İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI KALİTE ÇELİKLERE UYGULANAN YÜZEY KAPLAMA İŞLEMLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Burak SARICA

Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Programı: Malzeme Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. E. Sabri KAYALI

MAYIS 2005

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI KALİTE ÇELİKLERE UYGULANAN YÜZEY KAPLAMA İŞLEMLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Burak SARICA

506001202

Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Programı: Malzeme Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. E. Sabri KAYALI

MAYIS 2005

ÖNSÖZ

Bugüne ulaşırken bana hep güvenen, tüm okul hayatım ve çalışmalarım süresince bana her konuda destek veren, yardımcı olan ve tüm sıkıntılarıma katlanan annemin ve babamın payını her ne ile ifade etmeye çalışırsam çalışayım yetmeyecektir. Bu yüzden tüm çalışmamı ve herşeyimi öncelikle aileme adıyorum.

Değerli Hocam Prof. Dr. E. Sabri KAYALI'ya ise sadece bana yol gösterici olduğu, kendimi geliştirmeme sağladığı destek, tez çalışması için verdiği kıymetli zamanları için değil; lisans eğitimimden itibaren gülen gözlerin ortama pozitif enerji kattığını, serin kanlı olmanın meselelerin çözümünde en etkin rolü oynayan karakteristik özellik olduğunu ve kendimi gerçekleştirmek için açtığı ufuk için sonsuza kadar minnettar olacağım.

Hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na çalışmalarımı yapmam için sağladıkları ortam ve bana örnek olarak öğrettikleri için müteşekkirim.

Tez çalışmasına beni ortak eden, deneylerin yapılmasında maddi ve manevi olarak destek sağlayan Yük. Mak. Müh. Sn. Yüksel SOYKUT'a müteşekkirim. Deneylerin yapılmasında mesaisinin haricindeki zamanını bizimle harcayarak paylaşan, Gemi Mak. Müh. Sayın Kaan SAY'a emeklerinden dolayı teşekkür ederim.

Sahip oldukları kısa ve kıymetli zamanlarında, çalışmalarımda bana her türlü yardımı severek yapan çok değerli araştırma görevlileri arkadaşlarım Harun Mindivan, Fatih Güçlü ve Hasan Güleryüz'e teşekkür ederim.

Bugüne ulaşırken bana hep güvenen, çok değerli olan, kendisine ayırmam gereken saatleri çalarak çalıştığım uzun zamanlara rağmen bana olan sevgisini ve desteğini hep yanımda hissettiren Pin'e çok teşekkür ederim.

Mayıs, 2005 Burak SARICA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ iii

TABLO LİSTESİ vii

ŞEKİL LİSTESİ viii

KISALTMALAR xii

SEMBOL LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

SUMMARY xvi

1 GİRİŞ 1

1.1 Amaç 2

1.2 Cam Sanayisindeki Durum 2

1.3 Cam Şekillendirme Makinalarında Yaşanan Sıkıntılar 3

2 TRİBOLOJİ 6

2.1 Yüzey Karakteristikleri 11

3 KATI CİSİMLERİN TEMASI 14

3.1 Pürüzsüz Yüzeylerin Teması 14

3.2 Pürüzlü Yüzeylerin Teması 15

3.3 Makina Parçalarının Yüzey Kalitesi 16

3.4 Kayma Sürtünmesi **17**

3.4.1 Kuru Sürtünme 19

3.4.2 Sınır Sürtünmesi 23

3.4.3 Sıvı Sürtünmesi 24

4 AŞINMA **25**

4.1 Aşınmanın Tanımı **25**

4.2 Aşınma Türleri **27**

4.2.1 Adhezif Aşınma (Yapışma Aşınması) 31

4.2.2 Abrazif Aşınma 32

4.2.3 Yorulma Aşınması 34

4.2.4 Korozif Aşınma 36

4.2.5 Kazımalı (Fretting) Aşınma 36

4.2.6 Erozif Aşınma 37

4.2.7 Kavitasyonla Korozif Aşınma 38

4.2.8 Elektrik Ark Akımlı Aşınma 39

4.3 Aşınmanın Önlenmesi **39**

5 METALLERE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ **41**

5.1 Sert Krom Kaplama **42**

5.2 Akımsız Nikel Kaplama **43**

5.3 Borlama **45**

5.3.1 Borlama Prosesleri 47

5.3.2 Borlama İşleminin Avantajları 47

5.3.3 Borlama İşleminin Dezavantajları 48

5.4 Borlama Yöntemleri **49**

5.4.1 Kutu Borlama 49

5.4.2 Pasta Borlama 50

5.4.3 Sıvı Borlama 50

5.4.4 Gaz Borlama 53

5.4.5 Plazma Borlama 54

5.5 Nitrokarbürleme **55**

6 DENEYSEL ÇALIŞMALAR 56

6.1 Metal- Metal Aşınma Deneyleri 56

6.1.1 Nem ve Sıcaklık 58

6.1.2 Metal- Metal Aşınma Deneyleri Parametreleri 58

6.2 Metalografik Çalışmalar 59

7 DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ 60

8 GENEL SONUÇLAR 75

9 KAYNAKLAR 77

EKLER

Ek A: Deney Numuneleri Kaplama Kalınlıkları 81

Ek B : Deney Numuneleri Ağırlık ve Yükseklik Değerleri 82

Ek C : Deney Numuneleri Sertlik ($HV_{0,2}$) Değerleri 84

Ek D : 6000 m. Kayma Mesafesinde Deney Numunelerinde Meydana Gelen Ağırlık Kaybı Grafikleri 85

Ek E : 2000 m. Kayma Mesafesinde Deney Numunelerinde Meydana Gelen Ağırlık Kaybı Grafikleri 92

Ek F : Deney Numune Kesitlerinin Parlatılmış ve Dağlanmış Görüntüleri 99

Ek G : Deney Numuneleri Mekanik Özellikleri 129

Ek H : Disk Üstünde Pim Aşınma Deneylerindeki Farklı Kayma Mesafelerinde Kaydedilen Yüzey Aşınması Görüntüleri 133

Ek I : CD-ROM 146

ÖZGEÇMİŞ 147

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1	: Triboloji: Disiplinler arası bir yaklaşım.....	10
Tablo 4.1	: Aşınma mekanizmalarının göreceli önem dereceleri.....	27
Tablo 4.2	: Tek fazlı ve çok fazlı aşınmalara örnekler.....	29
Tablo 4.3	: Sıvı çarpmasına, çarpma açısının malzeme tepkisi üzerindeki etkileri.....	38
Tablo 4.4	: Belirli bir aşınma prosesinin kontrolü için tercih edilen malzeme özellikleri.....	40
Tablo 5.1	: Sıvı borlamada kullanılan çeşitli bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri.....	52
Tablo 5.2	: Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri.....	54
Tablo 7.1	: İncelenen deney numunelerinin farklı ve aynı kayma mesafelerinde gösterdikleri aşınma hızları.....	63
Tablo 7.2	: Disk üstünde aşınan pim deney numuneleri % ağırlık kaybı değerlerine göre (Ek B- Tablo B.1- 4) oluşturulmuş oransal değerler.....	74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 : Cam şekillendirme makinası kalıp kolu (a) fotoğraf görüntüsü (b) teknik resmi..... 4

Şekil 2.1 : Tribolojik sistemin elemanları..... 6

Şekil 2.2 : Kaplanmış yüzeyin değişik bölgelerinde tribolojik olarak önemli özellikler..... 8

Şekil 2.3 : Kaplanmış yüzeylerin malzeme özelliklerini etkileyen faktörler..... 9

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..... 11

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 kirli bir tabaka içerir. Oksit tabakası, metale bağlı olarak taban malzemesi içine işleyebilir..... 13

Şekil 3.1 : Katı cisimlerin ideal teması..... 14

Şekil 3.2 : Malzemenin görünen ve gerçek temas alanı..... 16

Şekil 3.3 : Kuru sürtünme..... 18

Şekil 3.4 : Sürtünme katsayısının kayma hızı ve temas süresi ile ilişkisi. 20

Şekil 3.5 : Hakiki yüzey temasının şematik gösterimi..... 20

Şekil 3.6 : Temas yüzeyindeki oksit tabakası..... 22

Şekil 3.7 : Adsorbe olmuş yağ film tabakası..... 23

Şekil 3.8 : Sıvı sürtünme geometrisi..... 24

Sayfa No

Şekil 4.1 : İki elemanlı abrazif aşınma..... 32

Şekil 4.2 : Üç elemanlı abrazif aşınma..... 33

Şekil 4.3 : Abrazif aşınma mekanizması..... 33

Şekil 4.4 : Yorulma aşınmasının şematik gösterilişi..... 34

Şekil 4.5 : Erozif aşınmadaki tipik olaylar..... 37

Şekil 4.6 : Sıvı kabarcıklarının çarpmasına bağlı olarak oluşan kavitasyon erozyonunun şematik gösterimi..... 39

Şekil 5.1 : İşletmelerde sert krom kaplanmış farklı şekil ve boyutlardaki malzemeler…….. 43

Şekil 5.2 : Bor tabakası..... 46

Şekil 6.1 : ASTM G 99 standardına göre hazırlanan aşınma deneyi numunesi..... 57

Şekil 6.2 : Aşınma Deneylerinde Disk Üstünde Pim Deney Düzeneği..... 58

Şekil 6.3 : Metal- Metal aşınma deney düzeneğinin şematik olarak gösterilişi. (1) Dengeleyici ağırlık (2) Yük (3) Pim (4) Aşındırıcı Disk..... 59

Şekil 7.1 : 1040- 4140- 5140- AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama öncesi ve farklı kaplamalar sonrasında elde edilen yüzey sertlikleri……... 61

Şekil 7.2 : 1040- 4140- 5140- AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama kalınlıkları (μm)…… 61

Şekil 7.3 : 1040- 4140- 5140- AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama türlerine göre 2000 m. kayma mesafesinde gösterdikleri ağırlık kaybı değerleri.....……... 62

Şekil 7.4 : Farklı yüzey işlemleri görmüş 1040 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği..... 64

Şekil 7.5 : Farklı yüzey işlemleri görmüş 1040 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği..... 64

Şekil 7.6 : Farklı yüzey işlemleri görmüş 4140 kalite çelik malzemenin, Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği..... 65

Şekil 7.7 : Farklı yüzey işlemleri görmüş 4140 kalite çelik malzemenin, Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği..... 66

Şekil 7.8 : Farklı yüzey işlemleri görmüş 5140 kalite çelik malzemenin, Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği..... 66

Şekil 7.9 : Farklı yüzey işlemleri görmüş 5140 kalite çelik malzemenin, Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği..... 67

Şekil 7.10 : Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 kalite çelik malzemenin, Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği 68

Şekil 7.11 : Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 kalite çelik malzemenin, Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği..... 68

Şekil 7.12 : Yüzeyi borlanmış 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği..... 69

Şekil 7.13 : Yüzeyi borlanmış 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği..... 70

Şekil 7.14 : Yüzeyi akımsız nikel kaplı 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği..... 70

Şekil 7.15 : Yüzeyi akımsız nikel kaplı 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği..... 71

Şekil 7.16 : Yüzeyi nitrokarbürlenmiş 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği..... 72

Şekil 7.17 : Yüzeyi nitrokarbürlenmiş 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği..... 72

Şekil 7.18 : Yüzeyi sert krom kaplı 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği..... 73

Şekil 7.19 : Yüzeyi sert krom kaplı 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği..... 74

KISALTMALAR

PVD	**:**	Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD	**:**	Kimyasal Buhar Biriktirme
ASTM	**:**	American Society for Testing of Materials
BAD	**:**	Bağıl Aşınma Direnci
HV	**:**	Vickers Sertliği

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{F_s}$	:	Sürtünme Kuvveti
$\mathbf{F_n}$	:	Normal Kuvvet
$\boldsymbol{\mu}$	:	Sürtünme Katsayısı
$\mathbf{A_g}$	:	Gerçek Temas Alanı
A	:	Geometrik Alan
HB	:	Temasta Olan Yumuşak Malzemenin Sertliği
$\boldsymbol{\Delta H}$	:	Aşınma Sonrasındaki Yükseklik Kaybı
$\boldsymbol{\Delta G}$	:	Aşınma Sonrasındaki Ağırlık Kaybı
$\boldsymbol{\Delta W_R}$	:	Referans Deney Numunesi Aşınma Hızı
$\boldsymbol{\Delta W_t}$	:	Diğer Deney Numunesinin Aşınma Hızı

FARKLI KALİTE ÇELİKLERE UYGULANAN YÜZEY KAPLAMA İŞLEMLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

ÖZET

Yüzey işlemleriyle malzemelerin mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Aşınma, sürtünmeye maruz kalan makina parçalarında takip edilen önemli sorunlardan bir tanesidir. Aşınma nedeniyle, cam şekillendirme makinalarında üretilen ürünlerde şekil bozuklukları meydana gelmekte ve üretimin durdurulmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, cam şekillendirme makinalarında üretimin verimliliğini arttırmak için, mevcut kalıp kolu malzemesine alternatif malzemeler ve kaplama türleri denenmiştir.

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 (ASTM 1040, 4140 ve 5140 kalite çelikler) malzemede çalışma gerçekleştirilmiştir. Kalıp kollarındaki gerçek aşınma şartlarını simule edebilecek şekilde tasarlanan laboratuvar deneyleri için numuneler hazırlanmıştır.

Disk üstünde aşınan pim deneyi test sonuçları, en az ağırlık kaybeden deney numunesi (borlanmış ASTM 4140 kalite çelik) referans alınarak incelenmiştir. 2000 m. kayma mesafesinde, mevcut kalıp malzemesi olarak kullanılan kaplamasız AISI 420 kalite çeliğin BAO'nın (Bağıl Aşınma Oranı), en az ağırlık kaybeden deney numunesi olan borlanmış ASTM 4140 kalite çeliğe göre 184,73 kat daha fazla aşındığı tespit edilmiş ve ASTM 4140 kalite çelik borlama sonrasında 235 $HV_{0,5}$'ten 1400 $HV_{0,5}$ sertlik değerine ulaşarak, kaplamasız AISI 420 kalite çelikten (270 $HV_{0,5}$) daha sert hale gelerek yüzeyinde oluşabilecek darbe kaynaklı yaralanmalara karşı korunması kolaylaşmıştır.

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.

Disk üstünde aşınan pim deneylerinin sonucunda borlanmış ASTM 4140 kalite çelik malzemenin cam şekillendirme makinalarının çalışma koşullarında aşınmaya karşı en dayanıklı malzeme olduğu tespit edilmiştir.

THE EFFECT OF DIFFERENT KIND COATINGS ON WEAR CHARACTERISTICS OF VARIOUS QUALITY STEELS

SUMMARY

By using surface treatment methods, materials' mechanical properties can be improved. Wear is always observed as one of the follow- up issue for machinery equipments which are exposed to friction. Wear causes interruptions during production in glass forming machines because of arm mould based non- uniform products. In order to improve the efficiency of production in the glass forming machines, the different kinds of the coated alternative steels as the material of arm moulds are analyzed in this study.

Wear resistance of arm moulds are investigated by using different kinds of surface treatment methods. As alternatives to the existing arm mould material AISI 420; ASTM 1040, 4140 and 5140 quality steels are coated with nitrocarburizing, hard chrome, boronizing and electroless nickel coating techniques. For decreasing the number of interruptions during the production, alternative materials of the coated arm moulds are tested by simulating the working conditions in a laboratory environment where the standard specimens are used.

The results of the pin on disc tests are based on the least weight loss of the specimens which is analyzed as the boronized ASTM 4140 quality steel. In 2000 m. sliding, RWR (Relative Wear Ratio) of the non- coated AISI 420 (existing arm mould material) had 184,73 times greater weight loss than the boronized ASTM 4140 quality steel in pin on disc test. After boronizing the ASTM 4140 quality steel, its hardness has reached from 235 $HV_{0,5}$ to 1400 $HV_{0,5}$ (where the non- coated AISI 420 had 270 $HV_{0,2}$ hardness) which provided the ASTM 4140 quality steel to be more resistant to impacts.

Arm mould lifecycle increase by boronizing do not only increase the efficiency of production by decreasing the number of interruptions, it also lets firms to have sufficient stocks of fast consumed arm moulds and less labor work for purchasing transactions. The coating cost is negligible when compared with the interruption costs and the cost of non- coated AISI 420 arm moulds.

After testing these materials by pin on disc test, the results have shown that the boronized ASTM 4140 steel is the most wear resistant material under working conditions of arm moulds in glass forming machines.

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, akımsız nikel kaplama ve çeşitli yüzey kaplama teknikleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

1982 yılında Amerikan Ulusal Teknoloji Enstitüsü' nün araştırmasına göre korozyon ve aşınmadan dolayı meydana gelen zarar, gayri safi milli hasılanın 7 %' sini teşkil ettiği görülmüş ve bu yönde çalışmalara ağırlık verilmesi önerilmiştir [1]. 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.

Yüzey işlemleri ve mühendisliği son yıllarda hızlı olarak gelişmesine rağmen yüzey işlemlerine dair pratik bilgiler oldukça eskidir. İ.Ö. 880 yıllarında Homer'in Odysseus'unda, demirci ustalarının kılıç ve baltalarının yüzeyini sertleştirdiklerine dair bilgiler yer almaktadır [1]. 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 [1]. 11.yy'da Çinlilerin silahların mukavemetini artırmak için soya fasülyesinin parçalanmasından (ayrışması) faydalandığı bilinmektedir [1]. 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 ısıl işlemler de teknolojiye paralel olarak oldukça gelişmiştir. Klasik ısıl 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 kullanılabilmektedir.

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 kollarının mevcut malzemesine (AISI 420) alternatif malzeme ve kaplama türleri denenmiştir.

Aşınma nedeni ile önemli sorunlar yaratan kalıp kollarının farklı yüzey işlemleri ile aşınmaya daha dirençli hale getirilmesi konusu incelenmiş ve buradan hareketle, esas amacı maliyet düşürme ve cam ev eşyası üretimi prosesinden beklenilen kalitede yüzey elde etmek olan çalışmada, mevcut çelik kalıplar yerine, daha ucuz alt malzeme ile birlikte daha iyi performansla çalışılabilecek farklı yüzey kaplama yöntemlerinin uygulanarak başarılı neticelerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

1.2 Cam Sanayisindeki Durum

Küreselleşme ve çok hızlı teknoloji değişimleri her sektörü etkilediği gibi cam sektörünü de etkilemiştir. Bu hareketlilik cam sektörünü büyük bir rekabet ortamına itmiştir. Cam sanayinde, aşınmaya uğrayan metal malzemeler üretim sırasında önemli problemler yaratmaktadır. Cam ürünlerinin şekillendirme aşamasında kullanılan kalıp, kalıp kolu, cam kesme makasları ve damla yolları gibi makina parçalarının ömürleri ve özelliklerinin değişimi bu ürünlerin yüzey özellikleri açısından büyük önem taşımaktadır.

Metal malzemenin seçimi sıcaklık, korozyona dayanım, kayganlık, makine hızına uyum, maliyet özellikleri göz önüne alınarak yapılmaktadır. Cam-metal etkileşiminin

yoğun yaşandığı kalıp yüzeylerinin performanslarının arttırılması ve daha iyi kontrol edilebilir özellikler için çeşitli yüzey iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır.

1.3 Cam Şekillendirme Makinelerinde Yaşanan Sıkıntılar

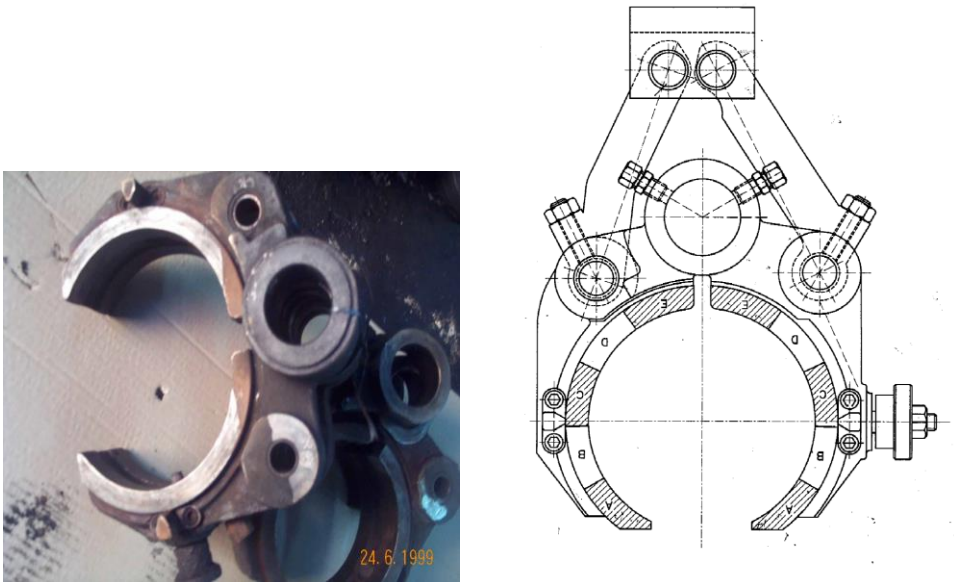
Cam şekillendirme makinelerinde maliyete yansıyan en önemli parametre makinenin kalıp kolu parçalarının değişmesi için durmasıdır. Birçok parçanın makine çalışırken değiştirilebilme imkanı varken, kalıp kolu değişimi için makinenin durdurulması gerekmekte ve doğrudan üretim kaybına neden olmaktadır.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

Cam kalıplarının, birbiri üzerinde çalışan veya cam 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 ara yüzeyin değiştirilmesi kalmaktadır.

Paşabahçe bünyesinde kalıp kolu çiftlerinin ömür sorunlarının incelenmesine yönelik yapılan çalışmaların ilk aşamasında kullanım süreleri ve yaşanan problemleri belirlemek amacı ile kapsamlı bir araştırma ve dökümantasyon çalışması yapılmıştır.

Paşabahçe A.Ş. bünyesinde kullanılan cam şekillendirme makinalarından birine ait olan kalıp kolunun fotoğrafı ve teknik resmi Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Bugüne kadar bu konu üstünde yapılmış çalışmalar özellikle yazılı raporlar kütüphaneden ve fabrikalardan temin edilmiş, geliştirme çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlara ulaşılmaya çalışılmıştır.



(a) (b)

Şekil 1.1: Cam şekillendirme makinası kalıp kolu (a) fotoğraf görüntüsü (b) teknik resmi [1].

Bu 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 ölçülerek teknik resimlerin üzerine işlenmiştir. Bu çalışmalar kapsamında; kalıp kolunun kalıpla yaptığı temas noktaları da tespit edilmiştir. Ayrıca yeni takılan kalıp kollarının istatistiği tutulmaya başlanmıştır.

Özellikle kalıp koluna gelen yükler belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun iki önemli nedeni vardır. Bunlardan ilki disk üstünde pim aşınma deneyleri sırasında uygulanacak yükü belirlemek ve bu sayede yapılacak çalışmalarda daha doğru ve gerçekçi sonuçlar elde etmektir. İkinci olarak da, çalışma esnasında uygulanan yüke uygun karakteristikte ekipmanın kullanılıp kullanılmadığının belirlenmesidir. Kalıp kolunda birçok hareketli eklem yeri vardır ve zamanla bu parçalarda çeşitli sorunlar görülmektedir. Yapılan çalışmada bu sorunlar belirlenip aşınma problemine etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Cam sanayinde kullanılan metal malzemelerdeki aşınmayı önlemek amacı ile en yaygın uygulama alanı bulan kaplama türü sert krom kaplamadır. Bu tür kaplamada

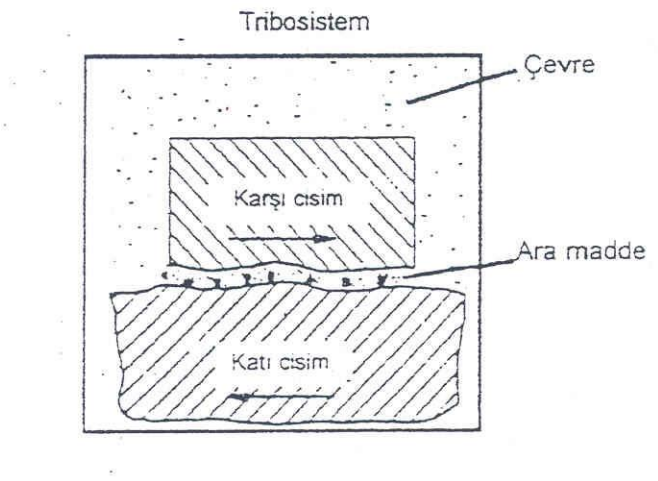
amaç, hem yüzeyi aşınmalara karşı korumak, hem de mamul yüzey düzgünlüğünü sağlamaktır. Ancak, kalıp şekline bağlı olarak, bazı uygulamalarda sert krom kaplamaların gerekli niteliklerde kaplanamamasından kaynaklanan ciddi problemler mevcuttur. Bununla birlikte çevresel etkileri de göz önünde bulundurulduğunda; krom kaplama bir çözüm olmaktan uzaklaşmaktadır.

2. TRİBOLOJİ

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 [2]. Triboloji, Yunanca 'sürtünme' anlamına gelen "tribo" kelimesinden türetilmiştir [3]

Triboloji, "bir izafi hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların bilimi veya tekniği" olarak tanımlanır [4]. Triboloji, aşınma problemlerinin çözümü ile ilgilenen ve malzeme bilimi, kimya, fizik ve mühendislik bilimleri gibi çeşitli bilim dallarını içeren bir bilimdir.

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 [5]. Bu sisteme tribolojik sistem denilmektedir. Şekil 2.1'de tribolojik bir sistemin ana elemanları görülmektedir.



Şekil 2.1: Tribolojik sistemin elemanları [5].

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. [6, 5]. Ara madde ise; katı, sıvı, gaz fazlarından birinde veya bunların karışımı şeklinde olabilir. Hareket; kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe gibi içimlerde olabilir. Yük ise gerilmenin az veya çok olmasının yanı sıra sabit, değişken, artan, azalan ve darbeli olabilir. [7, 8, 5, 9].

Triboloji, birbiriyle temasta olan relatif olarak areket halindeki yüzeylerle ilgilenen bilim ve teknoloji dalıdır- yani sürtünme, aşınma ve yağlama konularını kapsar.

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 atına almak için artan bir ihtiyaç vardır.

Daha önceden bu amaçlar tasarım değişiklikleriyle, daha gelişmiş malzeme seçimiyle veya yağlama tekniklerinin kullanımıyla elde edilmiştir. Malzeme değişiklikleri seramik veya polimerle ilgili uygulamaları içerebilirken, yağlama teknikleri mineral-sentetik yağlar gibi sıvı yağlayıcıların veya molibden disülfit gibi katı yağlayıcıların kullanımını içerir.

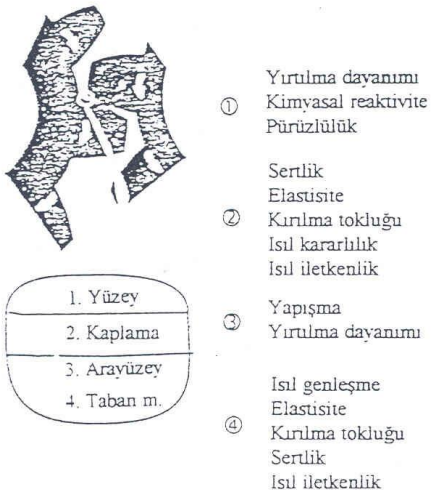
Son zamanlarda tribolojistler (triboloji üzerine çalışan bilim adamları), sürtünme ve aşınma kontroluna karşı başka bir yaklaşımın – yüzey işlemleri ve kaplaması uygulaması – kullanımının büyük oranlarda artmasını sağlamışlardır. Bu ise, yüzey mühendisliği adı verilen yeni bir bilim dalının gelişmesine 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 sağlanabilmesine yol açmıştır. Taban malzemesi mukavemet ve tokluk amaçlarıyla tasarlanabilirken, kaplama ise aşınmaya karşı direnç, ısıl yükler ve korozyondan sorumlu olur.

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

Kaplama prosesleri, kaplanan fazın haline göre genel olarak dört gruba ayrılabilir- gaz, çözelti, sıvı ve katı. Tribolojik olarak, bu konuda daha çok bilimsel ve ticari ilgi çeken gaz hali proseslerinin üzerinde durulması gerekir.

Tribolojik gereksinimleri karşılayabilmek için kaplanmış yüzey, örneğin sertlik, elastisite, kayma dayanımı, kırılma tokluğu, ısıl genleşme ve yapışma gibi özelliklerin uygun bir birleşimine sahip olmalıdır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, herbiri değişik özelliklere sahip dört değişik bölge ayırdedilebilir. [10].

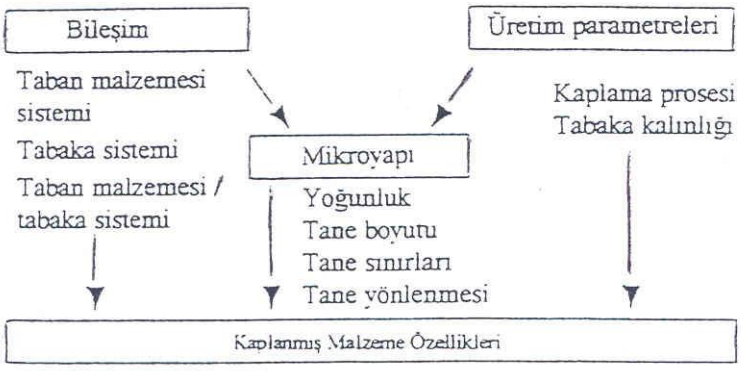


Şekil 2.2: Kaplanmış yüzeyin değişik bölgelerinde tribolojik olarak önemli özellikler [10].

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 arayüzede, 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 özellik, kolaylıkla aynı zamanda ede edilemez. 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'de gösterildiği gibi, kaplama prosesi ve kalınlığı gibi malzeme sisteminin ve üretim parametrelerinin birleşimidir. Bunların herbiri, örneğin yoğunluk, tane boyutu, tane sınırları ve tane yönlenmesi kaplamanın mikroyapısını belirler [10].



Şekil 2.3: Kaplanmış yüzeylerin malzeme özelliklerini etkileyen faktörler [10].

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

Tablo 2.1: Triboloji: Disiplinler arası bir yaklaşım.

Makina mühendislerinden elde edinilen bilgiler

- 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

- Gerilme ve sıcaklık bölgeleri
- Yük taşıma prosesi

Malzeme bilimcisinden elde edinilen bilgiler

- Bileşim, sertlik
- Matris- ikinci faz partiküllerin yapışması
- Kristallografik yapı, iç gerilme profili

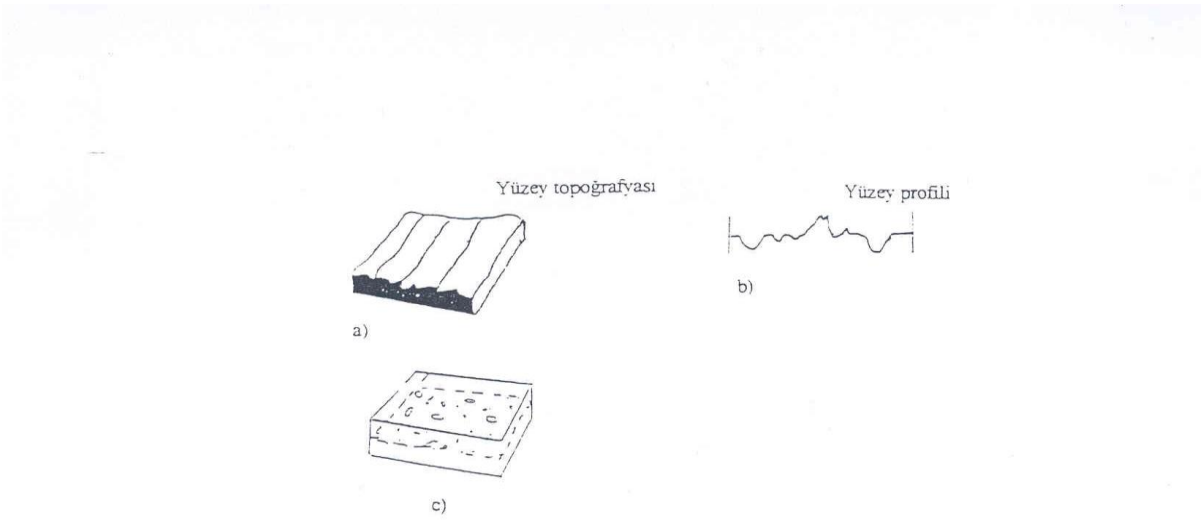
Yüzey bilimcisinden elde edinilen bilgiler

- Kaplama prosesi, kaplama kalınlığı
- Kaplama- taban malzemesi sertliği
- Kaplama- taban malzemesi yapışması, arayüzü

2.1 Yüzey Karakteristikleri

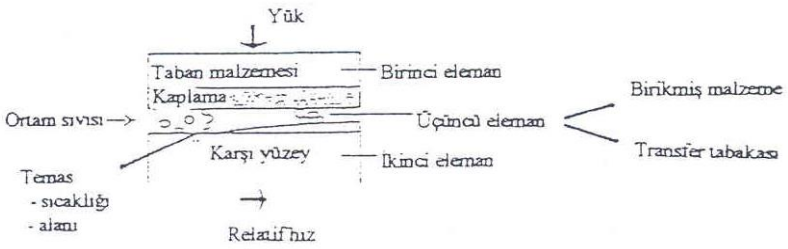
Mühendislik amaçlarıyla kullanılan tipik bir metal yüzeyi, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi girintiler ve çıkıntılar içeren, eğimlerin yaklaşık 5º civarında olduğu ve ender olarak 30º'den dik olduğu bir yüzey profiline sahiptir. Bir girintinin dibinden bir çıkıntının en üstüne kadar olan yükseklik farkı, tipik olarak 0,1- 3 μm arasındadır.

Mühendsilikte 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_I gibi. Bunların farklı açılardan tibolojideki faydaları, Whitehouse, Moore, Czichos, Williamson ve O'Connor tarafından tartışılmıştır [9]. 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 [10].



Şekil 2.4: Bir yüzeyin şekli, a) yüzey topoğrafyası ve b) yüzey pofili tarafından karakterize edilir. Temasta buluna iki yüzey için c)'de gösterilen gerçek temas alanı, gözle görülebilen temas alanından oldukça düşüktür [10].

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 yüzeyi, 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.

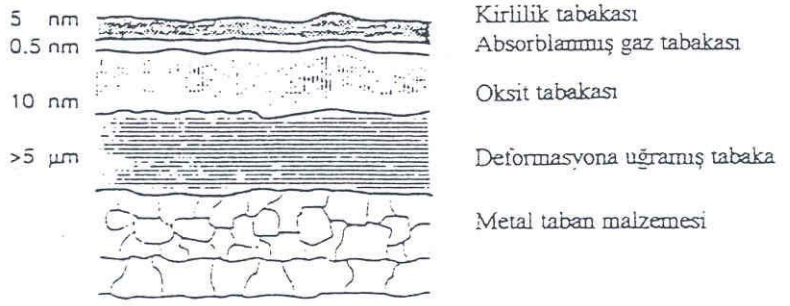


Şekil 2.5: Mühendislik sistemlerindeki gerçek temas koşullarının şematik gösterimi [2].

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.

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 [10]. Elipsometri gibi yeni

teknikler, kalınlığın istenilen bir anda ölçülebilmesine ve bir yüzeyin en üst tabakasının temas bölgesinde ortaya çıktığı anda bileşiminin analizine olanak sağlamıştır [10].



Şekil 2.6: Bir metal yüzeyi; deformasyona uğramış bir tabaka, oksit tabakası, absorblanmış gaz tabakası ve kirli bir tabaka içerir. Oksit tabakası, metale bağlı olarak taban malzemesi içine işleyebilir [10].

3. KATI CİSİMLERİN TEMASI

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.

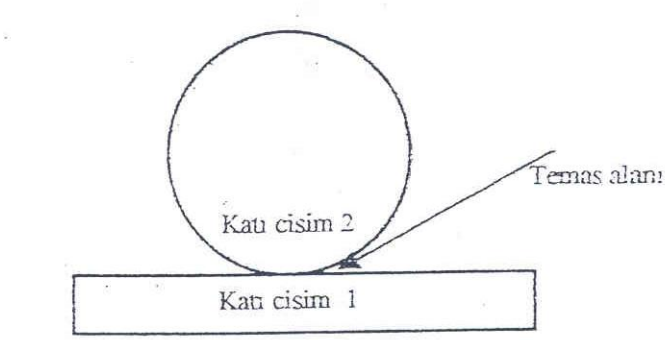
3.1 Pürüzsüz Yüzeylerin Teması

Temas alanında gerilme, koşullar tipine 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 dikeydirler
- Temas alanı, temas eden yüzeylere göre küçüktür



Şekil 3.1: Katı cisimlerin ideal teması [11].

Yüzey etkileşim davranışına etkili olan parametreler, temas eden cisimlere ait hacimsel niteliklere, bu cisimlerin temas eden yüzeylerinin niteliklerine bağlıdır [12].

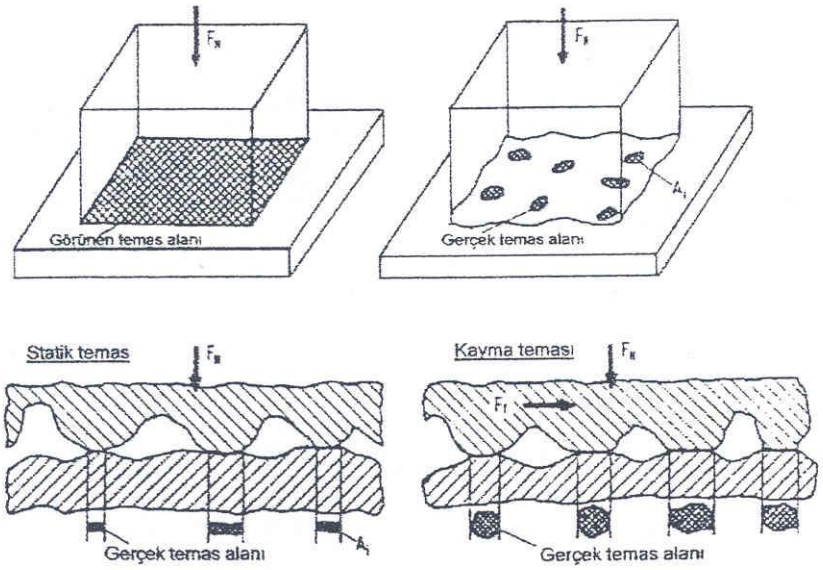
Hacimsel nitelikler arasında en önemlisi, akma mukavemeti ve nüfuz etme sertliği plastik mukavemet parametreleridir. Daha sonra malzemenin gevrekliğini gösteren, örneğin çelikte kırılma gerilmesinin basmada akma gerilmesine oranı, ya da çekmede plastik şekil değiştirme miktarı önemli olmaktadır. Yüksek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

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

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

3.2 Pürüzlü Yüzeylerin Teması

Üzerlerinde normal bir yükün bulunduğu iki pürüzlü yüzey temas haline geldiğinde, ilk temasa geçen noktalar yüzey üzerindeki düzgünsüzlüklerin doruk noktalarıdır. (Şekil 3.2). Yük arttıkça daha düşük yüksekliğe 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, ortalamanın altındaki doruklar temas etmemiş olacaklardır.



Şekil 3.2: Malzemenin görünen ve gerçek temas alanı [8].

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 malzemeden) kırılması ile aşındırıcı ikinci elementler (aşındırıcı parçacıklar) sisteme katılmış olur.

3.3 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 absorbsiyon 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.

3.4 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.

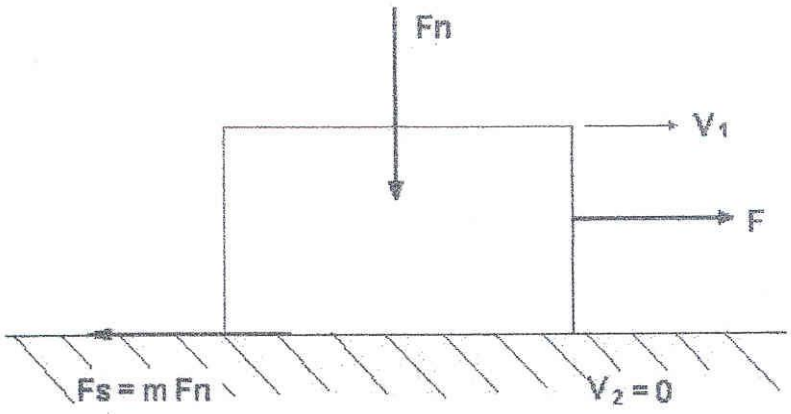
Sürtünmenin her türlü oluşumu günlük hayatımızda daima görülür. Yürüyebilmemiz bile sürtünmeye bağlıdır. Bu dereceye kadar roketler istisna edilirse, bütün nakil vasıtaları sürtünme sayesinde çalışabilmektedir. Bilhassa, yol stabilizesi ve frenleme bakımından otomobil tekerleklerinin yola olan sürtünmelerinin fazla olması gerekmektedir. Her türlü mekanizma ve makinalarda veya hareketin bulunduğu heryerde sürtünme mevcuttur. Prof. Vogelpohl, dünyada üretilen enerjinin 1/3- 1/2 arasındaki oran kadar sürtünmeye harcandığını tahmin etmektedir [8].

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 [13].

- 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 [6].

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.

3.4.1 Kuru Sürtünme

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

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

$$F_s = \mu.F_n \tag{3.1}$$

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'deki cisimlerin herhangi birine teğetsel bir *F* kuvveti tatbik edilirse, iki durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda *F* kuvvetine rağmen cisimler birbiri üzerinde kaymazlar. Bu durumda Newton kanununa göre F_s sürtünme kuvveti *F* kuvvetine eşit ve ters yöndedir.

$$F_s = F \tag{3.2}$$

İkinci durumda *F* kuvvetinin etkisi altında yüzeyler birbiri 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 [6, 12].

Coulomb- Amontos kanunu olarak tanınan 3.1 bağıntısına göre [6]:

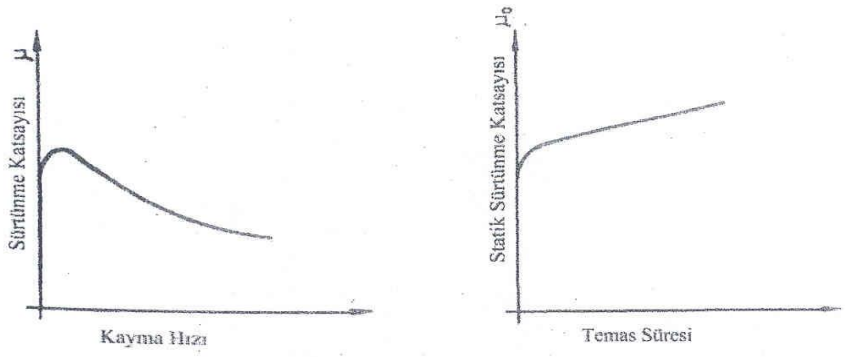
a. Sürtünme kuvveti normal kuvvetle orantılıdır; böylece sürtünme katsayısı

$$\mu = F_s / F \tag{3.3}$$

b. Sürtünme kuvveti nominal temas alanına bağlı değildir.

c. Sürtünme kuvveti kayma hızından bağımsızdır.

d. Sürtünme katsayısı temastaki malzeme çiftine bağlıdır.

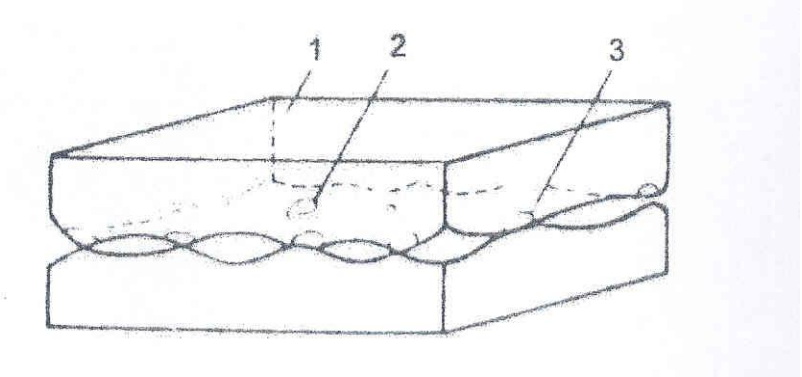


Şekil 3.4: Sürtünme katsayısının kayma hızı ve temas süresi ile ilişkisi [6].

Statik sürtünme katsayısı (μ_s), genellikle dinamik sürtünme katsayısından (μ_d) daha büyüktür. Kayma hızı arttıkça, dinamik sürtünme kasayısı, 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: Hakiki yüzey temasının şematik gösterimi [6].

Yapılan incelemeler gerçek yüzey alanının A_g = (1/500.....1/10,000) arasında değiştiğini göstermektedir [8]. Gerçek yüzey, pürüzlülüğe bağlı olduğundan, bunun büyüklüğü yüzey işleme yöntemlerine bağlıdır. Bunun yanı sıra, gerçek yüzey üzerindeki F_n yükleme kuvveti büyük rol oynamaktadır. Kuvvet büyüdükçe, pürüzlerin deformasyonu nedeniyle temas yüzeyleri artar. Bowden ve Tabor'a göre [3] temas yüzeylerini oluşturan pürüzlerin plastik deformasyon yaptıkları kabul edilirse, gerçek yüzey;

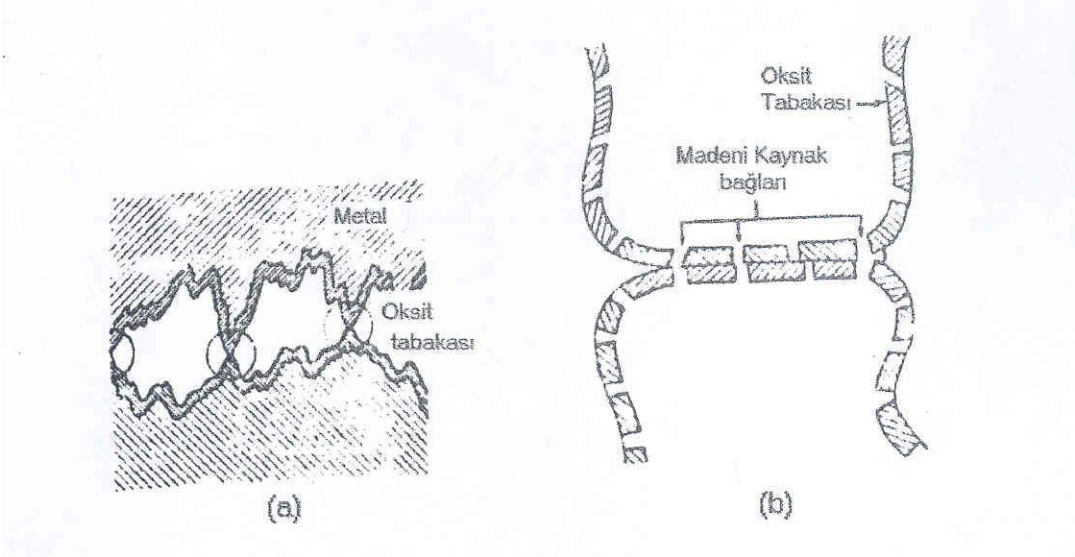
$$A_h = F_n / HB$$

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. Adsorpsiyon 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 [4, 13].

Teknikte kullanılan malzemelerin yüzeyleri çeşitli kimyasal bileşikleri ihtiva eden, tabii bir adsorpsiyon 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 [6].

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 [13, 6, 12].

b. Metal kaynak bağı teşkil etmiş olan temas noktalarınınkayma 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 [13].

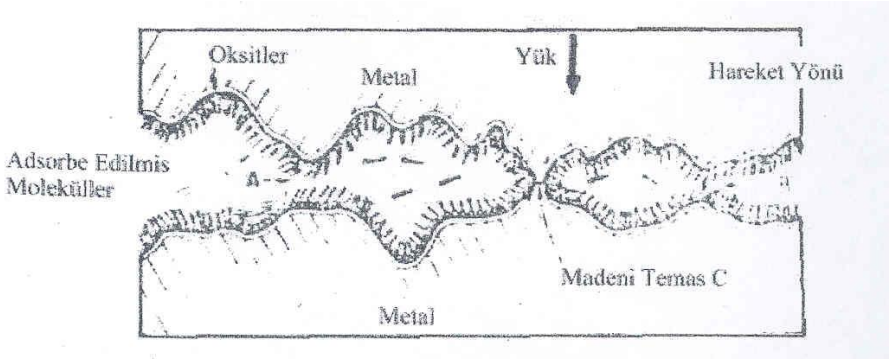
Şu halde, küçük bir sürtünme katsayısı elde etmek için malzemeler aynı veya birbiri ile kolayca alaşım yapabilen türde olmalıdırlar. Ayrıca, malzemelerin birinin sert, diğerinin yumuşak olması gerekir.

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.

3.4.2 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, adsorpsiyon olayının sonucu olarak metal yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışırlar (Şekil 3.7). Böylece yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kalınlığında adsorpsiyon 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.



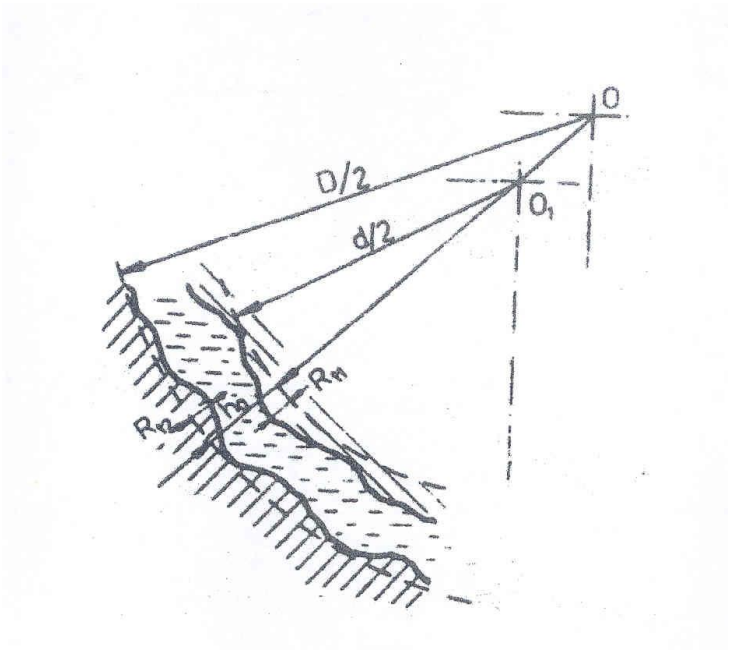
Şekil 3.7: Adsorbe olmuş yağ film tabakası [6].

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 [12].

3.4.3 Sıvı Sürtünmesi

Sıvı sürtünmesinde metal yüzeyler arasındaki yağ tabakasındaki basınç, dış kuveti dengeleyecek değere ulaşınca yüzeyler birbirinden tamamen ayrılır. Bu durum Şekil 3.8'de gösterilmiştir [45].

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



Şekil 3.8: Sıvı sürtünme geometrisi [45].

4. AŞINMA

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 [14, 15, 16].

Bir aşınma sisteminde, tribolojide belirtildiği gibi, sistemde; Ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük ve hareket temel unsurlardır.

4.1 Aşınmanın Tanımı

Teorik olarak incelenen sürtünmeden dolayı oluşan aşınma, tüm endüstri kollarında çok önemli bir tehlike olarak karşımıza çıkmaktadır. Eğer zamanında ve sistematik önlemler alınmaz ise çok pahalıya mal olabilecek sonuçlar görülebilir.

Alman Standardı DIN 50320'ye göre aşınma, " katı, sıvı veya gaz karşı cisme göre izafi hareket ve temas şeklinde mekanik bir etkiden dolayı katı bir cismin yüzeyinden malzemenin ileri derecede istenilmeyen kaybı" [17] olarak tanımlanır.

Misra ve Finnie [18] ise aşınmayı mekanik etkileşimler sonucunda katı bir yüzeyden malzeme kaldırılması şeklinde ifade ederek malzeme kaldırılmasını kimyasal etkenlerle de olabileceğini belirtmiştir.

Bu tanımlara göre yüzeylerin taşlanması, parlatılması veya mekanik parçaların ayırıştırılmasını aşınma olayı olarak incelememek gerekir. Zira bu olaylardaki yüzey değişikliği arzu edilen bir işleme olayıdır.

Aşınma endüstride her alanda karşımıza çıkacak bir olgudur. Aşınmayı belirleyen bazı kriterler vardır [11].

- Mekanik bir etkinin olması
- Sürtünme olması (izafi hareket)
- Yavaş ancak devamlı olması
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi
- İstenmediği halde meydana gelmesi

Gerek ve yeter şart olarak nitelediğimiz bu beş şartın doğal sonucu olarak aşınma meydana gelmektedir [5].

Bu şartlardan birini sağlamayan yıpranma olayı (örneğin genel korozyon) aşınma olarak ifade edilmemelidir. Çünkü korozyon, diğer bütün şartları sağlamasına rağmen sürtünme ve mekanik hareket olmaksızın (sadece kimyasal ve elektrokimyasal etki ile) meydana gelmektedir. Ancak sürtünme sırasında aşınmanın karakterine etki eden faktörlerden biriside çevredir. Çevre şartlarına bağlı olarak aşınmanın karakteri değişebilir. Mekanik etki ile birlikte kimyasal veya elektrokimyasal etki ile de malzeme yüzeyinden mikro tanecikler kopar veya yüzey bölgesi değişikliğe uğrar. Böyle durumlarda hem sürtünme, hem de korozyon birlikte tahribata neden olabilirler. Sürtünmeyle müşterek olarak kimyasal etkilerle meydana gelen korozyon aşınma kapsamına alınmalıdır. Nitekim, korozif etkenlerle bile olsa, tribolojik zorlanma sırasında meydana gelen yüzey bölgesi değişiklikleri veya parçacıkların kopması, aşınma kavramı içinde düşünülmelidir [5].

Haddeleme veya dövme sırasında yüzeyden ince tabakaların kalkması “yavaş” olma şartını sağlamadığından aşınma sayılmaz. Talaşlı şekillendirme veya alıştırma kapsamına aldığımız ve aşınma esasına dayanarak yaptığımız; taşlama, honlama, raspalama ve eğeleme gibi işlemler “yavaş” olmadıkları gibi isteyerek yaptığımız aşınmalardır.

4.2 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 [16].

Aşınma çok değişik şekillerde sınıflandırılmıştır. Araştırmacılar genellikle mekanizmaları, oluşum şiddetleri ve sıklıklarına, dolayısıyla önem derecelerini göz önüne alarak sınıflandırmışlardır. Eyre ve Rabinowicz aşınma mekanizmalarını 4 ana başlıkta toplamıştır. [19, 20] :

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

Özellikle Rabinowicz diğer aşınma türlerine "marjinal" olarak kabul etmiştir [20].

Eyre ve Rabinowicz farklı zamanlarda, aşınma mekanizmalarının önemini incelemişlerdir [19, 20]. Tablo 5.1'de aşınma mekanizmalarının göreceli olarak önem dereceleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Aşınma mekanizmalarının göreceli önem dereceleri [19, 20].

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 4.1'de görüldüğü gibi 1976 ile 1983 yılları arasındalki farklılık, abrazif ve adhezif aşınma mekanizmalarının önem derecelerinin değişmesidir. Tablo 4.1'deki 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.

Wulpi aşınmayı Aşınma I ve Aşınma II olarak;

Aşınma I

Abrazif Aşınma

- Erozyonlu Aşınma
- Zımparalayarak Aşınma
- Oyuk Aşınması

Adhezif Aşınma

- Kazımalı Aşınma

Aşınma II

Yorulma Aşınması

- Yüzeyaltı Yorulma Aşınması
- Yüzeyden Gelişen Yorulmalı Aşınma
- Kavitasyonlu Yorulma Aşınması

olacak şekilde sınıflandırılmıştır [16].

Bhushan aşınmayı birbirinden bağımsız olduğunu düşündüğü altı değişik mekanizmaya ayırmıştır [21]:

1. Adhezif Aşınma, Sürterek Aşınma, Sürüyerek Aşınma;
2. Abrazif Aşınma, kesme;
3. Yorulmalı Aşınma;
4. Korozyonlu Aşınma;
5. Erozyonlu Aşınma, katı partikülü, akışkan ortamlı ve kavitasyonlu;
6. Elektrik arkıyla meydana gelen aşınma.

Bunların dışında kalan kazımalı aşınma adhezif, abrazif ve korozyonlu aşınmanın; darbeli aşınma, erozyonlu ve yorulmalı aşınmanın bir bileşimi olarak düşünülmektedir [21]. Ayrıca, Bhushan aşınmayı tek fazlı ve çok fazlı olmak üzere iki gruba ayırmaktadır. Tek fazlı aşınmada; aşınma göreceli hareket halindeki katı, sıvı veya gaz yüzeyden malzemenin uzaklaştırılmasına neden olur. Çok fazlı aşınmada ise; aşınmada yine katı, sıvı veya gaz hareketi mevcuttur. Ancak burada katı, sıvı veya gaz ikincil fazı (aşınmış partiküller, çıkıntılar, sıvı damlaları, gaz kabarcıkları, vb,..) taşıyacak şekilde davranır ve aşınma meydana gelir [21].

Tablo 4.2: Tek fazlı ve çok fazlı aşınmalara örnekler [21].

Temas	**Partikül**	**Hareket**	**Genel Adlandırma**
Katı	-	Kayma	Kazımalı Aşınma
Gaz / Sıvı	-	Akışkan	Erozyonlu Aşınma
Sıvı	Gaz / Buhar	Partikül Darbesi	Kavitasyon Aşınması
Sıvı	Katı	Yüzeyde Kayma	Abrazif

Görüldüğü gibi aşınma farklı bilim adamlarına göre değişik metodlar oluşturularak çok değişik şekilde sınıflandırılmıştır. Bu bilim adamları arasındaki ortak özellik, benzer mekanizmalarla gelişen aşınma olaylarını bir araya toplamak ve diğerlerinden farklarını ortaya koyarak sınıflandırma yapmak olmuştur.

Bu çalışmalarda aşınma, aşağıda belirtildiği gibi sınıflandırılmıştır [22] :

a) Partiküller veya akışkanla meydana gelen aşınma

Abrazif aşınma,

Katı partiküllü erozyon,

Kavitasyon erozyonu,

Parlatarak aşındırma,

Akışkan darbesiyle aşınma,

Bulamaç halindeki akışkanın aşındırması

b) Yuvarlanma, darbe ve kayma hareketiyle meydana gelen aşınma

Adhezif aşınma,

Kazımalı aşınma,

Yuvarlanan yüzeylerin aşınması,

Darbeli aşınma

c) Kimyasal reaksiyonlarla ilişkili aşınma

Korozyonlu aşınma,

Oksidasyon aşınması.

Bunların dışında kalan yorulmalı aşınma bu sınıflandırmaya dahil edilmelidir. Aşınma mekanizmalarından yukarıdaki sınıflandırmaya uygun olarak örnek mekanizmalar seçilmiş ve devam eden bölümlerde bu mekanizmalar hakkında bilgi verilmiştir.

4.2.1 Adhezif Aşınma (Yapışma Aşınması)

Yapışma aşınması olarak da adandırılan 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 birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye olan malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir [14, 15, 16].

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

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 aşılır 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 relatif 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 [21].

4.2.2 Abrazif Aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da 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.

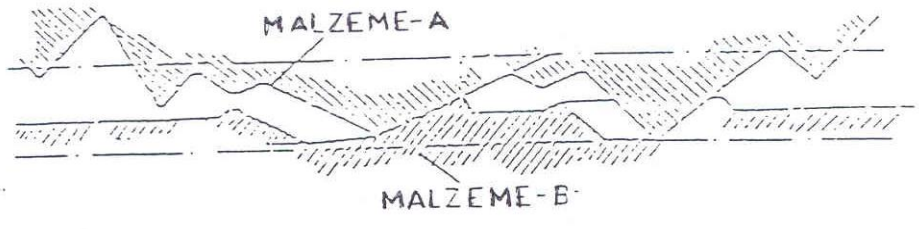
Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma şekli verilebilir [14, 15, 16].

Bu tip aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elemanlı (Şekil 4.1) ve üç elemanlı (Şekil 4.2) olmak üzere ikiye ayrılır.

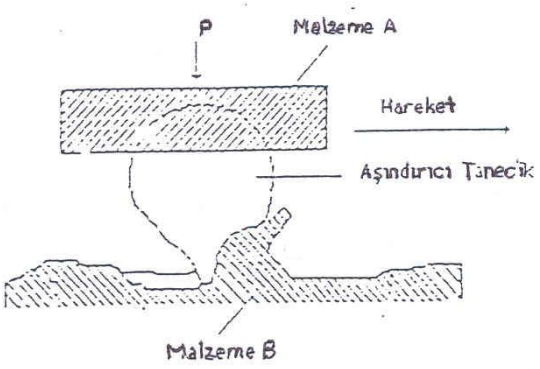
Abrazif aşınma, daha sert bir malzeme tarafından bir yüzeye yapılan hasar olarak açıklanabilir. Bazen de şiddet derecesine göre kazınma, çizilme veya oyuklanma olarak adlandırılır. Bu tip aşınmanın ortaya çıktığı genelde iki durum vardır:

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 taştır (üç elemanlı abrazyon) [21].



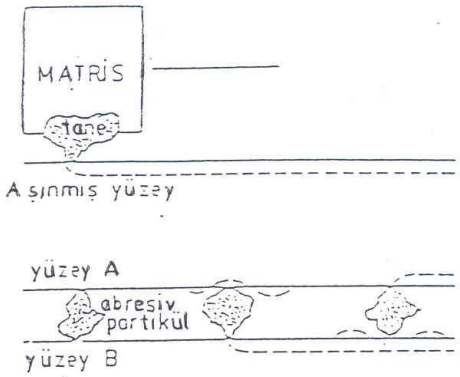
Şekil 4.1: İki elemanlı abrazif aşınma [14, 15, 16].



Şekil 4.2: Üç elemanlı abrazif aşınma [14, 15, 16].

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.

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 [21]. Şekil 4.3'te abrazif aşınma mekanizması, şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Abrazif aşınma mekanizması [14, 15, 16].

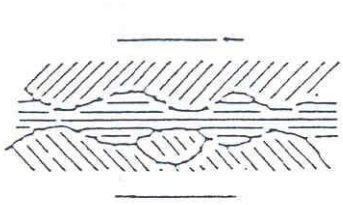
Abrazif aşınmayı etkileyen iki temel faktör, aşındırıcı partikül ile metal yüzeyi arasındaki sertlik farklılığı ve teması meydana getiren basıncın büyüklüğüdür. Abrazif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden normal yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak 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, mikrokesme ve mikrokırmanın toplam etkileri ile ortadan kaldırır.

Khruschow, abrazif aşınma üzerinde malzeme özelliklerinin etkisini incelemiştir. Saf metallerin ve metalik olmayan sert malzemelerin olması durumunda relatif aşınma direnci ve sertlik arasında direkt bir orantının olduğunu göstermiştir [21]. Bunun dışında, yapısal çeliklerin (normal sertleşen ve temperlenen) ısıl işleme uğratılmasının abrazif aşınma direncini geliştirdiğini belirtmiştir [21].

4.2.3 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, Şekil 4.4'te belirtildiği gibi yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur [14, 15, 16].



Şekil 4.4: Yorulma aşınmasının şematik gösterilişi [14, 15, 16].

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 [21].

Pratikte tüm makinalar, periyodik gerilme değişimlerine maruz kalırlar. Dönen bir şaftın 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 çıkıntıların 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 yakınlaşır. 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 [21].

4.2.4 Korozif Aşınma

Adhezyon, abrazyon ve yorulmadan kaynaklanan aşınma, birbirleriyle karşı karşıya bulunan yüzeylerin deformasyon özellikleriyle ve gerilme etkileşimleriyle açıklanabilir; fakat korozif 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 reakiyon 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 çıkıntıların mekanik özelliklerindeki değişimler nedeniyle, çıkıntıların reakiyona girme kabiliyetlerinde bir artma ile sonuçlanır.

Razavizadeh ve Eyre alüminyum alaşımlarının oksidasyon davranışını incelemiş ve korozif aşınmanın, metal yüzeyindeki tabakaları meydana getirmek için oksidasyon, deformasyon ve kırılmanın birleşmiş bir prosesi ile oluşturduğu sonucuna varmıştır [21].

4.2.5 Kazımalı (Fretting) Aşınma

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

Bu tip aşınmaya uğrayacak parçalara örnek olarak çekme kuvvetine maruz kalan parçalar, civatayla tutturumuş parçalar gösterilebilir.

Kazımalı aşınma çoğunlukla, basma kuvvetine maruz kalan 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 [21].

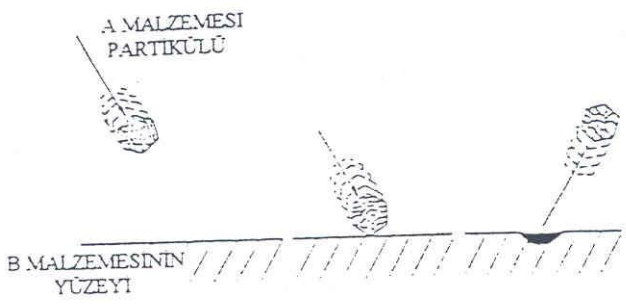
4.2.6 Erozif Aşınma

Erozif 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 [21].

Bununla ilgili temel mekanizma, şematik olarak Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Erozif aşınmadaki tipik olaylar [21].

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 4.3).

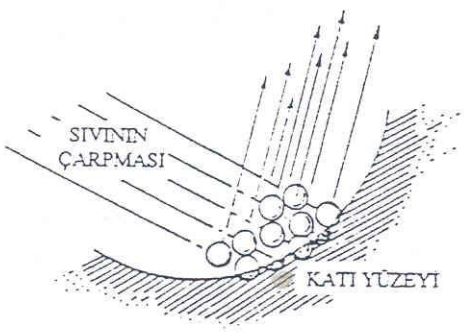
Tablo 4.3: Sıvı çarpmasına, çarpma açısının malzeme tepkisi üzerindeki etkileri [21].

	Çarpma Açısı		
Malzeme Tipi	**< 20º**	**45º**	**90º**
Elastik	Etkisiz	Görülebilir herhangi bir etki yok	Yüzey deforme olur
Sünek	Maksimum "kesme aşınması"	Karışık sistem	Maksimum deformasyon aşınması
Gevrek	Çok düşük erozyon	İleri safhadaki erozyon	Maksimum erozyon

4.2.7 Kavitasyonla Korozif Aşınma

Kavitasyon erozyonu, bir katı ve bir akışkanınrelatif harekette olduğu ve akışkanın içinde oluşan kabarcıkların kararsız hale geçmesi ve katının yüzeyine çarpmaları sonucu ortaya çıkar. Bu durum Şekil 4.6'da gösterilmiştir. 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 [21].



Şekil 4.6: Sıvı kabarcıklarının çarpmasına bağlı olarak oluşan kavitasyon erozyonunun şematik gösterimi [21].

Lord Rayleigh, bir kabarcığın çözülmesi nedeniyle sıvı içinde meydana gelen ani basıncı, sıvının sıkıştırılabilirliği ve ani yoğunluğu ile çökme hızına bağlamıştır [21]. Wilson ve Graham, gümüşün ağırlık kaybının bu anlayışla çok iyi bir şekilde uyuştuğunu ve erozyon hasarının da yoğunluk nedeniyle ve sıvı içindeki ses hızıyla ilişkili olabileceğini ifade etmişlerdir [21].

4.2.8 Elektrik Ark Akımlı Aşınma

Bir kayma prosesinde, ince bir hava filminin öbür tarafına yüksek bir elektriksel gerilim uygulandığı zaman, arklaşmaya yol açan dielektrik hasar meydana gelir. Arklaşma 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.

Arklaşma 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 arklaşma, birçok çeşit aşınmayı başlatabilir. Elektrikle çalışan makinalarda felaketle sonuçlanabilen hasarların oluşmasına sebep olur.

4.3 Aşınmanın Önlenmesi

Aşınma birbirinden bağımsız olarak veya aynı zamanda meydana gelen çeşitli olayların oluşturduğu karışık bir malzeme kaldırma, ayrılma prosesidir. Aşınmanın önlenmesi veya azaltılabilmesi için, öncelikli olarak aşınmaya neden olan tüm

faktörlerin anlaşılması gereklidir. Çok detay faktörlere yönelik, detaylı önlemlerin alınması gerekliliği nedeniyle, belirli bir aşınma türünü kontrol altında tutma ile ilgili örnekler, Tablo 4.4'te özetlenmiştir.

Tablo 4.4: Belirli bir aşınma prosesinin kontrolü için tercih edilen malzeme özellikleri [21].

Aşınma Modu	**Aşınma direncini veren malzeme özelliği**
Adhezif	Karşı yüzey malzemesinin düşük çözünürlüğü
	Kayma sırasında, ara yüzey sıcaklığındaki termal yumuşamaya karşı direnç
	Düşük yüzey enerjisi
Abrazif	Abrazif ortamdan daha yüksek yüzey sertliği
	Düşük deformasyon sertleşmesi katsayısı
Yorulma	Altyüzey deformasyonuna, çatlak oluşumu ve ilerleme hızına karşı direnç; yani, yüksek sertlik- tokluk- akma dayanımı
Korozif	Pasive edilmemiş halde korozif ortama karşı direnç
Kazınma	Ortama karşı korozyon direnci
	Yumuşak korozyon ürünleri oluşturma kabiliyeti
	Karşı yüzeyle mükemmel karışmazlık
	Yüksek abrazyon direnci
Katı partikül erozyonu	Düşük açılı çarpışma için yüksek sertlik
	Yüksek açılı çarpışma için yüksek tokluk
	Erozyon direnci üzerinde, ısıl işlemin herhangi bir etkisi yoktur.

5. METALLERE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ

Yüzey sertliği, aşınma direnci ve yorulma dayanımını artırmak amacıyla kullanılan yüzey işlemleri, mikroyapısal, kimyasal difüzyon ve iyon implantasyon 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. Mikroyapısal işlemler, kimyasal yayınım 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 [21].

Genel olarak termokimyasal işlemler katı, sıvı veya gaz ortamında gerçekleştirilir. Son yıllardaki gelişmelerle, bu işlemlerin çoğu için elektriki 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 [23]. 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 ulaşılabilmesini sağlamak, konstrüksiyonlarda beklenilen işlevi gösterebilmek için uygulanır.

Metallere uygulanan yüzey işlemleri çok geniş bir alana sahiptir. Uygun yüzey işlemi seçimi için, malzemenin kullanılacak alanın belirlenmesi, taban malzemesinin belirlenmesi ve seçimi, malzemeden 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 görecek seviyeye getirilir.

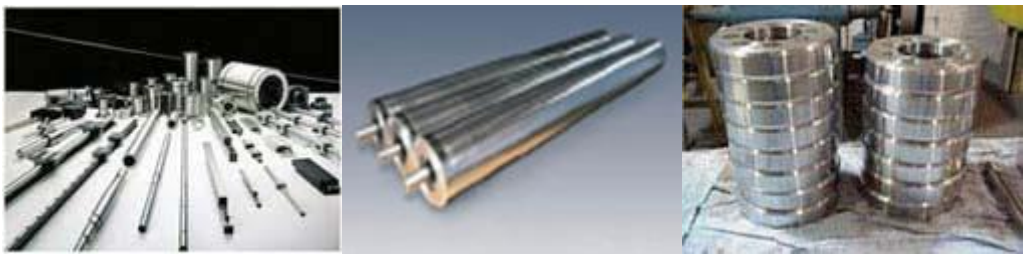
Yüzey işlemleriyle malzemelere şu özellikler kazandırılabilir:

- 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 arttırılması
- Kayma özelliklerinin iyileştirilmesi
- Sıcak çatlak hassasiyetinin azaltılması [43].

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 özelliklerler, kaplama metodu, yüksek tabaka sertliği ve yüksek kaplama kalınlığıdır.

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. Şekil 5.1'de genel olarak sert krom kaplama yapan işletmelerin kaplayabildikleri farklı şekil ve ebatlardaki malzemeler görülmektedir.



Şekil 5.1: İşletmelerde sert krom kaplanmış farklı şekil ve boyutlardaki malzemeler

Sert kromun uygulanmasının başlıca sebebi aşınmaya, yüzey yıpranmalarına ve korozyona karşı üstün dayanımıdır. Ayrıca sert krom kaplama ile ölçüden düşen veya hatalı işlenen rulman yataklarını, krankları, 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 (iç veya dış) maliyet açısından uygun bir çözüm olmaktadır. Sert krom kaplama bir çok çeşit metalin (dökme demir, çelik, paslanmaz çelik, bakır ve alüminyum) yüzey dayanımının arttırılmasında, ısıl işleme alternatiftir. (850-1000 Vickers / 66 Rockwell C yüzey sertliğine ulaşılabilmektedir.)

Kullanılamayacak parçaların sert krom kaplama ile geri kazanılması ve kullanım ömrünün yenisine göre daha fazla olmasının yanı sıra, %60'lara varan maliyet tasarrufu da sert kromun diğer avantajıdır. Bazı yaygın kullanım alanları ise; merdaneler (metal şekillendirme, kağıt, ambalaj, duvar kağıdı, kauçuk, plastik ve kimya endüstrisi), hidrolik silindirler, piston milleri, kırıcılar, kalıplar, krank şaftları, pompa burçları, hamur kesme tamburları olarak sırlanabilir [35].

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 onlara dekoratif ve mühendislik özellikleri kazandırmak amacı ile kullanılmaktadır. Nikel üzerine kaplanan ince bir krom tabakası ise nikel 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 ısıl işlemler sayesinde yüksek sertlik değerlerine ulaşabilmeleri
- Metal veya metal olmayan yüzeylere dahi belirli bir ön işlemden 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 da bilinen akımsız kaplamalar, kimyasal malzeme sarfiyatındaki yükseklik, yöntemin özel aksam gerektirmesi ve atık su temizleme sorunları nedeniyle pahalı bir kaplama türüdür [44].

5.3 Borlama

Malzeme dizaynında, korozyon ve aşınma gibi özelliklerin göz önünde bulundurulması gerekir. Yirminci yüzyılın başlarından itibaren çalışılmaya başlanan borlama ile çok sert, düşük sürtünme katsayısına sahip, yüksek sıcaklık mukavemeti fazla olan ve korozyon dirençli malzeme yüzeyleri elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bir termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemi olan borlamada, bor atomları metal yüzeyine termokimyasal olarak yayınarak sert bor tabakası oluştururlar. Bu yöntem, yaklaşık 900-1100 $^{\circ}$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.

Endüstride, makine üretiminde kullanılan malzemelerin seçimi kadar bu malzemelere uygulanan yüzey işlemleri de büyük önem taşımaktadır. Termokimyasal difüzyon prosesi ile yapılan bir yüzey işlemi olan borlama, malzeme yüzeyinde istenen yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısıyla, yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci ve iyi oksidasyon direnci sağlayan en elverişli yüzey sertleştirme işlemlerinden biridir. 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.

Borlama yüzey işlemi ile malzeme yüzeyinde borür tipi seramik fazlar oluşturulur (Şekil 5.3). Bu termo difüzyon işleminin uygulama sıcaklık aralığı 800-1000 ºC'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 Fe_2B tipi arayer intermetalik bileşikleri oluşturur. Borlama işlemi esnasında süresine ve sıcaklığına bağlı olarak tek ya da çift fazlı katmanlar oluşur. Tek tip fazdan oluşan Fe_2B endüstriyel uygulamalar için çok daha avantajlıdır. Çünkü FeB fazı çok daha gevrek bir fazdır ve daha yüksek termal genleşme katsayısına sahiptir.



Şekil 5.2: Bor tabakası [1].

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 Fe_2B 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 adhesiv ve abrasif aşınma koşularında iyi özellikler sağlamaktadır. Borürlerin oluşma serbest enerjileri genellikle yüksektir ve dolayısıyla borürlere ağır koşullar altında mükemmel termal ve kimyasal stabilite sağlamaktadır.

5.3.1 Borlama Prosesleri

Borlama, yüksek sıcaklıkta ana metalin yüzeyinde bor atomlarının difüzyonuyla borür tabakası oluşturulması işlemidir [24]. Borlama günümüzde yalnızca metallere değil, sermet ve seramik malzemelere de uygulanmaktadır. Bor kaplama, yüzeyde bileşik oluşturacak şekilde bor atomlarının difüzyonu olarak da bilinmektedir [25].

Borlama işlemi, yüzeyi iyi temizlenmiş malzemelere 700- 1000 ^{o}C sıcaklık aralığında, 1-10 saat sürelerde katı, pasta, sıvı veya gaz gibi çeşitli ortamlarda uygulanabilmektedir [24, 26]. 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 [24, 26].

Borlama, metal ve alaşımların yüzeylerinde sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini arttırırken, aynı zamanda bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda korumak ve erozyon direncini de arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Borlama işlemi, endüstriyel olarak daha çok demir esaslı alaşımlara uygulanmaktadır [27].

5.3.2 Borlama İşleminin Avantajları

Borür tabakası çok yüksek sertlik (1450- 5000 Hv) ve ergime sıcaklığına sahiptir. Demir esaslı malzemelerde kaplama tabakasının sertliği, alt kritik sıcaklığa kadar (650 ^{o}C) kalıcıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme teknikleri olan sementasyon ve nitrasyona göre çok daha yüksektir [28].

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 [24, 28].

Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda da (550- 600 ^{o}C) korunmaktadır [24].

Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksidan olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon direncini arttırmaktadır [24].

Borlanmış yüzeyler, çok yüksek sıcaklıklarda (850 ^{o}C) orta özellikte oksidasyon direncine ve oldukça yüksek ergimiş metal korozyonuna sahiptir [24].

Borlanan parça, oksidan ve korozif ortamlarda üstün bir yorulma ömrüne sahiptir [24].

Borlama işlemi, yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk kaynaklanma eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedirler [24, 29].

5.3.3 Borlama İşleminin 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 [24].

Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının % 5- 20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25μm'lik bir tabaka kalınlığı, 1.25-6.25 μm'lik bir büyümeye neden olmaktadır [28]. 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 (2000 N) sementasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği, dişli üretimine sınırlama getirmektedir [24].

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

5.4 Borlama Yöntemleri

Borlama işlemi esnasında bor kaynağı ve bor sağlayıcı bileşikler katı, sıvı veya gaz fazında olabilirler. Borür tabakalarının oluşumu için uygulanan yöntemleri 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 [24, 30].

Kutu borlama

Pasta borlama

Sıvı borlama

Elektrolitik sıvı borlama

Elektrolizle sıvı borlama

Gaz borlama

Plazma Borlama

5.4.1 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 kullanılabilmektedir. Bu bileşenler katı bor sağlayıcılar, akışkanlık sağlayıcılar ve aktivatörlerdir [24].

5.4.2 Pasta Borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın zor ve pahalı geldiği durumlarda veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle borlayıcı karışım malzemenin yüzeyine püskürtülerek veya spreylenerek oluşturulur ve kurutmadan sonra 1- 2 mm. kalınlığında bir tabaka elde edilir. Sonraki aşamada demirli malzeme 900 ^{o}C'ye indüksiyonla ya da 800- 1000 ^{o}C'lik bir fırında 5 saat süreyle ısıtılır. Bu proseste koruyucu atmosfer olarak argon, NH_3, N_2 gereklidir. 50 μm'yi geçen bir katman 1000 ^{o}C ve 20 dak. sonra elde edilir. Bu proses büyük parçalar ve kısmi borlama gerektirecek parçalar için idealdir [24, 28].

5.4.3 Sıvı Borlama

Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama 670- 1000 ^{o}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 [24, 26]. Bu yöntemin zehirlilik, patlayıcı doğa ve çevresel kirlilik gibi dezavantajları kullanımını sınırlamaktadır [6, 8].

Elektrolitik Sıvı Borlama**;** demir esaslı malzemeler içerisinde boraks bazlı ergiyik içeren banyo içerisinde (900- 950 ^{o}C) yapılır. %30 B_4C banyoya ilave edilir. Borlama işlemi % 20'ye kadar B_4C'ün 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 ^oC'nin altındaki sıcaklıklarda nikel alaşımların borlanmasında kullanılır [24, 26]. % 55 boraks ve % 45 B_4C karışımı 1:1 oaranında NaCl ve $BaCl_2$ kullanılarak çok yüksek tabaka kalınlıkları elde edilmektedir. Sıvı borlama ayrıca, boraks, ferro- silis, borik asit [27, 30] ve sodyum sülfat ($NaSO_4$) esaslı tuz banyolarında da gerçekleştirilmektedir [27, 30].

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 ^oC sıcaklık aralığında 4- 6 saat süreyle, 0.15- 0.20 A/cm^2 akım yoğunluğu altında gerçekleştirilmektedir [6, 11]. Parçanın her tarafında homojen bir kaplama tabaka kalınlığı elde edebilmek için elektroliz sırasında parça döndürülmektedir. Düşük alaşımlı çeliklerde çok ince kaplamaların eldesinde, yüksek akım yoğunluğu kullanılarak çok kısa süre sürelerde borlama yeterli olmaktadır. Alaşımlı çeliklerde ise kalın kaplama tabakalarının elde edilmesi için düşük akım yoğunluğu ve uzun borlama süresi gerekmektedir [28, 31].

Sıvı borlamada kullanılan çeşitli bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri Tablo 5.1'de verilmektedir [32].

Tablo 5.1: Sıvı borlamada kullanılan çeşitli bor sağlayıcı maddelerin bazı özellikleri [32].

Bor Sağlayıcılar	**Kimyasal Formül**	**Molekül Ağırlığı (gr.)**	**Teorik Bor Miktarı (%)**	**Ergime Sıcaklığı (^{o}C)**
Boraks	$Na_2B_4O_7.10H_2O$	381.42	11.35	-
Susuz Boraks	$Na_2B_4O_7$	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 zerinde yapılan borlama çalışmasında, % 50 kriyolit, % 50 bor karbür (200- 400 mesh) 1200 ^{0}C'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 [33]. 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 [33] metodu olarak bilinmektedir. İşlemde, kriyolitin oksijeni ile bor- karbür reaksiyona girerek sonucunda aktif bor oluşmaktadır.

5.4.4 Gaz Borlama

Gaz borlama işleminde kullanılan bor taşıyabilen gazlar, bor halojenler veya bor-hidrürler'dir. Gaz borlamada çoğunlukla kullanılan ortamlar aşağıda verilmektedir [24, 28].

Diborane (B_2H_6)- H_2 karışımı,

Bor halid- H_2 veya (75:25 N_2- H_2) gaz karışımı,

$(CH_3)_3$- B ve $(C_2H_5)_3$- B gibi organik bileşikleri.

(B_2H_6)- H_2 karışımı, zehirli ve patlayıcı olması nedeniyle ticari olarak kullanılmamaktadır. Fakat, B_2H_2: H_2 oranı 1:75 ve gaz akış hızı 75- 100 l/ saat olduğunda, aşınma direnci ve sertliği yüksek olan bor kaplamalar elde edilmektedir [12]. Organik malzemeler kullanıldığı zaman borür ve karbür bileşikleri birlikte oluşmaktadır. BBr_3, çok pahalı ve suyla olan çok kuvvetli reaksiyonu sebebiyle ve de yüksek sıcaklıkta kararlılığının ayarlanması için BF_3'e ihtiyaç duyulması sebebiyle kullanım açısından tercih görmemektedir. BCl_3, gaz borlama işlemi için en çok tercih edilen maddedir [24, 34].

1:15 BCl_3 + H_2 gaz karışımında 700- 950 ^oC sıcaklık aralığında ve 67 Kpa basınç altında (0, 67 bar), örneğin, 920 ^oC'de 2 saat sürede gaz borlama işlemine tabi tutulan bir parçada elde edilen bor tabaka kalınlığının 120- 150 µm olduğu rapor edilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, H_2 yerine 75:25 oranında $N_{2:}$ H_2 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 5.2' de verilmektedir [32].

Tablo 5.2: Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri [32].

Gazlar	**Kimyasal Formül**	**Molekül Ağırlığı (gr.)**	**Teorik Bor Miktarı (%)**	**Donma Noktası (^{o}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_2O_3	26.29	39.08	- 165.5
Bor Tri Metil	$(CH_3)_3B$	55.92	19.35	- 161.5
Bor Tri Etil	$(C_2H_5)_3B$	98.01	11.04	- 94.0

5.5 Plazma Borlama

Demir esaslı ve demir dışı metalik malzemelere uygulanan; Ar, H_2 gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl_3, B_2H_6, BF_3, $B(OCH_3)_3$ (trimetilborat) kullanıldığı, 800-1000 ^{0}C sıcaklıkta, yaklaşık 10^{-2} Pa gibi bir 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 [37, 38, 39, 40, 41].

Plazma borlamanın avantajları kısaca aşağıda belirtildiği gibi özetlenebilir:

a) Bilinen borlama işlemlerinde (katı, sıvı, gaz) tabaka kalınlığı ve homojenliği kontrol edilemezken, plazma borlamada mümkündür.

b) Kompleks parçalarda homojen difüzyon tabakası ve sertlik

c) Daha düşük sıcaklık ve işlem süresi

d) İşlem çok yoğun enerjide gerçekleştirilir.

e) Bu yöntemle yüzeyde tek fazlı Fe_2B tabakası elde edilebilir.

f) Daha büyük boyutlu (özellikle katı borlamaya göre) taban malzemeleri işleme tabii tutulabilir.

g) Zehirlilik, patlayıcı yapı ve çevre kirliliğinin kontrol olanağı

h) İşlem sonrası daha düşük distorsiyon.

5.6 Nitrokarbürleme

560-760°C sıcaklıkları arasında, karbon difüzyonu ile birlikte azotun kullanıldığı, bir termokimyasal işlemdir. Bu işlemde çok az (10-20 μm) bir demir nitrür tabakası elde edilir. Sert, gözenekli, aşınmaya ve korozyona dayanıklı bir yüzeydir. Bu işlem sırasında oksidasyon işlemi de uygulanarak, korozyon dayanımı artırılabilir. Çeşitli çeliklere, özellikle alaşımsız düşük karbonlu çeliklere uygulanabilir.

Genel uygulama şekli, taban malzemesi oda sıcaklığından 350 ^{o}C'ye ısıtılır, 1 saat süreyle havada oksidasyona maruz bırakılır, taban malzemesinin cinsine göre değişmekle birlikte, çelikler için 570- 580 ^{o}C'de (6- 8 saat) nitro karbürleme (N_2 + NH_3 + CO_2) işlemine tabi tutulur ve soğumaya bırakılır..

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneylerde farklı yüzey işlemleri görmüş (borlama, akımsız nikel, sert krom kaplama, nitokarbürleme) 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerinden hazırlanmış pimlerin disk üstünde aşınmaları incelenmiştir.

Borlama işlemi Vezneli Ltd. Şti.'nde (kutu borlama prosesi) koruyucu atmosfer olarak argonun kullanıldığı, 950 ^{o}C'lik bir fırında 4 saat süreyle ısıtılarak elde edilmiştir.

Nitrokarbürleme işlemi Assab Korkmaz Çelik A.Ş.'de 350 ^{o}C'ye ısıtılan deney numunelerinin 1 saat süreyle havada oksidasyonu sağlandıktan sonra, 10 saat süreyle 580 ^{o}C'de nitro karbürizasyona (N_2 + NH_3 + CO_2) maruz bırakılması ile elde edilmiştir.

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

Sert krom kaplama işlemi ise Altay Ltd. Şti. tarafından anot ve katot arasında akım geçirilmesi vasıtasıyla farklı akım yoğunluklarına bağlı olarak farklı kalınlıklarda 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 laboratuarlarında yapılan aşınma deneylerinde kullanılan pimlerin karakterizasyonu;

- Mikro sertlik
- Yüzey pürüzlülüğü
- Kaplama kalınlığı

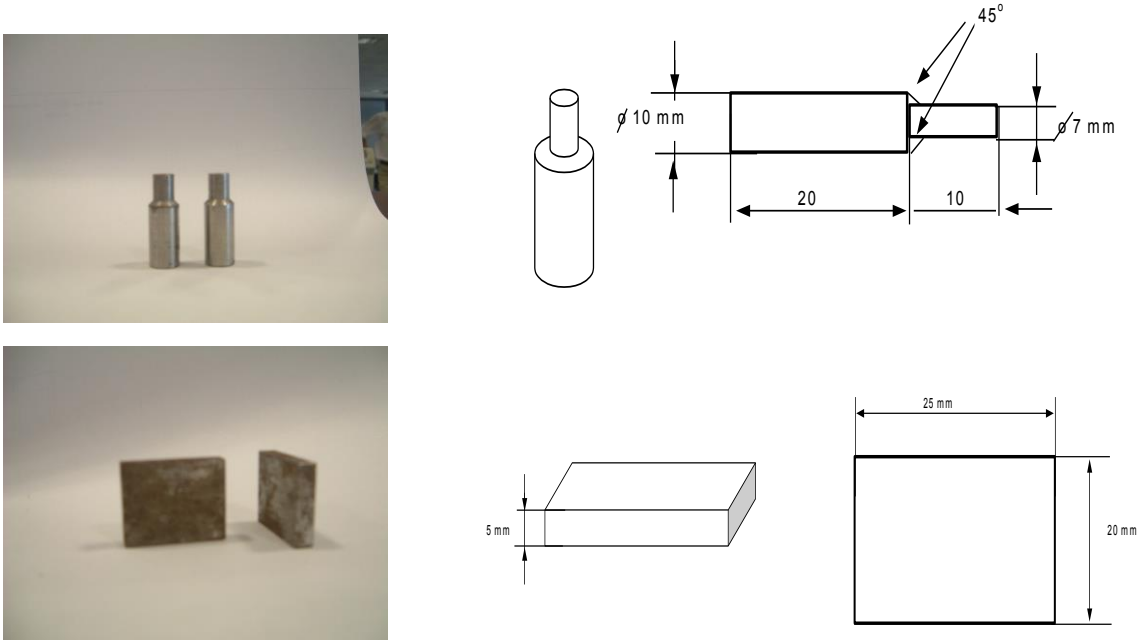
ölçümleri ile yapılmıştır.

6.1 Metal- Metal Aşınma Deneyleri

Farklı yüzey kaplama işlemleri yapılmış (borlama, akımsız nikel, sert krom kaplama, nitrokarbürleme) 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çeliklerden pim olarak

hazırlanan deney numunelerinin M2 kalite takım çeliği disk üstünde yapılan aşınma deneylerinde ağırlık ve yükseklik kaybı verileri her 2000 m kayma mesafesindeki duruşlarda kaydedilmiştir. Aşınma deneylerinde elde edilen ağırlık ve yükseklik kayıpları her bir deney numunesi için kayma mesafesine bağlı olarak (2000 m ve 6000 m) grafikler şeklinde Ek D.1- D.40 ve Ek E.1- E.40'da gösterilmiştir. İncelenen numunelerin metal- metal aşınmasında ağırlık kayıplarının yanı sıra yükseklik kayıplarının da kriter olarak alınması, metal-metal aşınması sırasında aşınmanın kaplama kalınlığında kalıp kalmadığının kontrol edilmesi amacıyla yapılmıştır.

Aşınma deneylerinde kullanılan deney numuneleri, ASTM G99 [42] standardında olup, numuneler Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1: ASTM G 99 [42] standardına göre hazırlanan aşınma deney numuneleri

Çizilen "ağırlık kaybı- kayma mesafesi" ve "yükseklik kaybı- kayma mesafesi" eğrileri doğrusal olup, bu doğruların eğimi gr/ m ve mm/ m cinsinden numunelerin aşınma hızlarını vermektedir.

Aşınma deney parametreleri aşağıda gösterilmiştir.

6.1.1 Nem ve Sıcaklık

Aşınma deneyleri esnasında laboratuar ortamında % 50 ± 5 nem oranı ve 20 ^{o}C ± 2 sıcaklıkta çalışılmıştır.

6.1.2 Metal- Metal Aşınma Deney Parametreleri

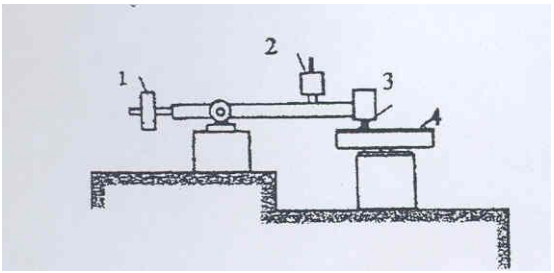
Aşınma deneylerinde işletme şartlarını simule edebilmek için kalıp kolu üzerine gelen yük hesaplanmıştır. Bunun için maksimum kalıp ağırlığı (5 inch kalıp kolu) 2 kg. ve kalıbın kalıp kolu üzerinde oturduğu yüzey alanı 3,744 mm^2 olarak tespit edilmiştir. Buradan birim alana düşen yük 5,342 gr/ mm^2 olarak belirlendi. 4 mm. çaplı pim yüzey alanı 12,56 mm^2 olduğuna göre kullanılması gereken ağırlık yaklaşık 67 gr. olarak belirlenmiştir.

Disk üstünde aşınan pim deneyinde kullanılan mekanizmada pim, bağlandığı kolun yaklaşık 2/3'ünde çalışmakta olup kullanılması gereken yükün yaklaşık 100 gr. olması gerektiğini göstermektedir. Emniyetli alanda kalabilmek için 500 gr.'lık bir yük seçilerek disk üstünde aşınan pim deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Pimin üzerinde hareket ettiği disk, M2 kalite çelikten imal edilmiştir. Metal- metal aşınma deneylerinde, Şekil 6.2 ve 6.3'de görüldüğü gibi deney numuneleri, sabit hızla dönen bir metal disk üzerine, sabit bir yük altında bastırılmıştırır. Deneyler, M2 kalite takım çeliği bir disk üzerinde 0.52 m/s kayma hızında, 5 N yük altında ve toplam 6,000 m. kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.2: Aşınma deneylerinde disk üstünde pim deney düzeneği.



Şekil 6.3: Metal- Metal aşınma deney düzeneğinin şematik olarak gösterilişi. (1) Dengeleyici ağırlık, (2) Yük, (3) Pim, (4) Aşındırıcı disk [1] .

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.

6.2. Metalografik Çalışmalar

Metalografik incelemeler için reçineye alınan numuneler, sırasıyla 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımpara kademelerinden geçirilerek zımparalanmıştır. Parlatma işlemi ise, üzeri keçe kaplı döner disklerde gerçekleştirilmiş, parlatıcı 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.

7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik taban malzemelerinin herbirinin kaplamasız, sert krom, akımsız nikel, nitrokarbür ve bor tabakası ile kaplandığı, kayma mesafesi olarak 6000 m'nin çalışıldığı aşınma deneyleri ile ilgili sonuçlar aşağıya çıkarılmıştır.

Aşınma deney sonuçları, referans alınacak aşınmaya karşı en düşük aşınma hızına sahip deney numunesine göre açıklanmıştır. Bu amaçla, herbir deney numunesi için elde edilen aşınma hızlarına göre aşağıdaki formül kullanılarak Bağıl Aşınma Dirençleri (BAD) tespit edilmiştir.

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

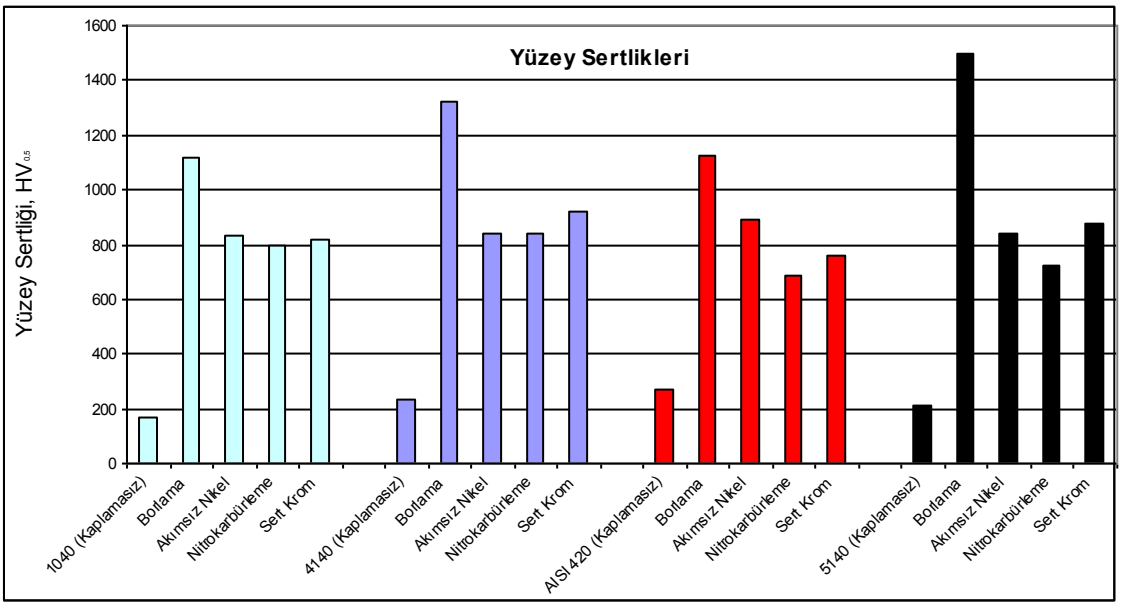
$BAD = \Delta W_R / \Delta W_t$

ΔW_R : Aşınmaya en dirençli deney numunesinin aşınma hızı,

ΔW_t : Diğer deney numunelerinin aşınma hızı

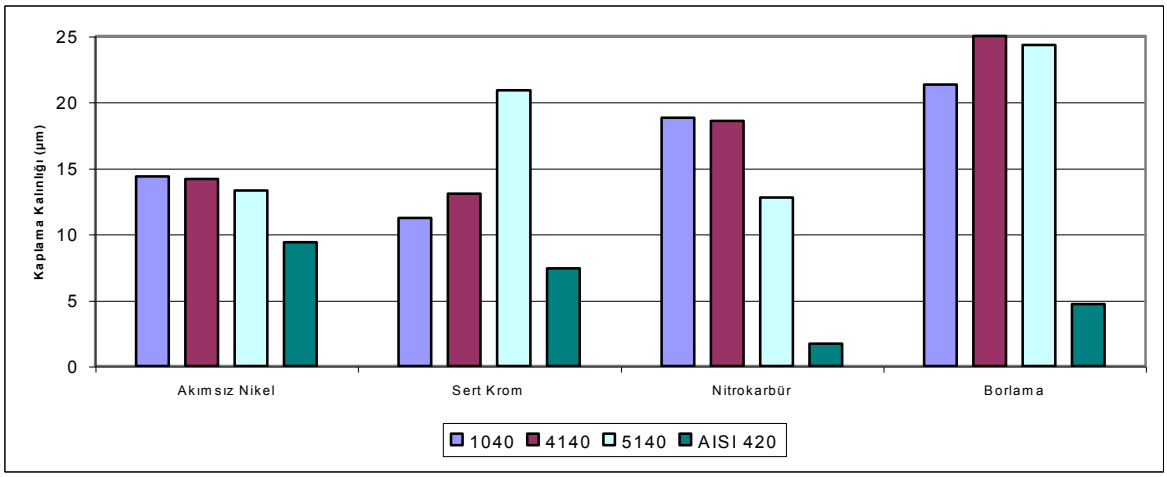
bağıntısı ile hesaplanmıştır. Metal- metal aşınma deneyleri için Bağıl Aşınma Dirençleri, deney numunelerinin ağırlık ve yükseklik kaybı kriterleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

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 H_v arasında olan yüzey sertlikleri; "Akımsız Nikel Kaplama, Nitrokarbürleme ve Sert Krom Kaplama" işlemleri sonrasında ortalama 800 H_v'e ulaşmıştır. Buna karşılık "Borlama" işlemi sonrası çelik türüne bağlı olarak 1110- 1495 $HV_{0,2}$ sertlik değerleri elde edilmiştir.



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

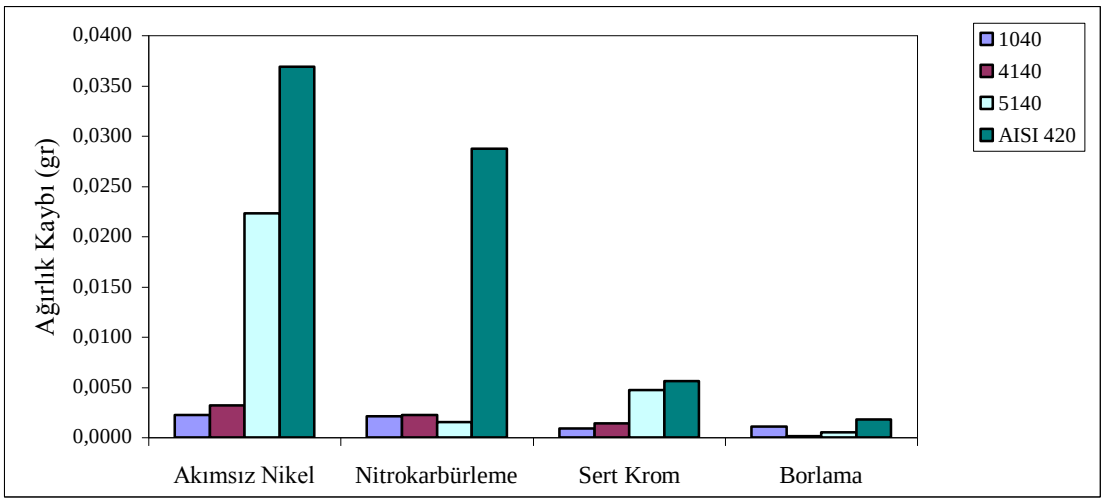
1040- 4140- AISI 420- 5140 kalite çelik malzemelerin dört farklı yüzey kaplama (nitrokarbürleme, sert krom kaplama, akımsız nikel kaplama ve borlama) işleminden sonra sahip oldukları kaplama kalınlıkları Şekil 7.2'de gösterilmiştir. Deney numuneleri ile ilgili olarak yapılan kaplama kalınlığı ölçümlerinde elde edilen minimum, maksimum ve ortalama değerler Ek. A'da gösterilmiştir.



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

Aşınma deneylerinde kayma mesafesi 2000 m iken kaplamalar genel olarak yüzeyden ayrılmadığı ve aşınmada kaplama içerisinde kalındığı için, karşılaştırma

yapılırken bütün deneyler için 2000 m'ye karşılık gelen ağırlık kayıpları dikkate alınmıştır. Şekil 7.3'te 2000 m'deki ağırlık kaybı değerleri gösterilmiştir.



Şekil 7.3: 1040- 4140- 5140- AISI 420 kalite çelik malzemelerin kaplama türlerine göre 2000 m kayma mesafesinde gösterdikleri ağırlık kaybı değerleri

Şekil 7.4- 7.11'de kaplama altındaki malzeme türüne göre farklı yüzey işlemleri gören numunelerin aşınmaya karşı gösterdikleri ağırlık kaybı ve yükseklik kaybı değerleri incelenmiştir. Kaplamasız numunelerin ağırlık ve yükseklik kayıpları kaplanmış numunelere göre çok fazla olduğu ve grafik skalasının anlaşılabilirliğini güç hale getirdiği için Şekil 7.4- 7.11'de gösterilmemiştir. Deneylerde elde edilen tüm ağırlık ve yükseklik kaybı verileri (kaplamasız numunelerin de değerleri dahil olmak üzere) Ek B- Tablo B.1- 4'de gösterilmiştir.

Tablo 7.1'de, incelenen deney numunelerinin farklı (2000- 4000- 6000 m) ve aynı (2000 m) kayma mesafelerinde gösterdikleri aşınma hızları verileri bulunmaktadır. Tablo 7.1'de farklı kayma mesafelerinin bulunduğu kolon, Ek D'de genel olarak sunulan şekillerde ağırlık ve yükseklik kayıplarına göre yapılan incelemelerde kaplamanın tükendiği kayma mesafeleri olarak düşünülen değerlerdir. Bu değerlere göre yapılan aşınma hızı analizinde 4140- borlanmış malzemenin aşınmaya karşı en dirençli deney numunesi olduğu ortaya çıkmıştır.

Farklı kayma mesafeleri sonrasında kaplama kalınlığı içerisinde kalma ihtimalinin 2000 m.'de daha yüksek olması nedeniyle bu mesafe baz alınmış ve bu değerlere

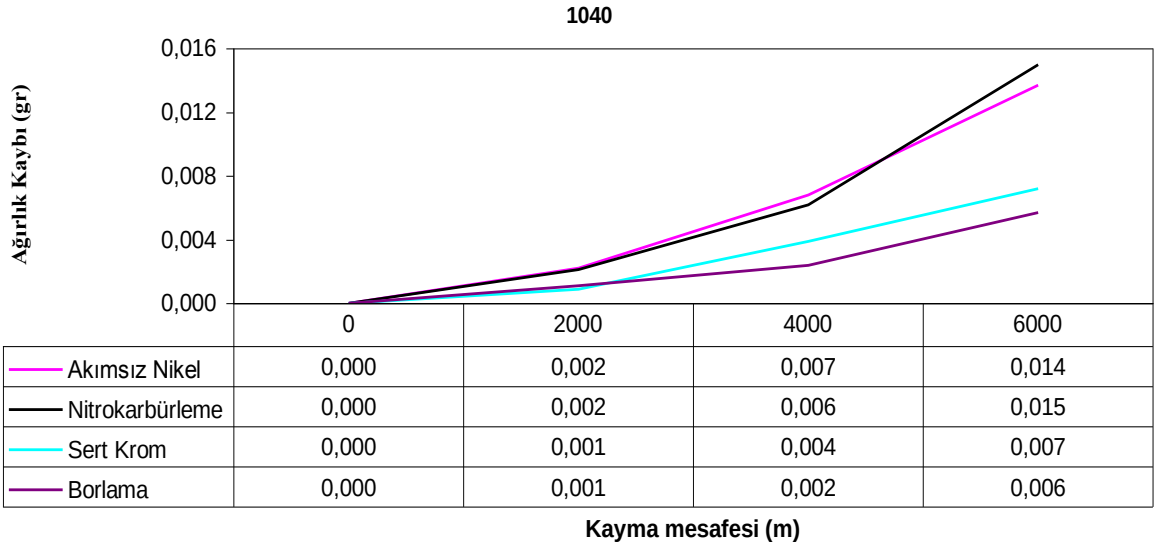
göre yapılan aşınma hızı analizinde (Ek E- Şekil 1- 40) aşınmaya karşı en dirençli deney numunesi yine 4140- borlanmış deney numunesi olmuştur. 2000 m. kayma mesafesinde 4140- borlanmış deney numunesinin aşınma hızı referans alınarak BAD değerleri çıkarılarak Tablo 7.1'de deney numunelerinin BAD'leri gösterilmiştir.

Tablo 7.1: İncelenen deney numunelerinin farklı ve aynı kayma mesafelerinde gösterdikleri aşınma hızları

Kaplama Türü	Taban Malzeme	Kaplama Kalınlığı (µm)	Karşı Malzeme	Kayma Mesafesi (m)	Aşınma Hızı (gr/m)	Kayma Mesafesi (m)	Aşınma hızı (gr/m)	B.A.D.
Akımsız Nikel	**1040**	14,36	M2	2000	0,0009	2000	0,0009	**0,1111**
	4140	14,18	M2	2000	0,0013	2000	0,0013	**0,0769**
	5140	13,28	M2	2000	0,0089	2000	0,0089	**0,0112**
	AISI 420	9,38	M2	2000	0,0148	2000	0,0148	**0,0068**
Nitrokarbürleme	**1040**	18,83	M2	4000	0,0016	2000	0,0008	**0,1250**
	4140	18,56	M2	2000	0,0009	2000	0,0009	**0,1111**
	5140	12,79	M2	4000	0,0014	2000	0,0006	**0,1667**
	AISI 420	1,68	M2	2000	0,0115	2000	0,0115	**0,0087**
Sert Krom	**1040**	11,22	M2	4000	0,0010	2000	0,0004	**0,2500**
	4140	13,06	M2	2000	0,0006	2000	0,0006	**0,1667**
	5140	20,87	M2	2000	0,0019	2000	0,0019	**0,0526**
	AISI 420	7,39	M2	2000	0,0022	2000	0,0022	**0,0455**
Borlama	**1040**	21,33	M2	4000	0,0007	2000	0,0004	**0,2500**
	4140	25,02	M2	4000	0,0002	2000	0,0001	**1,0000**
	5140	24,32	M2	4000	0,0011	2000	0,0002	**0,5000**
	AISI 420	4,67	M2	4000	0,0018	2000	0,0007	**0,1429**
Kaplamasız	**1040**	-	M2	6000	0,0209	2000	0,0086	**0,0116**
	4140	-	M2	6000	0,0317	2000	0,0022	**0,0455**
	5140	-	M2	6000	0,0174	2000	0,0077	**0,0130**
	AISI 420	-	M2	6000	0,0388	2000	0,0221	**0,0045**

Şekil 7.4- 7.11'de deney numuneleri taban malzemeleri baz alınarak deney numunesinin gördüğü farklı yüzey işlemlerinde gösterdikleri aşınma davranışları incelenmiştir. Şekil 7.12- 7.19'da ise, deney numuneleri yüzey kaplama işleminin türü baz alınarak farklı taban malzemelerin gördüğü aynı yüzey kaplama işlemlerinde gösterdikleri aşınma davranışları incelenmiştir.

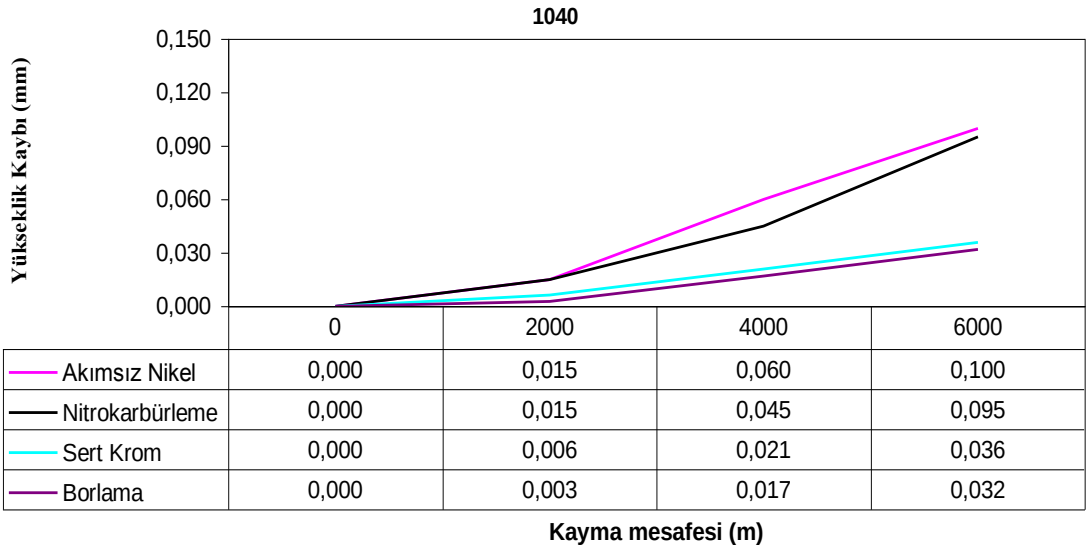
Şekil 7.4'te farklı yüzey işlemleri görmüş 1040 malzemenin kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Sert krom kaplı ve borlanmış numuneler aşınmaya karşı daha dirençli olmuşlardır. Borlamanın ise ilerleyen kayma mesafelerinde en dirençli numune olduğu görülmektedir. İlk 2000 ve 4000 m.'de benzer davranışlar gösteren akımsız nikel kaplı ve nitrokarbürlenmiş numunelerden nitrokarbürlenmiş olanın hızlanarak ağırlık kaybettiği görülmüştür. 1040 sert krom kaplı numunenin ortalama kaplama kalınlığının borlamanın ortalama kaplama kalınlığının yarısına yakın olması (Ek A- Tablo 1) ve 2000 m. kayma mesafesindeki sert krom kaplamanın kalkması (Ek H- Şekil H.6) aşağıdaki tablonun farklı deney numuneleri için farklı eğriler göstermesinin sebebidir.



	0	2000	4000	6000
Akımsız Nikel	0,000	0,002	0,007	0,014
Nitrokarbürleme	0,000	0,002	0,006	0,015
Sert Krom	0,000	0,001	0,004	0,007
Borlama	0,000	0,001	0,002	0,006

Şekil 7.4: Farklı yüzey işlemleri görmüş 1040 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği

Şekil 7.5'te farklı yüzey işlemleri görmüş 1040 kalite çelik malzemenin kayma mesafesine göre yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Şekil 7.4'ten farklı olarak sert krom kaplanmış numunenin 2000 m. sonunda daha hızlı yükseklik kaybettiği ve nitrokarbürlemenin ilk 2000 m'deki yükseklik kaybından sonra akımsız nikele göre yavaşlayan hızda yükseklik kaybettiği görülmüştür.

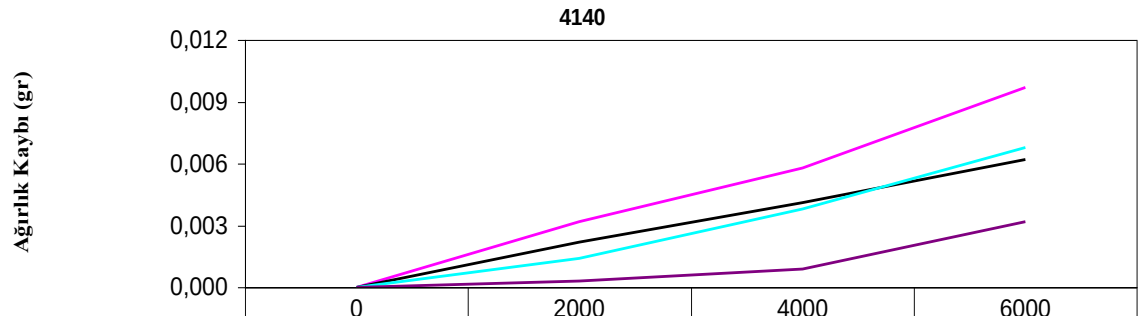


	0	2000	4000	6000
Akımsız Nikel	0,000	0,015	0,060	0,100
Nitrokarbürleme	0,000	0,015	0,045	0,095
Sert Krom	0,000	0,006	0,021	0,036
Borlama	0,000	0,003	0,017	0,032

Şekil 7.5: Farklı yüzey işlemleri görmüş 1040 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m.)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği

Şekil 7.6'da farklı yüzey işlemleri görmüş 4140 kalite çelik malzemenin kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Sert krom kaplı ve

nitrokarbürlenmiş numunelerin aşınmaya karşı benzer davranışlar gösterdiği, borlanmış numunenin ise diğer numunelere göre daha dirençli olduğu görülmektedir. 4140 kalite çeliğin borlanmış deney numunesinin kaplama kalınlığı (25,02 μm) diğer deney numunelerine göre daha fazladır (Ek A- Tablo 1). Deneyler sırasında 4000 m. kayma mesafesinde çekilen borlanmış deney numunesi fotoğrafında (Ek H- Şekil H.20) görüldüğü gibi, deney numunesinin yüzeyi diğer deney numunelerine göre daha az aşınmıştır. Akımsız nikel kaplı numunenin daha fazla aşındığı deneyde, ilk 4000 m.'den sonra akımsız nikel kaplı ve nitrokarbürlenmiş numunelerin hızlanarak ağırlık kaybettikleri görülmüştür.

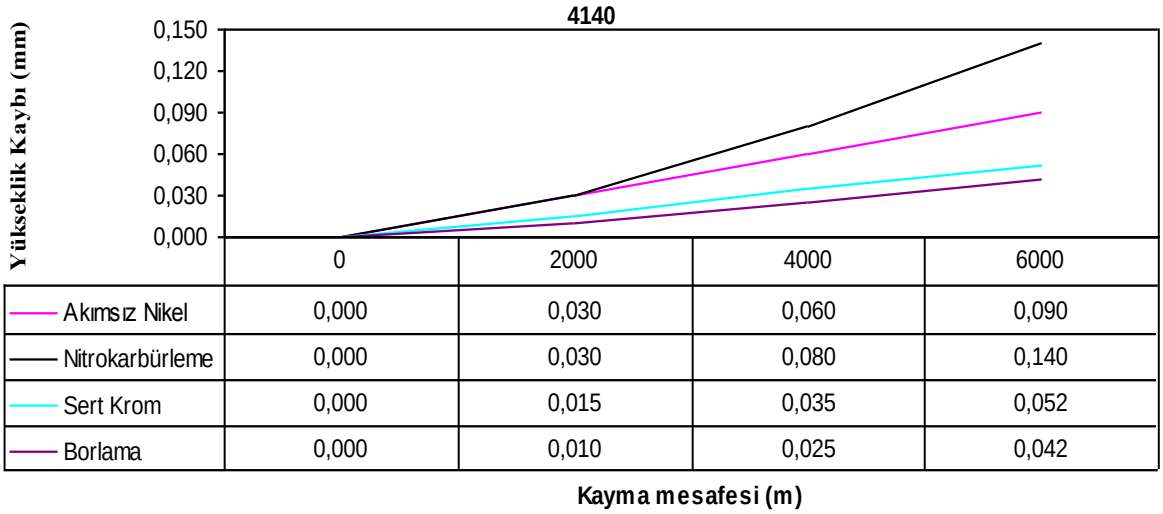


	0	2000	4000	6000
Akımsız Nikel	0,000	0,003	0,006	0,010
Nitrokarbürleme	0,000	0,002	0,004	0,006
Sert Krom	0,000	0,001	0,004	0,007
Borlama	0,000	0,000	0,001	0,003

Kayma mesafesi (m)

Şekil 7.6: Farklı yüzey işlemleri görmüş 4140 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği

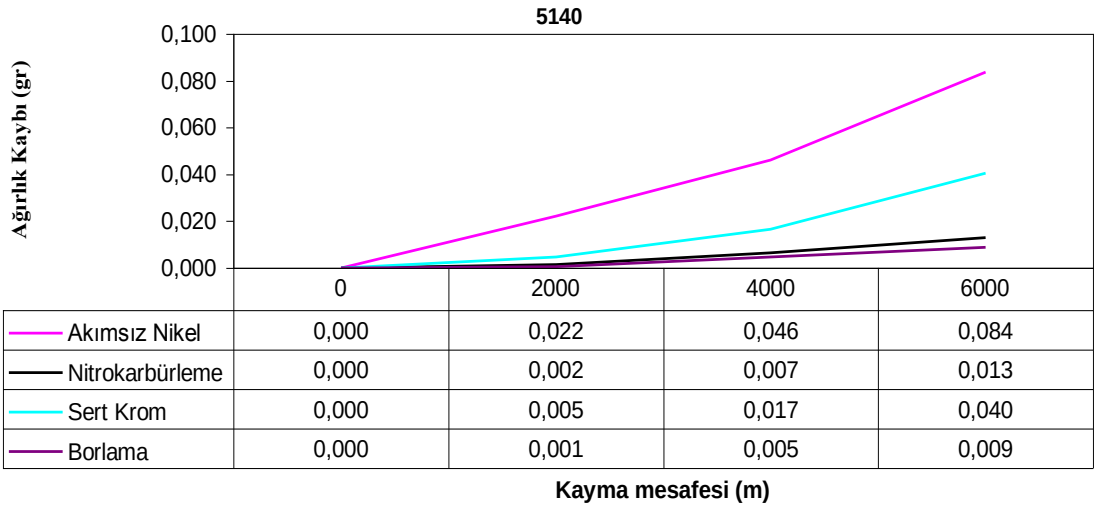
Şekil 7.7'de farklı yüzey işlemleri görmüş 4140 malzemenin kayma mesafesine göre yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Şekil 7.6'dan farklı olarak borlanmış ve sert krom kaplı numuneler arasında ilk 2000 m'de yakın aşınma hızları görülmüş, fakat sonrasında sert krom kaplamanın taban malzemesinden kalkarak ayrıldığı görülmüştür. Bu durum, Ek H- Şekil H.17'de gösterilmiştir.



	0	2000	4000	6000
Akımsız Nikel	0,000	0,030	0,060	0,090
Nitrokarbürleme	0,000	0,030	0,080	0,140
Sert Krom	0,000	0,015	0,035	0,052
Borlama	0,000	0,010	0,025	0,042

Şekil 7.7: Farklı yüzey işlemleri görmüş 4140 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği

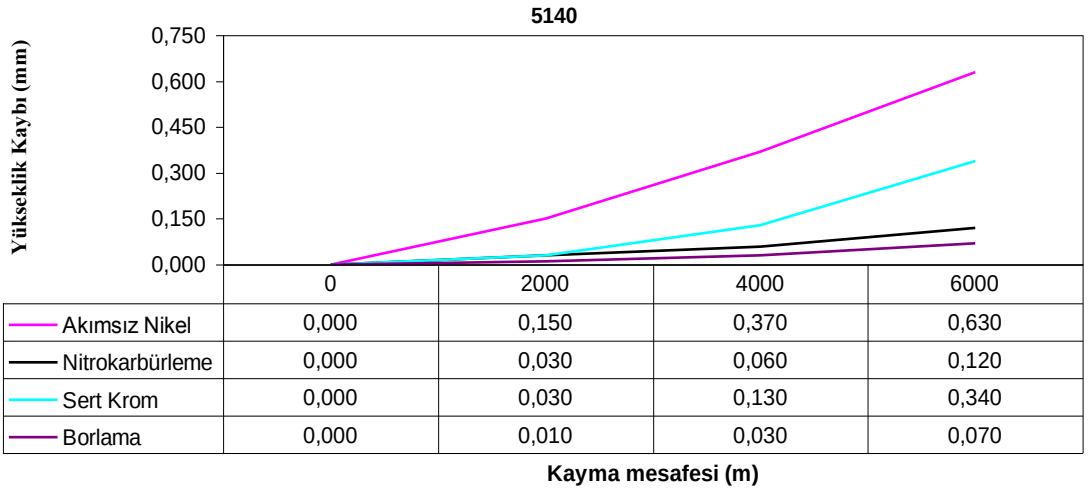
Şekil 7.8'de farklı yüzey işlemleri görmüş 5140 kalite çelik malzemenin kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Borlanmış ve nitrokarbürlenmiş numunelerin aşınmaya karşı en dirençli ve benzer aşınma davranışları gösterdikleri, akımsız nikel kaplı numunenin ise diğer numunelere göre aşınmaya dirençsiz olduğu görülmektedir. Nitrokarbürlenmiş deney numunesinin kaplama kalınlığının ortalama değeri (12,79 µm) (Ek A- Tablo 1) diğer nitrokarbürlenmiş deney numunelerine göre azken, en kalın kaplı numune olan borlamayla benzer yüzey görüntüleri (Ek H- Şekil H.24- 28) göstermiştir.



	0	2000	4000	6000
Akımsız Nikel	0,000	0,022	0,046	0,084
Nitrokarbürleme	0,000	0,002	0,007	0,013
Sert Krom	0,000	0,005	0,017	0,040
Borlama	0,000	0,001	0,005	0,009

Şekil 7.8: Farklı yüzey işlemleri görmüş 5140 kalite çelik malzemenin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği

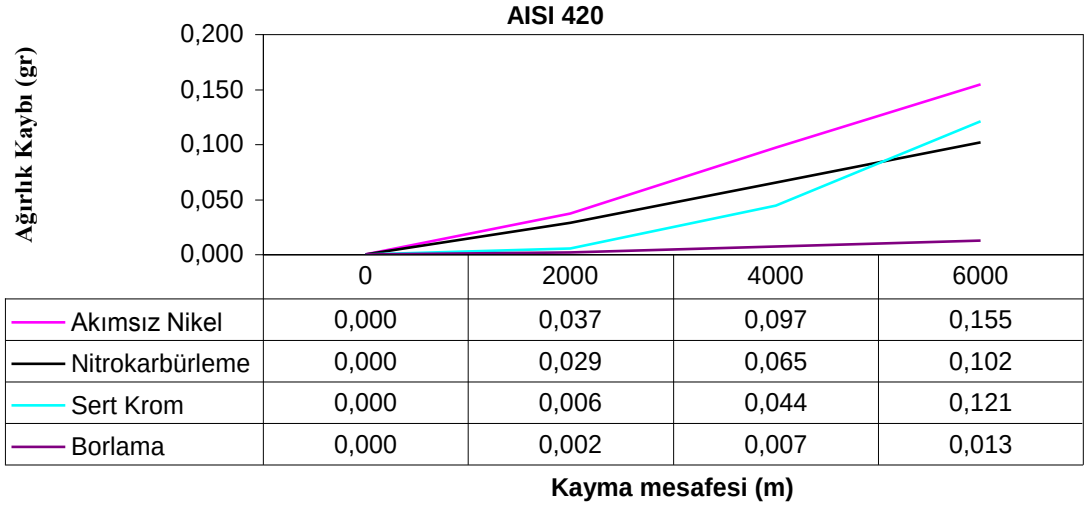
Şekil 7.9'da farklı yüzey işlemleri görmüş 5140 kalite çelik malzemenin kayma mesafesine göre yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Borlanmış ve nitrokarbürlenmiş numunelerin aşınmaya karşı en dirençli ve benzer davranışlar gösterdikleri, sert krom kaplı numunenin 4000 m. kayma mesafesinden sonra hızlanarak yükseklik kaybettiği, akımsız nikel kaplı numunenin ise diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az dirençte olduğu görülmektedir.



	0	2000	4000	6000
Akımsız Nikel	0,000	0,150	0,370	0,630
Nitrokarbürleme	0,000	0,030	0,060	0,120
Sert Krom	0,000	0,030	0,130	0,340
Borlama	0,000	0,010	0,030	0,070

Şekil 7.9: Farklı yüzey işlemleri görmüş 5140 malzemenin Kayma mesafesi (m.)- Yükseklik kaybı (mm.) grafiği

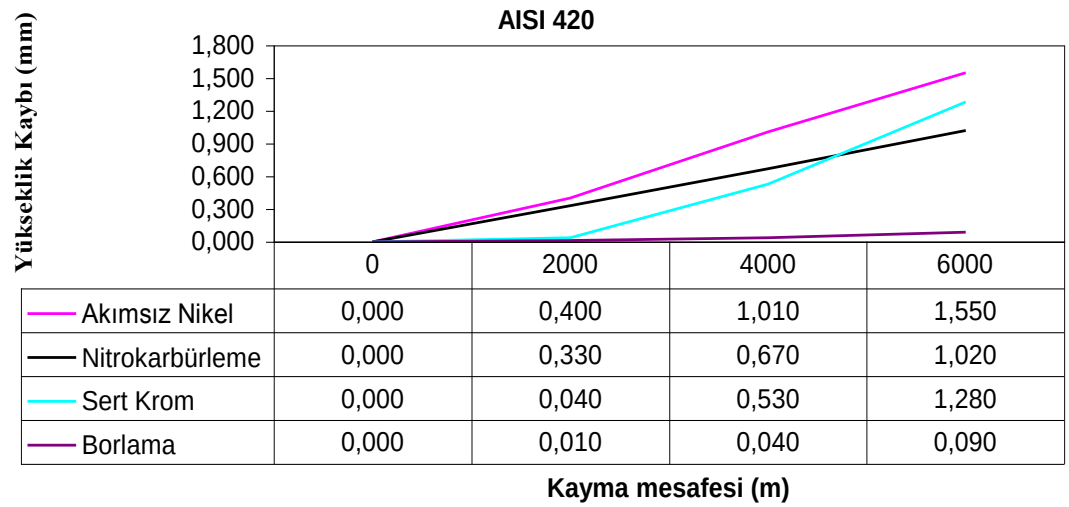
Şekil 7.10'da farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 malzemenin kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. Borlanmış numune aşınmaya karşı en dirençli davranışı, akımsız nikel kaplı ve nitrokarbürlenmiş numuneler ise diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az dirençsiz davranışı göstermiştir. Sert krom kaplı numune, 2000 m. sonunda hızlanarak ağırlık kaybetmiştir. Nitrokarbürlenmiş deney numunesinin kaplama kalınlığının ortalaması (Ek A- Tablo 1) en azken (1,68 µm), en kalın kaplı (9,68 µm) hali olan akımsız nikel kaplamaya benzer yüzey görüntüleri sergilediği (Ek H- Şekil H.31) tespit edilmiştir.



	0	2000	4000	6000
Akımsız Nikel	0,000	0,037	0,097	0,155
Nitrokarbürleme	0,000	0,029	0,065	0,102
Sert Krom	0,000	0,006	0,044	0,121
Borlama	0,000	0,002	0,007	0,013

Şekil 7.10: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 malzemenin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği

Şekil 7.11'de farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 malzemenin kayma mesafesine bağlı olarak yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. 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 2000 m. sonrasında hızlanarak yükseklik kaybettiği görülmektedir.

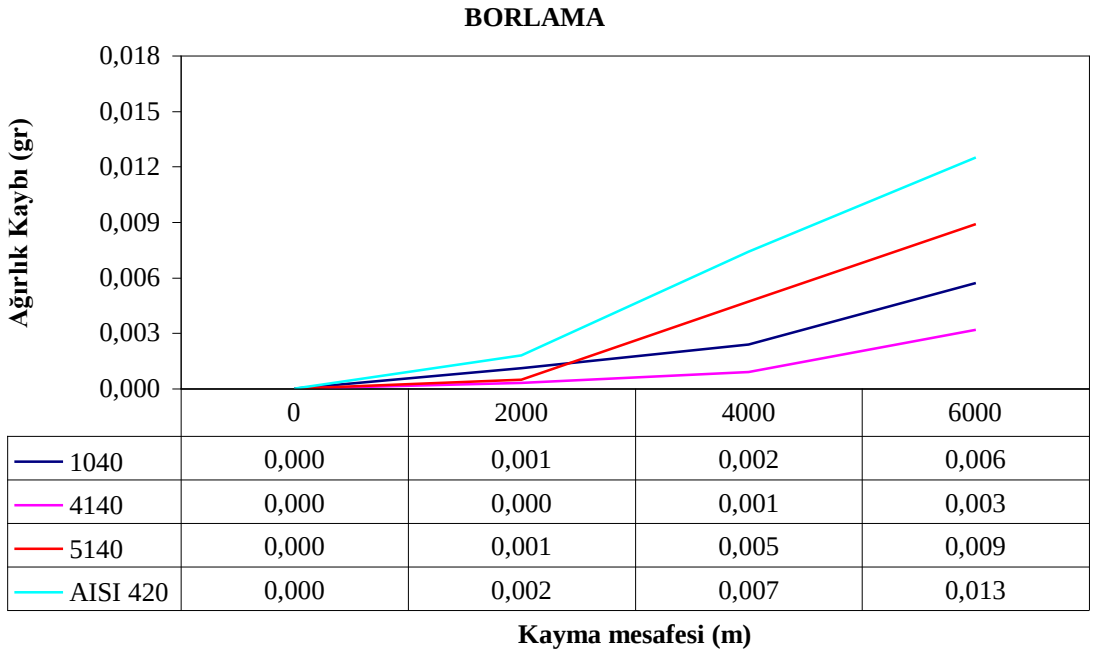


	0	2000	4000	6000
Akımsız Nikel	0,000	0,400	1,010	1,550
Nitrokarbürleme	0,000	0,330	0,670	1,020
Sert Krom	0,000	0,040	0,530	1,280
Borlama	0,000	0,010	0,040	0,090

Şekil 7.11: Farklı yüzey işlemleri görmüş AISI 420 malzemenin Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği

Şekil 7.12'de borlanmış farklı çelik numunelerin (1040- 4140- 5140- AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. 4140 kalite borlanmış çelik aşınmaya karşı en dirençli davranışı göstermiştir. AISI 420

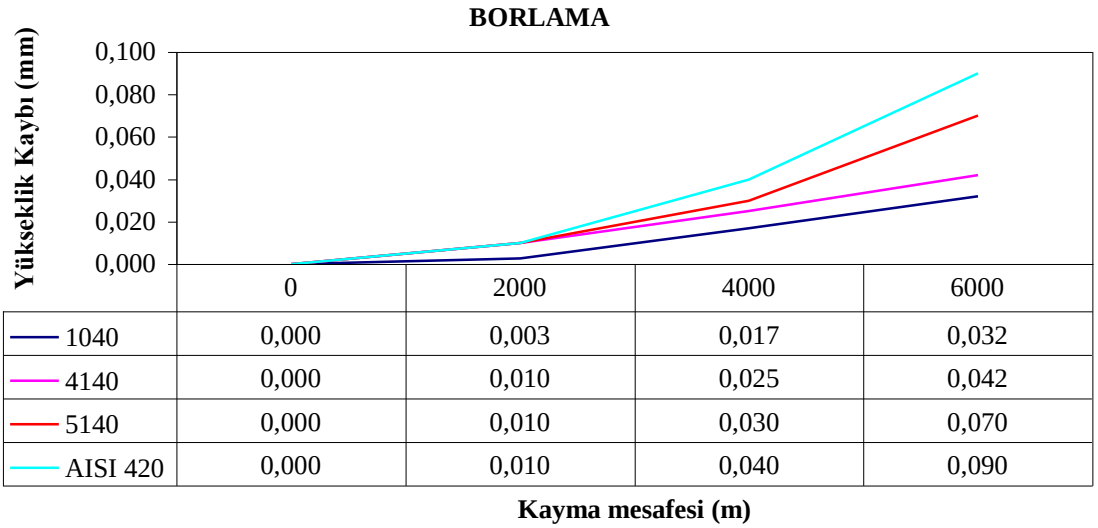
kalite çeliğin diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az dirençte olduğu ve 2000 m. sonrasında hızlanarak ağırlık kaybettiği görülmektedir. Bu durumun başlıca sebebi, borlanmış AISI 420 deney numunesi kaplama kalınlığı ortalamasının (Ek A- Tablo 1) diğer deney numunelerinin ortalama % 25'i kadar olmasıdır. Fakat ilk 2000 m.'deki aşınma davranışı incelendiğinde (kaplamanın içerisinde kalındığı zaman) borlamanın en iyi netice veren yüzey kaplama yöntemi olduğu yine görülmektedir (Ek E- Şekil E.31- 40).



	0	2000	4000	6000
1040	0,000	0,001	0,002	0,006
4140	0,000	0,000	0,001	0,003
5140	0,000	0,001	0,005	0,009
AISI 420	0,000	0,002	0,007	0,013

Şekil 7.12: Yüzeyi borlanmış 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği

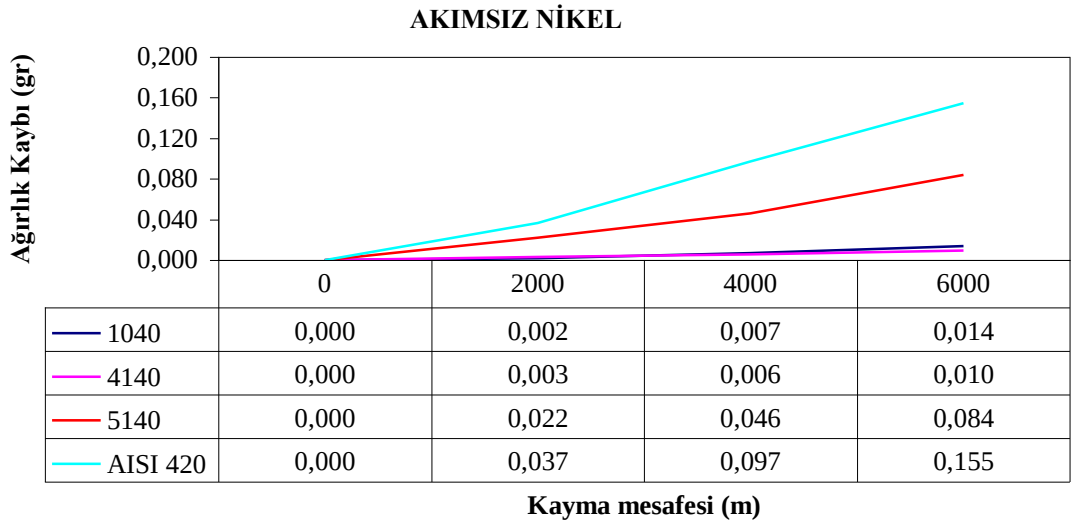
Şekil 7.13'te borlanmış farklı numunelerin (1040- 4140- 5140- AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. 1040 kalite çelik yükseklik kaybı açısından en dirençli davranışı göstermiş fakat 4000 m. sonrasında hızlanarak yükseklik kaybederek deney sonunda 4140'a yaklaşık oranda yükseklik kaybetmiştir. AISI 420 kalite çeliğin diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az dirençte olduğu ve 2000 m. sonrasında hızlanarak yükseklik kaybettiği görülmüştür.



	0	2000	4000	6000
1040	0,000	0,003	0,017	0,032
4140	0,000	0,010	0,025	0,042
5140	0,000	0,010	0,030	0,070
AISI 420	0,000	0,010	0,040	0,090

Şekil 7.13: Yüzeyi borlanmış 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği

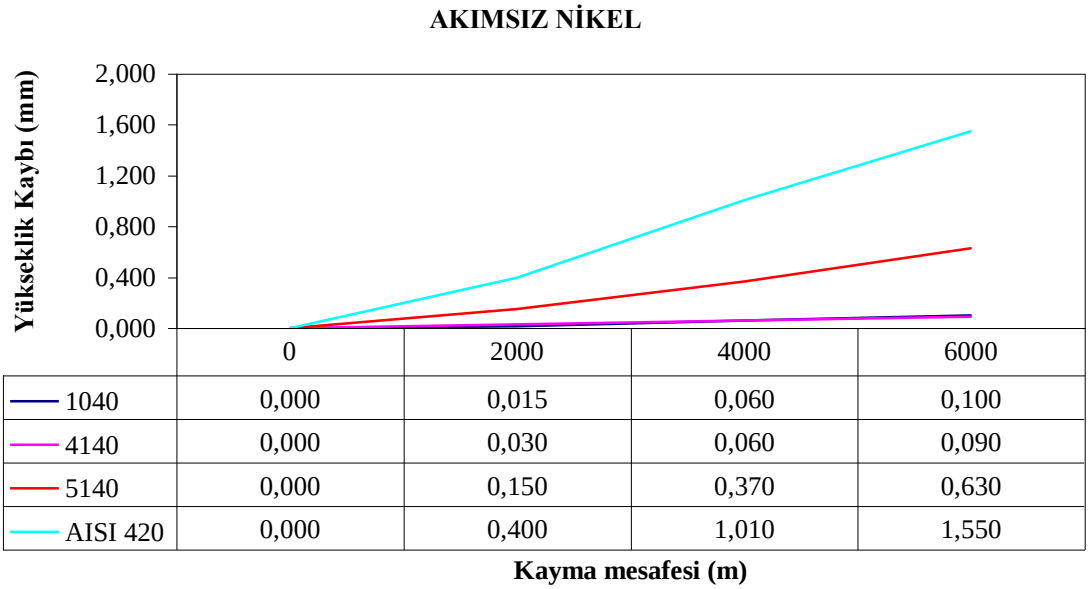
Şekil 7.14'te akımsız nikel kaplı farklı çelik numunelerin (1040- 4140- 5140- AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. 1040 ve 4140 aşınmaya karşı en dirençli davranışı göstermiştir. AISI 420 kalite çeliğin diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az dirençte olduğu ve 2000 m. sonrasında hızlanarak ağırlık kaybettiği görülmektedir.



	0	2000	4000	6000
1040	0,000	0,002	0,007	0,014
4140	0,000	0,003	0,006	0,010
5140	0,000	0,022	0,046	0,084
AISI 420	0,000	0,037	0,097	0,155

Şekil 7.14: Yüzeyi akımsız nikel kaplı 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği

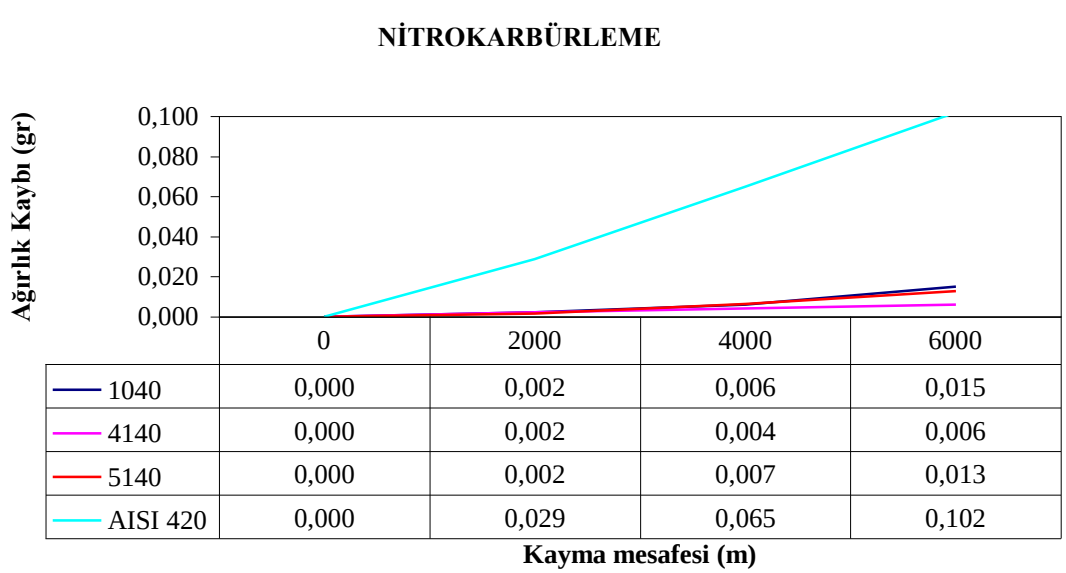
Şekil 7.15'te akımsız nikel kaplı farklı çelik numunelerin (1040- 4140- 5140- AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. 4140 aşınmaya karşı en dirençli davranışı göstermiştir. AISI 420'nin diğer numunelere gore aşınmaya karşı en az dirençte olduğu ve 2000 m. sonrasında hızlanarak yükseklik kaybettiği görülmektedir.



	0	2000	4000	6000
1040	0,000	0,015	0,060	0,100
4140	0,000	0,030	0,060	0,090
5140	0,000	0,150	0,370	0,630
AISI 420	0,000	0,400	1,010	1,550

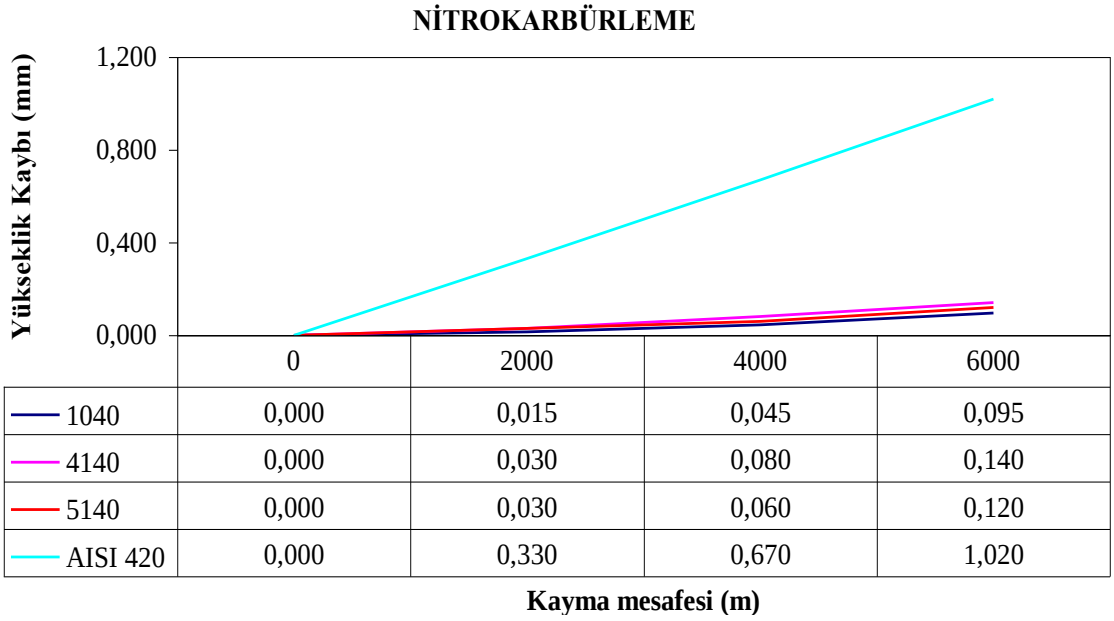
Şekil 7.15: Yüzeyi akımsız nikel kaplı 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği

Şekil 7.16'da nitrokarbürlenmiş farklı çelik numunelerin (1040- 4140- 5140- AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. 4140 aşınmaya karşı en dirençli davranışı göstermiştir. 4000 m. sonrasında 1040 ve 5140 kalite nitrokarbürlenmiş çeliklerin hızlanarak ağırlık kaybettiği, AISI 420 kalite nitrokarbürlenmiş çeliklerin ise diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az dirençte olduğu görülmektedir.



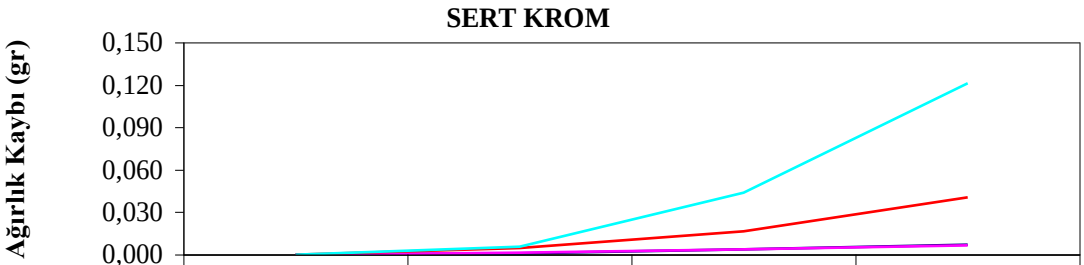
Şekil 7.16: Yüzeyi nitrokarbürlenmiş 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği

Şekil 7.17'de nitrokarbürlenmiş farklı numunelerin (1040- 4140- 5140- AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak yükseklik kaybı değişiminin grafiği gösterilmiştir. 1040 kalite nitrokarbürlenmiş çelik en az yükseklik kaybı gösteren numune olmuştur. 4140 kalite nitrokarbürlenmiş çelik benzer yükseklik kaybı davranışları göstermiş, AISI 420 kalite nitrokarbürlenmiş çelik ise diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az direnç gösteren malzeme olmuştur.



Şekil 7.17: Yüzeyi nitrokarbürlenmiş 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği

Şekil 7.18'de sert krom kaplanmış farklı kalite çelik numunelerin (1040- 4140- 5140- AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi gösterilmiştir. 4140 kalite sert krom kaplanmış çelik, en az ağırlık kaybı gösteren numune olmuştur. 1040 kalite sert krom kaplanmış çelik; 4140 kalite çeliğe benzer ağırlık kaybı davranışları göstermiştir. AISI 420 kalite çelik ise diğer numunelere göre aşınmaya karşı en az direnç gösteren numune olmuştur.

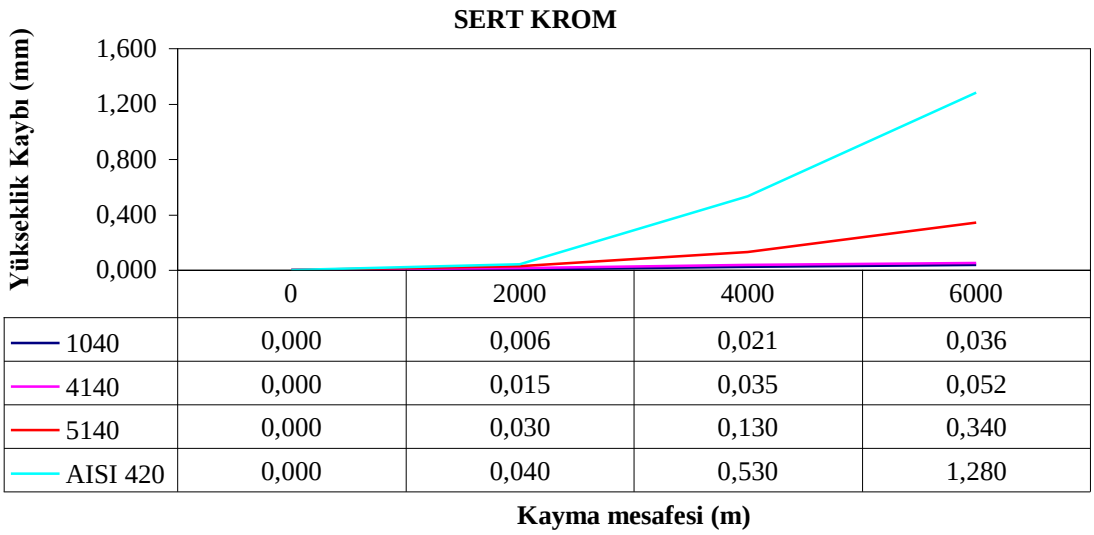


	0	2000	4000	6000
1040	0,000	0,001	0,004	0,007
4140	0,000	0,001	0,004	0,007
5140	0,000	0,005	0,017	0,040
AISI 420	0,000	0,006	0,044	0,121

Kayma mesafesi (m)

Şekil 7.18: Yüzeyi sert krom kaplı 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Ağırlık kaybı (gr) grafiği

Şekil 7.19'da sert krom kaplanmış farklı kalite çelik numunelerin (1040- 4140- 5140- AISI 420) kayma mesafesine bağlı olarak yükseklik kaybı değişimi gösterilmiştir. 1040 kalite sert krom kaplanmış çelik, en az yükseklik kaybı gösteren numune olmuştur. 4140 kalite çelik ile 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 7.19: Yüzeyi sert krom kaplı 1040, 4140, 5140 ve AISI 420 kalite çelik malzemelerin Kayma mesafesi (m)- Yükseklik kaybı (mm) grafiği

Mevcut kalıp kolu malzemesi olan AISI 420'ye alternatif olarak seçilen dört çelik türüne uygulanan kaplamaların sonucunda bor kaplı 4140 uygulamasının en yararlı seçim olacağı 2000 m. kayma mesafesine göre yapılan incelemede tespit edilmiştir. % ağırlık kaybı verilerine göre (Ek B- Tablo B.1- 4) inceleme yapıldığında, bor kaplı 4140 malzemenin % ağırlık kaybı değeri referans alınarak aşağıda Tablo 8.1'de belirtilen oranlarda diğer deney numunelerine göre aşınmaya karşı daha dirençli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 7.2: Aşınma deneylerinde 2000 m. kayma mesafesinde incelenen dört farklı kalite çeliğin farklı türdeki kaplanmış durumlarında % ağırlık kaybı değerlerine göre (Ek B- Tablo B.1- 4) hesaplanan aşınma oranı değerleri

Kaplama Türü	Deney Numunesi % Ağırlık Kaybı Değerleri				Bor Kaplı 4140 Deney Numunesine Göre Bağıl Aşınma Oranı			
	1040	4140	5140	AISI 420	1040	4140	5140	AISI 420
Kaplamasız	0,172	0,426	0,155	0,446	71,07	176,59	64,03	184,73
Akımsız Nikel	0,018	0,026	0,177	0,298	7,30	10,62	73,35	123,23
Nitrokarbürleme	0,017	0,018	0,012	0,232	6,98	7,33	5,03	96,13
Sert Krom Kaplama	0,007	0,012	0,040	0,045	3,00	4,93	16,74	18,75
Borlama	0,009	0,002	0,004	0,015	3,68	1,00	1,66	6,40

8. GENEL SONUÇLAR

Yüzey işlemleriyle malzemenin sertlik, süneklik ve yorulma gibi mekanik özellikleri yanında, sürtünme, aşınma, oksidasyon ve korozyon'a 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 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 aşınma deneyleri yapılmış ve gerçekleştirilen aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıya çıkarılmıştır.

Herbir deney numunesinin yüzey kaplama işlemi kendi alanlarında uzman firmalara yaptırılmış ve kaplama kalınlıkları herbir deney numunesi için aynı kalınlıkta olamamıştır. Bu nedenle aşınma sonuçlarının irdelenmesi tüm deney numuneleri aşınmanın kaplama içerisinde olduğu düşünülen 2000 m. kayma mesafesindeki ağırlık kayıpları incelenerek yapılmıştır.

Bulunan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

I. Şekil 7.3'te gösterildiği gibi, 2000 m. kayma mesafesinde en az ağırlık kaybeden deney numunesi 4140 borlanmış deney numunesi olmuştur.

II. Genel olarak ağırlık kayıpları incelendiğinde, borlanmış deney numunelerinin en az ağırlık kaybına uğrayan deney numuneleri oldukları ortaya çıkmış, dolayısıyla çalışmada öne çıkan yüzey kaplama türü "borlama" olmuştur.

III. Deney numunelerinin kaplama öncesi ve sonrası sertlik değerleri incelenmiş ve disk üstünde aşınan pim deneylerinde en sert olan deney numunelerinin daha az aşınmaya maruz kaldıkları tespit edilmiştir.

Şekil 7.1'de deney numunelerinin kaplama öncesi ve farklı kaplamalar sonrasında elde edilen yüzey sertlik değerleri görülmektedir. Deneyler sırasında ön plana çıkan iki taban malzemesinin, 4140 ve 5140 kalite çeliklerin yüzey kaplama işlemi sonrasında en fazla sertleşen deney numuneleri oldukları görülmüştür.

IV. AISI 420 kalıp kolu malzemesine alternatif olarak düşünülen farklı çelik ve kaplama türlerine ait deney sonuçlarında, akımsız nikel kaplama aşınmalarının, kaplamasız numunelere benzer olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir.

V. Sert krom kaplamaların borlamadan sonra en verimli neticelerin alındığı yüzey kaplama türü olduğu tespit edilmiştir.

VI. Deney numunelerinde nitrokarbürlemenin kaplama kalınlıklarının en düşük olması, kayma mesafesine göre aşınma hızlarının tespitinde 2000 m.'nin kullanılmasına sebep olmuş, kaplama içerisinde kalınan bu mesafede, sert krom kaplamaya yakın aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir.

9 KAYNAKLAR

[1] **Soykut, Y., Say, K., Sesigür, H.,** 2005. Cam Ev Eşyası Sektöründe Metal Kaplamalar Üzerine Araştırmalar, İş Geliştirme Müdürlüğü, Şişecam, İstanbul.

[2] **Celis, J. P.,** 1995. A systems approach to the tribological testing of coated materials, Surface and Coatings Technology, 74/ 75, pp. 15- 22.

[3] **Quinn, T. J. F.,** 1991. Physical analysis for tribology, Cambridge University Press, pp. 1- 9.

[4] **Hutchings, I. M.,** 1992. Tribology: Friction and Engineering Materials, Edward Arnold, London.

[5] **Karamış, M. B.,** 1985. Toprak İşleme Aletlerinde İş Organının Aşınmasının Etüdü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi F.B.E., Kayseri.

[6] **Akkurt, M.,** Makine Elemanları Cilt II, İ.T.Ü. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, sayı 134.

[7] **Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M.,** 1993. Bakım ve Tamir İşlerinde Kaynak ve Metal Püskürtme, Metal ve Kaynak, 49, s. 21- 25.

[8] **Sarı, N. Y.,** 1999. Klasik ve Modern Yüzey İşlemler Uygulanmış Ç 1050 Çeliğinin Abrazif + Erozif Aşınma Davranışının İncelenmesi, *Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[9] **Ulusoy, E.,** Toprak İşleme Aletlerinde İş Organlarının Aşınması Üzerinde Araştırmalar, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No: 390, s. 11, İzmir.

[10] **Holmberg, K., Matthews, A.,** 1994. Coatings Tribology- Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering, Elsevier, Vol. 28, pp. 3- 13, 33- 121, 125, 257- 307.

[11] **Oğuz, B.,** 1993. Aşınma Sorunları ve Dolgu Kaynakları, Oerlikon Kaynak Elektrodları ve San. A.Ş., İstanbul.

[12] Bayer, G., 1994. Mechanical Wear Prediction and Prevention, Marcel Dekker Inc., NY- USA.

[13] Özdaş, N., 1958. Sürtünme ve Aşınma Teorileri, İ.T.Ü. Mustafa İnan Kütüphanesi, p. 388.

[14] Kayalı, E. S., 1993. Sürtünme ve Aşınma, Workshop on Antiwear Coatings, Tübitak.

[15] Metals Handbook, 1975. Failure Analysis and Prevention, 9th Edition, ASM, Metals Park, Vol 10.

[16] Wulpi, D. J., 1985. Understanding How Components Fail, ASM, Metals Park, pp. 163- 204.

[17] Ramesch, C. S., Seshardri, S. K., Iyer, K. J. L., 1989. A Survey of Aspects of Wear of Metals, Indian of Technology, 29 (4), pp. 179- 185, Indian.

[18] Misra, A., Finnie, I., 1982. A Review of the Abrasive Wear of Metals, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 104, pp. 94- 101.

[19] Eyre, T. S., 1978. Wear Characteristics of Metals, in Source Book on Wear Control Technology, D. A. Rigney, W. A. Glaeser (Eds.); ASM Metals Park, pp. 1- 11.

[20] Rabinowicz, E., 1995. Friction and Wear of Materials, 2nd Edition, John Willey & Sons Inc., pp. 74.

[21] Bhushan, B., Gupta, B. K., 1991. Handbook of Tribology- Materials, Coatings and Surface Treatments, McGraw- Hill, Inc, pp. 6.1- 6.29.

[22] ASM Handbook, 1995. Friction, Lubrication and Wear Technology, 2nd. Printing, Vol. 18, ASM International, Materials Park, pp. 184- 190, 236- 241, 242- 256.

[23] Strafford, K. N., Smart, R., C, Sare, I, Subramain, C., 1995. Surface Engineering, Technomic Publishing Company, U.S.A.

[24] **Sinha, A. K.,** 1991. Boriding (Boronizing), ASM Handbook, pp. 437- 447, Vol. 4, J. Heat Treating.

[25] **Soydan, Y.,** 1996. Katı ortamda bor yayınımı ile sertleştirilen çelik yüzeylerinin kuru kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul..

[26] **Matuschka, A. G.,** 1987. Boronizing, Carl Hanser Verlag, München, 1980.

[27] **Khoee, M.,** 1992. Ergimiş boraks banyosunda çeliklere vanadyum karbür kaplama, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[28] **Şen, U.,** 1997. Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[29] **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.

[30] **Bozkurt, N.,** 1984. Bor yayınımıyla çeliklerde yüzey sertleştirme, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[31] **Seong, H. H., John, S. C.,** 1980. A study on electroboronizing of steel by superimposed cyclic current, *J. Materials Science,* 15, 1379- 86.

[32] **Graf, A., Matuschka, W.,** 1997. Borieren, pp. 1- 87, Carl Hanser Verlag, München, Wien.

[33] **Samsanov, G. V., Epik, A. P.,** 1966. Coatings of high temperature materials, pp. 35, Ed. Hausner, H. H. Plenium Press.

[34] **Hegevaldt, F., Singheiser, L., Türk, M.,** 1992. Ergimiş boraks banyosunda çeliklere vanadyum karbür kaplama, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[35] **http://www.international.2itb.com/page1.html**

[36] Cabeo, E.R., Laudien, G., Biemer, S., Rie, K.-T., Hoppe, S., 1999. Plasma-assisted Boriding of Industrial Components in a Pulsed D.C. Glow Discharge, Surface and Coating Technology, 116-119, p. 229-233

[37] 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, p. 71-75

[38] 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, p. 886-890

[39] Küper, A., Qiao, X., Stock, H.R., Mayr, P., 2000. A Novel Approach to Gas Boronizing, Surface and Coating Technology, 130, p. 87-94

[40] Qiao, X., Stock, H.-R., Kueper, A., Jarms, C., 2000. Effect of $B(CH_3O)_3$ Content on A PACVD Plasma-boriding Process, Surface and Coating Technology, 131, p. 291-293

[41] Hunger, H.J., Löbig, G., 1997. Generation of Boride Layers on Steel and Nickel Alloys by Plasma Activation of Boron Trifloride, Thin Solid Films, 310, p. 244- 250

[42] Çelik, Ö., 2001. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[43] Kurman, A., 1997. Metallere Uygulanan Yüzey İşlemleri, *Lisans Eğitimi Bitirme Tezi*, İ.T.Ü., Kimya- Metalurji Fakültesi, İstanbul

[44] Özbek, Ü., 1988. Akımsız Nikel Kaplamalar, *Lisans Eğitimi Bitirme Tezi*, İ.T.Ü., Kimya- Metalurji Fakültesi, İstanbul

[45] 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

Ek A. DENEY NUMUNELERİ KAPLAMA KALINLIKLARI

Tablo A.1: Farklı yüzey işlemleri görmüş disk üstünde pim aşınma deneyi numuneleri kaplama kalınlıkları (μ)

MALZEME	KAPLAMA	KAPLAMA KALINLIĞI (μm)		
		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 B: DENEY NUMUNELERİ AĞIRLIK ve YÜKSEKLİK VERİLERİ

Tablo B.1: Farklı yüzey işlemleri görmüş 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**	12,472	0,000	0,0000	29,8700	0,000	0,0000
	2000	12,4510	0,021	0,1716	29,6600	0,210	0,7030
	4000	12,4157	0,057	0,4546	29,3500	0,520	1,7409
	6000	12,3689	0,104	0,8298	28,9000	0,970	3,2474
Akımsız Nikel	**0**	12,4836	0,000	0,0000	29,8700	0,000	0,0000
	2000	12,4814	0,002	0,0176	29,8550	0,015	0,0502
	4000	12,4768	0,007	0,0545	29,8100	0,060	0,2009
	6000	12,4699	0,014	0,1097	29,7700	0,100	0,3348
Nitrokarbürleme	**0**	12,4660	0,000	0,0000	29,9100	0,000	0,0000
	2000	12,4639	0,002	0,0168	29,8950	0,015	0,0502
	4000	12,4598	0,006	0,0497	29,8650	0,045	0,1505
	6000	12,4510	0,015	0,1203	29,8150	0,095	0,3176
Sert Krom	**0**	12,4268	0,000	0,0000	29,8100	0,000	0,0000
	2000	12,4259	0,001	0,0072	29,8035	0,006	0,0218
	4000	12,4229	0,004	0,0314	29,7890	0,021	0,0704
	6000	12,4196	0,007	0,0579	29,7740	0,036	0,1208
Borlama	**0**	12,3865	0,000	0,0000	29,8000	0,000	0,0000
	2000	12,3854	0,001	0,0089	29,7974	0,003	0,0087
	4000	12,3841	0,002	0,0194	29,7830	0,017	0,0570
	6000	12,3808	0,006	0,0460	29,7680	0,032	0,1074

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

4140

	Kayma Mesafesi(m.)	Ağırlık (gr.)	Ağırlık Kaybı(gr.)	Ağırlık Kaybı(%)	Yükseklik (mm.)	Yükseklik Kaybı (mm.)	Yükseklik Kaybı(%)
Kaplamasız	**0**	12,4558	0,000	0,0000	29,8500	0,000	0,0000
	2000	12,4257	0,030	0,2417	29,5500	0,300	1,0050
	4000	12,3689	0,087	0,6977	28,9500	0,900	3,0151
	6000	12,2984	0,157	1,2637	28,3400	1,510	5,0586
Akımsız Nikel	**0**	12,4836	0,000	0,0000	29,8700	0,000	0,0000
	2000	12,4804	0,003	0,0256	29,8400	0,030	0,1004
	4000	12,4778	0,006	0,0465	29,8100	0,060	0,2009
	6000	12,4739	0,010	0,0777	29,7800	0,090	0,3013
Nitrokarbürleme	**0**	12,4372	0,000	0,0000	29,9100	0,000	0,0000
	2000	12,4350	0,002	0,0177	29,8800	0,030	0,1003
	4000	12,4331	0,004	0,0330	29,8300	0,080	0,2675
	6000	12,4310	0,006	0,0499	29,7700	0,140	0,4681
Sert Krom	**0**	11,7661	0,000	0,0000	29,6100	0,000	0,0000
	2000	11,7647	0,001	0,0119	29,5950	0,015	0,0507
	4000	11,7623	0,004	0,0323	29,5750	0,035	0,1182
	6000	11,7593	0,007	0,0578	29,5580	0,052	0,1756
Borlama	**0**	12,4268	0,000	0,0000	29,8100	0,000	0,0000
	2000	12,4265	0,000	0,0024	29,8000	0,010	0,0335
	4000	12,4259	0,001	0,0072	29,7850	0,025	0,0839
	6000	12,4236	0,003	0,0258	29,7680	0,042	0,1409

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

5140

	Kayma Mesafesi(m.)	Ağırlık (gr.)	Ağırlık Kaybı(gr.)	Ağırlık Kaybı(%)	Yükseklik (mm.)	Yükseklik Kaybı (mm.)	Yükseklik Kaybı(%)
Kaplamasız	**0**	12,4203	0,000	0,0000	29,9400	0,000	0,0000
	2000	12,4011	0,019	0,1546	29,6700	0,270	0,9018
	4000	12,3834	0,037	0,2971	29,4900	0,450	1,5030
	6000	12,3273	0,093	0,7488	29,2900	0,650	2,1710
Akımsız Nikel	**0**	12,5935	0,000	0,0000	29,9900	0,000	0,0000
	2000	12,5712	0,022	0,1771	29,8400	0,150	0,5002
	4000	12,5472	0,046	0,3676	29,6200	0,370	1,2337
	6000	12,5097	0,084	0,6654	29,3600	0,630	2,1007
Nitrokarbürleme	**0**	12,3437	0,000	0,0000	29,9500	0,000	0,0000
	2000	12,3422	0,002	0,0122	29,9200	0,030	0,1002
	4000	12,3372	0,007	0,0527	29,8900	0,060	0,2003
	6000	12,3308	0,013	0,1045	29,8300	0,120	0,4007
Sert Krom	**0**	11,6328	0,000	0,0000	29,6500	0,000	0,0000
	2000	11,6281	0,005	0,0404	29,6200	0,030	0,1012
	4000	11,6162	0,017	0,1427	29,5200	0,130	0,4384
	6000	11,5924	0,040	0,3473	29,3100	0,340	1,1467
Borlama	**0**	12,4696	0,000	0,0000	29,9500	0,000	0,0000
	2000	12,4691	0,001	0,0040	29,9400	0,010	0,0334
	4000	12,4649	0,005	0,0377	29,9200	0,030	0,1002
	6000	12,4607	0,009	0,0714	29,8800	0,070	0,2337

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

AISI 420

	Kayma Mesafesi(m.)	Ağırlık (gr.)	Ağırlık Kaybı(gr.)	Ağırlık Kaybı(%)	Yükseklik (mm.)	Yükseklik Kaybı (mm.)	Yükseklik Kaybı(%)
Kaplamasız	**0**	12,3778	0,000	0,0000	29,8000	0,000	0,0000
	2000	12,3226	0,055	0,4460	29,2100	0,590	1,9799
	4000	12,2642	0,114	0,9178	28,5800	1,220	4,0940
	6000	12,1996	0,178	1,4397	27,9800	1,820	6,1074
Akımsız Nikel	**0**	12,4032	0,000	0,0000	29,9200	0,000	0,0000
	2000	12,3663	0,037	0,2975	29,5200	0,400	1,3369
	4000	12,3060	0,097	0,7837	28,9100	1,010	3,3757
	6000	12,2487	0,155	1,2456	28,3700	1,550	5,1805
Nitrokarbürleme	**0**	12,3672	0,000	0,0000	29,8000	0,000	0,0000
	2000	12,3385	0,029	0,2321	29,4700	0,330	1,1074
	4000	12,3022	0,065	0,5256	29,1300	0,670	2,2483
	6000	12,2652	0,102	0,8248	28,7800	1,020	3,4228
Sert Krom	**0**	12,3722	0,000	0,0000	29,8800	0,000	0,0000
	2000	12,3666	0,006	0,0453	29,8400	0,040	0,1339
	4000	12,3281	0,044	0,3564	29,3500	0,530	1,7738
	6000	12,2510	0,121	0,9796	28,6000	1,280	4,2838
Borlama	**0**	11,6584	0,000	0,0000	29,9000	0,000	0,0000
	2000	11,6566	0,002	0,0154	29,8900	0,010	0,0334
	4000	11,6510	0,007	0,0635	29,8600	0,040	0,1338
	6000	11,6459	0,013	0,1072	29,8100	0,090	0,3010

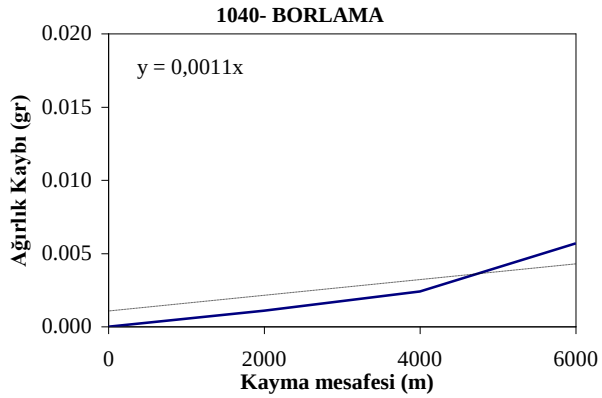
Ek C. DENEY NUMUNELERİ SERTLİK ($HV_{0,2}$) VERİLERİ

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

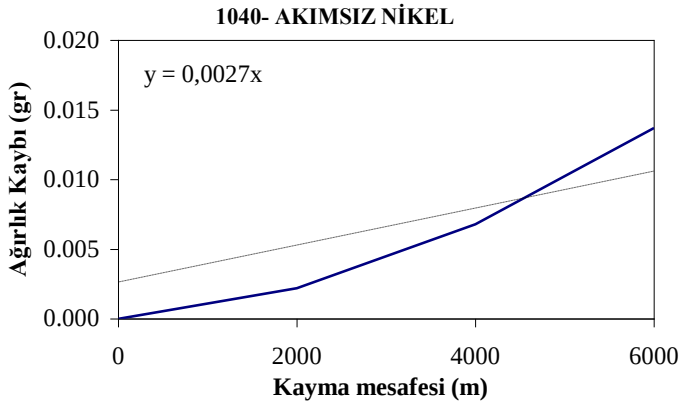
					KAPLAMA SERTLİK (HV)					
Malzeme	***Yapılan Yüzey İşlemi***	***1***	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**MİN**	**MAX**	**ORT**
1040	Borlama	1033	1033	1064	1097	1132	1168	1033	1168	1088
1040	Akımsız Nikel Kaplama	782	824	824	846	846	870	782	870	832
1040	Nitrokarbürleme	724	743	782	802	802	824	724	824	780
1040	Sert Krom Kaplama	782	782	802	802	802	824	782	824	799
4140	Borlama	1288	1288	1288	1378	1378	1324	1288	1378	1324
4140	Akımsız Nikel Kaplama	802	824	824	846	870	870	802	870	839
4140	Nitrokarbürleme	824	824	824	846	846	846	824	846	835
4140	Sert Krom Kaplama	824	846	870	894	919	946	824	946	883
5140	Borlama	1002	1002	1168	1206	1206	1206	1002	1206	1132
5140	Akımsız Nikel Kaplama	802	802	824	824	846	846	802	846	824
5140	Nitrokarbürleme	627	642	657	673	689	724	627	724	669
5140	Sert Krom Kaplama	824	824	846	870	870	870	824	870	851
AISI 420	Borlama	1002	1002	1168	1206	1206	1206	1002	1206	1132
AISI 420	Akımsız Nikel Kaplama	802	802	824	824	846	846	802	846	824
AISI 420	Nitrokarbürleme	627	642	657	673	689	724	627	724	669
AISI 420	Sert Krom Kaplama	824	824	846	870	870	870	824	870	851

Ek D. 6000 m. KAYMA MESAFESİNDE DENEY NUMUNELERİNDE MEYDANA GELEN AĞIRLIK KAYBI GRAFİKLERİ

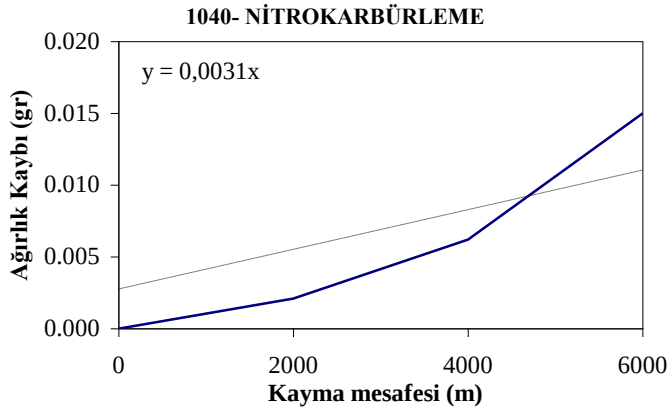
* Şekillerde kullanılan "y" değeri; aşınma eğrisinin eğimini vermektedir. Eğrinin eğiminin nümerik olarak büyüklüğü, aşınma hızının büyüklüğü ile doğru orantılıdır.



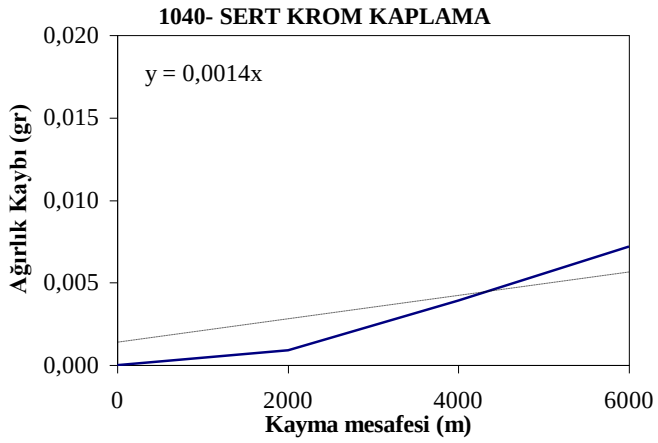
Şekil D.1: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



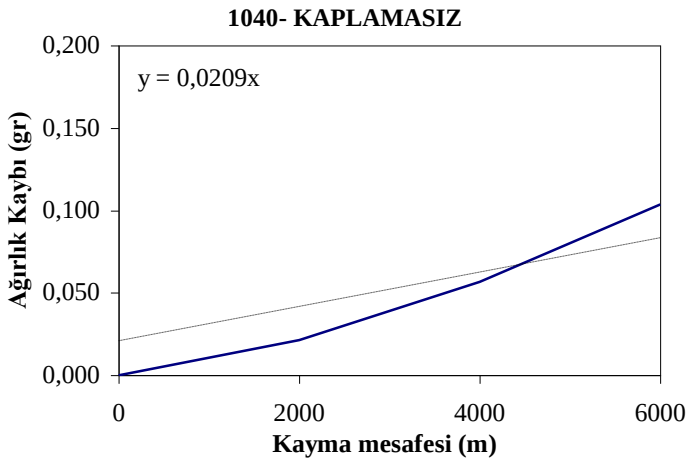
Şekil D.2: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



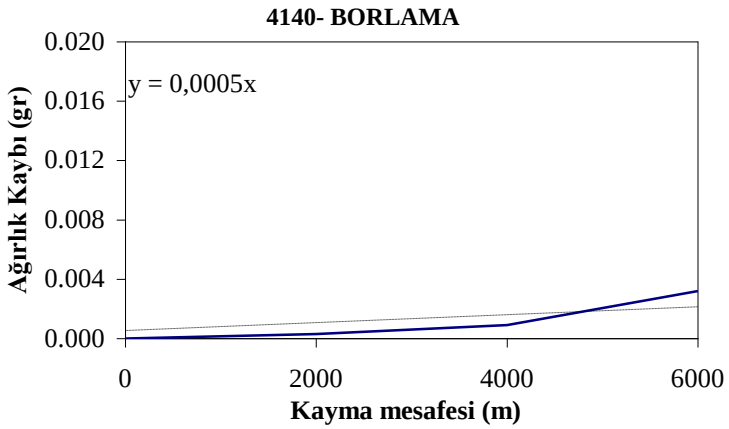
Şekil D.3: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



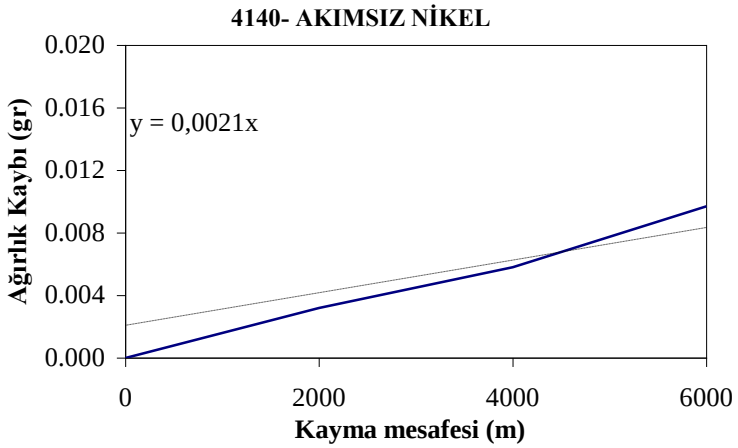
Şekil D.4: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



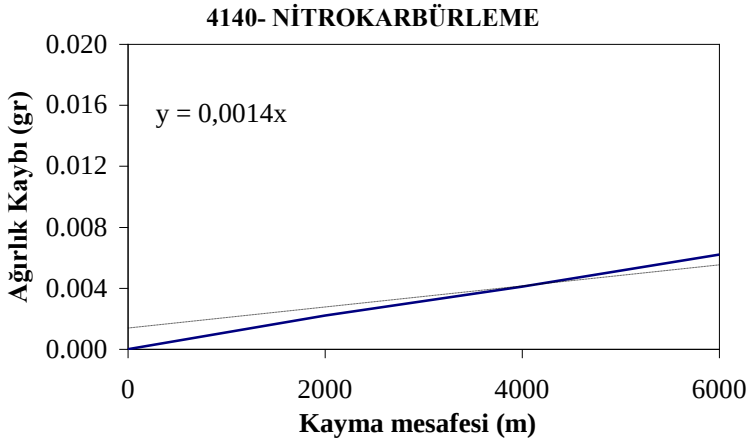
Şekil D.5: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



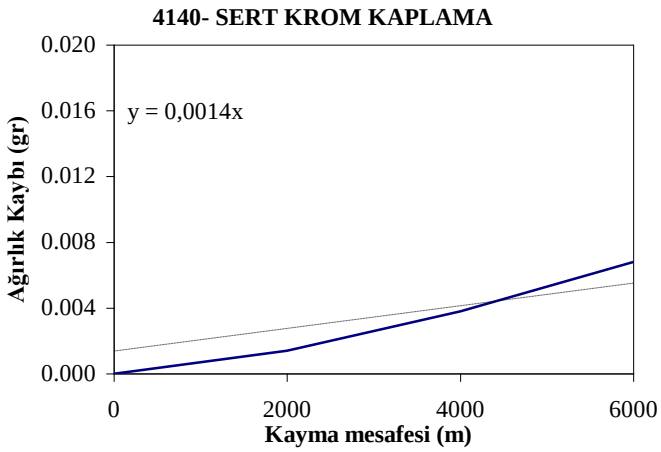
Şekil D.6: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



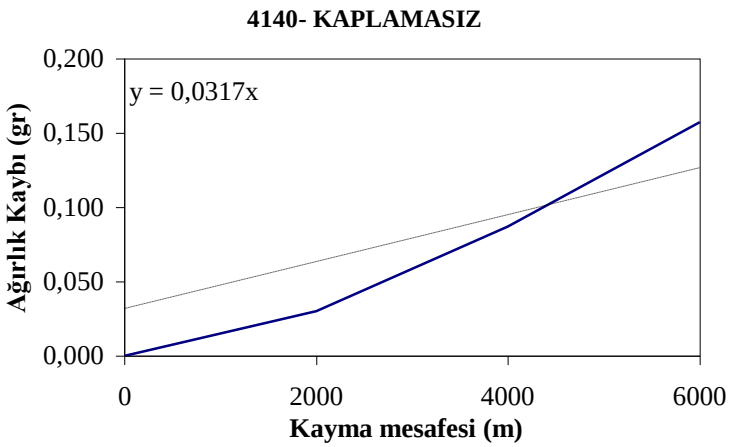
Şekil D.7: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



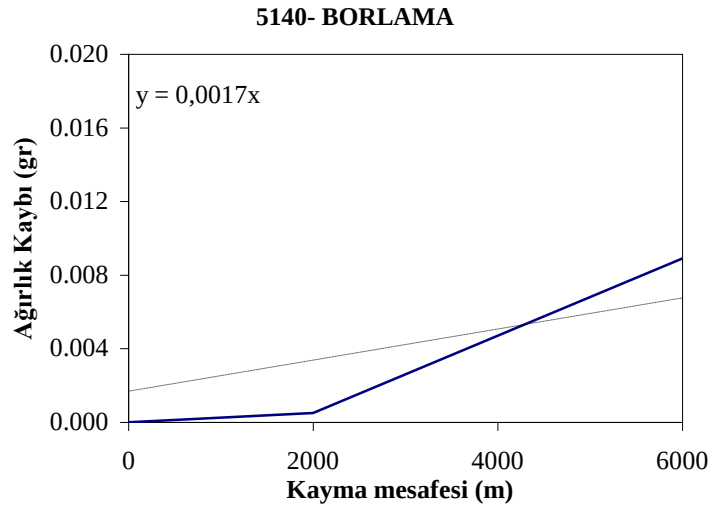
Şekil D.8: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



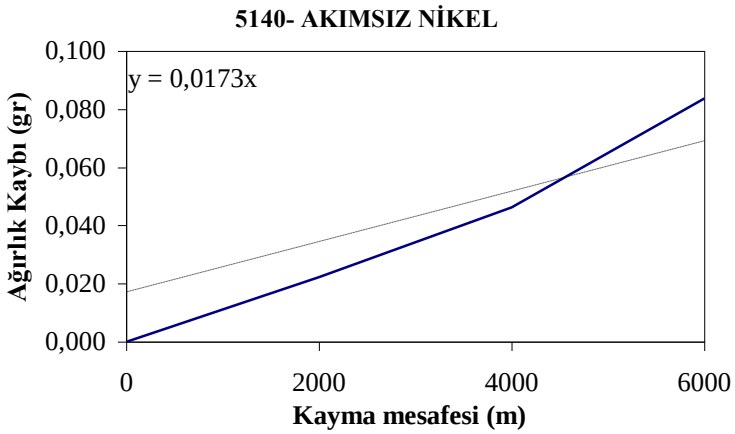
Şekil D.9: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



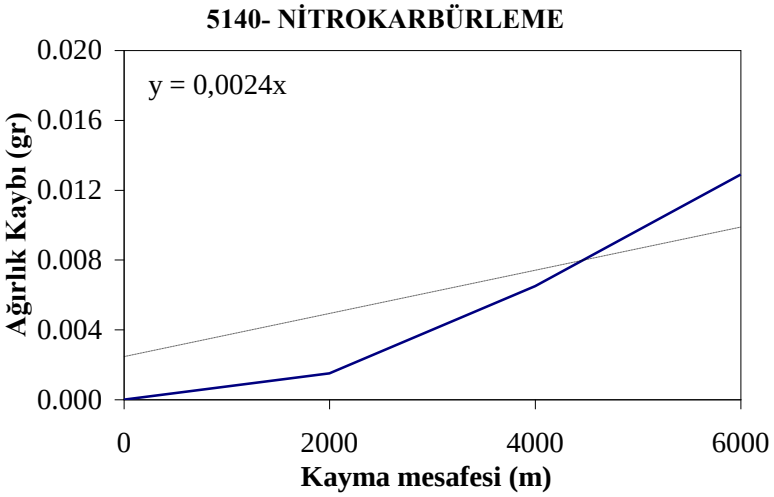
Şekil D.10: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



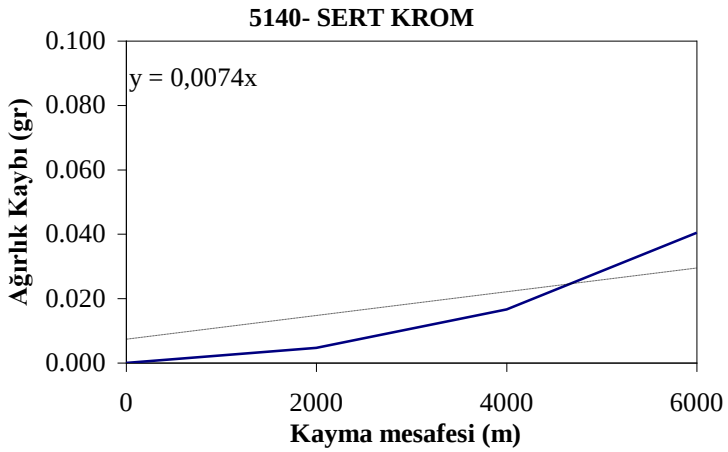
Şekil D.11: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



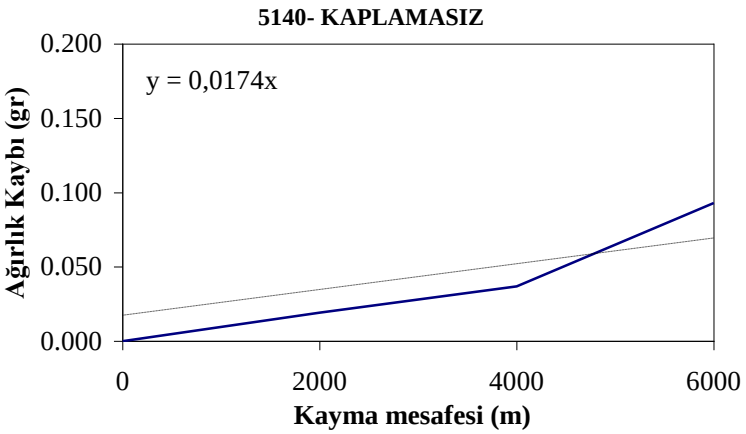
Şekil D.12: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



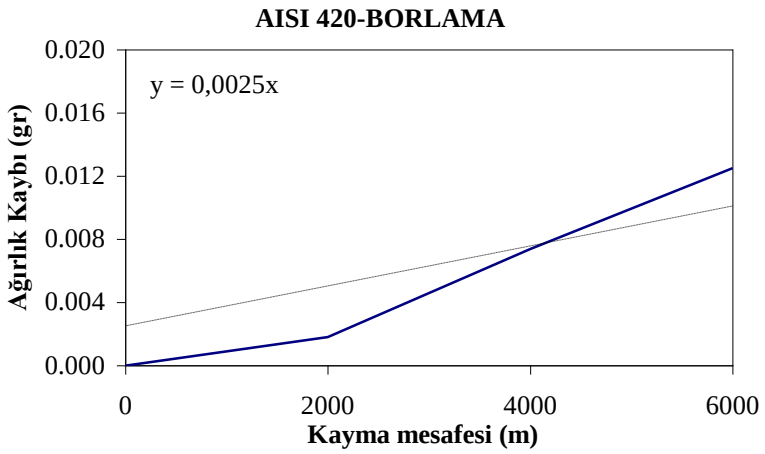
Şekil D.13: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



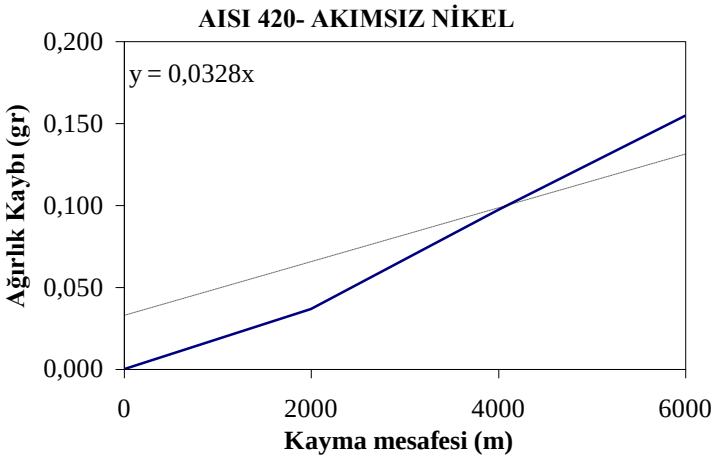
Şekil D.14: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



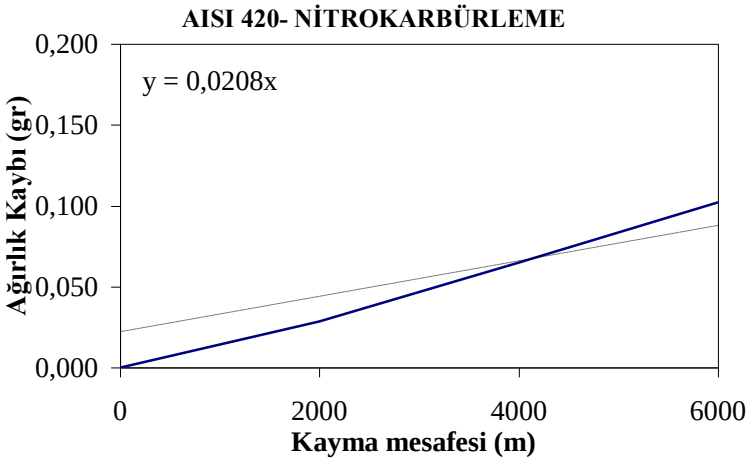
Şekil D.15: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



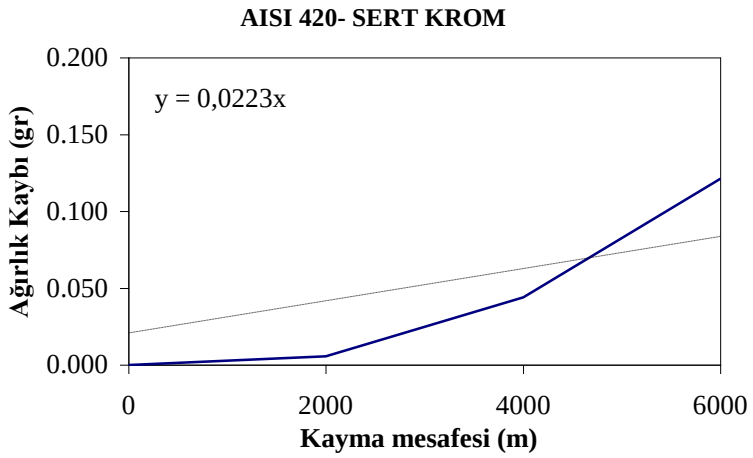
Şekil D.16: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



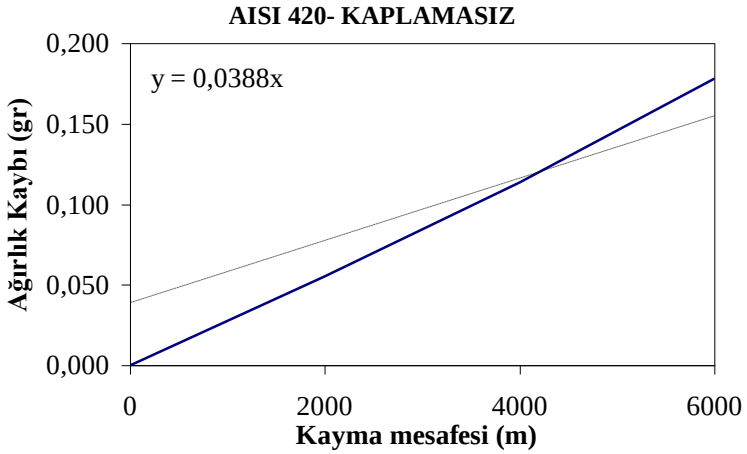
Şekil D.17: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



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



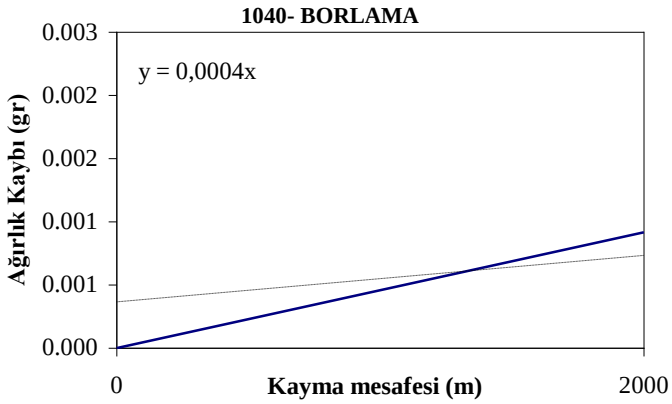
Şekil D.19: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



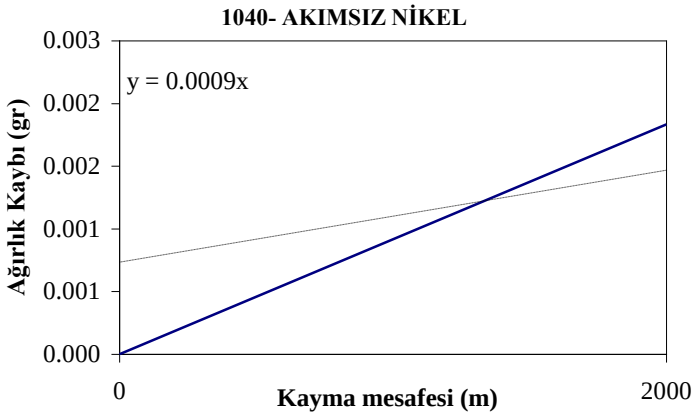
Şekil D.20: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği

Ek E. 2000 m. KAYMA MESAFESİNDE DENEY NUMUNELERİNDE MEYDANA GELEN AĞIRLIK KAYBI GRAFİKLERİ

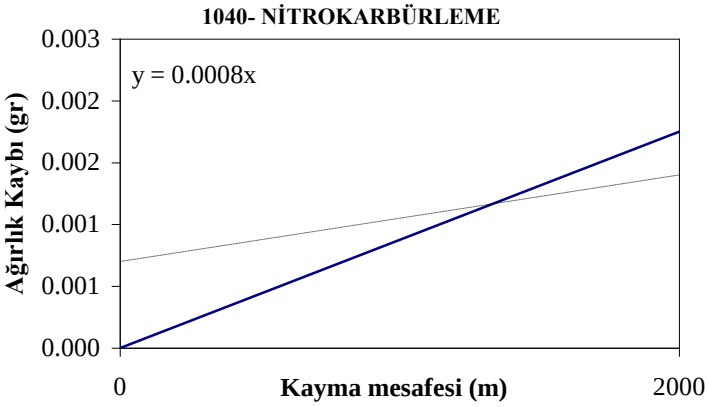
* Şekillerde kullanılan "y" değeri; aşınma eğrisinin eğimini vermektedir. Eğrinin eğiminin nümerik olarak büyüklüğü, aşınma hızının büyüklüğü ile doğru orantılıdır.



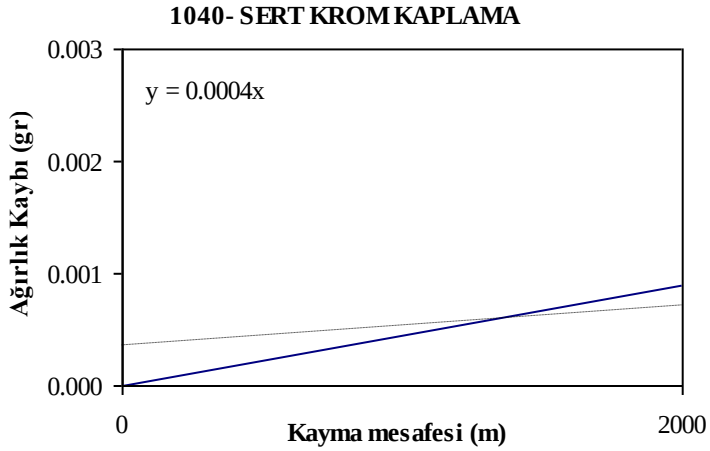
Şekil E.1: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



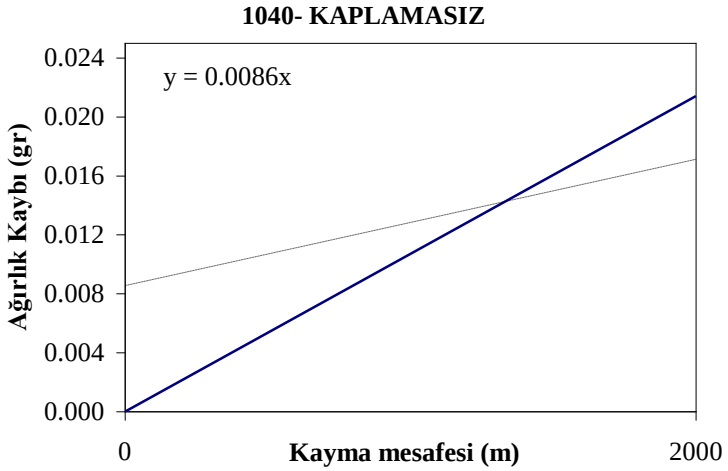
Şekil E.2: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



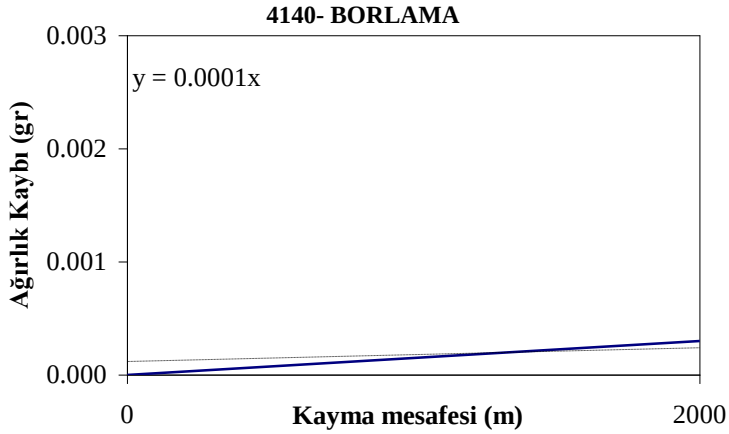
Şekil E.3: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



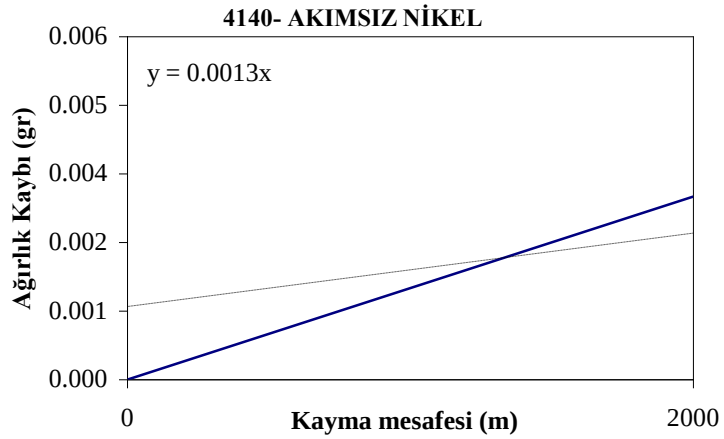
Şekil E.4: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



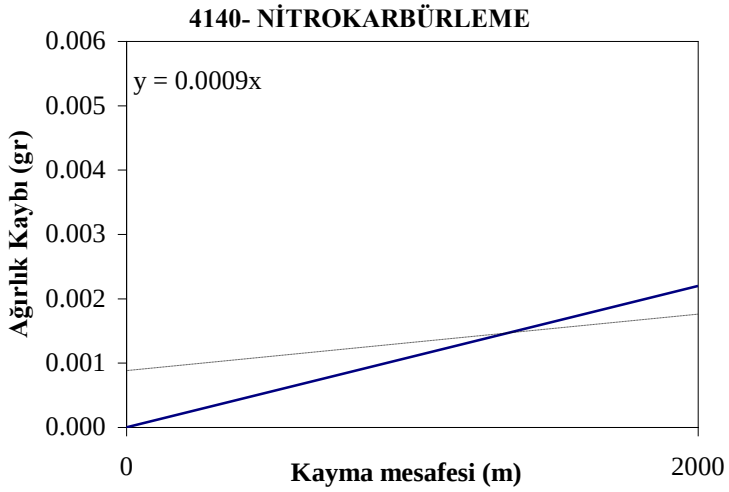
Şekil E.5: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



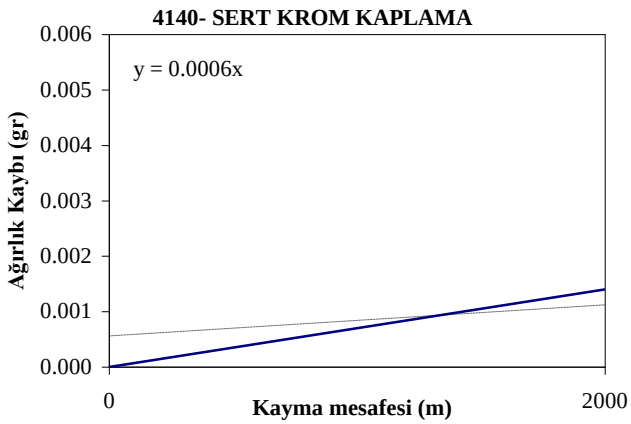
Şekil E.6: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



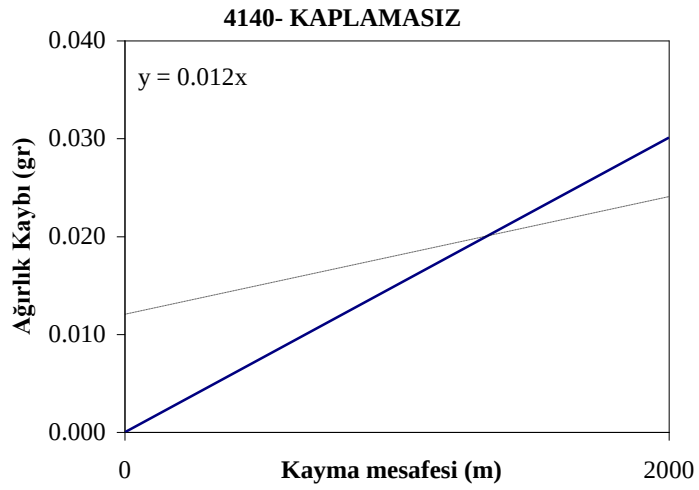
Şekil E.7: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



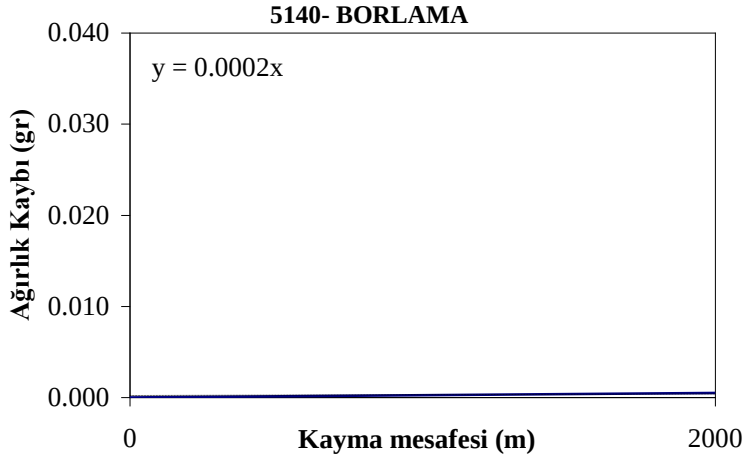
Şekil E.8: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



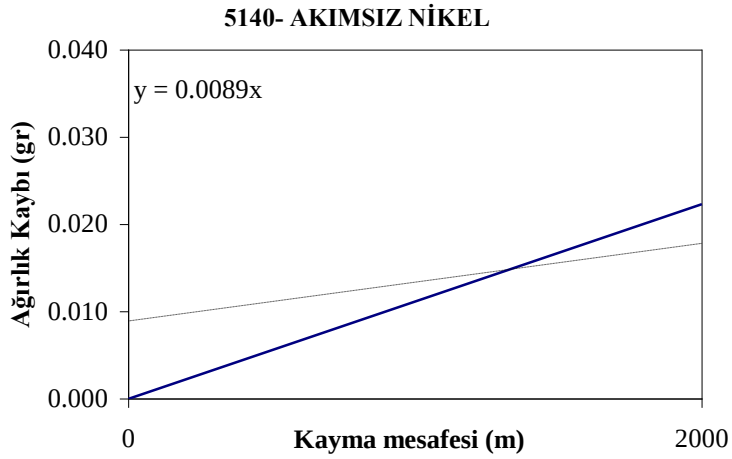
Şekil E.9: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



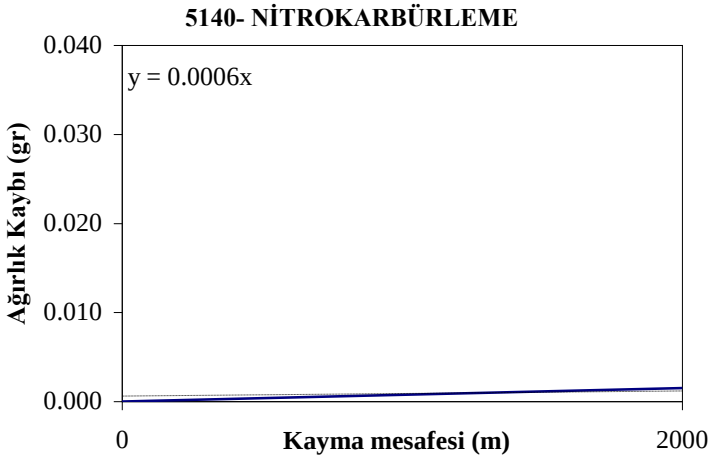
Şekil E.10: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



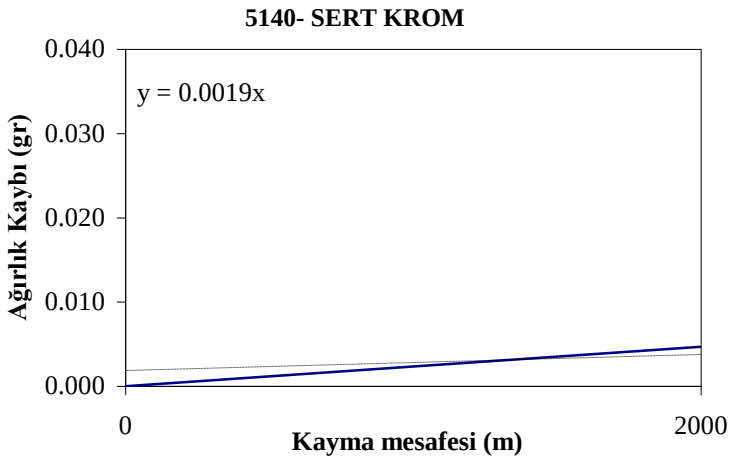
Şekil E.11: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



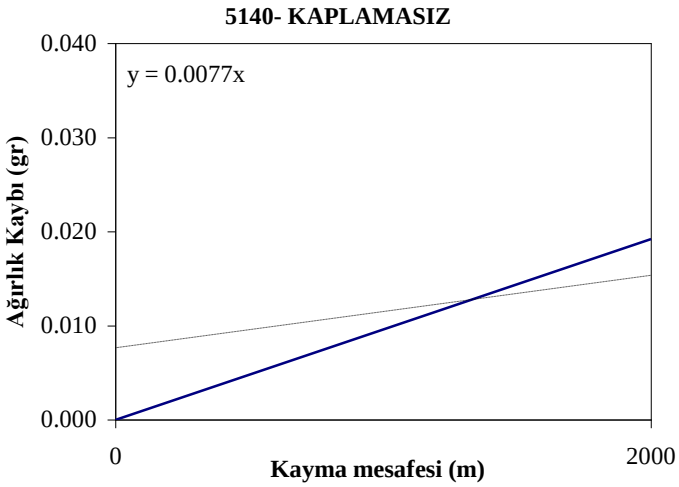
Şekil E.12: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



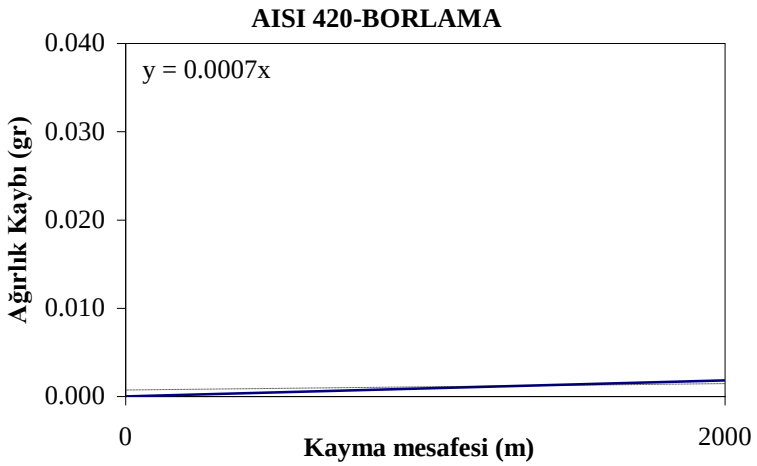
Şekil E.13: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



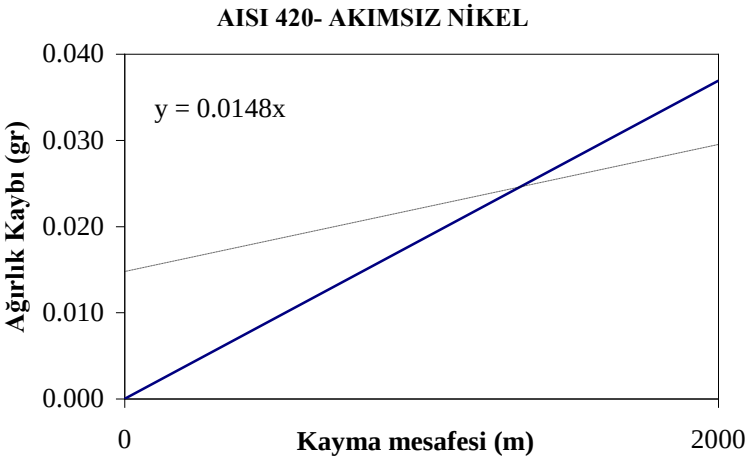
Şekil E.14: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



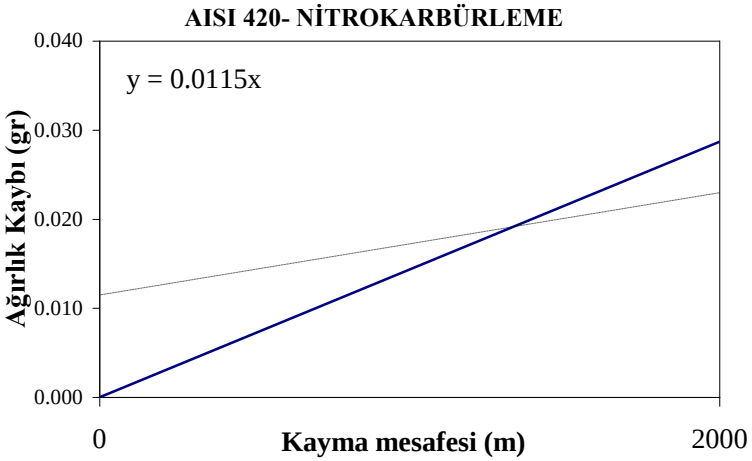
Şekil E.15: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



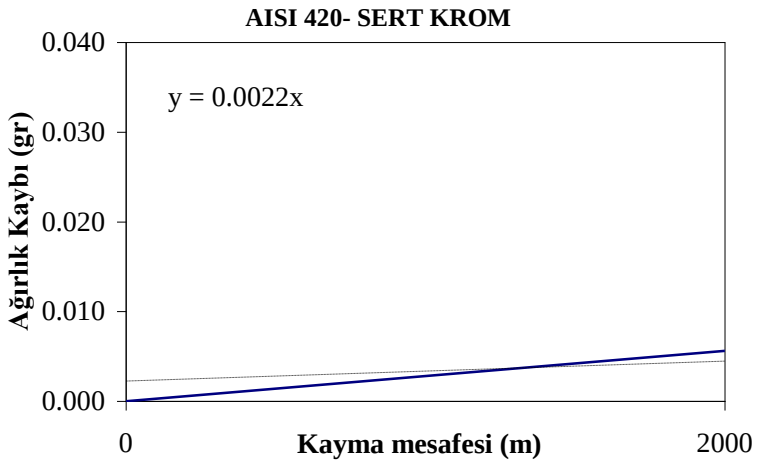
Şekil E.16: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



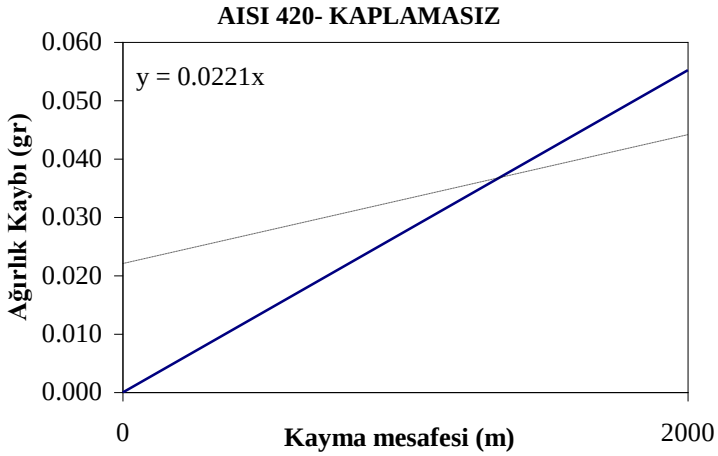
Şekil E.17: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



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

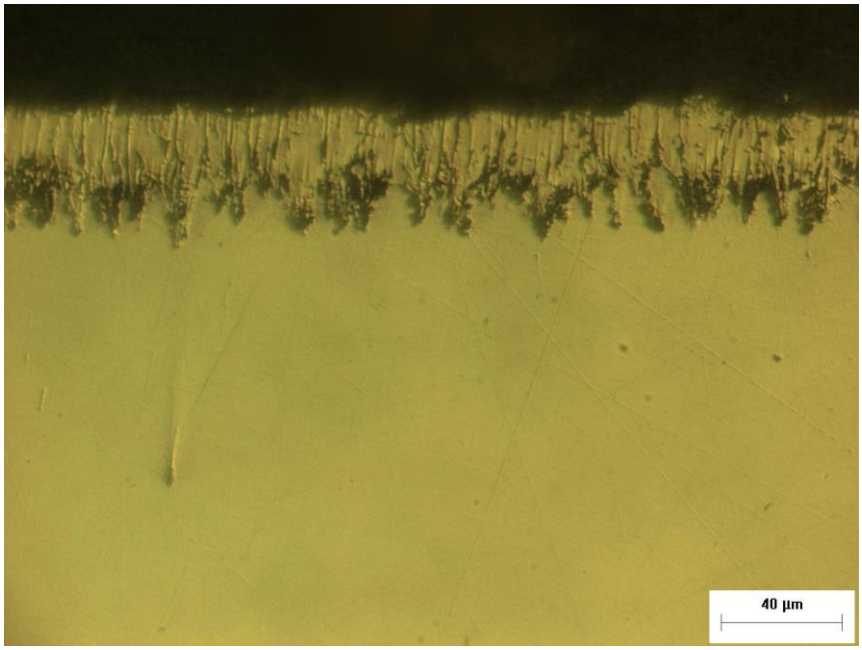


Şekil E.19: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği



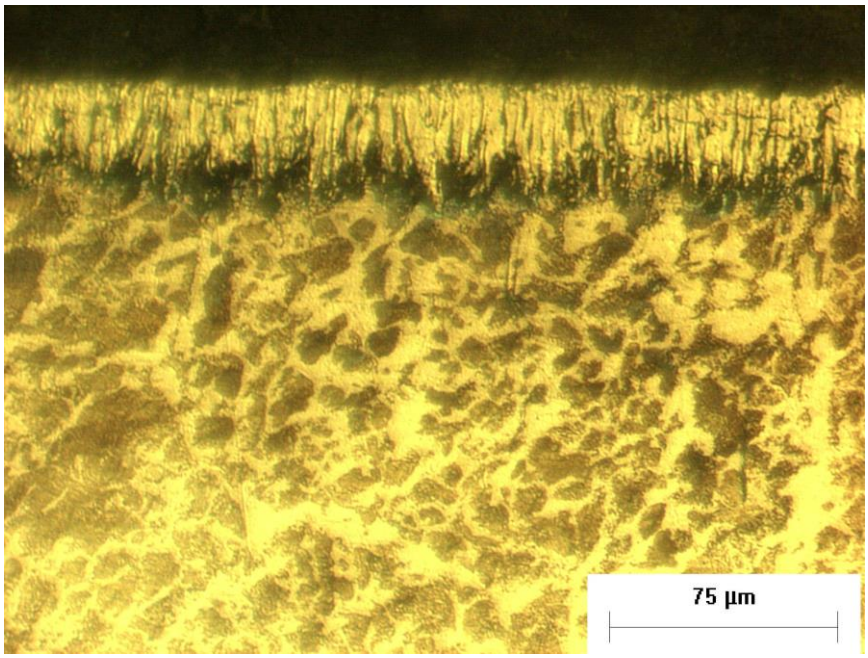
Şekil E.20: Kayma mesafesi (m.)- Ağırlık kaybı (gr.) grafiği

Ek F. DENEY NUMUNE KESİTLERİNİN PARLATILMIŞ VE DAĞLANMIŞ GÖRÜNTÜLERİ

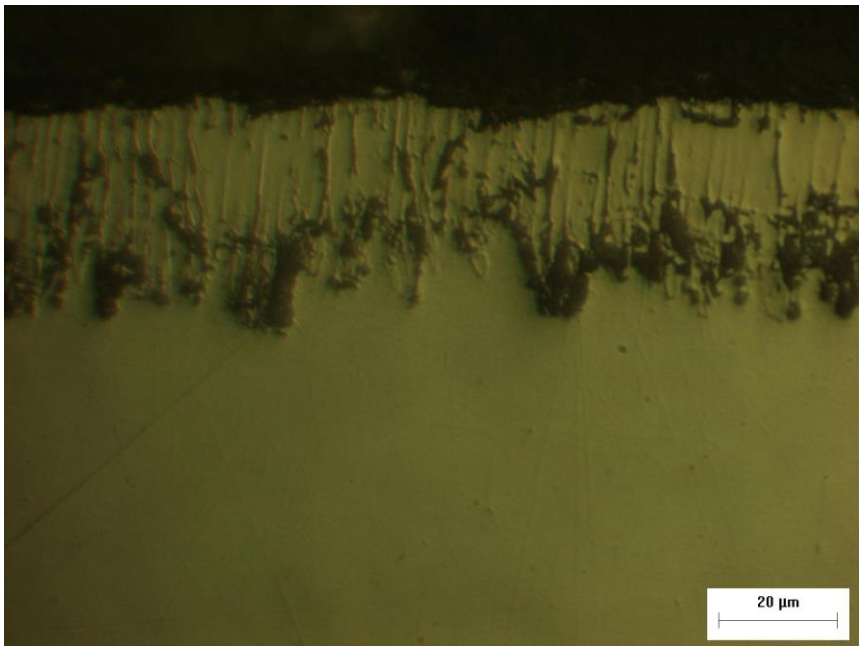


Şekil F.1: 1040 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 400x

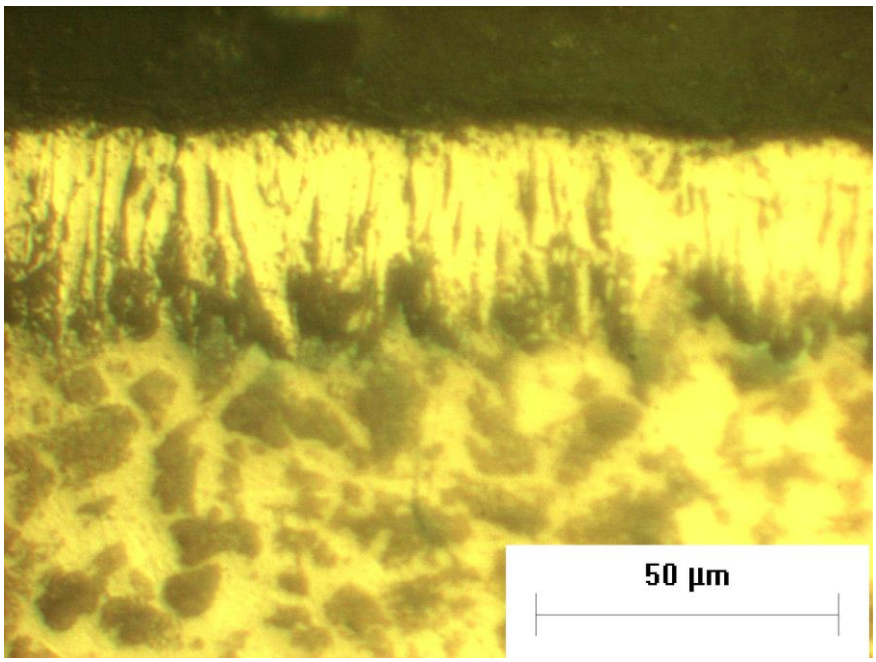
(Ortalama Bor Kaplama Kalınlığı: 21,33 µm)



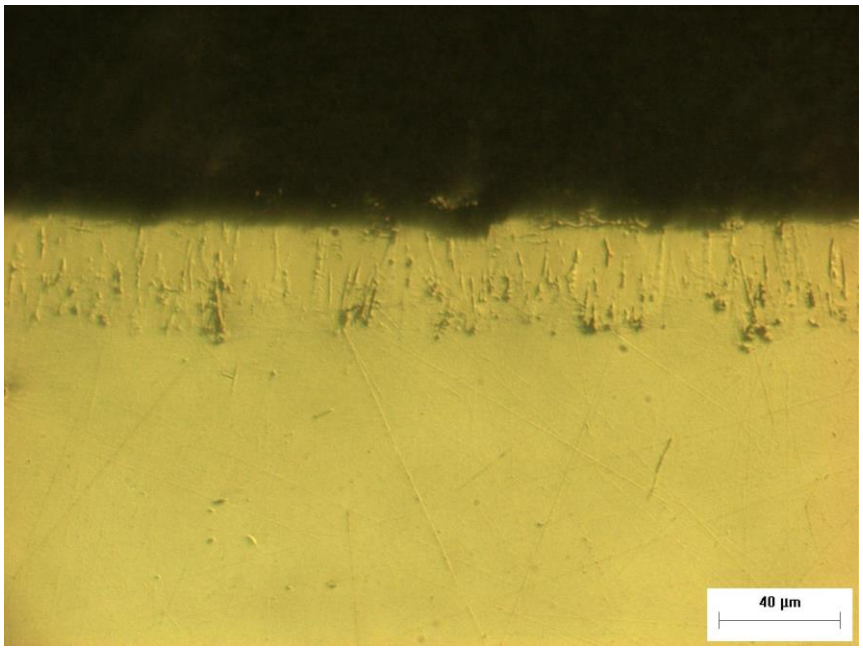
Şekil F.2: 1040 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x



Şekil F.3: 1040 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 800x

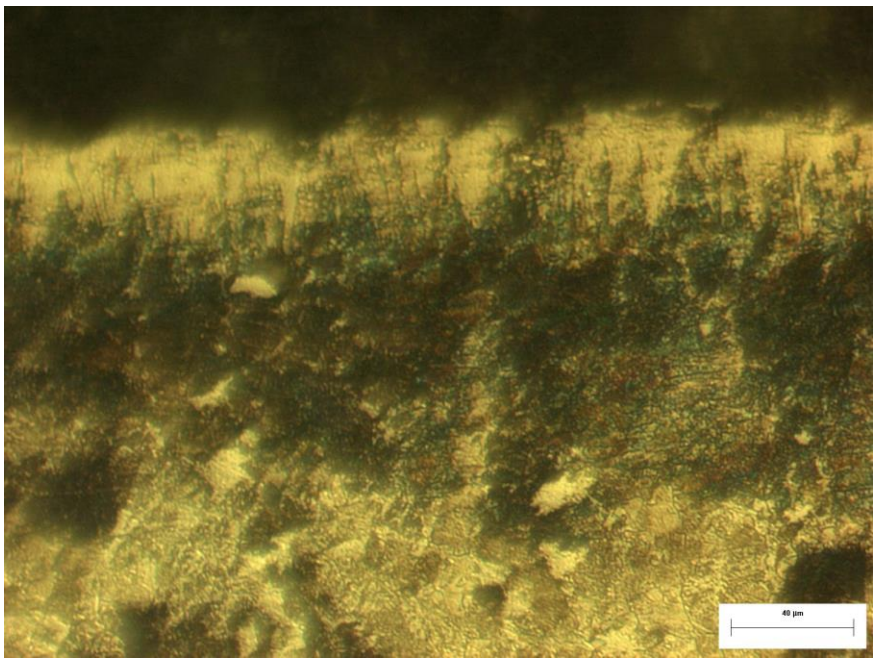


Şekil F.4: 1040 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x

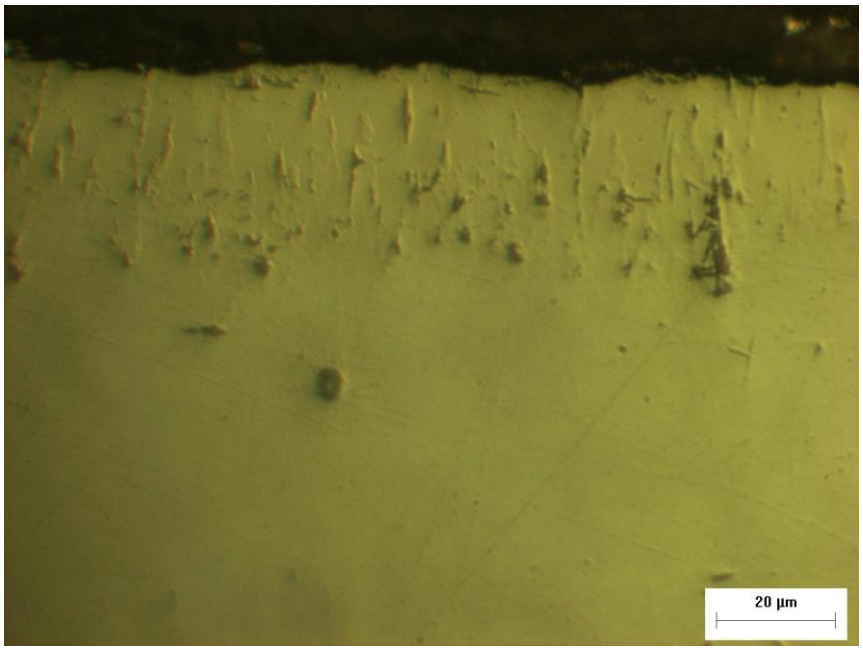


Şekil F.5: 4140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 400x

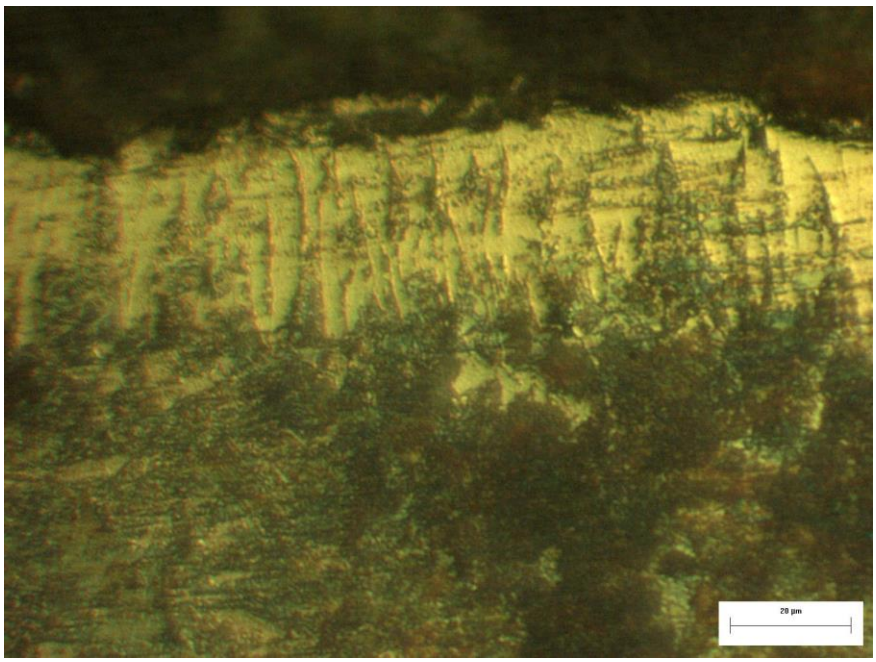
(Ortalama Bor Kaplama Kalınlığı: 25,02 µm)



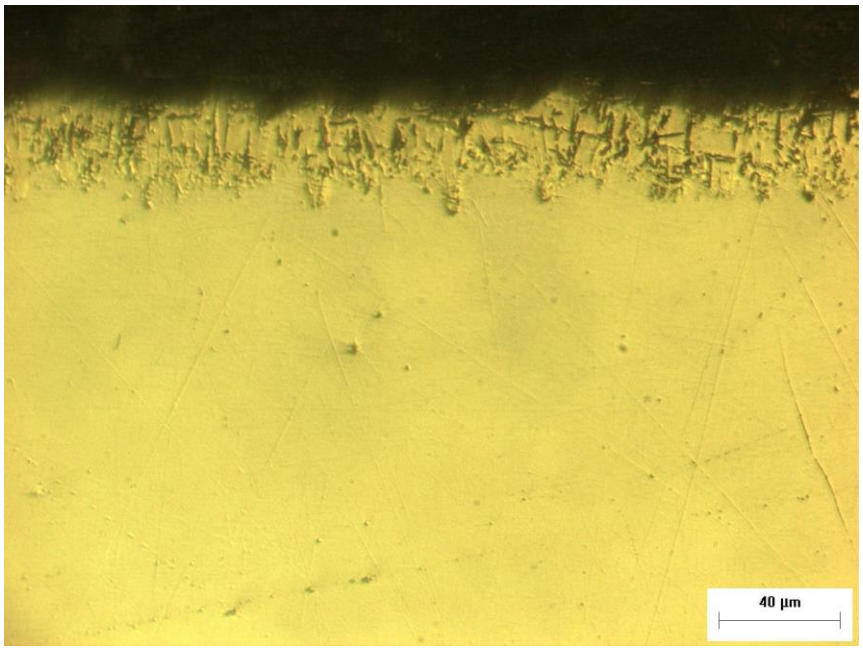
Şekil F.6: 4140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x



Şekil F.7: 4140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 800x

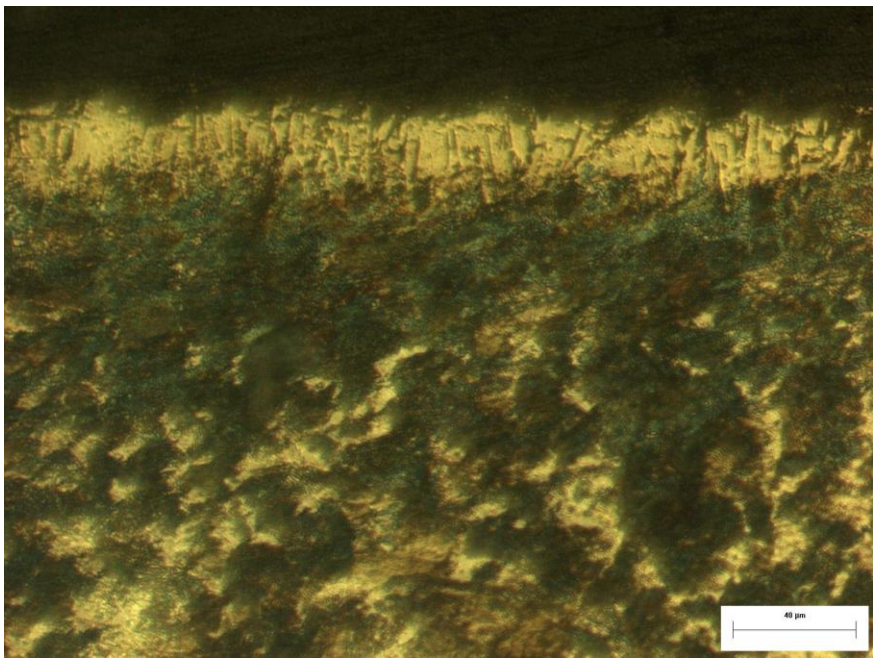


Şekil F.8: 4140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x

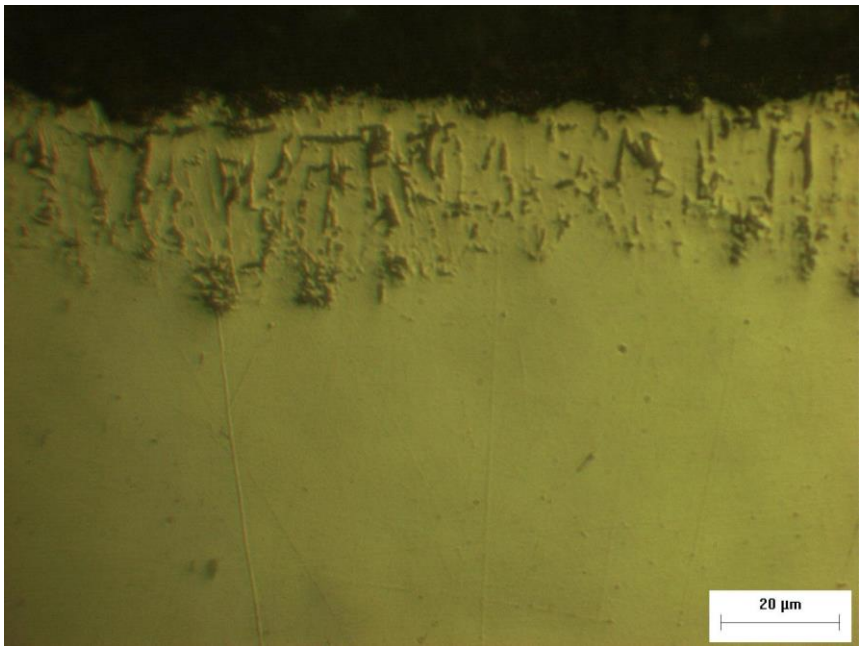


Şekil F.9: 5140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 400x

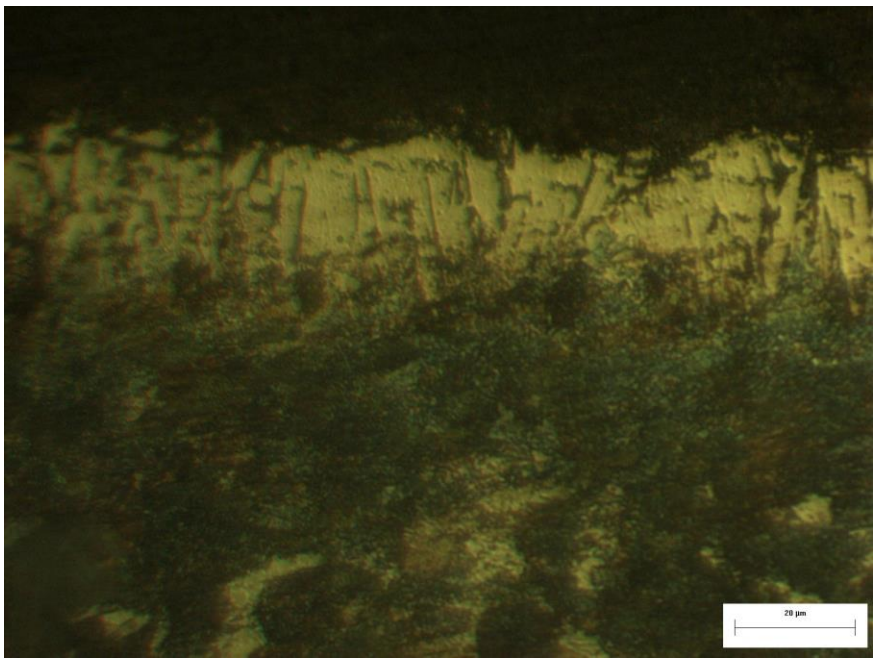
(Ortalama Bor Kaplama Kalınlığı: 24,32 µm)



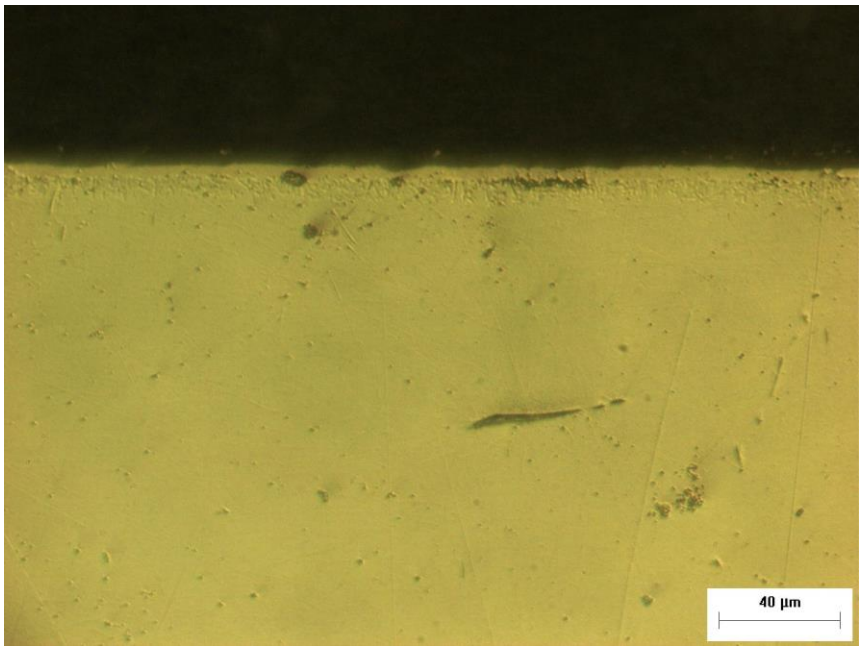
Şekil F.10: 5140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x



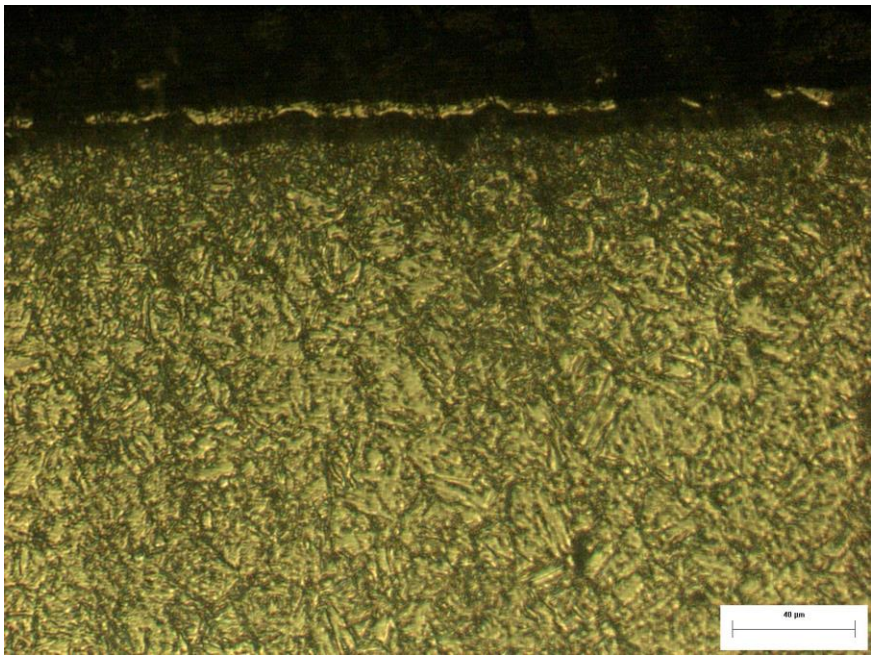
Şekil F.11: 5140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 800x



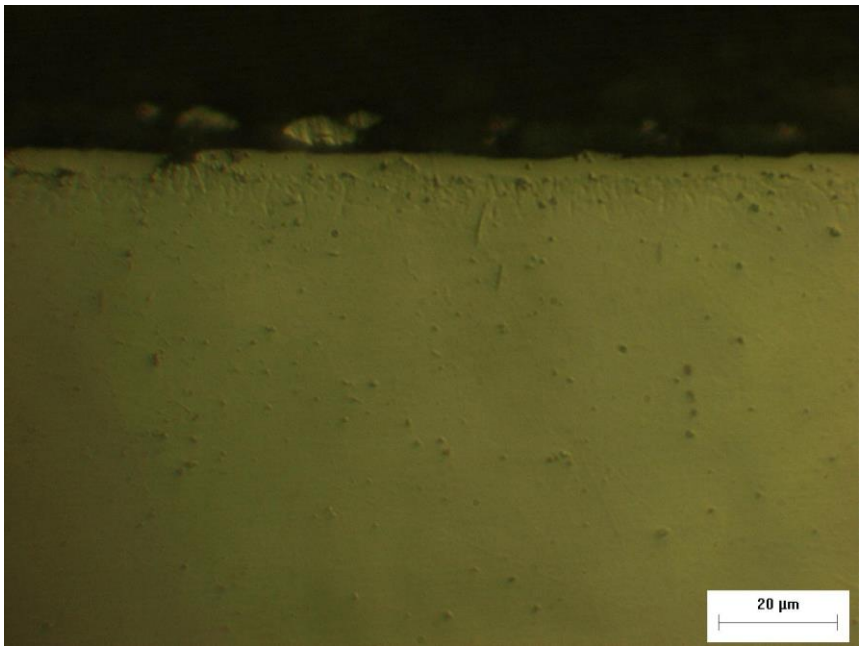
Şekil F.12: 5140 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x



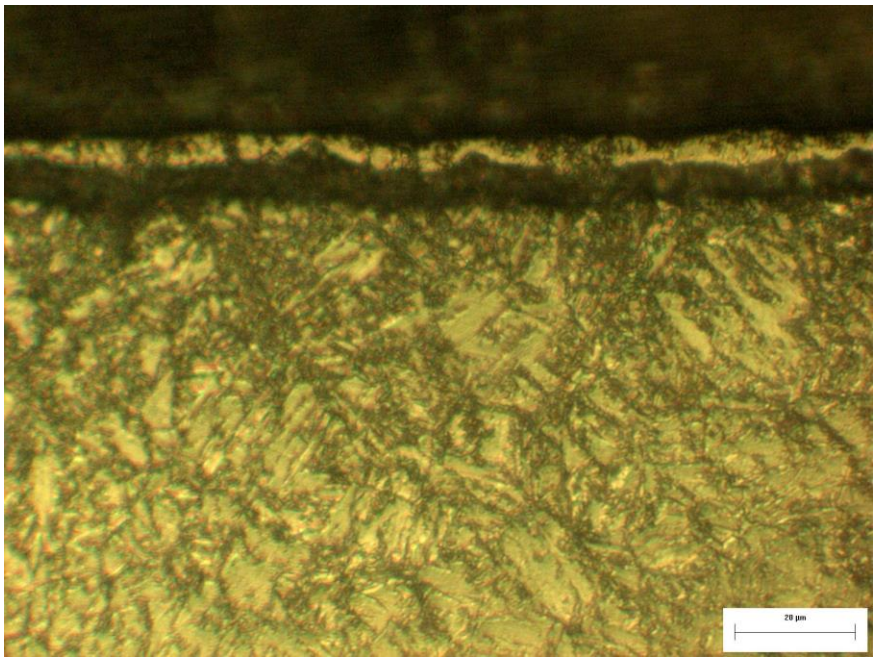
Şekil F.13: AISI 420 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-400x (Ortalama Bor Kaplama Kalınlığı: 4,67 µm)



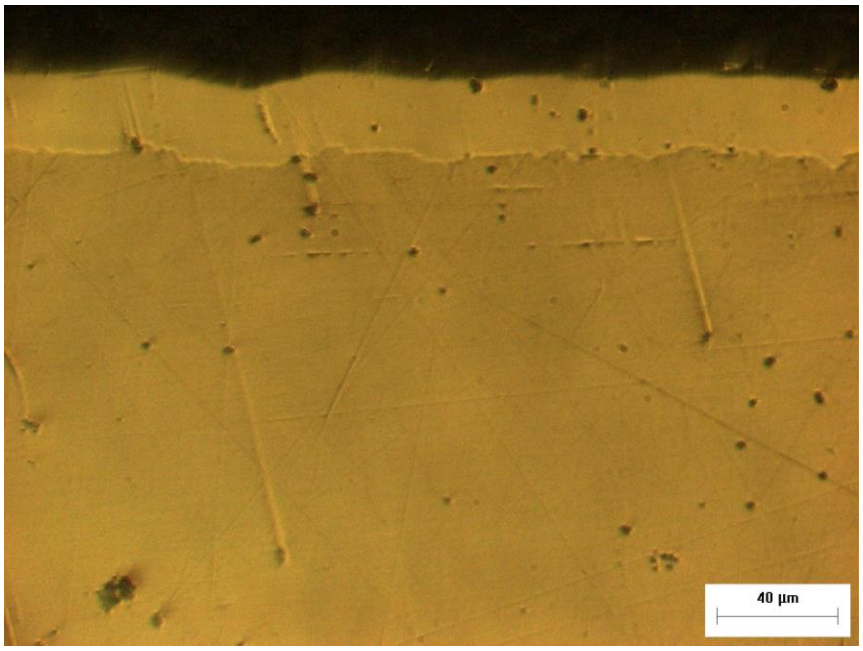
Şekil F.14: AISI 420 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-400x



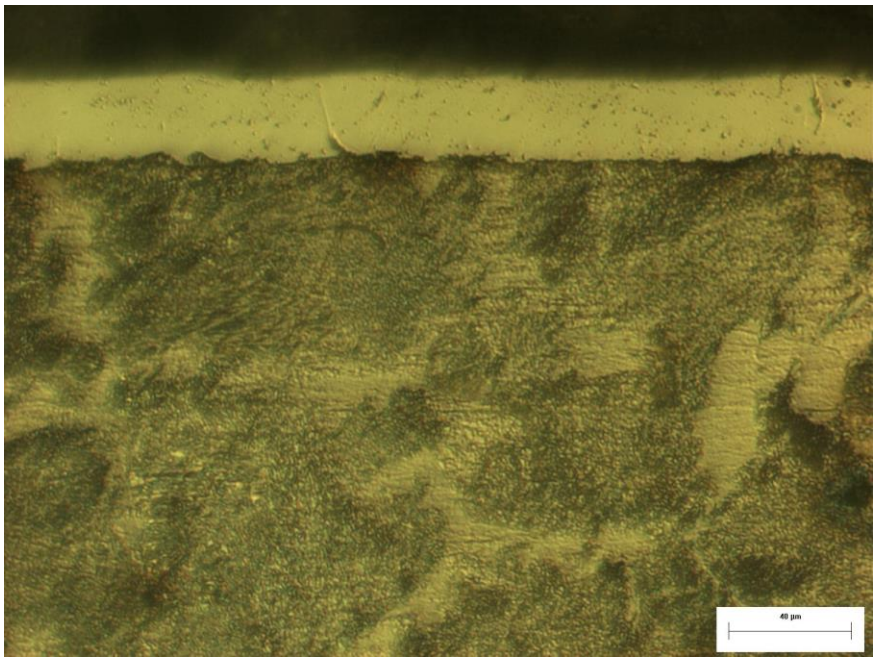
Şekil F.15: AISI 420 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-800x



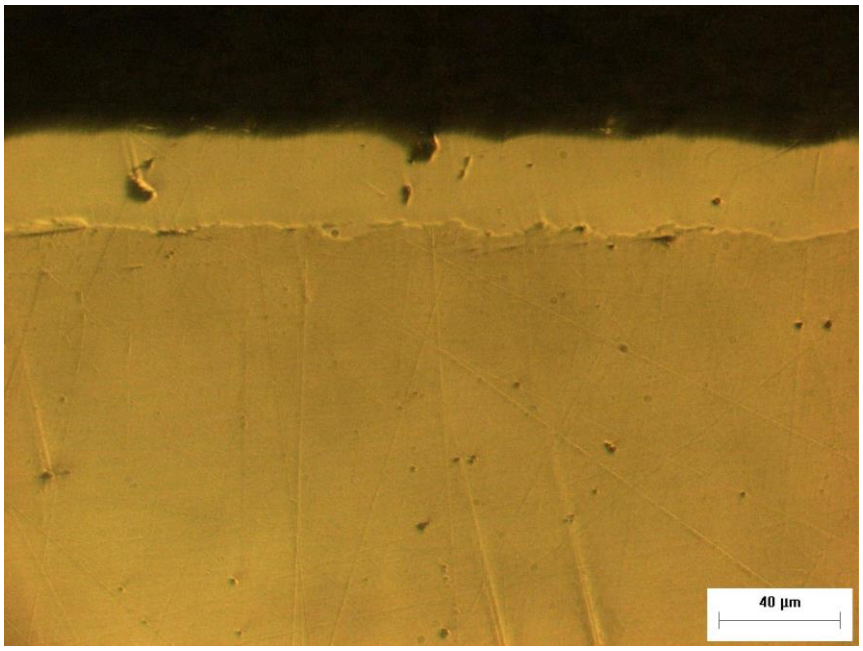
Şekil F.16: AISI 420 borlanmış deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-800x



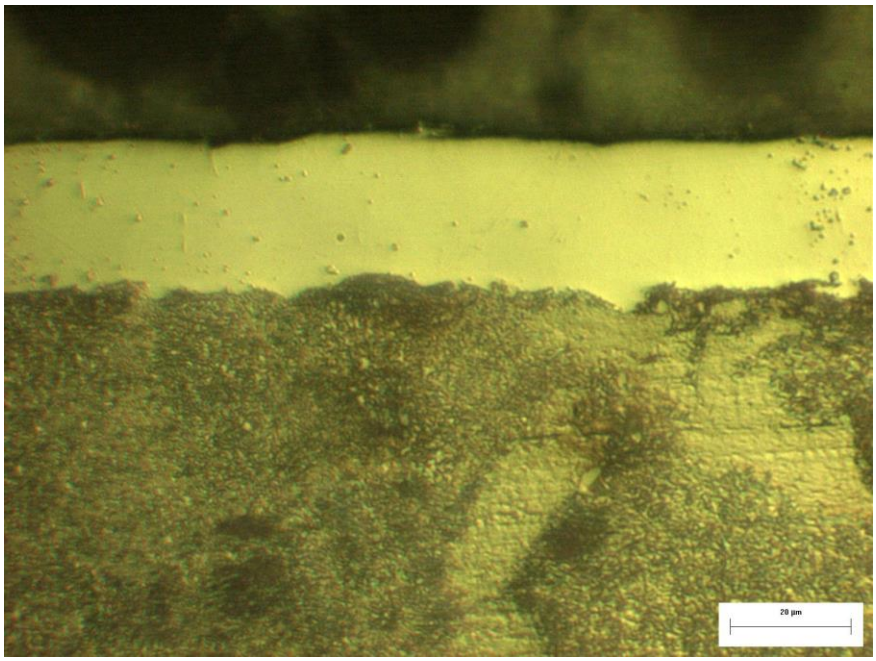
Şekil F.17: 1040 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-400x (Ortalama Sert Krom Kaplama Kalınlığı: 11,22 µm)



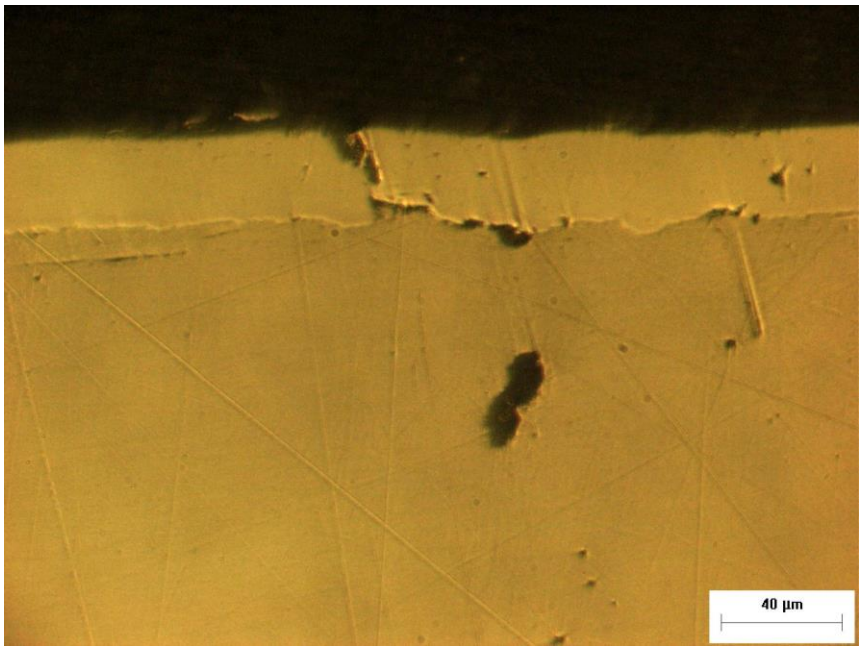
Şekil F.18: 1040 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-400x



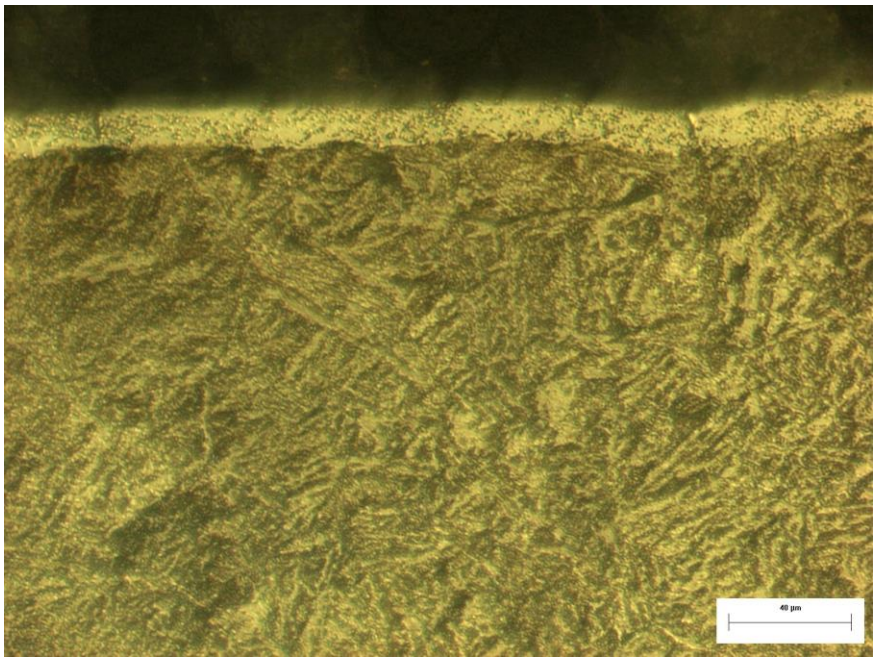
Şekil F.19: 1040 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-400x



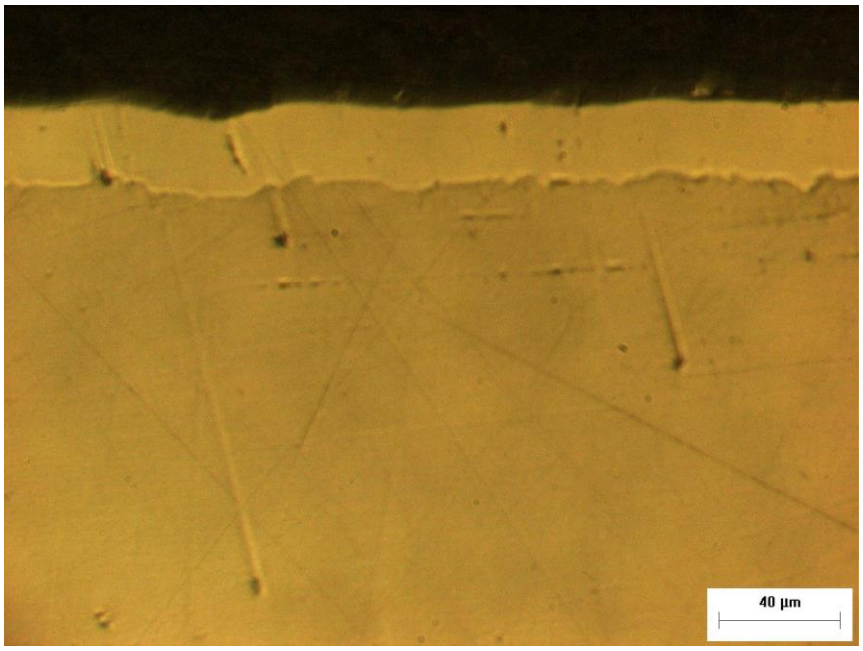
Şekil F.20: 1040 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-800x



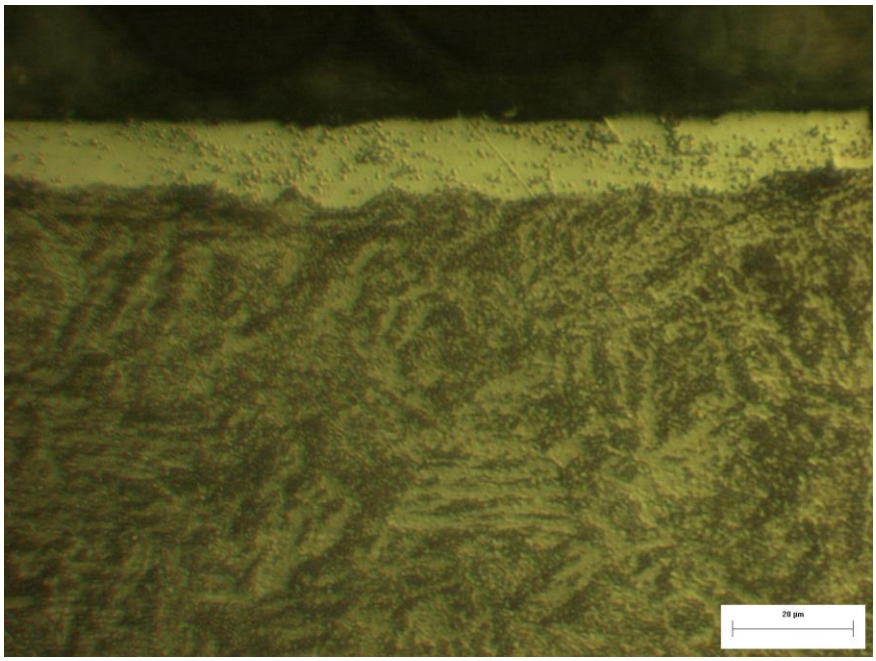
Şekil F.21: 4140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-400x (Ortalama Sert Krom Kaplama Kalınlığı: 13,06 µm)



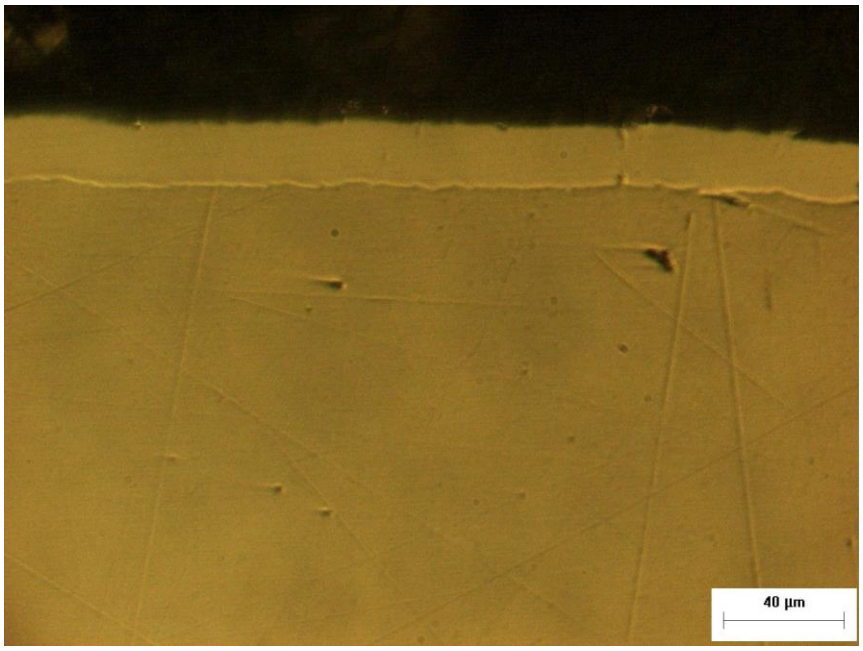
Şekil F.22: 4140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-400x



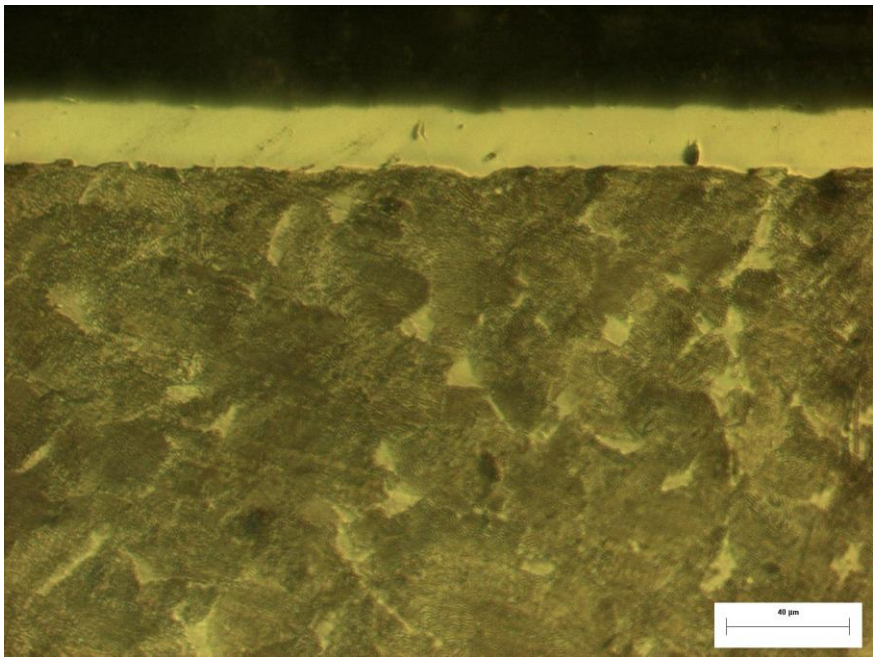
Şekil F.23: 4140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-400x



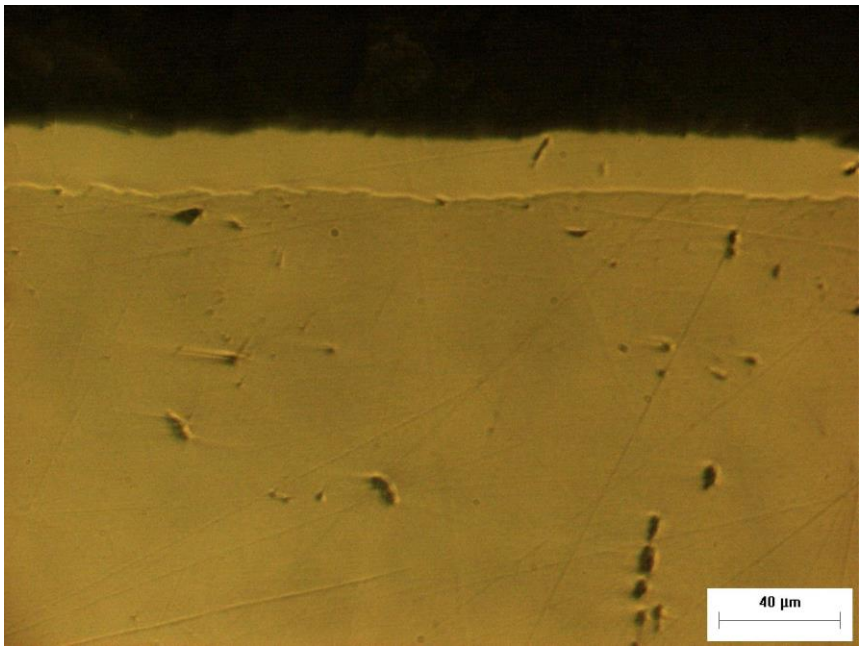
Şekil F.24: 4140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-800x



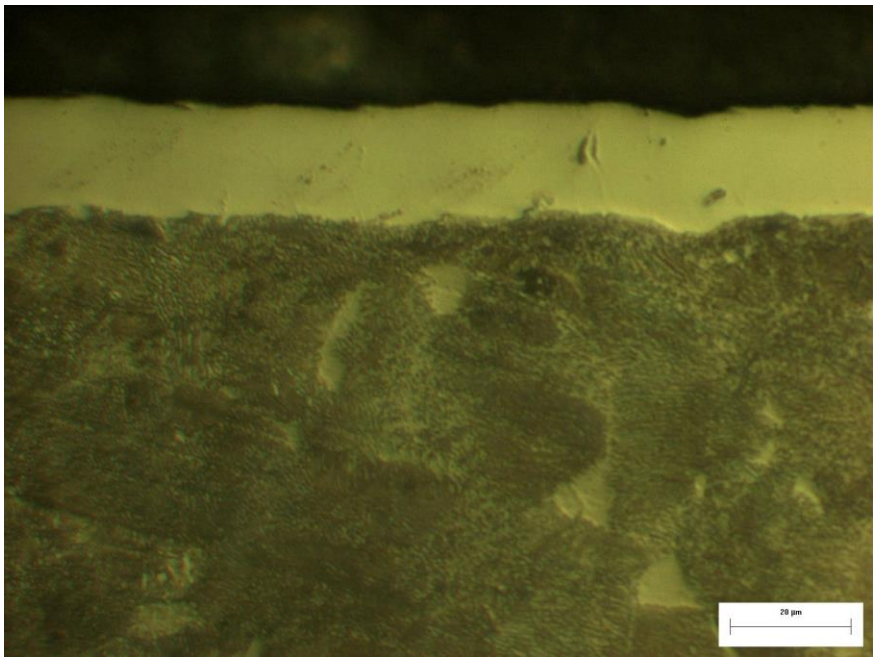
Şekil F.25: 5140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-400x (Ortalama Sert Krom Kaplama Kalınlığı: 20,87 µm)



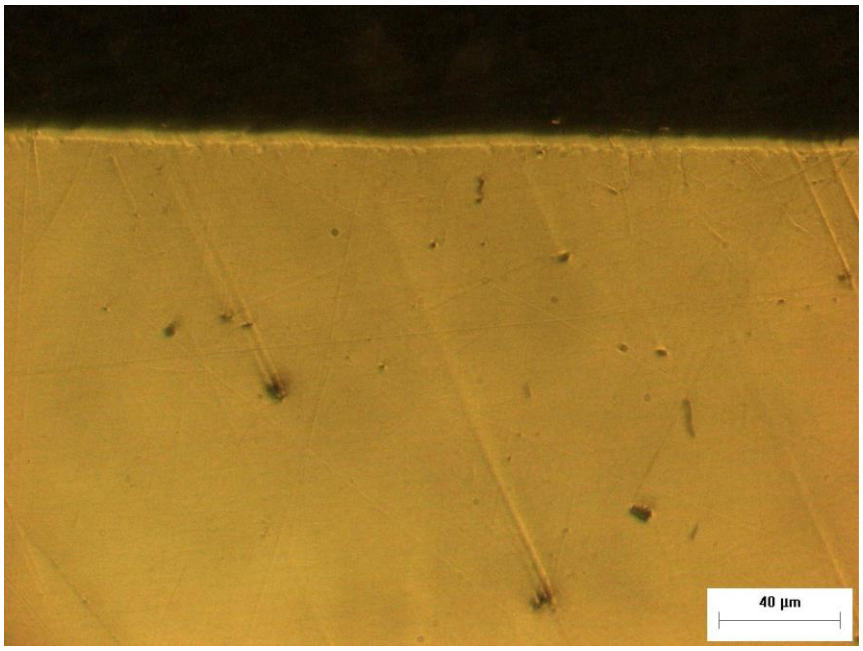
Şekil F.26: 5140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-400x



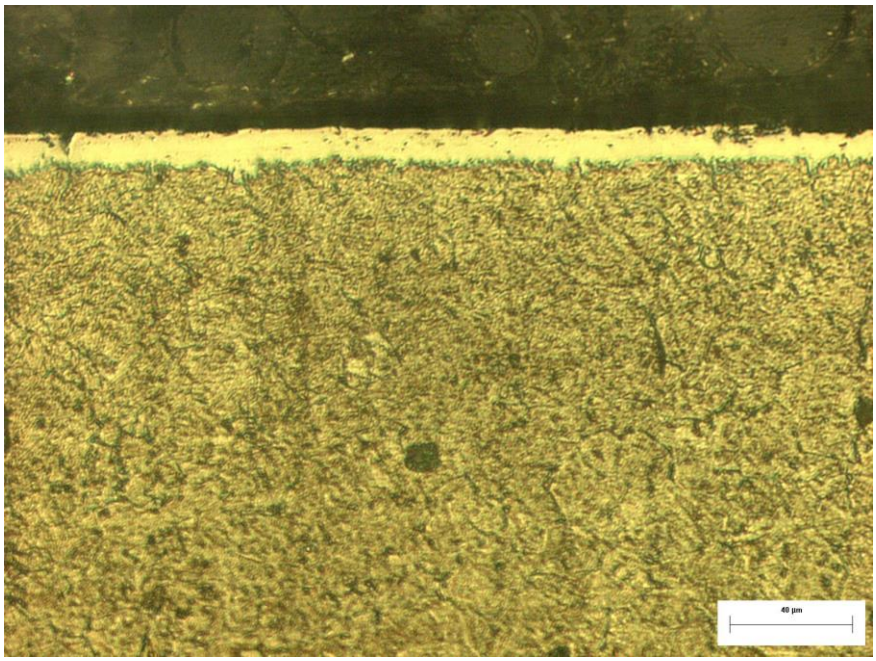
Şekil F.27: 5140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-400x



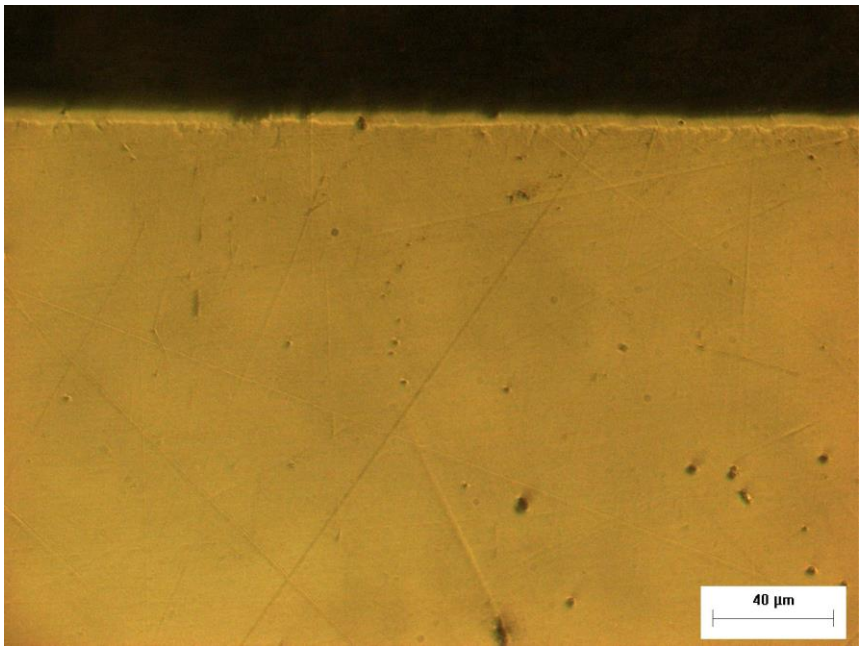
Şekil F.28: 5140 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-800x



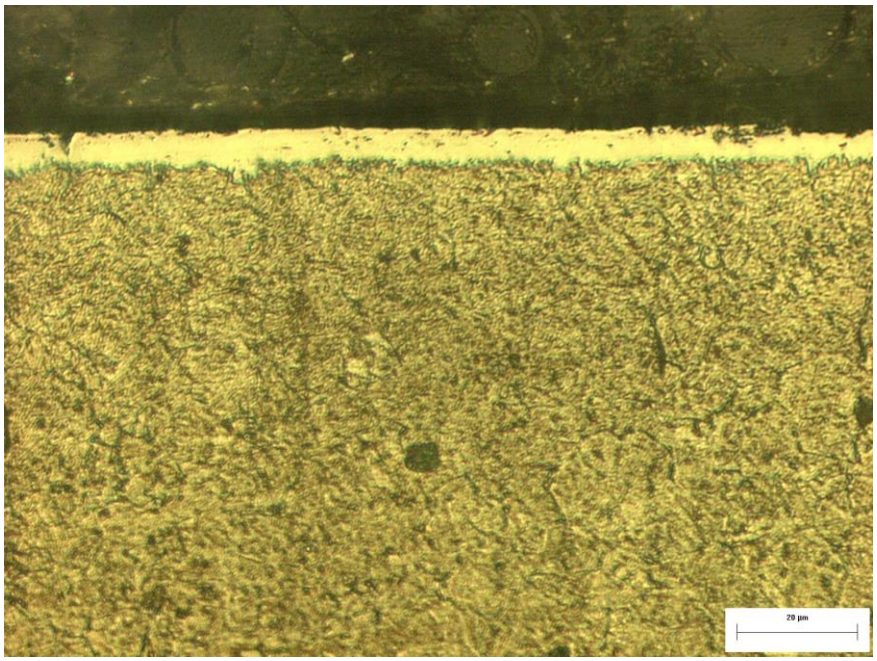
Şekil F.29: AISI 420 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 400x (Ortalama Sert Krom Kaplama Kalınlığı: 7,39 µm)



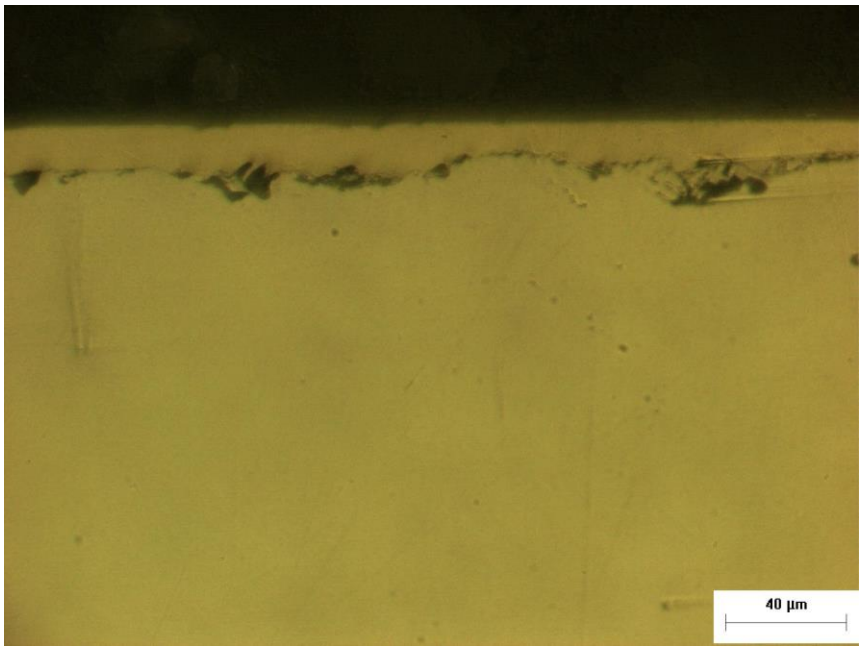
Şekil F.30: AISI 420 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x



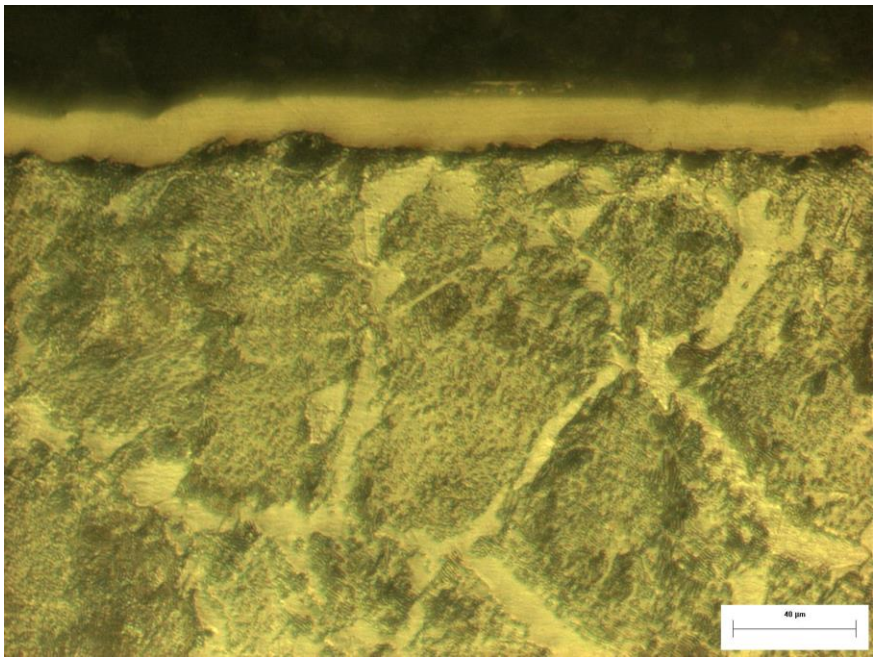
Şekil F.31: AISI 420 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 400x



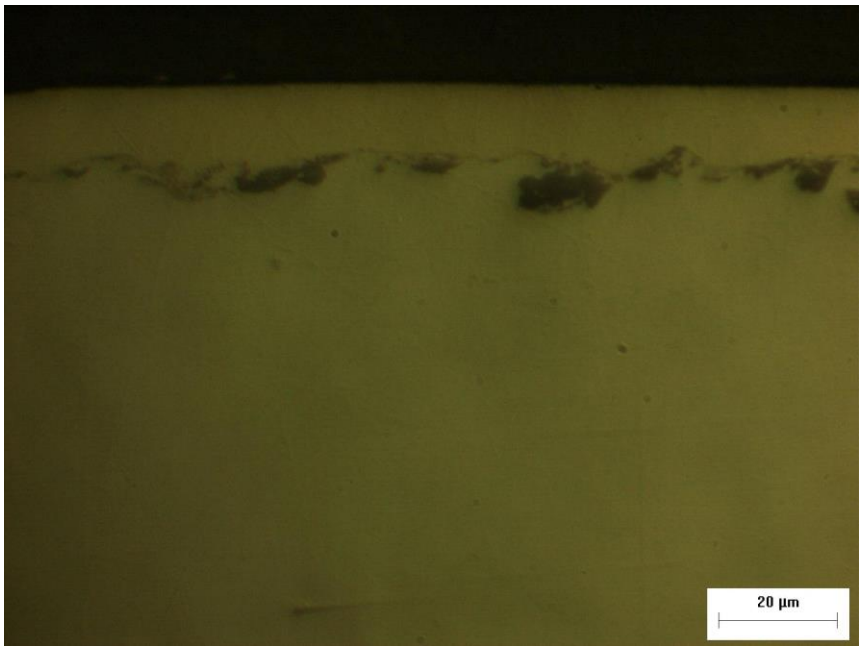
Şekil F.32: AISI 420 sert krom kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x



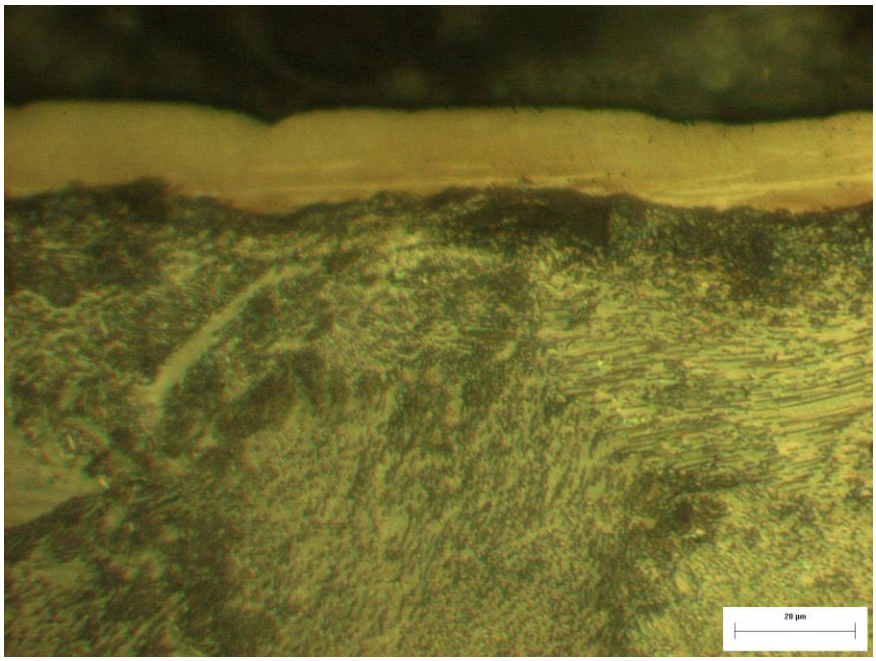
Şekil F.33: 1040 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış) 400x (Ortalama Akımsız Nikel Kaplama Kalınlığı: 14,36 µm)



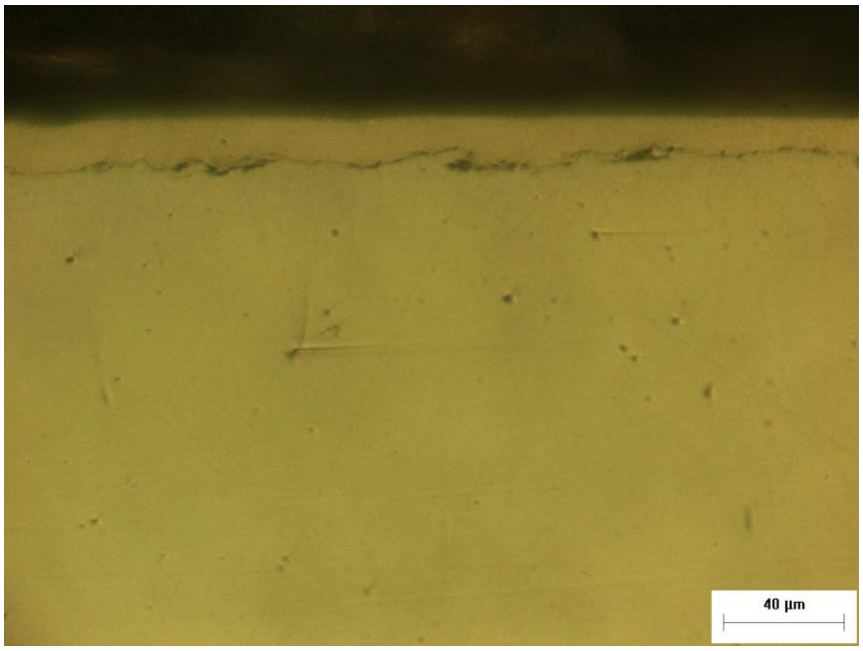
Şekil F.34: 1040 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x



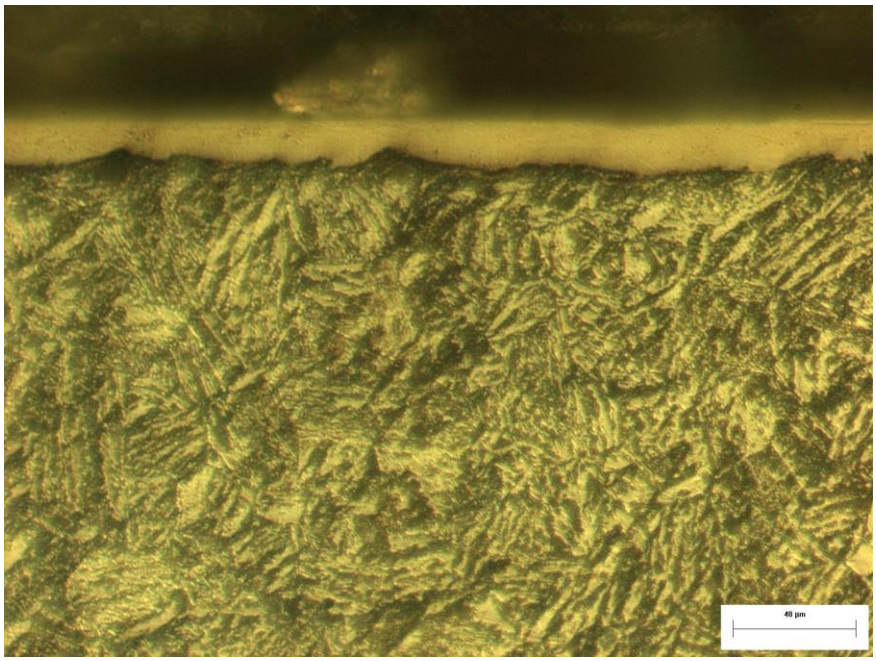
Şekil F.35: 1040 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 800x



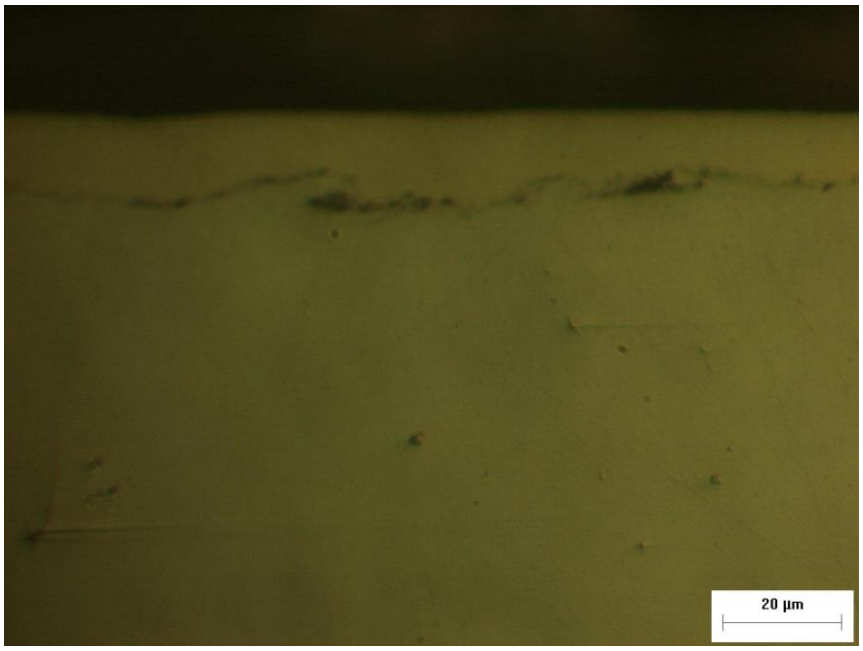
Şekil F.36: 1040 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x



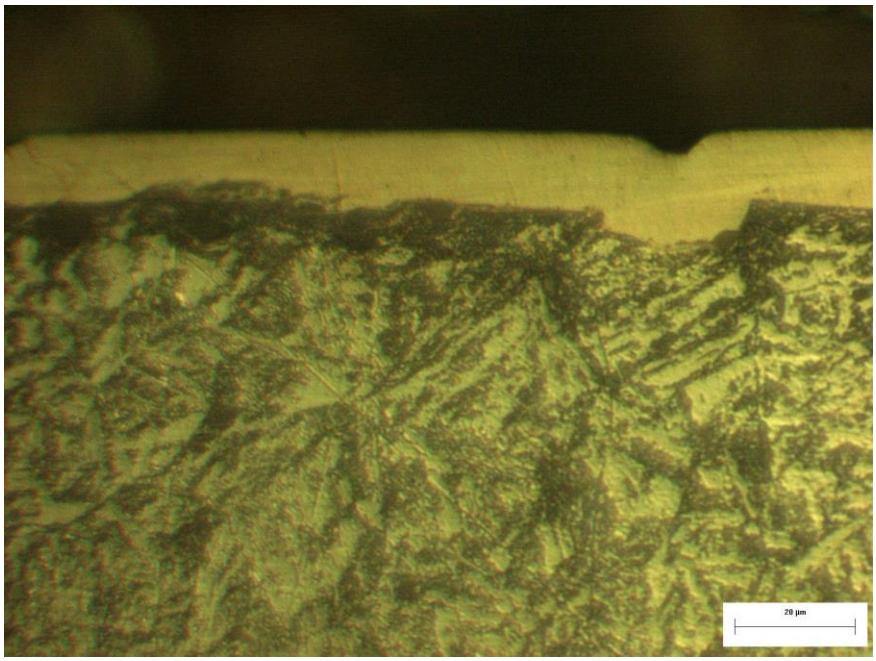
Şekil F.37: 4140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış) 400x (Ortalama Akımsız Nikel Kaplama Kalınlığı: 14,18 µm)



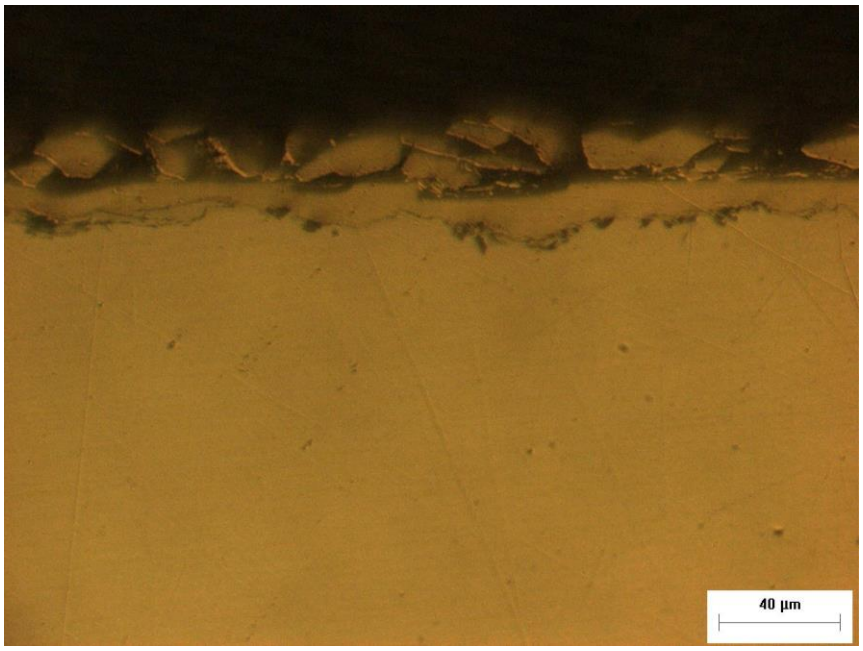
Şekil F.38: 4140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x



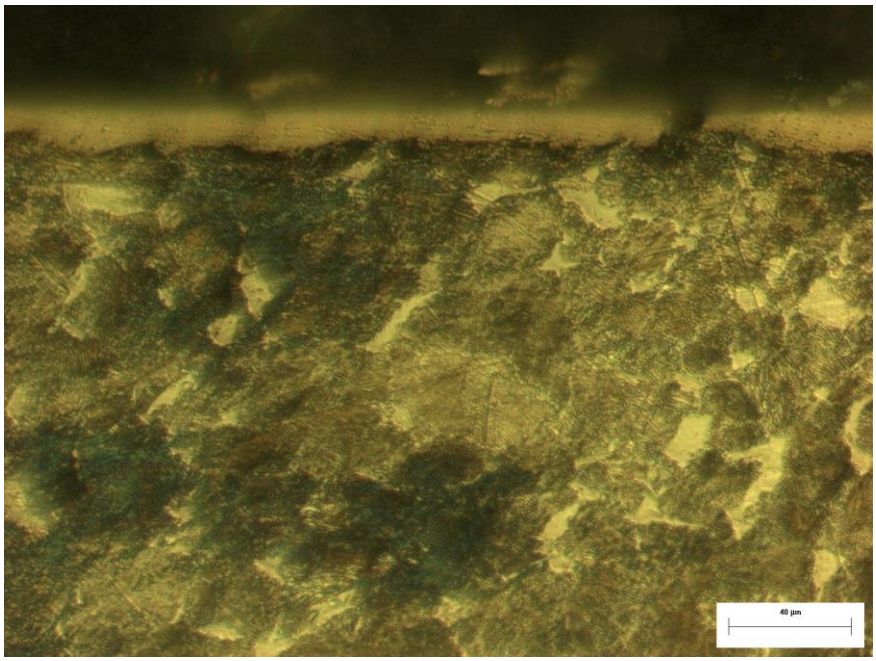
Şekil F.39: 4140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 800x



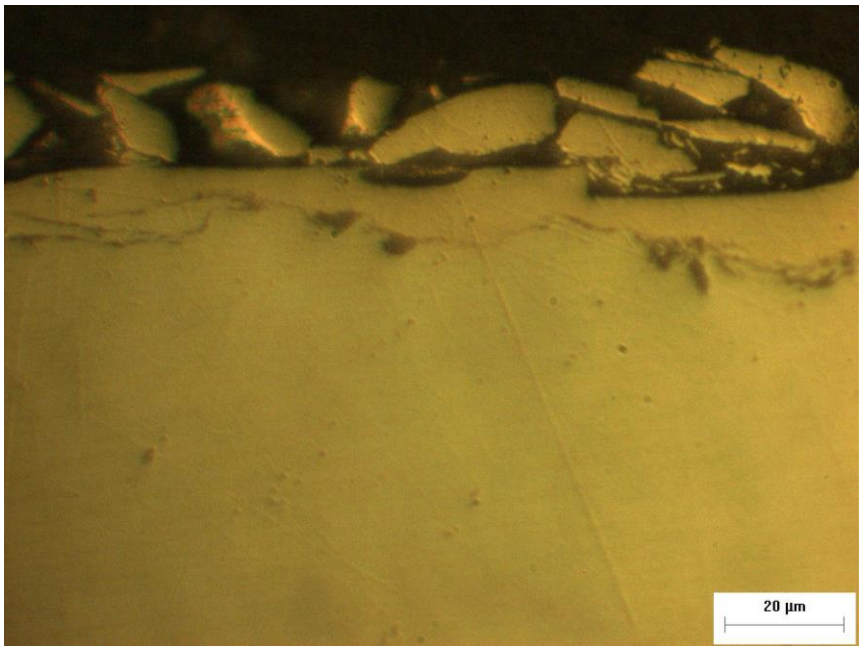
Şekil F.40: 4140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x



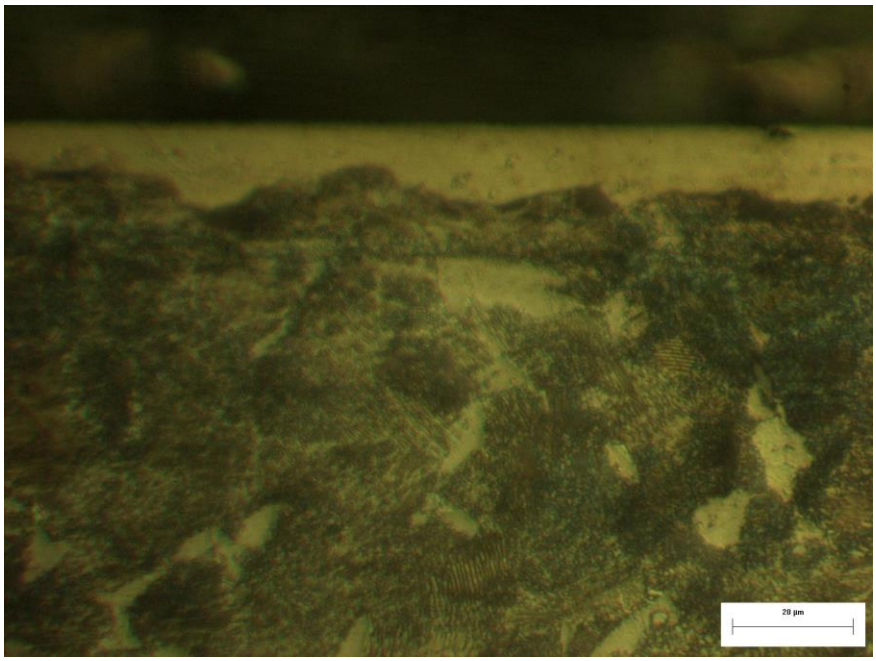
Şekil F.41: 5140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış) 400x (Ortalama Akımsız Nikel Kaplama Kalınlığı: 13,28 µm)



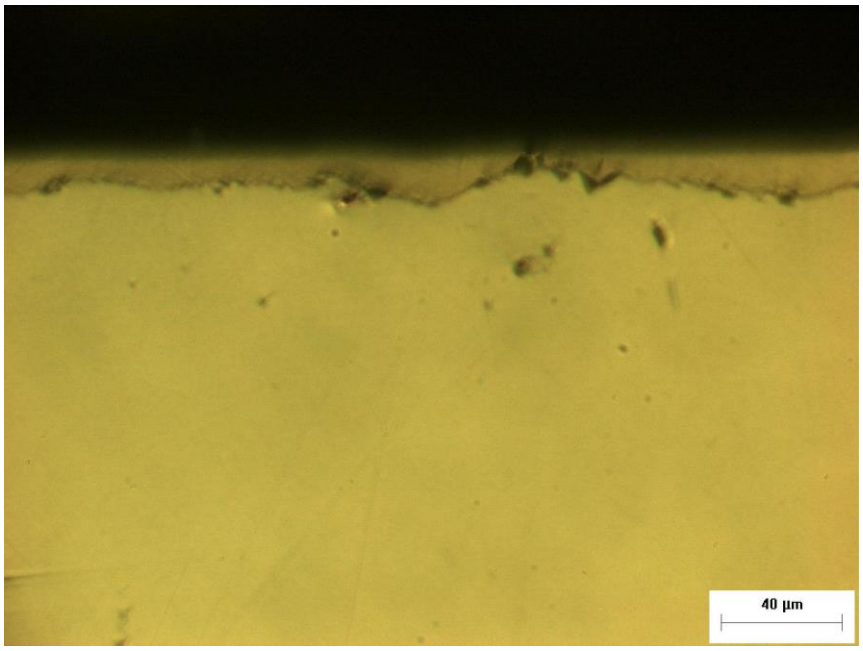
Şekil F.42: 5140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x



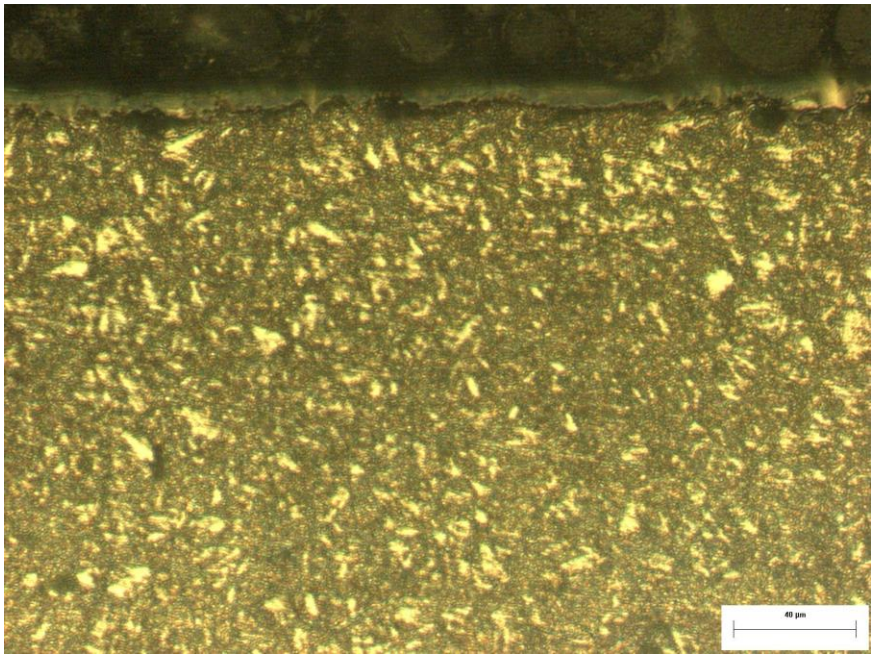
Şekil F.43: 5140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 800x



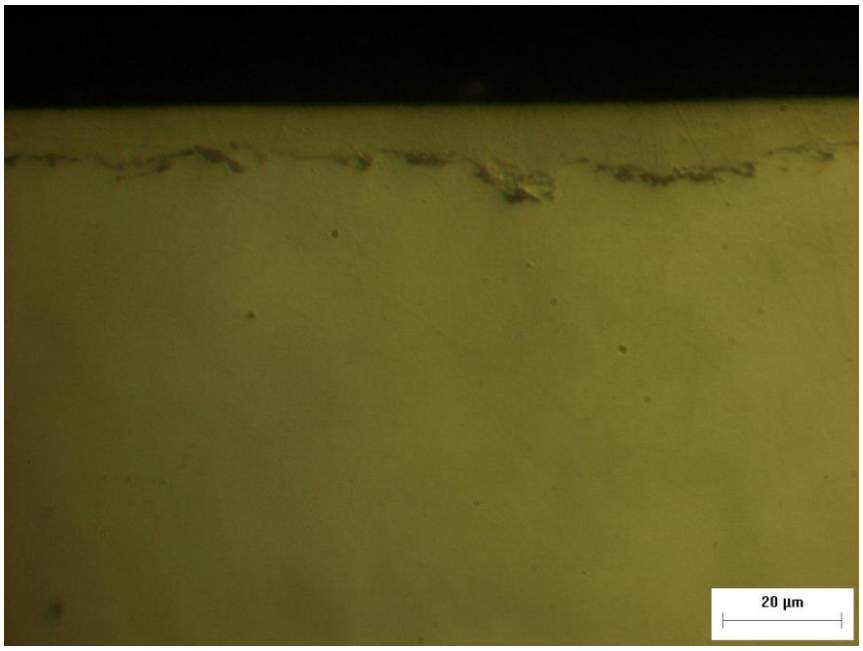
Şekil F.44: 5140 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x



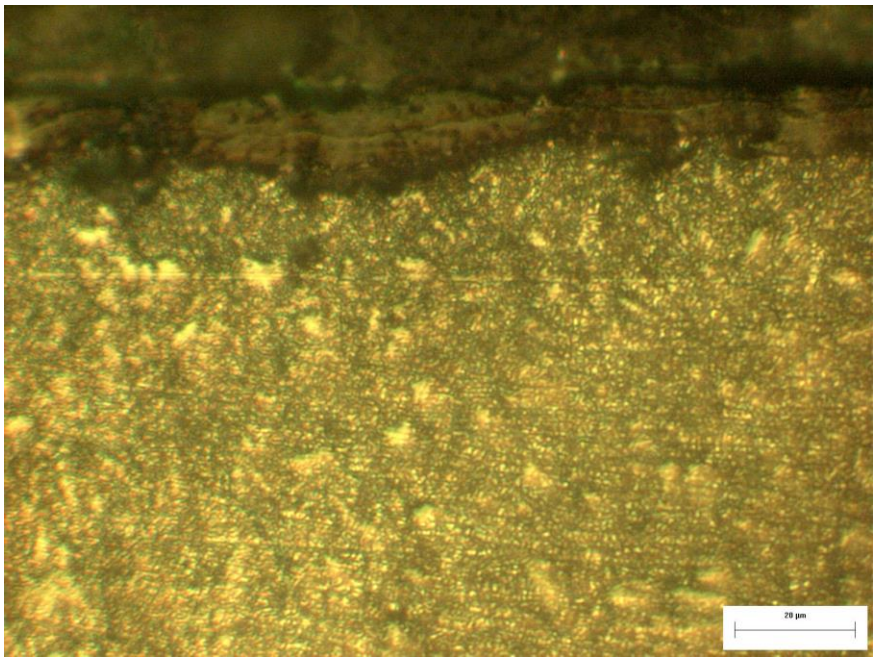
Şekil F.45: AISI 420 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 400x (Ortalama Akımsız Nikel Kaplama Kalınlığı: 9,38 µm)



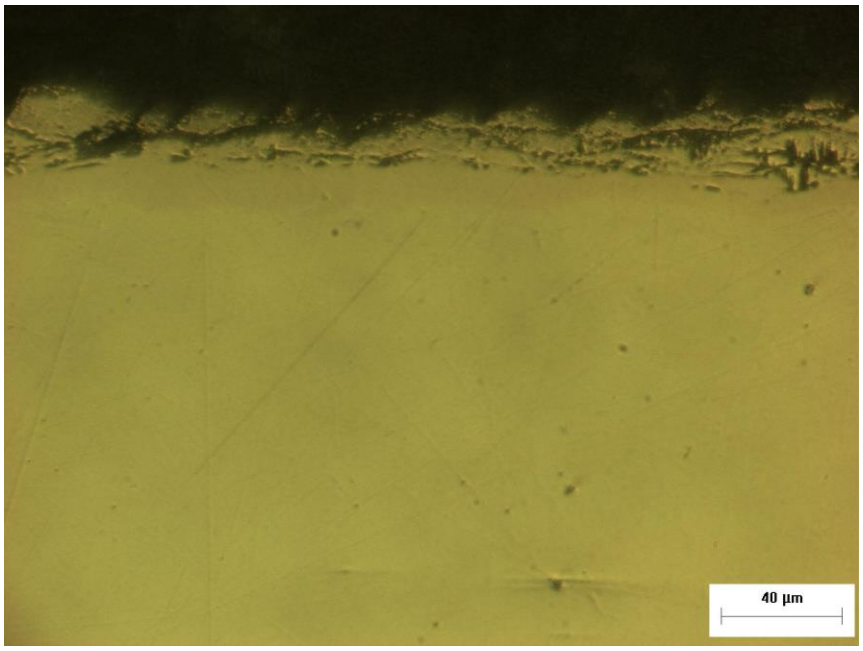
Şekil F.46: AISI 420 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 400x



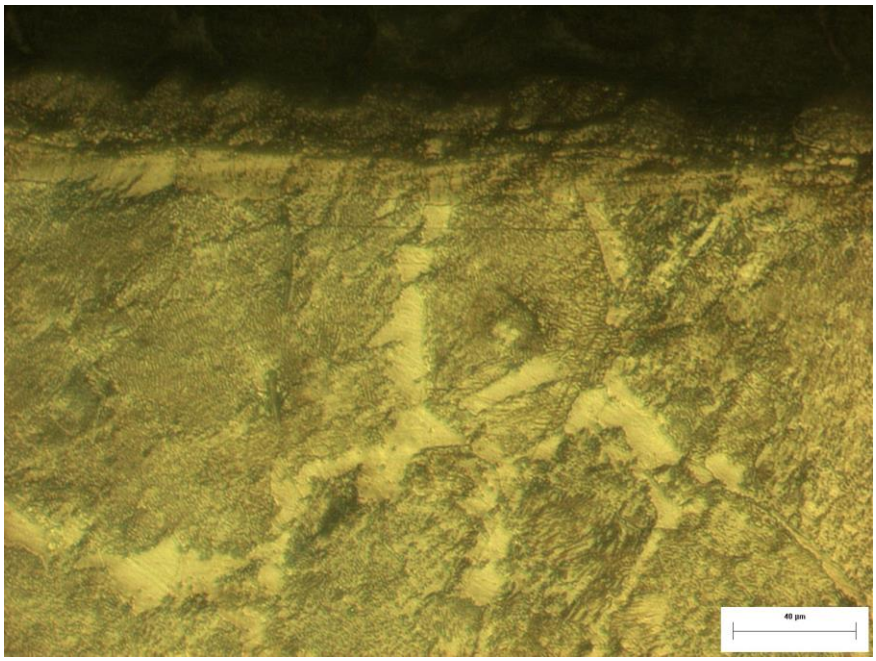
Şekil F.47: AISI 420 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)- 800x



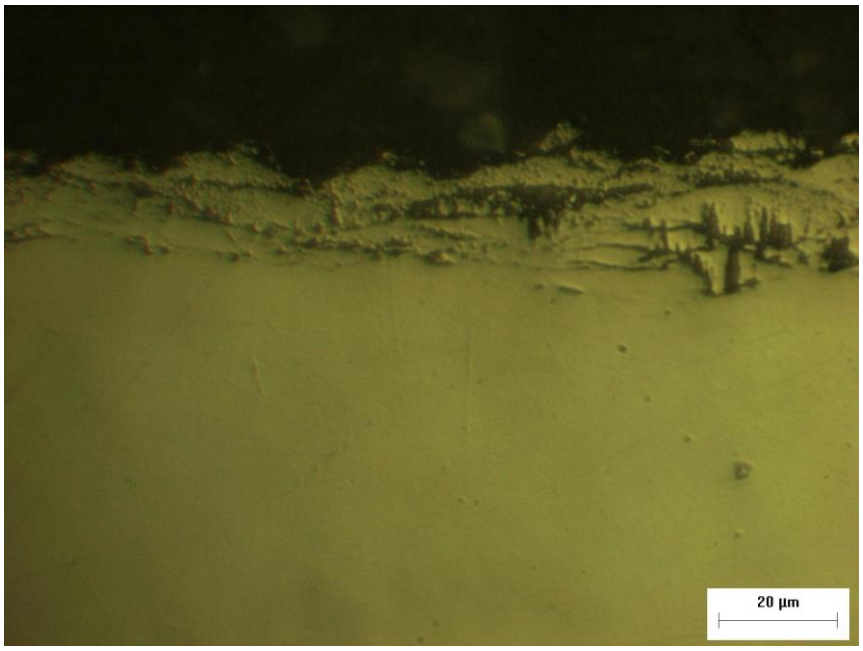
Şekil F.48: AISI 420 akımsız nikel kaplı deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)- 800x



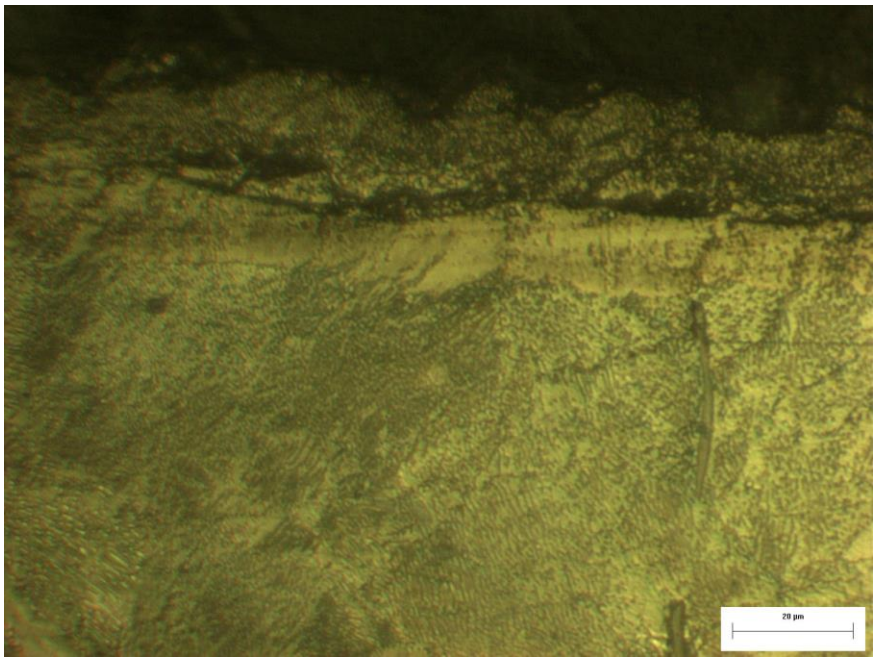
Şekil F.49: 1040 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-400x (Ortalama Nitrokarbürlenmiş Kaplama Kalınlığı: 18,83 µm)



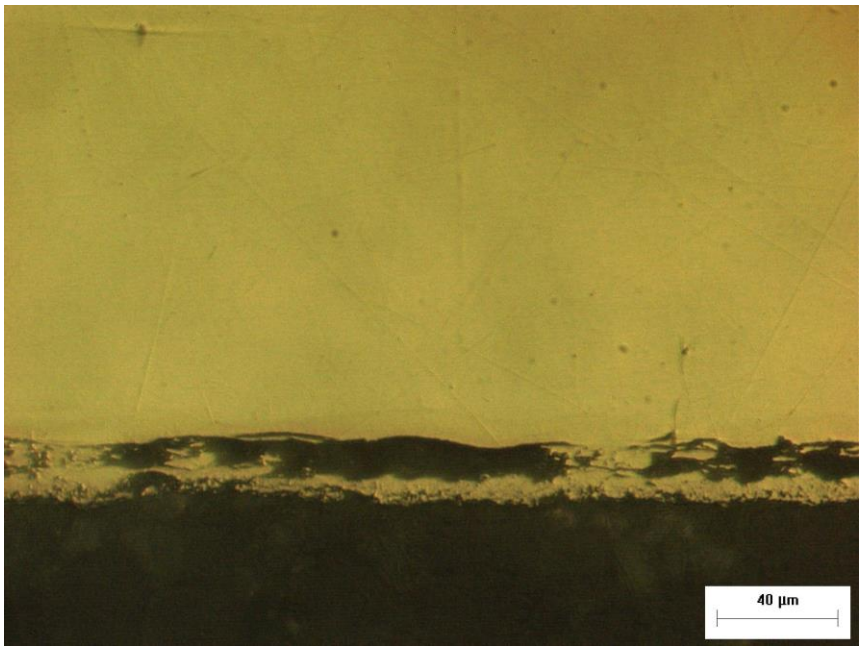
Şekil F.50: 1040 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-400x



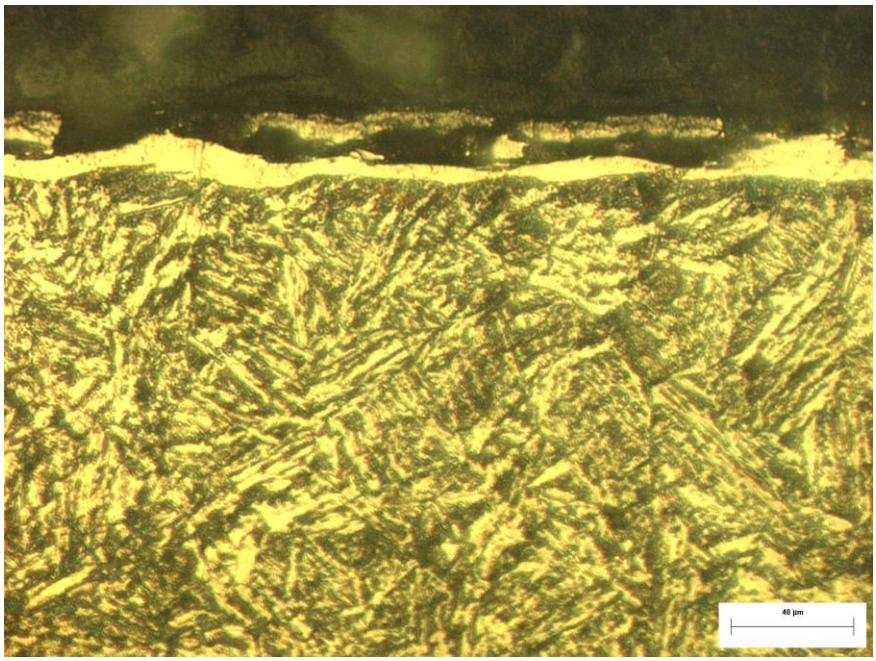
Şekil F.51: 1040 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-800x



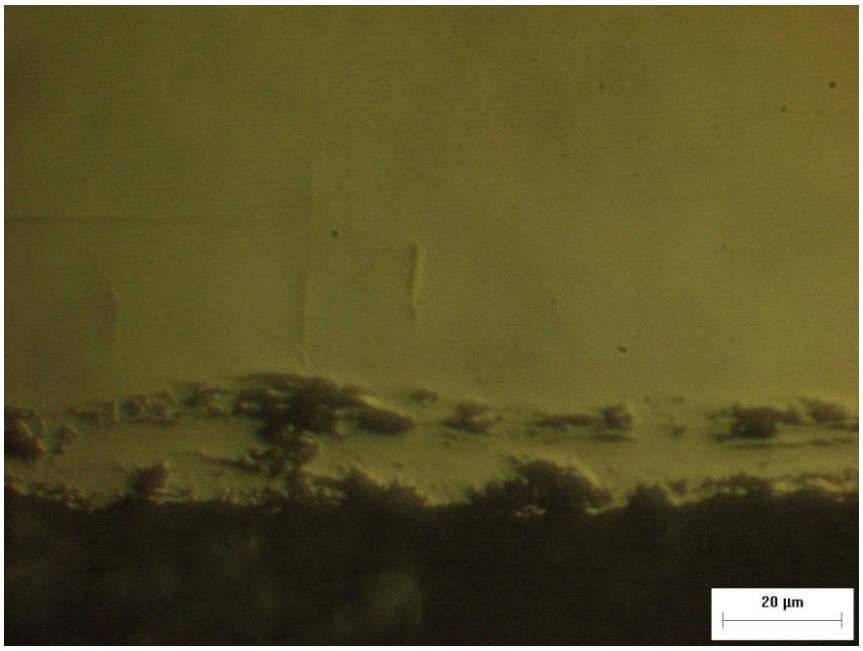
Şekil F.52: 1040 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-800x



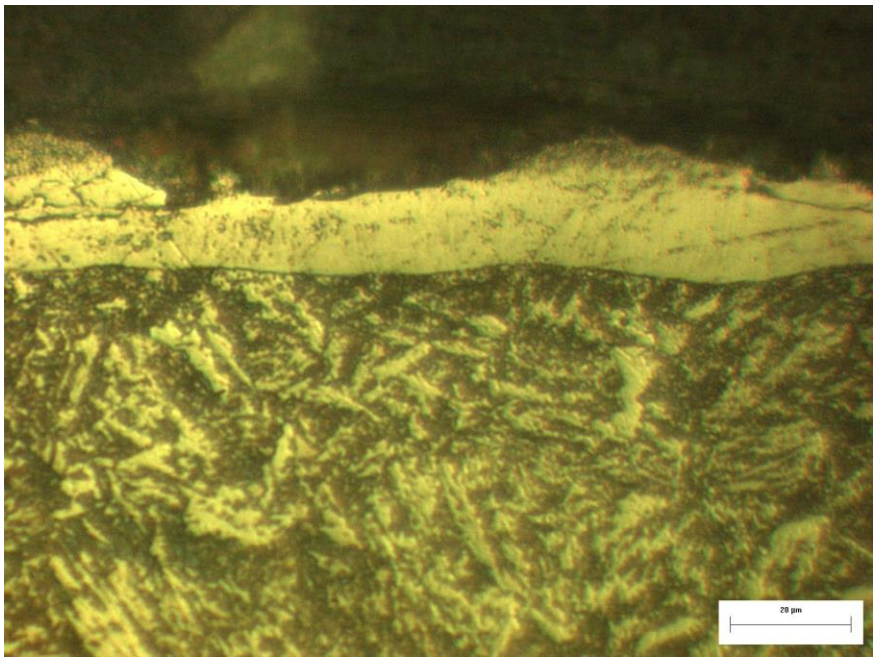
Şekil F.53: 4140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-400x (Ortalama Nitrokarbürlenmiş Kaplama Kalınlığı: 18,56 µm)



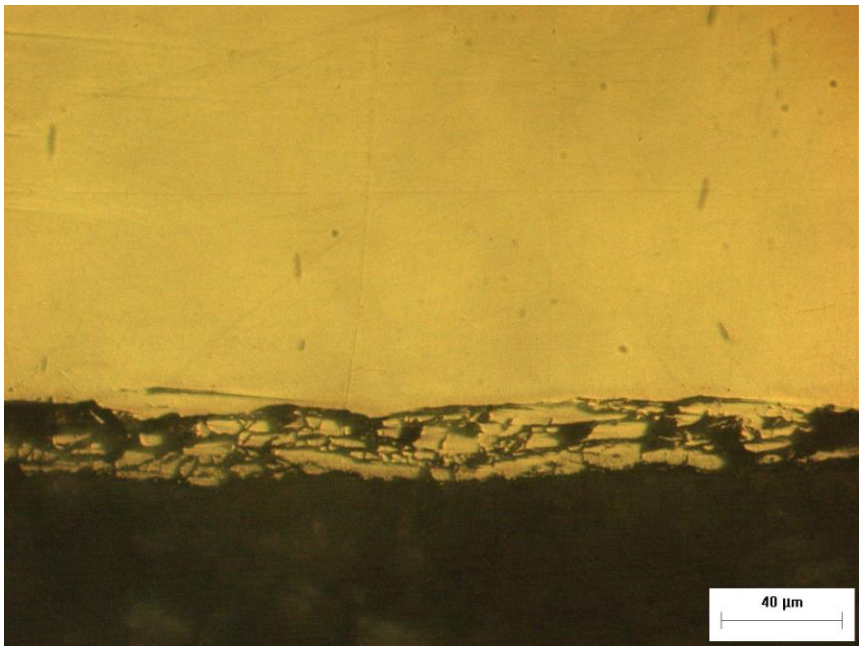
Şekil F.54: 4140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-400x



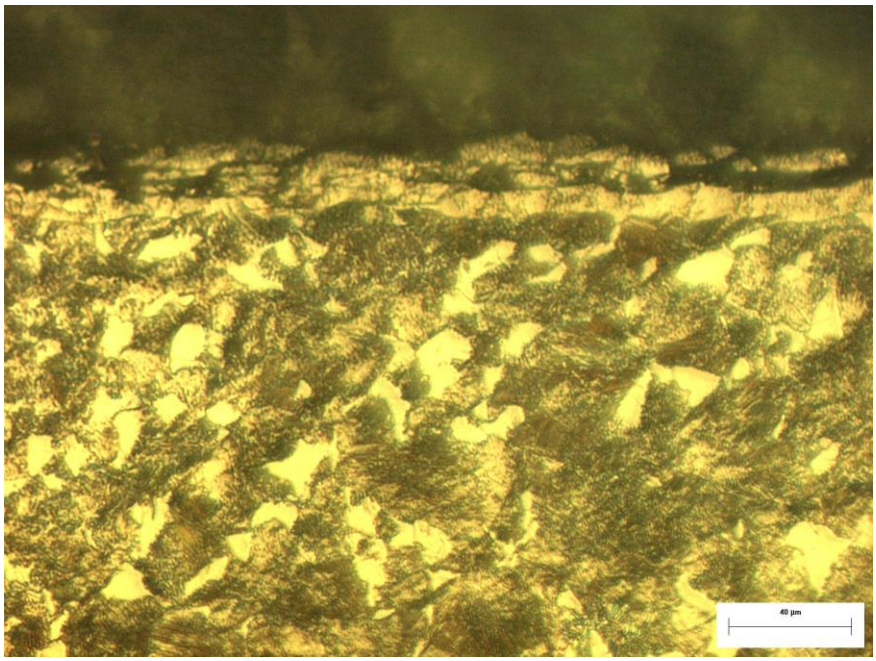
Şekil F.55: 4140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-800x



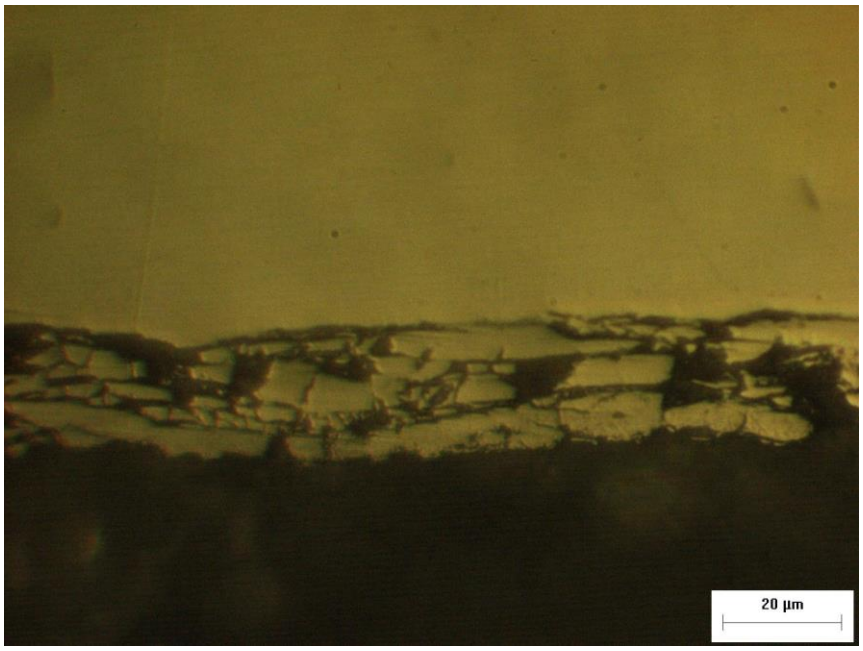
Şekil F.56: 4140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-800x



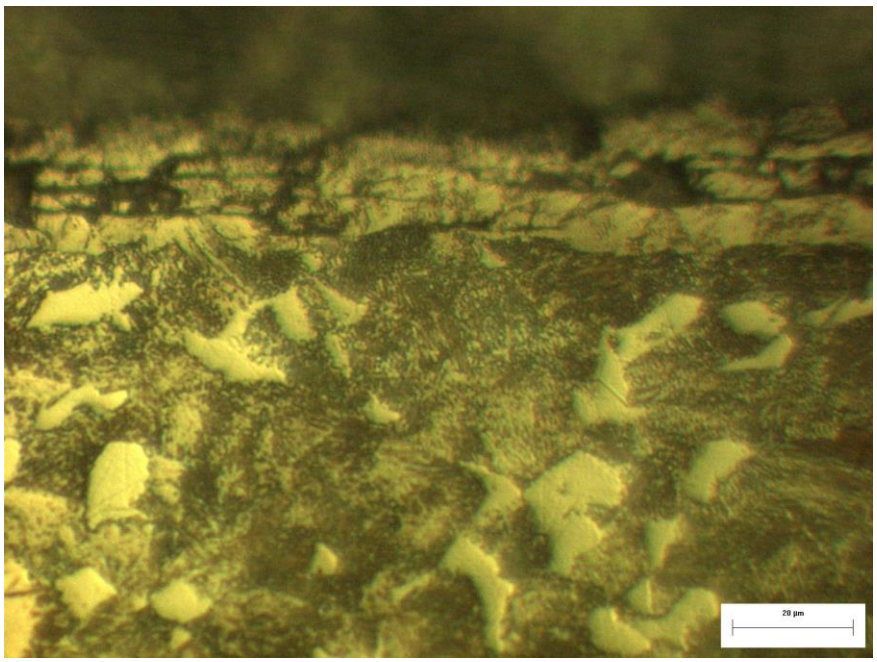
Şekil F.57: 5140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-400x (Ortalama Nitrokarbürlenmiş Kaplama Kalınlığı: 12,79 µm)



Şekil F.58: 5140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-400x



Şekil F.59: 5140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (parlatılmış)-800x



Şekil F.60: 5140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi kesit görüntüsü (dağlanmış)-800x

Ek G. DENEY NUMUNELERİ KİMYASAL BİLEŞİM ve MEKANİK ÖZELLİKLERİ

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

Kategori	Karbon Çeliği		
Kompozisyon	Elemet	Ağırlık (%)	
	C	0.37- 0.44	
	Mn	0.60- 0.90	
	P	0.04 (max)	
	Si	0.05 (max)	
Mekanik Özellikler (25 ^{o}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 G.2: 4140 Deney Numunesi Bileşim ve Mekanik Özellikleri

Kategori	Alaşımlı Çelik		
Genel Tanımı	Krom- molibden Çeliği		
Kompozisyon	Elemet	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 ^{o}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 G.3: 5140 Deney Numunesi Mekanik Özellikleri

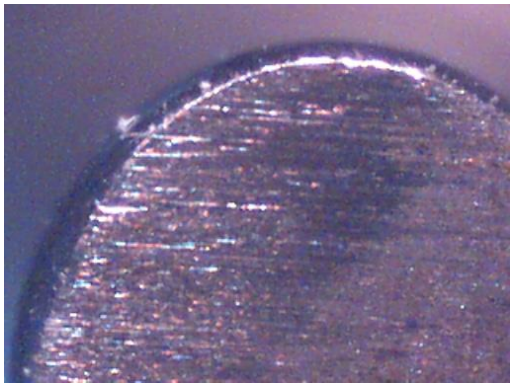
Kategori	Alaşımlı Çelik		
Genel Tanımı	Krom Çeliği		
Kompozisyon	Elemet	Ağırlık (%)	
	C	0.38- 0.43	
	Mn	0.70- 0.90	
	P	0.035 (max)	
	S	0.04 (max)	
	Si	0.15- 0.30	
	Cr	0.70- 0.90	
Mekanik Özellikler (25 ^{o}C)	Yoğunluk (x1000 kg/ m^3)		7.7- 8.03
	Poisson oranı		0.27- 0.30
	Elastik Modülü (GPa)		190- 210
	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 G.4: AISI 420 Deney Numunesi Mekanik Özellikleri

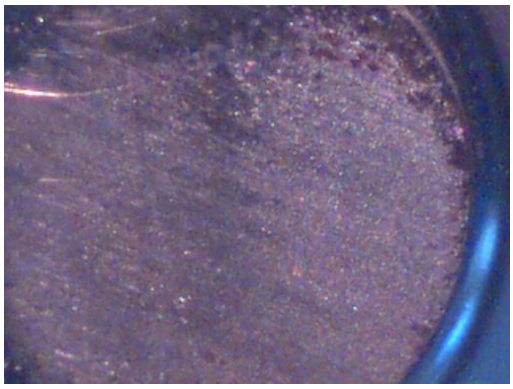
Kategori	Paslanmaz Çelik	
Genel Tanımı	Martenzitik Krom Çeliği	
Kompozisyon	Elemet	Ağırlık (%)
	C	0.15 (min)
	Mn	1.00 (max)
	P	0.04
	S	0.03
	Si	1.00 (max)
	Cr	12.0- 14.0
Mekanik Özellikler (25 ^{o}C)	Yoğunluk (x1000 kg/ m^3)	7.8
	Poisson oranı	0.27- 0.30
	Elastik Modülü (GPa)	200
	Çekme Dayanımı (MPa)	860
	Sertlik (HB)	149

Ek H. DİSK ÜSTÜNDE PİM AŞINMA DENEYLERİNDE FARKLI KAYMA MESAFELERİNDE KAYDEDİLEN YÜZEY AŞINMASI GÖRÜNTÜLERİ

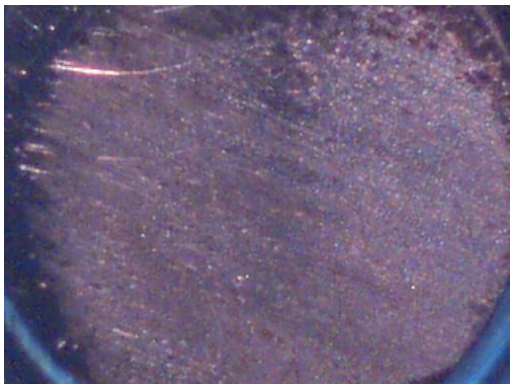
* Aşağıda gösterilen farklı yüzey işlemleri görmüş deney numunelerine ait fotoğraflar, 60x büyütmede elde edilmişlerdir.



Şekil H.1: 1040 kaplamasız deney numunesi görüntüsü- 2 km.

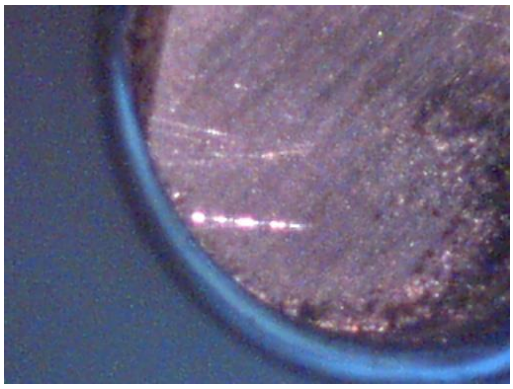


(a)

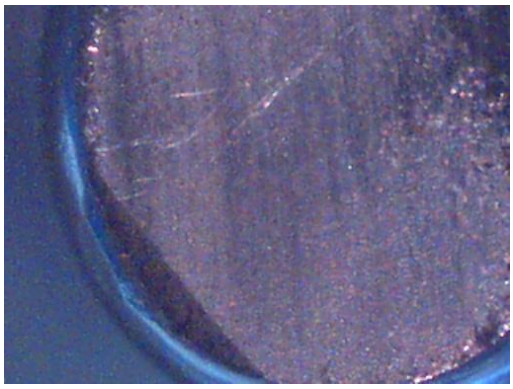


(b)

Şekil H.2: 1040 akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüsü (a) – (b) 2 km.

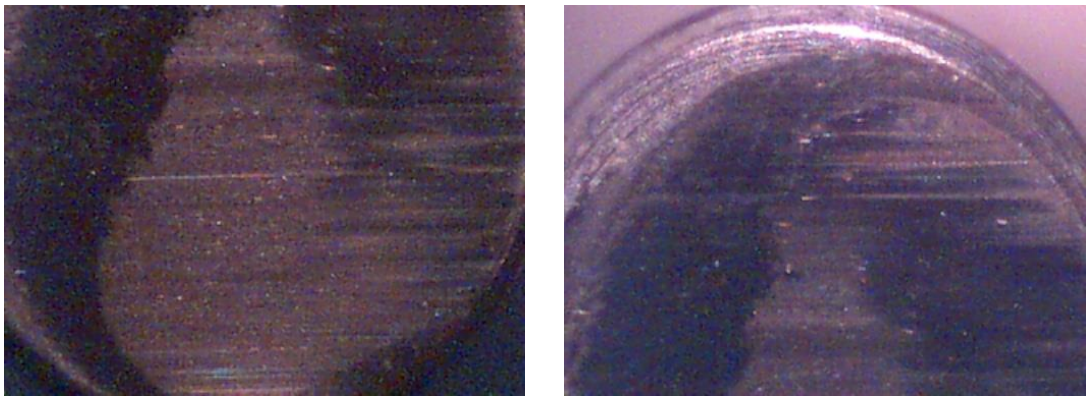


(a)

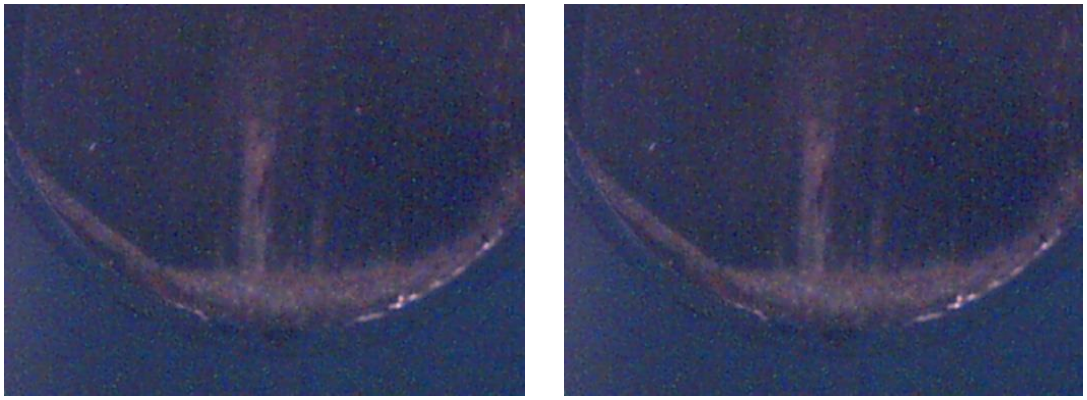


(b)

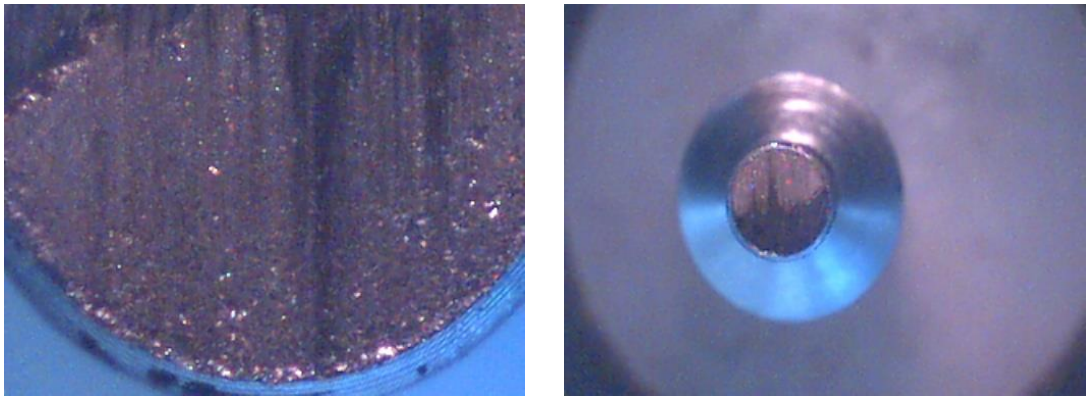
Şekil H.3: 1040 akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüsü (a) – (b) 4 km.



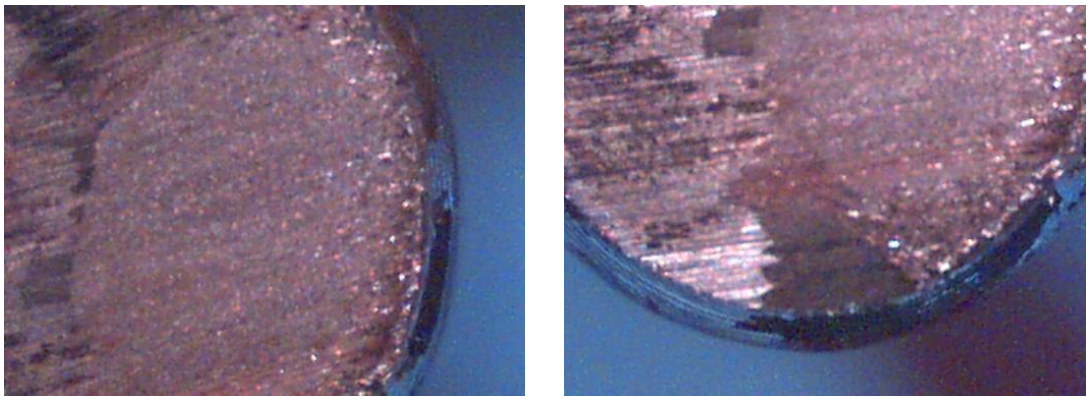
Şekil H.4: 1040 nitrokarbürlenmiş deney numunesi görüntüsü (a) – (b) 2 km.



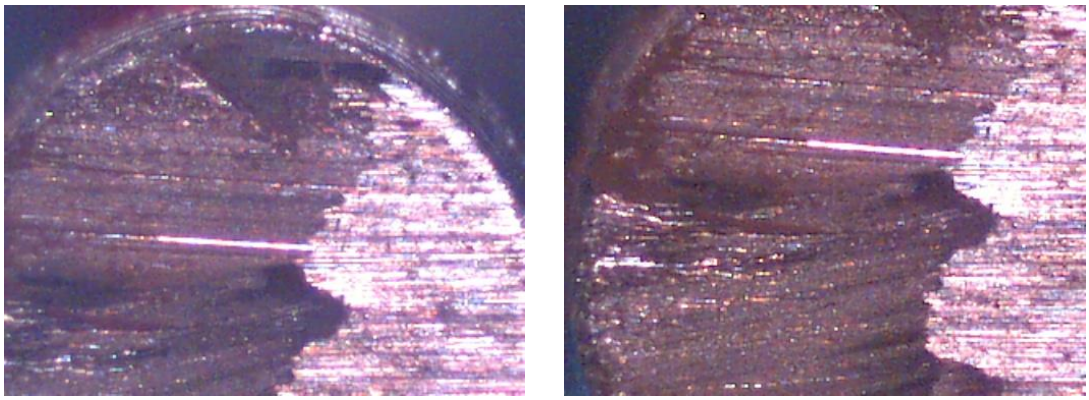
Şekil H.5: 1040 nitrokarbürlenmiş deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 4 km.



Şekil H.6: 1040 sert krom kaplı deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 2 km.



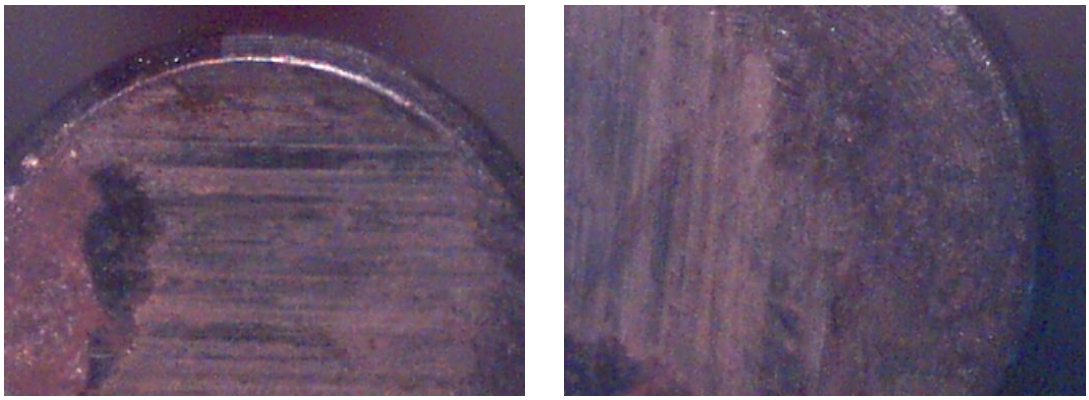
Şekil H.7: 1040 sert krom kaplı deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 4 km.



Şekil H.8: 1040 sert krom kaplı deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 6 km.

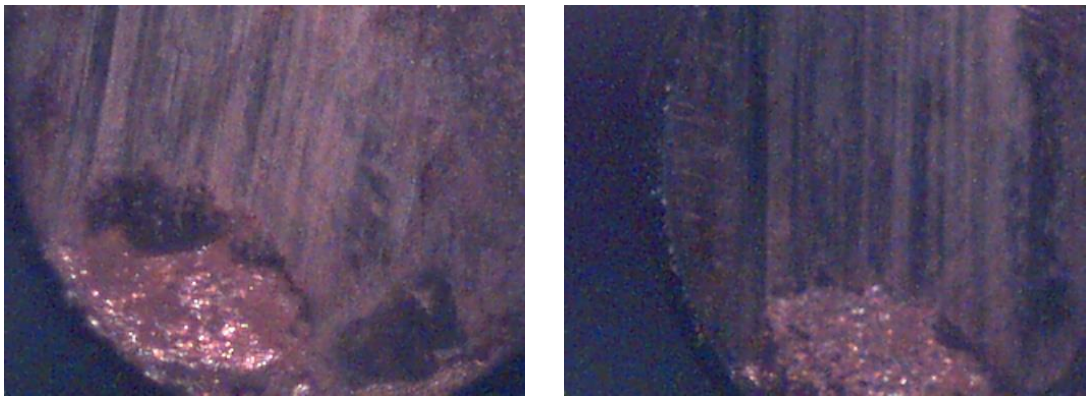


Şekil H.9: 1040 bor kaplı deney numunesi görüntüsü - 2 km.



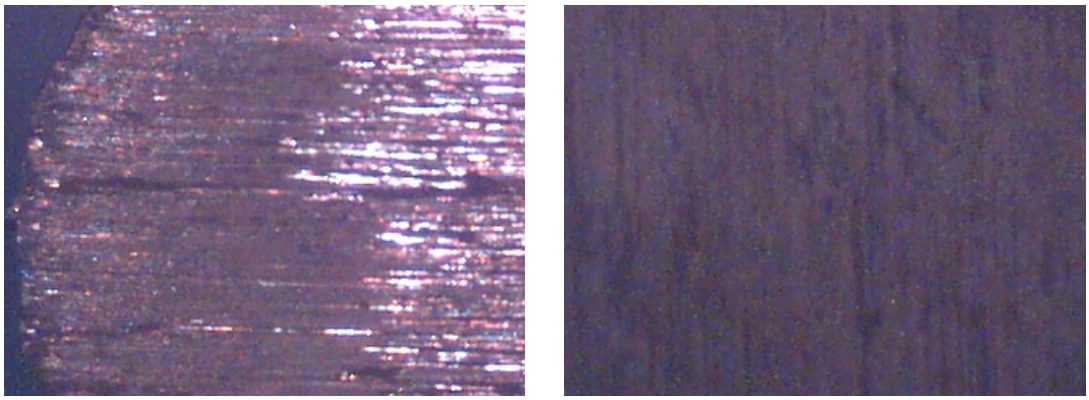
(a) (b)

Şekil H.10: 1040 bor kaplanmış deney numunesi görüntüsü (a) – (b) 4 km.



(a) (b)

Şekil H.11: 1040 bor kaplanmış deney numunesi görüntüsü (a) – (b) 6 km.



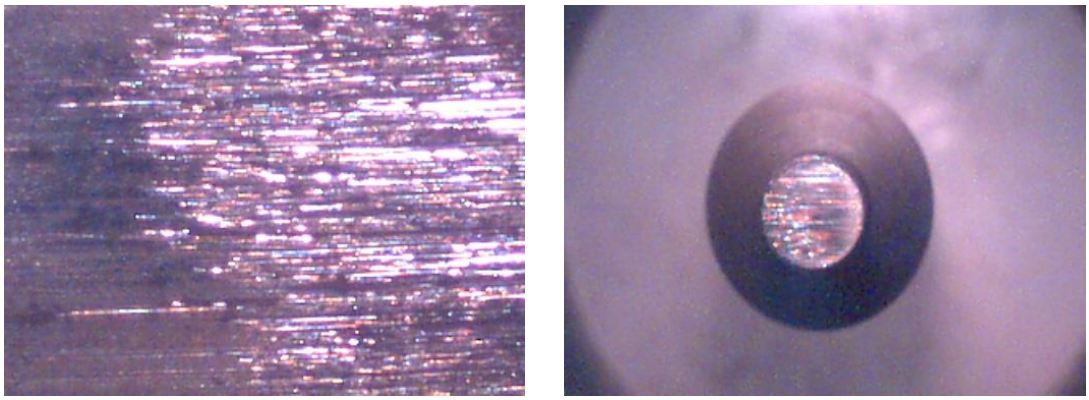
(a) (b)

Şekil H.12: 4140 kaplamasız deney numunesi görüntüsü (a) – (b) 2 km.

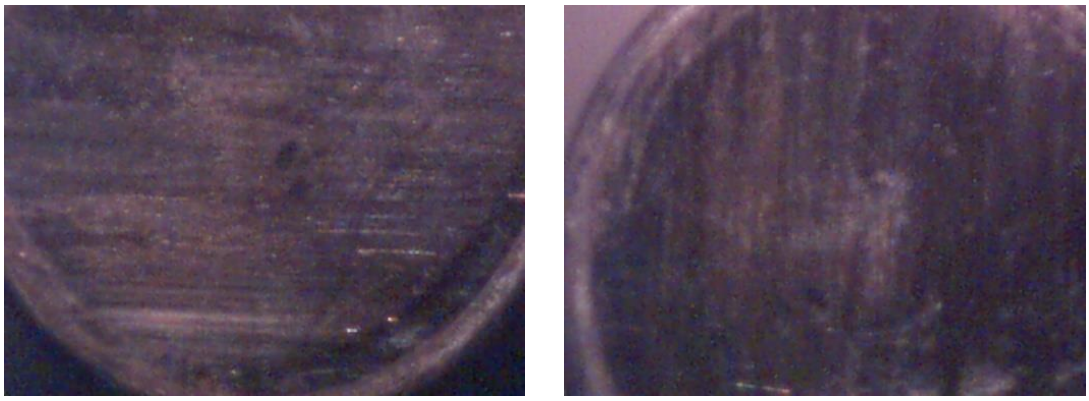


(a) (b)

Şekil H.13: 4140 kaplamasız deney numunesi görüntüsü (a) – (b) 4 km.



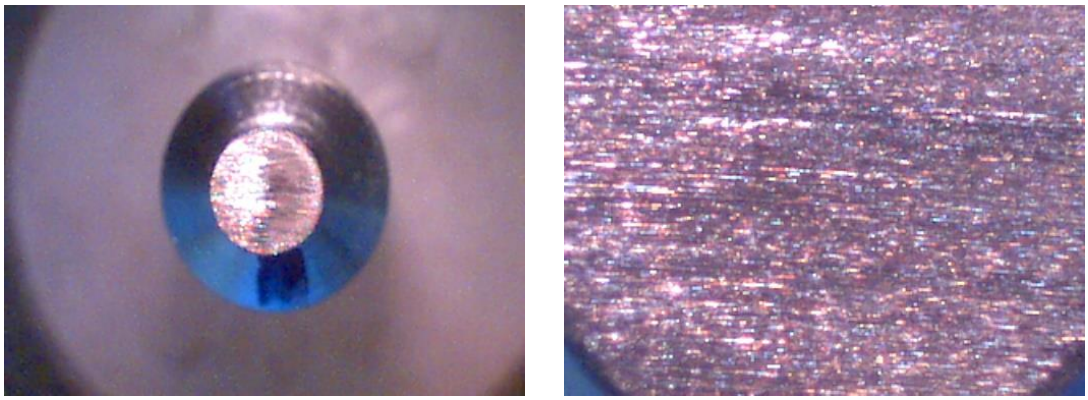
Şekil H.14: 4140 akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüsü(a) – (b) 2 km.



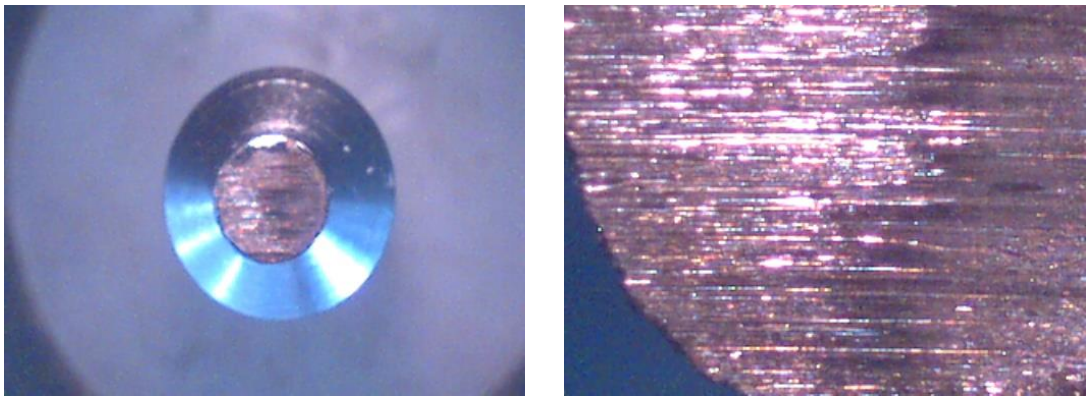
Şekil H.15: 4140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi görüntüsü (a) – (b) 2 km.



Şekil H.16: 4140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi görüntüsü (a) – (b) 4 km.



Şekil H.17: 4140 sert krom kaplı deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 2 km.



Şekil H.18: 4140 sert krom kaplı deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 4 km.

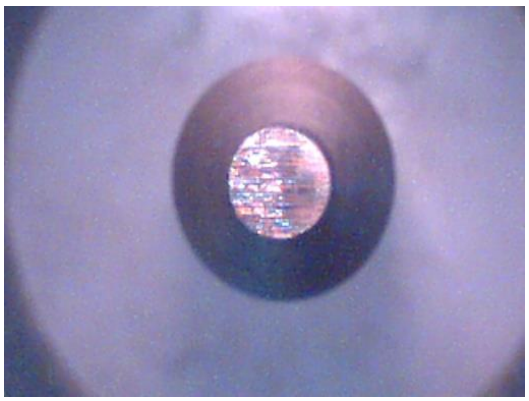


(a)

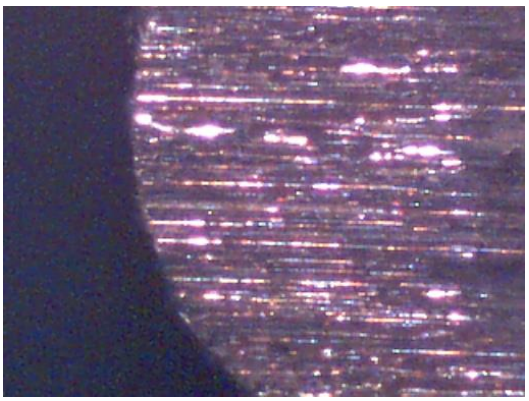


(b)

Şekil H.19: 4140 bor kaplı deney numunesi görüntüsü (a) – (b) 2 km.

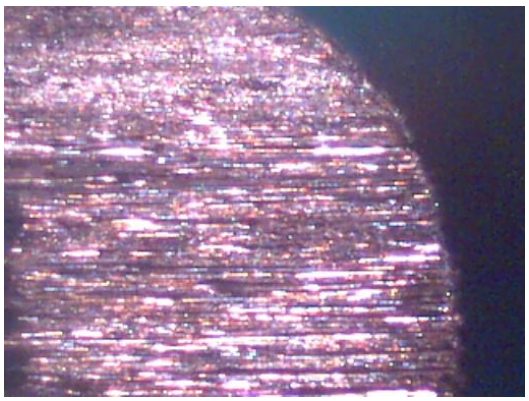


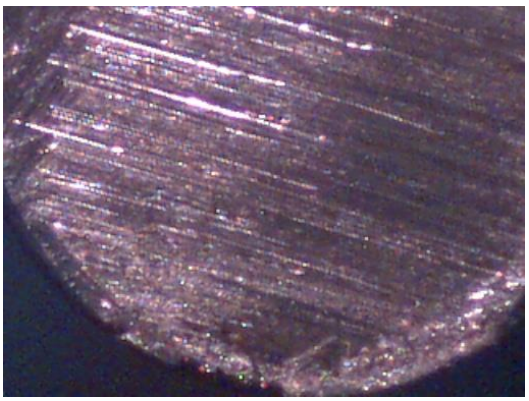
(a)



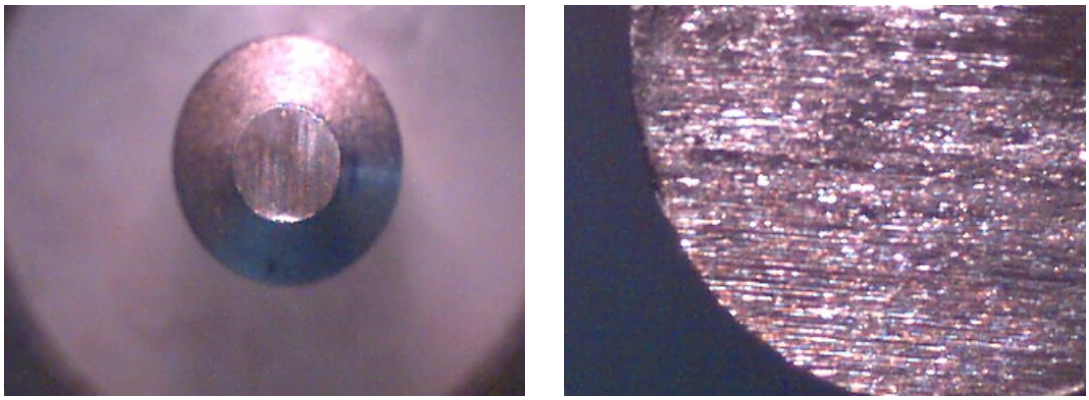
(b)

Şekil H.20: 4140 bor kaplı deney numunesi görüntüsü (a) – (b) 4 km.



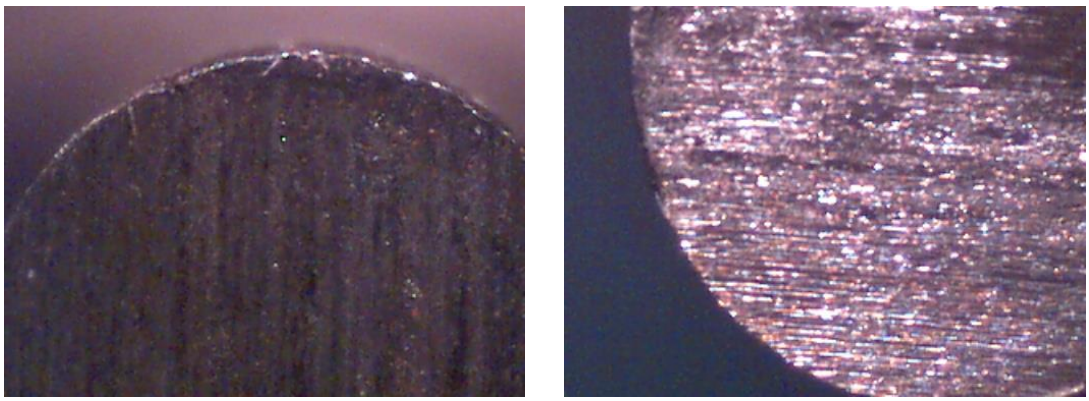


Şekil H.21: 5140 kaplamasız deney numunesi görüntüsü- (a) 2 km. (b) 4 km.



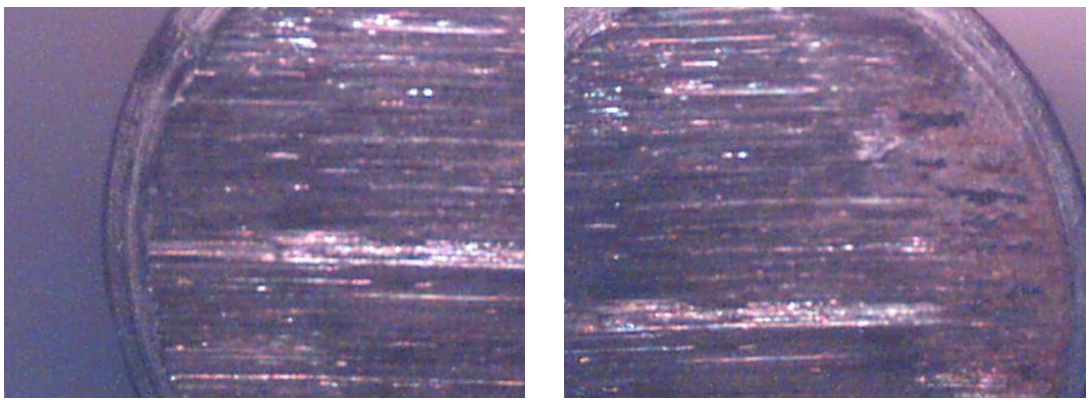
(a) (b)

Şekil H.22: 5140 akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüsü (a) - (b) 2 km.

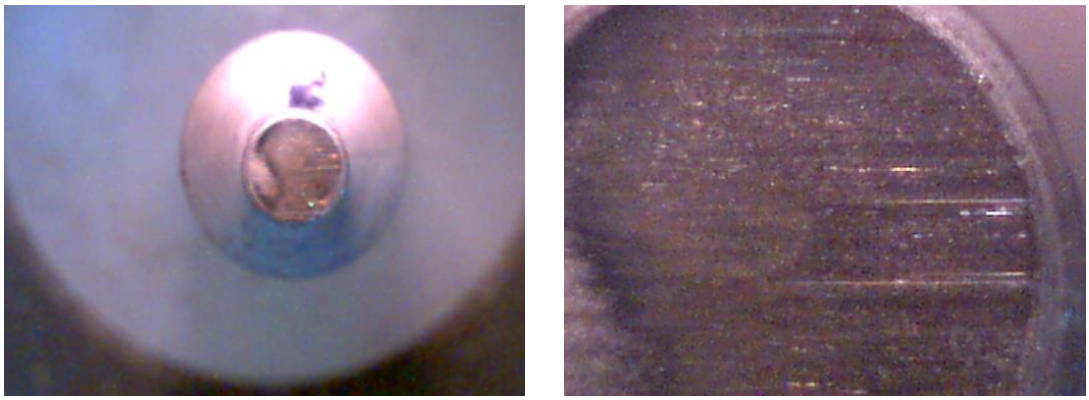


(a) (b)

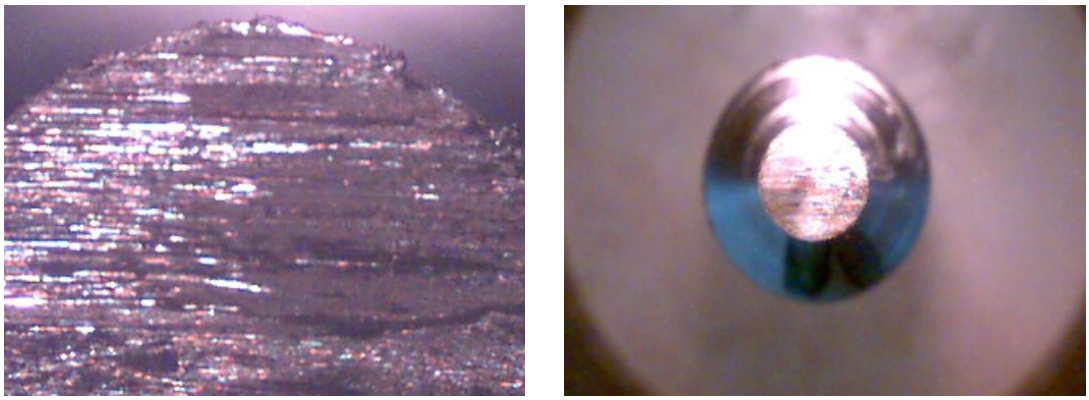
Şekil H.23: 5140 akımsız nikel kaplı deney numunesi görüntüsü (a) - (b) 4 km.



Şekil H.24: 5140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 2 km.



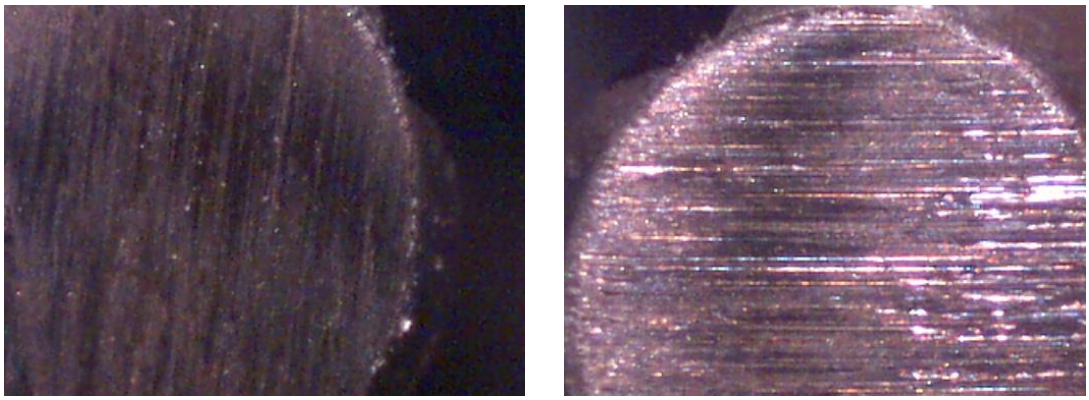
Şekil H.25: 5140 nitrokarbürlenmiş deney numunesi görüntüsü- 4 km.



Şekil H.26: 5140 sert krom kaplı deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 2 km.

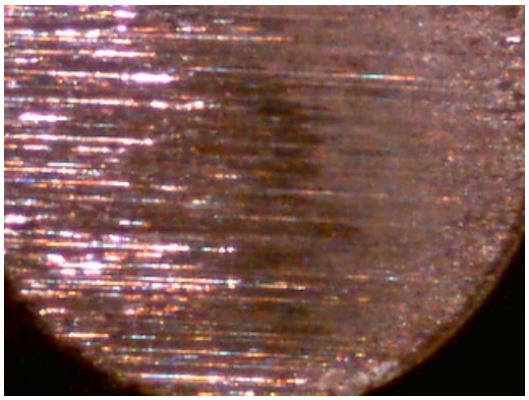


Şekil H.27: 5140 sert krom kaplı deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 4 km.

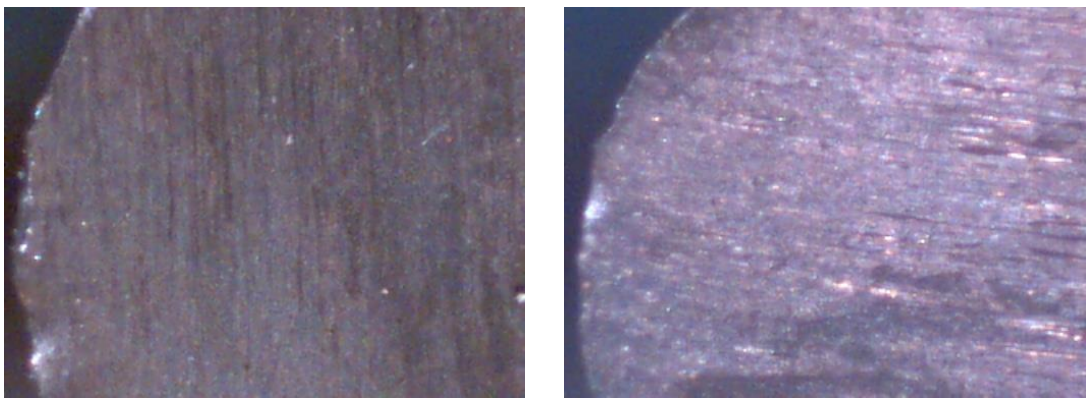


(a) (b)

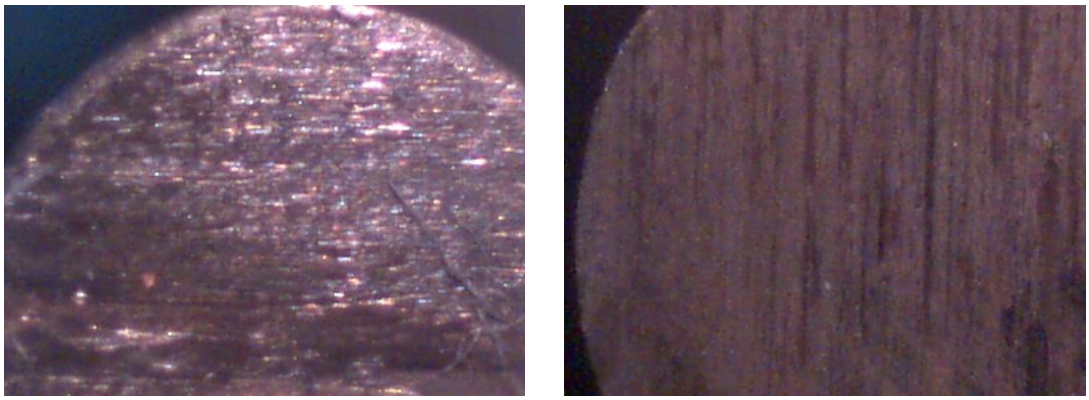
Şekil H.28: 5140 bor kaplı deney numunesi görüntüsü (a) 2 km. (b) 4 km.



Şekil H.29: 5140 bor kaplı deney numunesi görüntüsü- 6 km.

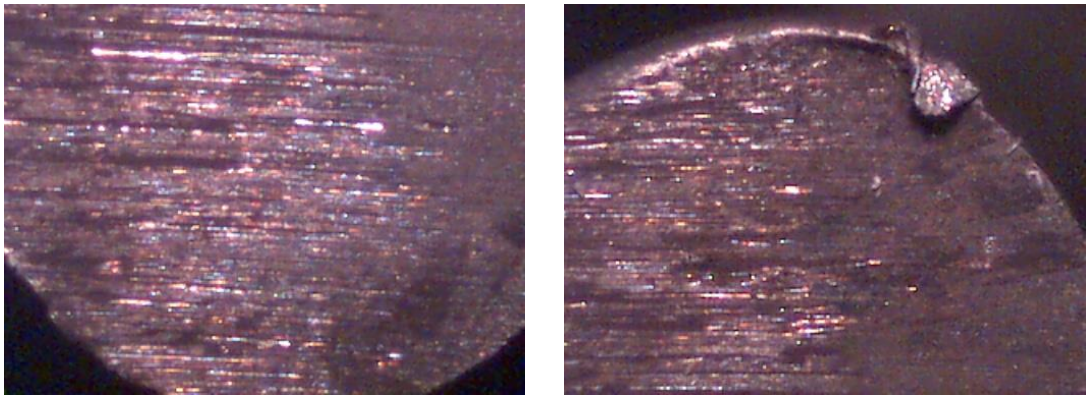


Şekil H.30: AISI 420 kaplamasız deney numunesi görüntüsü- 6 km.



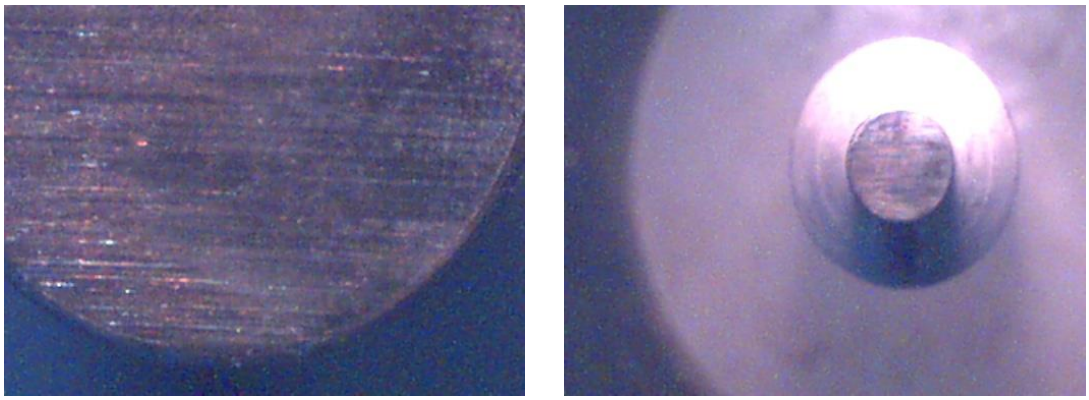
(a) (b)

Şekil H.31: AISI 420 akımsız nikel kaplanmış deney numunesi görüntüsü (a) 2 km. (b) 4 km.

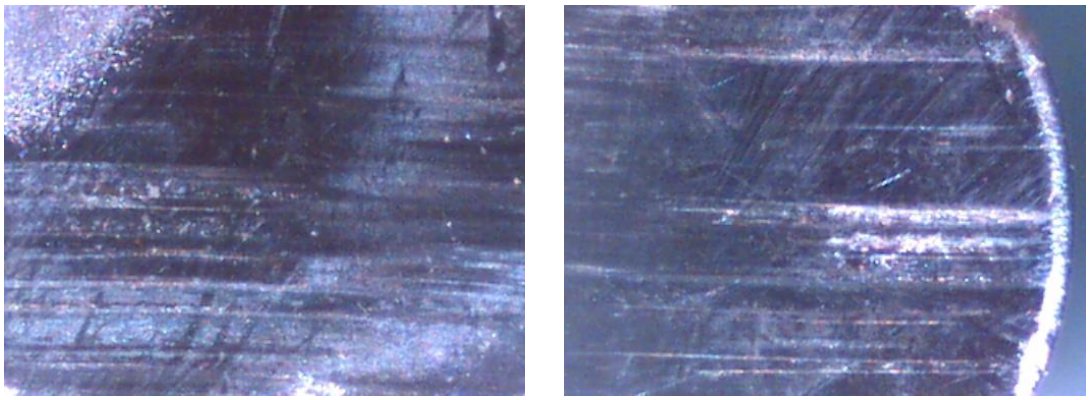


(a) (b)

Şekil H.32: AISI 420 akımsız nikel kaplanmış deney numunesi görüntüsü (a) 4 km. (b) 6 km.

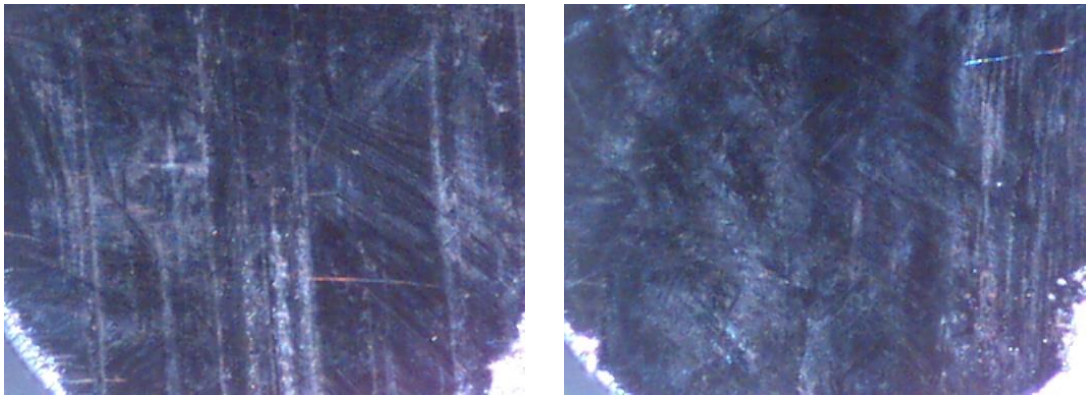


Şekil H.33: AISI 420 nitrokarbürlenmiş deney numunesi görüntüsü- 2 km.



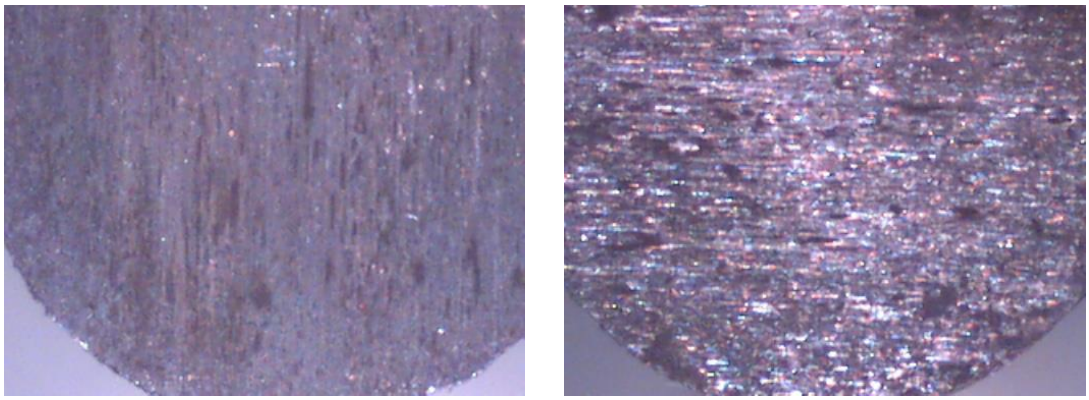
(a) (b)

Şekil H.34: AISI 420 sert krom kaplı deney numunesi görüntüsü
(a) 4 km. (b) 6 km.

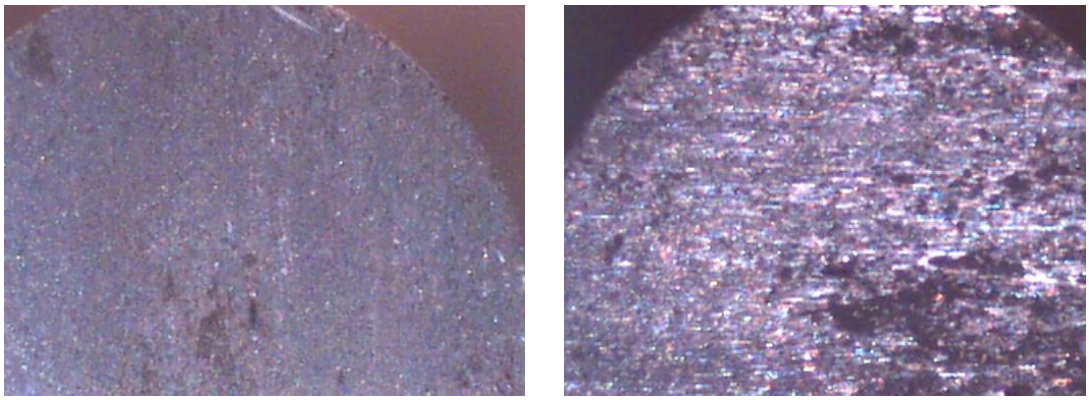


(a) (b)

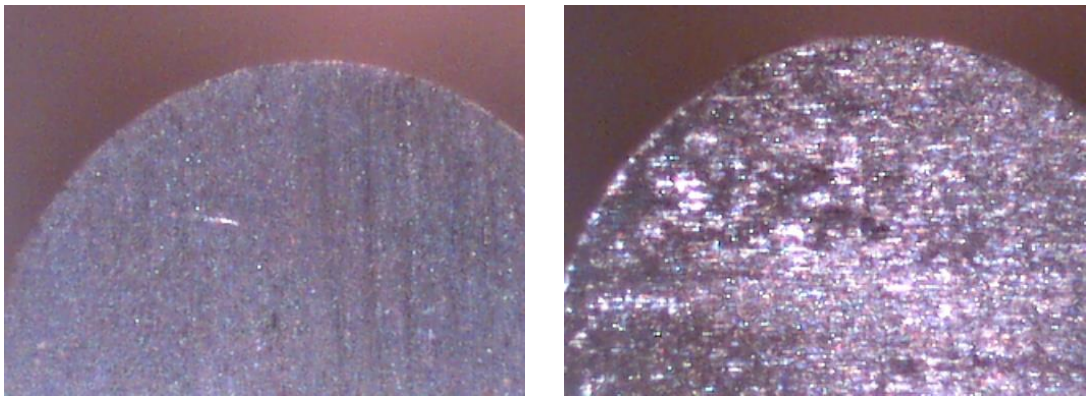
Şekil H.35: AISI 420 sert krom kaplı deney numunesi görüntüsü
(a) 4 km. (b) 6 km.



Şekil H.36: AISI 420 bor kaplı deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 2 km.



Şekil H.37: AISI 420 bor kaplı deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 4 km.



Şekil H.38: AISI 420 bor kaplı deney numunesi görüntüsü- (a) – (b) 6 km.

Ek I. CD ROM

ÖZGEÇMİŞ

1978 tarihinde İstanbul'da doğan Burak SARICA, Orta okul ve Lise eğitimini 1996 yılında İSTEK Vakfı Tarabya Kemal Atatürk Lisesi'nde tamamlamıştır. Lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Metalurji Mühendisliği Bölümü'nde 2000 yılında, İşletme Yüksek Lisansı (MBA) eğitimini ise Feyziye Mektepleri Vakfı Işık Üniversitesi'nde 2002 yılında bitirmiştir.

2000- 2001 döneminden itibaren İ.T.Ü. F.B.E.'de Malzeme Yüksek Lisans Programı'nda Yüksek Lisans, 2001- 2002 yılından itibaren ise Marmara Üniversitesi, Bankacılık ve Sigortacılık Enstitüsü, Bankacılık Bölümü'nde Doktora yapmaktadır.

2002 yılında Karbosan Zımpara Taşı San. A.Ş.'de "Satış Mühendisi" olarak başladığı iş hayatına, halen Philip Morris Sabancı Pazarlama ve Satış A.Ş.'de "Bölge Satış Müfettişi" olarak devam etmektedir.