımı ile çevrelenerek borlama yapılmaktadır. Kaba yüzeylerde bu kalınlık 10-20 mm olabilmektedir. Kutu borlamada, çok farklı borlama bileşenleri kullanılabilir. Bu bileşenler katı bor sağlayıcılar, akışkanlık sağlayıcılar ve aktivatörlerdir[90].

Yaygın olarak kullanılan bor sağlayıcılar; bor karbür (B_4C), ferrobor(Fe-B) ve amorf bordur(B). Ferrobor ve amorf bor çok iyi bor kaynaklarıdır ve kalın borür tabakaları oluştururlar, ayrıca bor karbürden çok daha pahalıdır. SiC ve Al_2O_3 reaksiyonda yer almaz ve akışkanlık sağlayarak, dolgu malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca SiC, bor miktarını kontrol eder ve borlama ajanlarının kaybını önler. $NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $Na_2B_4O_7$ borlama aktivatörleri olarak kullanılmaktadır. Bunların haricinde bazı ticari bor sağlayıcılar da borlama amacıyla kullanılmaktadır (ticari Ekabor tozu gibi). Amorf bor ve Al_2O_3 ile yapılan borlamalarda tabaka kalınlığı düşük fakat her tarafta homojen olmaktadır. Bor karbür kullanılması durumunda, borkarbürle birlikte kalsiyum klorür, baryum klorür, borik

asit ilave edildiği zaman kaplama elde edilememekte, sodyum klorür, HCl, amonyum klorür ve özellikle boraks kullanıldığı zaman kaplama gerçekleştirilebilmektedir.

5.5.2 Pasta borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın zor ve pahalı geldiği durumlarda veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, %45 B₄C, (200-400 mesh tane boyutu) ve %55 kriyolit (Na₃AlF₆ flaks ilaveli) kullanılırken iyi bir bağlama ajanı için de (bütil asetat içinde çözünmüş nitro selüloz) geleneksel borlama tozu karışımı (B₄C-SiC-KBF₄) kullanılır. Bu yöntemle borlayıcı karışım malzemenin yüzeyine püskürtülerek veya spreylenecek oluşturulur ve kurutmadan sonra 1-2 mm kalınlığında bir tabaka elde edilir. Sonraki aşamada demirli malzeme 900°C'ye induksiyonla ya da 800-1000°C'lik bir fırında 5 saat süreyle ısıtılır. Bu proseste koruyucu atmosfer olarak argon, NH₃, N₂ gereklidir. 50 µm'yi geçen bir katman 1000°C ve 20 dak. sürede elde edilir. Bu proses büyük parçalar ve kısmi borlama gerektirecek parçalar için idealdir[60].

5.5.3 Sıvı borlama

Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama 670-1000°C aralığında gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerin bazı dezavantajları vardır. Bunlar;

Tuz kalıntılarının malzeme üzerinde kalması ve ortamda reaksiyona girmeyen borun varlığı zaman ve para kaybına yol açar.

Borlamanın verimliliği için banyo viskozitesinin artmasına izin verilmez. Bu durum banyonun sürekli değiştirilmesiyle yapılır, maliyetlerin yükselmesinde önemli bir faktördür. Bazı durumlarda korozif dumandan koruma gerekebilir[83,90]. Bu yöntemin zehirlilik, patlayıcı doğa ve çevresel kirlilik gibi dezavantajları kullanımını sınırlamaktadır[17,30].

Elektrolitik Sıvı Borlama; demir esaslı malzemeler içerisinde boraks bazlı eriyik içeren banyo içerisinde (900-950°C) yapılır. %30 B₄C banyoya ilave edilir. Borlama işlemi %20'ye kadar B₄C'un ferro alüminyum ile değiştirilmesiyle geliştirilebilir. Çünkü çok etkili bir indirgeyicidir. Fakat %55 boraks, %40-50 ferro-boron ve %4-5 ferro-alüminyum içeren banyo ile en üstün sonuçlar elde edilir.

Ayrıca %75 KBF_4 ve %25 KF tuz banyosu ile 670°C 'nin altındaki sıcaklıklarda nikel alaşımların borlanması için kullanılır[83,90]. %55 boraks ve %45 B_4C karışımı 1:1 oranında NaCl ve BaCl_2 kullanılarak çok yüksek tabaka kalınlıkları elde edilmektedir. Sıvı borlama ayrıca, boraks, ferro-silis, borik asit ve sodyum sülfat (NaSO_4) esaslı tuz banyolarında da gerçekleştirilmektedir[95,97].

Elektrolizle Sıvı Borlama; elektrolizle tuz banyosunda borlama işleminde katod olarak, borlanacak demir esaslı malzeme ve anod olarak grafit elektrod kullanılmaktadır. Elektrolit olarak ise boraks kullanılmaktadır. Borlama işlemi, $900-950^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında 4-6 saat süreyle, $0,15-0,20 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmektedir[27,30]. Parçanın her tarafında homojen bir kaplama tabaka kalınlığı elde edebilmek için elektroliz sırasında parça döndürülmektedir. Düşük alaşımlı çeliklerde çok ince kaplamaların elde edilmesinde, yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok kısa sürelerde borlama yeterli olmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise kalın kaplama tabakalarının elde edilmesi için düşük akım yoğunluğu ve uzun borlama süresi gerekmektedir[68,98]. Sıvı borlamada kullanılan çeşitli bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri Tablo 5.2'de verilmektedir[99].

Tablo 5.2: Sıvı borlamada kullanılan çeşitli bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri[99].

Bor Sağlayıcılar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı (gr)	Teorik Bor Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381,42	11,35	-
Susuz Boraks	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201,26	21,50	741
Metabor Asidi	HBO_2	43,83	24,69	-
Sodyum Bor Florür	NaBF_4	109,81	9,85	-
Bor Oksit	B_2O_3	69,64	31,07	450
Bor Karbür	B_4C	55,29	78,28	2450
Potasyum Bor Florür	KBF_4	69,67	15,52	-

Yüksek frekanslı akımlarla yapılan borlama işlemi sırasında yüksek ısı, borlama süresini önemli ölçüde düşürmekte ve çok derin difüzyon kaplamaları elde edilmektedir. U8 çelik parça üzerinde yapılan borlama çalışmasında, %50 kriyolit, %50 bor karbür (200-400 mesh) 1200⁰C'ye ısıtılarak borlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde, 1 dak. sonrasında 35 µm, 2 dak. sonra 80 µm ve 3 dak. sonra 125 µm tabaka kalınlığı elde edilmektedir. Yani ısıtma süresi, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında 200-300 kez daha azalmaktadır[100]. Benzer sonuçlar Ck45 çeliğinin borlanması sırasında da görülmektedir. Yüzey tabakasının sertliği 1000 HV değerine sahiptir. X-ışınları çalışmalarında, demir-borür ve bor-karbür fazları elde edilmektedir. Borlama için bor-karbür + kriyolit karışımının kullanılması, M. E. Blanter[100] metodu olarak bilinmektedir. İşlemde, kriyolitin oksijeni ile bor-karbür reaksiyona girerek sonucunda aktif bor oluşmaktadır.

5.5.4 Gaz borlama

Gaz borlama işleminde kullanılan bor taşıyabilen gazlar, bor halojenler veya bor-hidrürler'dir. Gaz borlamada çoğunlukla kullanılan ortamlar aşağıda verilmektedir

Diborane (B₂H₆)-H₂ karışımı,

Bor halid-H₂ veya (75:25 N₂-H₂) gaz karışımı,

(CH₃)₃-B ve (C₂H₅)₃-B gibi organik bileşikler[68,90].

(B₂H₆)-H₂ karışımı, zehirli ve patlayıcı olması nedeniyle ticari olarak kullanılmamaktadır. Fakat, B₂H₂:H₂ oranı 1:75 ve gaz akış hızı 75-100 l/saat olduğunda, aşınma direnci ve sertliği yüksek olan bor kaplamalar elde edilmektedir. Organik malzemeler kullanıldığı zaman borür ve karbür bileşikler birlikte oluşmaktadır. BCl₃, gaz borlama işlemi için en çok tercih edilen maddedir[90,101].

Son yıllarda yapılan çalışmalar, H₂ yerine 75:25 oranında N₂:H₂ kullanımı ile FeB fazının azaltıldığını ve daha iyi kalitede kaplamaların elde edildiğini göstermektedir. Gaz borlama işlemi, titanyum ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir. Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri Tablo 5.3'te verilmektedir[99].

Tablo 5.3: Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri[99].

Gazlar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı (gr)	Teorik Bor Miktarı (%)	Donma Noktası (°C)
Bor Tri Florid	BF ₃	67,82	15,95	- 128,8
Bor Tri Klorid	BCl ₃	117,90	9,23	- 107,3
Bor Tri Bromit	BBr ₃	250,57	4,32	- 46,0
Di- Boran	B ₂ O ₃	26,29	39,08	- 165,5
Bor Tri Metil	(CH ₃) ₃ B	55,92	19,35	- 161,5
Bor Tri Etil	(C ₂ H ₅) ₃ B	98,01	11,04	- 94,0

5.5.5 Plazma borlama

Demir esaslı ve demir dışı metalik malzemelere uygulanan; Ar, H₂ gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl₃, B₂H₆, BF₃, B(OCH₃)₃ (trimetilborat) kullanıldığı, 800-1000⁰C sıcaklıkta, yaklaşık 10⁻² Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır. Mikroyapı ve demirbor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir[102-106].

Plazma borlamanın avantajları kısaca aşağıda belirtildiği gibi özetlenebilir:

- Bilinen borlama işlemlerinde (katı, sıvı, gaz) tabaka kalınlığı ve homojenliği kontrol edilemezken, plazma borlamada mümkündür.
- Kompleks parçalarda homojen difüzyon tabakası ve sertlik oluşması sağlanır.
- Daha düşük sıcaklık ve işlem süresinde gerçekleştirilir.
- İşlem çok yoğun enerjide gerçekleştirilir.
- Bu yöntemle yüzeyde tek fazlı Fe₂B tabakası elde edilebilir.
- Daha büyük boyutlu taban malzemeleri işleme tabi tutulabilir.
- Zehirlilik, patlayıcı yapı ve çevre kirliliğinin kontrol olanağı mümkündür.
- İşlem sonrası daha düşük distorsiyon oluşur.

5.6 Kaplama İşlemlerinin Yüzeylerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarına Etkileri

Makina elemanlarının aşınma dayanımlarını artırmanın en önemli yöntemlerinden birisi de, bor yayını ile yüzeylerinin sertleştirilmesidir. Moore[25], abrazif aşınma direnci ile sertlik arasında doğrusal bir ilişki olduğunu, ancak malzeme mikro yapısının, aşınma dayanımına etkisinin, sertliğe olan etkisinden çok daha fazla olduğunu belirtmektedir. Borlama işlemi sonucunda ise, en önemli artışlardan birisi sertlikte meydana gelmekte olup, karbon çeliklerinde 1500-2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde 2800-3300 HV'e ulaşan yüzey sertlik değerleri elde edilebilmektedir[107]. Dolayısıyla borlamanın abrazif aşınma dayanımını arttıracığı muhakkaktır.

Budinski yayınma işlemlerini değişik açılardan karşılaştırmıştır. Tablo 5.4'te görüldüğü gibi borlama işlemiyle yüksek yüzey sertliği elde edilmektedir[23].

Tablo 5.4: Yayınma İşlemine ait Bazı Özellikler[23].

<i>Yüzey İşlemi</i>	<i>Malzeme</i>	<i>İşlem Sıcaklığı (C°)</i>	<i>Sertlik (HV)</i>	<i>Tabaka Kalınlığı (mm)</i>
Karbürleme	4620	800/900	700	225
Nitrürleme	17-4 Çeliği	500/600	800	200-300
Karbonitrürleme	4620	700/900	700	500
Borlama (B1 ve B2)	4620	900/1100	1500	50
Titanyum Karbür	440C	900/1100	3000	75
Vanadyum Karbür	D2	900/1100	2500	75
FNC	4620	500/600	700	10
Referansa Kaplamalar				
Sert Krom	4620	Oda Sıcak.	900	75
Elektroliz Ni/P	4620	Oda Sıcak	700	30

Eyre karbürleme ve borlama işlemi uygulanmış malzemelerin aşınma davranışlarını karşılaştırmıştır. Sementasyon işlemi uygulanmış çelikteki (800 HV) adhezif aşınma direncinin normalize edilmiş (220 HV) EN1A çeliğinden daha iyi olmadığını, dolayısıyla sertlikle adhezif aşınma arasında doğrudan bir ilişki kurulamayacağını, adhezif aşınmanın yüzeyler arasındaki kimyasal uyumsuzlukla ilgili olduğunu belirtmektedir. Eyre borlamanın karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhezif aşınma dayanımı açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirtmektedir[2].

Borlanmış çeliklerin sürtünme ve aşınma davranışlarını etkileyen en önemli faktörlerden birisi de koruyucu oksitlenmedir. Borun oksijene karşı ilgisi (afinitesi) yüksektir ve hemen hemen bütün borürler yüzeyde çok ince bir oksit filmi oluştururlar. Yüzeyde oluşan bu B₂O₃ tabakası, bir tür katı yağlayıcı vazifesi görerek hem sürtünme katsayısını düşürmekte hem de kaynamayı dolayısıyla, adhezif aşınmayı önlemektedir. FeB ve Fe₂B tabakalarında koruyucu oksit tabakası değişik reaksiyon mekanizmaları sonucunda oluşmaktadır[19]. FeB tabakasında FeB'nin bileşeni olan bor, ortamdaki oksijenle tercihli olarak reaksiyona girerek yüzeyde B₂O₃-Fe₂B tabakaları oluşturur. Bunun sonucunda Fe₂B tabakası kalınlığında artış meydana gelir.



Fe₂B tabakasında ise Fe₂B'nin bileşeni olan bor, oksijenle birleşerek B₂O₃ ve α-demiri meydana getirir.



Borlamanın sürtünme katsayısına etkilerini araştıran araştırmacıların hemen hepsi borlamanın sürtünme katsayısını düşürdüğü sonucuna varmışlardır. Geoeuriot ve diğ.[111], borlanmış ve kromlanmış (Tablo 5.5), Linial ve diğ., borlanmış ve borlanmamış malzemelerin sürtünme katsayılarını belirlemişlerdir[107].

Tablo 5.5: Sert krom kaplama ve borlama uygulanmış çeliklerin sürtünme katsayıları[107].

Çelik	İşlem uygulandıktan sonraki sürtünme katsayıları	
	Borlanmış	Kromlanmış
XC10	0,57	0,64
XC38	0,55	0,74
Z200 C12	0,54	0,75
Z6 CN 18-10	0,50	0,63

Borlanmış yüzeylerin aşınma açısından diğer bir üstünlüğü, gerek çalışma ortamından kaynaklanan, gerekse kayma sürtünmesi sonucunda ortaya çıkan ısının, borlu tabakaların sertliklerinde ve aşınma dayanımlarında büyük bir düşüşe neden olmamasıdır[2]. Borlanmış çelik malzemeler hakkında çok sayıda çalışmalar yapılmış olmasına rağmen sünek demirlerin borlanması hakkında nispeten az sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Bunun yanısıra borlanmış çeliklerin kırılma toklukları hakkında bazı çalışmalar yapıldığı görülmektedir[108-110]. Luigi, değişik sıcaklıklarda ve kuru sürtünme şartlarında yaptığı deneyler sonucunda 200°C sıcaklıkta aşınma dayanımları arasında belirgin bir fark yok iken, 300°C sıcaklıkta borlama işlemi uygulanmış yüzeylerin aşınma dayanımı, nitrürleme ve karbonitrürleme uygulanmış yüzeylere göre oldukça yüksektir[112].

Bor yayını uygulanmış yüzeylerin aşınma davranışlarını inceleyen araştırmacıların büyük çoğunluğu, tek fazlı (Fe_2B) tabakalarının, çift fazlı ($FeB+Fe_2B$) tabakalarından daha iyi sonuçlar verdiği konusunda birleşirken, Shadrachev ve diğ. %10-20 FeB inklüzyonları içeren Fe_2B matriksli yapının aşınma direncinin daha iyi olduğunu ileri sürmektedir[107]. Yapılan çalışmalarda borlama ile erişilen sertliğin abrazif aşınmaya karşı direnci arttırdığı ve Fe_2B 'nin aşınmaya karşı direncinin FeB fazına göre 10 kat daha düşük olduğu iddia edilmektedir[113]. Subrahmanyam homojen olmayan mikro yapılardan dolayı iki fazlı tabakaların aşınma dayanımlarının, daha kötü olduğunu ve yine yüzey tabakalarına bağlı olarak aşınma mekanizmalarının farklılıklar gösterdiğini; iki fazlı tabakalarda transfer partiküllerinin oksitlenmesiyle birlikte adhezif aşınma, tek fazlı FeB borür tabakasında ve alt tabakalarda, hem oksidatif aşınma hem de abrazif aşınma, tek fazlı Fe_2B tabakasında ise oksidatif yorulma aşınması gözlemlendiğini belirtmektedir[114].

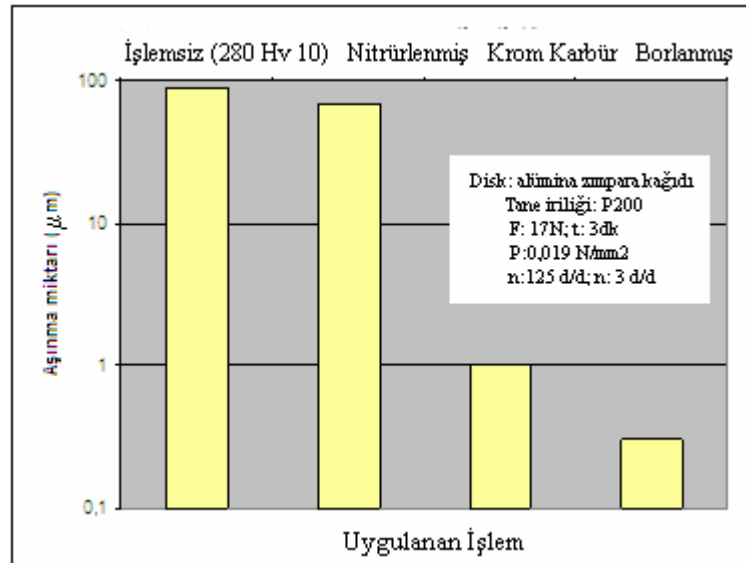
Uetz ve Wlassow, Fe_2B tabakasındaki aşınmanın yorulma sonucunda ve üç adımda gerçekleştiğini ileri sürmektedir. Birinci adımda sürtünme sürecinin başlamasıyla mikro temas noktalarında bozulmalar oluşur. Bu noktalarda yapısal hatalardan dolayı dislokasyon ve kafes hatalarının yoğunluğu artar. İkinci adımda hata yoğunluğu belirli bir kritik değere ulaşıncaya yüzeyde mikro çatlaklar oluşur. Bu adımda tüm enerji çatlak oluşumu ve yayılması için yönlendirilir ve yüzeyde karakteristik çatlak ağları oluşur. Son adımda ise, tipik bal peteğini andıran yüzey yapısı oluşur ve pulcuk şeklindeki ayrılmalarla aşınma ürünleri ortaya çıkar. Bu olay sürekli olarak tekrar eder. Bu mekanizma tipik yorulma aşınmasını karakterize etmektedir[115].

Aşınma ürünleri Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , α -Fe, Fe_2B içermektedir ve bunların oranları büyük ölçüde basınç ve hıza bağlı olarak değişmektedir[114].

Sullivan yumuşak çeliklerin, kuru kayma durumundaki aşınmaları sonucunda oluşan, üç yüksek sıcaklık oksidinin (α - Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO) oluşumunu, aşınma oranı ve yüzey sıcaklığındaki değişime bağlamakta ve bu oksitler arasındaki geçişlerin, yüzey sıcaklığındaki açık değişimlerle, aşağıdaki gibi açık bir şekilde belirlenebileceğini iddia etmektedirler[116].

- α - Fe_2O_3 226-230°C veya 277-282°C
- Fe_3O_4 368-448°C
- FeO 583-612°C

Ara yüzeylerde yüksek sıcaklıklar oluştuğunda, özellikle yüzeye yakın bölgelerde deboronizasyon oluştuğu ve yüzey tabakalarının oksitlenmesi sonucunda aşınma ürünlerinin analizinde α - Fe_2O_3 , Fe_3O_4 ve HBO_2 bileşenlerinin ortaya çıktığı belirtilmektedir. Takeuchi FeB ve Fe_2B tabakalarının benzer aşınma özellikleri gösterdiğini, maksimum aşınmanın metalik ve oksidatif aşınmanın birlikte etkilediği durumda meydana geldiğini, hafif aşınma ve yüksek kayma hızlarındaki aşınma kayıplarının ise esas olarak oksidatif aşınmadan kaynaklandığını ve borlanmış çeliklerin aşınma davranışlarını etkileyen en önemli faktörün, yüzeyde oluşan koruyucu oksit filmleri olduğunu ileri sürmektedir[117].



Şekil 5.7: 42CrMo₄ Çeliğin Taşlama Diski Testi Sonucundaki Abrasif Aşınma Miktarı[112].

Borür tabakalarının abrazif aşınma dayanımları, yüksek sertliklerinden dolayı oldukça iyidir. Farklı kaplama teknikleri uygulanmış yüzeylerinin abrazif aşınma davranışları Şekil 5.7'de verilmiştir. Borür tabakasının abrazif aşınma açısından üstünlüğü şekilden açıkça görülmektedir[112].

Borlamadan sonra uygulanan ısıl işlemler de aşınma dayanımını etkilemektedir. Borlama+Normalleştirme+Sertleştirme ve 200⁰C'de temperleme işlemi uygulanmış numuneler, borlamadan sonra herhangi bir ısıl işlem uygulanmamış numunelere göre daha iyi aşınma dayanımı göstermektedir[118]. Bazı araştırmacılar ise borlama sonrası ısıl işlemlerin, tek fazlı borür tabakalarının aşınma dayanımını pek fazla değiştirmedığını, buna karşılık çift fazlı tabakaların aşınma direncini ise önemli ölçüde artırdığını, bunun da büyük ölçüde iki fazlı tabakalardaki kalıntı gerilmelerden kaynaklandığını ileri sürmektedirler[107].

Demir esaslı malzemelerin borlanması, atmosferik korozyona karşı az, fakat bazı asit ve sıvı metallere karşı büyük aşınma dayanımı sağlar. Özellikle HCl, H₂SO₄, NaOH, NaNO₃ ve NaNO₃/NaNO₂, Al, Pb, ve Zn gibi metallerin sıvı banyolarında korozyon dayanımı çok yüksektir. Yüksek kromlu çeliklerin özellikle HCl'deki korozyon dayanımı, borlama ile önemli ölçüde artmaktadır. H₂SO₄'deki korozyon dayanımı ise çok fazla iyileşmemektedir. Krom borit, yüzeyde krom oksit oluşumuna neden olmakta ve yüzeyi korozyona karşı pasifleştirmektedir[119].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Cam şekillendirme makinalarındaki aşınan parçalara uygulanan yüzey işlemlerinin performansa etkilerinin incelendiği bu çalışmada Paşabahçe Kırklareli Cam Fabrikası bünyesinde ön çalışma yapıp kalıp kolu çiftlerinin ömür sorunları incelenmiştir. Yapılan çalışmaların ilk aşamasında kullanım süreleri ve yaşanan problemleri belirlemek amacı ile kapsamlı bir araştırma ve dökümantasyon çalışması yapılmıştır. Bugüne kadar bu konu üstünde yapılmış çalışmalar, özellikle yazılı raporlar kütüphaneden ve fabrikadan temin edilmiş, geliştirme çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlara ulaşılmaya çalışılmıştır.

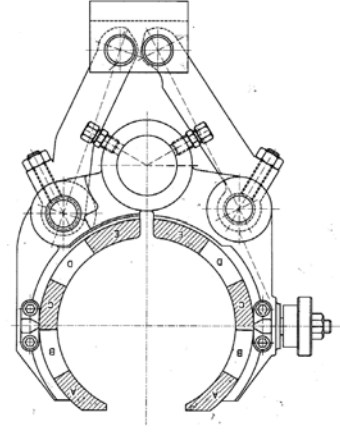
Araştırmalar sonucunda; işletmede kalıp kolu ömrü ile ilgili istatistik çalışması tutulmadığı belirlenmiştir. Halen kullanılmakta olan dökme demir kalıpları ve AISI 420 kalıp kolları (Şekil 6.1) incelenerek bozulma mekanizmalarının ortaya çıkartılmasına çalışılmıştır[49]. Bu çalışmalarla kalıp kolları sırasıyla;

- a. Boyut
- b. Ağırlık
- c. Taşıdığı kalıp büyüklüğü
- d. Çalıştığı ürün hızı
- e. Durmadan çalıştığı süre
- f. Yağlama ve soğutma koşulları
- g. Malzemesi
- h. Yapılan yüzey işlemleri
- i. Çalışma süresi
- j. Toplam ömür

kriterlerine göre incelenmiştir.



(a) Fotoğraf görüntüsü



(b) Teknik resim görüntüsü

Şekil 6.1: Cam şekillendirme makinası kalıp kolu a), b)[49].

Araştırmada öncelikle kalıp kolları temizlenerek etiketlenmiş ve fotoğraflanmış, daha sonra sağ ve sol olarak iki parçaya ayrılmış, çizilen teknik resimler üzerinde sağ ve sol kollarda yapılan incelemelerde saptanan aşınmalar, eğer varsa parça kayıpları ve bunun gibi yüzey düzgünsüzlükleri belirlenerek teknik resimlerin üzerine işlenmiştir. Bu çalışmalar kapsamında; kalıp kolunun kalıpla yaptığı temas noktaları da tespit edilmiştir. Ayrıca yeni takılan kalıp kollarının istatistiği tutulmaya başlanmıştır.

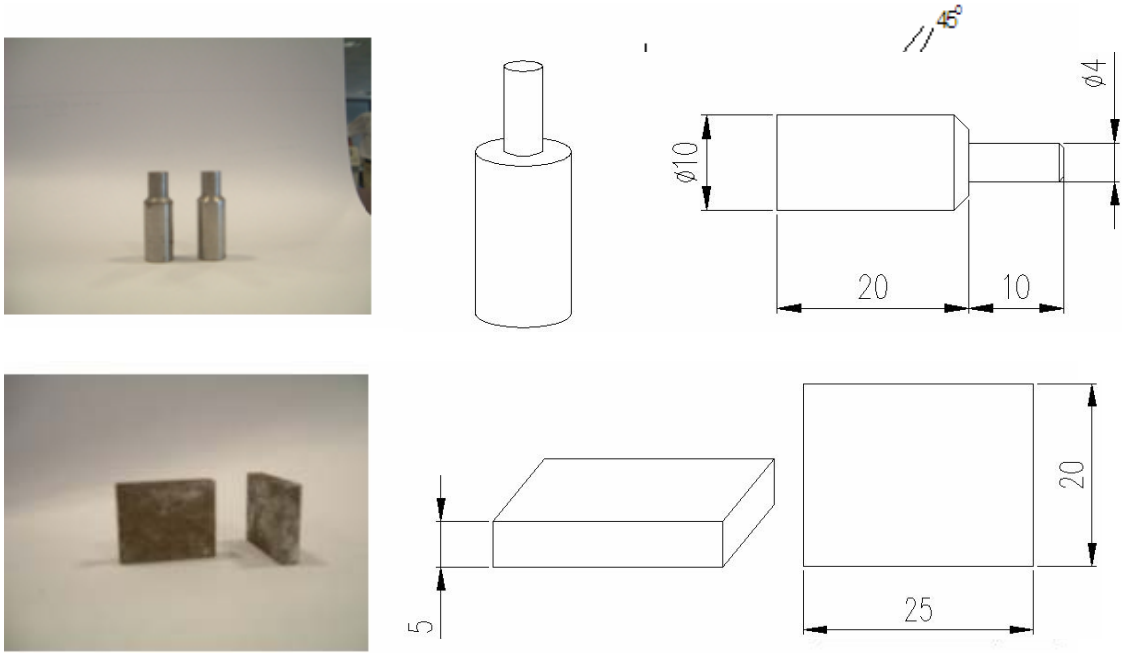
Bu ön çalışmada özellikle kalıp koluna gelen yükler belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun iki önemli nedeni vardır. Bunlardan ilki pin-on disk (aşınan pim) ve abrezif aşınma deneyleri sırasında uygulanacak yükü belirlemek ve bu sayede yapılacak çalışmalarda daha doğru ve gerçekçi sonuçlar elde etmek, ikinci olarak ta çalışma esnasında uygulanan yüke uygun karakteristikte ekipmanın kullanılıp kullanılmadığının belirlenmesidir.

6.1 Aşınma Deneyleri

6.1.1 Aşınma Deney Numuneleri

Aşınma deneyleri için işlem görmemiş ve farklı yüzey işlemleri görmüş (borlama, akımsız nikel, sert krom kaplama, nitrokarbürleme) AISI 1040 (DIN Ck40 Malzeme No:1.1186), AISI 4140 (DIN 42CrMo4 Malzeme No:1.7223), AISI 5140 (DIN 42Cr4 Malzeme No:1.7045) ve AISI 420 (DIN X20Cr13 Malzeme No:1.4021) kalite çeliklerinden hazırlanmış deney numuneleri hazırlanmıştır.

Metal-metal ve metal-abrazif aşınma deneylerinde kullanılan deney numuneleri, ASTM G99[120] standardında olup, 4 mm çapındadır. İleri geri aşınma deneyinde kullanılmak üzere pim numune yerine prizma numune hazırlanmıştır. Numuneler Şekil 6.2’de gösterilmiştir[49].



Şekil 6.2: ASTM G 99 standardında hazırlanan aşınma deneyi numuneleri[35].

6.1.2 Aşınma deney numunelerine uygulanan yüzey işlemleri

Laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerde farklı yüzey işlemleri görmüş (borlama, akımsız nikel, sert krom kaplama, nitrokarbürleme) AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerinden hazırlanmış numunelerin aşınmaları incelenmiştir.

Borlama işlemi Vezneli Ltd. Şti.’nde kutu borlama prosesinde Ekobor firmasının hazır tozu ile yapılmıştır. Numuneler koruyucu atmosfer olarak argonun kullanıldığı, 950°C’lik bir fırında 4 saat süreyle ısıtılarak yapılmıştır.

Nitrokarbürleme işlemi Assab Korkmaz Çelik A.Ş.’de, 350°C’ye ısıtılan deney numunelerinin 1 saat süreyle havada oksidasyonu sağlandıktan sonra, 10 saat süreyle 580°C’de nitro karbürizasyona ($N_2+NH_3+CO_2$) maruz bırakılması ile gerçekleştirilmiştir.

Akımsız nikel kaplama işlemi Aral Endüstriyel Ltd. Şti. tarafından deney numunelerinin 4 saat süreyle 190°C’de gerilimlerinin giderildiği, 1 saat süreyle 345°C’de hidrojen gevrekliğinin giderildiği ortamda farklı banyolarda yapılmıştır.

Sert krom kaplama işlemi ise Altay Ltd. Şti. tarafından elektrolitik krom kaplama yöntemi ile farklı kalınlıklara bağlı olarak farklı akım yoğunluklarında kromik asit ve sülfürik asit ortamında gerilim yaratarak sağlanmıştır.

Deney numunelerine ait kaplama kalınlıkları ve taban malzemesi ile ilgili bilgiler sırasıyla Ek. A ve Ek. G’de verilmiştir.

İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılan aşınma deneylerinde kullanılan pim ve plakaların karakterizasyonu;

- Mikro sertlik
- Yüzey pürüzlülüğü
- Kaplama kalınlığı

ölçümleri ile yapılmıştır.

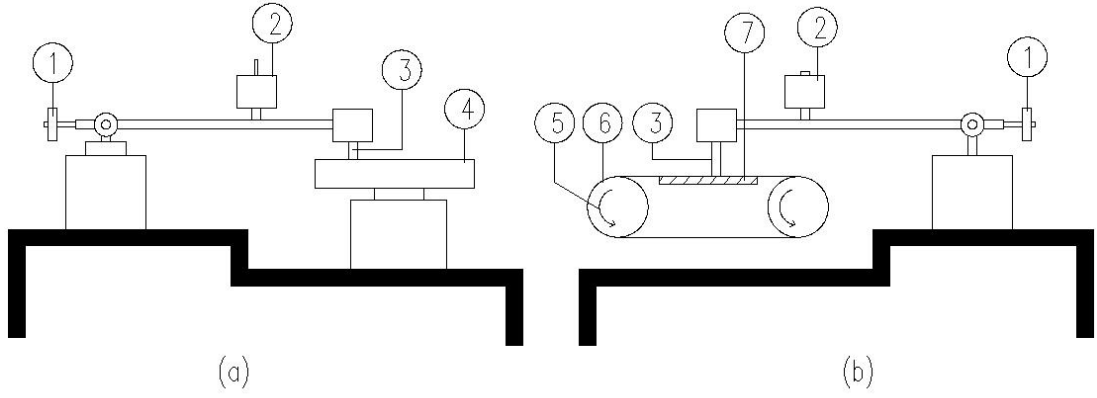
6.1.3 Nem ve sıcaklık

Aşınma deneyleri esnasında laboratuvar ortamında %50 ± 5 nem oranı ve 20°C ± 2 sıcaklıkta çalışılmıştır.

6.1.4 Aşınma deney parametreleri

Metal-metal ve metal-abrazif aşınma deneylerinde işletme şartlarını gerçekçi bir şekilde uygulayabilmek için kalıp kolu üzerine gelen yük hesaplanmıştır. Bunun için maksimum kalıp ağırlığı (125 mm kalıp kolu) 20 kg ve kalıbın kalıp kolu üzerinde oturduğu yüzey alanı 3,744 mm² olarak tespit edilmiştir. Buradan birim alana düşen yük 53,42 gr/mm² olarak belirlenmiştir. 4 mm çaplı pim yüzey alanı 12,56 mm² olduğuna göre kullanılması gereken ağırlık yaklaşık 670 gr olarak belirlenmiştir.

Disk üstünde aşınan pim deneyinde kullanılan mekanizmada pim, bağlandığı kolun yaklaşık 2/3’ünde çalışmakta olup kullanılması gereken yükün yaklaşık 1000 gr olması gerektiğini göstermektedir (Şekil 6.3). Emniyetli alanda kalabilmek için 5 kg’lık bir yük seçilerek disk üstünde aşınan pim deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.3: (a) Metal-Metal (b) Metal-Abrazif deney düzeneğinin şematik gösterilişi. (1) Dengeleyici ağırlık (2) yük (3) numune (4) aşındırıcı disk (5) iletici silindir (6) abrazif bant (7) çelik destek plakası[49].

Pimin üzerinde hareket ettiği disk, M2 kalite çelikten imal edilmiştir. Metal-metal aşınma deneylerinde, Şekil 6.3 ve 6.4'te görüldüğü gibi deney numuneleri, sabit hızla dönen bir metal disk üzerine, sabit bir yük altında bastırılmıştır. Deneyler, M2 kalite takım çeliği bir disk üzerinde 0,52 m/s kayma hızında, 5 kg yük altında ve toplam 6.000 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.4: Metal-metal aşınma deneylerinde disk üstünde pim deney düzeneği.

Metal-metal aşınma deneylerinin öncesi ve sonrasında, her numunenin yüksekliği 0,01 mm ve ağırlığı 0,1 mg hassasiyetle ölçülerek numunelerin yükseklik kayıpları (ΔH) ve ağırlık kayıpları (ΔG) 2.000 m'lik kayma mesafeleri aralıklarında hesaplanmıştır. Numuneler ve aşındırıcı disk her deney öncesi alkol ile temizlenmiş ve kuru sürtünme şartları sağlanmıştır.

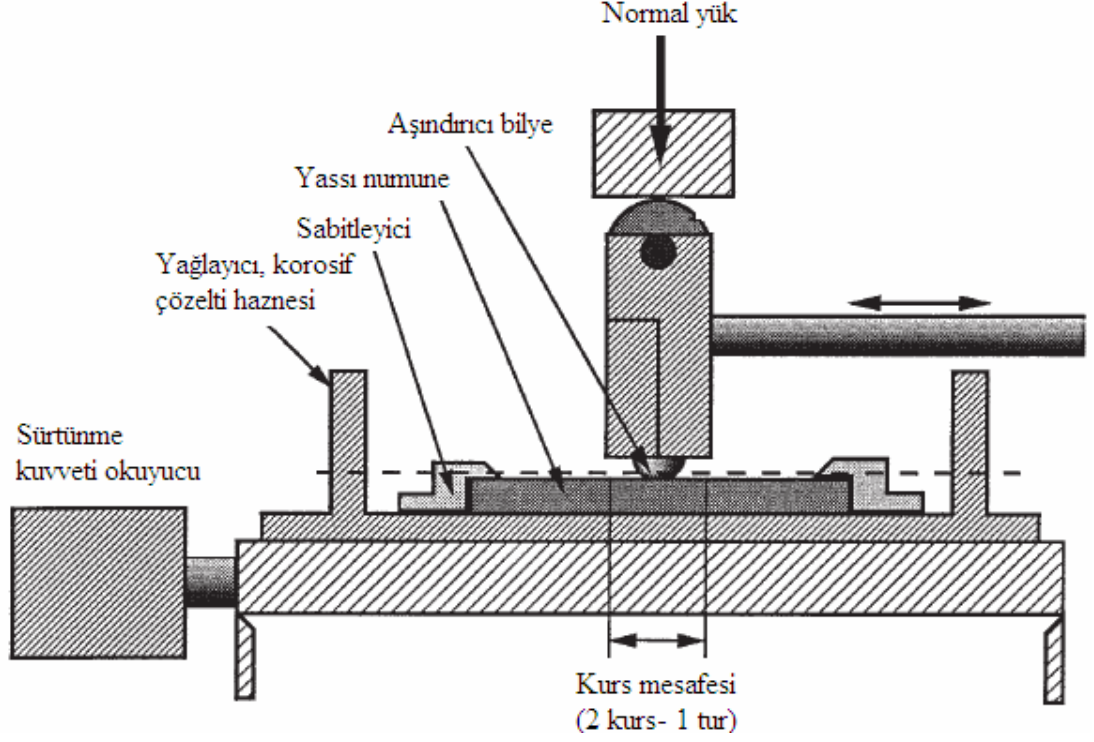
Metal-abrazif aşınma deneyine 5 kg yük ile başlanmıştır ancak kaplamaların bu yük altında ilk 5,5 m'den sonra aşındığı görülünce, çalışma yükü 2,5 kg'a düşürülmüştür. Metal-abrazif aşınma deneylerinde, 240 grid (50 μm)'lik SiC zımparalar kullanılmıştır. Şerit zımpara bandının ilerleme hızı 0,2 m/s olarak belirlenmiştir. Şekil 6.3 ve Şekil 6.5'te görüldüğü gibi metal-abrazif aşınma deneyleri sabit hızla dönen bir şerit zımpara üzerine numunelerin 2,5 kg yük uygulanarak bastırılmaları ile gerçekleştirilmiştir. Metal-abrazif aşınma deneyleri süresince abrazif şerit zımpara üzerinde sürtünen numune, devamlı temiz abrazif yüzey üzerinden geçmesi için kayma yönüne dik olarak hareket etmektedir. Oda sıcaklığında yapılan deneylerde, numuneler aşındırıcı şerit zımpara üzerinde bir turu 5,5 m olan 3 turda toplam 16,5m yol yapmaktadır.



Şekil 6.5: Metal-abrazif aşınma deney düzeneği.

Metal-abrazif aşınma deneylerinin öncesi ve sonrasında, her numunenin yüksekliği 0,01 mm ve ağırlığı 0,1 mg hassasiyetle ölçülerek numunelerin yükseklik kayıpları (ΔH) ve ağırlık kayıpları (ΔG) 5,5 m'lik kayma mesafeleri aralıklarında hesaplanmıştır.

Metal-metal ve metal-abrazif aşınma deneylerine ilave olarak kaplamasız ve kaplamalı çelik malzemelerin aşınma davranışları ileri-geri (Reciprocating) aşınma deney cihazında da incelenmiştir. İleri-geri aşınma deneyi, levha üzerinde bilya temas geometrisine sahip, ASTM G133 standardında (ASTM G133-05, 2005) tanımlanan ileri-geri aşınma deney cihazında (Şekil 6.6) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.6: ASTM G133 standardında (ASTM G133-05, 2005) tanımlanan ileri-geri aşınma deney düzeneği.

İleri-geri aşınma deneyleri, numune yüzeyine 10 mm çapında Al_2O_3 alumina topun sürtünmesi ile yapılmış olup hareket uzunluğu ve toplam kayma mesafesi sırasıyla 12 mm ve 120 m'dir. Aşınma süresi tüm testler için eşit tutulmuş ve 10.000 çevrim olarak belirlenmiştir. İleri-geri aşınma deneyi sırasında sürtünme kuvveti bir bilgisayar yardımı ile sürekli kaydedilmiştir (Şekil 6.7). Laboratuvar deneyleri esnasında $\%50 \pm 5$ nem oranı ve $20^\circ C \pm 2$ ile çalışılmıştır. Aşınma deneyi sonrasında numune yüzeyleri üzerinde gelişen aşınma izleri yüzey profilometresi (Pethonometre S8P ve Veeco) ile analiz edilmiştir. Yüzey izlerinin ölçümü Facodyn T9 model optik uçla, 1.750 mm uzunluğunda, 250 μm yüksekliğinde ve 1 mm genişliğinde bir alandan 4 adet tarama ile gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında Al_2O_3 alumina bilyede meydana gelen aşınma optik mikroskopta incelenmiştir.

Aşınma deneyleri kuru ortam (normal atmosferik koşullarda) gerçekleştirilmiştir. Kuru ortamda aşınma deneyleri 6,0 N dikey yük altında ve 0,09 m/s kayma hızında Al_2O_3 bilyenin sürtünmesi ile yapılmıştır.



Şekil 6.7: İleri-geri aşınma deney düzeneği.

6.2. Metalografik Çalışmalar

Metalografik incelemeler için reçineye alınan numuneler, sırasıyla 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 grid zımpara kademelerinden geçirilerek zımparalanmıştır. Daha sonraki parlatma işlemi ise, üzeri keçe kaplı döner disklerde gerçekleştirilmiş, parlaticı olarak %98'lik Al_2O_3 kullanılmıştır. Parlatma işlemi tamamlandıktan sonra, numunelerin görüntüleri alınmıştır.

Parlatma işleminden sonra optik mikroskopta yüzey görüntüleri alınan numuneler, su ile yıkanıp etil alkol ile iyice temizlendikten sonra, %3'lük nital ile dağlanarak mikroyapı incelemelerine hazır hale getirilmiştir. Sadece AISI 420 malzeme grubu için (%3'lük nital ile dağlanamadığı için) dağlayıcı olarak %20 HNO_3 -%2 HF kullanılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde Diagnostic marka optik mikroskop kullanılmıştır. Bu mikroskopta Image Pro programı kullanılarak 400x-800x büyütmelerde mikroyapı fotoğrafları çekilerek Ek. E'de Şekil E.1-E.30'da gösterilmiştir.

Yüzeyleri borlanmış numunelerin yüzeyden alınan kesitleri boyunca taramalı elektron mikroskobu çalışmaları yapılmıştır. Jeol SEM JSM6360LV marka cihazından alınan backscatter görüntüleri(BEI) Ek. S'de Şekil S.1-S.4'te gösterilmiştir. Kesitten alınan görüntülerden görüldüğü gibi AISI 1040, AISI 4140, ve AISI 5140 kalite çelik

malzemelerin Ekabor II ile borlanması sonucunda kolonsal ve dişli bor tabakasının oluştuğu görülmüştür. AISI 420 kalite elik malzemesinin borlanması sonucunda ise kolonsal olmayan bor tabakası oluştuğu görülmüştür. Borlama işlemine tabi tutulan malzemelerde oluşan yapıları üç farklı kısma ayırmak mümkün olmuştur.

- a) Borür fazlarını içeren borür tabakası
- b) Borür tabakasının altında yer alan, borun katı çözeltiye geçtiği ve sertliğin borür tabaka sertliğinden düşük ama orjinal malzeme sertliğinden yüksek olduğu geçiş bölgesi
- c) Bor atomlarının diffüze olmadığı, borca etkilenmeyen elik matris yapısı.

7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik taban malzemelerinin herbirinin kaplamasız, sert krom, akımsız nikel, nitrokarbür ve bor tabakası ile kaplandığı durumlardaki sertlik, kaplama kalınlığı ve metalografik yapı incelemeleri ve aşınma deneyleri ile ilgili sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

Aşınma deney sonuçları, referans alınacak aşınmaya karşı en düşük ağırlık kaybına sahip deney numunesine göre açıklanmıştır. Bu amaçla, herbir deney numunesi için elde edilen ağırlık kaybına göre aşağıdaki formül kullanılarak Rölatif Aşınma Oranı (RAO) tespit edilmiştir.

RAO, incelenen farklı yüzey işlemleri görmüş deney numuneleri arasında en düşük aşınma hızına sahip olan deney numunesi referans alınarak;

$$RAO = \Delta W_t / \Delta W_R \quad (7.1)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır.

ΔW_t : Diğer deney numunelerinin ağırlık kaybına,

ΔW_R : Aşınmaya en dirençli deney numunesinin ağırlık kaybıdır.

Burada; metal-metal aşınma deneyleri için Rölatif Aşınma Oranı, deney numunelerinin ağırlık ve yükseklik kaybı kriterleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Metal-abrazif aşınma deneylerinde ise RAO, deney numunelerinin ağırlık ve yükseklik kaybı kriterleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu deneylere ilave olarak alumina top ile ileri-geri aşınma deneyi de yapılmış, malzeme üstündeki aşınma izlerinden aşınma alanı hesaplanmış, ayrıca bu deneylerde sürtünme katsayıları da sürekli kaydedilmiştir.

Deneysel amaçla seçilen çelik kalıp kolu malzemelerinin kaplama öncesi ve kaplama sonrası ölçülen ortalama yüzey sertlikleri Şekil 7.1’de verilmektedir. Şekil 7.1’den de açıkça görülebileceği gibi, kaplama işlemleri öncesi 170-210 HV arasında olan yüzey sertlikleri; “Akımsız Nikel Kaplama, Nitrokarbürleme ve Sert Krom Kaplama” işlemleri sonrasında ortalama 800 HV’e ulaşmıştır.

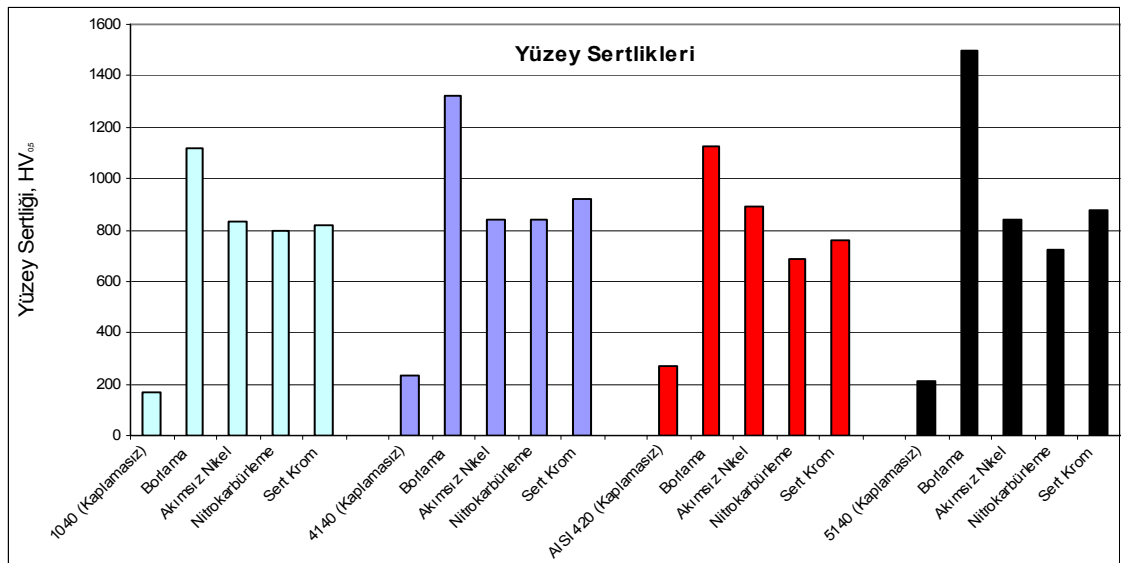
Bu çeliklerin kaplamasız durumda en düşük sertlikte olanı AISI 1040 kalite çeliktir (170 HV), en sert ise AISI 420 kalite çeliktir (270 HV).

Akımsız nikel kaplama sonucunda incelenen tüm çeliklerin sertlikleri yaklaşık değerlerde olmasına rağmen en yüksek sertlik AISI 420 kalite çelikte (832 HV) elde edilmiştir.

Nitrokarbürleme işlemi sonucunda da incelenen tüm çeliklerin sertlikleri birbirine yakın (yaklaşık 800 HV) değerlerdedir. Sertlik değerleri detaylı olarak karşılaştırıldığında nitrokarbürleme durumunda AISI 420 çeliği (685 HV) ile AISI 5140 çeliğinin (725 HV) diğer iki çelikten daha düşük sertlikte olduğu tespit edilmiştir.

Sert krom kaplama sonrasında da aynı mertebede sertlik değerlerine ulaşılmasına rağmen, bu kaplama sonrası en yüksek sertlik AISI 4140 kalite çelikte (920 HV), en düşük sertlik ise AISI 420 kalite çelikte (757 HV) elde edilmiştir.

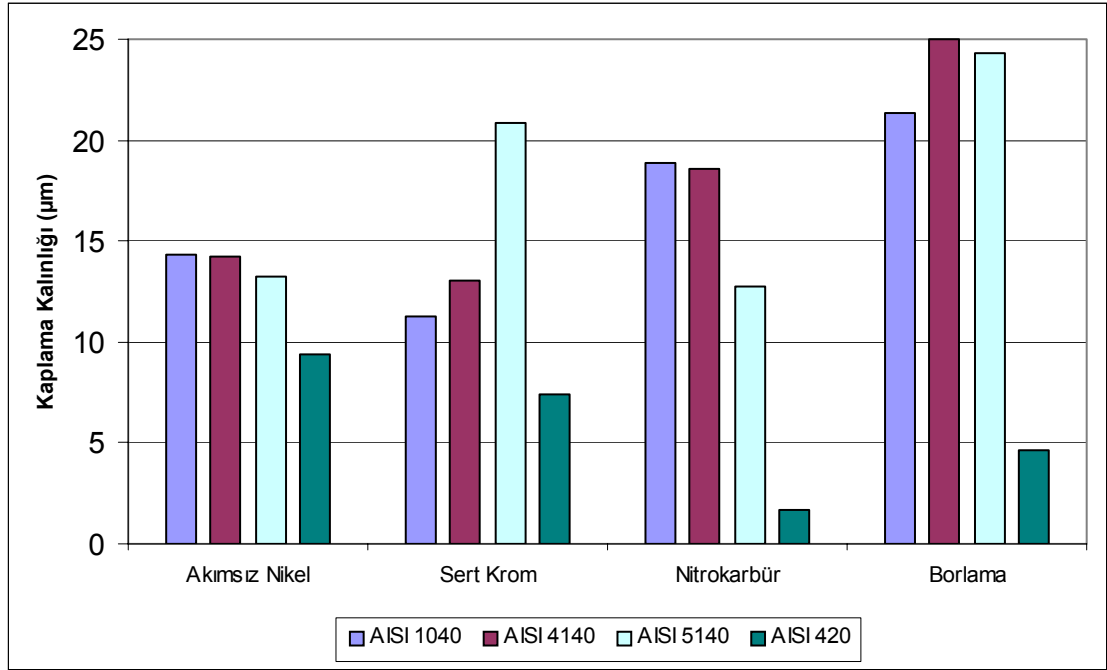
Buna karşılık Borlama işlemi sonrası çelik türüne bağlı olarak 1110-1495 HV sertlik değerleri elde edilmiştir. Bu durumda en yüksek sertlik AISI 5140 kalite çelikte (1495 HV) elde edilmiştir. Bunu borlanmış AISI 4140 çelik (1324 HV) izlemiştir. AISI 1040 kalite çelik (1116 HV) ile borlanmış AISI 420 kalite çeliklerin (1126 HV) sertlikleri ise aynı mertebede kalmıştır.



Şekil 7.1: AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama öncesi ve farklı kaplamalar sonrasında elde edilen yüzey sertlikleri.

Deney numuneleri ile ilgili olarak yapılan sertlik ölçümlerinde elde edilen tüm değerler Ek C’de verilmiştir.

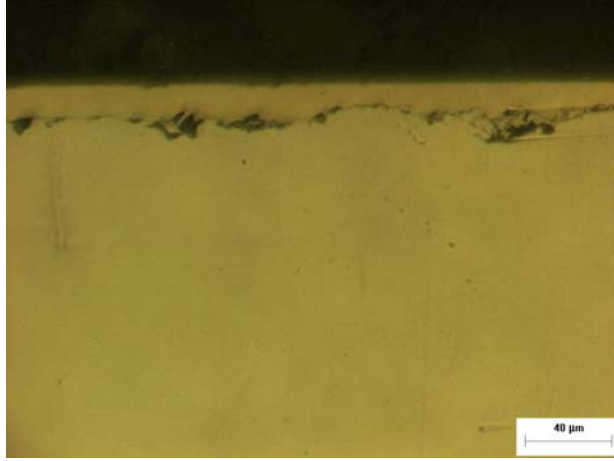
AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420 kalite çelik malzemelerin dört farklı yüzey kaplama (nitrokarbürleme, sert krom kaplama, akımsız nikel kaplama ve borlama) işleminden sonra sahip oldukları ortalama kaplama kalınlıkları Şekil 7.2’de gösterilmiştir.



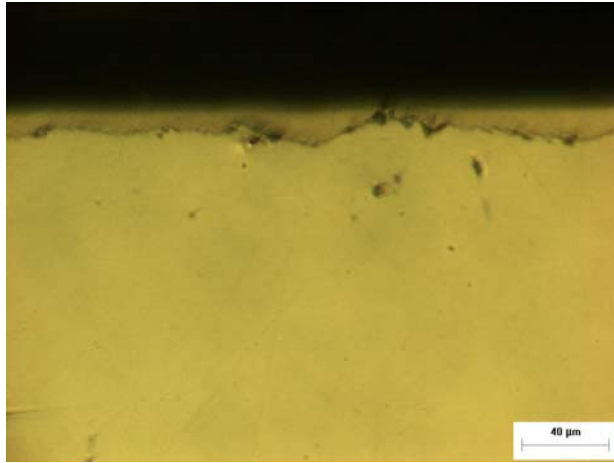
Şekil 7.2: AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama kalınlıkları (µm).

Akımsız nikel ile kaplanmış çelikler incelendiğinde, AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 5140 kalite çeliklerin ortalama kaplama kalınlıklarının birbirlerine çok yakın oldukları (14 µm), AISI 420 kalite çeliğin ortalama kaplama kalınlığının (9 µm) ise diğer çeliklere oranla %40 daha az olduğu görülmüştür.

Kaplama kalınlığının incelendiği optik mikroskop görüntülerinde, AISI 1040 kalite çeliğin (Şekil 7.3) kaplama tabakasının AISI 420 kalite çeliğin kaplama tabakasından daha kalın ve daha üniform olduğu görülmektedir (Şekil 7.4).



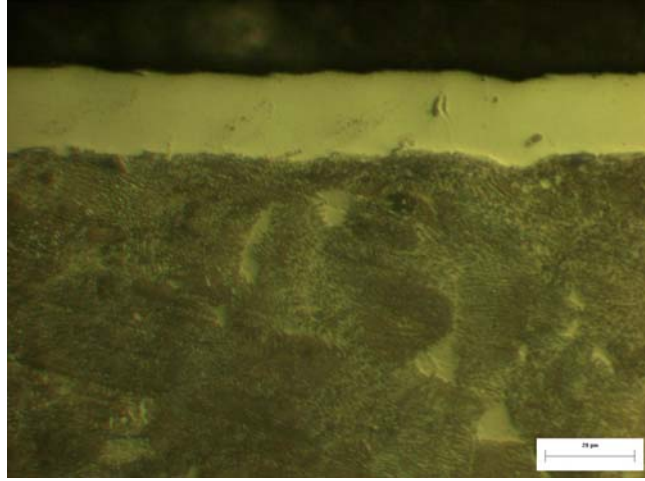
Şekil 7.3: AISI 1040 kalite çeliğin akımsız nikel kaplanmış durumundaki kesit görüntüsü (Ortalama kaplama kalınlığı: 14,36 µm).



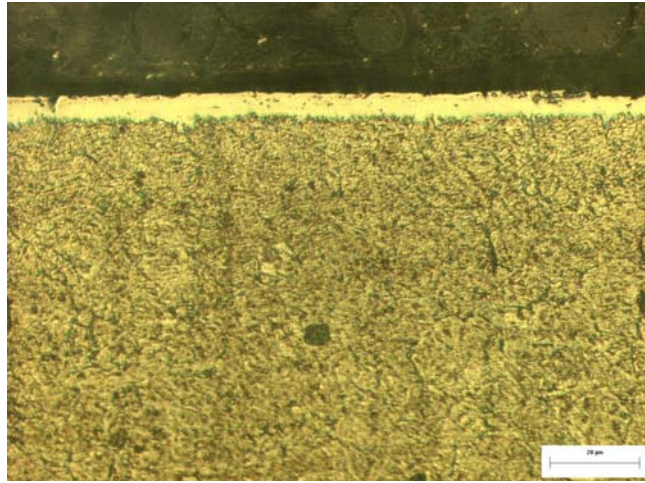
Şekil 7.4: AISI 420 kalite çeliğin akımsız nikel kaplanmış durumundaki kesit görüntüsü (Ortalama kaplama kalınlığı: 9,38 µm).

Sert krom kaplama uygulanmış tüm çelikler incelendiğinde, en yüksek ortalama kaplama kalınlığının AISI 5140 kalite çeliğinde (20 µm) olduğu, AISI 420 kalite çeliğin ise ortalama (7 µm) kaplama kalınlığı ile en ince kaplamaya sahip çelik olduğu belirlenmiştir.

Optik mikroskoptan elde edilen kesit görüntüleri karşılaştırıldığında, sert krom kaplanmış AISI 5140 kalite çeliğin kaplamasının (Şekil 7.5), AISI 420 kalite çeliğin kaplamasına göre (Şekil 7.6) çok daha kalın olduğu, her iki kaplamanın da homojen olduğu açıkça görülmektedir.



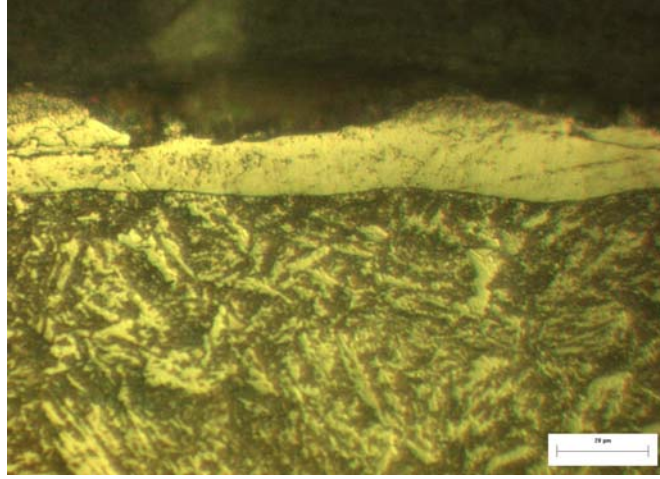
Şekil 7.5: AISI 5140 kalite çeliğin sert krom kaplanmış durumdaki kesit görüntüsü (dağlanmış).



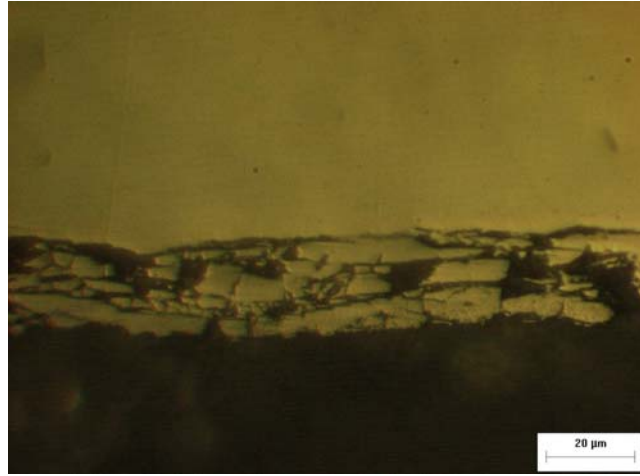
Şekil 7.6: AISI 420 kalite çeliğin sert krom kaplanmış durumdaki kesit görüntüsü (dağlanmış).

Nitrokarbürleme yüzey işlemi uygulanmış çelikler incelendiğinde, AISI 1040 ve AISI 4140 kalite çeliklerin diğer çeliklerden daha yüksek ortalama kaplama kalınlıklarına sahip oldukları ($18 \mu\text{m}$) , AISI 420 kalite çeliğin ise çok ince bir nitrokarbür tabakasına ($1,7 \mu\text{m}$) sahip olduğu tespit edilmiştir.

Nitrokarbürlenmiş çeliklerin kesit görüntüleri incelendiğinde, AISI 4140 kalite çeliğin kaplama kalınlığının heterojen olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.7). AISI 5140 kalite çeliğin nitrokarbürlenmiş kaplama tabakasının ise daha ince ve poroziteli bir yapıda olduğu görülmüştür (Şekil 7.8).



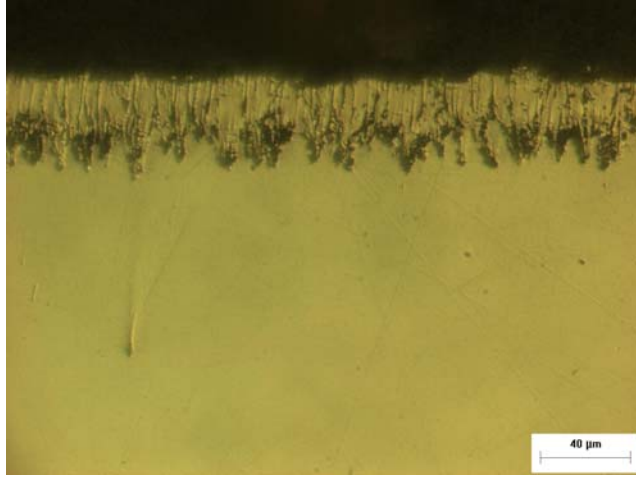
Şekil 7.7: AISI 4140 kalite çeliğin nitrokarbürleşmiş durumdaki kesit görüntüsü (dağlanmış).



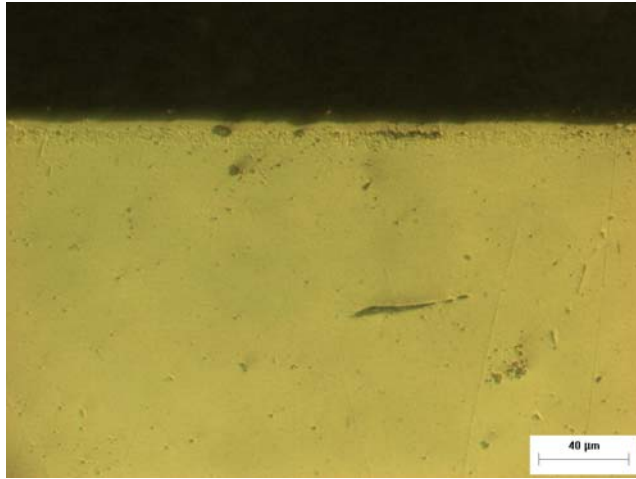
Şekil 7.8: AISI 5140 kalite çeliğin nitrokarbürleşmiş durumdaki kesit görüntüsü.

Borlama işlemi sonunda da, 4,6 μm ortalama kaplama kalınlığına sahip AISI 420 kalite çelik dışında borlanmış AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 5140 kalite çeliklerin en yüksek ortalama (>21 μm) kaplama kalınlıklarına ulaştıkları görülmüştür.

Borlanmış çeliklerin optik mikroskopta alınan kesit görüntüleri incelediğinde, borlanmış AISI 1040 kalite çeliğin yüzeyinde kolonsal ve dişli bir bor tabakasının oluştuğu (Şekil 7.9), borlanmış en ince tabaka kalınlığına sahip AISI 420 kalite çelikte ise bu dişli kaplama tabakasının oluşmadığı belirlenmiştir (Şekil 7.10).

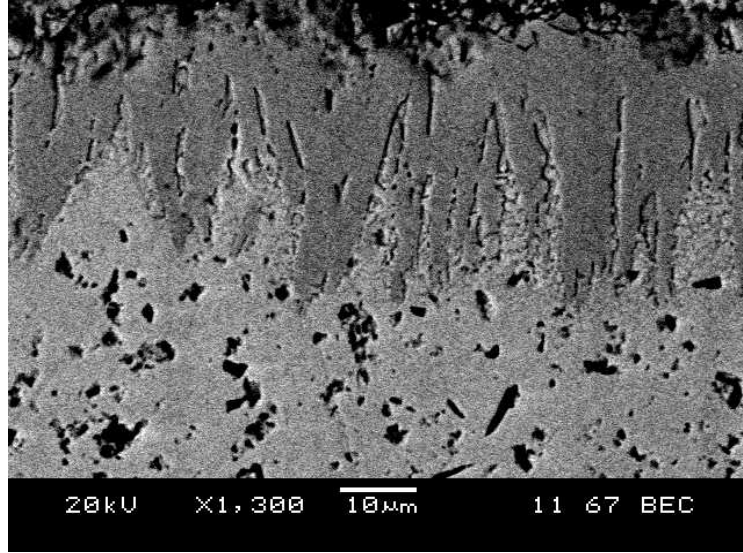


Şekil 7.9: AISI 1040 kalite çeliğin borlanmış durumdaki kesit görüntüsü (Ortalama Bor kaplama kalınlığı: 21,33 μm).

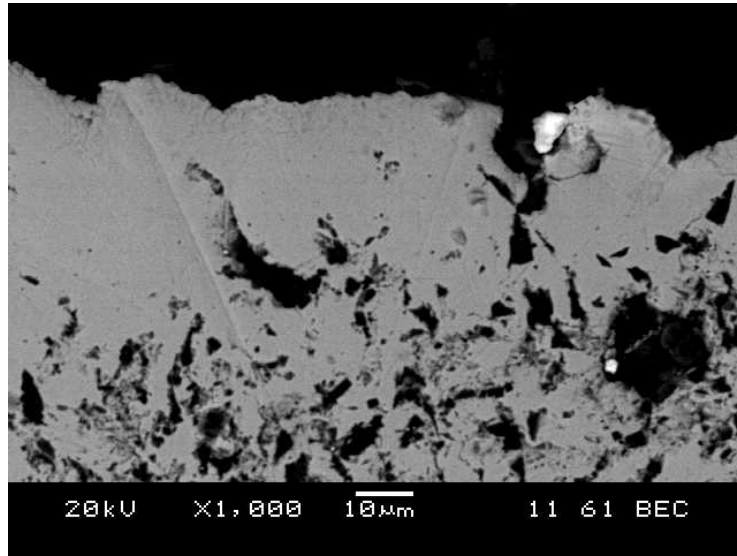


Şekil 7.10: AISI 420 kalite çeliğin borlanmış durumdaki kesit görüntüsü (Ortalama Bor kaplama kalınlığı: 4,67 μm)

Borlama yapılmış numunelerin kesitleri boyunca ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları da yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen tüm SEM görüntüleri Ek S'de verilmiştir. SEM görüntülerinden de optik mikroskop görüntülerine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kesitten alınan görüntülerde AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 5140 kalite çeliklerinin borlanması sonucunda kolonsal ve dişli bir bor tabakasının oluştuğu görülmüştür (Şekil 7.11). AISI 420 kalite çeliğin borlanması sonucunda ise, kolonsal olmayan bor tabakası tespit edilmiştir (Şekil 7.12).



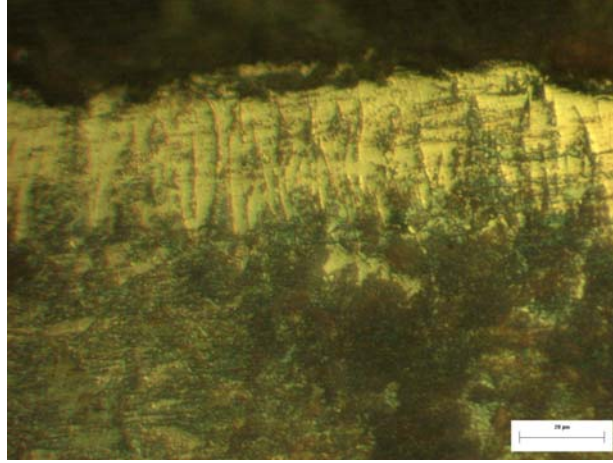
Şekil 7.11: Borlanmış AISI 1040 kalite çeliğin SEM görüntüsü.



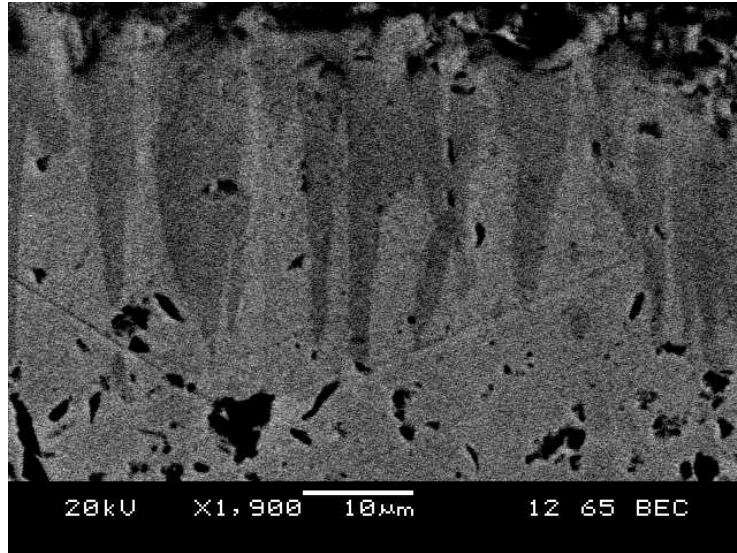
Şekil 7.12: Borlanmış AISI 420 kalite çeliğin SEM görüntüsü.

Yapılan kalınlık ölçümleri incelendiğinde, borlanmış AISI 4140 kalite çeliğin tüm kaplamalar içerisinde en yüksek ortalama ($25 \mu\text{m}$) kaplama kalınlığı değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Optik mikroskop (Şekil 7.13) ve taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri (Şekil 7.14), borlanmış AISI 4140 kalite çeliğin yüzeyinde oluşan kalın ve dişli bor tabakasını açıkça göstermektedir.



Şekil 7.13: Borlanmış AISI 4140 kalite çeliğin optik mikroskop kesit görüntüsü (dağlanmış).



Şekil 7.14: Borlanmış AISI 4140 kalite çeliğinin kesit SEM görüntüsü.

AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerine uygulanan tüm yüzey işlemleri sonucunda en düşük ortalama kaplama kalınlığına sahip çelik AISI 420 kalite çelik olarak belirlenmiştir.

Deney numuneleri ile ilgili olarak yapılan kaplama kalınlığı ölçümlerinde elde edilen minimum, maksimum ve ortalama değerler Ek B’de gösterilmiştir.

Kaplama işlemleri öncesinde ve sonrasında tüm çeliklerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) ölçülmüştür. İncelenen akımsız nikel kaplı tüm çelik numuneler içinde en düşük ortalama yüzey pürüzlülük değeri AISI 420 kalite çelikte ($0,42-0,90 \mu\text{m}$) ve en yüksek yüzey pürüzlülük değeri ise AISI 1040 kalite çelikte ($1,82-1,90 \mu\text{m}$) tespit edilmiştir. Ayrıca akımsız nikel kaplama yüzey işlemi sonucunda tüm çeliklerin

yüzeý pürüzlüklüklerinin yüzeý işlemleri görmemiş çeliklere göre arttığı görülmüştür. Deneylerde kullandığımız malzemelerin yüzeý pürüzlük değeri Ek T’de gösterilmiştir.

Nitrokarbürlenmiş çelikler üzerinde yapılan ölçümlerde en yüksek yüzeý pürüzlüklük değeri AISI 4140 kalite çelikte (1,45-1,52 µm), en düşük yüzeý pürüzlüklük değeri ise akımsız nikel kaplama da olduğu gibi AISI 420 kalite çelikte (0,32 µm) ölçülmüştür.

Nitrokarbürlenmiş çeliklerin yüzeý pürüzlüklük değeri karşılaştırıldığında, AISI 420 kalite çelik dışında işlem görmemiş diğer çeliklerin yüzeý pürüzlüklük değeri daha yüksek olduğu tespit edilmiştir, yani nitrokarbürleme işlemi AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 5140 kalite çeliklerin yüzeý pürüzlülüğünü azaltmıştır.

İncelenen sert krom kaplı tüm çelikler içinde AISI 420 kalite çeliğin en düşük yüzeý pürüzlülüğüne sahip (0,35-0,37 µm) olduğu, ancak bu çeliğin kaplama öncesi ölçülen yüzeý pürüzlüklük değeri (0,30-0,32 µm) olduğu göz önüne alındığında, AISI 420 kalite çelikte yüzeý pürüzlüklük değeri işlem gördükten sonra arttığı sonucuna varılmıştır. Sert krom kaplanmış AISI 1040 kalite çeliğin yüzeý pürüzlüklük değeri (0,80-0,87 µm) ise, yüzeý işlemi görmemiş çeliğe göre (0,77-0,85) belirgin bir değişikliğe rastlanmamıştır. Ölçüm yapılan sert krom kaplı tüm çelikler içerisinde en yüksek pürüzlüklük değeri AISI 4140 kalite çelikte (1,12-1,25) tespit edilmiştir.

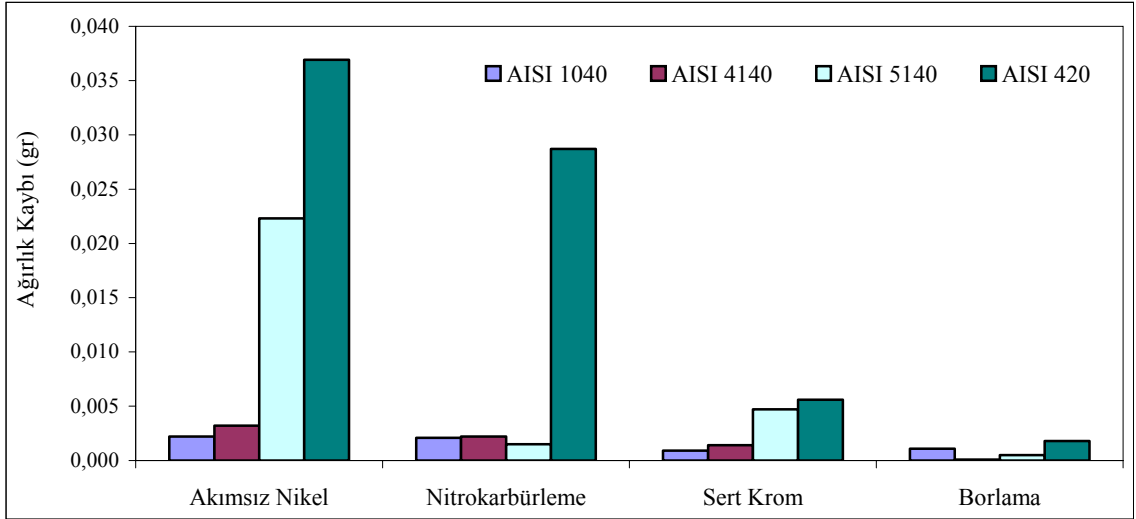
Borlanmış tüm çeliklerin yüzeý pürüzlüklük değeri, işlem görmemiş çeliklere göre belirgin bir artışa rastlanmamıştır. Buna rağmen en yüksek yüzeý pürüzlüklük değeri AISI 4140 kalite çelikte (1,02-1,10 µm), en düşük yüzeý pürüzlüklük değeri ise AISI 420 kalite çelikte (0,32-0,35 µm) ölçülmüştür. AISI 5140 kalite çeliğin borlama sonrası yüzeý pürüzlüklük değeri (0,92-1,00 µm) işlem görmemiş durumuna göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Genel olarak ölçüm yapılan tüm çeliklerde, yüzeý işlemi uygulanmamış çeliklerin yüzeý işlemi uygulanmış çeliklere göre daha düşük yüzeý pürüzlüklük değerlerine sahip oldukları tespit edilmiştir. Uygulanan yüzeý işlemlerinden borlama ve sert krom kaplama, yüzeý pürüzlüklük değerlerini arttırıcı yönde belirgin bir etki yaratmadığı halde akımsız nikel kaplamanın yüzeý pürüzlülüğünü arttırdığı belirlenmiştir.

7.1 Disk Üstünde Aşınan Pim Deneyinde Elde Edilen Deney Sonuçları ve İrdelenmesi

Metal-metal aşınma deneyinde pimin üzerinde hareket ettiği disk, M2 kalite çelikten imal edilmiştir ve kayma mesafesi 6.000 m olarak belirlenmiştir. Aşınma deneylerinde kayma mesafesi 2.000 m iken kaplamaların genel olarak yüzeyden ayrılmadığı ve aşınma kaybı kaplanmış bölge içerisinde kaldığı için, karşılaştırma yapılırken bütün deneyler için 2.000 m'ye karşılık gelen ağırlık kayıpları dikkate alınmıştır. Şekil 7.15'de 2.000 m'deki ağırlık kaybı değerleri gösterilmiştir.

Şekil 7.16-7.23'te kaplama altındaki malzeme türüne göre farklı yüzey işlemleri gören numunelerin kayma mesafesine göre ağırlık kaybı ve yükseklik kaybı değerleri verilmiştir.



Şekil 7.15: AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama türlerine göre 2.000 m kayma mesafesinde gösterdikleri ağırlık kaybı değerleri.

Kaplamasız numunelerin ağırlık ve yükseklik kayıpları kaplanmış numunelere göre çok fazla olduğu ve grafik skalasının anlaşılabilirliğini güç hale getirdiği için Şekil 7.16-7.23'te gösterilmemiştir. Deneylerde elde edilen tüm ağırlık ve yükseklik kaybı verileri (kaplamasız numunelerin de değerleri dahil olmak üzere) Ek F'de, Tablo F.1-4'te gösterilmiştir.

Farklı kayma mesafeleri sonrasında yapılan yükseklik kaybı değerlerinden kaplama kalınlığı içerisinde kalma durumunun 2.000 m'de sağlandığı belirlenmiş olduğundan, bu mesafe baz alınmış ve bu değerlere göre aşınma analizi yapılmıştır. 2.000 m

kayma mesafesinde AISI 4140 borlanmış deney numunesinin ağırlık kaybının en az olması nedeni ile referans malzeme seçilmiştir. Diğer malzemelerin ağırlık kayıpları, referans malzemenin ağırlık kaybına oranlanarak rölatif aşınma oranı (RAO) değerleri hesaplanmıştır. Tablo 7.1’de deney numunelerinin RAO’ları gösterilmiştir.

Tablo 7.1’de, incelenen deney numunelerinin 2.000 m kayma mesafesinde gösterdikleri rölatif aşınma oranı değerleri verilmiştir.

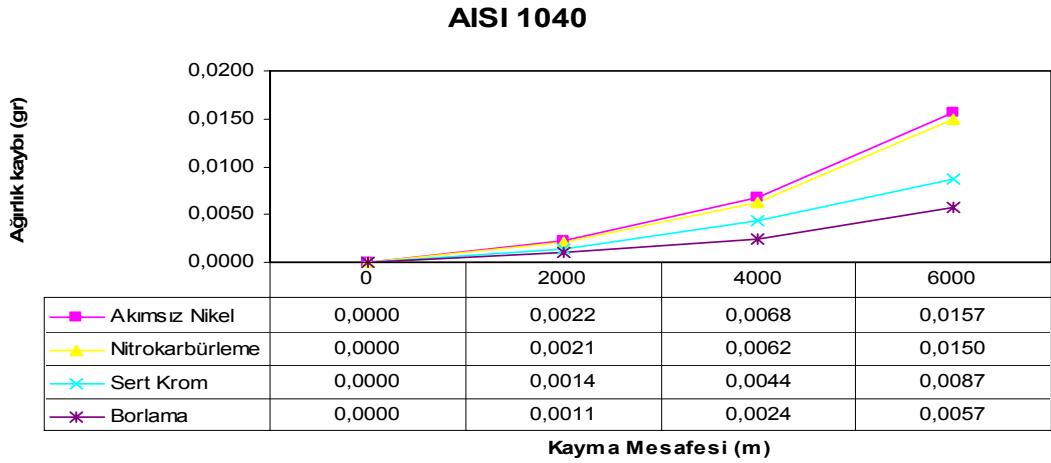
İncelenen çeliklerin farklı kaplama işlemleri sonucunda aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerlerinden yapılan aşınma analizinde, AISI 4140 borlanmış malzemenin aşınmaya karşı en dirençli malzeme olduğu ortaya çıkmıştır.

Tablo 7.1: Aşınma deneylerinde 2.000 m kayma mesafesinde incelenen dört farklı kalite çeliğin farklı türdeki kaplanmış durumlarında ağırlık kaybı değerlerine göre (Ek F-Tablo F.1-4) hesaplanan rölatif aşınma oranı değerleri.

Kaplama Türü	Deney Numunesi Ağırlık Kaybı Değerleri (gr)			
	AISI 1040	AISI 4140	AISI 5140	AISI 420
Kaplamasız	0,0214	0,0301	0,0192	0,0552
Akımsız Nikel	0,0022	0,0032	0,0223	0,0369
Nitrokarbürleme	0,0021	0,0022	0,0015	0,0287
Sert Krom	0,0014	0,0014	0,0047	0,0056
Borlama	0,0011	0,0003	0,0005	0,0018
Kaplama Türü	Borlanmış AISI 4140 numuneye göre RAO değeri			
	AISI 1040	AISI 4140	AISI 5140	AISI 420
Kaplamasız	71,33	100,33	64	184
Akımsız Nikel	7,33	10,67	74,33	123
Nitrokarbürleme	7	7,33	5	95,67
Sert Krom	4,67	4,67	15,67	18,67
Borlama	3,67	1	1,67	6

İncelenen çelikler taban malzemesi olarak baz alınarak bu çeliklere uygulanan farklı yüzey işlemlerinde gösterdikleri aşınma davranışları Şekil 7.16-7.23’te incelenmiştir. Şekil 7.24-7.31’de ise, bu çeliklere uygulanan yüzey kaplama işleminin türü baz alınarak farklı taban malzemelerinin aynı yüzey kaplama işlemlerinde gösterdikleri aşınma davranışları incelenmiştir.

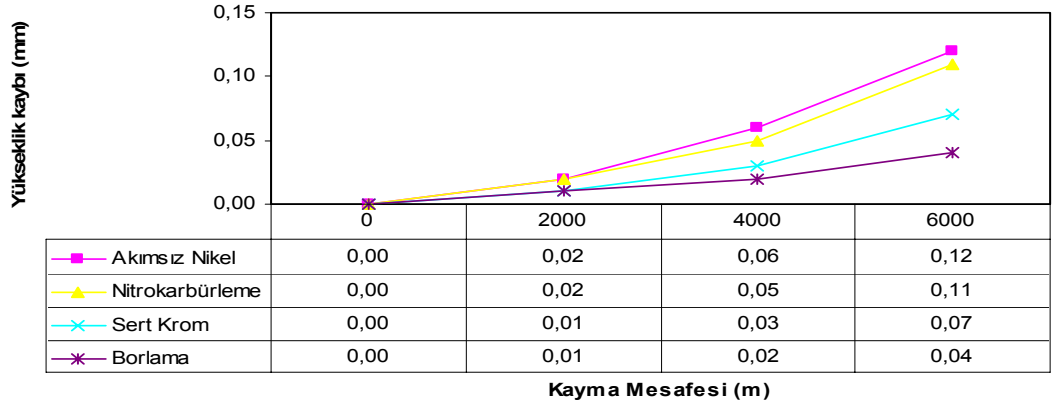
Şekil 7.16'da farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040 malzemenin kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Sert krom kaplı ve borlanmış numuneler aşınmaya karşı daha dirençli olmuşlardır. Borlamanın ise, incelenen toplam kayma mesafelerinde aşınmaya en dirençli kaplama olduğu görülmektedir. İncelenen toplam kayma mesafelerinde akımsız nikel kaplı ve nitrokarbürleşmiş numuneler benzer aşınma davranışı göstermiştir. AISI 1040 sert krom kaplı numunenin ortalama kaplama kalınlığının borlamanın ortalama kaplama kalınlığının yarısına yakındır (Ek B-Tablo B.1). 2.000 m kayma mesafesinde sert krom kaplamanın kalkması (Ek I-Şekil I.13) sonucunda aşınma davranışında etkisi kalmamıştır.



Şekil 7.16: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040 kalite çelik malzemenin (Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

Şekil 7.17'de farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040 kalite çelik malzemenin kayma mesafesine göre yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Burada da aşınmaya en dirençsiz kaplamanın akımsız nikel, en dirençlinin ise borlama olduğu açıkça görülmektedir.

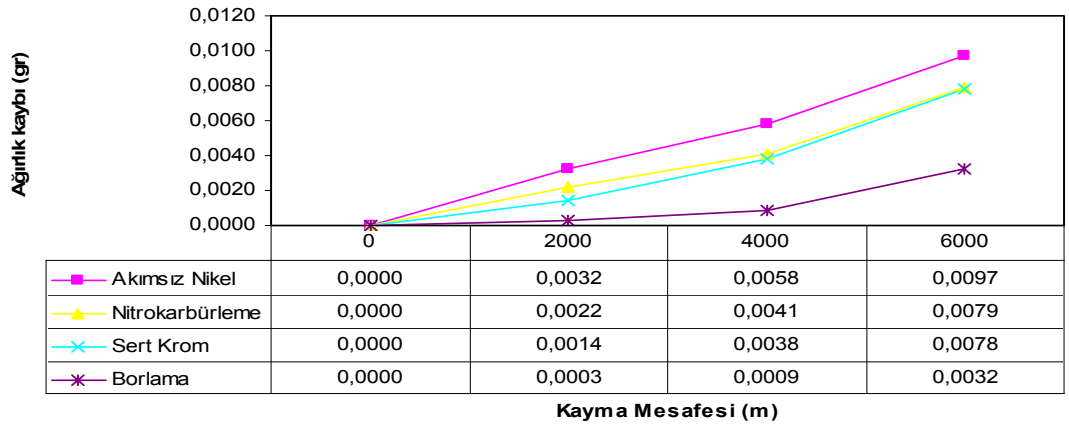
AISI 1040



Şekil 7.17: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040 kalite çelik malzemenin (Kayma mesafesi (m) - Yükseklik kaybı (mm)) grafiği.

Şekil 7.18’de farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 4140 kalite çelik malzemenin kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Bu çelikte de sert krom kaplı ve nitrokarbürlenmiş numunelerin aşınmaya karşı benzer davranışlar gösterdiği, borlanmış numunenin ise diğer numunelere göre daha dirençli olduğu görülmektedir.

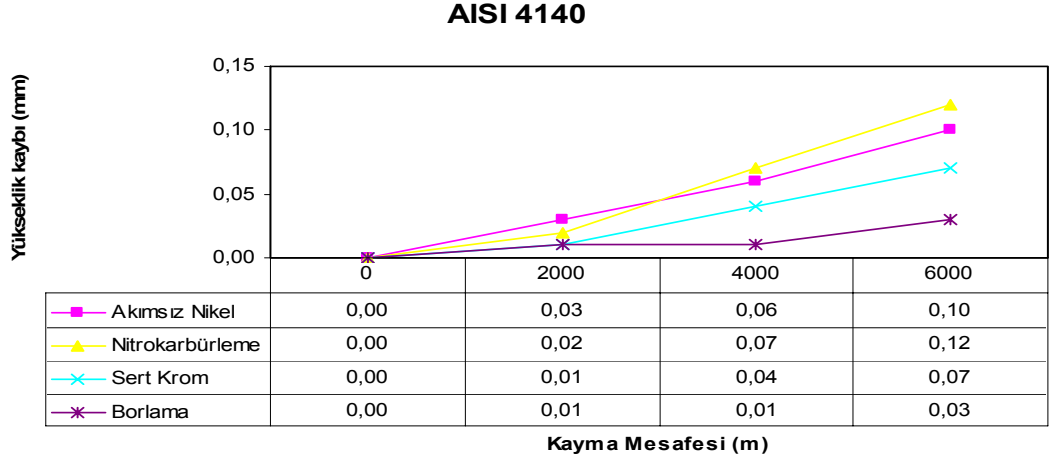
AISI 4140



Şekil 7.18: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 4140 kalite çelik malzemenin (Kayma mesafesi (m) - Yükseklik kaybı (mm)) grafiği.

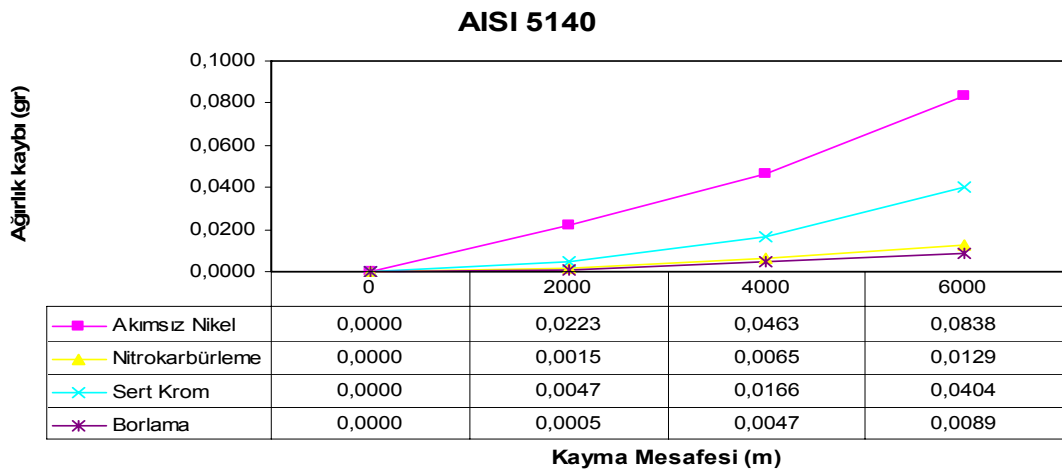
Şekil 7.19’da ise farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 4140 malzemenin kayma mesafesine göre yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Borlanmış ve sert krom kaplı numuneler arasında ilk 2.000 m’de birbirine yakın aşınma hızları

görülmüş, fakat sonrasında sert krom kaplamanın aşınma hızı çok artmıştır. Bu hızlı aşınmanın nedeni krom kaplamanın Ek I-Şekil I.28’de görüldüğü gibi aşınarak taban malzemesinden ayrılmış olmasıdır.



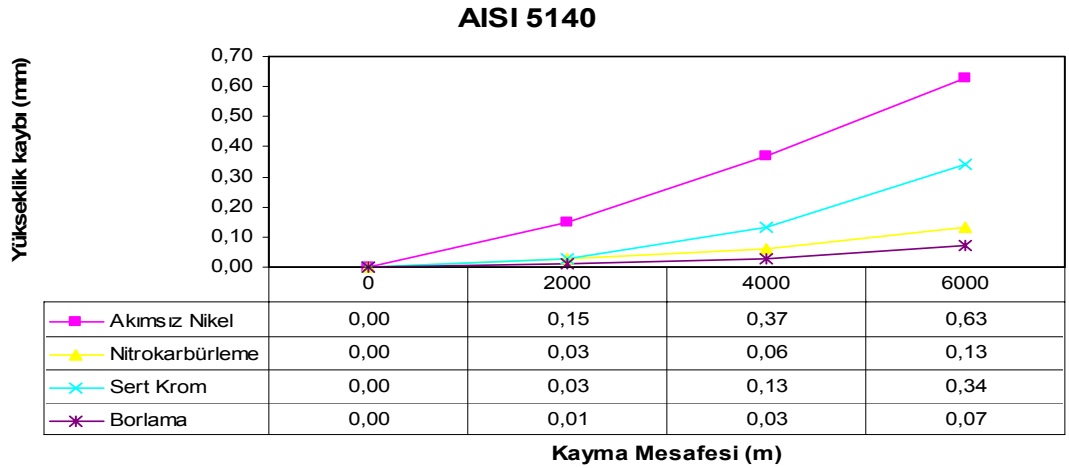
Şekil 7.19: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 4140 kalite çelik malzemenin (Kayma mesafesi (m) - Yükseklik kaybı (mm)) grafiği.

Şekil 7.20’de farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 5140 kalite çelik malzemenin kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Bu çelikte borlanmış ve nitrokarbürlenmiş numunelerin aşınmaya karşı en dirençli ve benzer aşınma davranışları gösterdikleri, akımsız nikel kaplı numunenin ise yapılan kaplamalar içinde aşınmaya en dirençsiz kaplama olduğu görülmektedir.



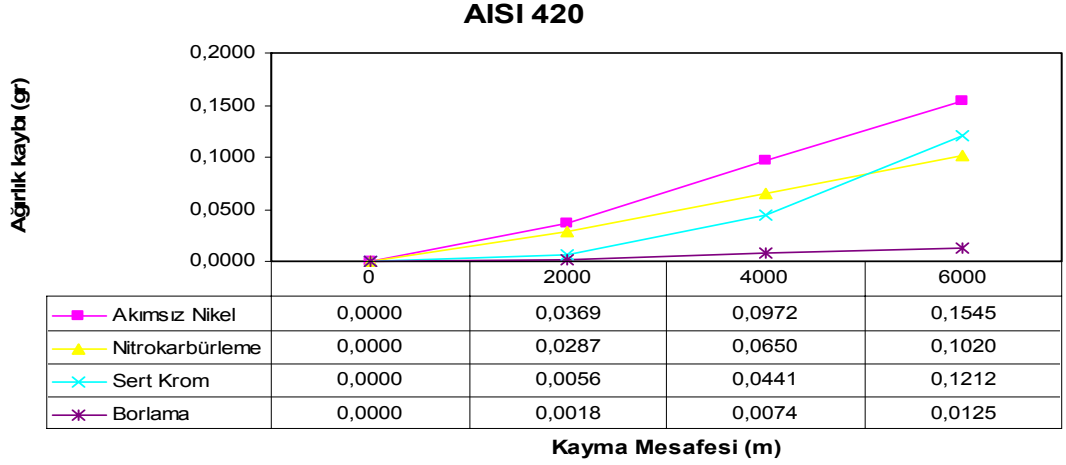
Şekil 7.20: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 5140 kalite çelik malzemenin (Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

Şekil 7.21’de farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 5140 kalite çelik malzemenin kayma mesafesine göre yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Borlanmış ve nitrokarbürlenmiş numunelerin aşınmaya karşı en dirençli ve benzer davranışlar gösterdikleri, sert krom kaplı numunenin 2.000 m kayma mesafesinden sonra hızlanarak yükseklik kaybettiği, akımsız nikel kaplı numunenin ise diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az dirençli olduğu görülmektedir.



Şekil 7.21: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 5140 kalite çelik malzemenin (Kayma mesafesi (m) - Yükseklik kaybı (mm)) grafiği.

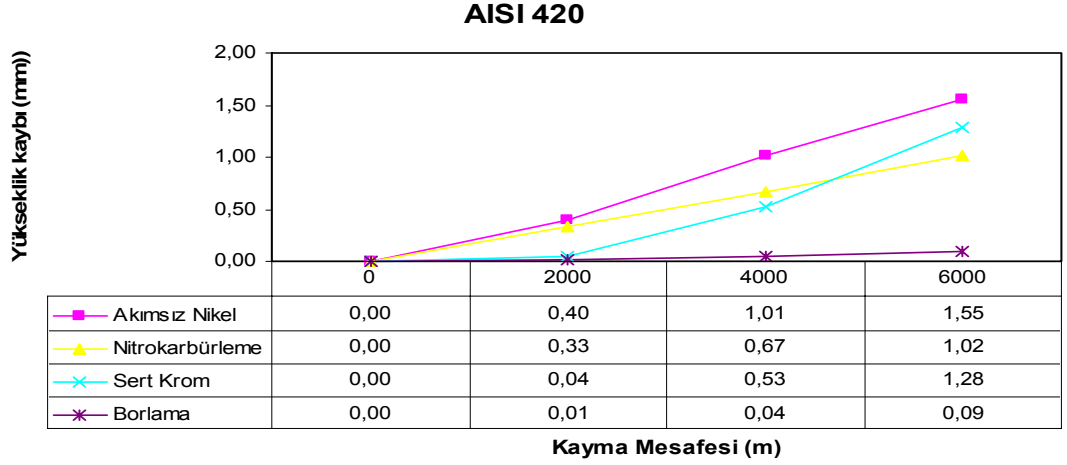
Şekil 7.22’de farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 malzemenin kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Borlanmış numune aşınmaya karşı en dirençli davranışı, akımsız nikel kaplı ve nitrokarbürlenmiş numuneler ise diğer numunelere göre aşınmaya karşı en dirençsiz davranışı göstermiştir.



Şekil 7.22: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 kalite çelik malzemenin (Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

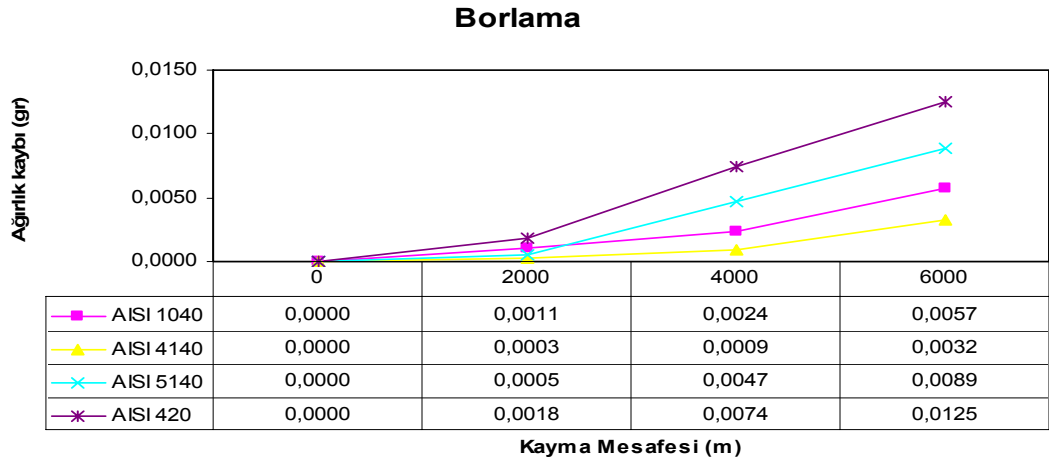
2.000 m kayma mesafesine kadar borlanmış numune ile benzer ağırlık kaybına uğrayan sert krom kaplı numune, 2.000 m sonrasındaki kayma mesafelerinde hızlanarak ağırlık kaybetmiştir. Nitrokarbürlenmiş deney numunesinin ortalama kaplama kalınlığı (Ek B - Tablo 1) en azken (1,68 μm), en kalın kaplı (9,68 μm) hali olan akımsız nikel kaplamaya benzer aşınma yüzey görüntüleri sergilediği (Ek H-Şekil H.31) tespit edilmiştir.

Şekil 7.23’de farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 malzemenin kayma mesafesine bağlı olarak yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Burada da borlanmış numune aşınmaya karşı en dirençli davranışı göstermiştir. Akımsız nikel kaplı ve nitrokarbürlenmiş numunelerin diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az dirençte olduğu, sert krom kaplı numunenin ise 2.000 m sonrasında hızlanarak yükseklik kaybettiği görülmektedir.



Şekil 7.23: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 kalite çelik malzemenin (Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm)) grafiği.

Yapılan kaplamalar içerisinde borlamanın aşınmaya karşı en dirençli olması nedeni ile, borlanmış 4 farklı çeliğin aşınma davranışlarını kıyaslamak amacı ile aşınma deney sonuçları Şekil 7.24'te borlanmış farklı çeliklerin kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi grafiği olarak tekrar incelenmiştir. AISI 4140 kalite borlanmış çelik aşınmaya karşı en dirençli davranışı göstermiştir.

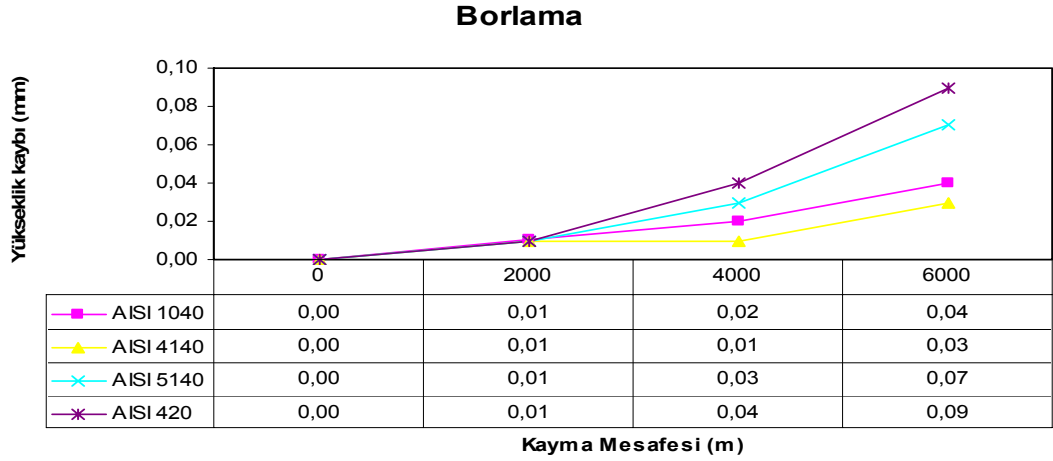


Şekil 7.24: Yüzeyi borlanmış AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin (Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

AISI 420 kalite çeliğin diğer numunelere göre aşınmaya karşı en dirençsiz olduğu ve 2.000 m sonrasında AISI 420 ve AISI 5140 kalite çeliklerin hızlanarak ağırlık

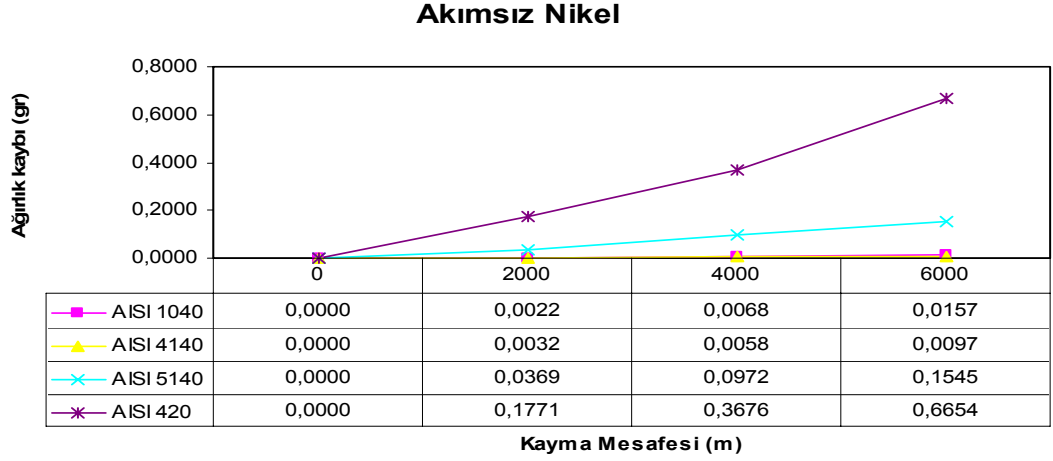
kaybettiği görülmektedir. Bu davranış 2.000 m kayma mesafesinde, bu 2 çelikte de borlanmış tabakanın aşınarak gitmesi ile ilgilidir. Tüm çelikler için 2.000 m'deki aşınma davranışı incelendiğinde borlamanın en iyi netice veren yüzey kaplama yöntemi olduğu görülmektedir.

Şekil 7.25'de borlanmış farklı numunelerin kayma mesafesine bağlı olarak yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. AISI 4140 kalite çelik yükseklik kaybı açısından en dirençli davranışı göstermiştir. 4.000 m kayma mesafesi sonrasında AISI 1040 kalite çelik ile AISI 4140 kalite çeliğin aşınma hızları birbirine yakın oranda artmıştır. AISI 420 kalite çeliğin diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az dirençte olduğu ve 2.000 m sonrasında hızlanarak yükseklik kaybettiği yani aşınma hızının hızla arttığı görülmüştür.



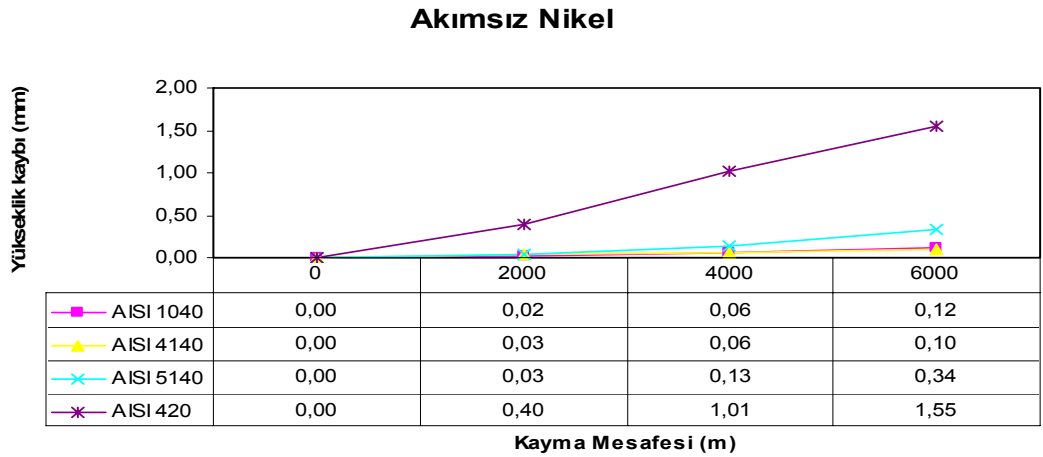
Şekil 7.25: Yüzeyi borlanmış AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerin (Kayma mesafesi (m) - Yükseklik kaybı (mm)) grafiği.

Şekil 7.26'da akımsız nikel kaplı farklı çelik numunelerin (AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. AISI 1040 ve AISI 4140 aşınmaya karşı en dirençli davranışı göstermiştir. AISI 420 kalite çeliğin artan kayma mesafeleri ile aşınma hızı artmış olup, akımsız nikel kaplı çelikler içinde aşınmaya en dirençsiz davranışı göstermiştir.



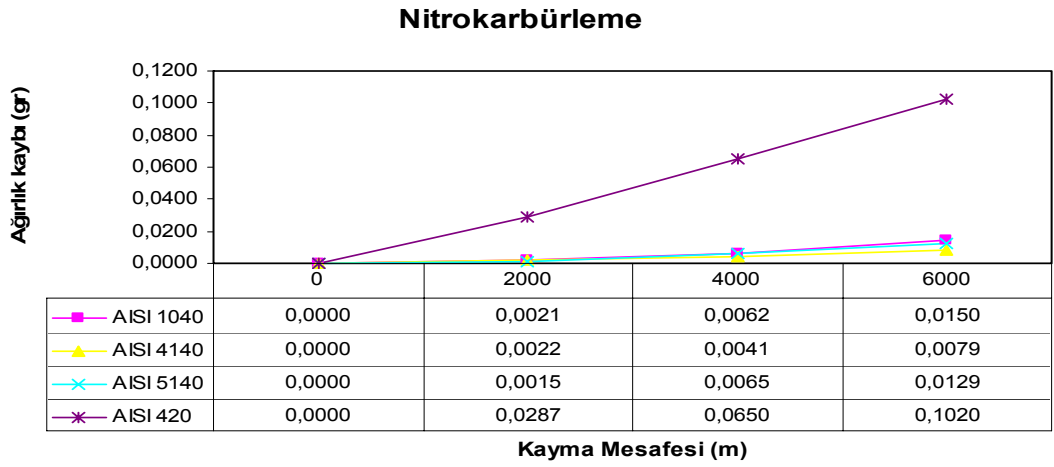
Şekil 7.26: Yüzeyi akımsız nikel kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerin (Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

Şekil 7.27’de akımsız nikel kaplı farklı çelik numunelerin (AISI 1040-AISI 4140– AISI 5140-AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. AISI 4140 kalite çelik aşınmaya karşı en dirençli, AISI 420 kalite çelik ise aşınmaya karşı en az dirençli davranışı göstermiştir.



Şekil 7.27: Yüzeyi akımsız nikel kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin (Kayma mesafesi (m) - Yükseklik kaybı (mm)) grafiği.

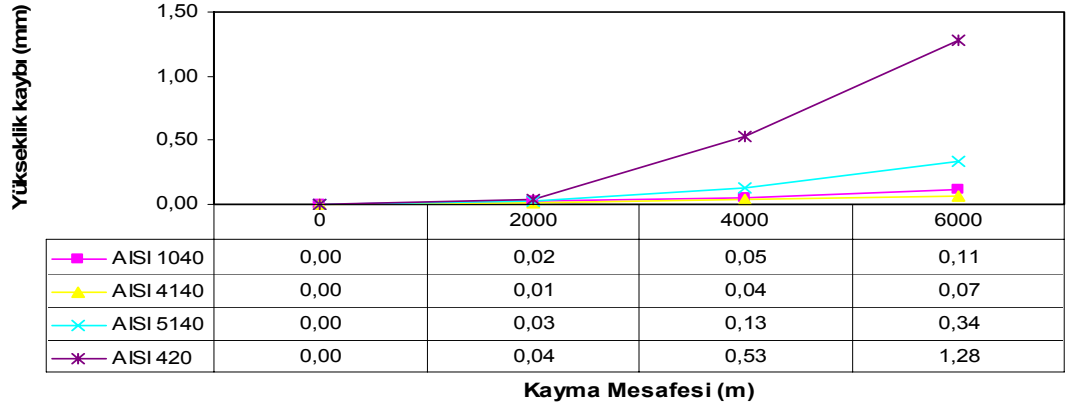
Şekil 7.28’de nitrokarbürleşmiş farklı çelik numunelerin (AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420) kayma mesafesine bağı olarak ağırlık kaybı değışiminin grafiğı gösterilmiştir. AISI 420 kalite çelik dışındaki diğler üç çelik (AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 5140) nitrokarbürleşmiş durumda kayma mesafesine bağı olarak benzer aşınma davranışı göstermişlerdir. Bu üç çelik içinde ağırlık kaybı değışimlerine göre AISI 4140 kalite çelik aşınmaya karşı en dirençli davranışı göstermiştir. AISI 420 kalite nitrokarbürleşmiş çeliğın aşınma hızı diğler çeliklere kıyasla çok yüksek değışimdedir.



Şekil 7.28: Yüzeyi nitrokarbürleşmiş AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerin (Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm)) grafiğı.

Şekil 7.29’da nitrokarbürleşmiş farklı numunelerin (AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420) kayma mesafesine bağı olarak yükseklik kaybı değışiminin grafiğı gösterilmiştir. AISI 4140 kalite nitrokarbürleşmiş çelik en az yükseklik kaybı gösteren numune olmuştur.

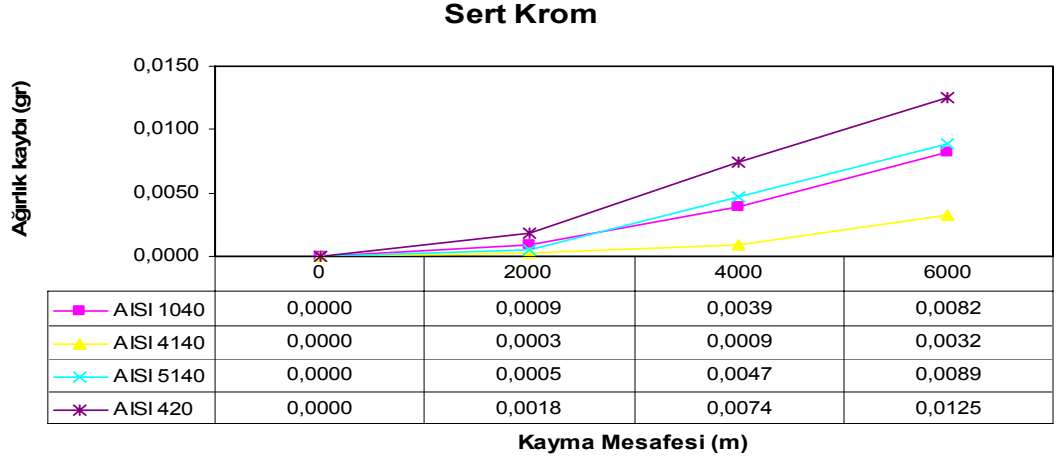
Nitrokarbürleme



Şekil 7.29: Yüzeyi nitrokarbürlenmiş AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerin (Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm)) grafiği.

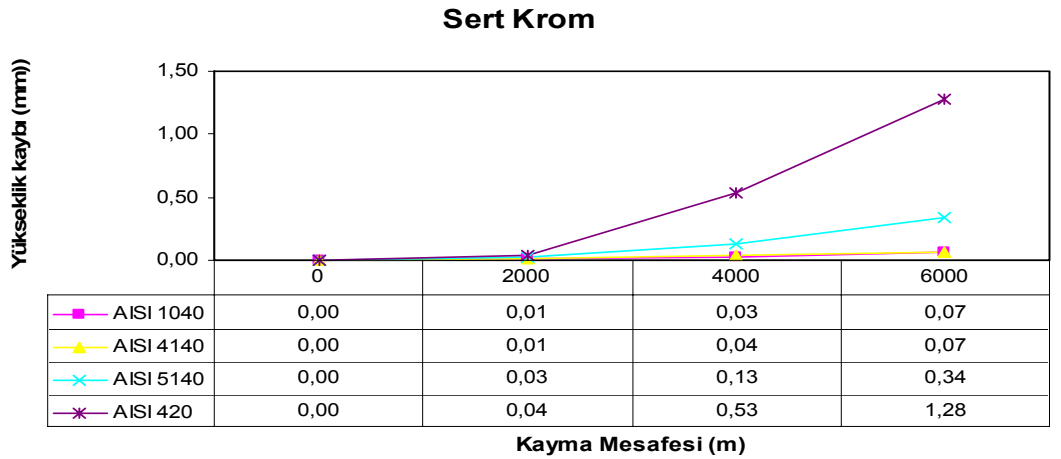
AISI 420 kalite nitrokarbürlenmiş çelik 2.000 m kayma mesafesine kadar diğer çeliklere benzer bir aşınma davranışı göstermesine karşın artan kayma mesafelerinde diğer numunelere göre çok yüksek bir aşınma hızında aşınarak aşınmaya karşı en az direnç gösteren malzeme olmuştur.

Şekil 7.30’da sert krom kaplanmış farklı kalite çelik numunelerin (AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi gösterilmiştir. AISI 4140 kalite sert krom kaplanmış çelik, en az ağırlık kaybı gösteren numune olmuştur. AISI 1040 ve AISI 5140 kalite sert krom kaplanmış çelikler birbirine benzer ağırlık kaybı davranışları göstermişlerdir. AISI 420 kalite çelik ise yine diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az direnç gösteren numune olmuştur.



Şekil 7.30: Yüzeyi sert krom kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin (Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

Şekil 7.31’de sert krom kaplanmış farklı kalite çelik numunelerin (AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak yükseklik kaybı değişimi gösterilmiştir. AISI 4140 kalite çelik ile AISI 1040 kalite çelik benzer yükseklik kaybı davranışları göstermiştir. AISI 420 kalite çelik ise diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az direnç gösteren malzeme olmuştur.

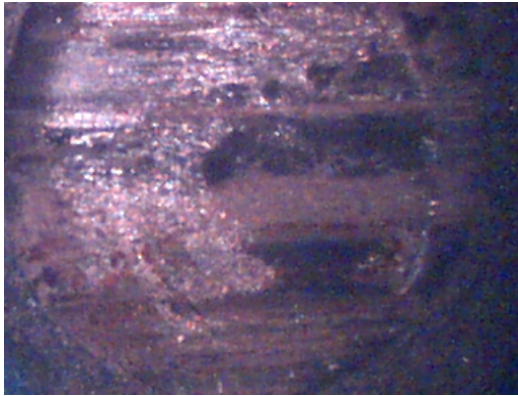


Şekil 7.31: Yüzeyi sert krom kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin (Kayma mesafesi (m) -Yükseklik kaybı (mm)) grafiği.

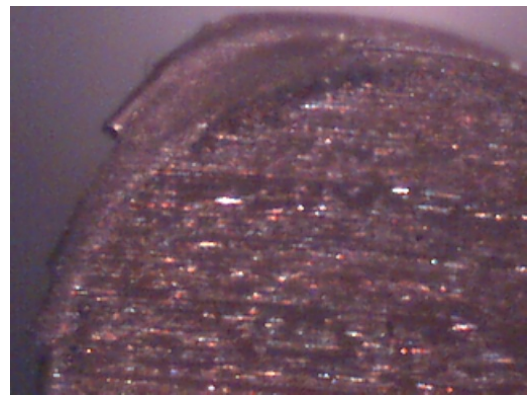
Sert krom kaplı AISI 420 kalite çelik 2.000 m sonunda hızlanarak yükseklik kaybetmiş olup incelenen sert krom kaplı çelikler içinde aşınmaya en az dirençli malzeme davranışı göstermiştir.

Sonuç olarak mevcut kalıp kolu malzemesi olan AISI 420 kalite çeliğe alternatif olarak seçilen dört çelik türüne uygulanan kaplamaların sonucunda bor kaplı AISI 4140 kalite çelik uygulamasının en yararlı seçim olacağı 2.000 m kayma mesafesine göre yapılan karşılaştırmalı incelemede tespit edilmiştir. % ağırlık kaybı verilerine göre (Ek B-Tablo B.1-4) aşınma deney sonuçları irdelenirken rölatif aşınma oranı (RAO) hesaplanmıştır. Burada en az aşınan bor kaplı AISI 4140 malzemenin % ağırlık kaybı değeri referans alınarak Tablo 7.1’de belirtilen rölatif aşınma oranları bulunmuştur.

Aşınma deneyi sonucunda Rölatif Aşınma Oranına göre en çok aşınan AISI 420 Kaplamasız ve en az aşınan AISI 4140 Borlanmış pim numunelerinin Stero mikroskop görüntüleri Şekil 7.32’de verilmiştir.



(a) AISI 4140 Borlanmış

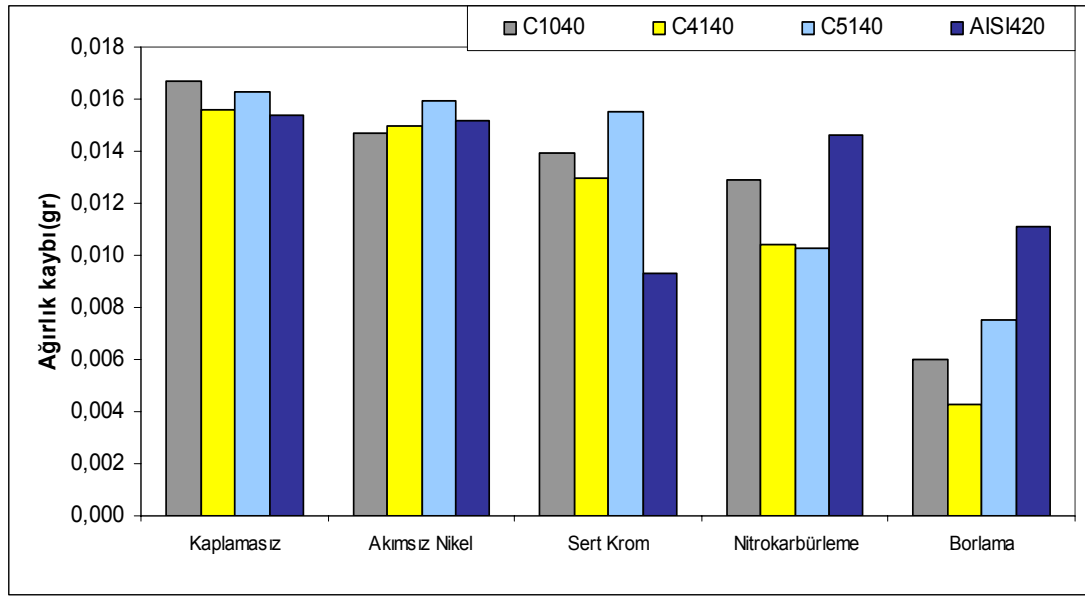


(b) AISI 420 Kaplamasız

Şekil 7.32: Rölatif Aşınma Oranına göre en az aşınan AISI 4140 borlanmış (a) ve en az aşınan AISI 420 kaplamasız (b) pim numunelerinin stereo mikroskop görüntüleri (60x).

7.2 Metal- Abrazif Aşınma Pim Deneyinde Elde Edilen Deney Sonuçları ve İrdelenmesi

Metal-abrazif aşınma deneyinde, pim üzerinde hareket eden 240 grid boyutundaki SiC abrazif şerit bantlar kullanılmıştır. Kayma mesafesi 16,5 m olarak belirlenmiştir. Aşınma deneylerinde kayma mesafesi 5,5 m iken kaplamalar genel olarak yüzeyden ayrılmadığı ve aşınmada kaplama içerisinde kaldığı için, karşılaştırma yapılırken bütün deneyler için 5,5 m'ye karşılık gelen ağırlık kayıpları dikkate alınmıştır. Metal-abrazif aşınma deneyinde metal-metal aşınma deneyinden farklı olarak sadece ağırlık kayıpları dikkate alınmıştır. Yüzeyde oluşan aşınma izlerinin yükseklik ölçümlerinde sağlıklı veri alınabilmesine olanak vermemesi nedeniyle yükseklik kayıpları değerlendirilmemiştir. Şekil 7.33'te incelenen dört çeliğin kaplama türlerine göre metal-abrazif aşınma deneylerinde 5,5 m'deki ağırlık kaybı değerleri grafik halinde verilmiştir.

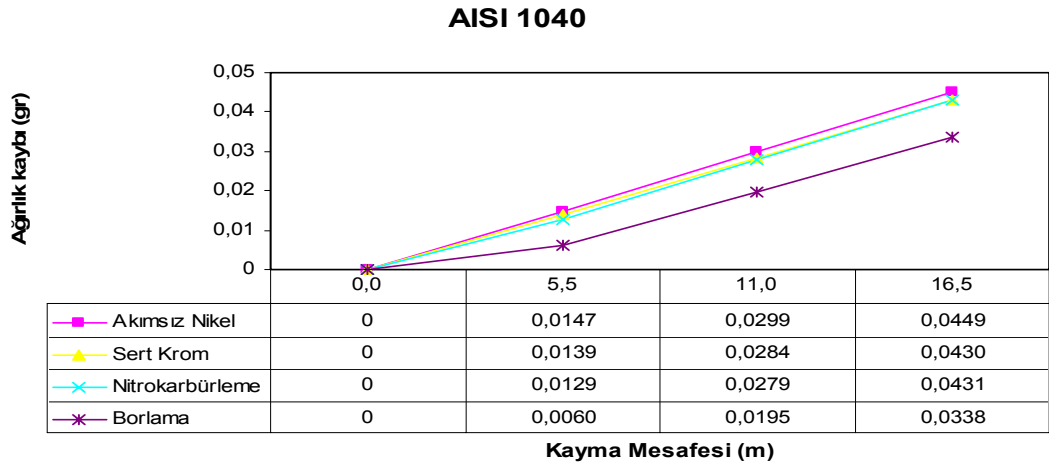


Şekil 7.33: AISI 1040-AISI 4140-AISI 5140-AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama türlerine göre metal-abrazif aşınma deneylerinde 5,5 m kayma mesafesinde ağırlık kaybı değerleri.

Şekil 7.34-7.37'de kaplama altındaki malzeme türüne göre farklı yüzey işlemleri gören numunelerin abrazif aşınmaya karşı gösterdikleri ağırlık kaybı değerleri incelenmiştir. Deneylerde elde edilen tüm ağırlık kaybı verileri (kaplamasız numunelerin de değerleri dahil olmak üzere) Ek J-Tablo J.1-2'de gösterilmiştir.

Şekil 7.38-7.41’de deney numuneleri taban malzemeleri baz alınarak deney numunesinin gördüğü farklı yüzey işlemlerinde gösterdikleri aşınma davranışları incelenmiştir. Verilere ait tüm grafikler toplam yol olan 16,5 m için Ek K ve Ek L’de verilmiştir.

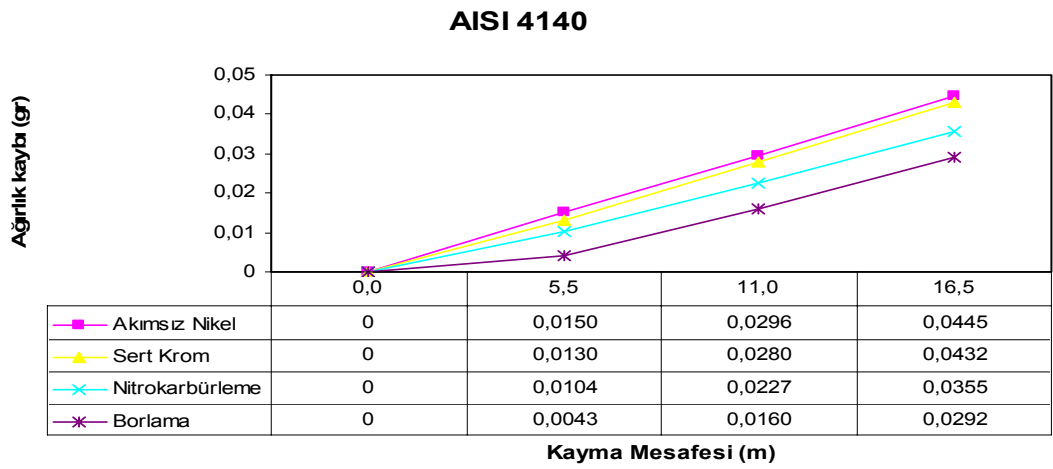
Şekil 7.34’de farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040 kalite çelik malzemenin kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. 5,5 m kayma mesafesinde nitrokarbürlenmiş, akımsız nikel ve sert krom kaplı numuneler aşınmaya karşı benzer davranışlar göstermişlerdir. Ancak borlanmış numuneler kadar dirençli olamamışlardır. Borlanmış numunenin aşınma hızı 5,5 m’den sonra artmıştır. Sonuç olarak ilerleyen kayma mesafelerinde de abrazif aşınmaya en dirençli numunenin borlanmış numune olduğu görülmektedir.



Şekil 7.34: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040 kalite çelik malzemenin abrazif aşınma deneylerinde (Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

Şekil 7.35’te farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 4140 çelik malzemenin kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Sert krom ve akımsız nikel kaplı numunelerin aşınmaya karşı daha az direnç göstererek benzer davranışlar gösterdiği, nitrokarbürlenmiş numunenin ise diğer iki numuneye oranla daha dirençli olduğu, fakat AISI 4140 çelik malzemedeki borlanmış numunenin aşınmaya karşı en iyi direnci gösterdiği tespit edilmiştir.

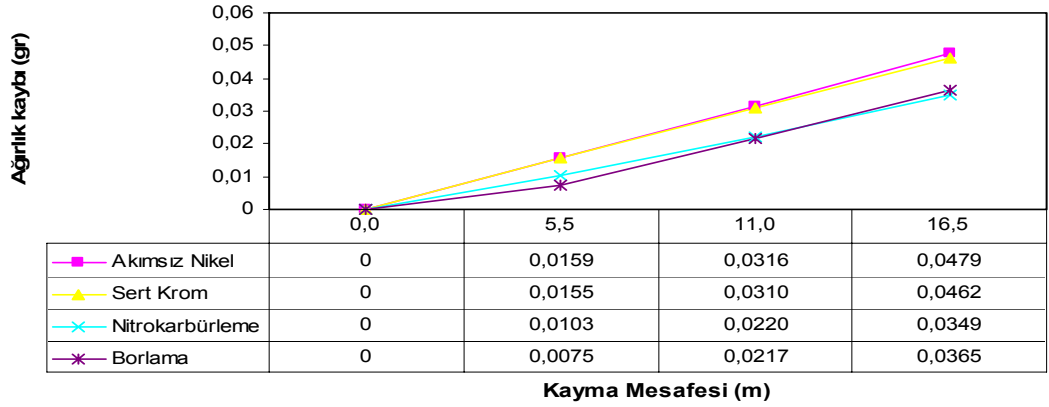
AISI 4140 kalite çeliğin borlanmış deney numunesinde kaplama kalınlığı 25,02 μm 'dir, sonrasında ise en kalın kaplama nitrokarbürleşmiş malzemeye aittir ve bu iki malzemenin kaplama kalınlığı diğer iki deney numunelerine göre daha fazladır (Ek B-Tablo 1). Deneyler sırasında 5,5 m kayma mesafesinde çekilen borlanmış deney numunesi fotoğrafında (Ek H-Şekil H.20) görüldüğü gibi, borlanmış deney numunesinin yüzeyi diğer deney numunelerine göre daha az aşınmıştır. Akımsız nikel kaplı numunenin en fazla aşındığı abrazif aşınma deneyinde, akımsız nikel kaplı nitrokarbürleşmiş ve sert krom kaplı numunelerin aşınma hızları birbirine yakın mertebelerde olmuştur.



Şekil 7.35: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 4140 kalite çelik malzemenin abrazif aşınma deneylerinde (Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

Şekil 7.36'da farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 5140 çelik malzemenin abrazif aşınmada kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Sert krom ve akımsız nikel kaplı numunelerin aşınmaya karşı daha az direnç göstererek benzer aşınma davranışları gösterdiği, nitrokarbürleşmiş ve borlanmış numunelerin ise diğer iki numuneye oranla daha dirençli olduğu görülmektedir.

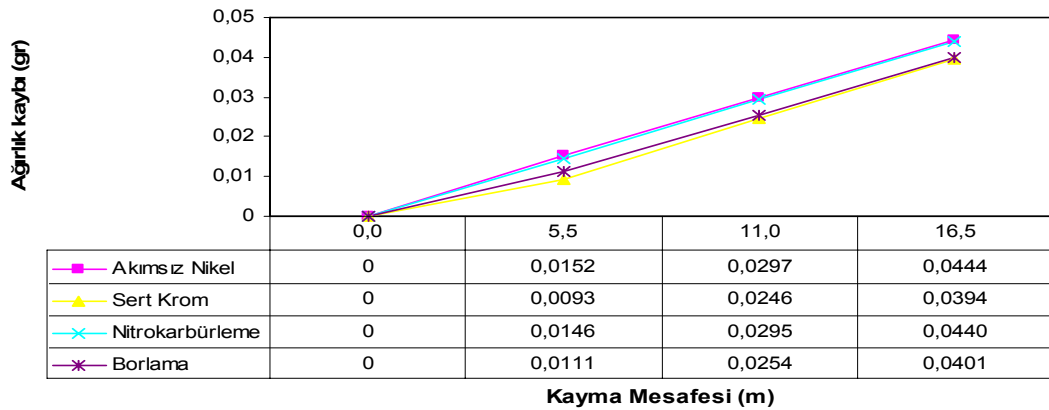
AISI 5140



Şekil 7.36: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 5140 kalite çelik malzemenin abrazif aşınma deneylerinde (Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

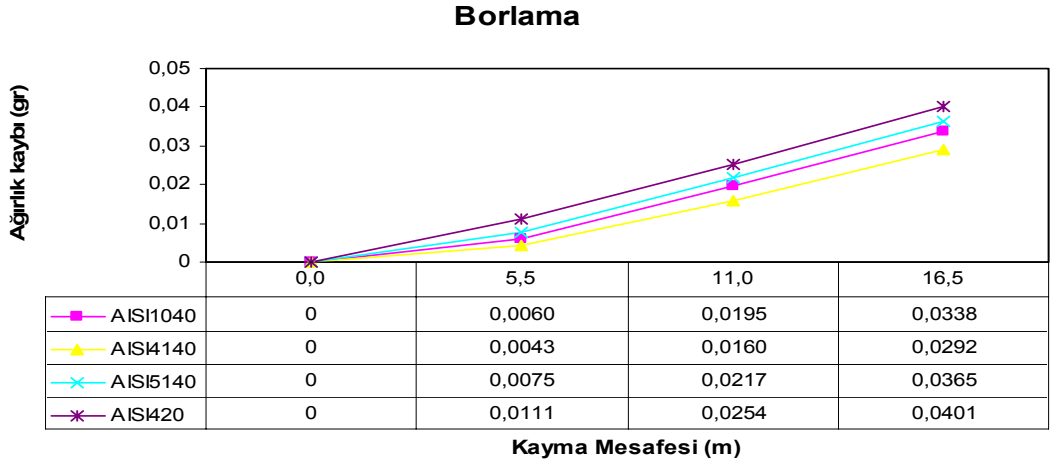
Şekil 7.37’de farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 kalite çelik malzemenin kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Sert krom kaplı numune aşınmaya karşı en dirençli davranışı, akımsız nikel kaplı ve nitrokarbürlenmiş numuneler ise diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az dirençsiz davranışı göstermiştir. Borlanmış numunenin aşınma davranışı da sert krom kaplı numunenin aşınma davranışına çok yakındır.

AISI 420



Şekil 7.37: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 kalite çelik malzemenin abrazif aşınma deneylerinde (Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

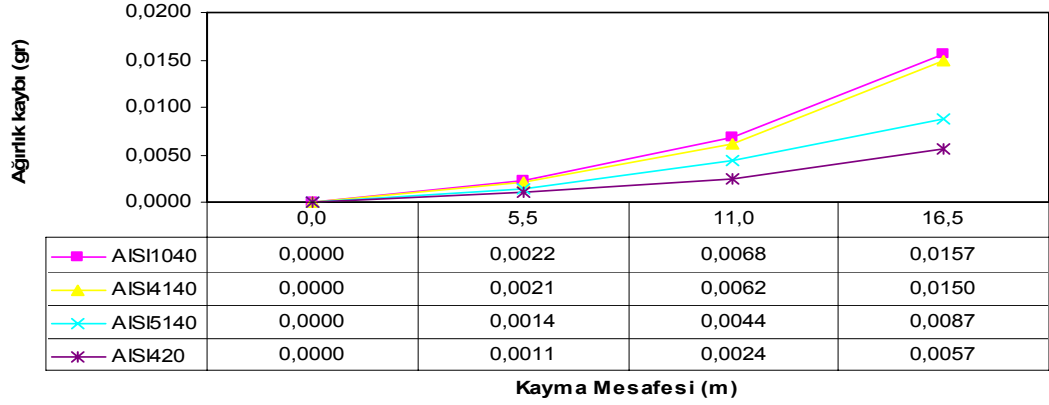
Şekil 7.38’de aşınmaya karşı en dirençli yüzey kaplama yöntemi olarak görülen borlanmış numunelerin karşılaştırmalı grafiği bulunmaktadır. AISI 4140 deney numunesinin aşınmaya karşı en dirençli numune olmasının en önemli sebebi AISI 4140 kalite çeliğin en kalın borlama kalınlığında ve de yüksek bir sertlikte olmasıdır.



Şekil 7.38: Yüzeyi borlanmış AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerin abrazif aşınma deneylerinde (Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

Şekil 7.39’da akımsız nikel kaplı deney numunelerinin karşılaştırmalı abrazif aşınma grafiği bulunmaktadır. Akımsız nikel kaplı AISI 420 malzemenin abrazif aşınmaya karşı en dirençli deney numunesi olduğu görülmektedir. AISI 1040, AISI 4140 ve AISI 5140 deney numuneleri benzer kaplama kalınlıklarına sahip olmalarına rağmen, en sert yüzey sertliğine sahip olması, akımsız nikel kaplı AISI 420’nin aşınmaya karşı en dirençli deney numunesi olmasını sağlamıştır. 11 m sonrasında akımsız nikel kaplı AISI 1040 ve AISI 4140 kalite çeliklerin deney numunelerinin hızlanarak ağırlık kaybettikleri yani aşınma hızlarının arttığı görülmüştür.

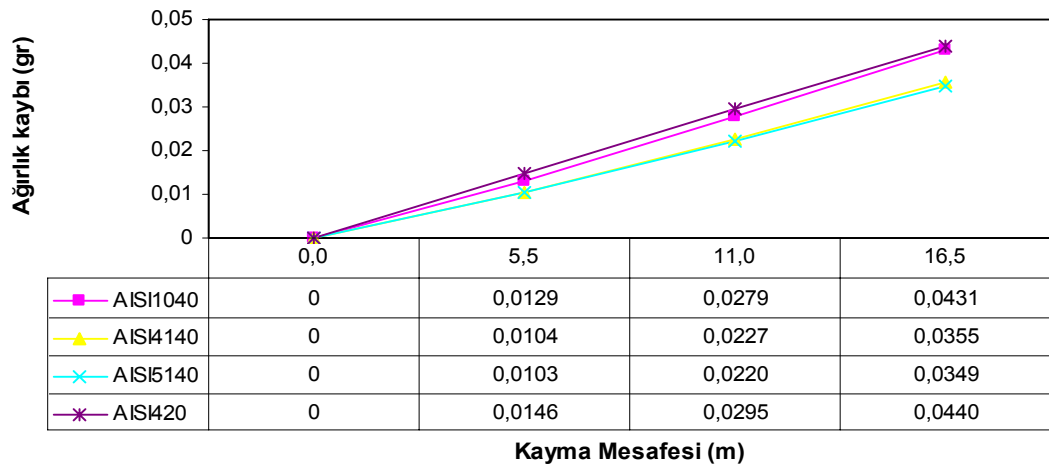
Akımsız Nikel



Şekil 7.39: Akımsız nikel kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerin abrazyif aşınma deneylerinde (Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

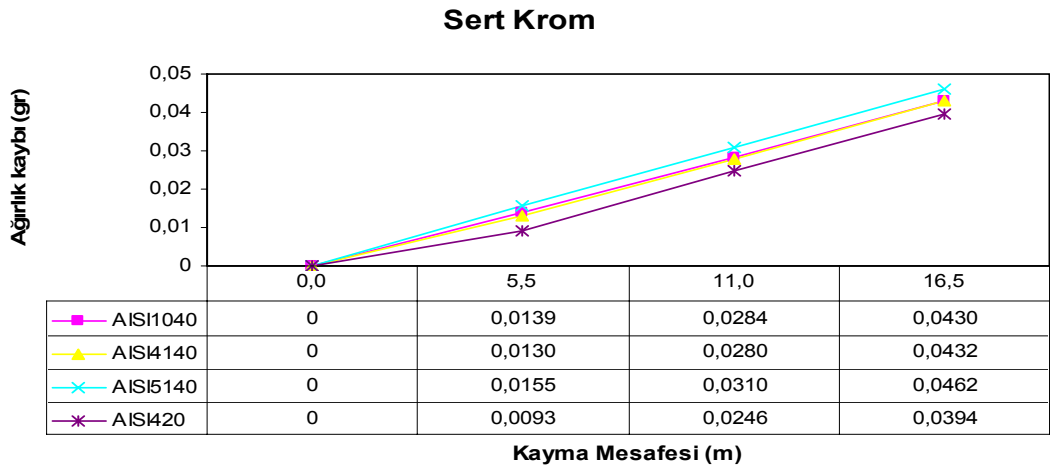
Şekil 7.40'da nitrokarbürleşmiş deney numunelerinin karşılaştırmalı abrazyif aşınma grafiği bulunmaktadır. Nitrokarbürleşmiş dört deney numunesinin benzer yüzey sertliklerine sahip olmalarına rağmen, nitrokarbürleşmiş AISI 4140 ve AISI 5140 kalite çelik malzemenin aşınmaya karşı en dirençli deney numuneleri olduğu görülmektedir.

Nitrokarbürleme



Şekil 7.40: Yüzeyi nitrokarbürleşmiş AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerin abrazyif aşınma deneylerinde (Kayma mesafesi (m) - Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

Şekil 7.41’de sert krom kaplı deney numunelerinin karşılaştırmalı abrazif aşınma grafiği bulunmaktadır. Dört deney numunesi de benzer aşınma davranışları göstermiştir. Deney numunesi içerisinde en kalın kaplamaya AISI 5140 kalite çelik numune, en az kaplama kalınlığına ise AISI 420 kalite çelik numune sahiptir. Dört deney numuneside benzer yüzey sertliklerine sahip olmalarına rağmen, AISI 420 kalite çelik numunesinin özellikle ilk 5,5 m kayma mesafesinde abrazif aşınmaya karşı en dirençli deney numunesi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.41: Yüzeyi sert krom kaplı AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerin abrazif aşınma deneylerinde (Kayma mesafesi (m) Ağırlık kaybı (gr)) grafiği.

Mevcut kalıp kolu malzemesi olan AISI 420 kalite çeliğe alternatif olarak seçilen üç çelik malzemeye, dört farklı yüzey işlemi uygulanmıştır. Bu deney numuneleriyle yürütülen çalışmalar sonucunda, metal-metal deneylerinde olduğu gibi, metal-abrazif deneylerinde de bor kaplı AISI 4140 kalite çeliğin en yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle 5,5 m kayma mesafesine göre yapılan irdelemelerde, borlanmış AISI 4140 kalite çeliğin abrazif aşınma direncinin en yüksek olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7.2’de deney numunelerinin ağırlık kaybı değerlerine göre yapılan abrazif aşınma davranışı analizinde, metal-abrazif aşınma deneylerinde de aşınmaya karşı en dirençli malzeme olan borlanmış AISI 4140 kalite çeliğin ağırlık kaybı referans olarak alınarak, incelenen tüm çeliklerin abrazif aşınmada farklı kaplama uygulanmış durumlarındaki rölatif aşınma oranları (RAO) verilmiştir.

Tablo 7.2: Abrazif aşınma deneylerinde 5,5 m kayma mesafesinde incelenen dört farklı kalite çeliğin farklı türdeki kaplanmış durumlarında % ağırlık kaybı değerlerine göre (Ek J-Tablo J.1-2) hesaplanan rölatif aşınma oranı (RAO) değerleri.

Kaplama Türü	Deney Numunesi Ağırlık Kaybı Değerleri (gr)			
	AISI 1040	AISI 4140	AISI 5140	AISI 420
Kaplamasız	0,0167	0,0156	0,0163	0,0154
Akımsız Nikel	0,0147	0,015	0,0159	0,0152
Nitrokarbürleme	0,0129	0,0104	0,0103	0,0146
Sert Krom	0,0139	0,013	0,0155	0,0093
Borlama	0,006	0,0043	0,0075	0,0111
Kaplama Türü	Borlanmış AISI 4140 numuneye göre RAO değeri			
	AISI 1040	AISI 4140	AISI 5140	AISI 420
Kaplamasız	3,88	3,63	3,79	3,58
Akımsız Nikel	3,42	3,49	3,70	3,53
Nitrokarbürleme	3,00	2,42	2,40	3,40
Sert Krom	3,23	3,02	3,60	2,16
Borlama	1,40	1,00	1,74	2,58

Tablo 7.2'den açıkça görüldüğü gibi, borlanmış AISI 4140 kalite çeliğe kıyasla, kaplamasız AISI 420 kalite çeliğin abrazif aşınmada aşınma oranı 3,54 kat, borlanmış durumda da 2,54 kat daha fazladır.

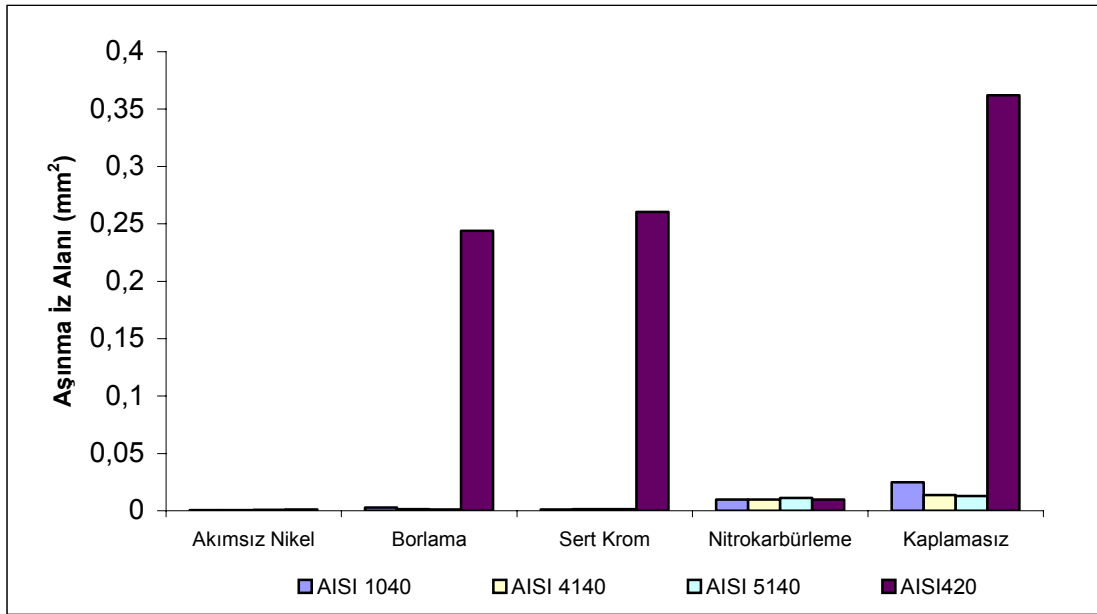
En iyi abrazif aşınma direnci borlanmış AISI 4140 kalite çelikte, bunu sert krom kaplama, nitrokarbürleme ve akımsız nikel kaplamalar izliyor.

Borlanmış durumda en iyi abrazif aşınma direnci AISI 4140 kalite çelikte, bunu AISI 1040, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelikler izlemektedir.

7.3 İleri-Geri Aşınma Deneyi

İleri-geri aşınma deneylerinde kullanılan tüm deney numuneleri birbirleriyle karşılaştırıldığında AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklere göre aşınma izi alanlarının daha küçük olduğu belirlenmiştir.

Yüzey işlemleri bakımından karşılaştırıldığında, akımsız nikel kaplamaların diğer yüzey işlemlerine alumina top üzerinde daha küçük aşınma izi bıraktığı fakat nitrokarbürleşmiş deney numunelerinde ise, bu durumun tam tersine işlediği görülmüştür (Şekil 7.42).

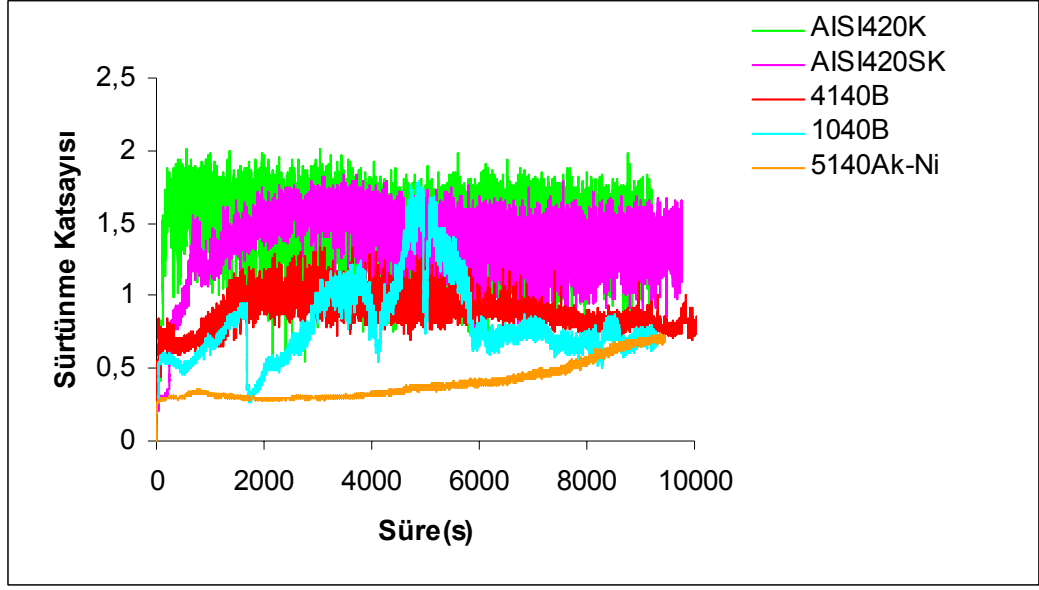


Şekil 7.42: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin ileri-geri aşınma deneyinde yüzeyinde oluşan aşınma iz alanları (mm²) grafiği.

Yapılan hesaplamalar sonucunda belirlediğimiz sürtünme katsayı değerleri içinde en yüksek sürtünme katsayısına sahip olan AISI 420 kalite çelik kaplamasız deney numunesinin en çok aşınan deney numunesi olduğu tespit edilmiştir.

İleri-geri aşınma deneylerinde en düşük sürtünme katsayısına sahip olan deney numunesinin AISI 5140 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.43).

Yapılan aşınma deneylerinde aşınma izi küçük olan AISI 4140 ve AISI 1040 kalite çelik deney numunelerinin, mevcut kullanılan AISI 420 kalite çelik deney numunesine göre sürtünme katsayısının daha düşük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.43: Farklı yüzey işlemleri görmüş çelik malzemeler içinde öne çıkan numenelerin sürtünme katsayısı grafiği.

8. GENEL SONUÇLAR

Yüzey işlemleriyle malzemenin sertlik, süneklik ve yorulma gibi mekanik özellikleri yanında, sürtünme, aşınma, oksidasyon ve korozyona karşı dayanıklılık özellikleri de geliştirilmektedir. Sürtünerek çalışan makina elemanlarında belirli bir süre sonra ortaya çıkan aşınma problemlerini azaltmak için birçok yüzey iyileştirme teknikleri uygulanmaktadır. Yaşanan malzeme ve ürün kayıplarını, cam şekillendirme makinalarında minimuma indirmek ve söz konusu bu nedenlerden kaynaklanan duruş ve üretim kayıplarını azaltmak amacı ile gerçekleştirilen bu çalışmada; kalıp kolu mevcut malzemesine (AISI 420) alternatif olan malzeme ve kaplama türleri denenmiştir.

Dört farklı taban malzemesinin dört farklı yüzey kaplama işlemi görmüş ve kaplanmamış durumlarındaki yirmi farklı deney numunesi üzerinde aşınmalara karşı dayanımlarını simule etmek amacı ile metal-metal, metal-abrazif ve ileri-geri aşınma deneyleri yapılmış ve gerçekleştirilen aşınma deneylerinden elde edilen genel sonuçlar aşağıya çıkarılmıştır.

Herbir deney numunesinin yüzey kaplama işlemi kendi alanlarında uzman firmalara yaptırılmış ve kaplama kalınlıkları her bir deney numunesi için aynı kalınlıkta olamamıştır. Bu nedenle aşınma sonuçlarının irdelenmesi tüm deney numuneleri için aşınmanın kaplama içerisinde kaldığının belirlendiği metal-metal aşınma deneylerinde 2.000 m, metal-abrazif aşınma deneylerinde 5,5 m kayma mesafesindeki ağırlık kayıpları incelenerek yapılmıştır.

Bulunan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 1.Yüzey işlemi görmüş tüm numuneler, yüzey işlemi görmemiş deney numunelerine göre daha yüksek sertlik değerlerine ulaşmış ve daha az aşınmışlardır.
- 2.Deneysel amaçla seçilen çelik kalıp kolu malzemelerinin kaplama öncesi 170-210 HV arasında olan yüzey sertlikleri; “Akımsız Nikel Kaplama, Nitrokarbürleme ve Sert Krom Kaplama” işlemleri sonrasında

ortalama 800 HV değerine ulaşmıştır. Buna karşılık ‘‘Borlama’’ işlemi sonrası elik türüne bağlı olarak 1110- 1495 HV sertlik değerleri elde edilmiştir.

3. Gerek metal-metal, gerekse metal-abrasif aşınma deneylerinde genel olarak ağırlık kayıpları incelendiğinde, borlanmış deney numunelerinin en az ağırlık kaybına uğrayan deney numuneleri oldukları ortaya çıkmış ve dolayısıyla çalışmada ne çıkan yüzey kaplama türü ‘‘borlama’’ olmuştur.
4. Metal-metal aşınma deneylerinde 2.000 m kayma mesafesinde en az ağırlık kaybeden deney numunesi AISI 4140 borlanmış deney numunesi olmuştur. Bu numunenin yapısal bir özelliği, en kalın kaplama kalınlığına ve çok yüksek yüzey sertliğine sahip olmasıdır.
5. Taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) yapılan incelemelerde AISI 1040 ve AISI 4140 deney numunelerinde borlanmış yüzeylerin kolonsal ve dişli bir kaplama yapısının olduğu grlmştir.
6. Metal-metal ve metal-abrazif aşınma deneylerinde, sert krom kaplamaların borlamadan sonra en iyi aşınma direncinin elde edildiği yüzey kaplama türü olduğu tespit edilmiştir.
7. Metal-metal ve metal-abrazif aşınma deneylerinde aşınmaya karşı en dirençli deney numuneleri borlanmış AISI 4140 kalite elik olarak tespit edilmiştir. Metal-metal aşınma deneylerinde 2.000 m ve metal-abrasif aşınma deneylerinde 5,5 m kayma mesafelerinde borlanmış AISI 4140’ın aşınmada ağırlık kaybı referans alınarak diğer deney numunelerinin rölatif aşınma oranı (RAO) değerleri kıyaslandığında, borlanmış AISI 4140 deney numunesinin, mevcut durumda kullanılan sert krom kaplı AISI 420 deney numunesine göre sırasıyla 18,67 ve 2,16 kat daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir.
8. İleri-geri aşınma deneylerinde kullanılan tüm deney numuneleri birbirleriyle karşılaştırıldığında yapılan aşınma izi alanı hesaplamalarında AISI 1040 ve AISI 4140 deney numunelerinin ön plana çıktığı grlmştir.

9. İleri-geri aşınma deneylerinde kullanılan tüm deney numuneleri birbirleriyle yapılan yüzey işlemleri bakımından karşılaştırıldığında, akımsız nikel kaplamaların diğer yüzey işlemlerine göre daha çok aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Nitrokarbürleşmiş deney numunelerinde ise, bu durumun tam tersine işlediği görülmüştür.
10. İleri-geri aşınma deneylerinde en yüksek sürtünme katsayısına sahip olan AISI 420 kalite çelik kaplamasız deney numunesinin en çok aşınan deney numunesi olduğu tespit edilmiştir.
11. İleri-geri aşınma deneylerinde en düşük sürtünme katsayısına sahip olan deney numunesinin AISI 5140 kalite çelik olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Eyre, T.S.**, 1978, Wear Characteristic of Metals, in SourceBook on Wear. Control Technology, s.1-11
- [2] **Celis, J. P.**, 1995. A systems approach to the tribological testing of coated materials, *Surface and Coatings Technology*, 74/ 75, s.15- 22.
- [3] **Quinn, T. J. F.**, 1991. Physical analysis for tribology, Cambridge University Press, s.1- 9.
- [4] **Küçükerman, Ö.**, 1985. Cam Sanatı, Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş., İstanbul.
- [5] **Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı.**, 2001, Taşa ve toprağa dayalı ürünler sanayi özel ihtisas komisyonu raporu, Ankara
- [6] **Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı.**, 2006, Taşa ve toprağa dayalı ürünler sanayi özel ihtisas komisyonu raporu, Ankara
- [7] **Tooley, F.V.**, 1974, The Handbook of Glass Manufacture, Books for Industry, Inc. Volume I.
- [8] **Stoic A., Kopac A., Cukor G.**, 2005, Testing of machinability of mould steel 40CrMnMo₇ using genetic algorithm. *J. Mater. Process Tech.*, s.164.
- [9] **Hutchings, I. M.**, 1992. Tribology: Friction and Engineering Materials, Edward Arnold, London.
- [10] **Van Stappen, M., Stals, L.M., Kerkhofs, M., Quaezhagens, C.**, 1995, State of the Art for Industrial Use of Ceramic PVD Coatings, *Surface and Coating Technology*, 74-75, s.629-633.
- [11] **ASM Handbook**, 1995, Friction, Lubrication and Wear Technology, 2ndPrinting, Vol.18, ASM International, Materials Park, USA.
- [12] **ASM Materials Engineering Dictionary**, 1992, J.R.Davis (Ed.), ASM International, Materials Park, Ohio 44073, USA, s.497-522
- [13] **ASM Handbook**, 1985, Mechanical Testing, Vol.8, ASM International, USA, s.601-608.

- [14] **Karamış, M. B.**, 1985. Toprak İşleme Aletlerinde İş Organının Aşınmasının Etüdü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi F.B.E., Kayseri.
- [15] **ASTM G 40-88**, 1989, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, Vol.03.02, ASTM, Philedelphia, USA.
- [16] **Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M.**, 1993. Bakım ve Tamir İşlerinde Kaynak ve Metal Püskürtme, Metal ve Kaynak, 49, s.21- 25.
- [17] **Sarı, N. Y.**, 1999. Klasik ve Modern Yüzey İşlemler Uygulanmış Ç 1050 Çeliğinin Abrazif + Eroziyon Davranışının İncelenmesi, Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] **Ulusoy, E.**, Toprak İşleme Aletlerinde İş Organlarının Aşınması Üzerinde Araştırmalar, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, İzmir.
- [19] **Holmberg, K., Matthews, A.**, 1994. Coatings Tribology- Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering, Elsevier, Vol. 28, s.3- 13, 33- 121, 125, 257- 307.
- [20] **Bunshah, R.F.**, 1980. High Rate PVD Processes, AGARD Lecture Series No 106, Materials Coating Tecniques, Harford House, London.
- [21] **Ashby, M.F., Jones, D.R.H.**, 1980, Engineering Materials, An Introduction to Their Properties and Applications, Pergamon Press Ltd., England.
- [22] **The Oxford English Dictionary**, 1989, 2nd Ed., J.A.SIMPSON, E.S.C. WEINER (Prep.) Vol VI, Oxford, GB.
- [23] **Budinski K.G.**, 1991, Friction in Machine Design, in Tribological Modelling of Mechanical Designers, ASTM STP 1105, K.C.LUDEMA, R.G.BAYER (Eds.), ASTM, Philadelphia, USA, s.89-126.
- [24] **Ulukan, L.**, 1993 “Makina Elemanları III”, Ders Notu, İstanbul.
- [25] **Moore, D.F.** , 1975, “Principles and Applications of Tribology”, Pergamon Press., Oxford.
- [26] **Bowden, F.P. ve Tabor, D.**,1950 “The Friction and Lubrication of Solids”, At the Clarendon Press, Oxford.
- [27] **Oğuz, B.**, 1993. Aşınma Sorunları ve Dolgu Kaynakları, Oerlikon Kaynak Elektrodları ve San. A.Ş., İstanbul.

- [28] **Bayer, G.**, 1994. Mechanical Wear Prediction and Prevention, Marcel Dekker Inc., NY- USA.
- [29] **Özdaş, N.**, 1958. Sürtünme ve Aşınma Teorileri, İ.T.Ü. Mustafa İnan Kütüphanesi, s.388.
- [30] **Akkurt, M.**, Makine Elemanları Cilt II, İ.T.Ü. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, sayı 134.
- [31] **Akman, H.**, 2001. Endüstride Karşılaşılan Aşınma Problemlerinin İncelenmesi ve Tamir- Bakım Kaynak Yöntemleri Uygulanarak Kullanım Ömürlerinin Uzatılması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] **Kayalı, E. S.**, 1993. Sürtünme ve Aşınma, Workshop on Antiwear Coatings, Tübitak.
- [33] **Metals Handbook**, 1975. Failure Analysis and Prevention, 9th Edition, ASM, Metals Park, Vol 10.
- [34] **Wulpi, D. J.**, 1985. Understanding How Components Fail, ASM, Metals Park, s.163- 204.
- [35] **Ramesch, C. S., Seshardri, S. K., Iyer, K. J. L.**, 1989. A Survey of Aspects of Wear of Metals, *Indian of Technology*, 29 (4), s.179- 185, Indian.
- [36] **Wilson, A. W., Nicholson, J. N.**, 1989. Surface Coatings 2, Elsevier Applied Science,
- [37] **Stachowiak. G.W. ve Batchelor. A. W.**, 2001. Engineering Tribology, Butterworth Heinemann., United States of America.
- [38] **Rabinowicz, E.**, 1995. Friction and Wear of Materials, 2nd Edition, John Willey & Sons Inc., s.74.
- [39] **Swith, A. J.**, 1988, Modern surface analysis materials science, Metals and Materials.
- [40] **Bhushan, B., Gupta, B. K.**, 1991. Handbook of Tribology- Materials, Coatings and Surface Treatments, McGraw- Hill, Inc, 6.1- 6.29.
- [41] **Akkaş, O.**, 1998Tin Kaplama Parametrelerinin Aşınma Davranışı Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [42] **Siniawski Matthew T., Harris Stephen J., Wang Qian**, 2007, A universal wear law for abrasion, *Wear*, s.883-888.
- [43] **Akçakaya, R.**, 2002 Cam üzerine araştırmalar, *Teknik bülten*, Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş., İstanbul.
- [44] **ASTM–C162–04**, 2004. Standard Terminology of Glass and Glass Products, American Society for. Testing and Materials, United States.
- [45] **Robertson, G. L.**, 1993. Food Packaging: Principles and Practice, Marcel Dekker Inc., New York.
- [46] **Kuşculuoğlu, S., Yücesoy, D. ve Engin. S.**, 1993. Cam Teknolojisine Giriş I. Cilt, Eğitim Müdürlüğü Türkiye Şişe ve Cam A.Ş., İstanbul.
- [47] **Kuşculuoğlu, S., Yücesoy, D. ve Engin. S.**, 1993. Cam Teknolojisine Giriş II. Cilt, Eğitim Müdürlüğü Türkiye Şişe ve Cam A.Ş., İstanbul.
- [48] **Arısoy, C. F.**, 2006. Borlama ve nitrokarbürleme yüzey işlemlerinin cam ambalaj üretiminde kullanılan dökme demir kalıpların performansına etkileri, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [49] **Soykut, A. Y., Say, K. ve Sesigür, H.** 2004 Cam ev eşyası sektöründe metal kaplama yöntemleri üzerine araştırmalar, *Teknik bülten*, Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş., İstanbul.
- [50] **Manns. P., Döll. W. ve Kleer. G.**, 1995. Glass in contact with mould materials for cantainer production. *Glass Science and Technology* Glastechnische Berichte, 68, s.389-399.
- [51] **Yağcı. E. ve Irmak. K.**, 1999. Şişe kalıplarında ön kaplama uygulaması, 14. Cam Problemleri Sempozyumu, İstanbul, 30 Eylül 1999, s.167-176.
- [52] **Karagöz. Ş ve Alanyalı. H.**, 1998. İyon-ark katmanlama yöntemiyle kaplanmış şişe kalıplarında ergiyik cam-kalıp arayüzey ilişkisi. IV. Seramik Kongresi, İstanbul, Eylül 1998, s.713-719.
- [53] **Karagöz. S ve Alanyalı. H.**, 1999. Wear studies of coating deposited by thermal spraying and ion-arc plating on glass moulds. *Praktische Metallographie*, 36, s.297-310.

- [54] **Zhong. D, Mateeva. E., Dahan. I., Moore. J. J., Mustoe. G. G. W., ve Thiel. S.**, 2000. Wettability of NiAl, Ni-Al-N, Ti-B-C, and Ti-B-C-N films by glass at high temperatures. *Surface and Coatings Technology*.
- [55] **Kulikov. A. I.**, 2000. Phosphate carburizing of glass molds and glass-shaping machines. *Glass and Ceramics Equipment*, 57, s.361-362.
- [56] **Erinç. N.**, 1986. Cam kalıp malzemeleri (dökme demirler), Araştırma Müdürlüğü Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş.
- [57] **Ensor. T. F.**, 1990. Mould Materials, *Glass Technology*, s.31, 85-88.
- [58] **Ensor. T. F.**, 1978. Mould Materials, *Glass Technology*, s.19, 113-119.
- [59] **Strafford, K. N., Smart, R., C, Sare, I, Subramain, C.**, 1995. Surface Engineering, Technomic Publishing Company, U.S.A.
- [60] **Sarıca. B.**, 2005. Farklı kalite çeliklere uygulanan yüzey kaplama işlemlerinin aşınma davranışlarına etkileri, Y. Lisans Eğitimi Bitirme Tezi, İ.T.Ü., Kimya- Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- [61] **Yapar. U., Başman. G., Arısoy. C. F. ve Şeşen. M. K.**, 2002. Çeliklerde borlama yoluyla yüzey sertleştirme. *Metal Dünyası*, s.115, 69-74.
- [62] **Topbaş. M. A.**, 1998. Çelik ve ısıtma işlem el kitabı. Prestij Yayıncılık, İstanbul
- [63] **ASM International Handbook Committee.**, 1990., Heat treating, ASM Handbook formerly 4. edition, Metals Handbook., ASM International,
- [64] **Kurman, A.**, 1997. Metallerde Uygulanan Yüzey İşlemleri, Lisans Eğitimi Bitirme Tezi, İ.T.Ü., Kimya- Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- [65] **Nasuf, G. İ.**, 2002. Sert krom kaplamanın geleceği, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [66] **Özbek, Ü.**, 1988. Akımsız Nikel Kaplamalar, Lisans Eğitimi Bitirme Tezi, İ.T.Ü., Kimya- Metalurji Fakültesi, İstanbul
- [67] **Edwards. J.**, 1997. Coating and surface treatment systems for metals a comprehensive guide to selection, ASM International, Finishing Publications, United States of America.
- [68] **Şen, U.**, 1997. Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [69] **Carbucicchio, M., Badini, C. ve Samboga, G.,** 1980. On the early stages of high purity iron boriding with crystalline boron powder, *J. Materials Science*, 15, s.1483-1490.
- [70] **Campos I., Oseguera J., Figueuroa U., Garcia J.A., Bautista O., Kelemenis G.,** 2003, *Mater Sci. Eng. A.*, s.352, 261-266.
- [71] **Genel K., Özbek I., Kurt A., Bindal C.,** 2002, *Surface Coating Technoogy*, 160, s.38-43.
- [72] **Genel K., Özbek I., Bindal C.,** 2003, *Mater Sci. Eng. A.*, s.347.
- [73] **Brakmann C.M., Gommers A.W.J., Mittemeijer E.J.,** 1989, *Mater Res.*, s.354.
- [74] **Şen S., Şen U., Bindal C.,** 2004, An approach to kinetic study of boronized steels. *Surface Coating Technology*.
- [75] **Özbek I., Bindal C.,** 2002, *Surface Coating Technology*, s.154.
- [76] **Şen S., Özbek I., Şen U., Bindal C.,** 2001, *Surface Coating Technology*, s.135.
- [77] **Şen S., Şen U., Bindal C.,** 2002, 11th international metal&material congress, s.1158.
- [78] **Pelleg J., Judelewicz M.,** 1992, *Thin Solid Films*, s.215.
- [79] **Şen Saduman, Şen Uğur, Bindal Cuma,** 2005, The growth kinetics of borides formed on boronized AISI 4140 stee, *Vacuum*77, s.195-202.
- [80] **Martini C., Palombarini G., Poli G., Prandstraller D.,** 2004, Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings, s.608.
- [81] **Okamoto. H.,** 2004. B-Fe (Boron Iron), *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 25, s.297-298.
- [82] **Xu, C.H., Gao, W. veYang, Y.L.,** 2001. Superplastic boronizing of a low alloy steel-microstructural aspects, *J. Materials Processing Technology*, 108, s.349-355.
- [83] **Matuschka, A. G.,** 1980. Boronizing, Carl Hanser Verlag, München Wien., Heyden & Son Inc. Philedelphia.

- [84] **Yu. L.G., Chen. X. J., Khor. K.A. ve Sundararajan. G., 2005.** FeB/Fe₂B phase transformation during pack-boriding: boride layer growth kinetics, *Acta Materialia*, 53, s.2361-2368.
- [85] **Yapar, U., 2003.** Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [86] **Jain V., Sundararajan G., 2002,** Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel. *Surface Coating Technology*, s.149.
- [87] **Kulka M., Pertek A., 2003,** The importance of carbon content beneath iron borides after boronizing of chromium and nickel-based low-carbon steel, *Appl.Surf.Sci.*214, s.161.
- [88] **Yan P.X., Wei Z.Q., Wen X.L., Wu Z.G., Xu J.W., Liu W.M., Tian J., 2002,** Post boronizing ion implantation of C45 steel, *Appl.Surf.Sci.* 195, s.74.
- [89] **Maragoudakis N.E., Stergioudis G., Omar H., Pavlidou E., Tsipas D.N., 2002,** Boro-nitriding of steel US 37-1, *Mater.Lett.*57, s.949.
- [90] **Sinha, A. K., 1991.** Boriding (Boronizing), *ASM Handbook*, pp. 437- 447, Vol. 4, J. Heat Treating.
- [91] **Soydan, Y., 1996.** Katı ortamda bor yayılımı ile sertleştirilen çelik yüzeylerinin kuru kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [92] **Şen S., Şen U., Bindal C., 2005,** An approach to kinetic study of borided steels. *Surface Coating Technology*, s.191.
- [93] **Novakova A.A., Sizov I.G., Golubok D.S., Kiseleva T.Yu., Revokatov P.O., 2004,** Electron-beam boriding of low-carbon steel, s.383.
- [94] **Uslu I., Cömert H., İpek M., Çelebi F.G., Özdemir O., Bindal C., 2006,** A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels, *Materials and Design*.

- [95] **Khoe, M.**, 1992. Ergimiş boraks banyosunda çeliklere vanadyum karbür kaplama, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [96] **Bindal, C.**, 1991. Az alaşımlı çelikler ve ticari karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borür tipi seramik kompozitlerin bazı özelliklerinin tespiti, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [97] **Bozkurt, N.**, 1984. Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [98] **Seong, H. H., John, S. C.**, 1980. A study on electroboronizing of steel by superimposed cyclic current, *J. Materials Science*, 15, s.1379- 1386.
- [99] **Graf, A., Matuschka, W.**, 1997. Borieren, Carl Hanser Verlag, München, Wien, s.1- 87.
- [100] **Samsanov, G. V., Epik, A. P.**, 1966. Coatings of high temperature materials, Ed. Hausner, H. H. Plenum Press, s. 35.
- [101] **Hegevaldt, F., Singheiser, L., Türk, M.**, 1992. Ergimiş boraks banyosunda çeliklere vanadyum karbür kaplama, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [102] **Yoon, J.H., Jee, Y.K., Lee, S.Y.**, 1999. Plasma Paste Boronizing Treatment of The Stainless Steel AISI 304, *Surface and Coating Technology*, 112, s.71-75.
- [103] **Nam, K.S., Lee, K.H., Lee, S.R., Kwon, S.C.**, 1999. A Study on Plasma-assisted Boriding of Steels, *Surface and Coating Technology*, 98, s. 886-890.
- [104] **Küper, A., Qiao, X., Stock, H.R., Mayr, P.**, 2000. A Novel Approach to Gas Boronizing, *Surface and Coating Technology*, 130, s.87-94.
- [105] **Qiao, X., Stock, H.-R., Kueper, A., Jarms, C.**, 2000. Effect of B(CH₃O)₃ Content on A PACVD Plasma-boriding Process, *Surface and Coating Technology*, 131, s.291-293.
- [106] **Hunger, H.J., Löbig, G.**, 1997. Generation of Boride Layers on Steel and Nickel Alloys by Plasma Activation of Boron Trifluoride, *Thin Solid Films*, 310, s.244- 250.

- [107] **Özsoy, A.**, 1991. Çeliğin Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriks Özelliklerinin İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [108] **Özbek I., Bindal C.**, 2002, Mechanical properties of boronized AISI W4 steel. *Surface Coating Technology*, s.154.
- [109] **Şen U., Şen S.**, 2003, The fracture toughness of borides formed on boronized cold work tool steels. *Mater Character*, s.50.
- [110] **Şen S., Şen U., Bindal C.**, 2001, Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel. *Surface Coating Technology*, s.135.
- [111] **Geouriot, P., Thevenot, F., Driver, J.H., Magnin, T.**, 1983. Methods For Examining Brittle Layers Obtained by a Boriding Surface Treatment.
- [112] **Hunger, H.J. ve True G.**, 1994. Boronizing to produce Wear-resistant Surface Layers, *Heat treatment of Metals*, 2, 31-39,
- [113] **Şen U., Şen S., Yılmaz F.**, 2004, Structural characterization of boride layer on boronized ductile irons, *Surface and Coatings Technology* 176,
- [114] **Subrahmanyam, J. ve Gopinath, K.**, Wear Studies on Boronized Mild Steel, *Wear*, Vol.95, 293-311, 1984.
- [115] **Uetz, H. ve Wlassow, W.**, Kinetik und Mechanismen des Verschleisses von Boridschichten by trockener Gleitreibung, *Wear*, 64, 231-243, 1980.
- [116] **Sullivan, J.C.L., Quinn, T.F.J. ve Rowson, D.M.**, Developments in The Oxidational Theory of Mild Wea, *Tribology Int.*, 13, 153-158, 1980.
- [117] **Takeuchi, E., Fuji, K. ve Katagiri, T.** Sliding Wear Characteristics of Gas Boronized Steel, *Wear*, 55, 121-130, 1979.
- [118] **Liliental, W. ve Tacikowski, J.**, Effect of Heat Treatment on The Brittleness of Boride Layers on Steel, *Industrial Heating*, 47, 4, 34-36, 1980.
- [119] **Fichtl, W.**, Über Neue Erkenntnisse auf dem Gebielt Oberflächen Borierens, *HTM*, 29, 2, 113-119, 1974.
- [120] **Çelik, Ö.**, 2001. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ek A. DENEY NUMUNELERİ KİMYASAL BİLEŞİM ve MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Tablo A.1: AISI 1040 Deney Numunesi Kimyasal Bileşim ve Mekanik Özellikleri

Kategori	Karbon Çeliği	
Kompozisyon	Element	Ağırlık (%)
	C	0,37- 0,44
	Mn	0,60- 0,90
	P	0,04 (max)
	Si	0,05 (max)
Mekanik Özellikler (25°C)	Yoğunluk (x1000 kg/m ³)	7,845
	Poisson oranı	0,27- 0,30
	Elastik Modülü (GPa)	190- 210
	Çekme Dayanımı (MPa)	518,8
	Akma Dayanımı (MPa)	353,4
	Uzama (%)	30,2
	Alan Azalması (%)	57,2
	Sertlik (HB)	149
Darbe Direnci-Izod (J)	44,3	

Tablo A.2: AISI 4140 Deney Numunesi Bileşim ve Mekanik Özellikleri

Kategori	Alaşımli Çelik	
Genel Tanımı	Krom- molibden Çeliği	
Kompozisyon	Element	Ağırlık (%)
	C	0,38- 0,43
	Mn	0,75- 1,00
	P	0,035 (max)
	S	0,04 (max)
	Si	0,15- 0,30
	Cr	0,80- 1,10
	Mo	0,15- 0,25
Mekanik Özellikler (25°C)	Yoğunluk (x1000 kg/m ³)	7,7- 8,03
	Poisson oranı	0,27- 0,30
	Elastik Modülü (GPa)	190- 210
	Çekme Dayanımı (MPa)	655
	Akama Dayanımı (MPa)	417,1
	Uzama (%)	25,7
	Alan Azalması (%)	56,9
	Sertlik (HB)	197
Darbe Direnci- Izod (J)	54,5	

Tablo A.3: AISI 5140 Deney Numunesi Mekanik Özellikleri

Kategori	Alaşımli Çelik	
Genel Tanımı	Krom Çeliği	
Kompozisyon	Element	Ağırlık (%)
	C	0,38- 0,43
	Mn	0,70- 0,90
	P	0,035 (max)
	S	0,04 (max)
	Si	0,15- 0,30
	Cr	0,70- 0,90
Mekanik Özellikler (25°C)	Yoğunluk (x1000 kg/m ³)	7,7- 8,03
	Poisson oranı	0,27- 0,30
	Elastik Modülü (GPa)	190- 210
	Çekme Dayanımı (MPa)	572,3
	Akma Dayanımı (MPa)	293,0
	Uzama (%)	28,6
	Alan Azalması (%)	57,3
	Sertlik (HB)	167
	Darbe Direnci_ Izod (J)	40,7

Tablo A.4: AISI 420 Deney Numunesi Mekanik Özellikleri

Kategori	Paslanmaz Çelik	
Genel Tanımı	Martenzitik Krom Çeliği	
Kompozisyon	Element	Ağırlık (%)
	C	0,15 (min)
	Mn	1,00 (max)
	P	0,04
	S	0,03
	Si	1,00 (max)
	Cr	12,0- 14,0
Mekanik Özellikler (25°C)	Yoğunluk (x1000 kg/m ³)	7,8
	Poisson oranı	0,27- 0,30
	Elastik Modülü (GPa)	200
	Çekme Dayanımı (MPa)	860
	Sertlik (HB)	149

Tablo A.5: AISI 1040 Deney Numunesinin Kimyasal Analiz Sonuçları

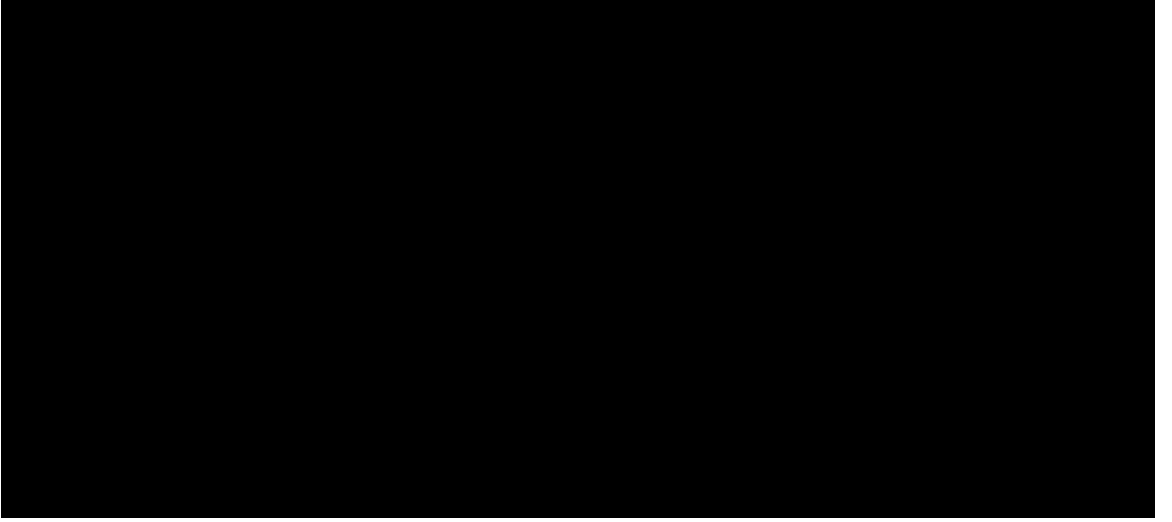
MALZEME	AISI 1040	AISI 4140	AISI 5140	AISI 420
ELEMENT	%	%	%	%
Karbon (C)	0,43800	0,41800	0,40600	0,20700
Fosfor (P)	0,01240	0,01010	0,01010	0,01240
Molibden (Mo)	0,01550	0,18000	0,00848	0,07030
Kobalt (Co)	0,00509	0,00657	0,01880	0,02850
Titanyum (Ti)	0,00100	0,00188	0,00133	0,00100
Silisyum (Si)	0,22300	0,26100	0,27700	0,31200
Kükürt (S)	0,02600	0,01920	0,02600	0,01630
Nikel (Ni)	0,04970	0,06200	0,08630	0,11700
Bakır (Cu)	0,03330	0,04580	0,02600	0,16200
Vanadyum (V)	0,00100	0,00137	0,00221	0,02720
Mangan (Mn)	0,81300	0,85500	0,64100	0,40000
Krom (Cr)	0,12000	1,00000	0,91600	13,15000
Alüminyum (Al)	0,02380	0,02520	0,01340	0,00200
Niobyum (Nb)	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200
Tungsten (W)	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500
Kurşun (Pb)	0,00200	0,00200	0,00200	-
Kalay (Sn)	0,00300	0,00300	0,00300	-
Antimon (Sb)	0,00200	0,00200	0,00200	
Demir (Fe)	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan

Ek B. DENEY NUMUNELERİ KAPLAMA KALINLIKLARI**Tablo B.1:** Farklı yüzey işlemleri görmüş disk üstünde pim aşınma deneyi numuneleri kaplama kalınlıkları (μ)

MALZEME	KAPLAMA	KAPLAMA KALINLIĞI (μ m)		
		MİN	MAX	ORT
1040	Kaplamasız			
1040	Akımsız Nikel	9,72	17,62	14,36
1040	Sert Krom	9,32	14,33	11,22
1040	Nitrokarbürleme	11,30	25,34	18,83
1040	Borlama	6,43	36,33	21,33
4140	Kaplamasız			
4140	Akımsız Nikel	8,32	16,65	14,18
4140	Sert Krom	11,87	14,32	13,06
4140	Nitrokarbürleme	14,92	23,43	18,56
4140	Borlama	7,63	39,89	25,02
5140	Kaplamasız			
5140	Akımsız Nikel	10,21	16,43	13,28
5140	Sert Krom	12,65	29,87	20,87
5140	Nitrokarbürleme	9,33	16,99	12,79
5140	Borlama	8,22	36,04	24,32
AISI420	Kaplamasız			
AISI420	Akımsız Nikel	7,21	11,78	9,38
AISI420	Sert Krom	5,08	8,98	7,39
AISI420	Nitrokarbürleme	1,33	1,98	1,68
AISI420	Borlama	3,02	0,062	4,67

Ek C. DENEY NUMUNELERİ SERTLİK (HV_{0,2}) VERİLERİ

Tablo C.1: Farklı yüzey işlemleri görmüş numunelerin işlem sonrasında elde edilen yüzey sertliği verileri (HV_{0,2})



Ek. D İNCELENEN KALIP KOLLARINDAN ÖRNEKLER:



Şekil D1: İncelenen Kalıp kolu görüntülerinden örnekler.



Şekil D2: İncelenen Kalıp kolu görüntülerinden örnekler.



Şekil D3-4: İncelenen Kalıp kolu görüntülerinden örnekler.



Şekil D5-6: İncelenen Kalıp kolu görüntülerinden örnekler.



Şekil D7-8: İncelenen Kalıp kolu görüntülerinden örnekler.



Şekil D9-10: İncelenen Kalıp kolu görüntülerinden örnekler.



Şekil D11-12: İncelenen Kalıp kolu görüntülerinden örnekler.



Şekil D13-14: İncelenen Kalıp kolu görüntülerinden örnekler.



Şekil D15-16: İncelenen Kalıp kolu görüntülerinden örnekler.

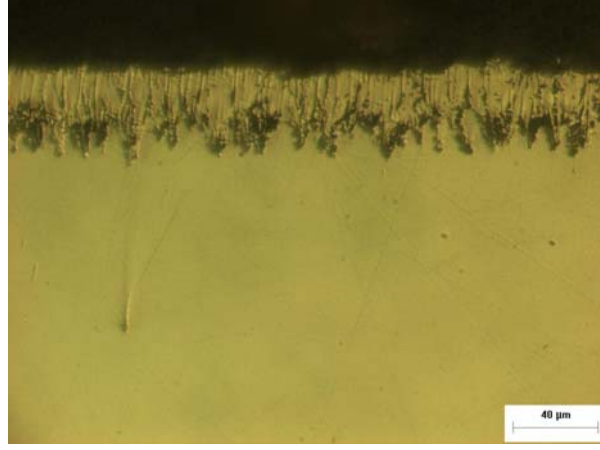


Şekil D17-18: İncelenen Kalıp kolu görüntülerinden örnekler.

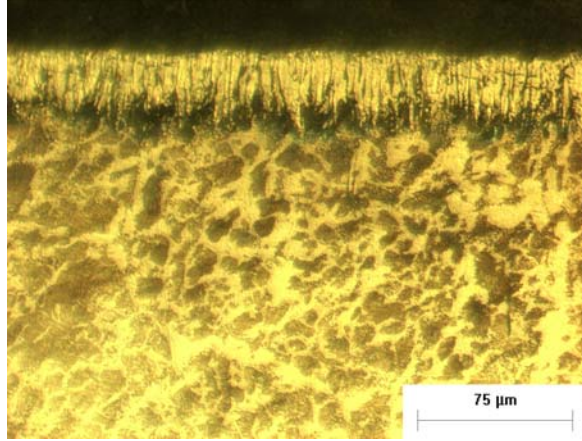


Şekil D19-20: İncelenen Kalıp kolu görüntülerinden örnekler.

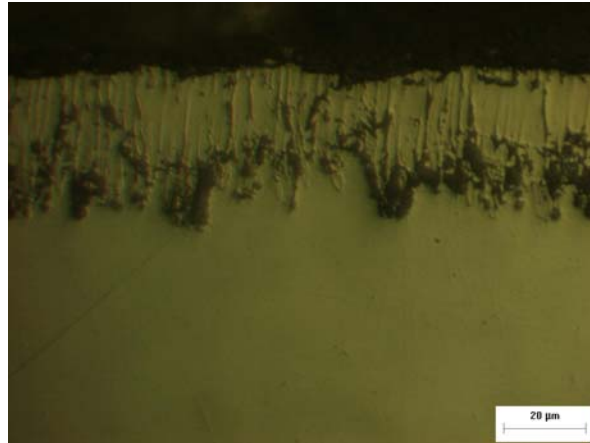
Ek E. DENEY NUMUNE KESİTLERİNİN PARLATILMIŞ VE DAĞLANMIŞ GÖRÜNTÜLERİ



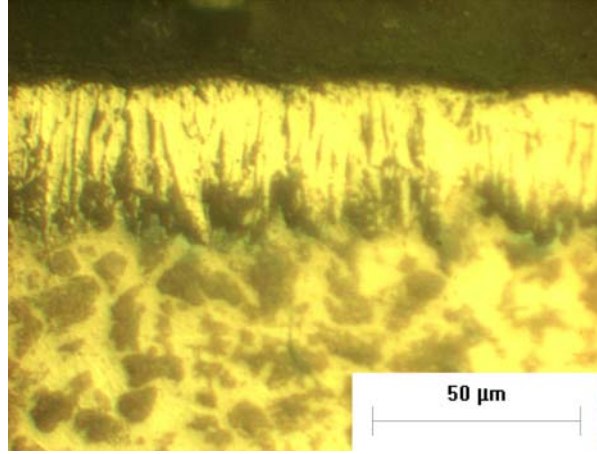
Şekil E.1: AISI 1040 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü - 400x (Ortalama Bor Kaplama Kalınlığı: 21,33 µm).



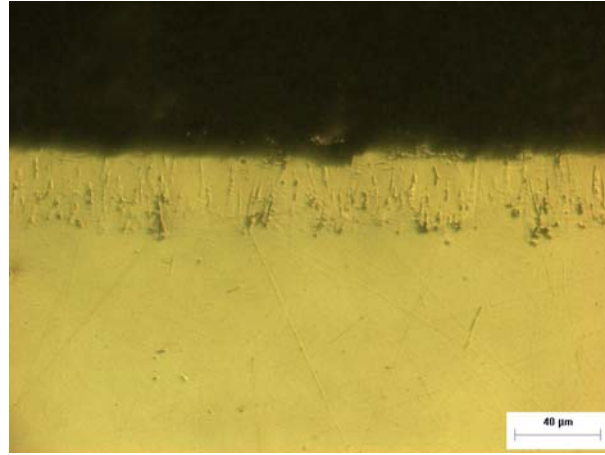
Şekil E.2: AISI 1040 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x.



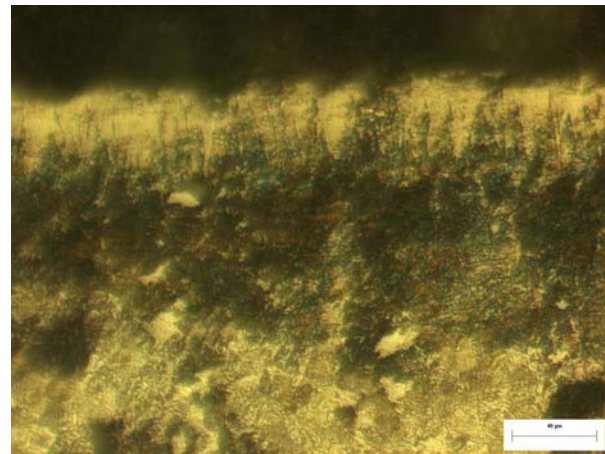
Şekil E.3: AISI 1040 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü - 800x.



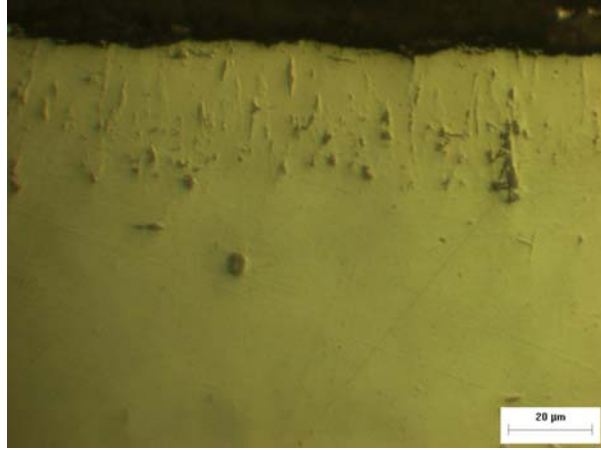
Şekil E.4: AISI 1040 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-800x.



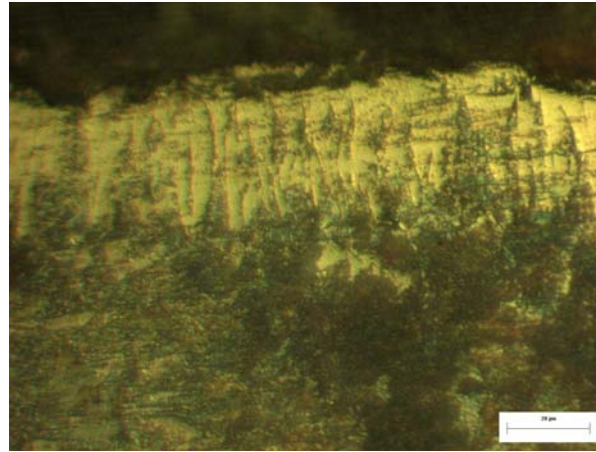
Şekil E.5: AISI 4140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü - 400x (Ortalama Bor Kaplama Kalınlığı: 25.02 μm).



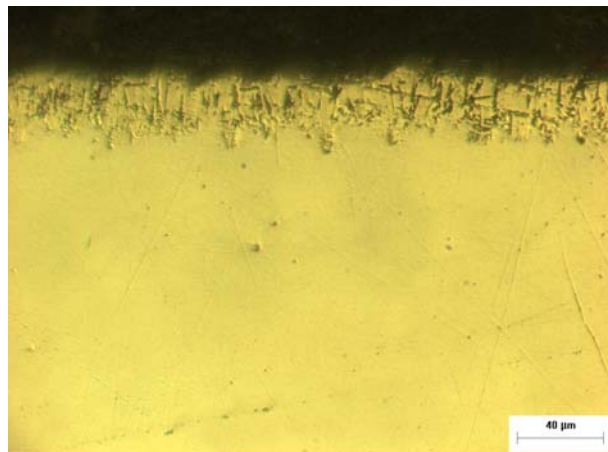
Şekil E.6: AISI 4140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-400x.



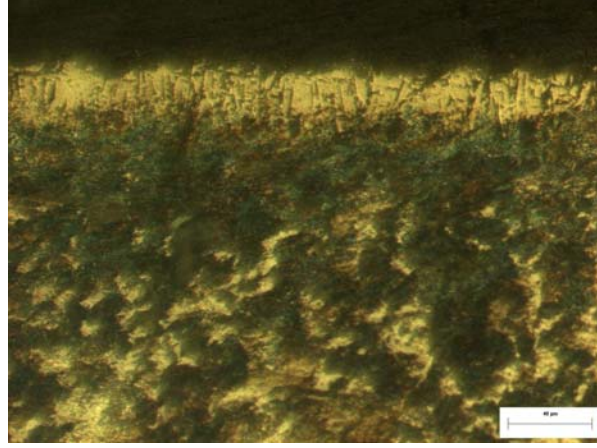
Şekil E.7: AISI 4140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü-800x.



Şekil E.8: AISI 4140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x.



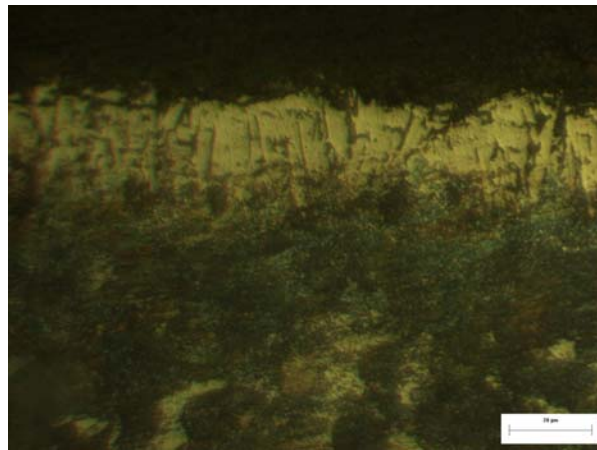
Şekil E.9: AISI 5140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü -400x (Ortalama Bor Kaplama Kalınlığı: 24.32 μm).



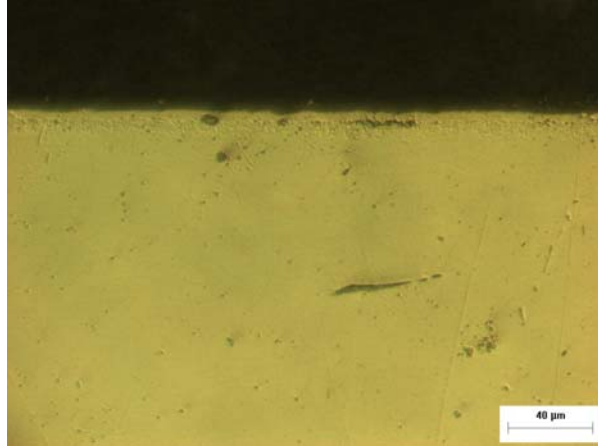
Şekil E.10: AISI 5140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x.



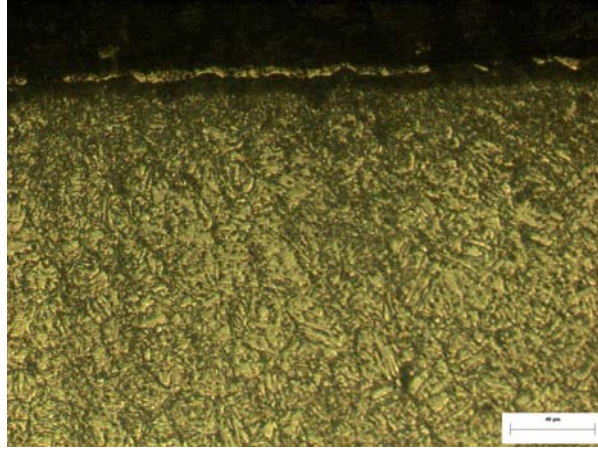
Şekil E.11: AISI 5140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü -800x .



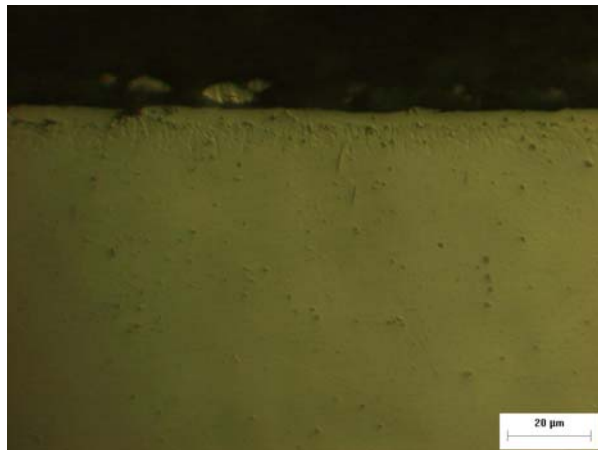
Şekil E.12: AISI 5140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x.



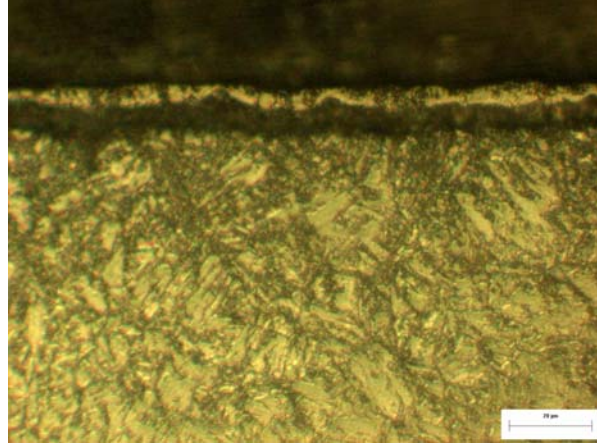
Şekil E.13: AISI 420 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü - 400x (Ortalama Bor Kaplama Kalınlığı: 4.67 µm).



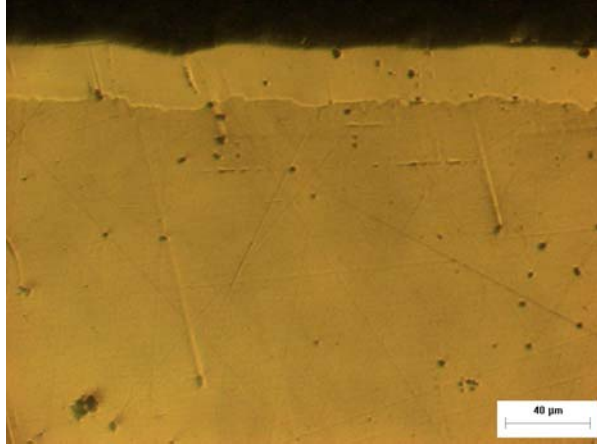
Şekil E.14: AISI 420 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x.



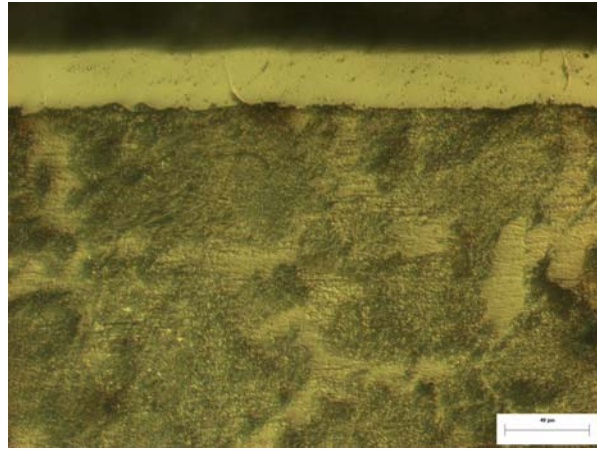
Şekil E.15: AISI 420 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü - 800x.



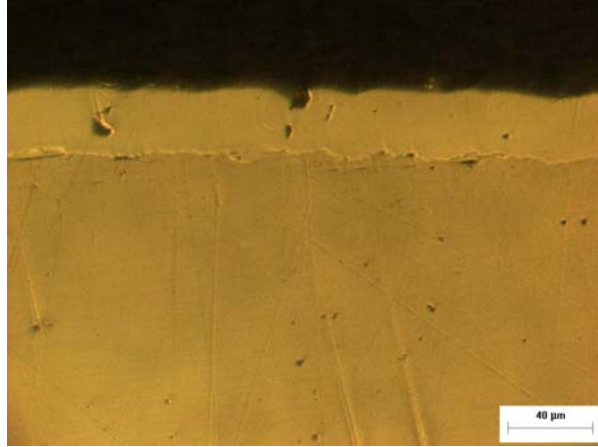
Şekil E.16: AISI 420 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış) - 800x.



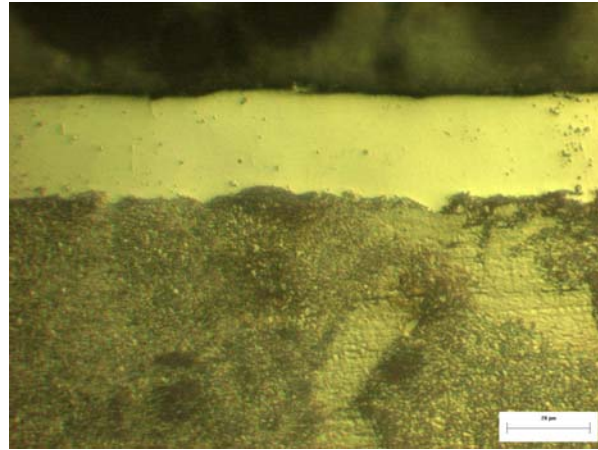
Şekil E.17: 1040 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü -400x (Ortalama Sert Krom Kaplama Kalınlığı: 11.22 µm).



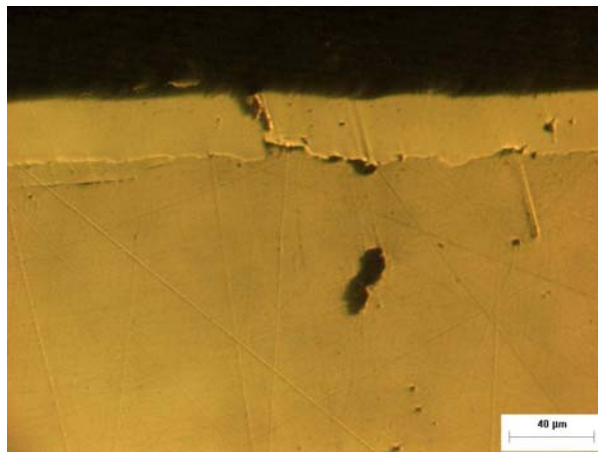
Şekil E.18: AISI1040 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü - 400x.



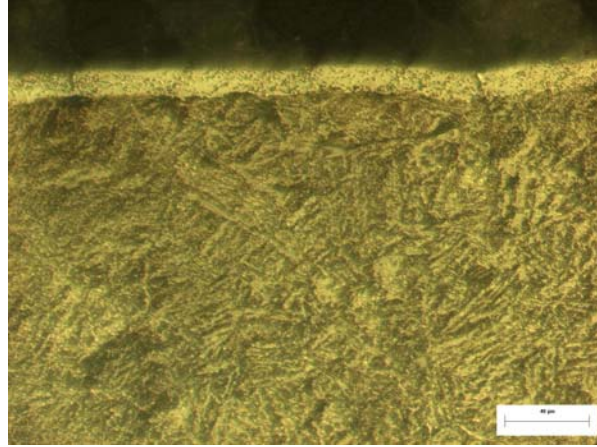
Şekil E.19: AISI 1040 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü - 400x.



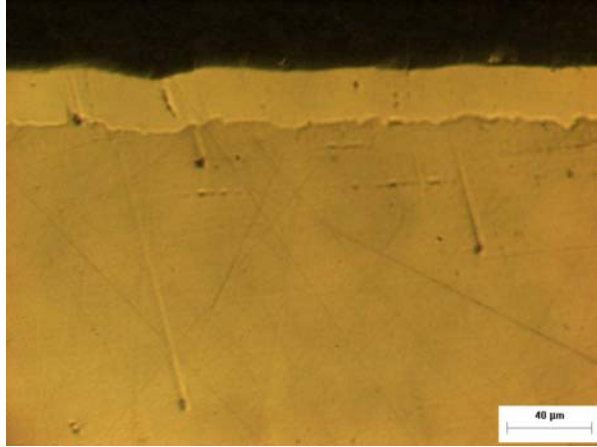
Şekil E.20: AISI 1040 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü - 800x.



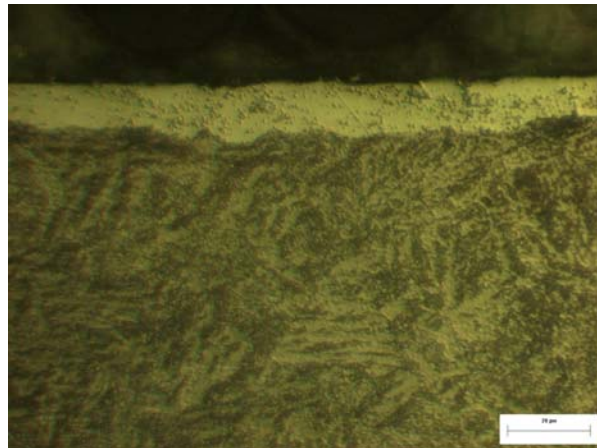
Şekil E.21: AISI 4140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü - 400x (Ortalama Sert Krom Kaplama Kalınlığı: 13.06 μm).



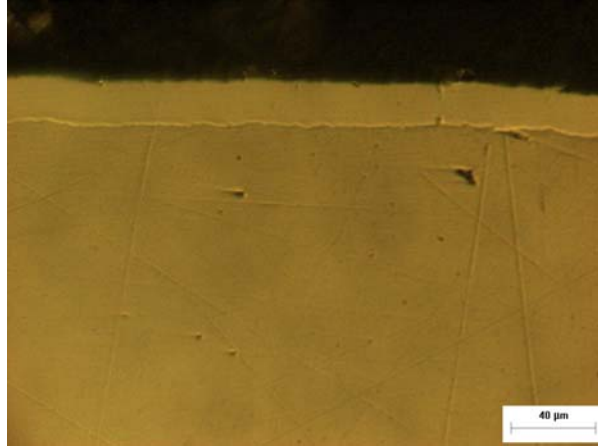
Şekil E.22: AISI 4140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x.



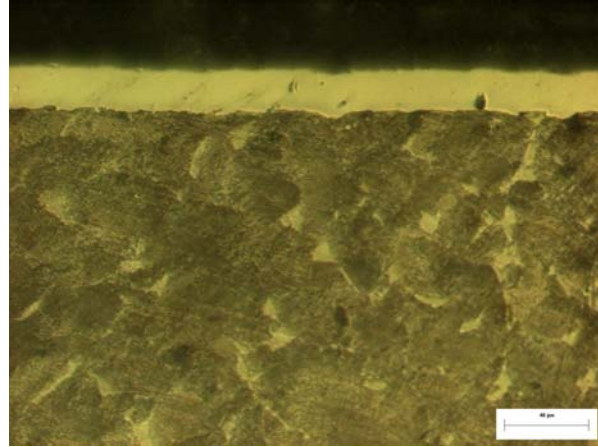
Şekil E.23: AISI 4140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü- 400x.



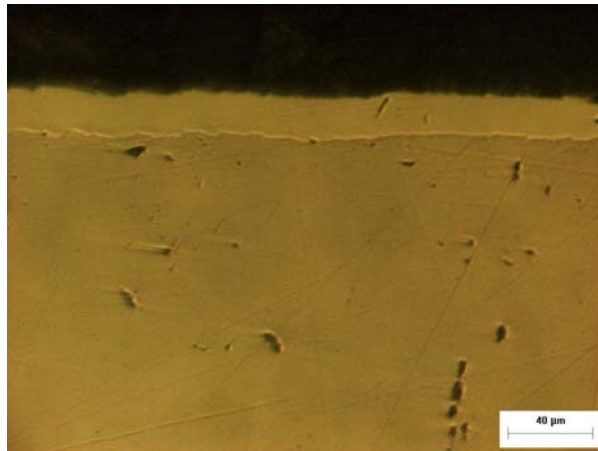
Şekil E.24: AISI 4140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x.



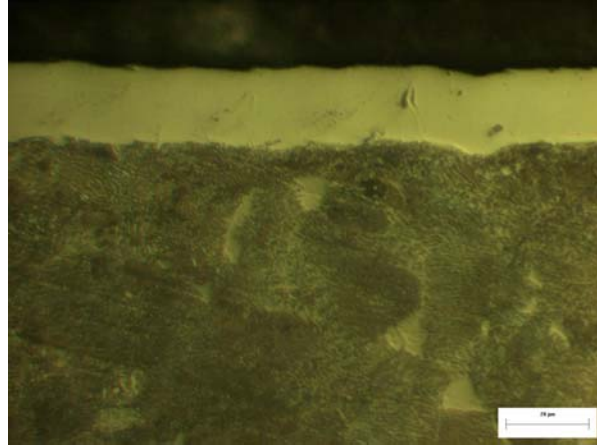
Şekil E.25: AISI 5140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü - 400x (Ortalama Sert Krom Kaplama Kalınlığı: 20.87 µm).



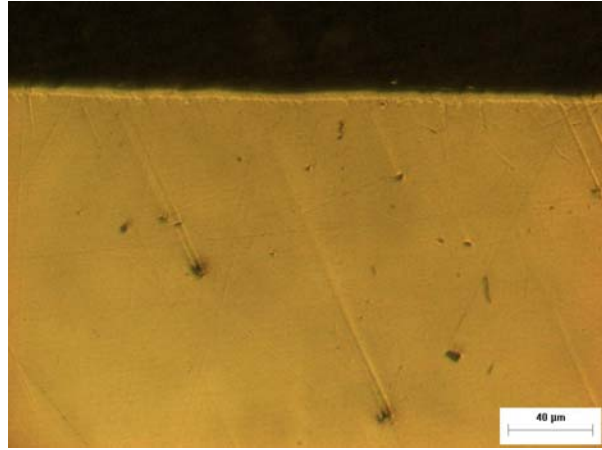
Şekil E.26: AISI 5140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x.



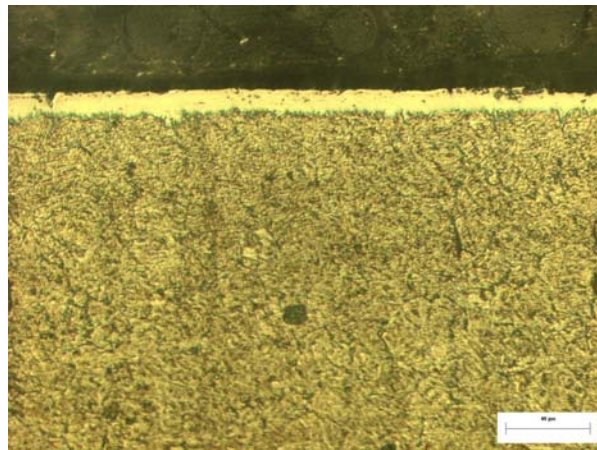
Şekil E.27: AISI 5140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü)- 400x.



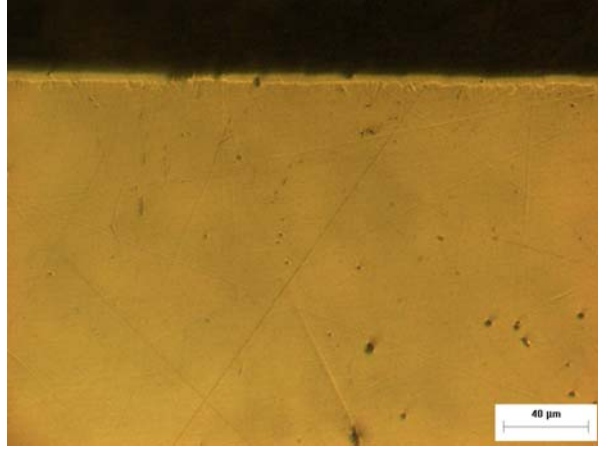
Şekil E.28: AISI 5140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü - 800x.



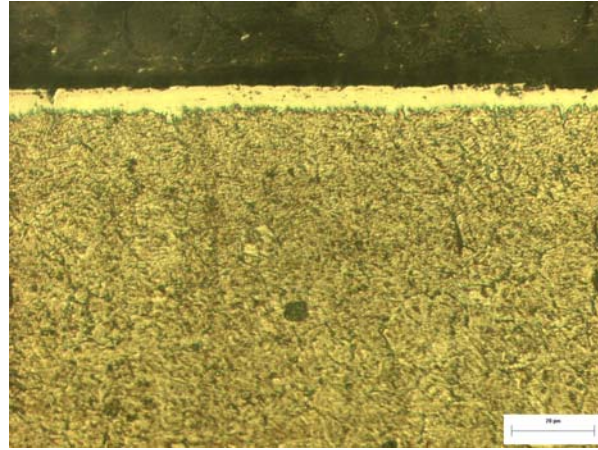
Şekil E.29: AISI 420 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü -400x (Ortalama Sert Krom Kaplama Kalınlığı: 7.39 µm).



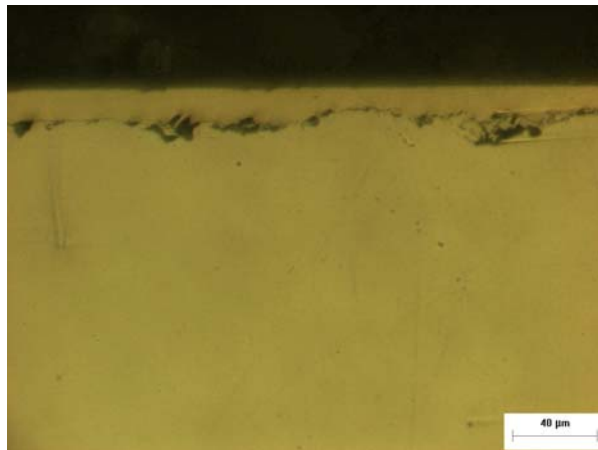
Şekil E.30: AISI 420 sert krom kaplı numunesi kesit görüntüsü(dağlanmış)-400x.



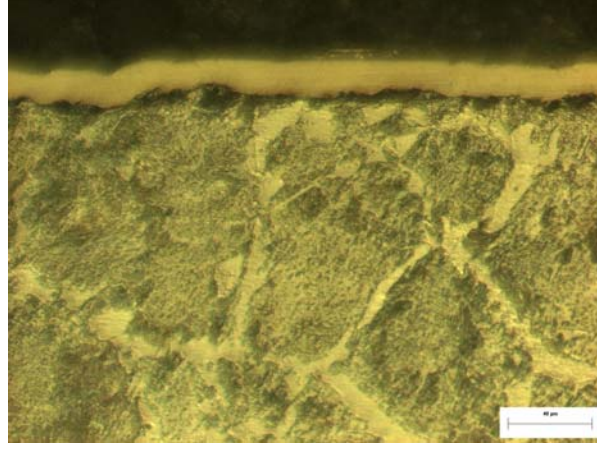
Şekil E.31: AISI 420 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü-400x.



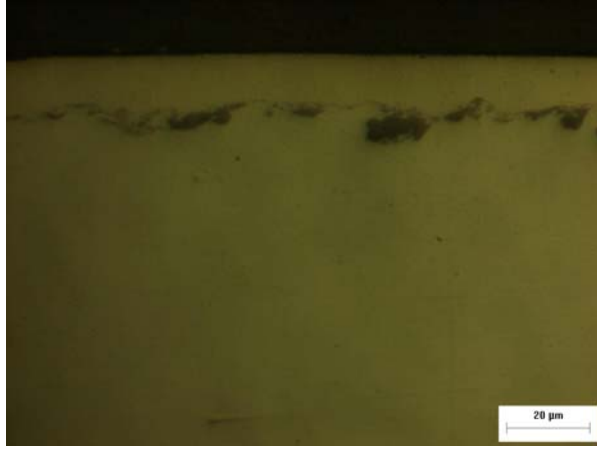
Şekil E.32: AISI 420 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-800x.



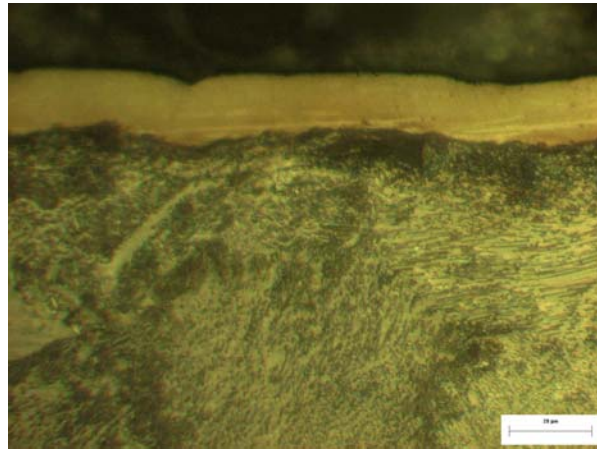
Şekil E.33: 1040 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü- 400x (Ortalama Akımsız Nikel Kaplama Kalınlığı: 14.36 µm).



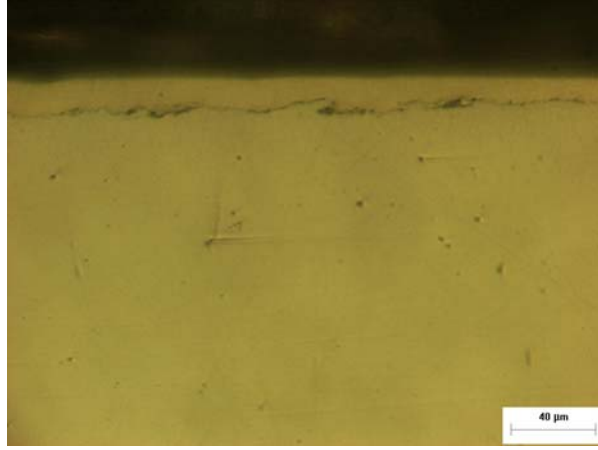
Şekil E.34: AISI 1040 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x.



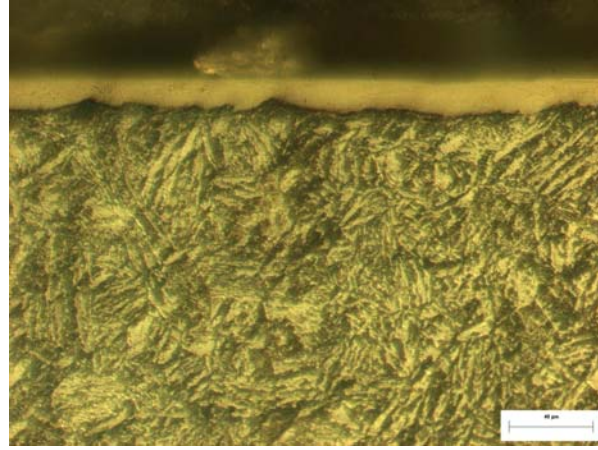
Şekil E.35: AISI 1040 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü - 800x.



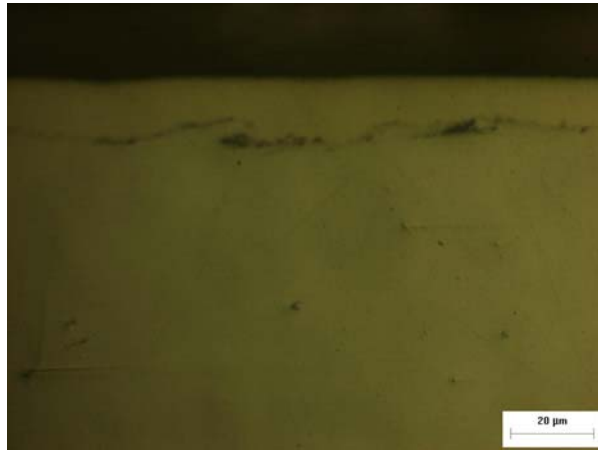
Şekil E.36: AISI 1040 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x.



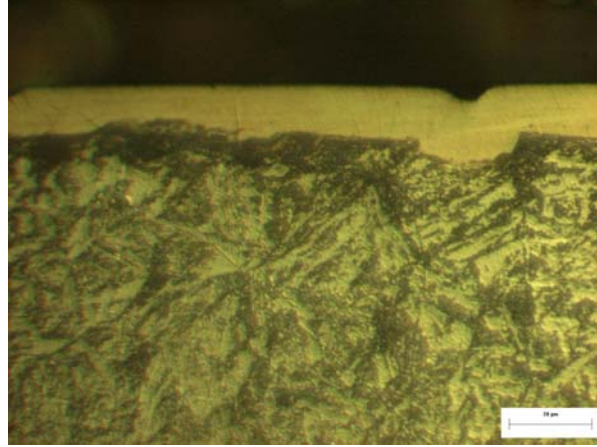
Şekil E.37: AISI 4140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü - 400x (Ortalama Akımsız Nikel Kaplama Kalınlığı: 14.18 µm).



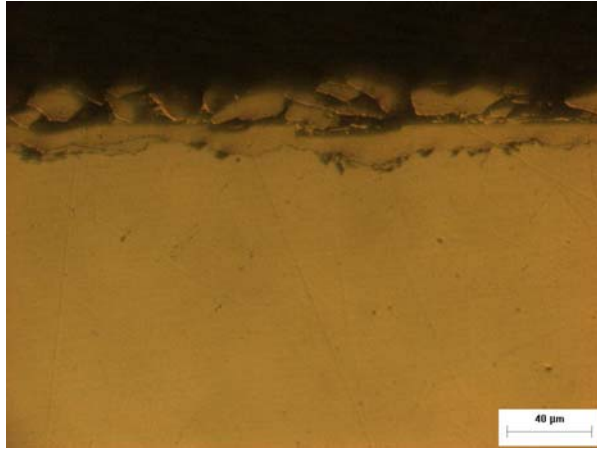
Şekil E.38: AISI 4140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x.



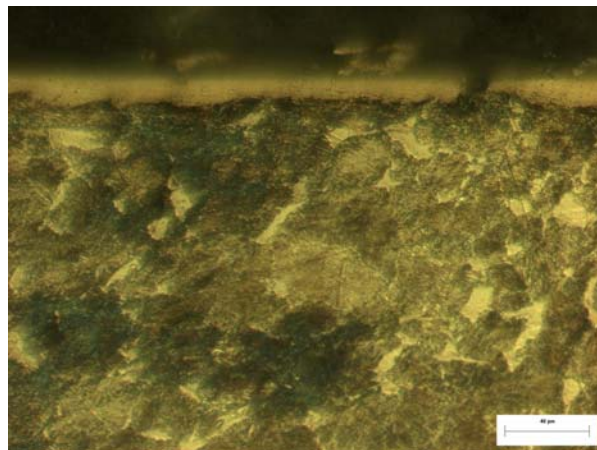
Şekil E.39: AISI 4140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü - 800x.



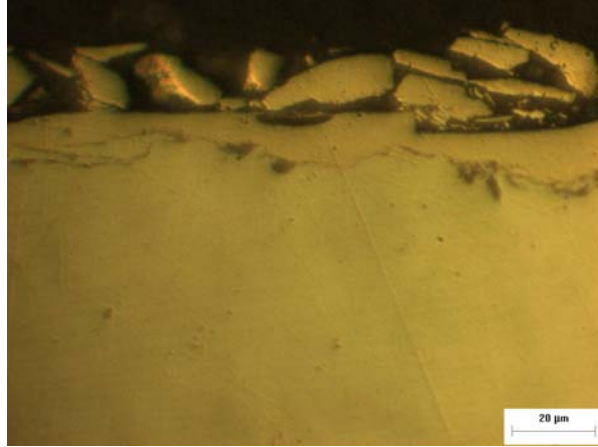
Şekil E.40: AISI 4140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x.



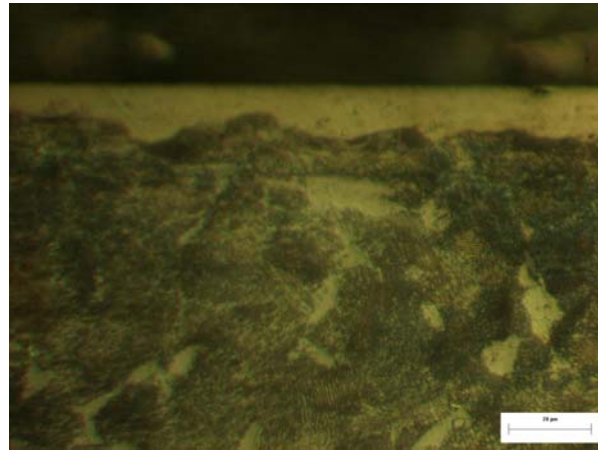
Şekil E.41: AISI 5140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü -400x (Ortalama Akımsız Nikel Kaplama Kalınlığı: 13.28 μm).



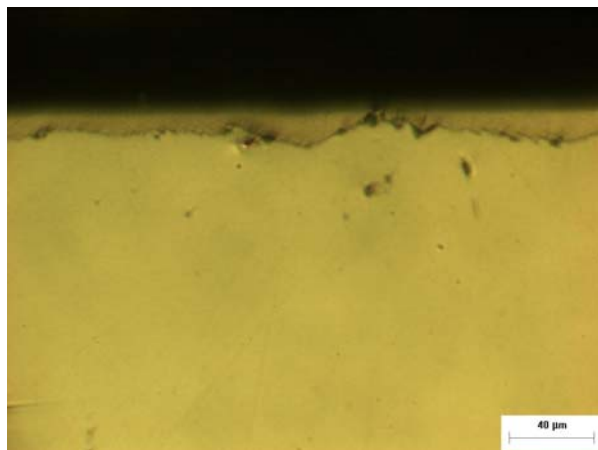
Şekil E.42: AISI 5140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x.



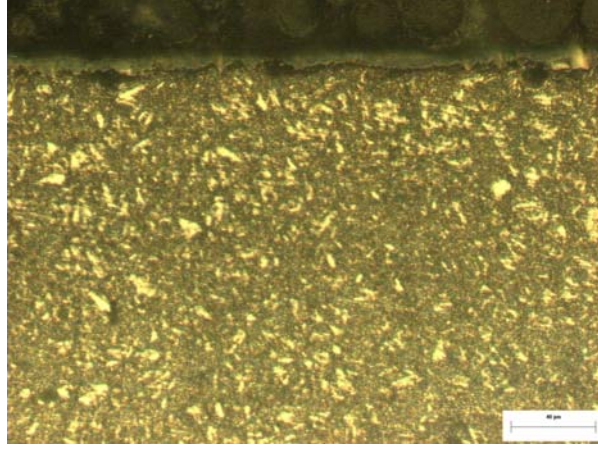
Şekil E.43: AISI 5140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü - 800x.



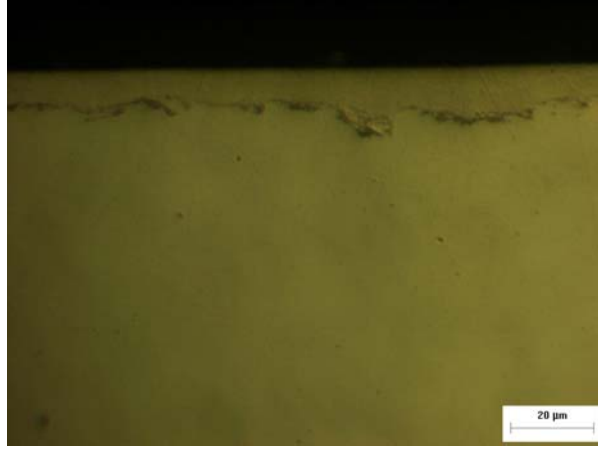
Şekil E.44: AISI 5140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x.



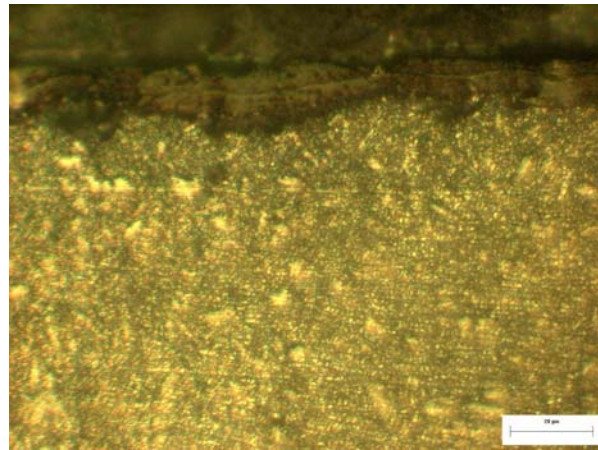
Şekil E.45: AISI 420 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü - 400x (Ortalama Akımsız Nikel Kaplama Kalınlığı: 9.38 µm).



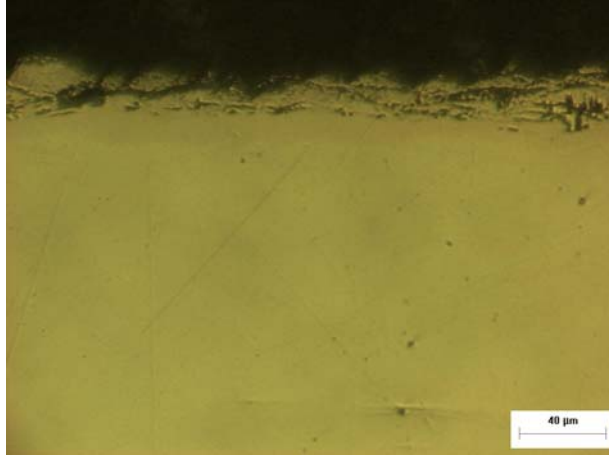
Şekil E.46: AISI 420 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış) 400x.



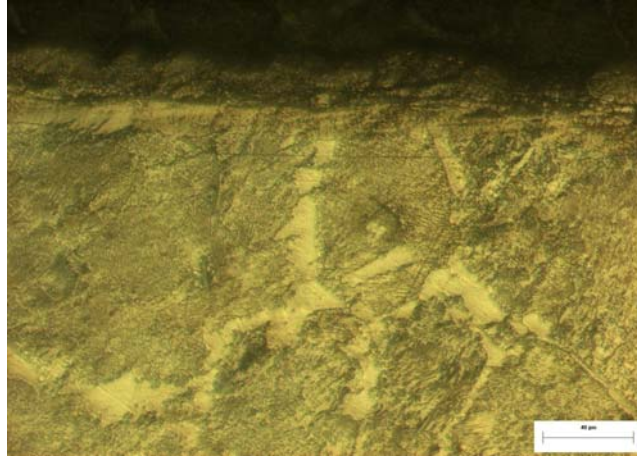
Şekil E.47: AISI 420 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü-800x.



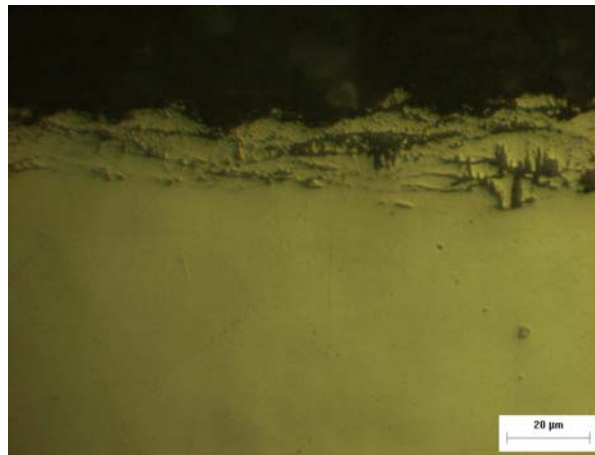
Şekil E.48: AISI 420 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış) 800x.



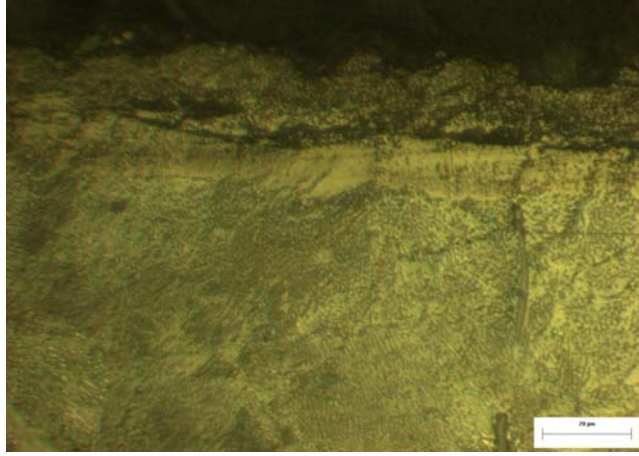
Şekil E.49: 1040 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü- 400x (Ortalama Nitrokarbürlenmiş Kaplama Kalınlığı: 18.83 μm).



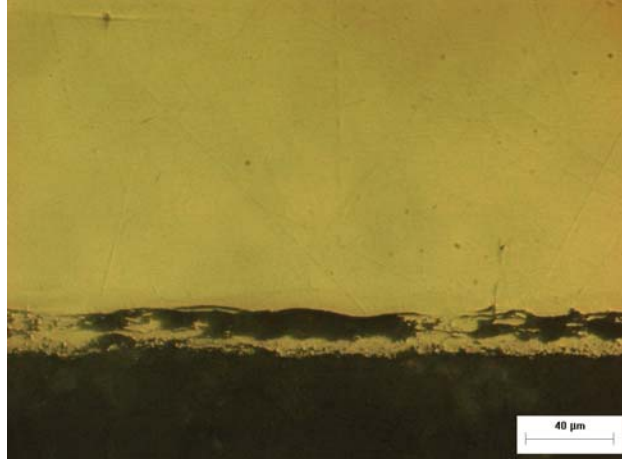
Şekil E.50: AISI 1040 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış) 400x.



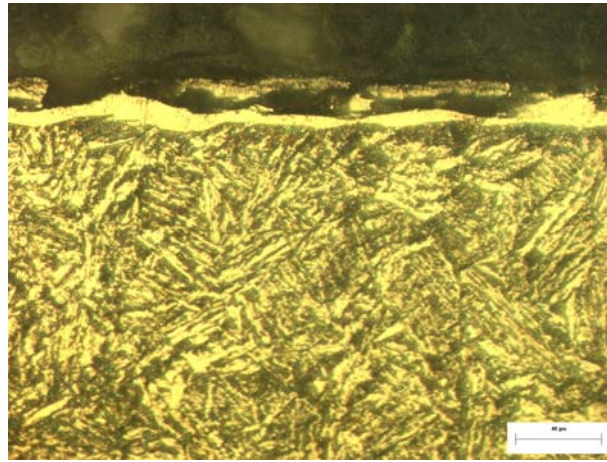
Şekil E.51: 1040 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü - 800x.



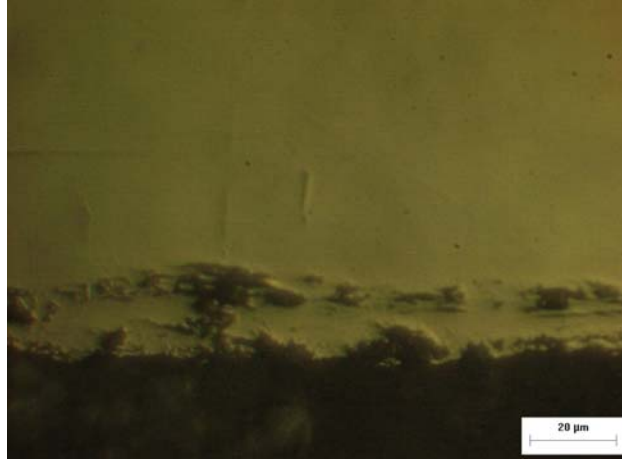
Şekil E.52: AISI 1040 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)800x.



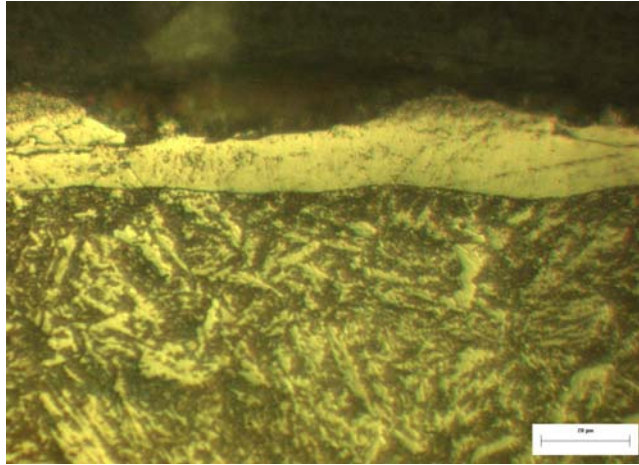
Şekil E.53: AISI 4140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü - 400x (Ortalama Nitrokarbürlenmiş Kaplama Kalınlığı: 18.56 µm).



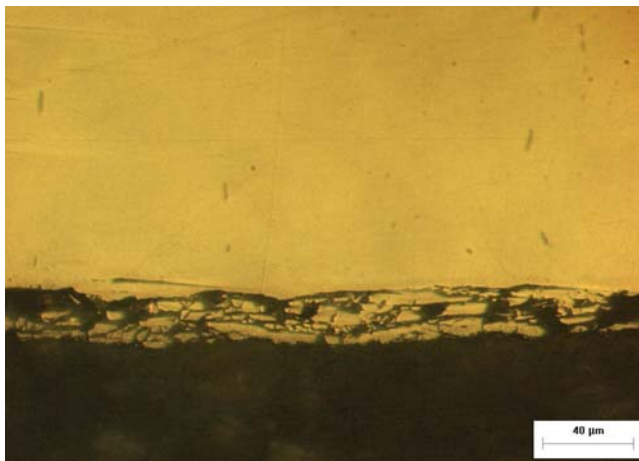
Şekil E.54: AISI 4140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü - 400x



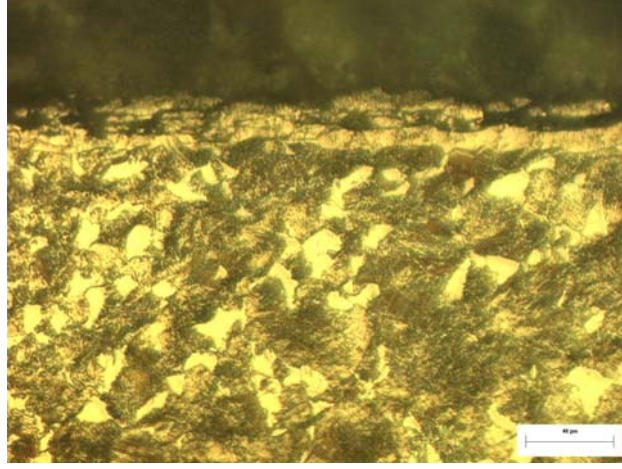
Şekil E.55: AISI 4140 nitrokarbürleşmiş deney numunesi kesit görüntüsü - 800x



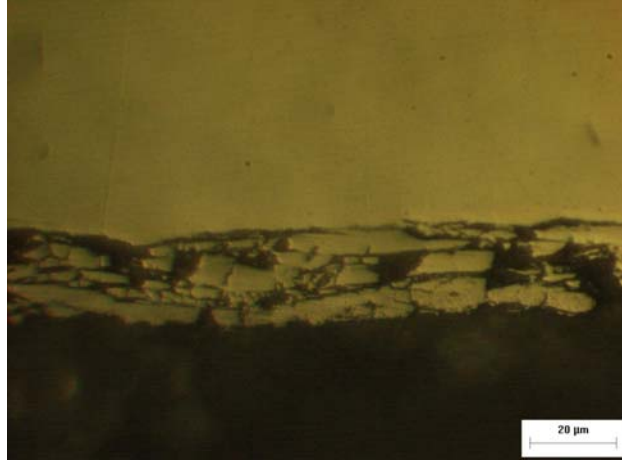
Şekil E.56: AISI 4140 nitrokarbürleşmiş deney numunesi kesit görüntüsü 800x



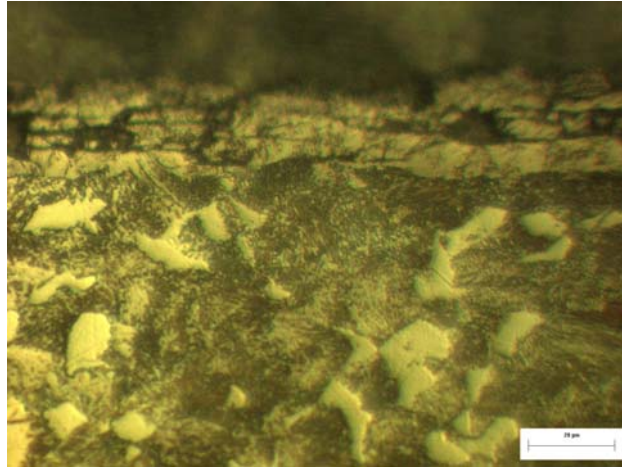
Şekil E.57: AISI 5140 nitrokarbürleşmiş deney numunesi kesit görüntüsü - 400x (Ortalama Nitrokarbürleşmiş Kaplama Kalınlığı: 12.79 µm).



Şekil E.58: AISI 5140 nitrokarbürleşmiş deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x



Şekil E.59: AISI 5140 nitrokarbürleşmiş deney numunesi kesit görüntüsü - 800x



Şekil E.60: AISI 5140 nitrokarbürleşmiş deney numunesi kesit görüntüsü - 800x

Ek F: DISK ÜSTÜNDE AŞINAN PİM DENEY NUMUNELERİ AĞIRLIK VE YÜKSEKLİK VERİLERİ

Tablo F.1: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040 kalite çelik malzemenin aşınma deneylerinde elde edilen Ağırlık (gr) ve Yükseklik (mm) verileri

Kayma Mesafesi(m.)	Ağırlık (gr.)	Ağırlık Kaybı(gr.)	Ağırlık Kaybı(%)	Yükseklik (mm.)	Yükseklik Kaybı (mm.)	Yükseklik Kaybı(%)	
Kaplamasız	0	12,4724	0,0000	0,0000	29,87	0,00	0,0000
	2000	12,4510	0,0214	0,1716	29,66	0,21	0,7030
	4000	12,4157	0,0567	0,4546	29,35	0,52	1,7409
	6000	12,3689	0,1035	0,8298	28,90	0,97	3,2474
Akımsız Nikel	0	12,4836	0,0000	0,0000	29,87	0,00	0,0000
	2000	12,4814	0,0022	0,0176	29,85	0,02	0,0670
	4000	12,4768	0,0068	0,0545	29,81	0,06	0,2009
	6000	12,4679	0,0157	0,1258	29,75	0,12	0,4017
Nitrokarbürleme	0	12,4660	0,0000	0,0000	29,91	0,00	0,0000
	2000	12,4639	0,0021	0,0168	29,89	0,02	0,0669
	4000	12,4598	0,0062	0,0497	29,86	0,05	0,1672
	6000	12,4510	0,0150	0,1203	29,80	0,11	0,3678
Sert Krom	0	12,4273	0,0000	0,0000	29,81	0,00	0,0000
	2000	12,4259	0,0014	0,0113	29,80	0,01	0,0335
	4000	12,4229	0,0044	0,0354	29,78	0,03	0,1006
	6000	12,4186	0,0087	0,0700	29,74	0,07	0,2348
Borlama	0	12,3865	0,0000	0,0000	29,80	0,00	0,0000
	2000	12,3854	0,0011	0,0089	29,79	0,01	0,0336
	4000	12,3841	0,0024	0,0194	29,78	0,02	0,0671
	6000	12,3808	0,0057	0,0460	29,76	0,04	0,1342

Tablo F.2: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 4140 kalite çelik malzemenin aşınma deneylerinde elde edilen Ağırlık (gr) ve Yükseklik (mm) verileri

Kayma Mesafesi(m.)	Ağırlık (gr.)	Ağırlık Kaybı(gr.)	Ağırlık Kaybı(%)	Yükseklik (mm.)	Yükseklik Kaybı (mm.)	Yükseklik Kaybı(%)	
Kaplamasız	0	12,4558	0,0000	0,0000	29,85	0,00	0,0000
	2000	12,4257	0,0301	0,2417	29,55	0,30	1,0050
	4000	12,3689	0,0869	0,6977	28,95	0,90	3,0151
	6000	12,2984	0,1574	1,2637	28,34	1,51	5,0586
Akımsız Nikel	0	12,4836	0,0000	0,0000	29,87	0,00	0,0000
	2000	12,4804	0,0032	0,0256	29,84	0,03	0,1004
	4000	12,4778	0,0058	0,0465	29,81	0,06	0,2009
	6000	12,4739	0,0097	0,0777	29,77	0,10	0,3013
Nitrokarbürleme	0	12,4372	0,0000	0,0000	29,90	0,00	0,0000
	2000	12,4350	0,0022	0,0177	29,88	0,02	0,1003
	4000	12,4331	0,0041	0,0330	29,83	0,07	0,2675
	6000	12,4293	0,0079	0,0499	29,78	0,12	0,4681
Sert Krom	0	11,7661	0,0000	0,0000	29,61	0,00	0,0000
	2000	11,7647	0,0014	0,0119	29,60	0,01	0,0507
	4000	11,7623	0,0038	0,0323	29,57	0,04	0,1182
	6000	11,7583	0,0078	0,0578	29,54	0,07	0,1756
Borlama	0	12,4268	0,0000	0,0000	29,81	0,00	0,0000
	2000	12,4265	0,0003	0,0024	29,80	0,01	0,0335
	4000	12,4259	0,0009	0,0072	29,80	0,01	0,0839
	6000	12,4236	0,0032	0,0258	29,78	0,03	0,1409

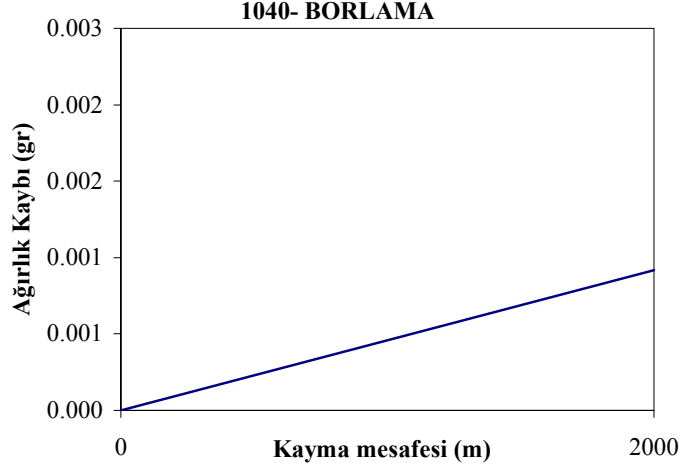
Tablo F.3: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 5140 kalite çelik malzemenin aşınma deneylerinde elde edilen Ağırlık (gr) ve Yükseklik (mm) verileri

Kayma Mesafesi(m.)		Ağırlık (gr.)	Ağırlık Kaybı(gr.)	Ağırlık Kaybı(%)	Yükseklik (mm.)	Yükseklik Kaybı (mm.)	Yükseklik Kaybı(%)
Kaplamasız	0	12,4203	0,0000	0,0000	29,94	0,00	0,0000
	2000	12,4011	0,0192	0,1546	29,67	0,27	0,9018
	4000	12,3834	0,0369	0,2971	29,49	0,45	1,5030
	6000	12,3273	0,0930	0,7488	29,29	0,65	2,1710
Akımsız Nikel	0	12,5935	0,0000	0,0000	29,99	0,00	0,0000
	2000	12,5712	0,0223	0,1771	29,84	0,15	0,5002
	4000	12,5472	0,0463	0,3676	29,62	0,37	1,2337
	6000	12,5097	0,0838	0,6654	29,36	0,63	2,1007
Nitrokarbürleme	0	12,3437	0,0000	0,0000	29,95	0,00	0,0000
	2000	12,3422	0,0015	0,0122	29,92	0,03	0,1002
	4000	12,3372	0,0065	0,0527	29,89	0,06	0,2003
	6000	12,3308	0,0129	0,1045	29,82	0,13	0,4007
Sert Krom	0	11,6328	0,0000	0,0000	29,65	0,00	0,0000
	2000	11,6281	0,0047	0,0404	29,62	0,03	0,1012
	4000	11,6162	0,0166	0,1427	29,52	0,13	0,4384
	6000	11,5924	0,0404	0,3473	29,31	0,34	1,1467
Borlama	0	12,4696	0,0000	0,0000	29,95	0,00	0,0000
	2000	12,4691	0,0005	0,0040	29,94	0,01	0,0334
	4000	12,4649	0,0047	0,0377	29,92	0,03	0,1002
	6000	12,4607	0,0089	0,0714	29,88	0,07	0,2337

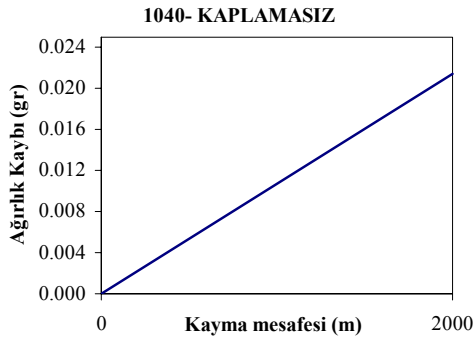
Tablo F.4: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 kalite çelik malzemenin aşınma deneylerinde elde edilen Ağırlık (gr) ve Yükseklik (mm) verileri

Kayma Mesafesi(m.)		Ağırlık (gr.)	Ağırlık Kaybı(gr.)	Ağırlık Kaybı(%)	Yükseklik (mm.)	Yükseklik Kaybı (mm.)	Yükseklik Kaybı(%)
Kaplamasız	0	12,3778	0,0000	0,0000	29,80	0,00	0,0000
	2000	12,3226	0,0552	0,4460	29,21	0,59	1,9799
	4000	12,2642	0,1136	0,9178	28,58	1,22	4,0940
	6000	12,1996	0,1782	1,4397	27,98	1,82	6,1074
Akımsız Nikel	0	12,4032	0,0000	0,0000	29,92	0,00	0,0000
	2000	12,3663	0,0369	0,2975	29,52	0,40	1,3369
	4000	12,3060	0,0972	0,7837	28,91	1,01	3,3757
	6000	12,2487	0,1545	1,2456	28,37	1,55	5,1805
Nitrokarbürleme	0	12,3672	0,0000	0,0000	29,80	0,00	0,0000
	2000	12,3385	0,0287	0,2321	29,47	0,33	1,1074
	4000	12,3022	0,0650	0,5256	29,13	0,67	2,2483
	6000	12,2652	0,1020	0,8248	28,78	1,02	3,4228
Sert Krom	0	12,3722	0,0000	0,0000	29,88	0,00	0,0000
	2000	12,3666	0,0056	0,0453	29,84	0,04	0,1339
	4000	12,3281	0,0441	0,3564	29,35	0,53	1,7738
	6000	12,2510	0,1212	0,9796	28,60	1,28	4,2838
Borlama	0	11,6584	0,0000	0,0000	29,90	0,00	0,0000
	2000	11,6566	0,0018	0,0154	29,89	0,01	0,0334
	4000	11,6510	0,0074	0,0635	29,86	0,04	0,1338
	6000	11,6459	0,0125	0,1072	29,81	0,09	0,3010

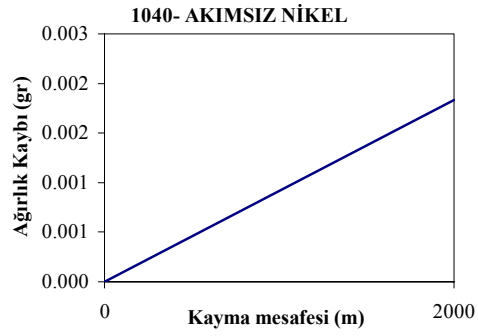
Ek G. 2.000 m KAYMA MESAFESİNDE DİSK ÜSTÜNDE AŞINAN PİM DENEY NUMUNELERİNDE GÖRÜLEN AĞIRLIK KAYBI GRAFİKLERİ



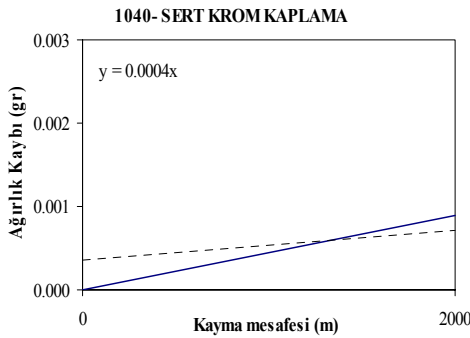
Şekil G.1: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



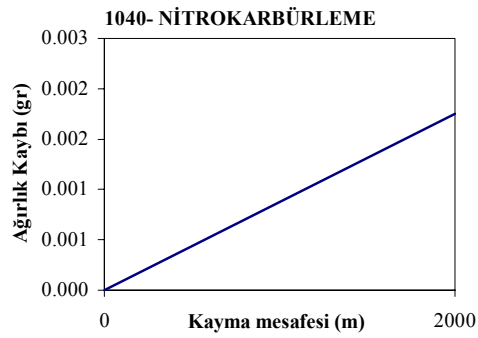
Şekil G.2: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



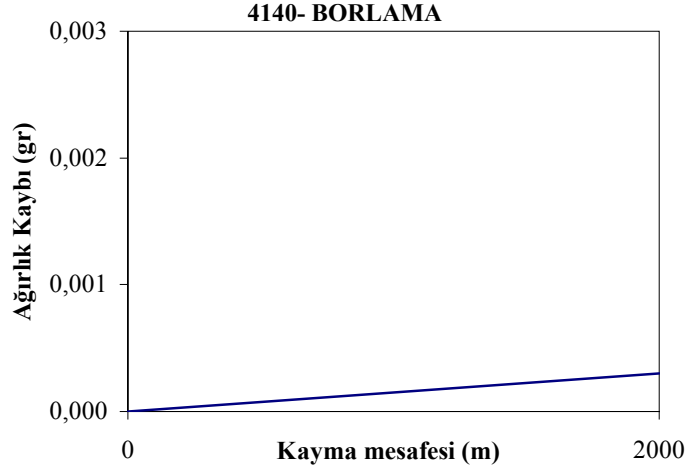
Şekil G.3: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



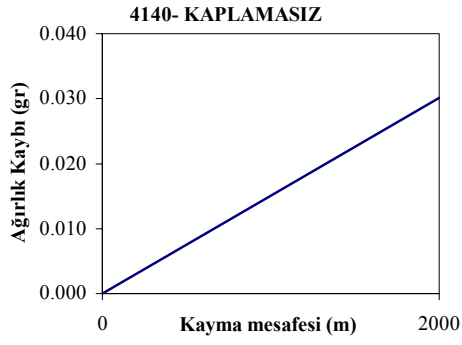
Şekil G.4: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



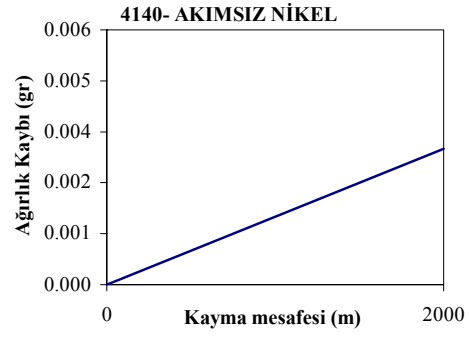
Şekil G.5: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



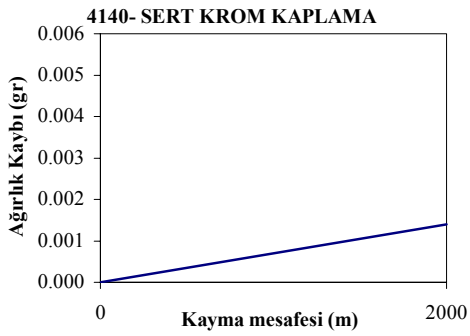
Şekil G.6: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



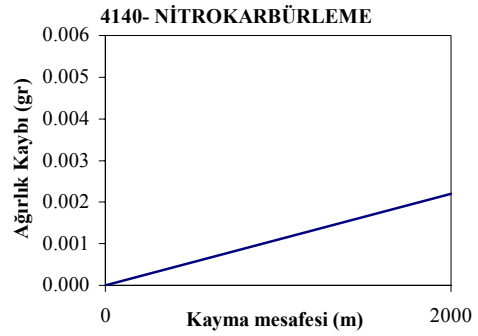
Şekil G.7: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



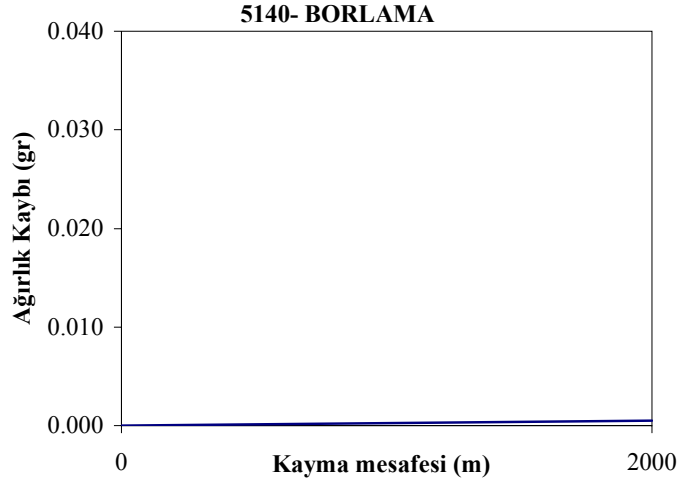
Şekil G.8: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



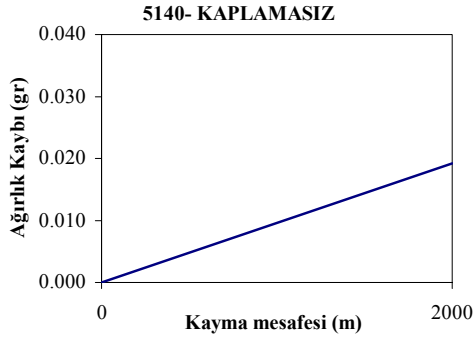
Şekil G. 9: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



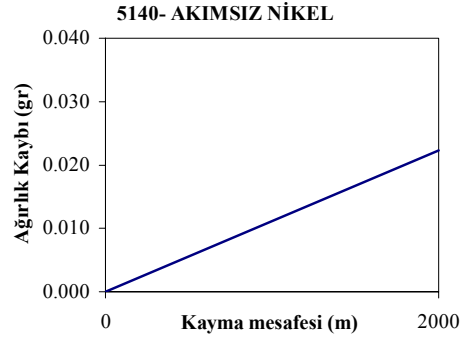
Şekil G.10: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



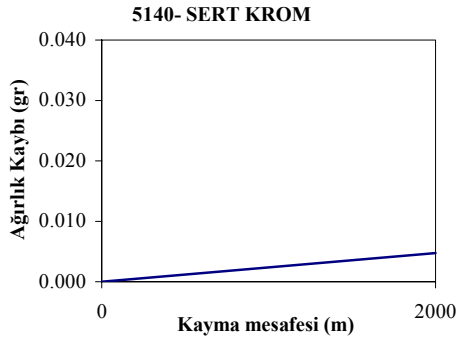
Şekil G.11: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



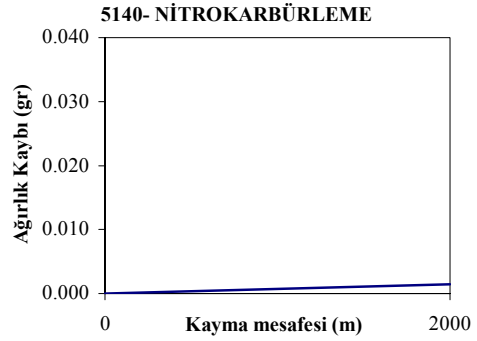
Şekil G. 12: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



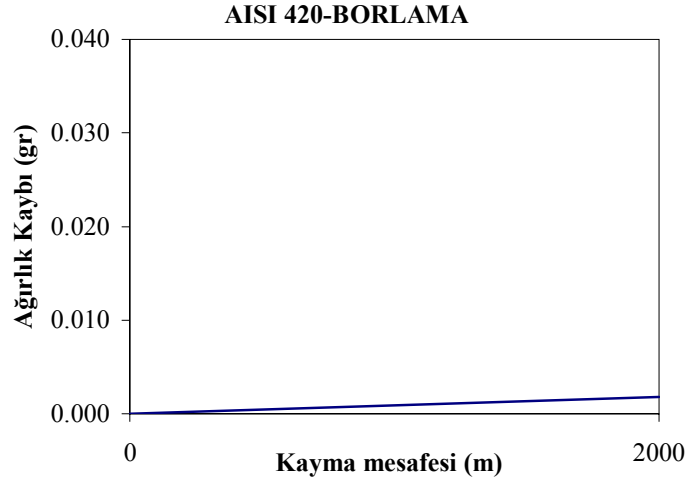
Şekil G.13: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



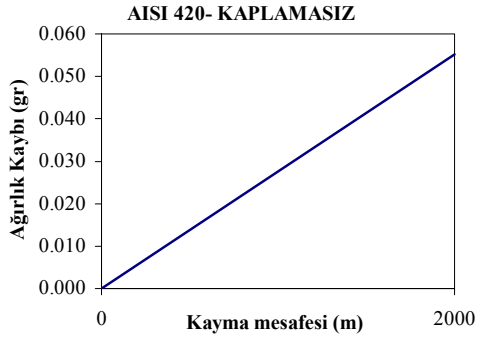
Şekil G. 14: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



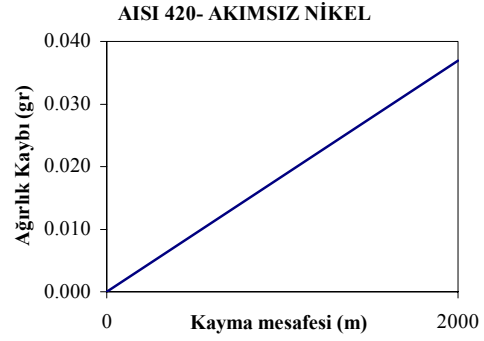
Şekil G.15: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



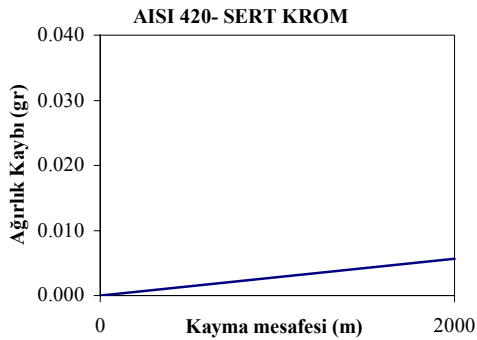
Şekil G.16: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



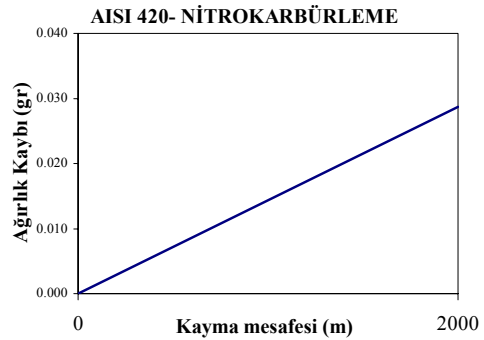
Şekil G. 17: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



Şekil G.18: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

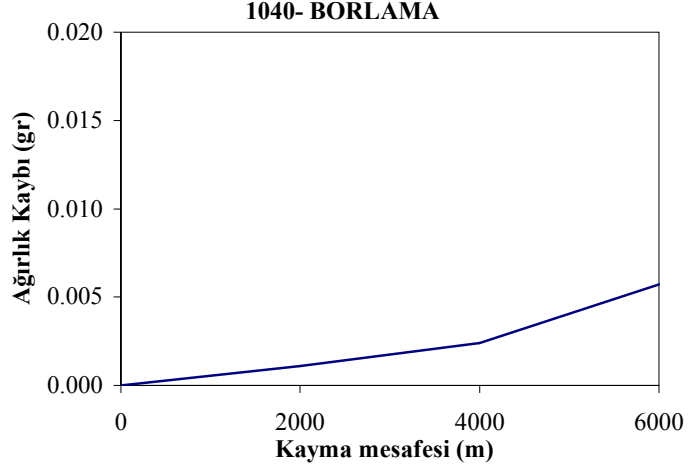


Şekil G. 19: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

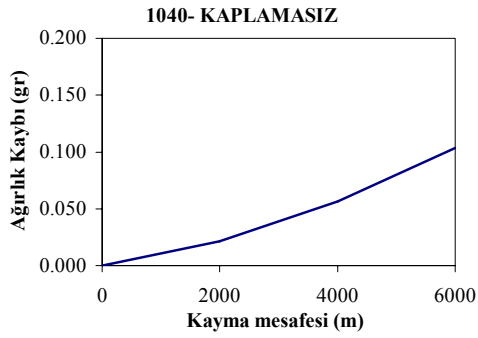


Şekil G.20: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

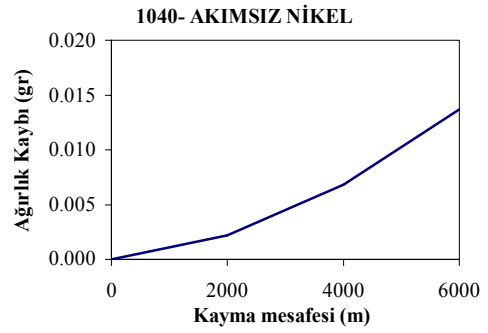
Ek H. 6.000 m KAYMA MESAFESİNDE DİSK ÜSTÜNDE AŞINAN PİM DENEY NUMUNELERİNDE GÖRÜLEN AĞIRLIK KAYBI GRAFİKLERİ



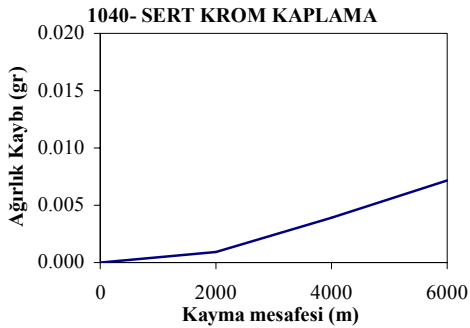
Şekil H.1: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



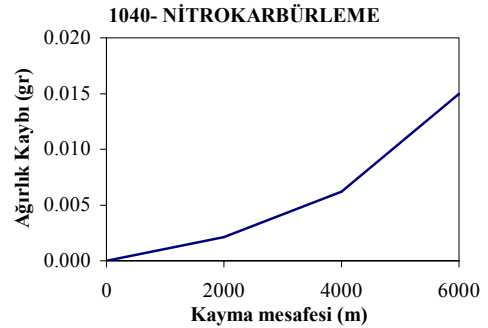
Şekil H.2: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



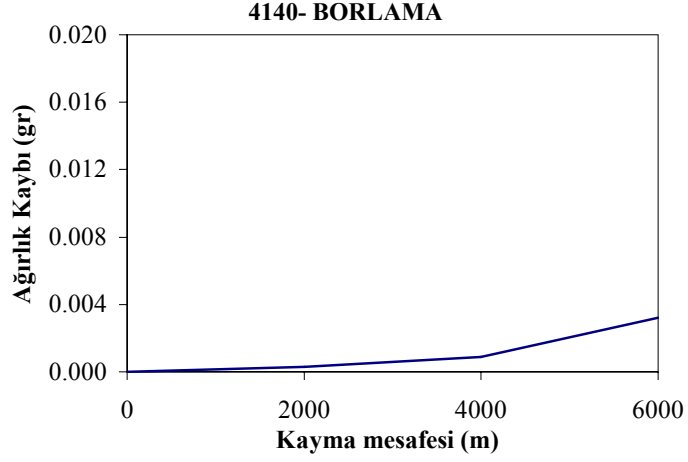
Şekil H.3: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



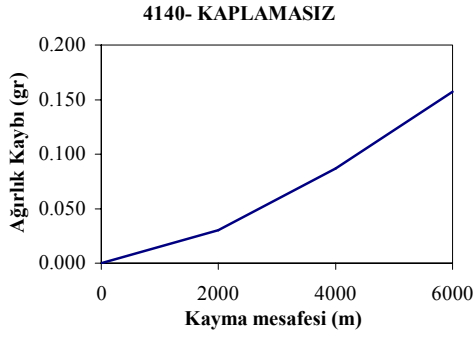
Şekil H.4: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



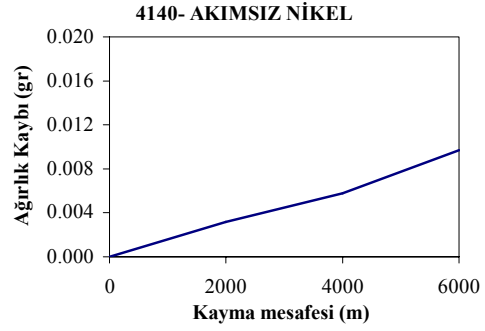
Şekil H.5: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



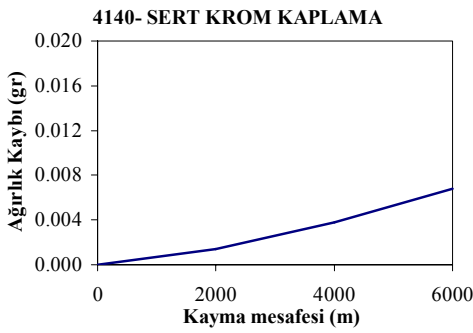
Şekil H.6: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



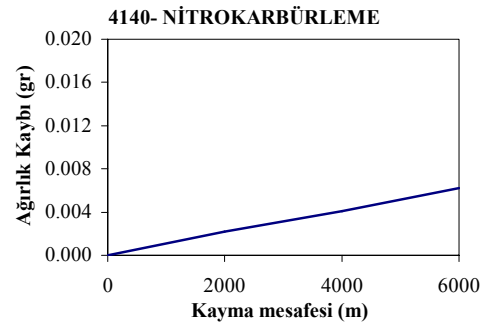
Şekil H.7: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



Şekil H.8: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

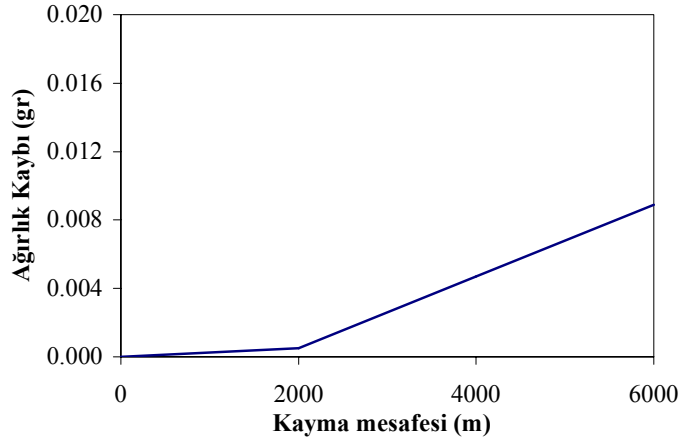


Şekil H.9: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



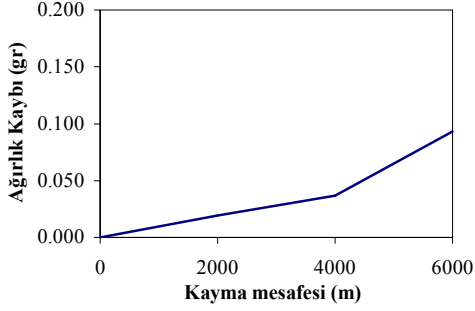
Şekil H.10: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

5140- BORLAMA



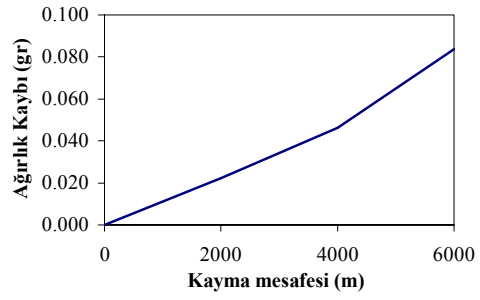
Şekil H.11: Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

5140- KAPLAMASIZ



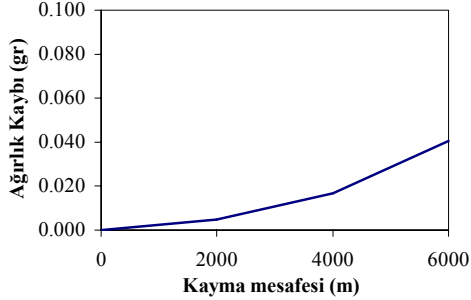
Şekil H.12: Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

5140- AKIMSIZ NİKEL



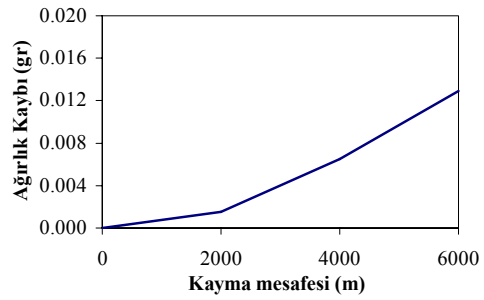
Şekil H.13: Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

5140- SERT KROM

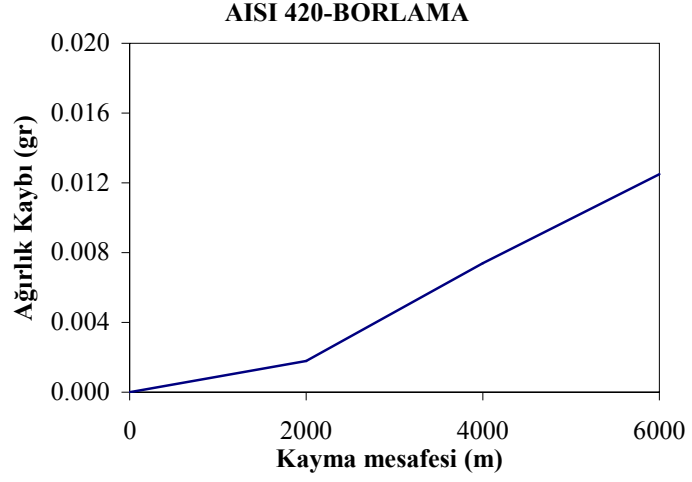


Şekil H.14: Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

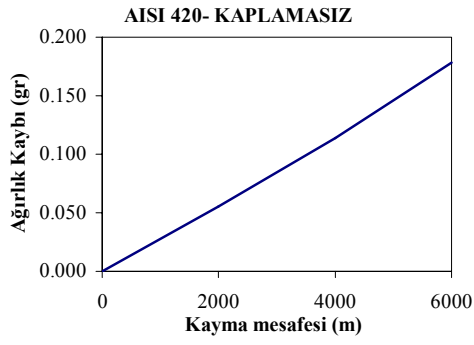
5140- NİTROKARBÜRLEME



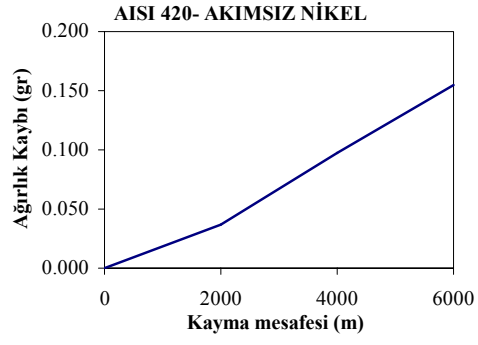
Şekil H.15: Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



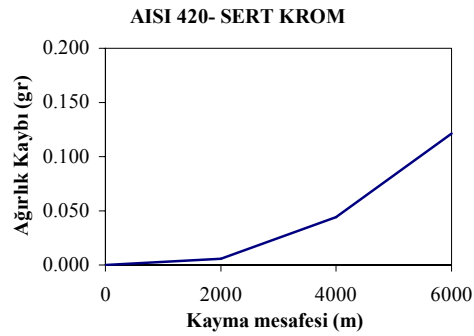
Şekil H.16: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



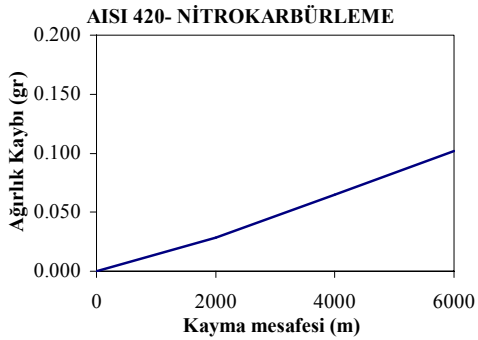
Şekil H.17: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



Şekil H.18: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

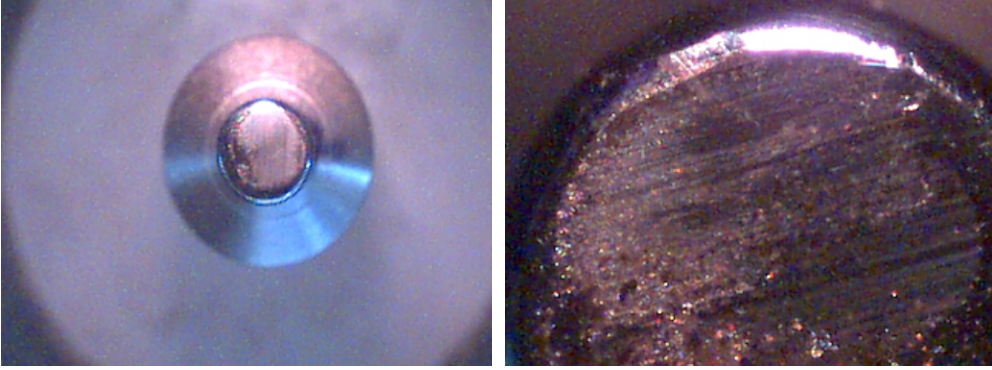


Şekil H.19: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



Şekil H.20: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

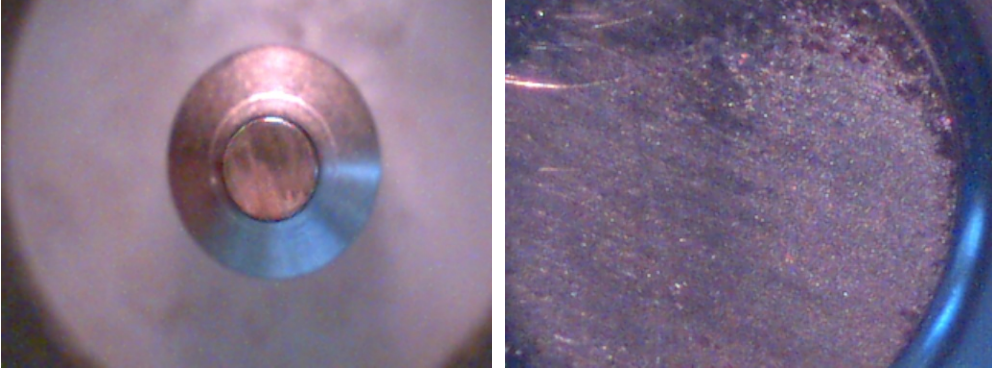
Ek I. DİSK ÜZERİNDE AŞINAN PİM DENEYİ NUMUNE FOTOĞRAFLARI



(a)10x

(b)60x

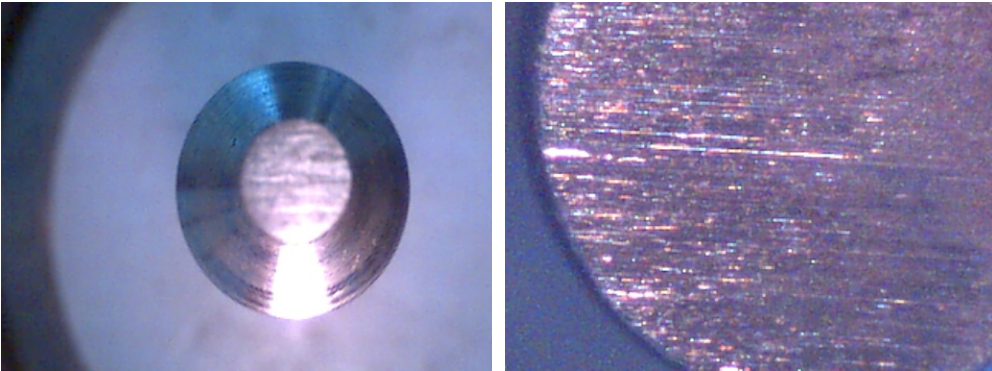
Şekil I.1: AISI 1040 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

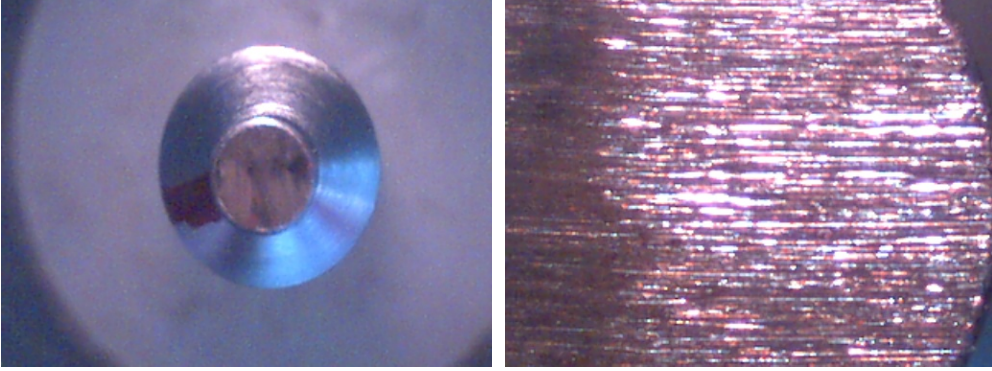
Şekil I.2: AISI 1040 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

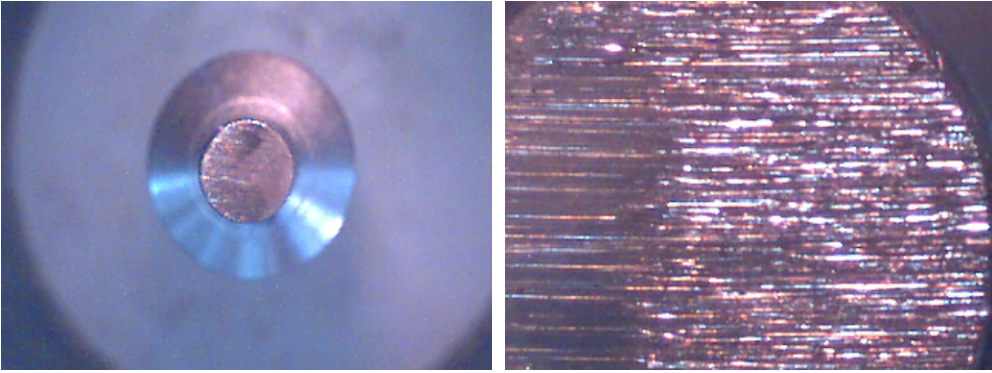
Şekil I.3: AISI 1040 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

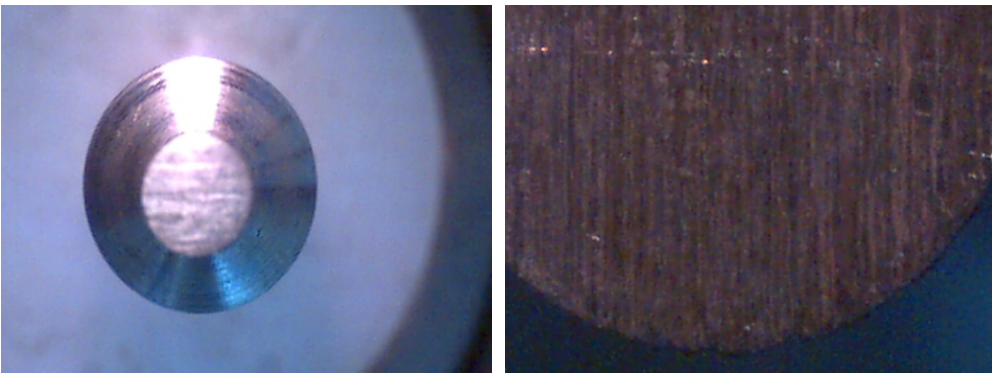
Şekil I.4: AISI 1040 Kaplamasız deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

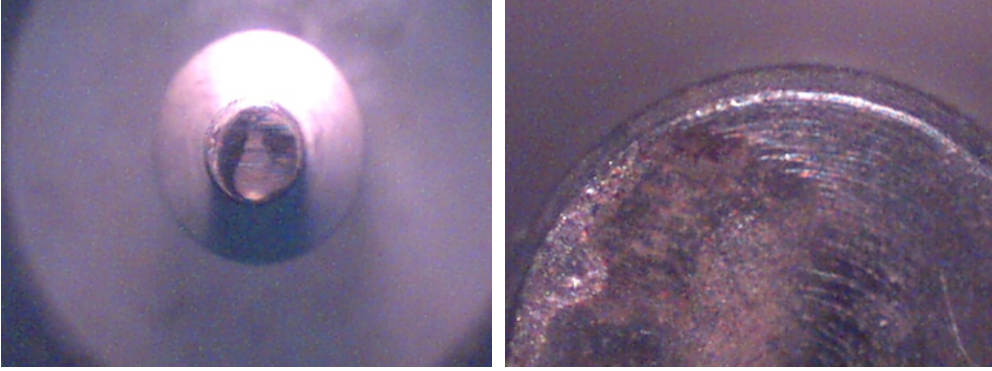
Şekil I.5: AISI 1040 Kaplamasız deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

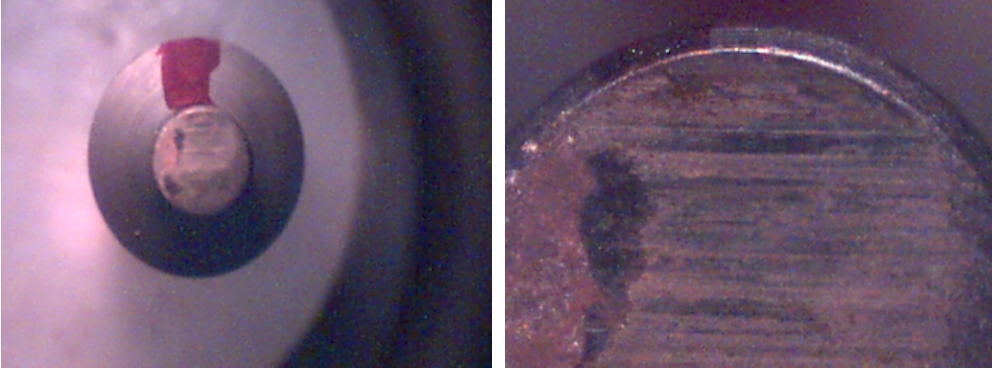
Şekil I.6: AISI 1040 Kaplamasız deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

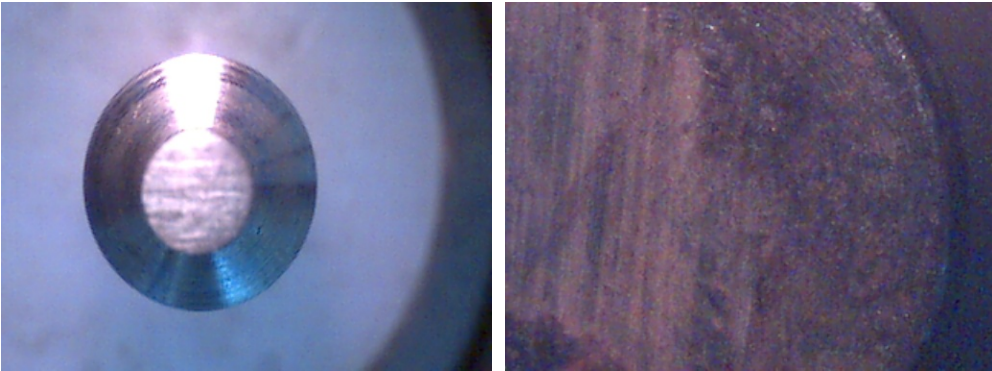
Şekil I.7: AISI 1040 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

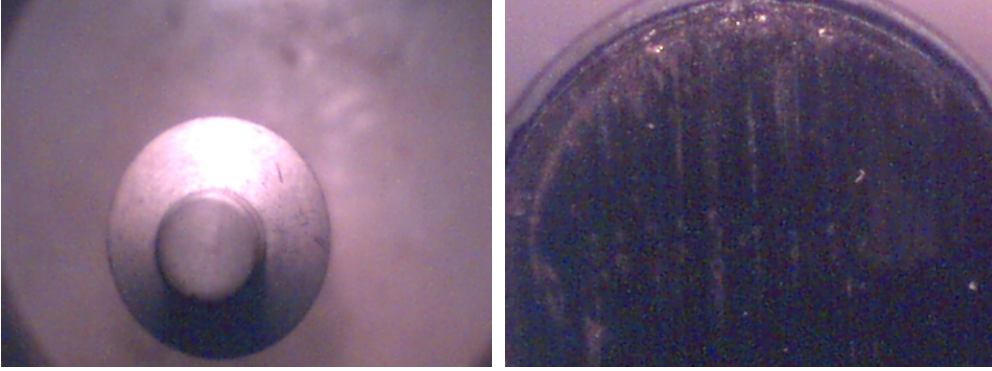
Şekil I.8: AISI 1040 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil I.9: AISI 1040 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

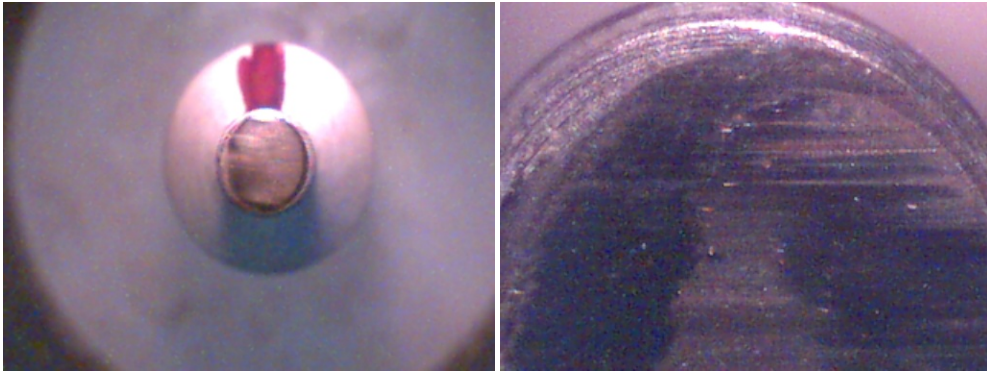
Şekil I.10: AISI 1040 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

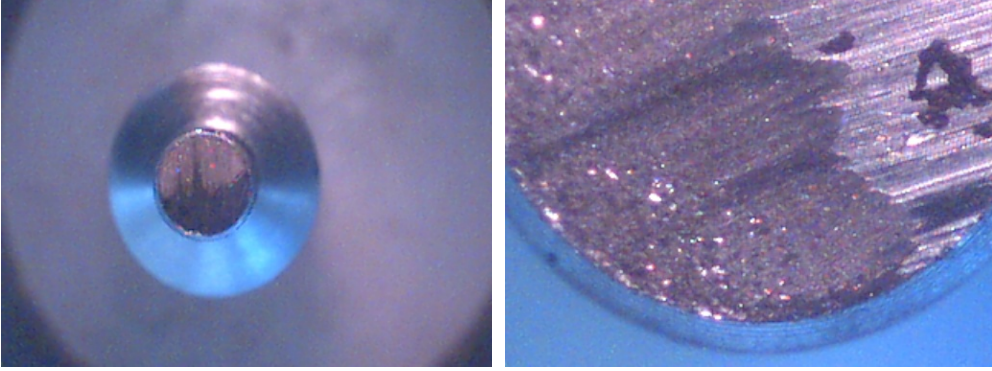
Şekil I.11: AISI 1040 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

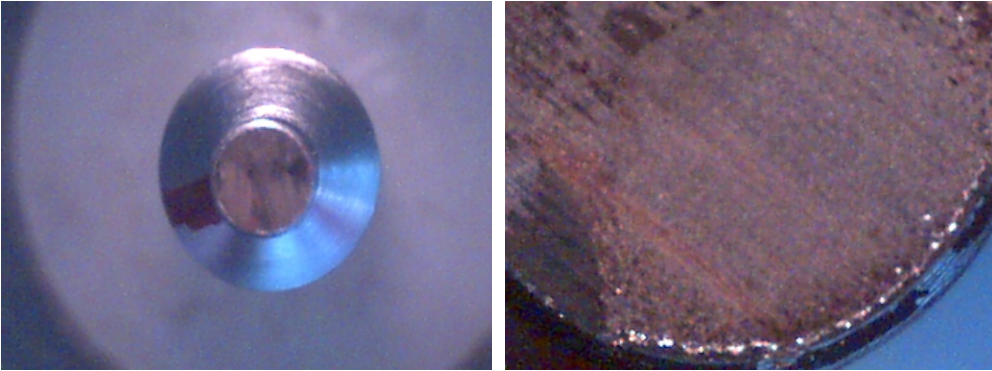
Şekil I.12: AISI 1040 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

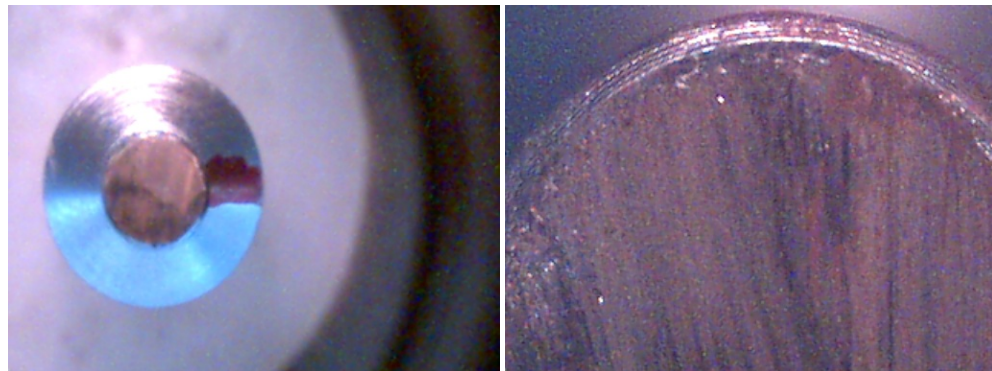
Şekil I.13: AISI 1040 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil I.14: AISI 1040 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil I.15: AISI 1040 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

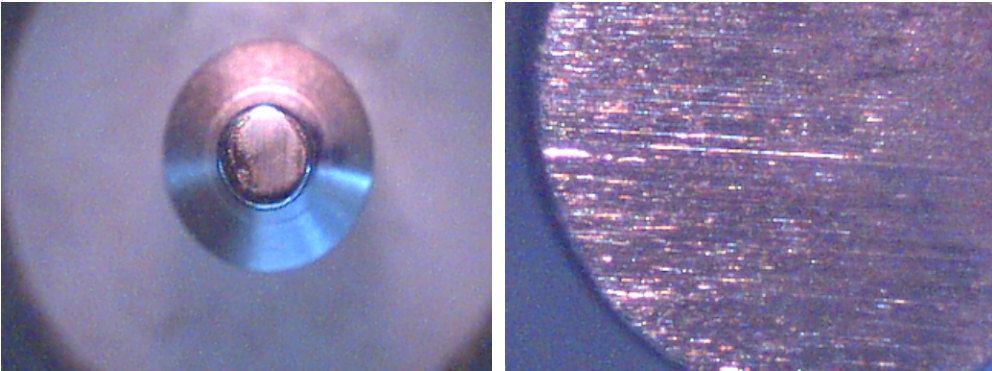
Şekil I.16: AISI 4140 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

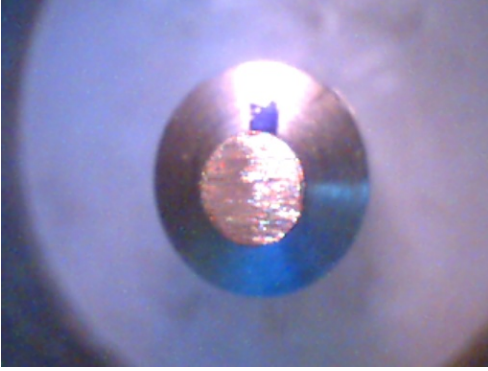
Şekil I.17: AISI 4140 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil I.18: AISI 4140 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 6.000 m.

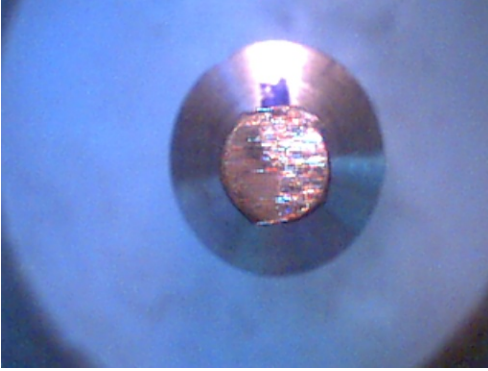


(a)10x



(b)60x

Şekil I.19: AISI 4140 Kaplamasız deney numunesi görüntüleri 2.000 m.

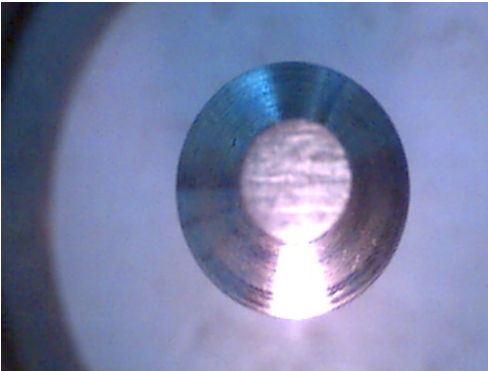


(a)10x

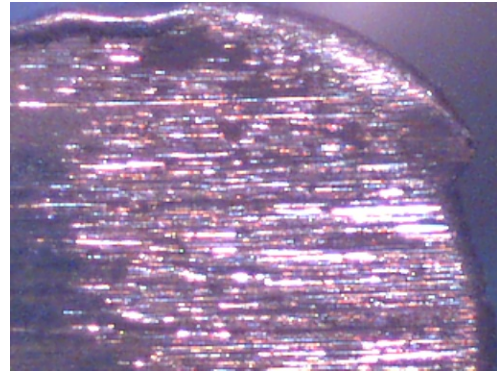


(b)60x

Şekil I.20: AISI 4140 Kaplamasız deney numunesi görüntüleri 4.000 m.

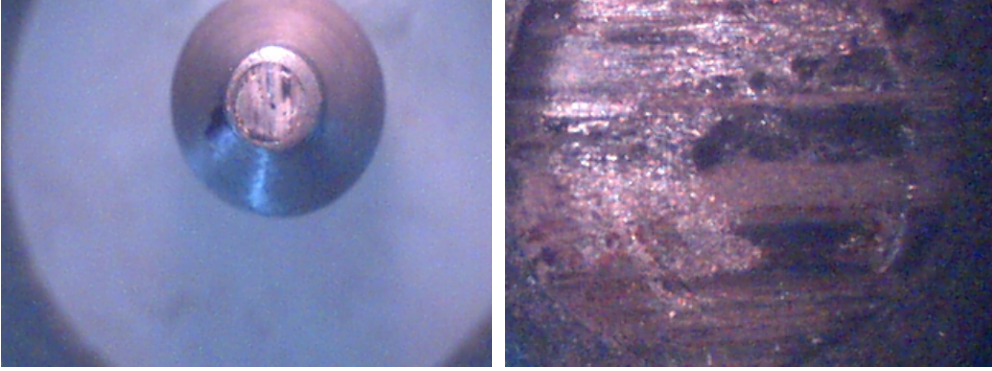


(a)10x



(b)60x

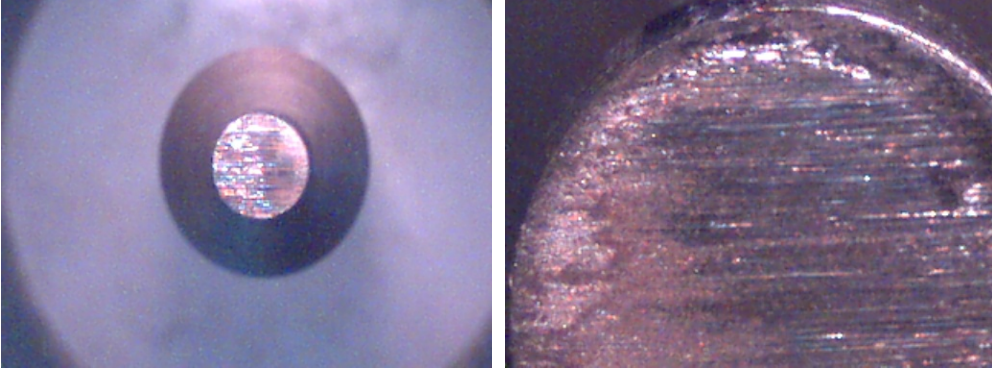
Şekil I.21: AISI 4140 Kaplamasız deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

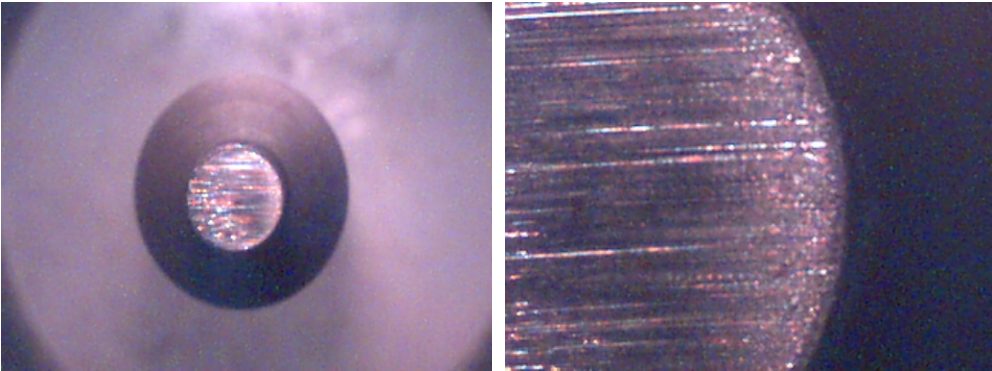
Şekil I.22: AISI 4140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil I.23: AISI 4140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

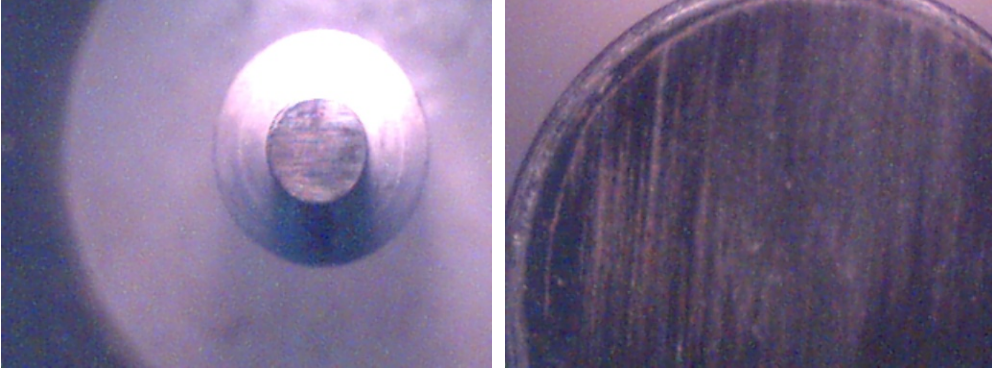
Şekil I.24: AISI 4140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

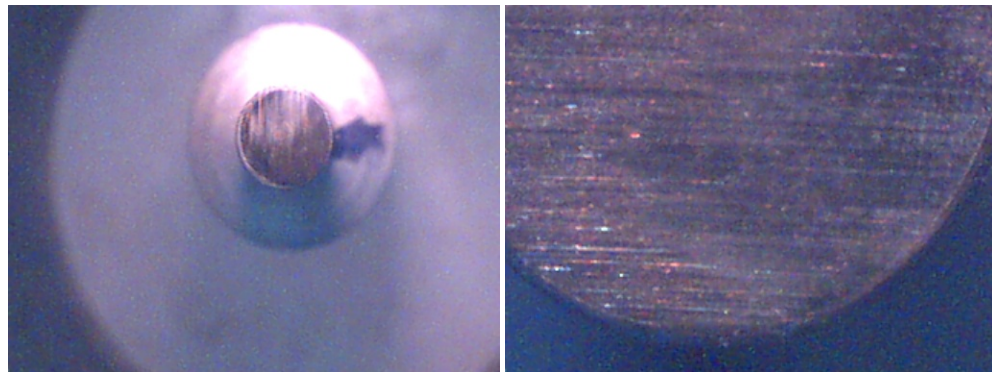
Şekil I.25: AISI 4140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

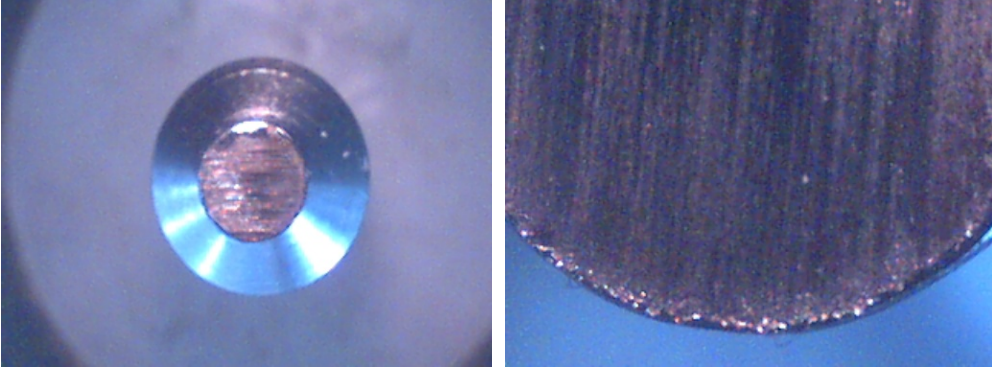
Şekil I.26: AISI 4140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

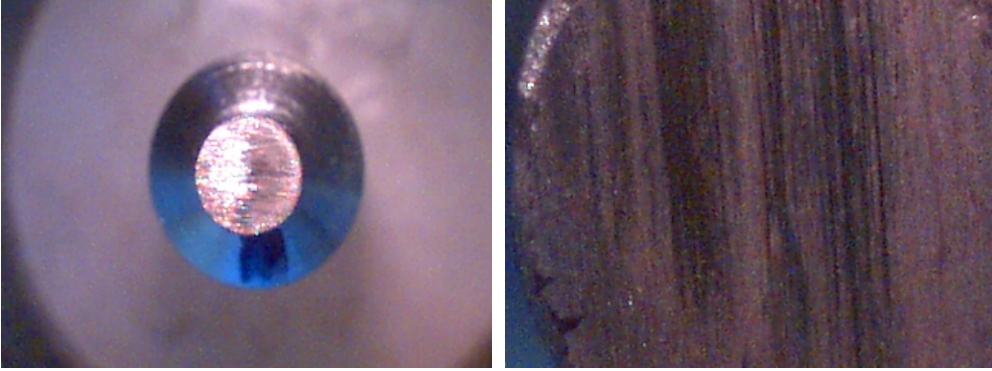
Şekil I.27: AISI 4140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

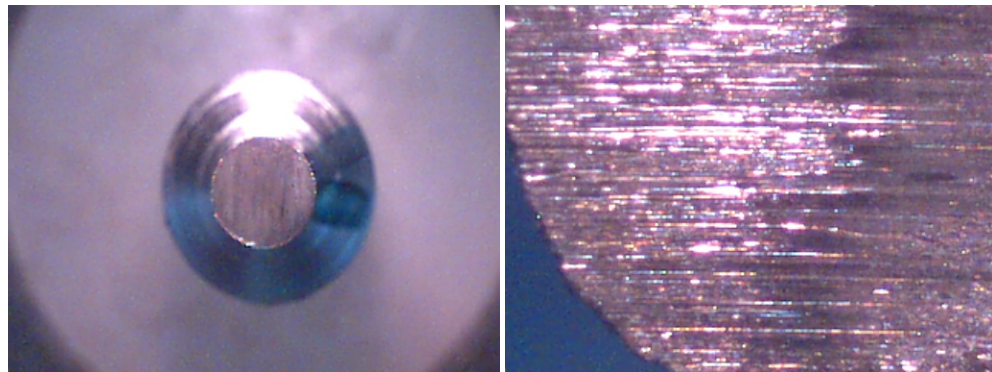
Şekil I.28: AISI 4140 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

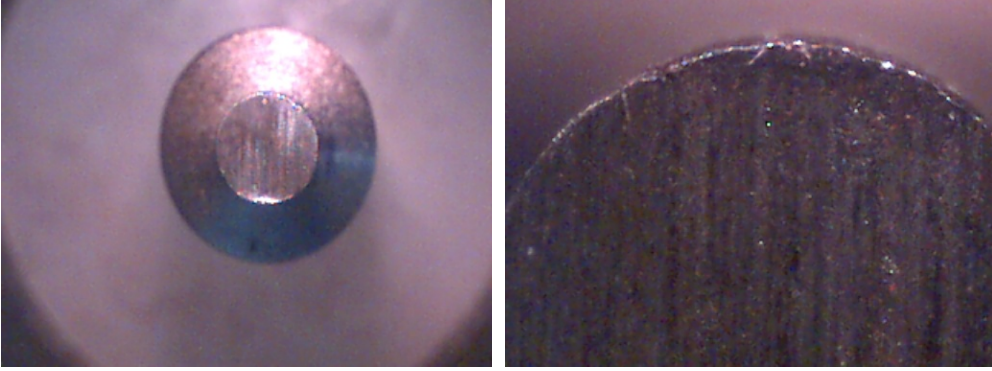
Şekil I.29: AISI 4140 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil I.30: AISI 4140 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

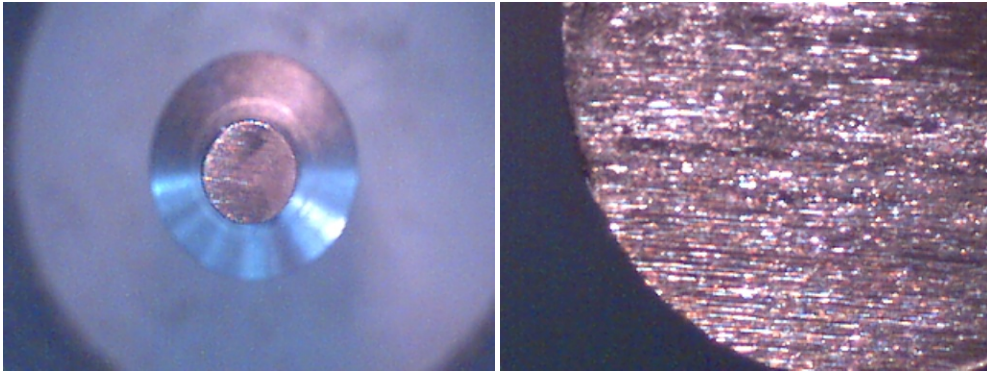
Şekil I.31: AISI 5140 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

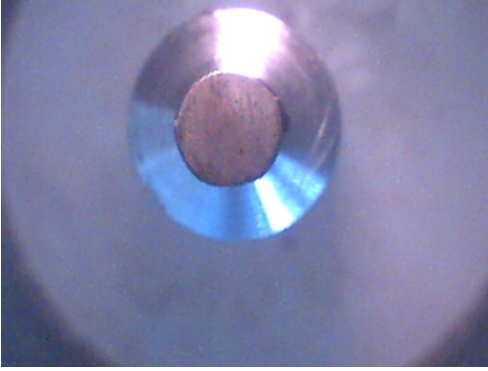
Şekil I.32: AISI 5140 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



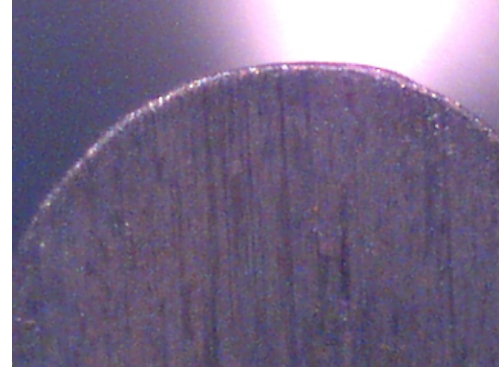
(a)10x

(b)60x

Şekil I.33: AISI 5140 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 6.000 m.

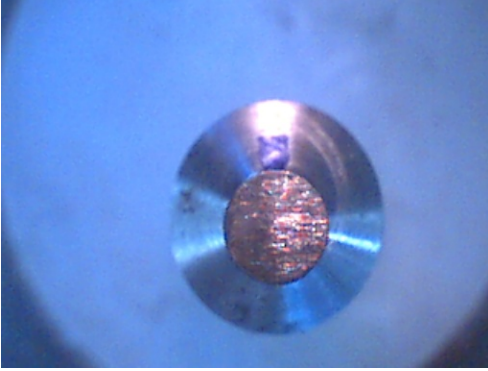


(a)10x

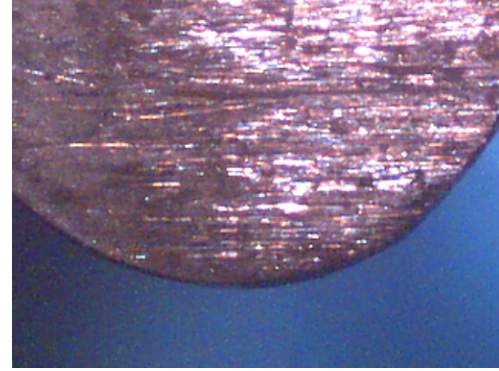


(b)60x

Şekil I.34: AISI 5140 Kaplamasız deney numunesi görüntüleri 2.000 m.

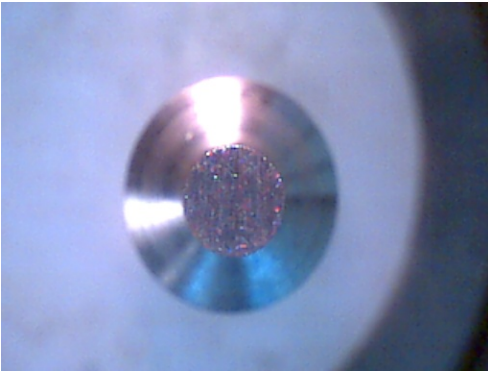


(a)10x

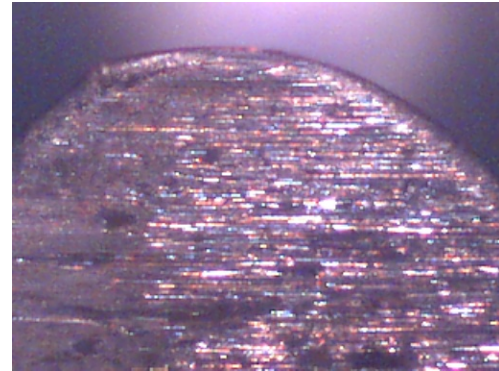


(b)60x

Şekil I.35: AISI 5140 Kaplamasız deney numunesi görüntüleri 4.000 m.

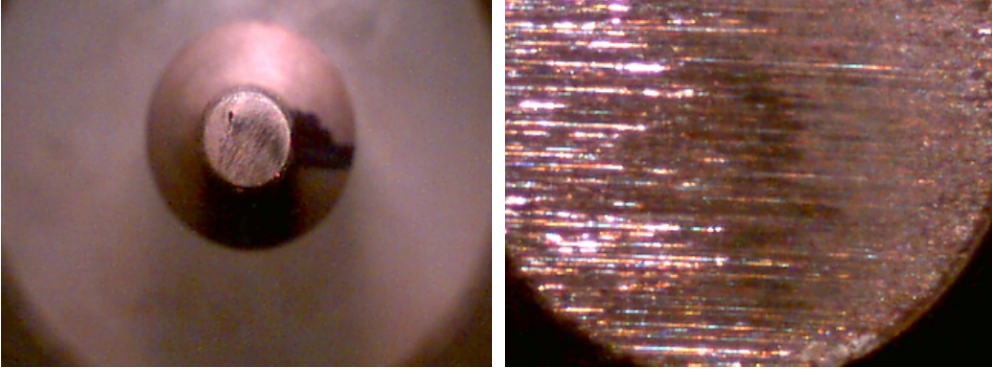


(a)10x



(b)60x

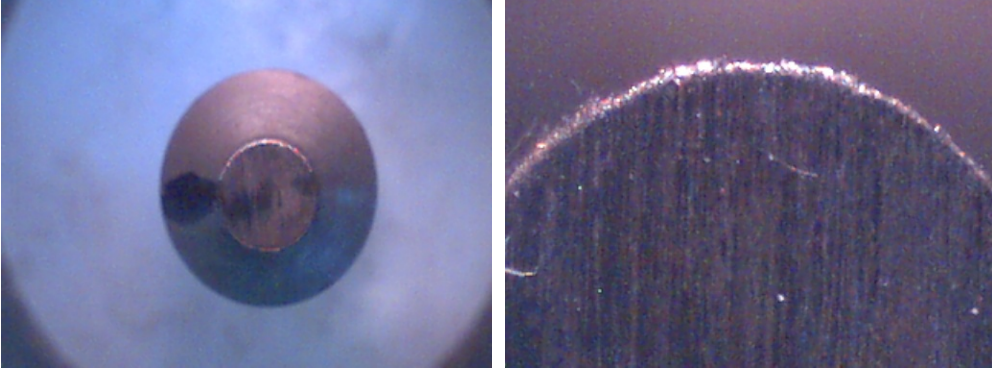
Şekil I.36: AISI 5140 Kaplamasız deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

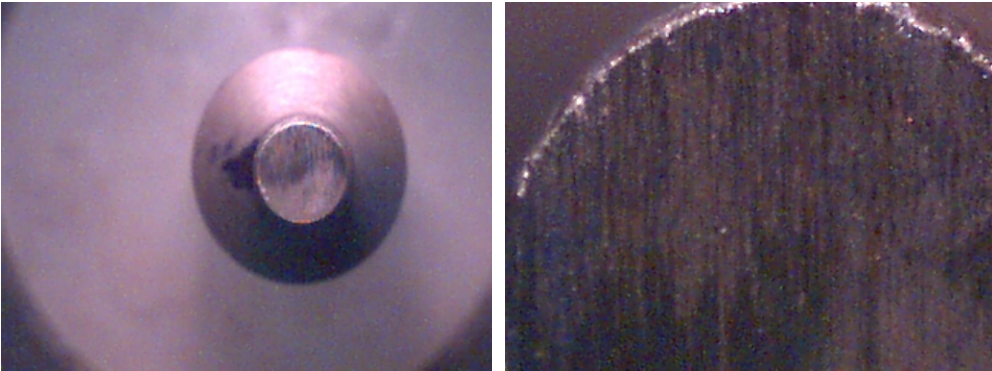
Şekil I.37: AISI 5140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

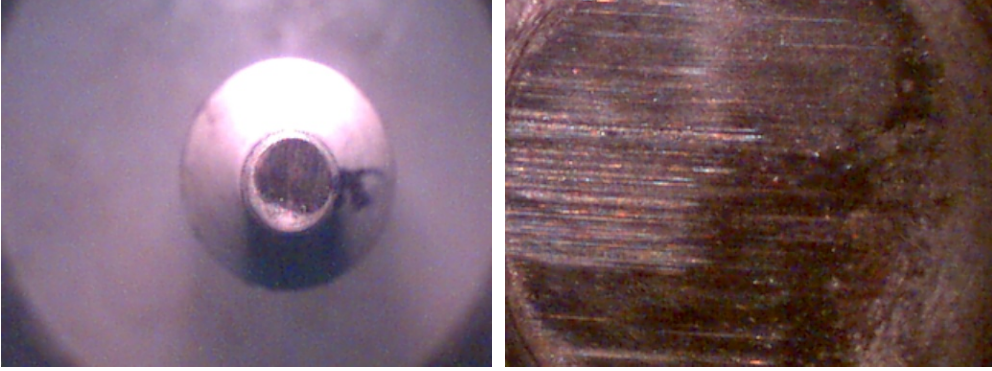
Şekil I.38: AISI 5140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

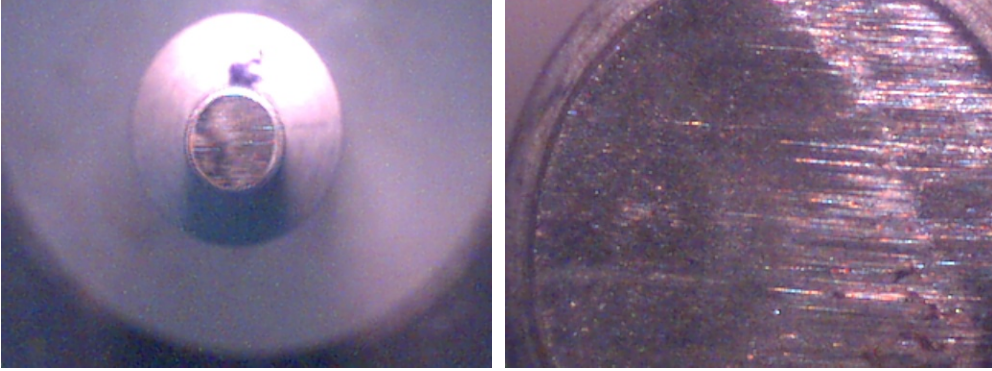
Şekil I.39: AISI 5140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

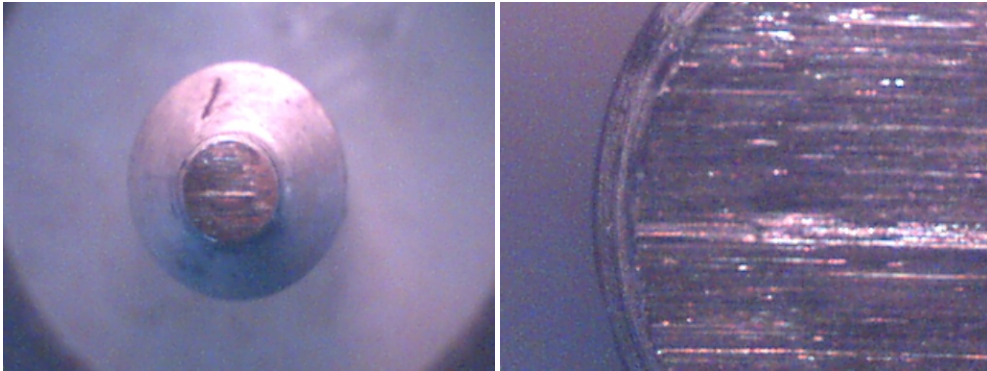
Şekil I.40: AISI 5140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

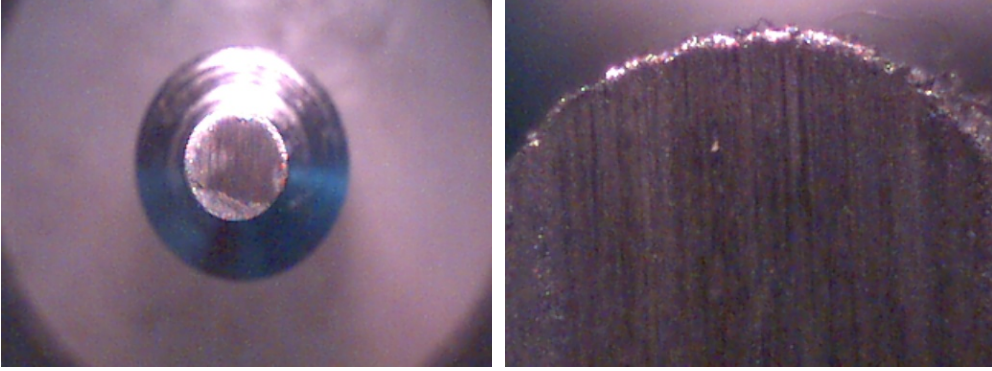
Şekil I.41: AISI 5140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil I.42: AISI 5140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

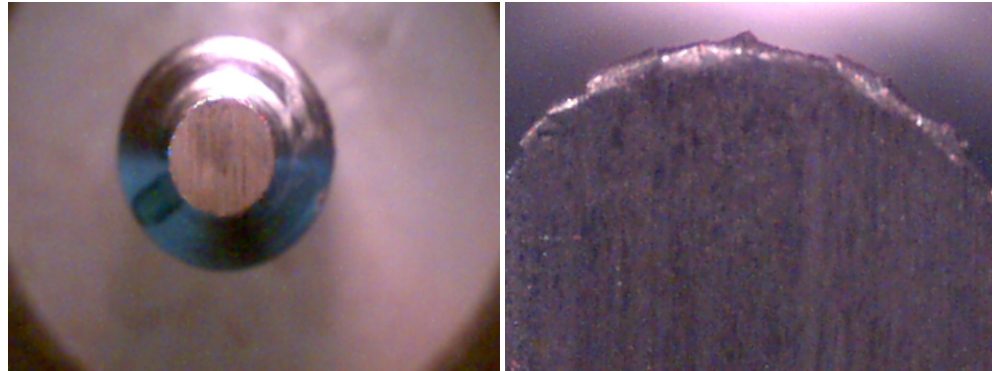
Şekil I.43: AISI 5140 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

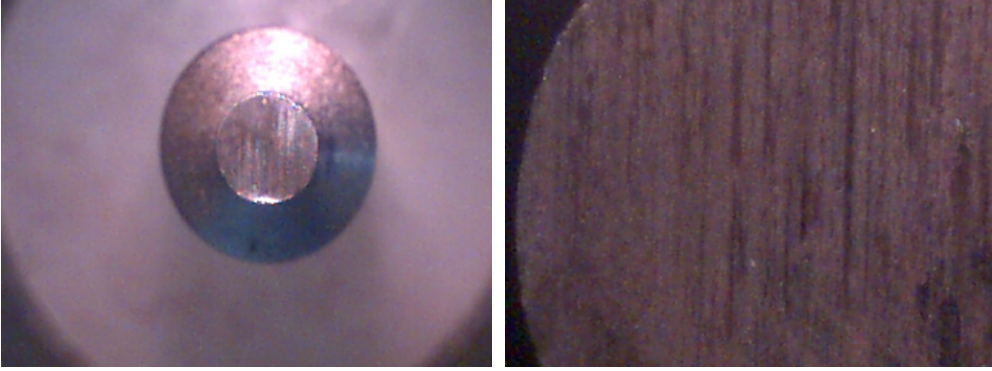
Şekil I.44: AISI 5140 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

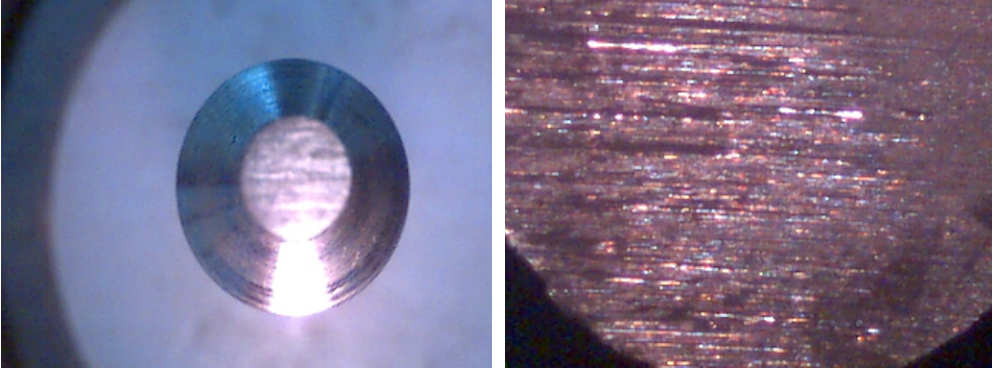
Şekil I.45: AISI 5140 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

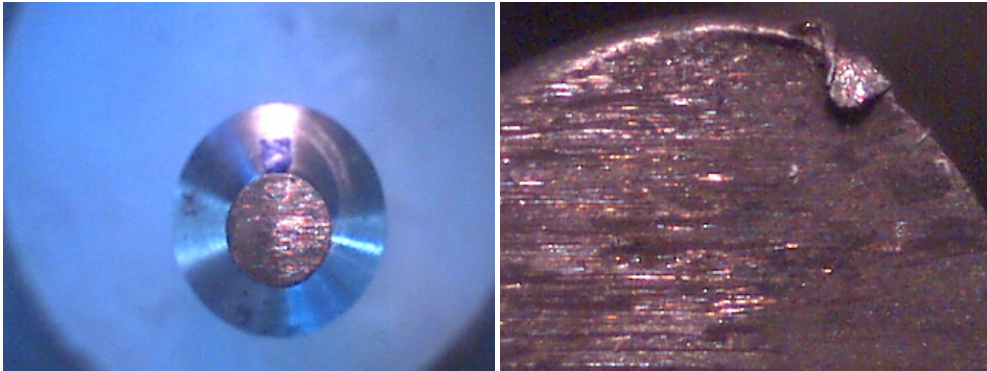
Şekil I.46: AISI 420 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

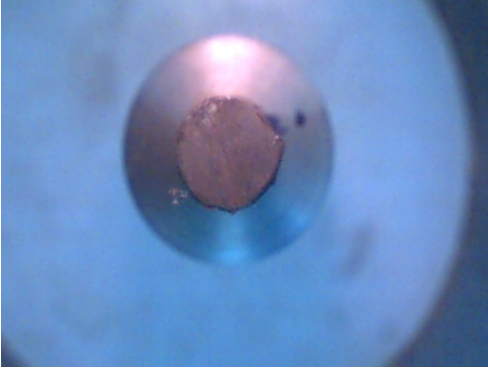
Şekil I.47: AISI 420 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



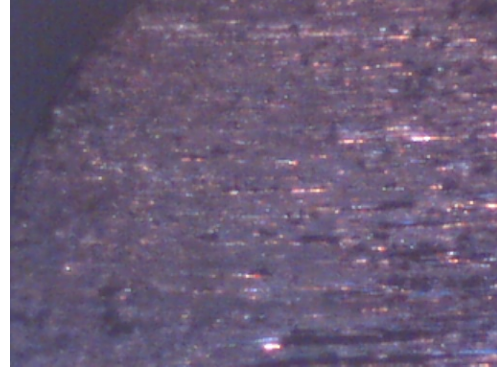
(a)10x

(b)60x

Şekil I.48: AISI 420 Akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 6.000 m.

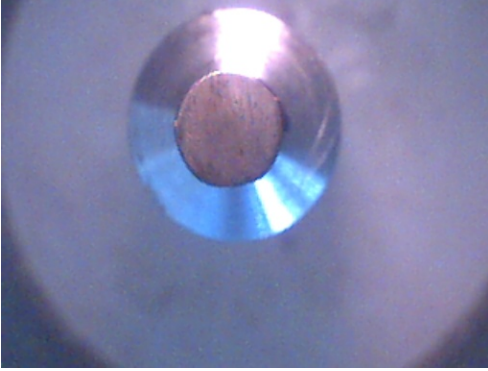


(a)10x

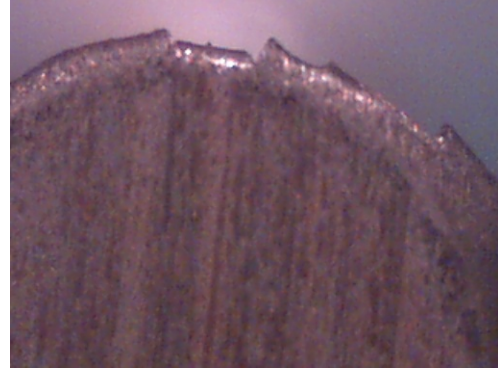


(b)60x

Şekil I.49: AISI 420 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 2.000 m.

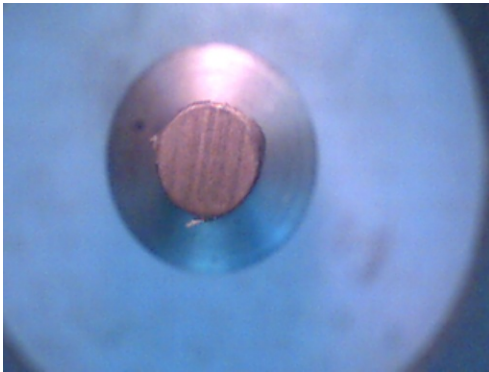


(a)10x

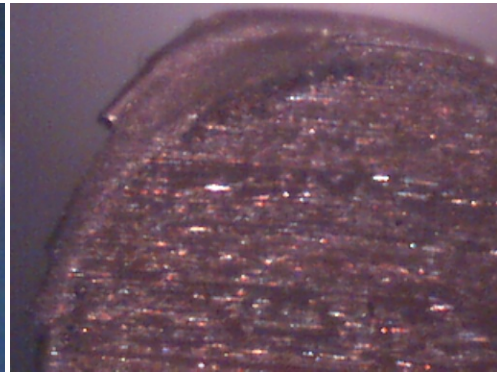


(b)60x

Şekil I.50: AISI 420 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 4.000 m.

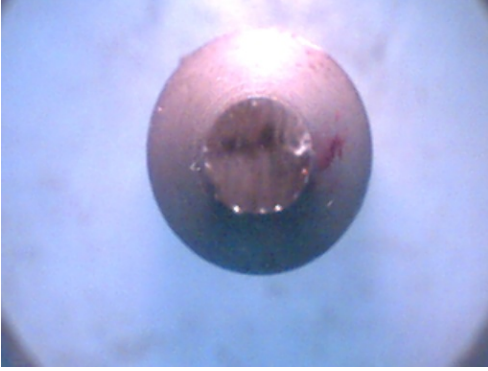


(a)10x



(b)60x

Şekil I.51: AISI 420 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 6.000 m.

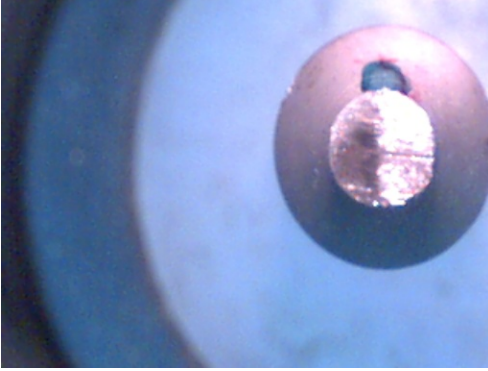


(a)10x

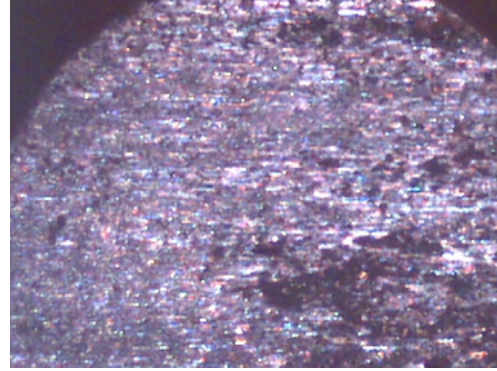


(b)60x

Şekil I.52: AISI 420 Borlanmış kaplı deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

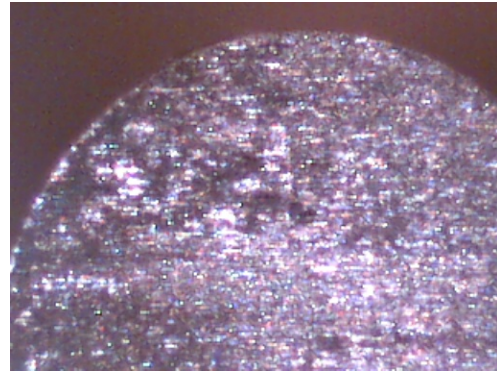


(b)60x

Şekil I.53: AISI 420 Borlanmış kaplı deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x



(b)60x

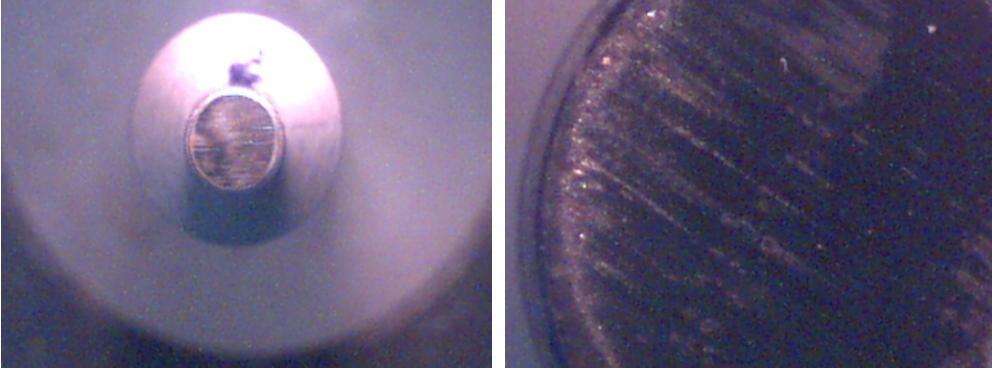
Şekil I.54: AISI 420 Borlanmış kaplı deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

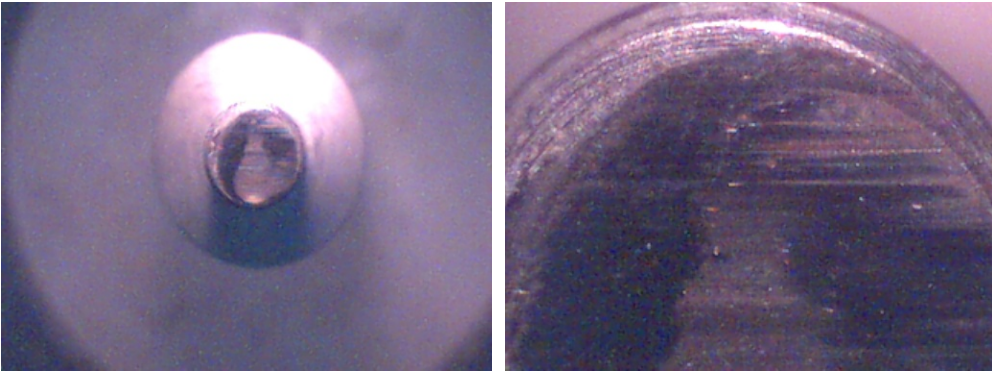
Şekil I.55: AISI 420 Nitrülenmiş deney numunesi görüntüleri 2.000 m.



(a)10x

(b)60x

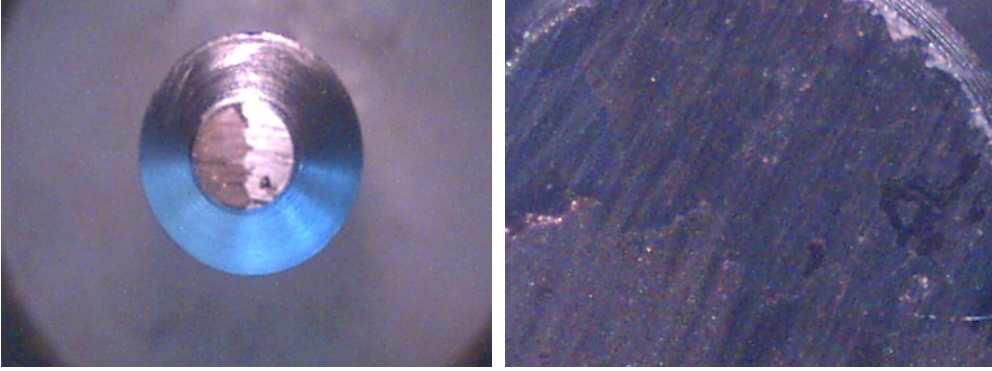
Şekil I.56: AISI 420 Nitrülenmiş deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

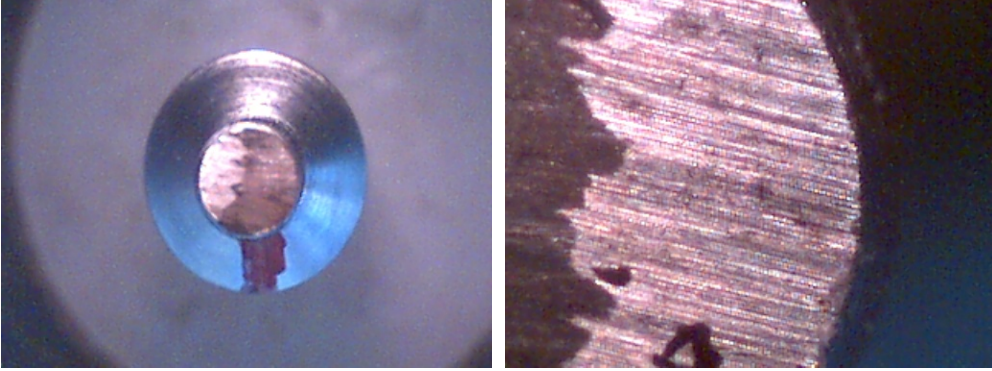
Şekil I.57: AISI 420 Nitrülenmiş deney numunesi görüntüleri 6.000 m.



(a)10x

(b)60x

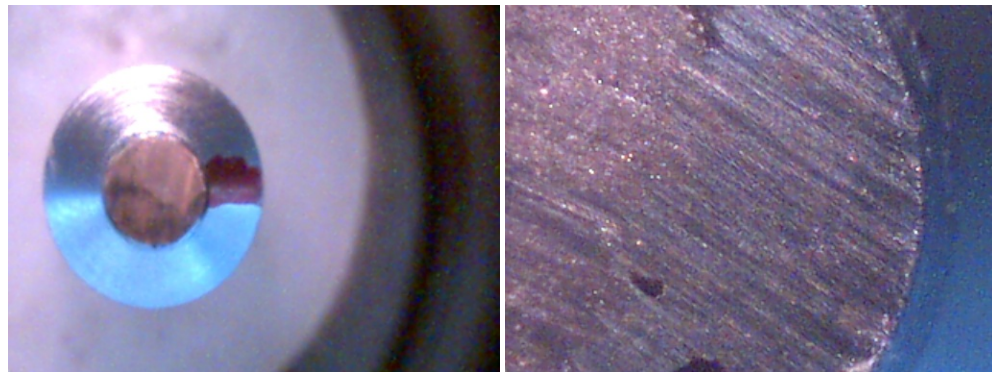
Şekil I.58: AISI 420 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil I.59: AISI 420 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 4.000 m.



(a)10x

(b)60x

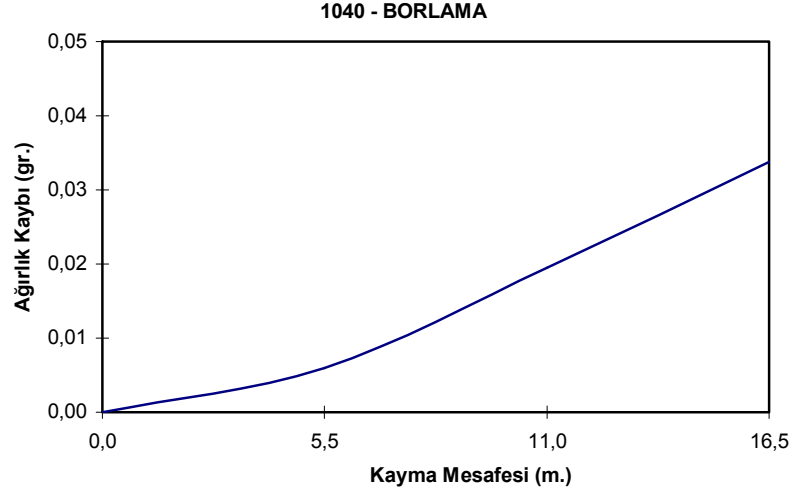
Şekil I.60: AISI 420 Sert krom kaplı deney numunesi görüntüleri 6.000 m.

Ek J. METAL-ABRAZİF AŞINMA DENEY SONUÇ TABLOLARI

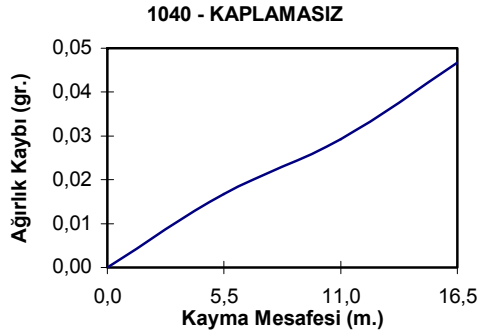
Malzeme Türü	Kaplama Türü	İlk Ağırlık(gr)	5,5m Ağırlık(gr)	Fark 5,5m	11m Ağırlık(gr)	Fark 11m	16,5m Ağırlık(gr)	Fark 16,5m
C1040	Kaplamasız	12,3580	12,3413	0,0167	12,3288	0,0292	12,3113	0,0467
C1040	Ak-Ni	12,4940	12,4793	0,0147	12,4641	0,0299	12,4491	0,0449
C1040	Krom	11,7310	11,7171	0,0139	11,7026	0,0284	11,6880	0,0430
C1040	Nitrür	12,3435	12,3306	0,0129	12,3156	0,0279	12,3004	0,0431
C1040	Bor	12,4226	12,4166	0,0060	12,4031	0,0195	12,3888	0,0338
C4140	Kaplamasız	12,4162	12,4006	0,0156	12,3860	0,0302	12,3712	0,0450
C4140	Ak-Ni	12,4645	12,4495	0,0150	12,4349	0,0296	12,4200	0,0445
C4140	Krom	11,7426	11,7296	0,0130	11,7146	0,0280	11,6994	0,0432
C4140	Nitrür	12,4324	12,4220	0,0104	12,4097	0,0227	12,3969	0,0355
C4140	Bor	12,3930	12,3887	0,0043	12,3770	0,0160	12,3638	0,0292
C5140	Kaplamasız	12,4295	12,4132	0,0163	12,3980	0,0315	12,3818	0,0477
C5140	Ak-Ni	12,5264	12,5105	0,0159	12,4948	0,0316	12,4785	0,0479
C5140	Krom	11,6266	11,6111	0,0155	11,5956	0,0310	11,5804	0,0462
C5140	Nitrür	12,3223	12,3120	0,0103	12,3003	0,0220	12,2874	0,0349
C5140	Bor	12,1007	12,0932	0,0075	12,0790	0,0217	12,0642	0,0365
AISI420	Kaplamasız	12,4036	12,3882	0,0154	12,3731	0,0305	12,3543	0,0493
AISI420	Ak-Ni	12,3848	12,3696	0,0152	12,3551	0,0297	12,3404	0,0444
AISI420	Krom	11,6565	11,6472	0,0093	11,6319	0,0246	11,6171	0,0394
AISI420	Nitrür	12,4360	12,4214	0,0146	12,4065	0,0295	12,3920	0,0440
AISI420	Bor	12,4072	12,3961	0,0111	12,3818	0,0254	12,3671	0,0401

Malzeme Türü	Kaplama Türü	İlk Boy(mm)	5,5m Boy(mm)	Fark 5,5m	11m Boy(mm)	Fark 11m	16,5m Boy(mm)	Fark 16,5m
C1040	Kaplamasız	29,68	29,49	0,1900	29,47	0,21	29,26	0,42
C1040	Ak-Ni	29,8	29,72	0,0800	29,56	0,24	29,45	0,35
C1040	Krom	29,63	29,5	0,1300	29,43	0,2	29,22	0,41
C1040	Nitrür	29,83	29,71	0,1200	29,59	0,24	29,4	0,43
C1040	Bor	29,9	29,84	0,0600	29,65	0,25	29,54	0,36
C4140	Kaplamasız	29,83	29,65	0,1800	29,44	0,39	29,37	0,46
C4140	Ak-Ni	29,85	29,74	0,1100	29,53	0,32	29,4	0,45
C4140	Krom	29,48	29,34	0,1400	29,29	0,19	29,15	0,33
C4140	Nitrür	29,88	29,7	0,1800	29,62	0,26	29,46	0,42
C4140	Bor	29,76	29,71	0,0500	29,58	0,18	29,47	0,29
C5140	Kaplamasız	29,82	29,68	0,1400	29,52	0,3	29,34	0,48
C5140	Ak-Ni	29,94	29,74	0,2000	29,5	0,44	29,35	0,59
C5140	Krom	29,45	29,34	0,1100	29,27	0,18	28,92	0,53
C5140	Nitrür	29,95	29,85	0,1000	29,66	0,29	29,55	0,4
C5140	Bor	29,91	29,83	0,0800	29,64	0,27	29,47	0,44
AISI420	Kaplamasız	29,96	29,84	0,1200	29,7	0,26	29,55	0,41
AISI420	Ak-Ni	29,86	29,65	0,2100	29,59	0,27	29,43	0,43
AISI420	Krom	29,97	29,9	0,0700	29,71	0,26	29,6	0,37
AISI420	Nitrür	29,98	29,9	0,0800	29,7	0,28	29,54	0,44
AISI420	Bor	29,89	29,82	0,0700	29,68	0,21	29,51	0,38

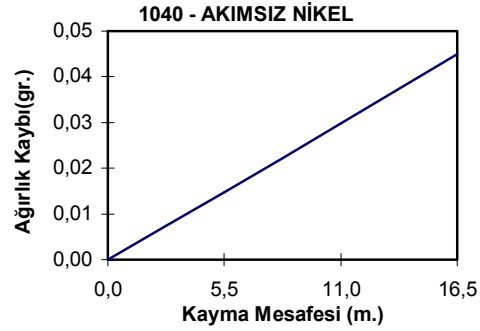
Ek K. 16.5 m KAYMA MESAFESİNDE ABRAZİF AŞINMA DENEY NUMUNELERİNDE GÖRÜLEN AĞIRLIK KAYBI GRAFİKLERİ



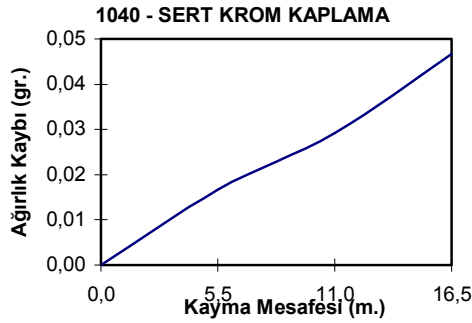
Şekil K.1: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



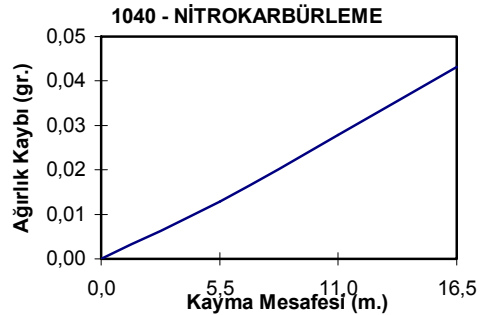
Şekil K.2: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



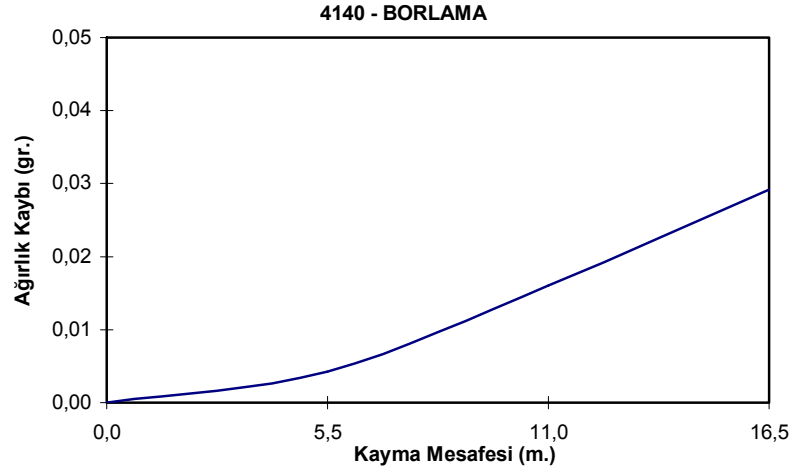
Şekil K.3: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



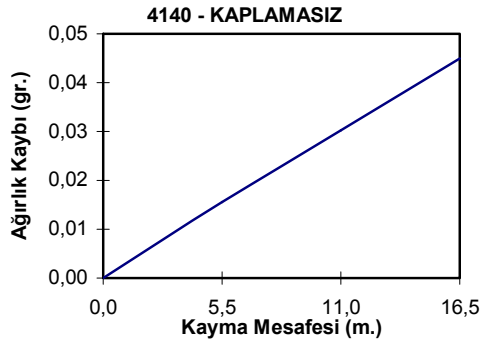
Şekil K.4: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



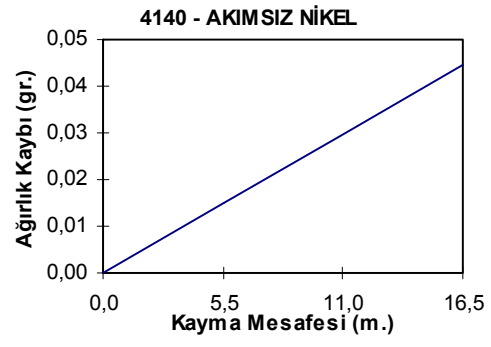
Şekil K.5: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



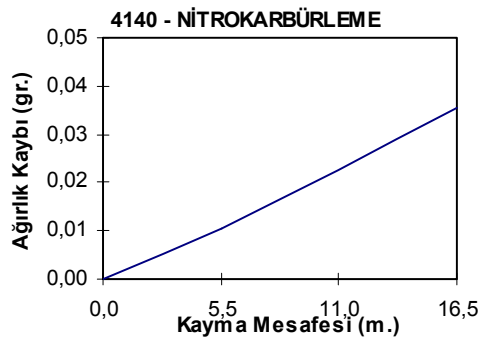
Şekil K.6: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



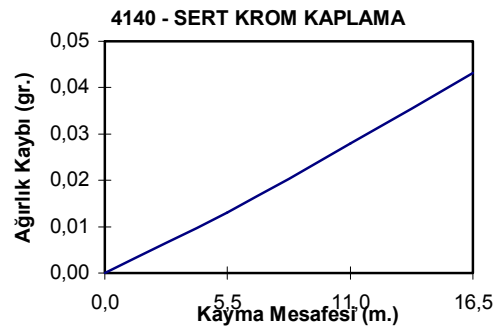
Şekil K.7: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



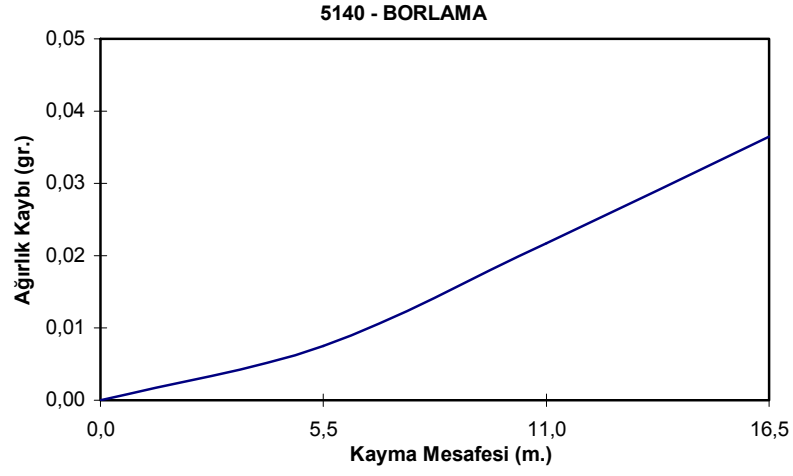
Şekil K.8: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



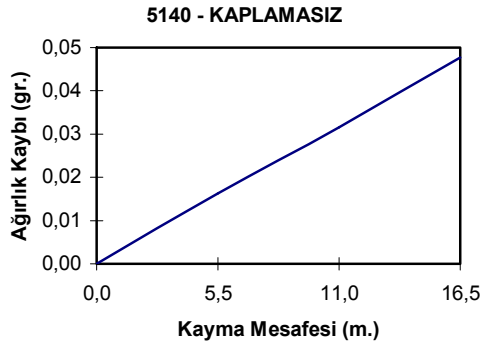
Şekil K.9: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



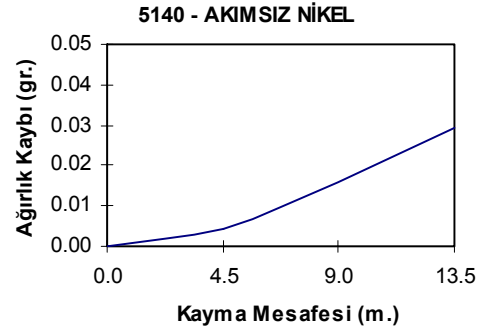
Şekil K.10: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



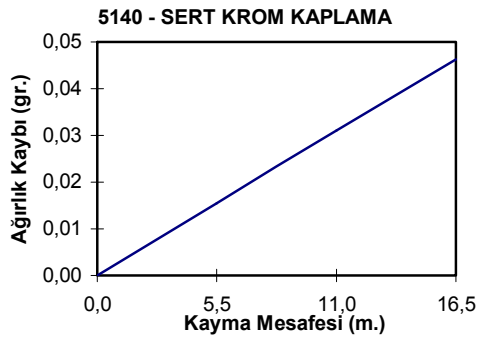
Şekil K.11: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



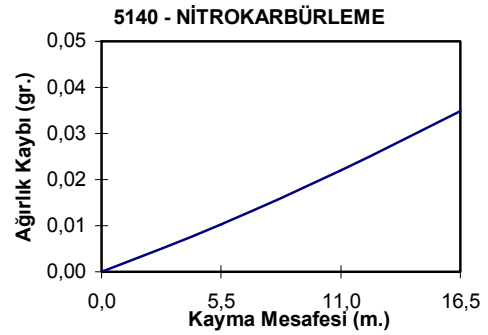
Şekil K.12: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



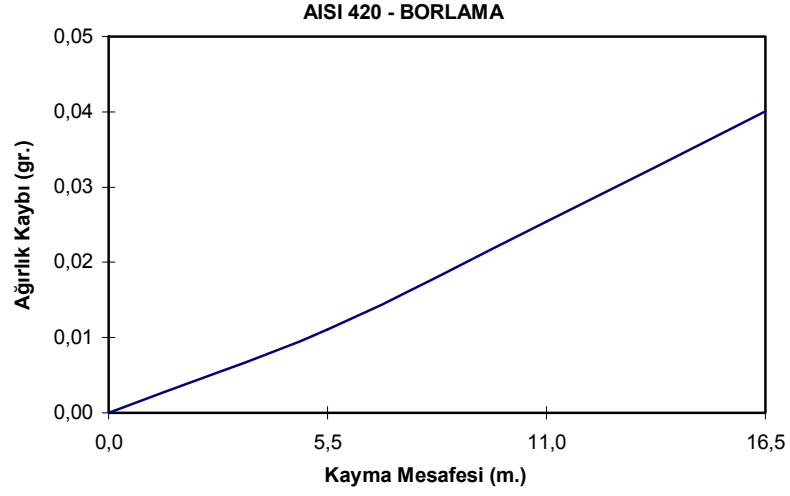
Şekil K.13: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



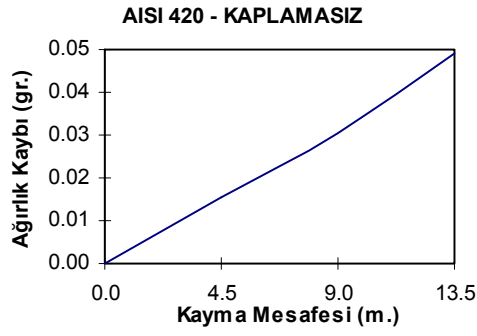
Şekil K.14: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



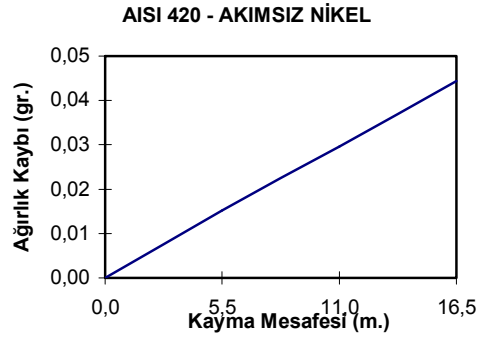
Şekil K.15: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



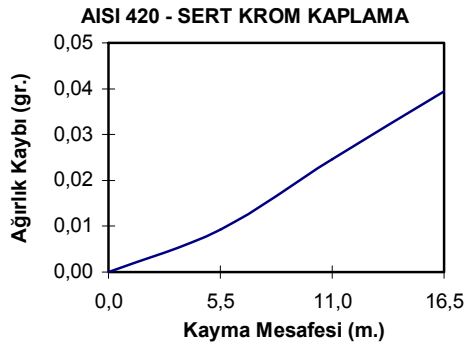
Şekil K.16: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



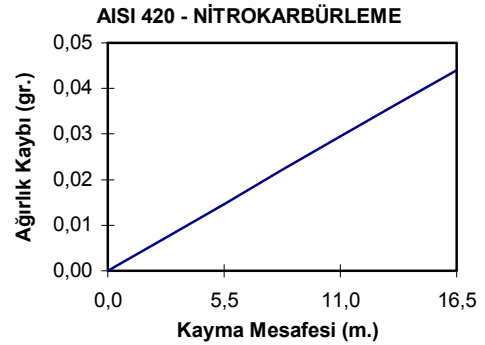
Şekil K.17: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.



Şekil K.18: Kayma mesafesi (m)-Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

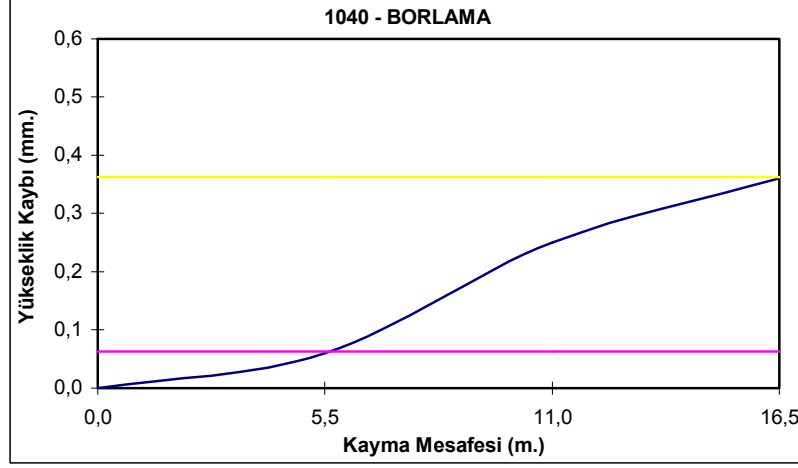


Şekil K.19: Kayma mesafesi (m)-kaybı (gr) grafiği.

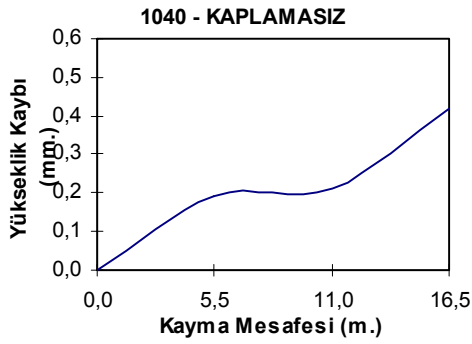


Şekil K.20: Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği.

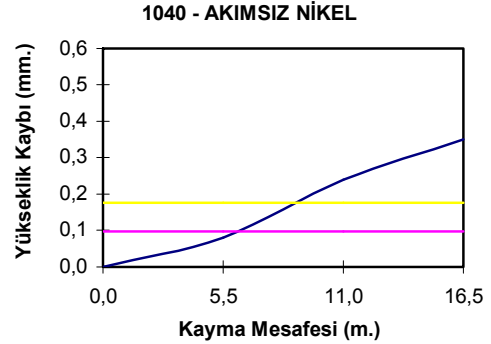
Ek L. 16.5 m KAYMA MESAFESİNDE ABRASİVE AŞINMA DENEY NUMUNELERİNDE GÖRÜLEN YÜKSEKLİK KAYBI GRAFİKLERİ



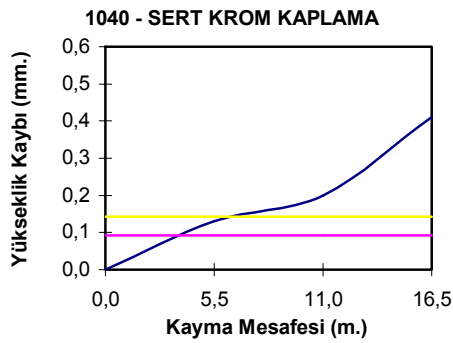
Şekil L. 1: Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.



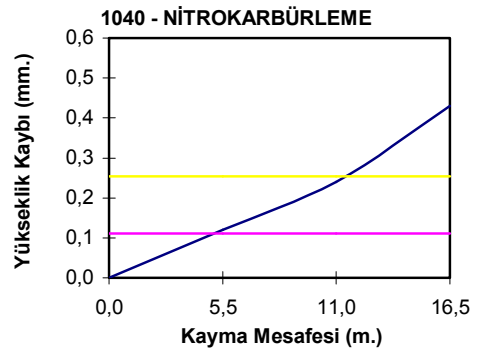
Şekil L.2: Kayma mesafesi (m)-kaybı (mm) grafiği.



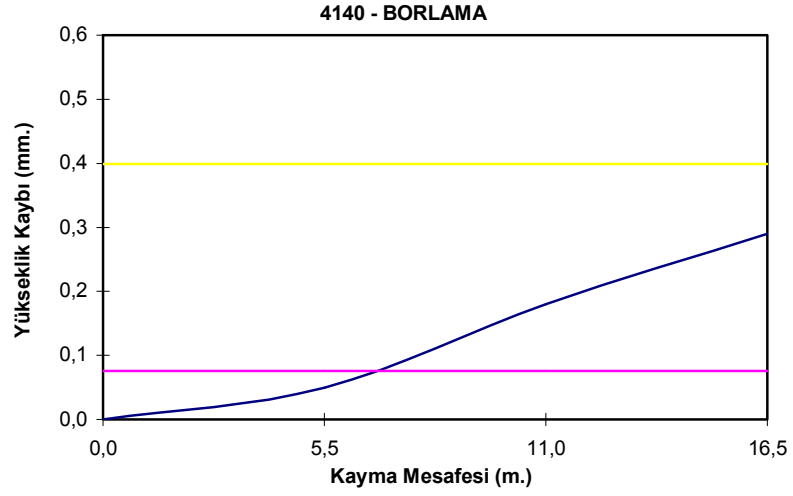
Şekil L.3: Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.



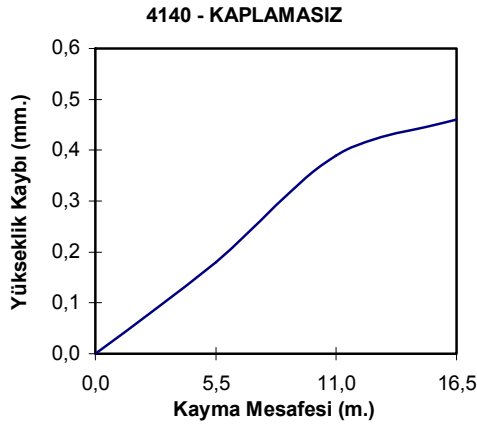
Şekil L.4: Kayma mesafesi (m)-kaybı (mm) grafiği.



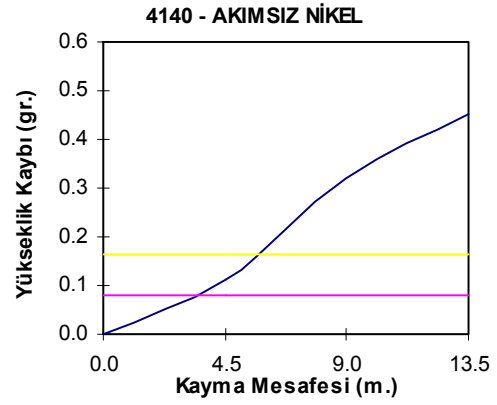
Şekil L.5: Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.



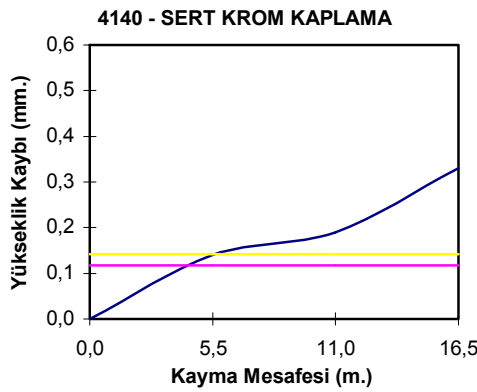
Şekil L. 6: Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği.



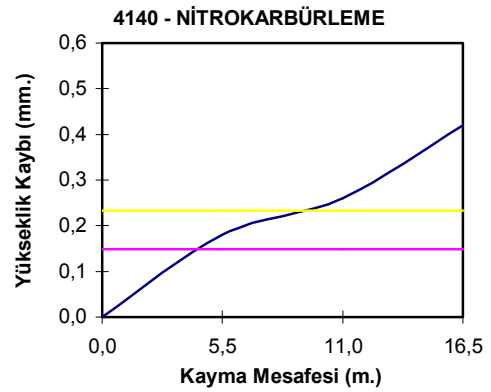
Şekil L.7: Kayma mesafesi (m)- kaybı (mm) grafiği.



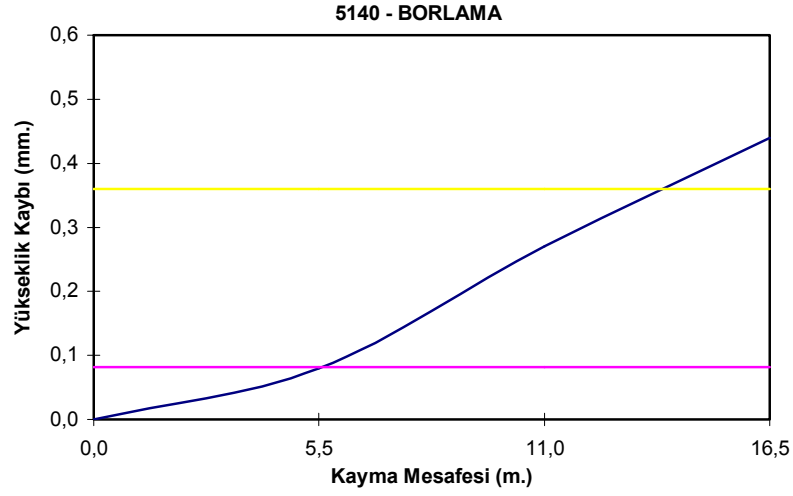
Şekil L.8: Kayma mesafesi (m)- Yükseklik Yükseklik kaybı (mm) grafiği.



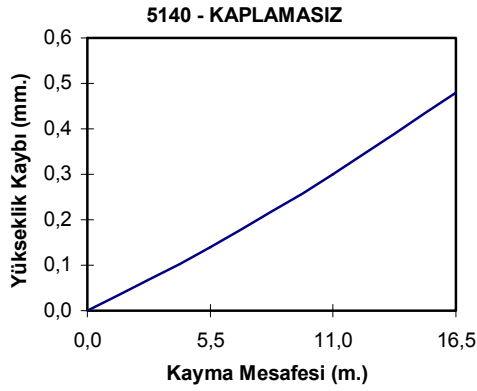
Şekil L.9: Kayma mesafesi (m)- kaybı (mm) grafiği.



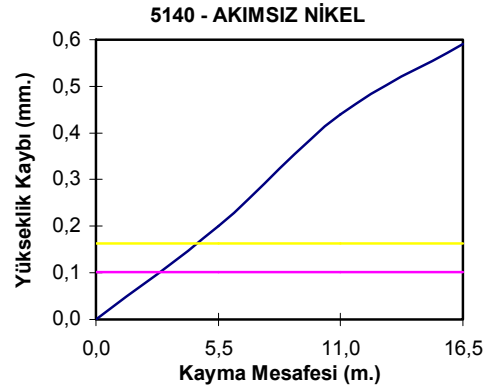
Şekil L.10: Kayma mesafesi (m) Yükseklik Yükseklik kaybı (mm) grafiği.



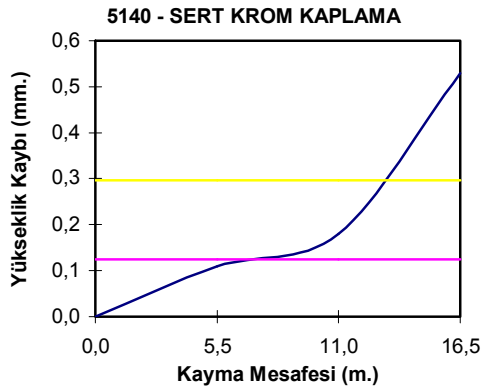
Şekil L. 11: Kayma mesafesi (m)-Yükseklik kaybı (mm) grafiği.



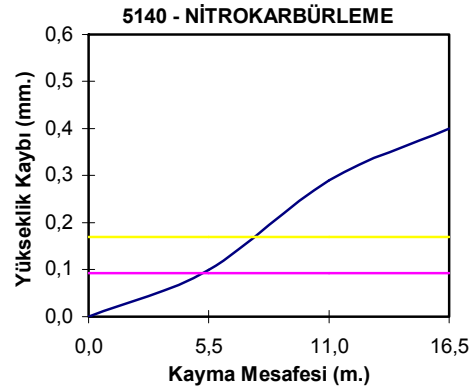
Şekil L.12: Kayma mesafesi (m)-kaybı (mm) grafiği.



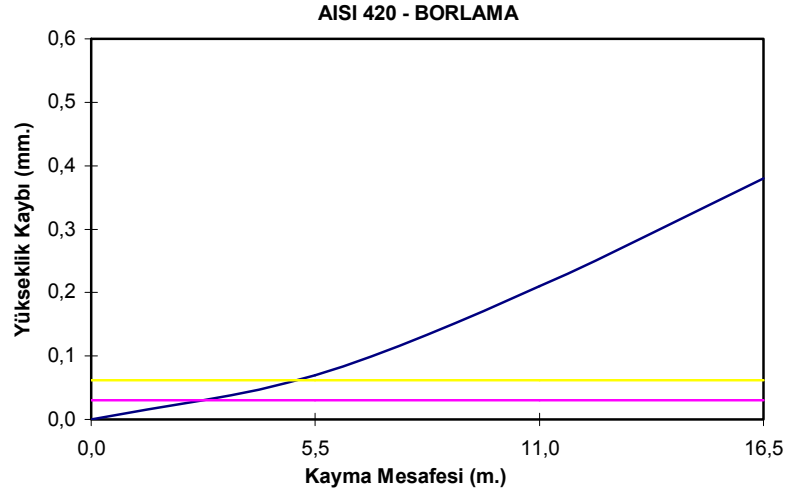
Şekil L.13: Kayma mesafesi (m)-Yükseklik Yükseklik kaybı (mm) grafiği.



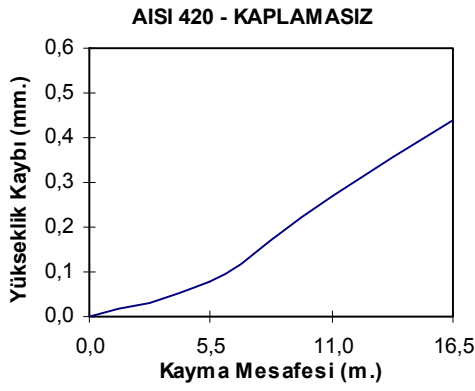
Şekil L.14: Kayma mesafesi (m)-kaybı (mm) grafiği.



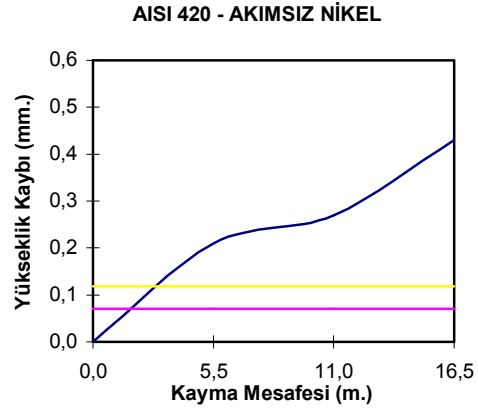
Şekil L.15: Kayma mesafesi (m)- Yükseklik Yükseklik kaybı (mm) grafiği.



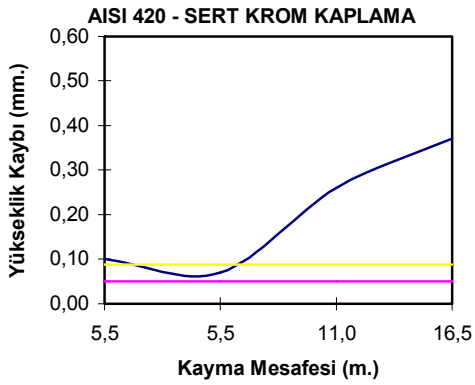
Şekil L. 16: Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği.



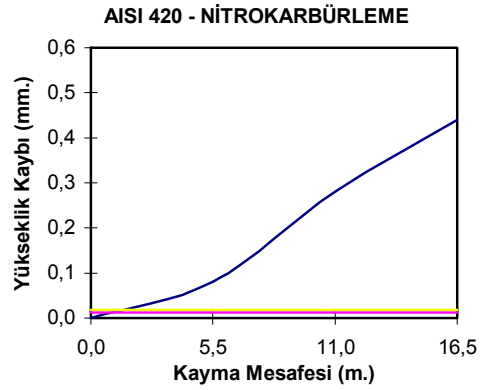
Şekil L.17: Kayma mesafesi (m)- kaybı (mm) grafiği.



Şekil L.18: Kayma mesafesi (m) Yükseklik kaybı (mm) grafiği.

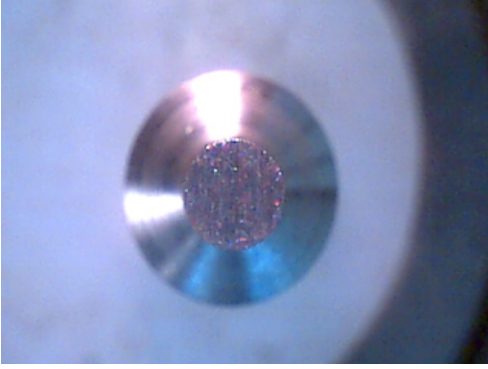


Şekil L.19: Kayma mesafesi (m)- kaybı (mm) grafiği.

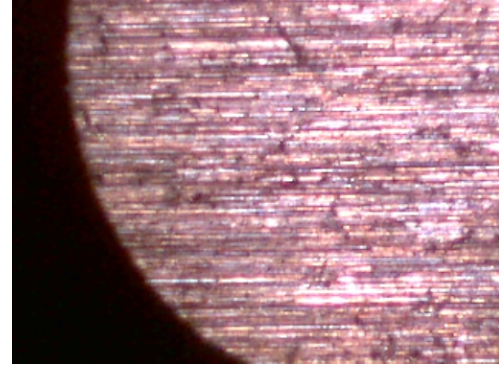


Şekil L.20: Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği.

Ek M. ABRAZİF AŞINMA DENEY NUMUNELERİNDE 5.5 – 11 – 16.5 m KAYMA MESAFELERİNDE 10x ve 60x BÜYÜTMELERDE GÖRÜLEN YÜZEY FOTOĞRAFLARI

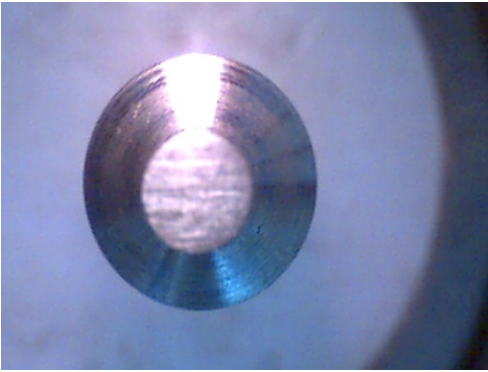


(a)10x

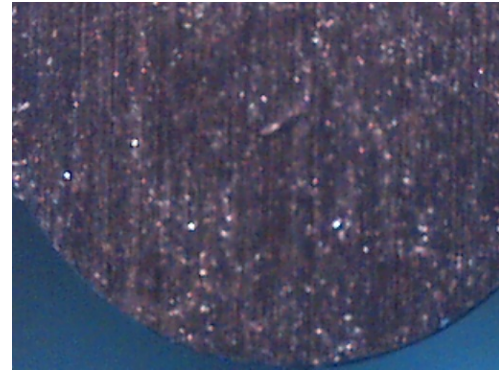


(b)60x

Şekil M.1: AISI 1040 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.

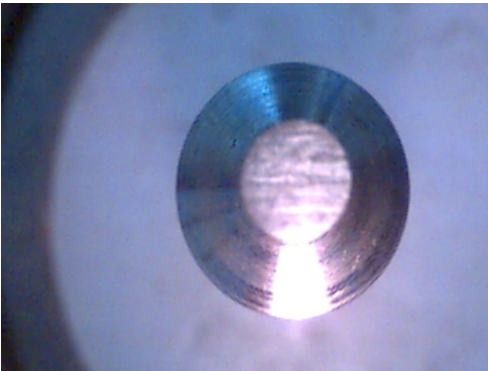


(a)10x

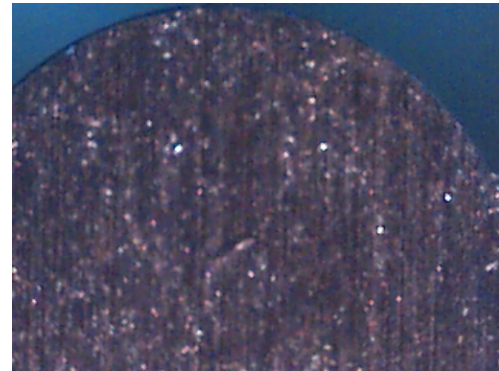


(b)60x

Şekil M.2: AISI 1040 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.

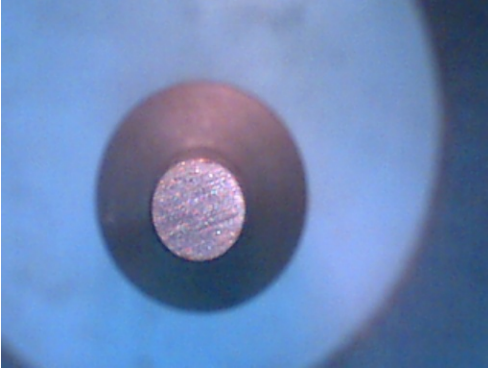


(a)10x

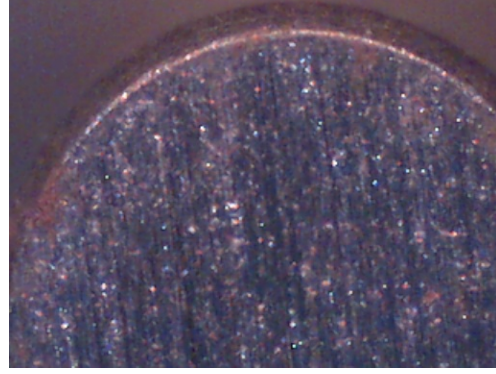


(b)60x

Şekil M.3: AISI 1040 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m.

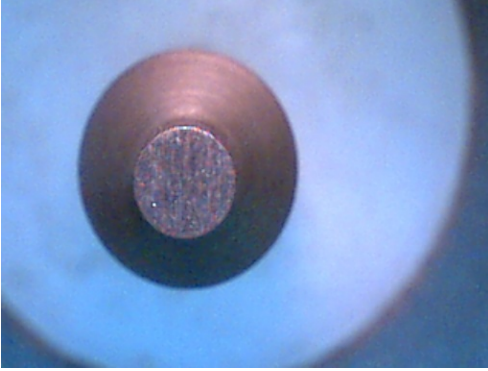


(a)10x

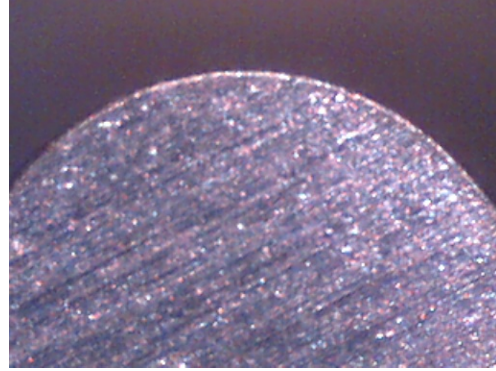


(b)60x

Şekil M.4: AISI 1040 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 5.5 m.

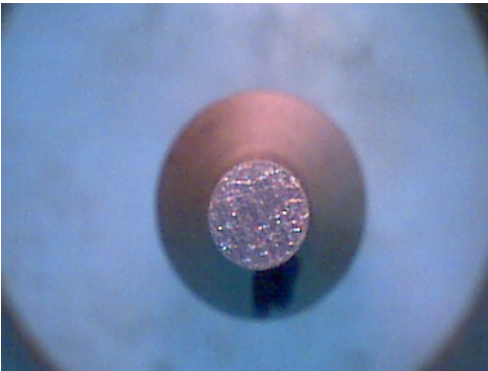


(a)10x

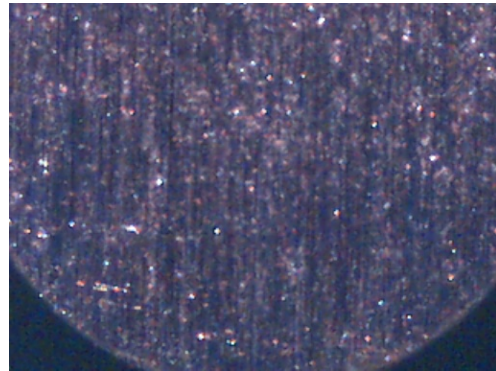


(b)60x

Şekil M.5: AISI 1040 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 11 m.

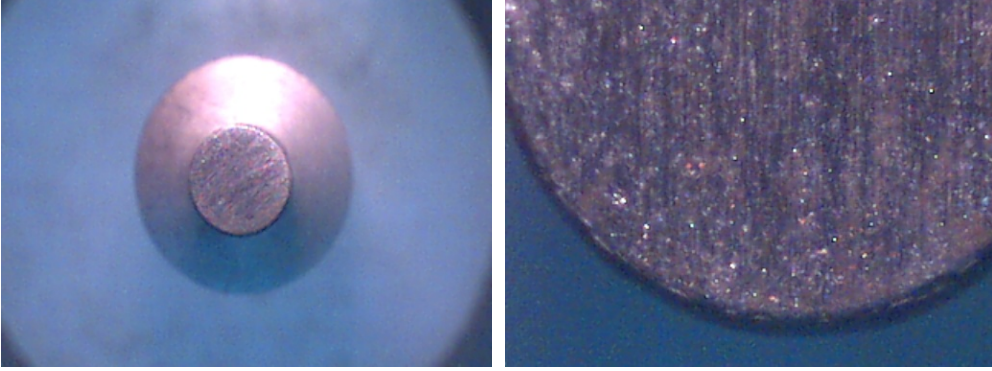


(a)10x



(b)60x

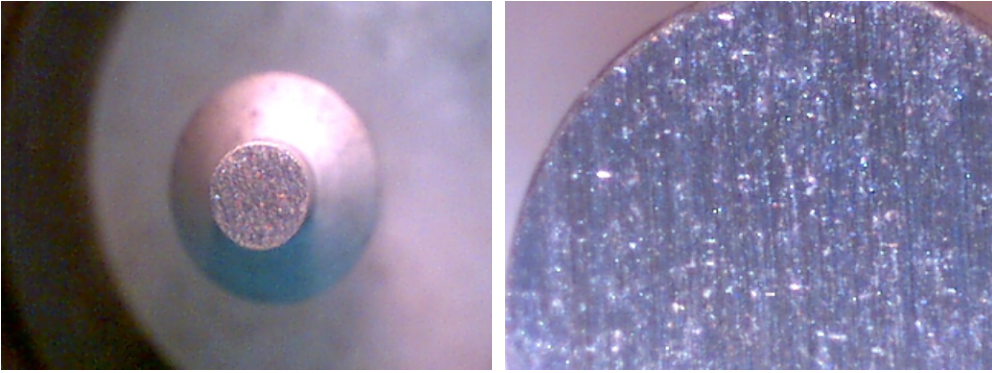
Şekil M.6: AISI 1040 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 16.5 m.



(a)10x

(b)60x

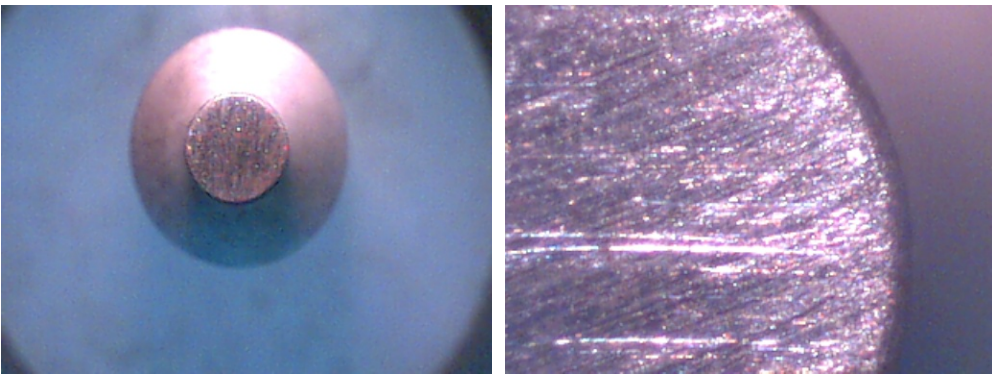
Şekil M.7: AISI 1040 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.



(a)10x

(b)60x

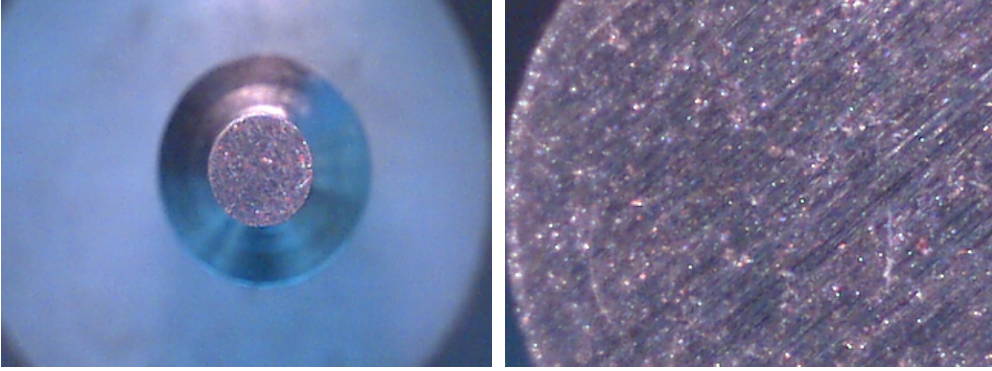
Şekil M.8: AISI 1040 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.



(a)10x

(b)60x

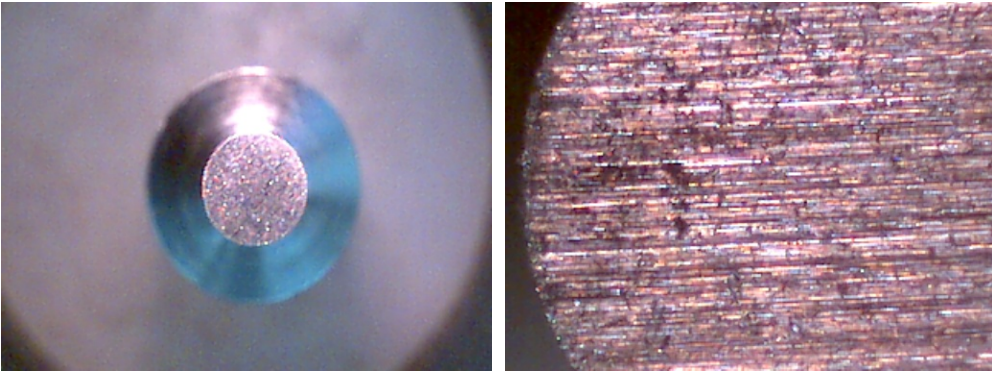
Şekil M.9: AISI 1040 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m.



(a)10x

(b)60x

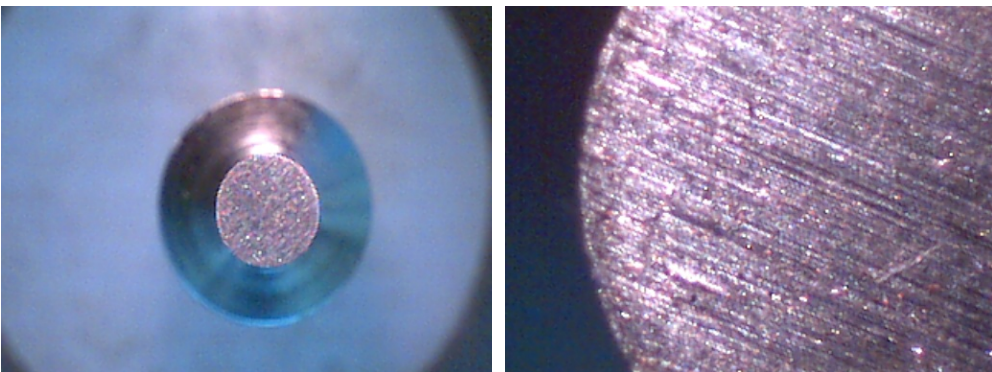
Şekil M.10: AISI 1040 Sert Krom kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.



(a)10x

(b)60x

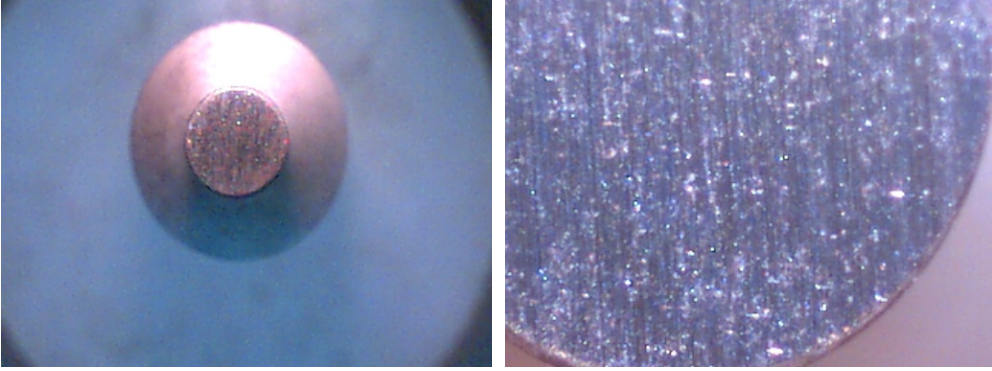
Şekil M.11: AISI 1040 Sert Krom kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.



(a)10x

(b)60x

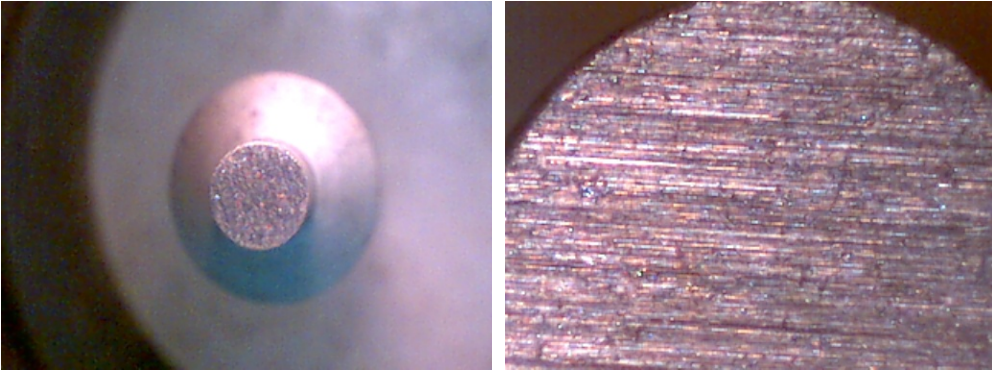
Şekil M.12: AISI 1040 Sert Krom kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m.



(a)10x

(b)60x

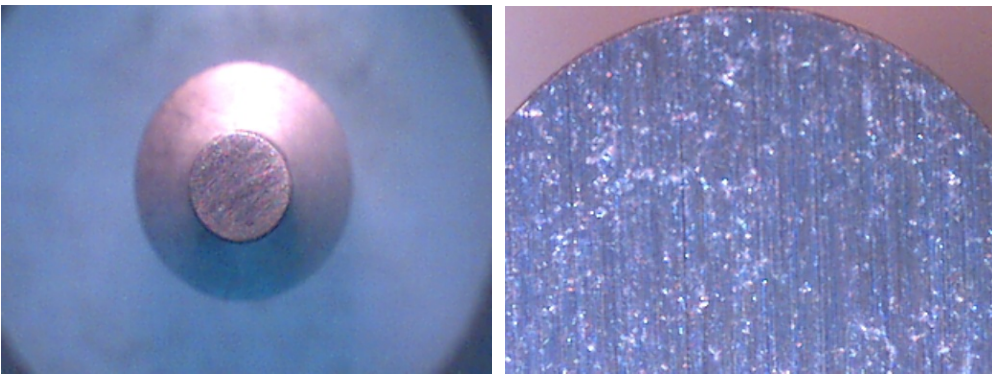
Şekil M.13: AISI 1040 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 5.5 m.



(a)10x

(b)60x

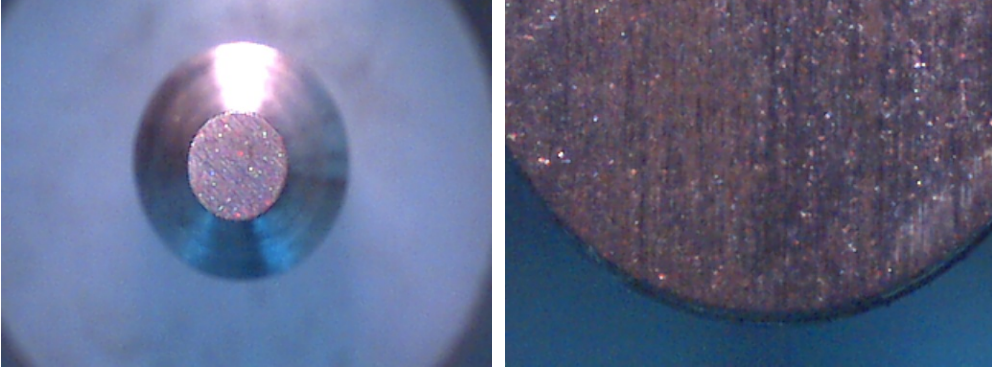
Şekil M.14: AISI 1040 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 11 m.



(a)10x

(b)60x

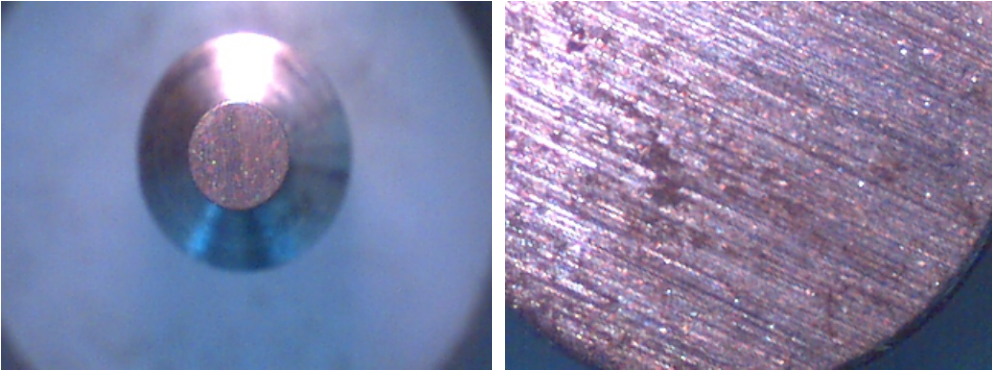
Şekil M.15: AISI 1040 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 16.5 m.



(a)10x

(b)60x

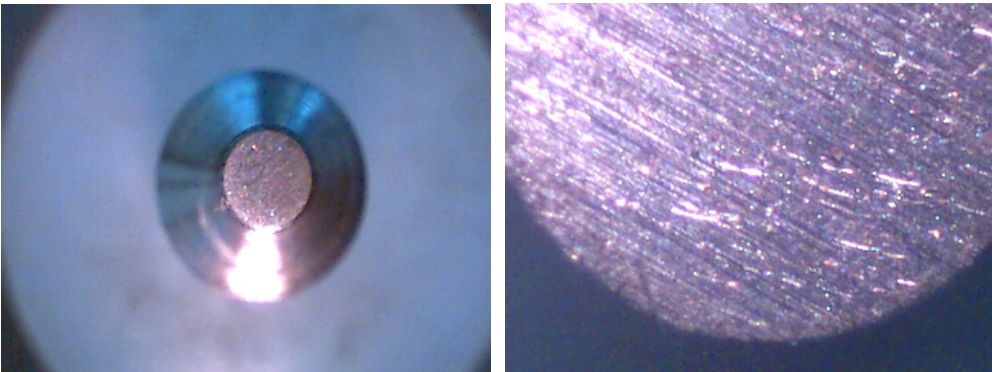
Şekil M.16: AISI 4140 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil M.17: AISI 4140 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.



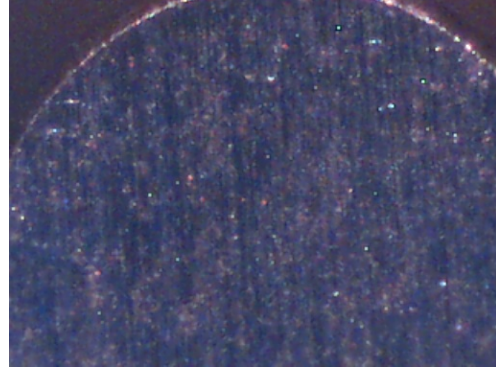
(a)10x

(b)60x

Şekil M.18: AISI 4140 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m.

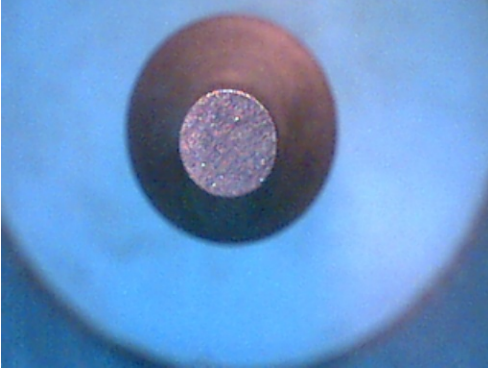


(a)10x



(b)60x

Şekil M.19: AISI 4140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 5.5 m.

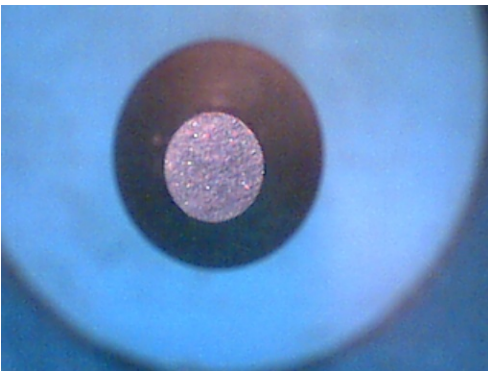


(a)10x

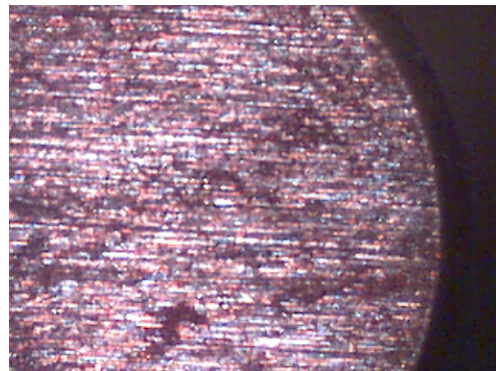


(b)60x

Şekil M.20: AISI 4140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 11 m.



(a)10x



(b)60x

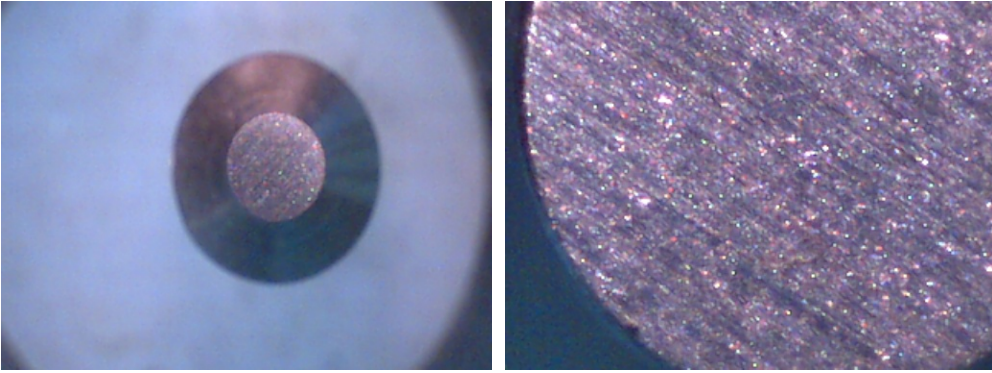
Şekil M.21: AISI 4140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 16.5 m.



(a)10x

(b)60x

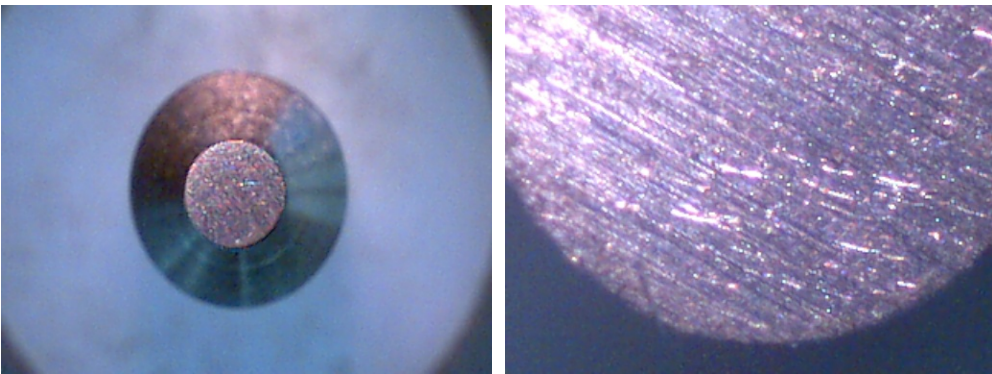
Şekil M.22: AISI 4140 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil M.23: AISI 4140 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.



(a)10x

(b)60x

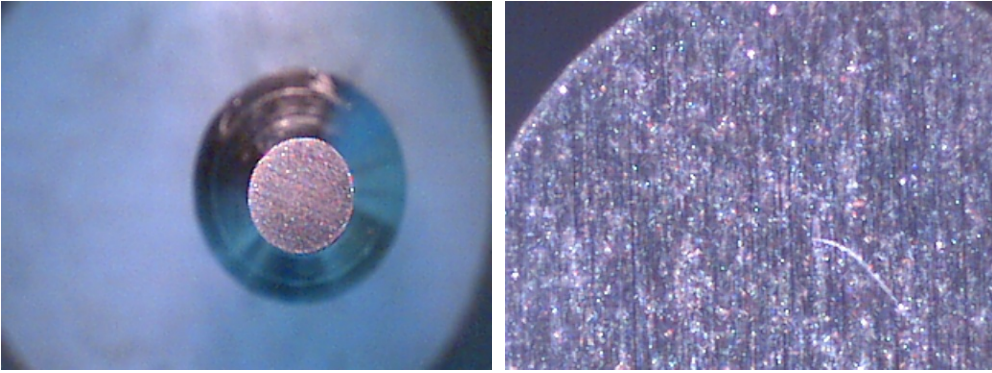
Şekil M.24: AISI 4140 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m.



(a)10x

(b)60x

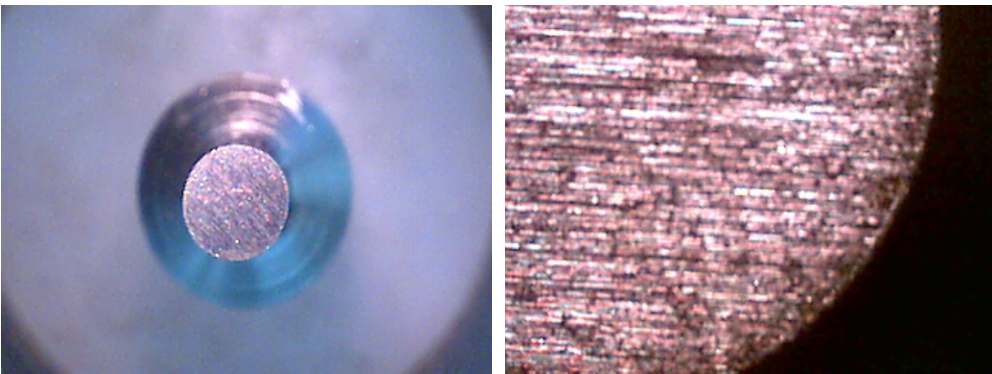
Şekil M.25: AISI 4140 Sert Krom kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.



(a)10x

(b)60x

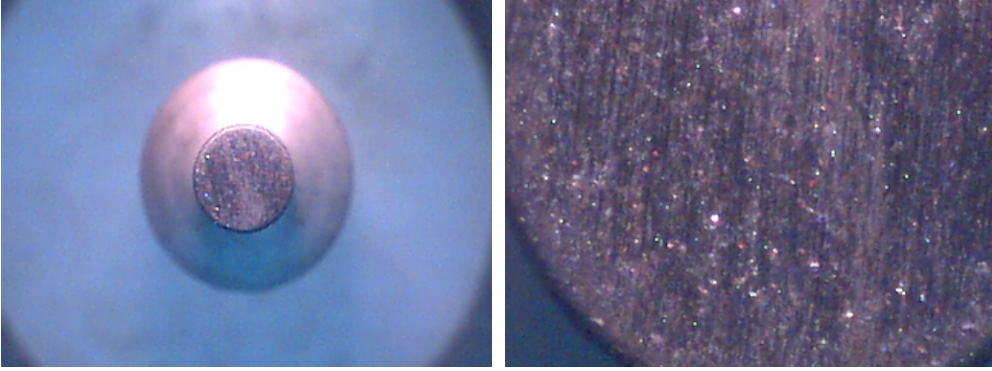
Şekil M.26: AISI 4140 Sert Krom kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil M.27: AISI 4140 Sert Krom kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m.



(a)10x

(b)60x

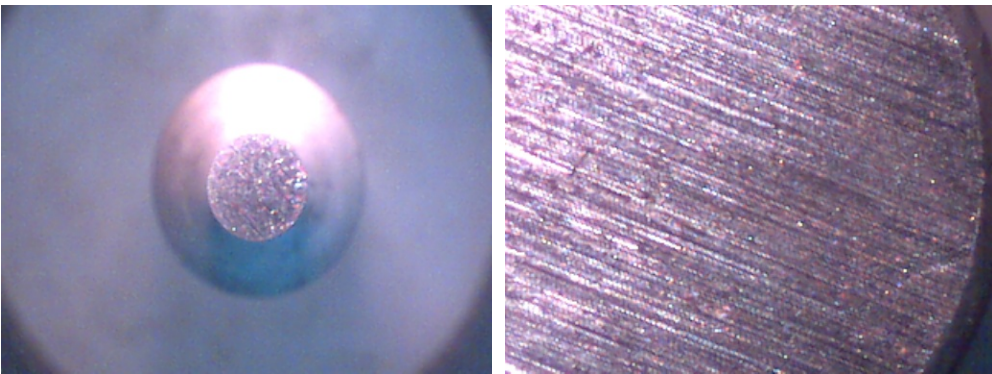
Şekil M.28: AISI 4140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 5.5 m



(a)10x

(b)60x

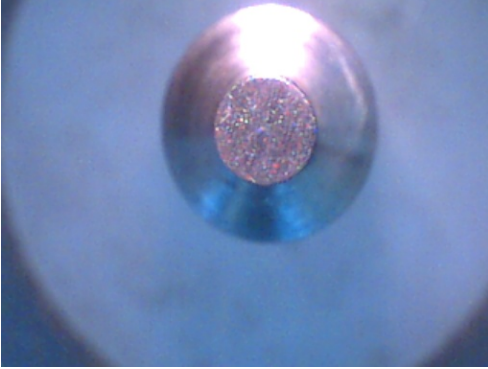
Şekil M.29: AISI 4140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 11 m



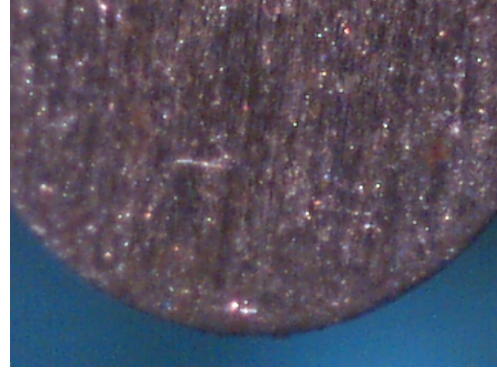
(a)10x

(b)60x

Şekil M.30: AISI 4140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 16.5 m

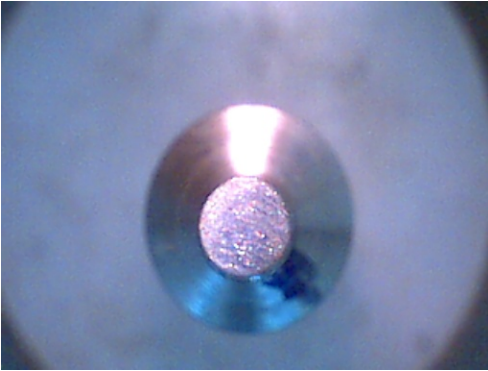


(a)10x

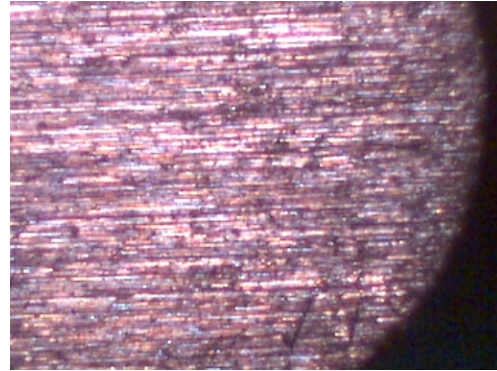


(b)60x

Şekil M.31: AISI 5140 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.

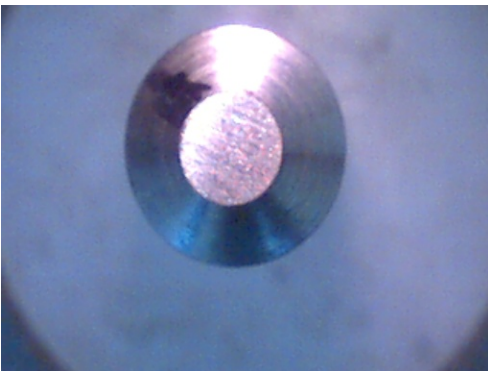


(a)10x

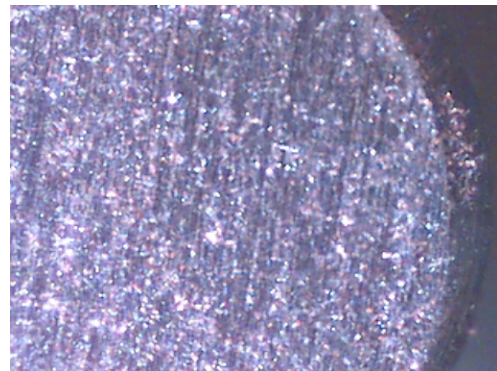


(b)60x

Şekil M.32: AISI 5140 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.



(a)10x

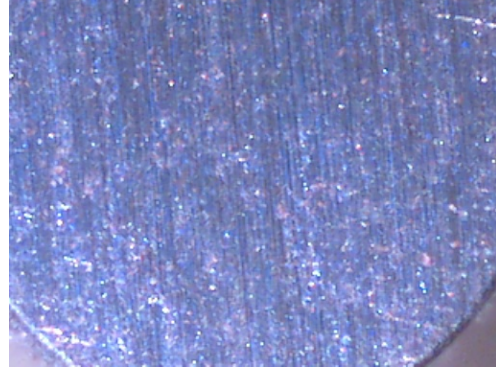


(b)60x

Şekil M.33: AISI 5140 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m.

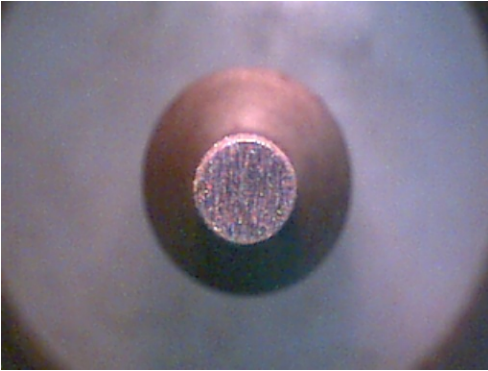


(a)10x



(b)60x

Şekil M.34: AISI 5140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 5.5 m.

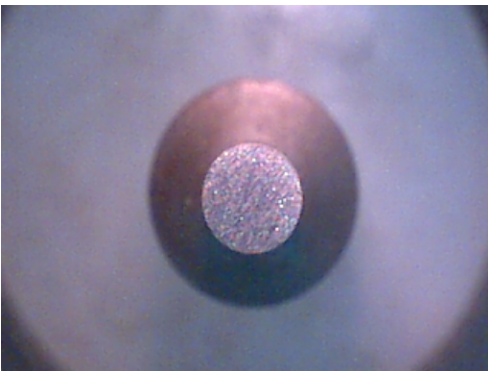


(a)10x

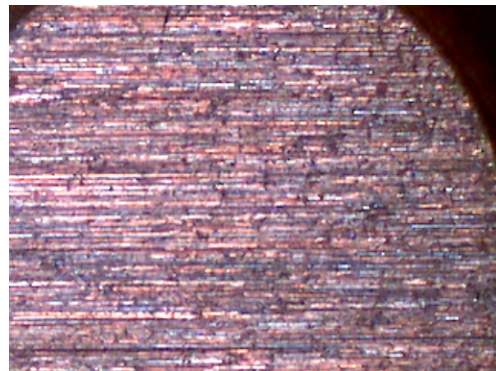


(b)60x

Şekil M.35: AISI 5140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 11 m.

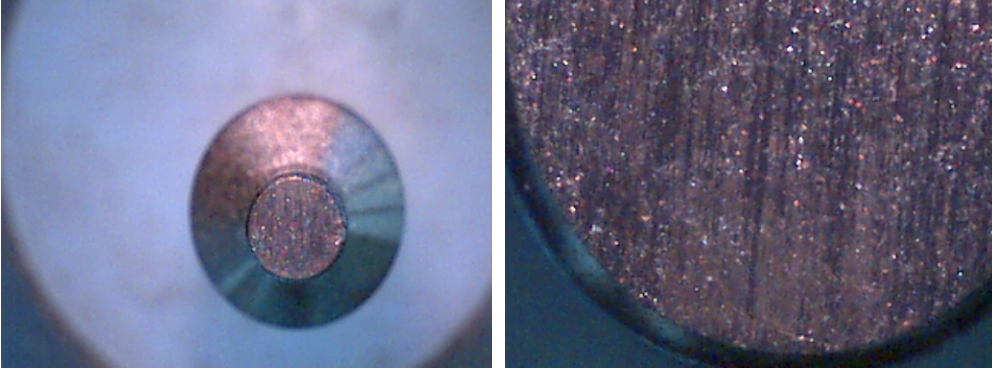


(a)10x



(b)60x

Şekil M.36: AISI 5140 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 16.5 m.



(a)10x

(b)60x

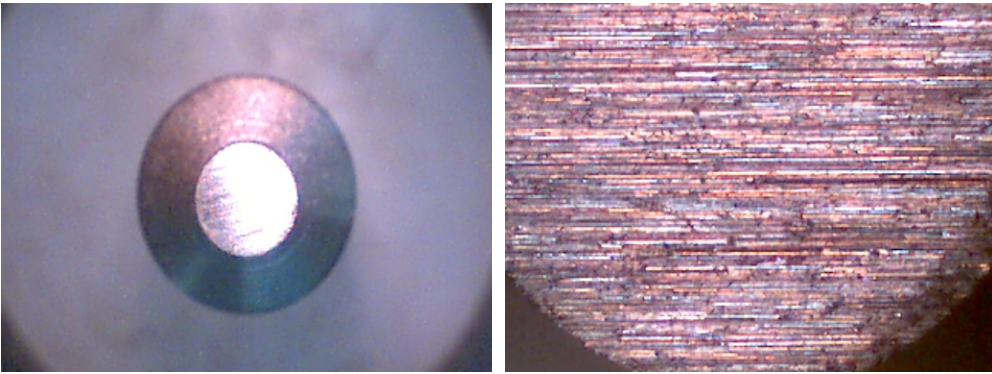
Şekil M.37: AISI 5140 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil M.38: AISI 5140 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil M.39: AISI 5140 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m.

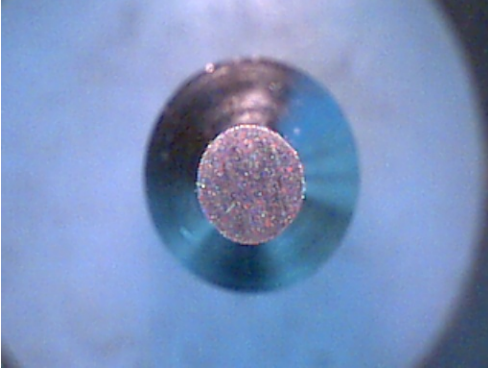


(a)10x

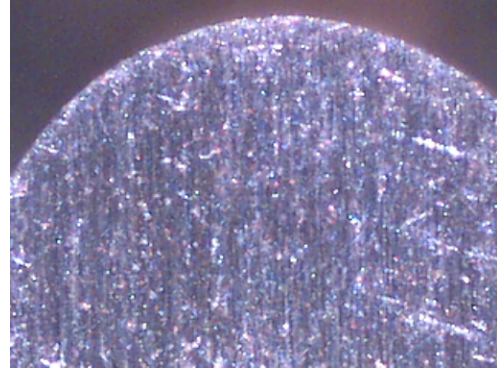


(b)60x

Şekil M.40: AISI 5140 Sert Krom kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.

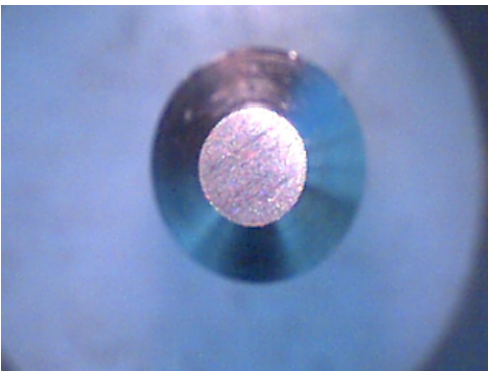


(a)10x

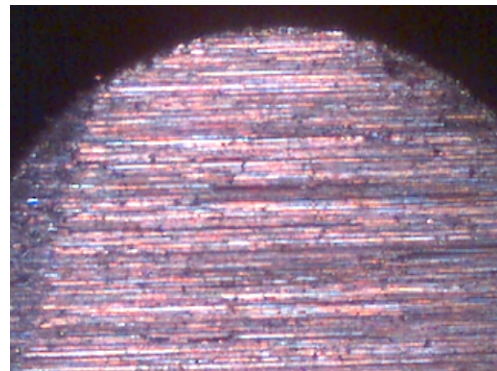


(b)60x

Şekil M.41: AISI 5140 Sert Krom kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.

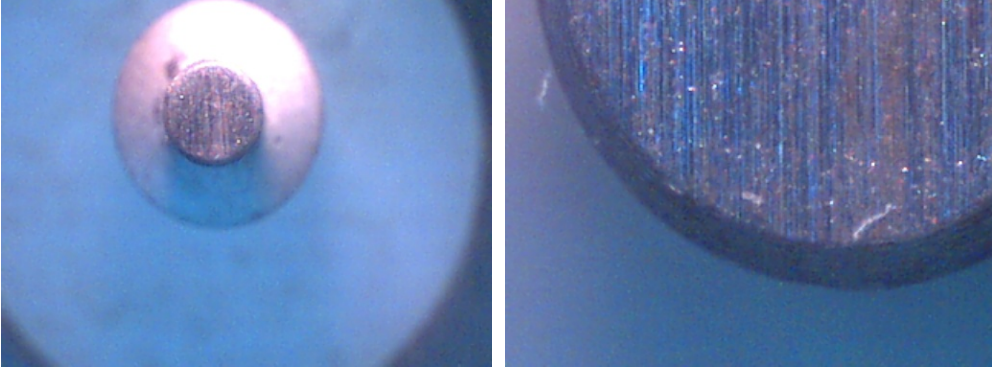


(a)10x



(b)60x

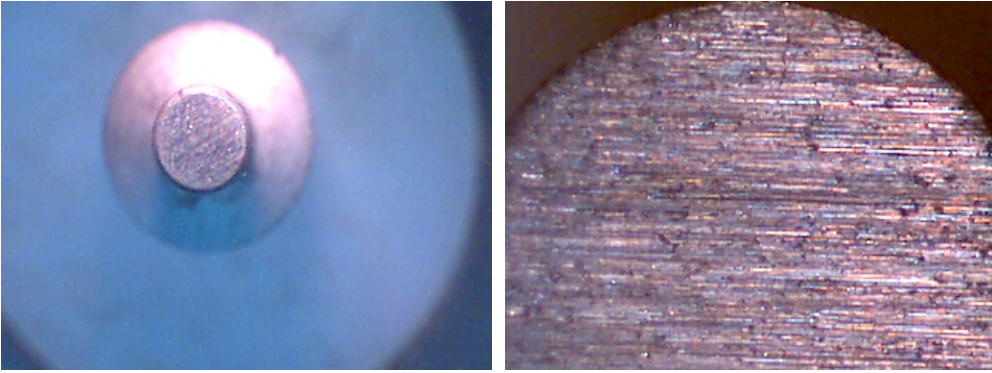
Şekil M.42: AISI 5140 Sert Krom kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m.



(a)10x

(b)60x

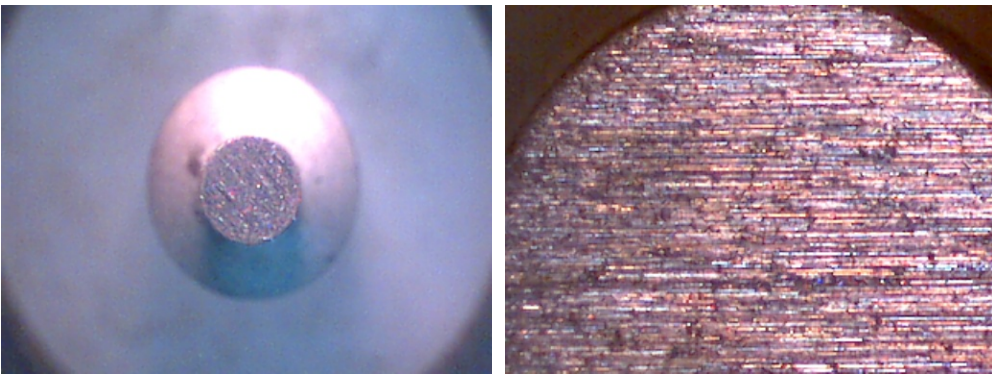
Şekil M.43: AISI 5140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 5.5 m



(a)10x

(b)60x

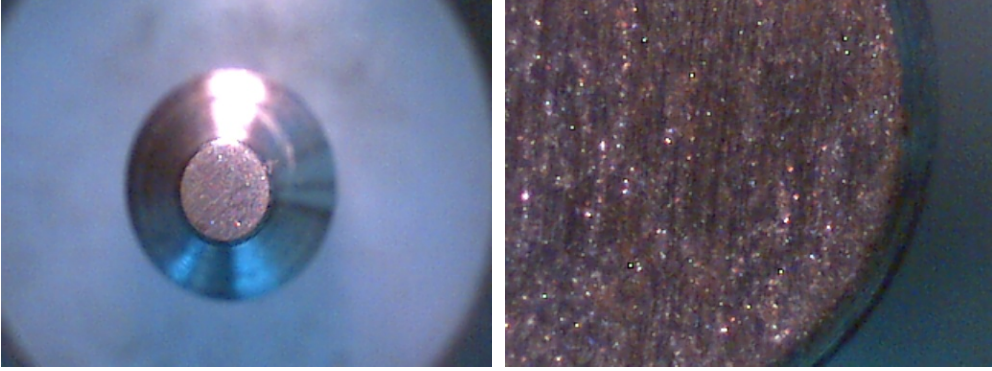
Şekil M.44: AISI 5140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 11 m



(a)10x

(b)60x

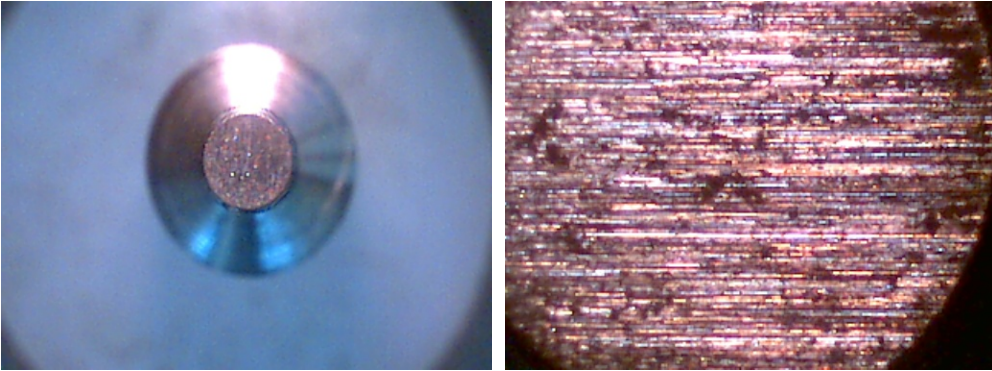
Şekil M.45: AISI 5140 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 16.5 m



(a)10x

(b)60x

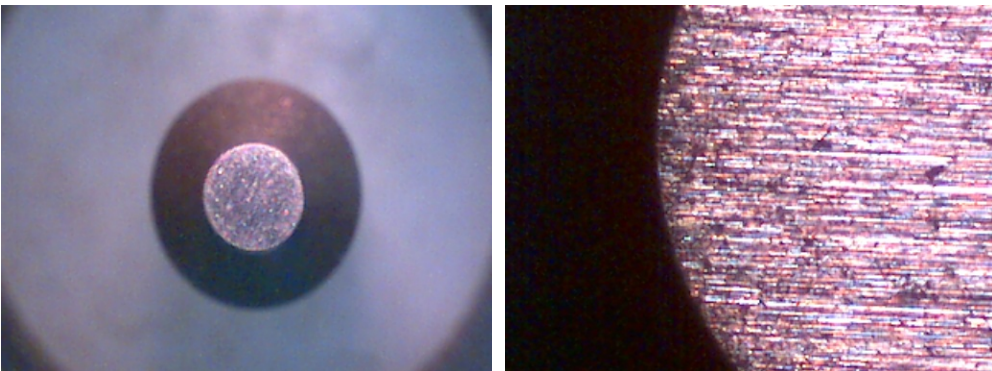
Şekil M.46: AISI 420 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.



(a)10x

(b)60x

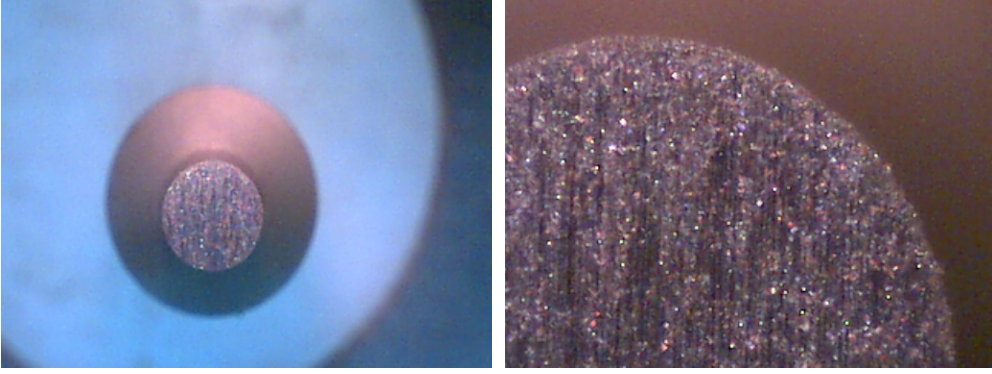
Şekil M.47: AISI 420 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.



(a)10x

(b)60x

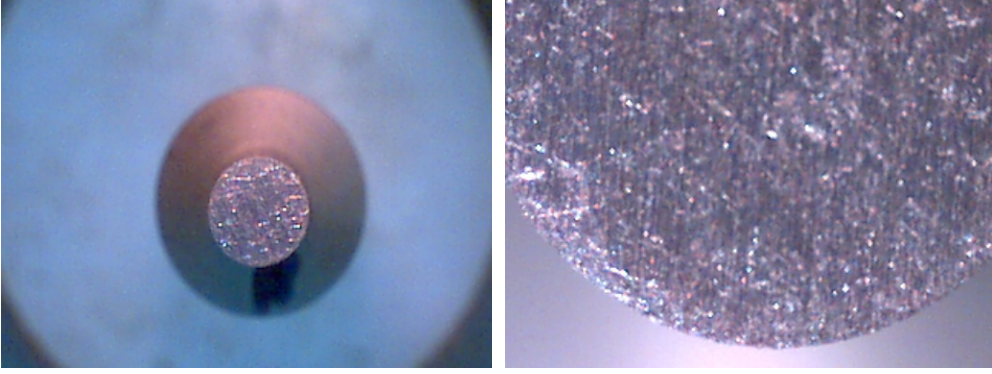
Şekil M.48: AISI 420 Kaplamasız kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m.



(a)10x

(b)60x

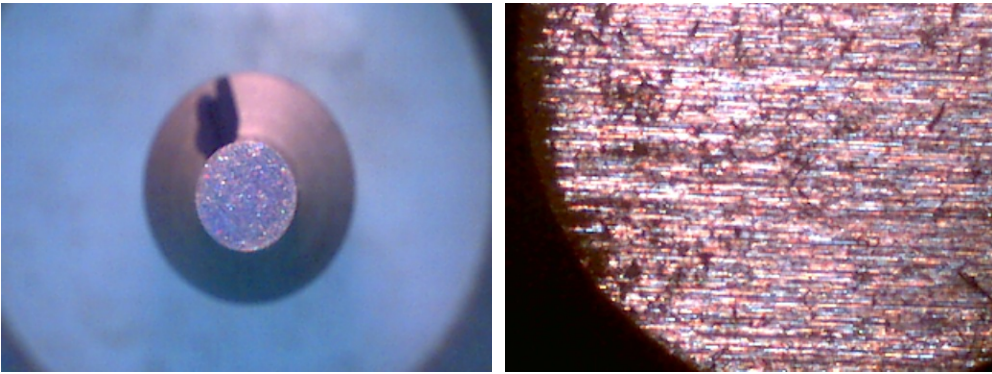
şekil M.49: AISI 420 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 5.5 m.



(a)10x

(b)60x

şekil M.50: AISI 420 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 11 m.



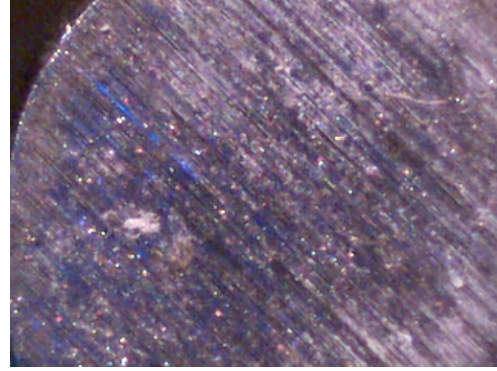
(a)10x

(b)60x

şekil M.51: AISI 420 Borlanmış deney numunesi görüntüleri 16.5 m.

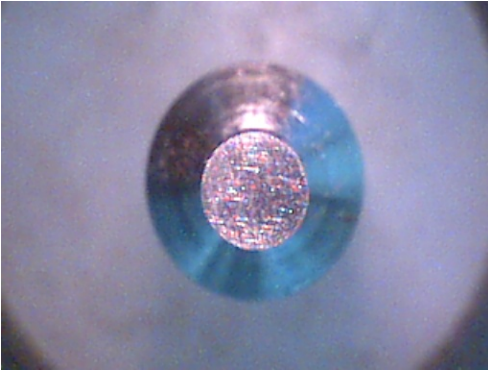


(a)10x

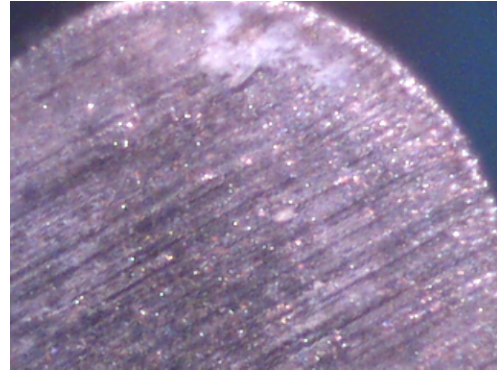


(b)60x

Şekil M.52: AISI 420 Sert Korma kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.

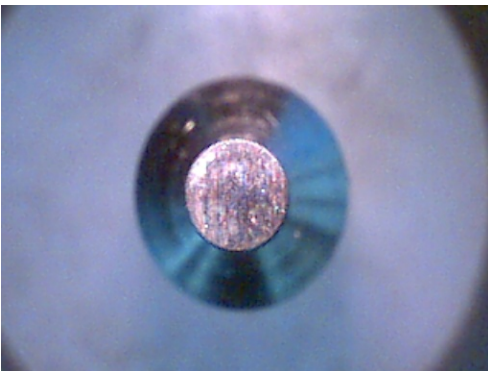


(a)10x

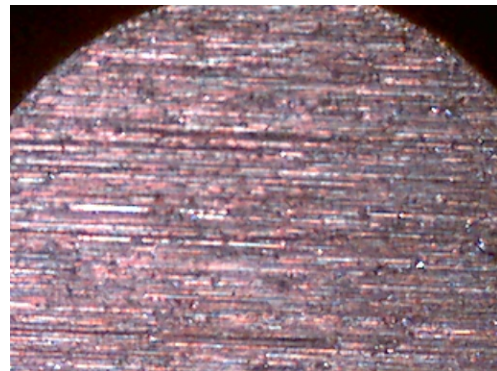


(b)60x

Şekil M.53: AISI 420 Sert Korma kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.

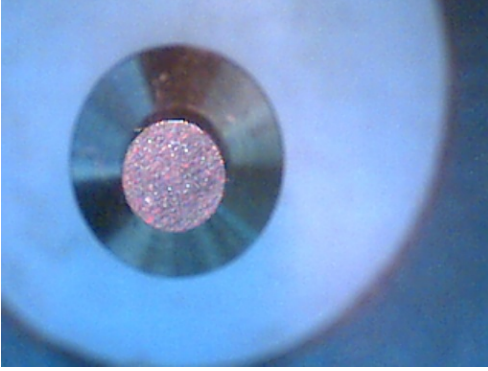


(a)10x

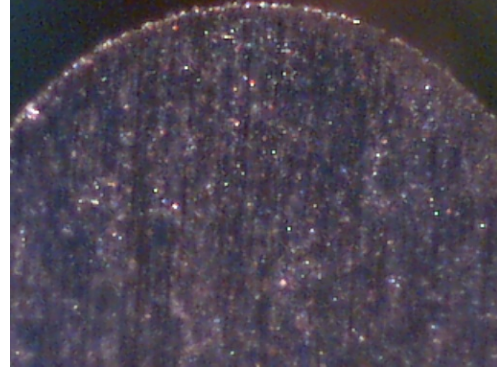


(b)60x

Şekil M.54: AISI 420 Sert Korma kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m.

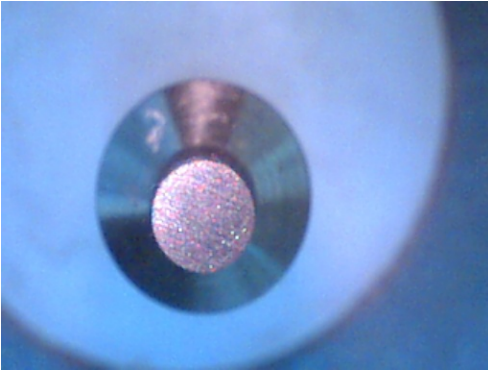


(a)10x

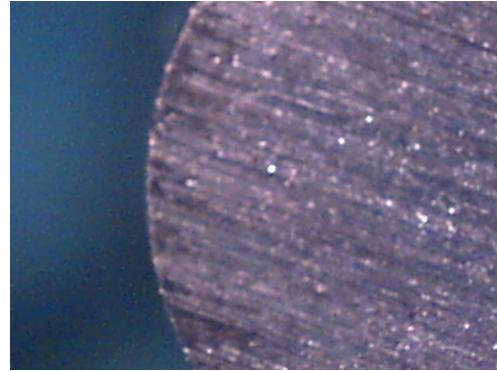


(b)60x

Şekil M.55: AISI 420 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 5.5 m.

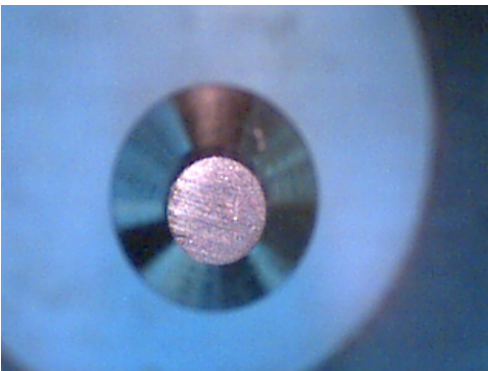


(a)10x

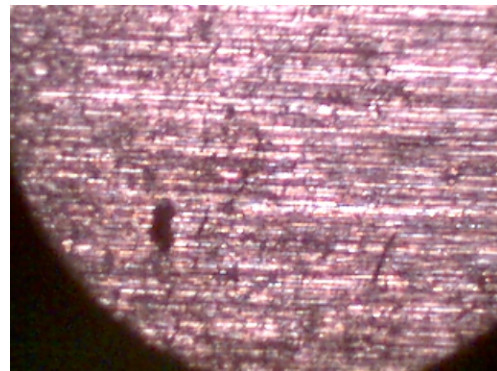


(b)60x

Şekil M.56: AISI 420 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 11 m.

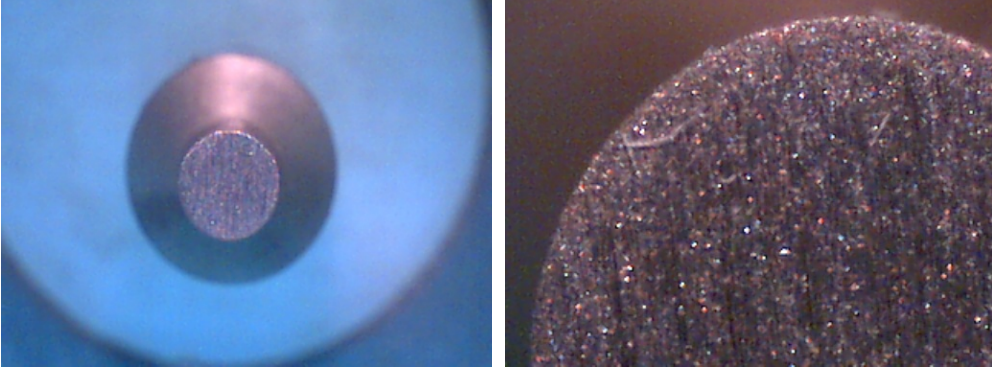


(a)10x



(b)60x

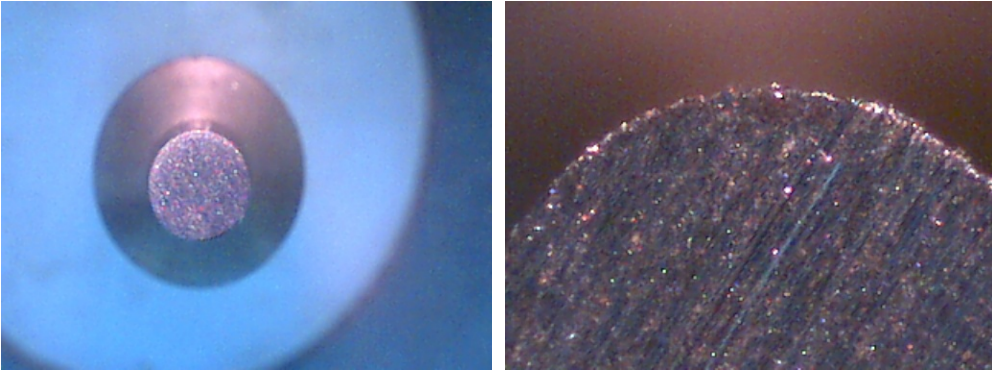
Şekil M.57: AISI 420 Akımsız Nikel kaplı deney numunesi görüntüleri 16.5 m



(a)10x

(b)60x

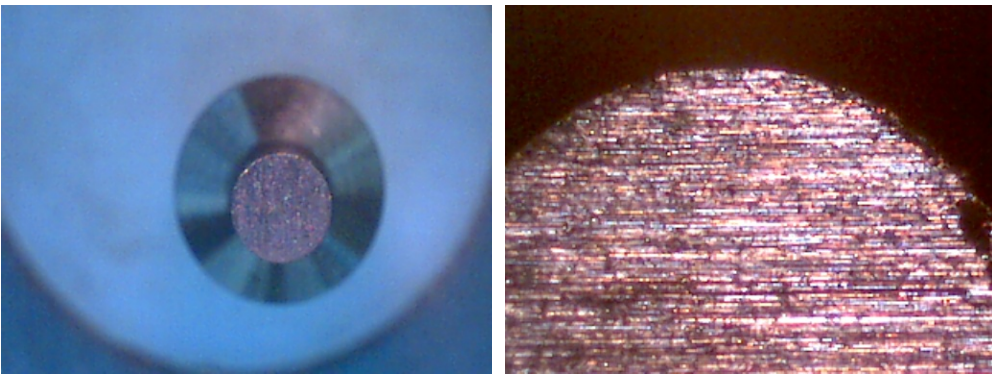
Şekil M.58: AISI 420 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 5.5 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil M.59: AISI 420 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 11 m.



(a)10x

(b)60x

Şekil M.60: AISI 420 Nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri 16.5 m.

Ek N. İLERİ-GERİ AŞINMA DENEY VERİLERİ

Tablo N.1: AISI 1040 malzemenin ileri-geri aşınma testi verileri

AISI 1040	mm	mm	Alan	Ort
Akımsız Nikel	0,56	1,46	0,000642	0,000601
	0,44	1,62	0,000560	
Borlama	0,87	4,1	0,002800	0,002906
	0,92	4,17	0,003012	
Sert Krom	0,41	3,26	0,001049	0,001240
	0,43	4,24	0,001431	
Nitrokarbürleme	0,84	14,8	0,009759	0,009659
	0,83	14,67	0,009558	
Kaplamasız	1,21	27,5	0,026121	0,024826
	1,19	25,19	0,023531	

Tablo N.2: AISI 4140 malzemenin ileri-geri aşınma testi verileri

AISI 4140	mm	Mm	Alan	Ort
Akımsız Nikel	0,37	2,45	0,000711603	0,000640678
	0,38	1,91	0,000569753	
Borlama	0,58	3,5	0,00159355	0,001483258
	0,53	3,3	0,001372965	
Sert Krom	0,37	3,28	0,000952676	0,001324138
	0,45	4,8	0,0016956	
Nitrokarbürleme	0,85	13,63	0,009094618	0,009626494
	0,89	14,54	0,010158371	
Kaplamasız	0,99	17,79	0,013825499	0,013616021
	0,96	17,79	0,013406544	

Tablo N.3: AISI 5140 malzemenin ileri-geri aşınma testi verileri

AISI 5140	mm	mm	Alan	Ort
Akımsız Nikel	0,55	1,72	0,00074261	0,000897059
	0,57	2,35	0,001051508	
Borlama	0,63	2,2	0,00108801	0,001226484
	0,69	2,52	0,001364958	
Sert Krom	0,38	3,28	0,000978424	0,001318172
	0,44	4,8	0,00165792	
Nitrokarbürleme	1,05	13,2	0,0108801	0,011164898
	1,06	13,76	0,011449696	
Kaplamasız	0,94	17,01	0,012551679	0,01269557
	0,94	17,4	0,01283946	

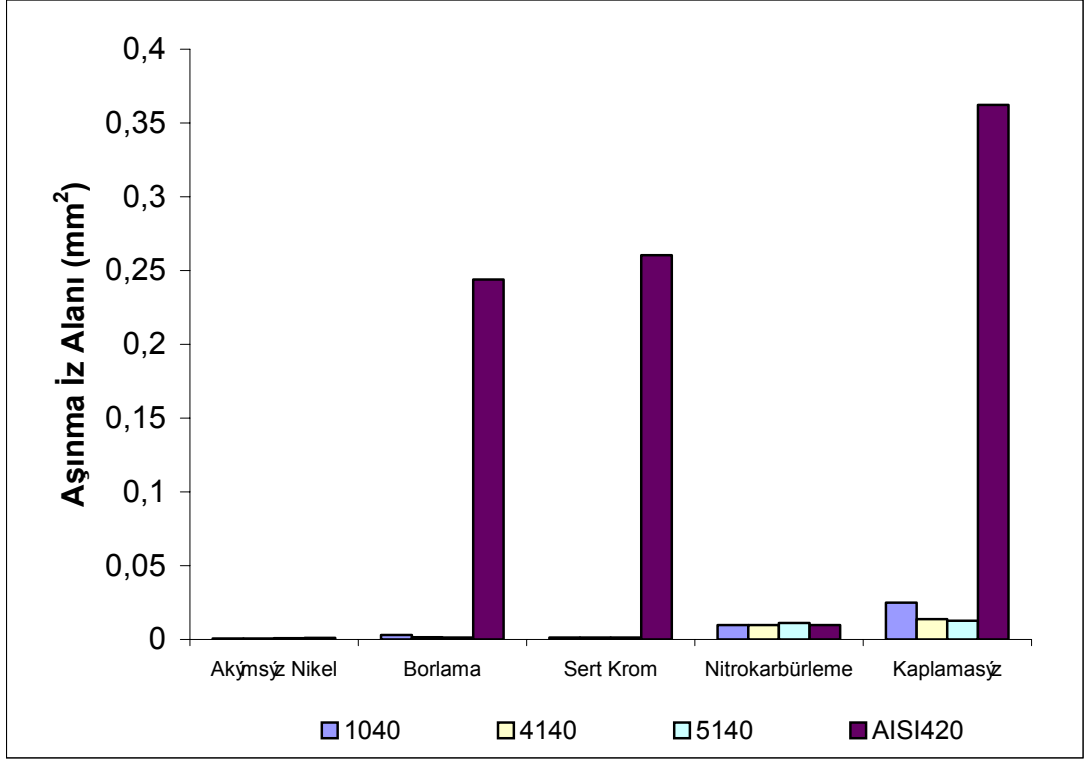
Tablo N.4: AISI 420 malzemenin ileri-geri aşınma testi verileri

AISI 420	mm	mm	Alan	Ort
Akımsız Nikel	0,68	2,82	0,001505316	0,001149005
	0,51	1,98	0,000792693	
Borlama	2,45	114,84	0,22086603	0,24379957
	2,74	124,01	0,266733109	
Sert Krom	2,83	114,85	0,255145018	0,260281076
	2,9	116,59	0,265417135	
Nitrokarbürleme	2,05	114,85	0,184822363	0,199950883
	2,35	116,59	0,215079403	
Kaplamasız	3,67	128,82	0,371123979	0,36214146
	3,76	119,65	0,35315894	

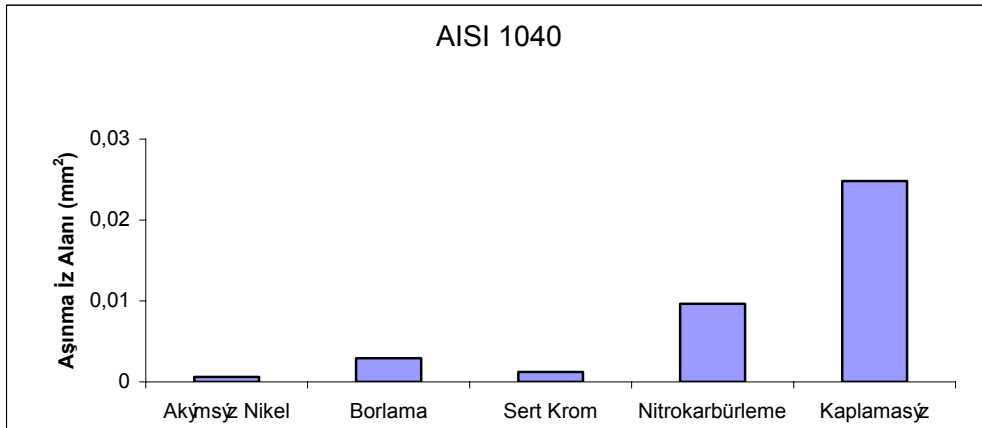
Tablo N.5: Tüm deney numunelerinin ileri-geri aşınma deneyi sonuçunda hesaplanan ortalama iz alanları:

	AISI 1040	AISI 4140	AISI 5140	AISI 420
Akımsız Nikel	0,00060068	0,0006407	0,000897059	0,001149005
Borlama	0,00290583	0,0014833	0,001226484	0,24379957
Sert Krom	0,00124022	0,0013241	0,001324138	0,260281076
Nitrokarbürleme	0,00965868	0,0096265	0,011164898	0,196264943
Kaplamasız	0,02482606	0,013616	0,01269557	0,36214146

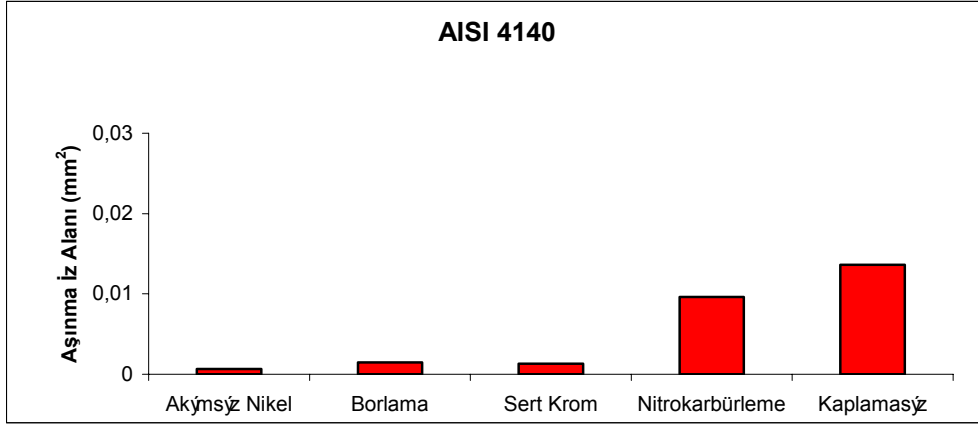
Ek O: AŞINMA İZ ALANI



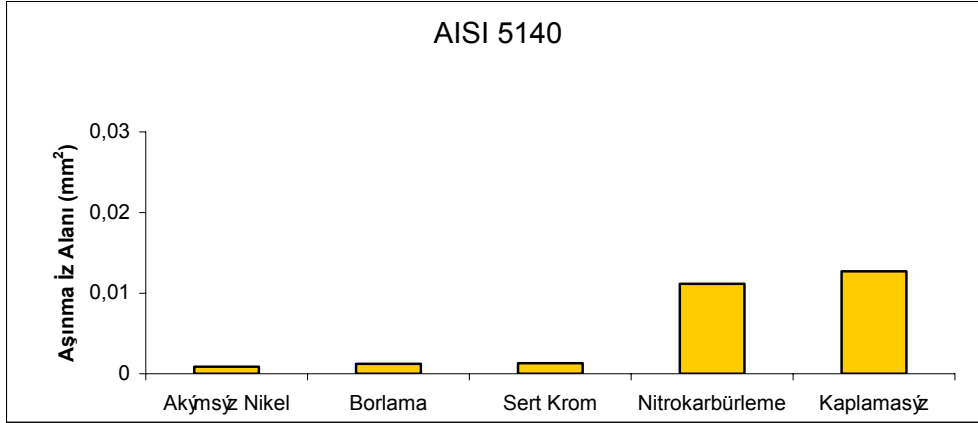
Şekil O1: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemenin (Aşınma iz alanı (mm²)) grafiği.



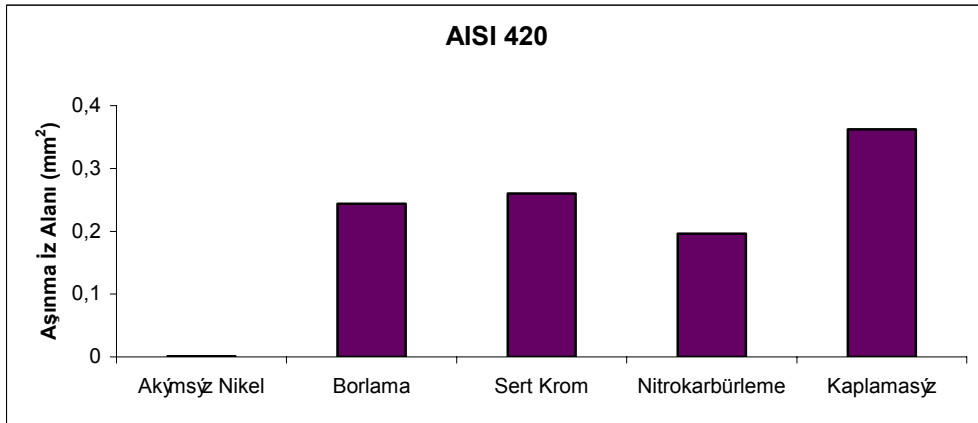
Şekil O2: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 1040 kalite çelik malzemenin (Aşınma iz alanı (mm²)) grafiği.



Şekil O3: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 4140 kalite çelik malzemenin (Aşınma iz alanı (mm²)) grafiği.

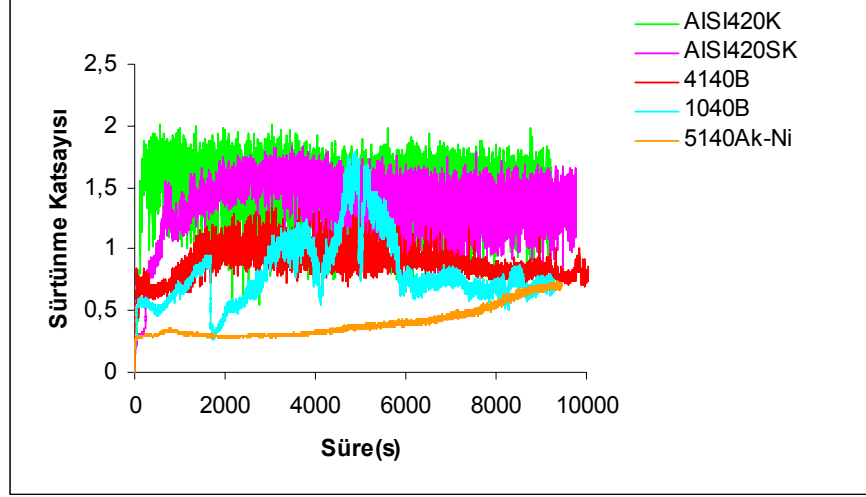


Şekil O4: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 5140 kalite çelik malzemenin (Aşınma iz alanı (mm²)) grafiği.

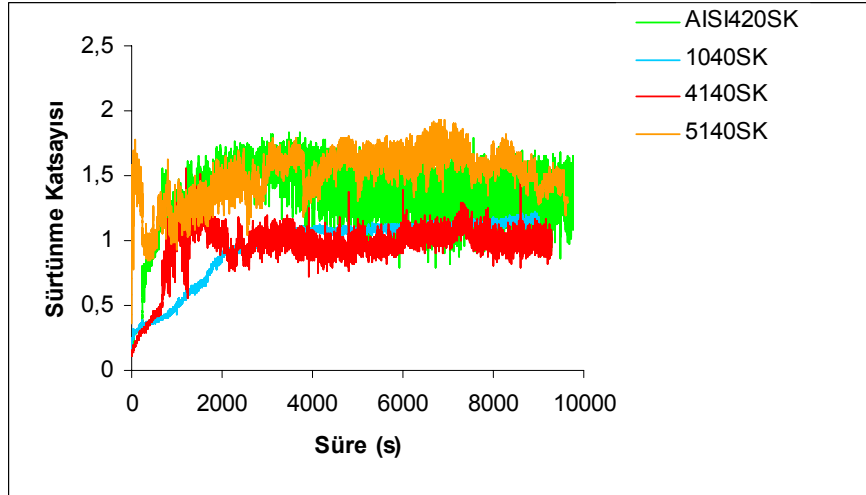


Şekil O5: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 kalite çelik malzemenin (Aşınma iz alanı (mm²)) grafiği.

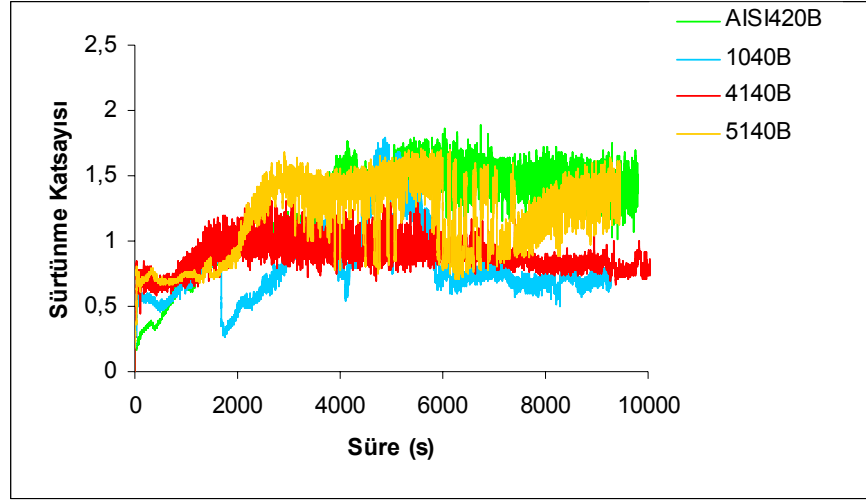
Ek P: SÜRTÜNME KATSAYISI GRAFİKLERİ:



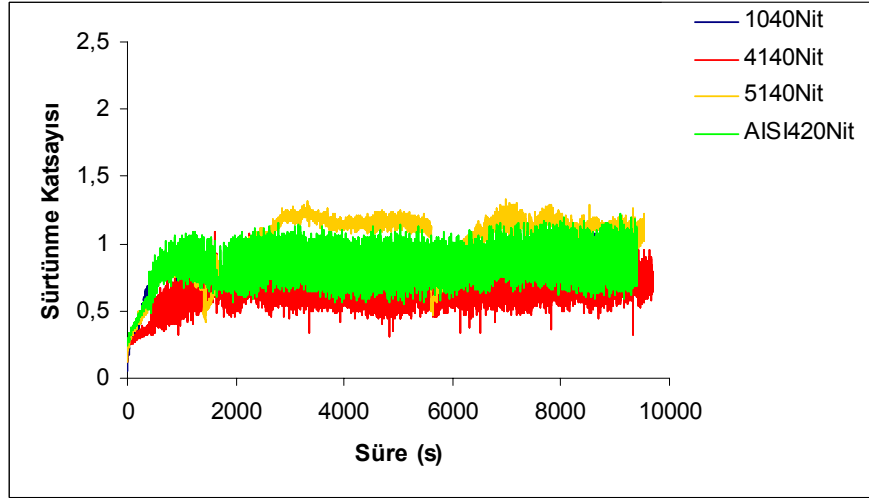
Şekil P 1: Farklı yüzey işlemleri görmüş çelik malzemeler içinde öne çıkan nemenelerin sürtünme katsayısı grafiği.



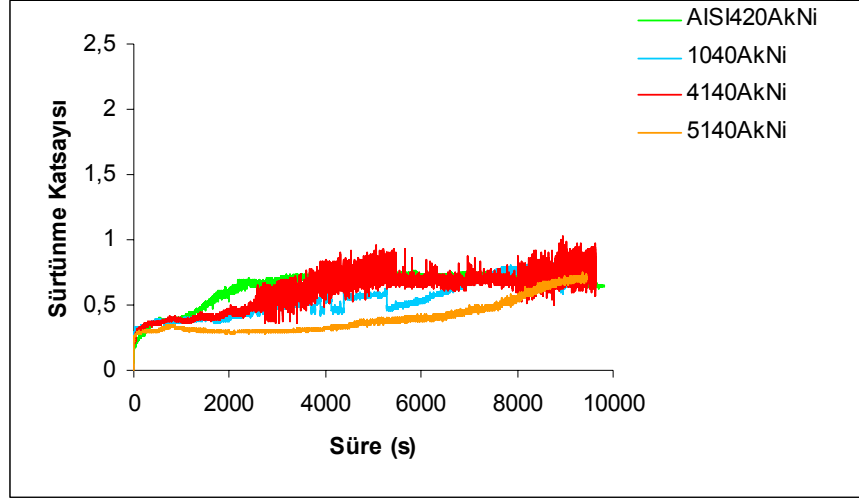
Şekil P 2: Yüzeyi sert krom kaplanmış AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerin sürtünme katsayısı grafiği.



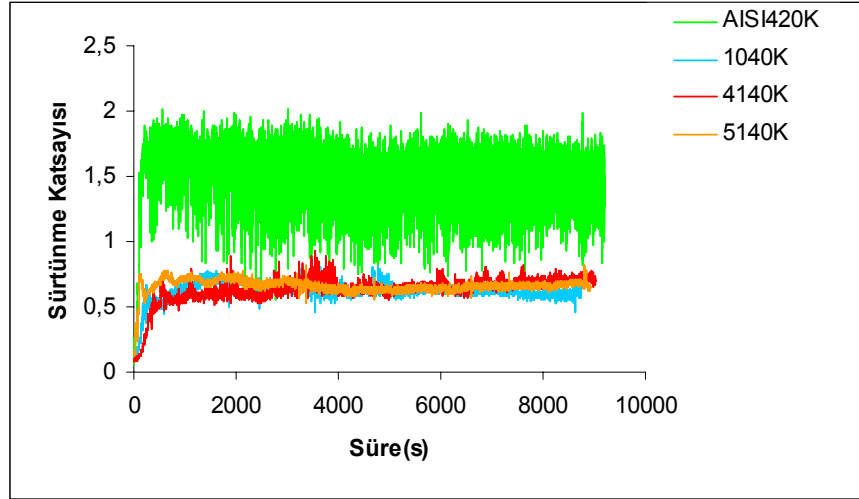
Şekil P 3: Yüzeyi borlanmış AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerin sürtünme katsayısı grafiği.



Şekil P 4: Yüzeyi nitrokarbürlenmiş AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerin sürtünme katsayısı grafiği.

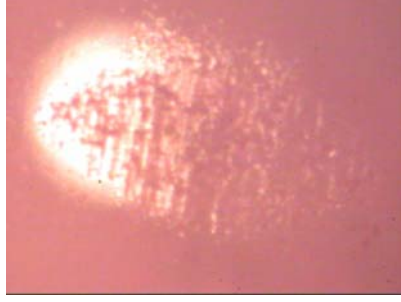


Şekil P 5: Yüzeyi akımsız nikel kaplanmış AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerin sürtünme katsayısı grafiği.

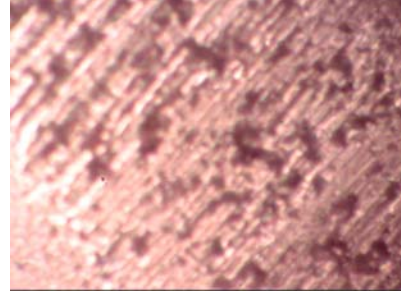


Şekil P 6: Yüzeyi işleme görmemiş AISI 1040, AISI 4140, AISI 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerin sürtünme katsayısı grafiği.

Ek R: AŞINMA TESTİ SONUÇUNDA ELDE EDİLEN TOP FOTOĞRAFLARI



(a) 5x



(b) 10x

Şekil R.1: AISI 1040 yüzey işlemsiz deney numunesi görüntüleri

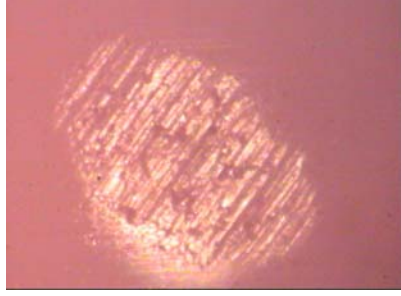


(a) 5x

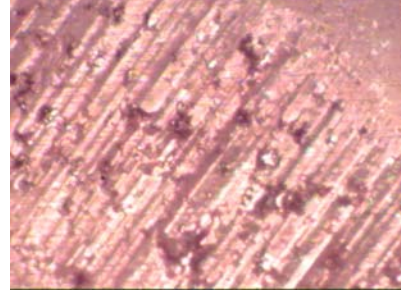


(b) 10x

Şekil R.2: AISI 4140 yüzey işlemsiz deney numunesi görüntüleri

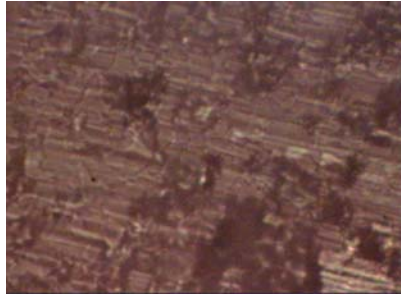


(a) 5x

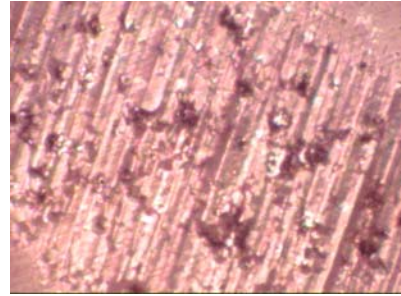


(b) 10x

Şekil R.3: AISI 5140 yüzey işlemsiz deney numunesi görüntüleri

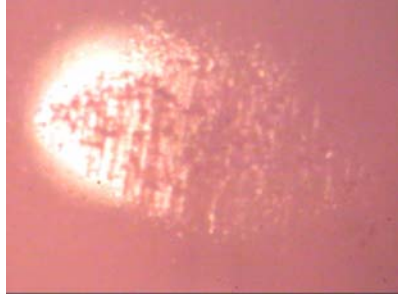


(a) 5x

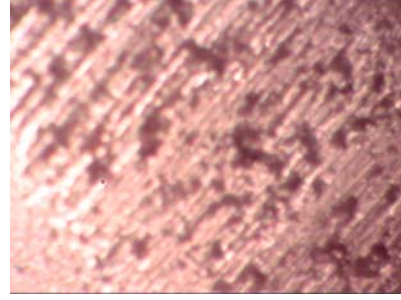


(b) 10x

Şekil R.4: AISI 420 yüzey işlemsiz deney numunesi görüntüleri

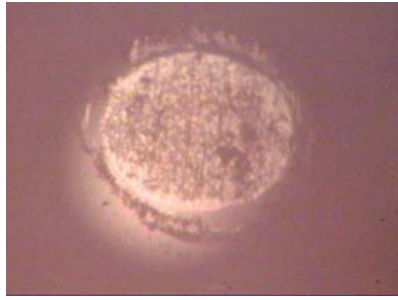


(a) 5x

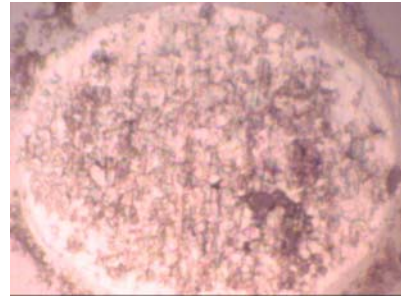


(b) 10x

Şekil R.5: AISI 1040 borlanmış deney numunesi görüntüleri



(a) 5x

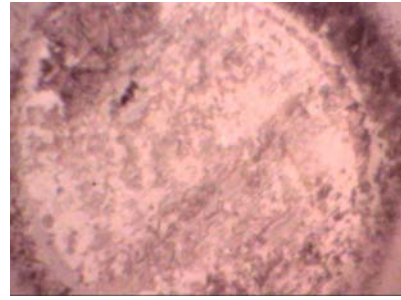


(b) 10x

Şekil R.6: AISI 4140 borlanmış deney numunesi görüntüleri

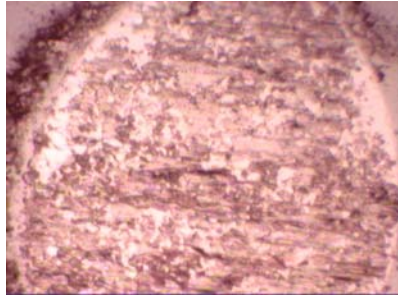


(a) 5x

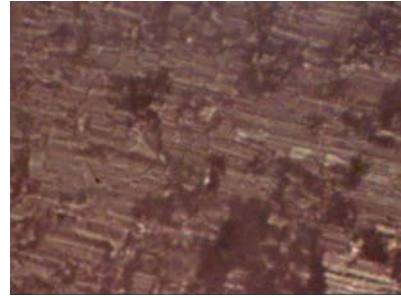


(b) 10x

Şekil R.7: AISI 5140 borlanmış deney numunesi görüntüleri



(a) 5x

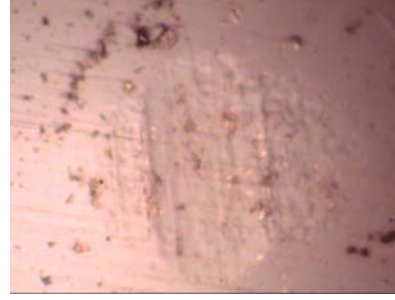


(b) 10x

Şekil R.8: AISI 420 borlanmış deney numunesi görüntüleri

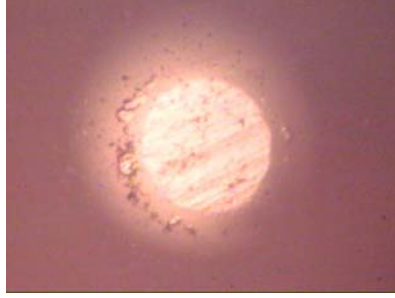


(a) 5x

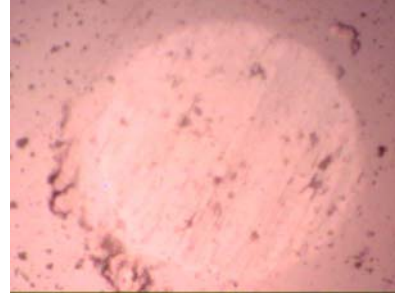


(b) 10x

Şekil R.9: AISI 1040 akımsız nikel kaplanmış deney numunesi görüntüleri



(a) 5x

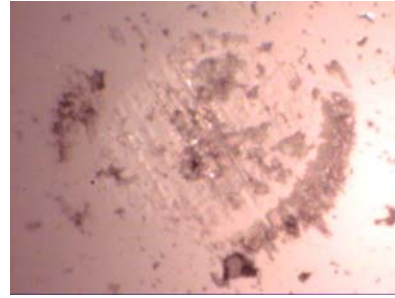


(b) 10x

Şekil R.10: AISI 4140 akımsız nikel kaplanmış deney numunesi görüntüleri

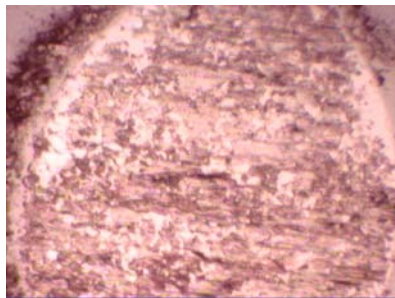


(a) 5x

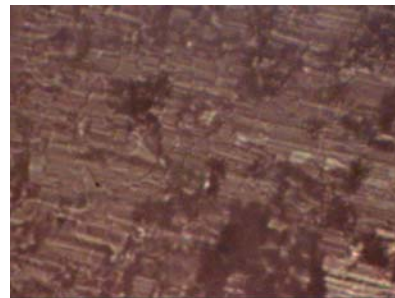


(b) 10x

Şekil R.11: AISI 5140 akımsız nikel kaplanmış deney numunesi görüntüleri



(a) 5x



(b) 10x

Şekil R.12: AISI 420 akımsız nikel kaplanmış deney numunesi görüntüleri

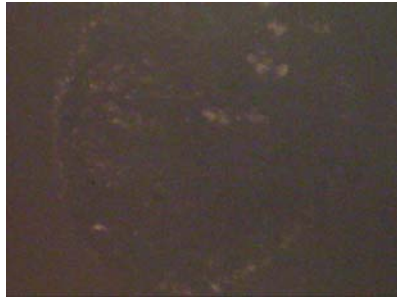


(a) 5x



(b) 10x

Şekil R.13: AISI 1040 sert krom kaplanmış deney numunesi görüntüleri

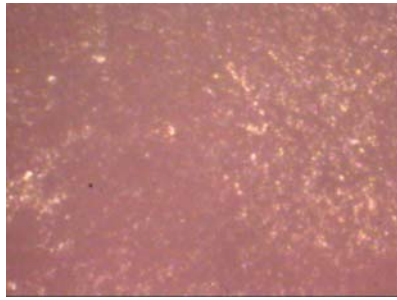


(a) 5x

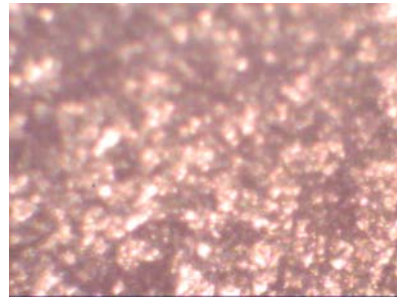


(b) 10x

Şekil R.14: AISI 4140 sert krom kaplanmış deney numunesi görüntüleri

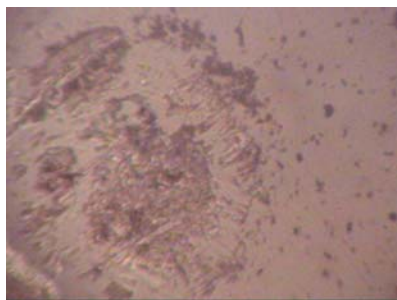


(a) 5x

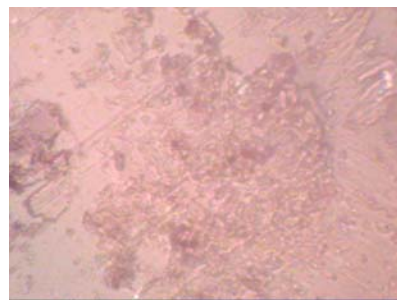


(b) 10x

Şekil R.15: AISI 5140 sert krom kaplanmış deney numunesi görüntüleri

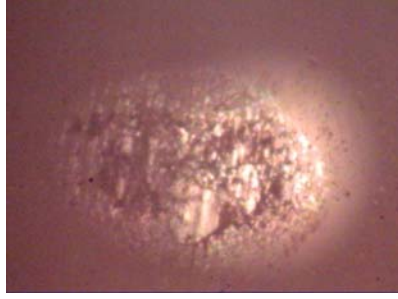


(a) 5x

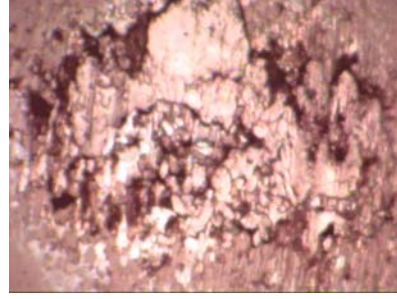


(b) 10x

Şekil R.16: AISI 420 sert krom kaplanmış deney numunesi görüntüleri



(a) 5x

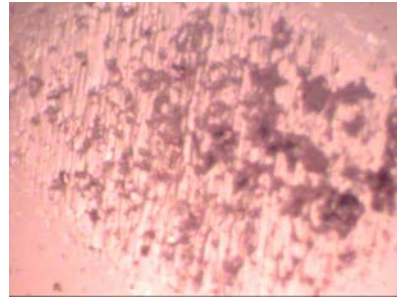


(b) 10x

Şekil R.17: AISI 1040 nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri



(a) 5x

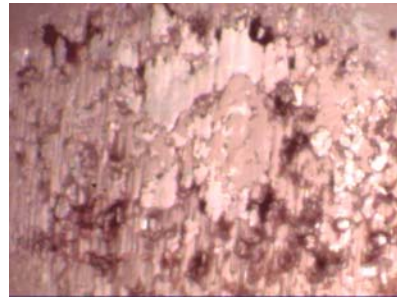


(b) 10x

Şekil R.18: AISI 4140 nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri

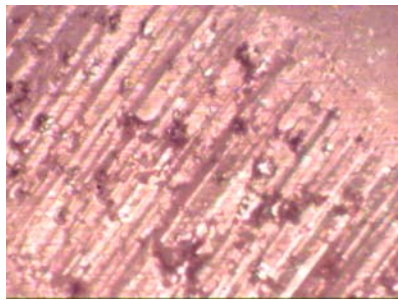


(a) 5x

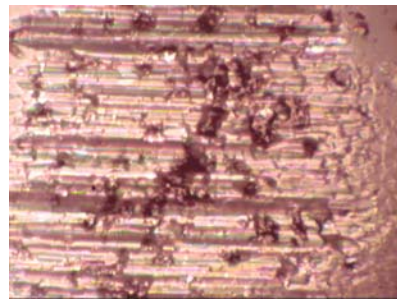


(b) 10x

Şekil R.19: AISI 5140 nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri



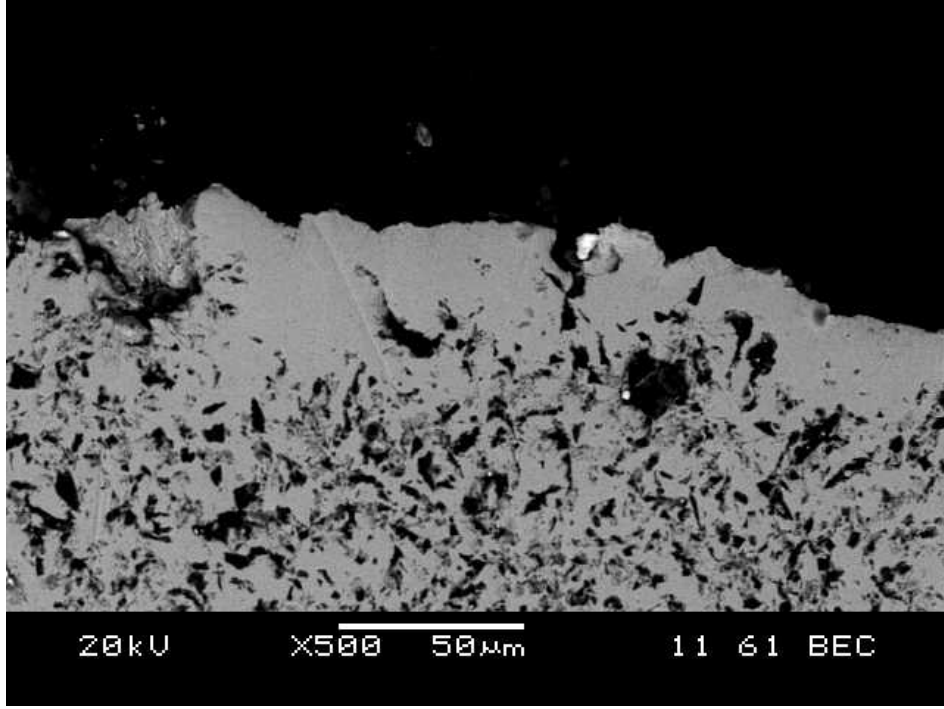
(a) 5x



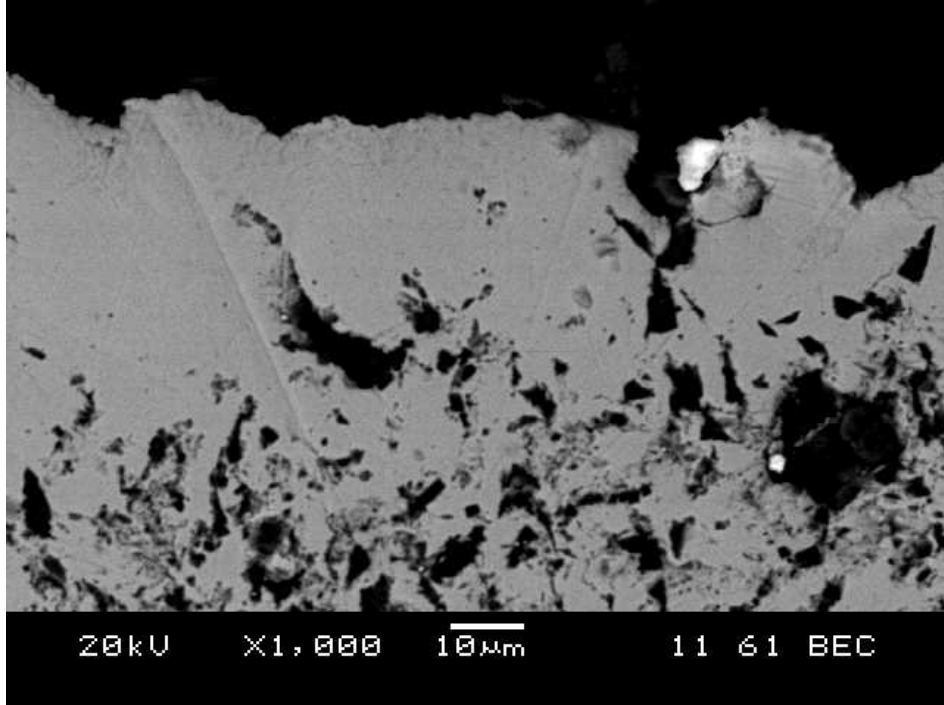
(b) 10x

Şekil R.20: AISI 420 nitrokarbürleşmiş deney numunesi görüntüleri

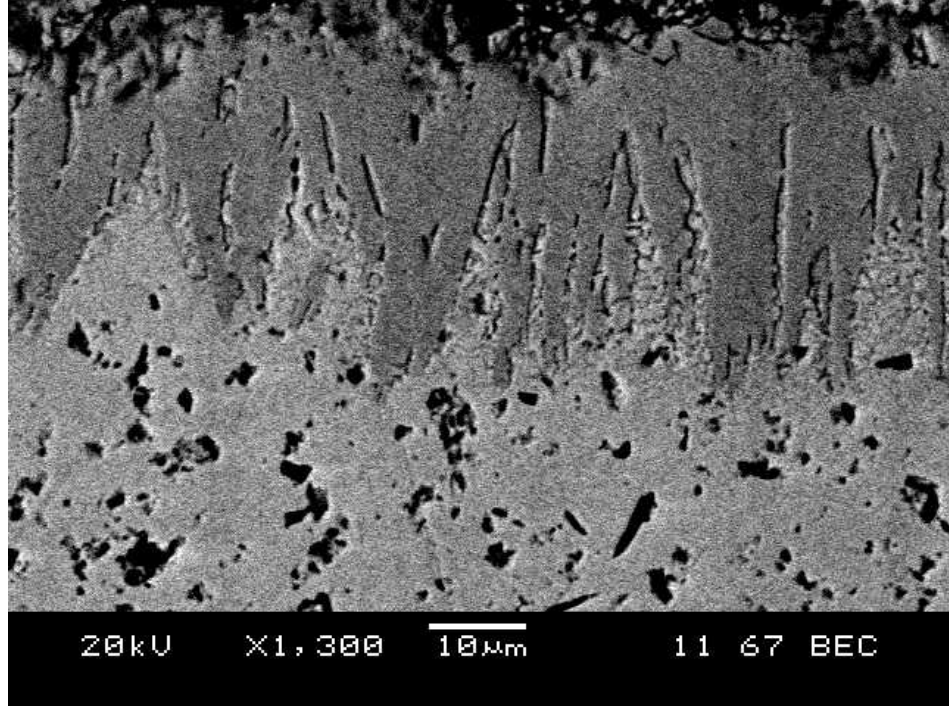
Ek S: YÜZEYLERİ BORLANMIŞ NUMUNELERİN SEM GÖRÜNTÜLERİ



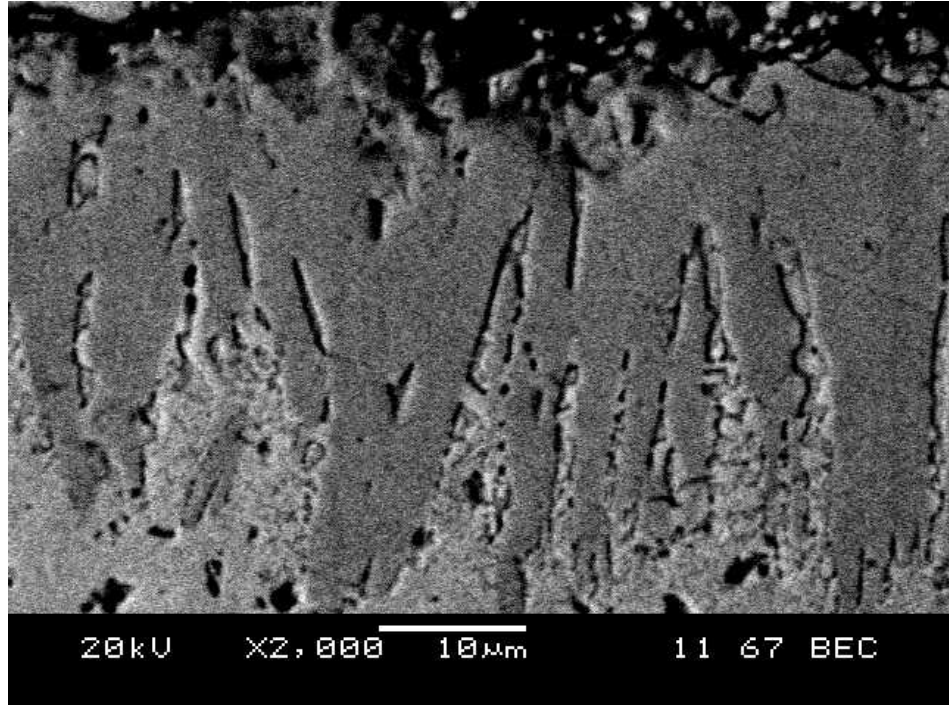
Şekil S 1: AISI 420 borlanmış çelik numunenin yüzeyden alınan kesit boyunca SEM görüntüsü:



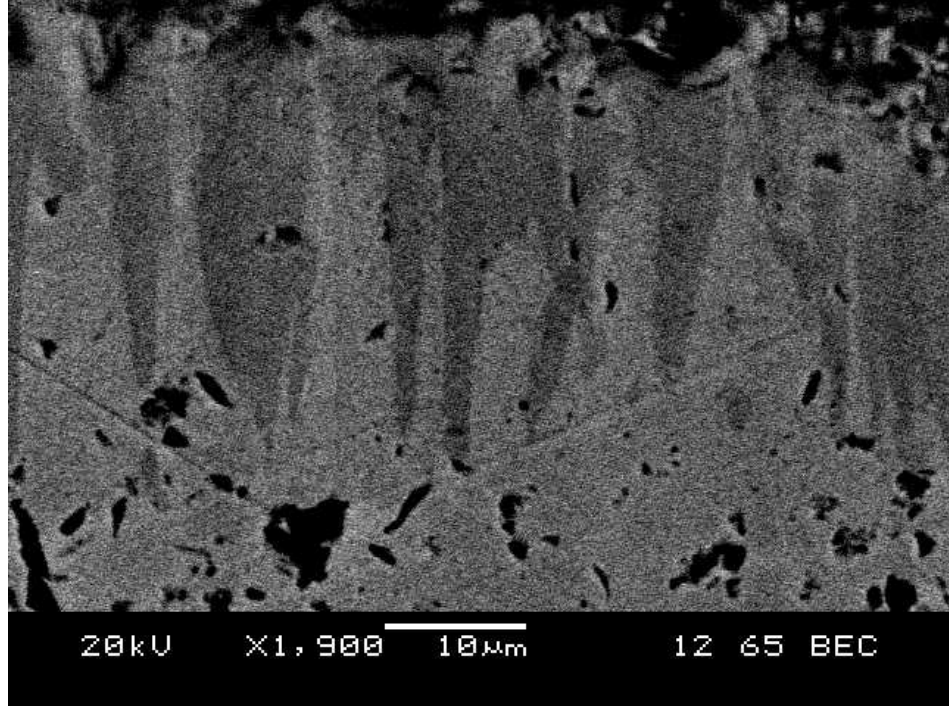
Şekil S 2: AISI 420 borlanmış çelik numunenin yüzeyden alınan kesit boyunca SEM görüntüsü:



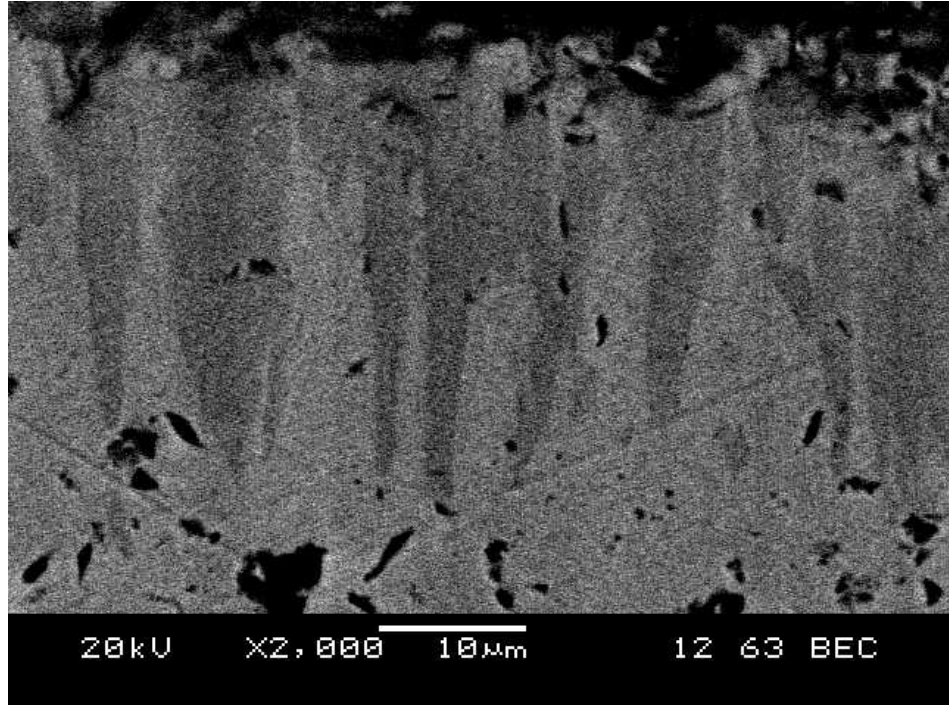
Şekil S 3: AISI 1040 borlanmış çelik numunenin yüzeyden alınan kesit boyunca SEM görüntüsü:



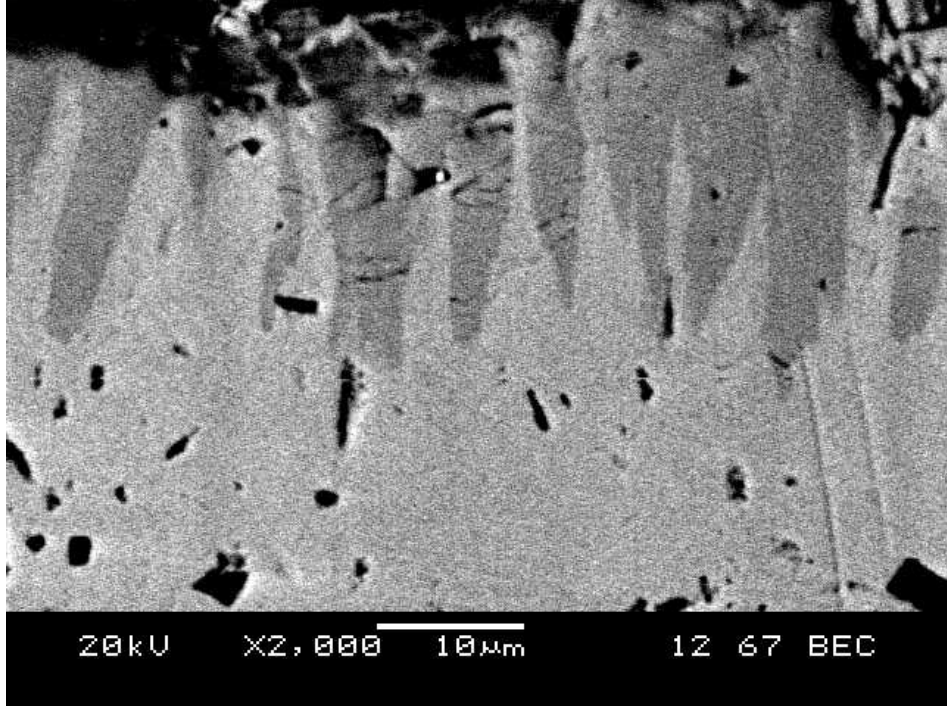
Şekil S 4: AISI 1040 borlanmış çelik numunenin yüzeyden alınan kesit boyunca SEM görüntüsü:



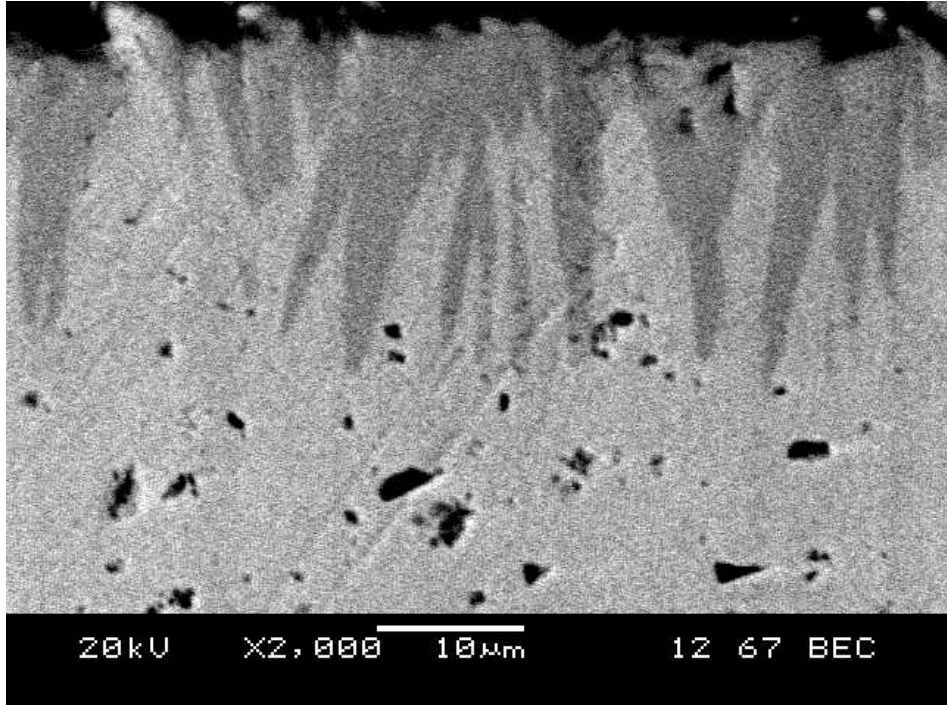
Şekil S 5: AISI 4140 borlanmış çelik numunenin yüzeyden alınan kesit boyunca SEM görüntüsü:



Şekil S 6: AISI 4140 borlanmış çelik numunenin yüzeyden alınan kesit boyunca SEM görüntüsü:



Şekil S 7: AISI 5140 borlanmış çelik numunenin yüzeyden alınan kesit boyunca SEM görüntüsü:



Şekil S 8: AISI 5140 borlanmış çelik numunenin yüzeyden alınan kesit boyunca SEM görüntüsü:

Ek T: DENEYLERDE KULLANDIĞIMIZ MALZEMELERİN YÜZEY PÜRÜZLÜK DEĞERLERİ

AISI 1040- AISI 4140- AISI 420- AISI 5140 kalite çelik malzemelerin dört farklı yüzey kaplama (nitrokarbürleme, sert krom kaplama, akımsız nikel kaplama ve borlama) işleminden sonra sahip oldukları yüzey pürüzlük değerleri belirlenmiş ve Tablo T.1’de gösterilmiştir.

Tablo T.1: Deneyleerde kullandığımız malzemelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

Malzeme	Kaplama	Ra (Micron)	Rz	Rmax
AISI 1040		0.77-0.85	5.30-6.50	6.50-7.90
AISI 1040	Nitrokarbürleme	1.20-1.27	8.30-9.70	8.70-10.30
AISI 1040	Sert Krom	0.80-0.87	6.20-7.00	7.90-8.20
AISI 1040	Akımsız Nikel	1.82-1.90	10.50-11.30	12.10-12.50
AISI 1040	Borlama	0.87-0.97	5.70-6.00	6.20-6.80
AISI 4140		0.97-1.07	6.60-7.20	7.40-8.00
AISI 4140	Nitrokarbürleme	1.45-1.52	7.40-8.80	7.60-9.10
AISI 4140	Sert Krom	1.12-1.25	7.20-7.70	7.90-8.40
AISI 4140	Akımsız Nikel	0.97-1.02	6.40-6.70	7.60-8.70
AISI 4140	Borlama	1.02-1.10	6.70-7.50	7.60-8.40
AISI 5140		0.97-1.05	6.10-6.60	6.40-7.30
AISI 5140	Nitrokarbürleme	1.27-1.37	8.50-8.80	9.20-10.10
AISI 5140	Sert Krom	1.00-1.15	7.00-7.50	8.00-8.30
AISI 5140	Akımsız Nikel	1.20-1.32	8.80-9.10	9.80-11.00
AISI 5140	Borlama	0.92-1.00	5.70-7.10	6.90-7.60
AISI 420		0.30-0.32	2.30-2.40	3.10-3.20
AISI 420	Nitrokarbürleme	0.32-0.32	2.80-3.00	3.60-3.80
AISI 420	Sert Krom	0.35-0.37	2.80-3.00	3.20-3.90
AISI 420	Akımsız Nikel	0.42-0.90	3.50-7.00	5.10-8.50
AISI 420	Borlama	0.35-0.32	2.70-3.40	3.10-3.90

Ek U: CD-ROM

ÖZGEÇMİŞ

1972 tarihinde İstanbul'da doğan A.Yüksel SOYKUT, ilk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamlamıştır. Lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Makina Mühendisliği Bölümü'nde 1995 yılında tamamlayarak, 1995 yılında ABD'de University of Missouri-Rolla'da başladığı İşletme Mühendisliği Yüksek Lisansı'nı 1998 yılında derece ile bitirmiştir.

1998-1999 döneminden itibaren İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Malzeme Doktora Programı'nda Doktora yapmaktadır.

1998 yılında Paşabahçe Cam Sanayii A.Ş.'de başlamış olduğu iş hayatına, halen İş Geliştirme Mühendisi olarak devam etmektedir.