

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KALIP ÇELİKLERİNDE AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Eda ERDEM

Ocak, 2021
İZMİR

KALIP ÇELİKLERİNDE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Eda ERDEM

Ocak, 2021

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

EDA ERDEM, tarafından **DR. ÖĞR. ÜYESİ BAHADIR UYULGAN** yönetiminde hazırlanan “**KALIP ÇELİKLERİNDE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Bahadır UYULGAN

Yönetici

Doç. Dr. Mustafa EROL

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Osman ÇULHA

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında yardım ve tecrübelerini sakınmayan değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Bahadır UYULGAN'a, lisans eğitimi de dâhil olmak üzere lisansüstü eğitimi boyunca da beni destekleyen ve yol gösteren değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Osman ÇULHA ve Sayın Doç. Dr. Hülya DURMUŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bana olan her türlü katkı ve yardımlarından dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği tüm akademik ve teknik bölüm personeline, lisansüstü eğitimim ve çalışmalarım sırasında benden desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım ve meslektaşım Yük. Müh. Kübra ÖZTÜRK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamda bana numune desteği sağlayan Standard Profil Ege Otomatik A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2019.KB.FEN.015 kodlu proje ile desteklenmiştir. Lisansüstü tez projeleri burs programıyla araştırma süresince destek sağlayan Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne, verdikleri imkan ve desteklerden ötürü teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde katkıları büyük olan, başarıları ile kendime örnek aldığım, bana maddi manevi desteklerini esirgemeyen, her konuda destek olan, sevgili ve saygıdeğer aileme bu süreçte yanımda oldukları için sonsuz teşekkür ederim.

Eda ERDEM

KALIP ÇELİKLERİNDE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZ

Bu tez çalışmasında plastik enjeksiyon kalıplarında kullanılan kalıp çeliklerinde karşılaşılan aşınma problemlerinin belirlenmesi ve kalıp malzemesi aşınmasını azaltmaya yönelik malzeme özelliklerin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Çeliklerin aşınma dirençlerini arttırmak amacıyla birçok çalışma yapılmakta ve endüstride çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler arasında ise en ekonomik ve kolay uygulanabilir yöntem olarak yüzey sertleştirme gösterilebilir. Yüzey sertleştirme metotlarından borlama yöntemi daha yüksek yüzey sertliği ve dolayısıyla daha yüksek aşınma direnci sağladığından tercih sebebi olmaya başlamıştır.

Özetle bu tez çalışması plastik enjeksiyon kalıplarında kullanılan ön sertleştirilmiş ve ısıtıl işlem uygulanmış dört farklı takım çeliğine alternatif olarak görece düşük maliyetli, yüksek işleme kabiliyetine sahip 1.2311 çeliğinin borlama işlemi ile yüksek mekanik ve kimyasal özelliklere sahip kalıp çelikleri özelliklerine getirilmesi için borlama işlemi yapılarak yüksek performans elde edilmesini kapsamaktadır. Ayrıca bu konuya paralel olarak bu çalışmaya konu olan kalıp çelikleri arasında görece düşük maliyetli C1 çeliğinin ve 1.2311 alternatif çeliğinin kaplama sonrası XRD, Optik Mikroskop, spektral analiz, sertlik testi, aşınma testi ve yüzey profili tayini (yüzey pürüzlülüğü) incelemeleri yapılmıştır. Daha sonra borlama öncesi ve sonrası malzemenin aşınma ve sertlik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Aşınma, borlama, kalıp çelikleri, mekanik özellikler, sertlik

IMPROVEMENT OF WEAR BEHAVIOR ON TOOL STEELS

ABSTRACT

In this thesis, the main purpose is to determine the wear problems that are encountered in the mold steels which are being used in the plastic injection processes by focusing on improving the material properties in order to reduce the wear of the mold material. Various studies are being conducted and several methods are applied in the industry in order to improve the wear properties of the mold steels. In these applications, surface hardening can be cited as one of the most favourable methods because of its easy implementation and economic benefits. In the field of surface hardening, boronizing has started to become a widely used method because of the fact that it provides high surface hardness and therefore higher wear resistance than carburizing and nitriding.

As summary, 1.2311 steel has relatively low cost and high processing capability. This thesis presents an alternative to four different plastic injection molds, which are prehardened and heat-treated, by using 1.2311 steel. With boronizing, 1.2311 steel can have the necessary mechanical and chemical material properties and can be used in the industry as an alternative. In addition to the scope of this thesis, coated C1 steel and 1.2311 steel, which are used in the research, have been examined and analysis for the XRD, Optical Microscope, spectral analysis, hardness test, wear test and surface profile determination (surface roughness) have been conducted. The effects of the material on abrasion and hardness properties have also been examined before and after the boronizing process.

Keywords: Abrasion, boronizing, tool steels, mechanical properties, hardness

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi

BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
-------------------------------	----------

BÖLÜM İKİ - LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
---	----------

BÖLÜM ÜÇ - KALIP ÇELİKLERİ	7
---	----------

3.1 Plastik Kalıp Çelikleri.....	7
----------------------------------	---

BÖLÜM DÖRT - KALIP ÇELİKLERİNDE KARŞILAŞILAN AŞINMA PROBLEMLERİ.....	9
---	----------

4.1 Sürtünmenin Tanımı	9
------------------------------	---

4.1.1 Kuru (yağsız) sürtünme	10
------------------------------------	----

4.1.2 Sınır (yarı sıvı) sürtünme.....	10
---------------------------------------	----

4.1.3 Sıvı (film) sürtünme	10
----------------------------------	----

4.2 Aşınmanın Tanımı	11
----------------------------	----

4.3 Aşınma Mekanizmaları	11
4.3.1 Abrazif Aşınma	12
4.3.2 Adhezif Aşınma.....	13
4.3.3 Yorulma Aşınması.....	14
4.3.4 Korozyon Aşınma	15
4.3.5 Erozyon Aşınma	16
4.4 Malzeme Aşınmasının Ölçüm Yöntemleri	17
4.1.1 Ağırlık Farkı Ölçüm Yöntemi	19
4.1.2 Kalınlık Ölçüm Yöntemi	19
4.1.3 İz Değişim Ölçüm Yöntemi	20
4.1.4 Radyo İzotop Ölçüm Yöntemi	20
4.5 Aşınmanın Önlenmesi.....	20
 BÖLÜM BEŞ - KALIP ÇELİKLERİNE UYGULANAN YÜZEY MODİFİKASYON İŞLEMLERİ.....	 21
5.1 Nitritleme	21
5.2 Nitrokarbürleme	22
5.3 Karbürleme	22
5.4 Karbonitritleme	22
5.5 Borlama	23
5.6 Borlama Yöntemleri.....	23
5.6.1 Kutu Borlama	23
5.6.2 Pasta Borlama.....	27
5.6.3 Sıvı Borlama.....	27
5.6.4 Gaz Borlama.....	27

5.6.5 Plazma Borlama	27
5.7 Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları.....	28
5.7.1 Borlama İşleminin Avantajları	28
5.7.2 Borlama İşleminin Dezavantajları.....	31
5.8 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları.....	31
5.9 Borür Tabakası Çeşitleri ve Bor Tabakası Kalınlığı.....	32
5.10 Demir – Bor Denge Diyagramı	33
5.10.1 Fe ve Fe ₂ B Fazı Özellikleri.....	34
5.11 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması.....	35
5.12 Bor Tabakasının Sertlik Özelliği	37
5.13 Bor Tabakasının Sürtünme Davranışı.....	37
5.14 Bor Tabakasının Aşınma Davranışı	37
5.15 Alaşım Elementlerinin Borlamaya ve Bor Tabakasına Etkisi	38

BÖLÜM ALTI - DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... 40

6.1 Çalışmanın Amacı.....	40
6.2 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Olan Malzemeler ve Spektral Analizleri.....	40
6.3 Deney Numunelerinin Kodlandırılması	41
6.4 Deneysel Çalışmalar ve Kullanılan Cihazlar	43
6.4.1 Optik ve Metal Mikroskop	43
6.4.2 Stereo Mikroskop	44
6.4.3 X-Işınları Difraksiyonu ve Kristal Yapı (XRD) Analiz Cihazı.....	44
6.4.4 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı.....	45
6.4.5 Mikrosertlik Test Cihazı.....	46
6.4.6 Aşınma Test Cihazı	47

6.4.7 Yüzey Profilometresi Ölçüm Cihazı	51
6.4.8 Kutu Borlama İşlemi	53
BÖLÜM YEDİ - DENEYSEL SONUÇLAR	56
7.1 Metalografik İnceleme Sonuçları.....	56
7.2 Kutu Borlama Deneyi Sonuçları	65
7.2.1 Metalografik İnceleme ve Tabaka Kalınlığı Sonuçları	65
7.2.3 Bor Kaplamanın Sertlik Ölçüm Sonuçları	68
7.2.4 Bor Kaplamanın X-Işınları Difraksiyonu ve (XRD) Sonuçları	69
7.3 Aşınan Yüzeylerin İncelenmesi	71
7.4 Yüzey Kalitesi ve Sertlik Sonuçları.....	78
7.5 Aşınma Deneyi Sonuçları	85
7.5.1 Hassas Terazî ile Ölçülen Aşınma Kayıpları	93
7.5.2 Yüzey Profilometre Sonuçları.....	94
7.5.3 Aşınma Kayıplarının Karşılaştırılması.....	99
BÖLÜM SEKİZ - GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR.....	101
BÖLÜM DOKUZ - SONUÇLAR	103
KAYNAKLAR	106

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4.1 DIN 50320 normuna göre tribolojik sistemin şematik gösterimi	9
Şekil 4.2 Kuru sürtünme modeli şematik gösterimi.....	10
Şekil 4.3 Endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan aşınma mekanizmalarının oransal gösterimi	12
Şekil 4.4 Abrasif aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi.....	12
Şekil 4.5 Temas türüne göre abrasif aşınmanın şematik gösterimi.....	13
Şekil 4.6 Adhezif aşınma mekanizmasının şematik olarak gösterimi.....	14
Şekil 4.7 Yorulma aşınmasında yüzeyde çatlak oluşumu ve ilerlemesinin şematik gösterimi	15
Şekil 4.8 Korozyon aşınma mekanizmasının şematik gösterimi	16
Şekil 4.9 Erozyon aşınma mekanizmasının şematik gösterimi	17
Şekil 4.10 Aşınma deney sistemleri.....	19
Şekil 5.1 Kutu (katı) borlama işleminin şematik gösterimi	24
Şekil 5.2 Borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları.....	30
Şekil 5.3 Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları	30
Şekil 5.4 Çeliklerde difüzyon proseslerinden elde edilen sertlik aralıkları çeliklerin yüzeylerine farklı difüzyon prosesleri sonucunda elde edilen değişik kaplamaların sertlik değer aralıkları	31
Şekil 5.5 Borür tabakası çeşitleri	32
Şekil 5.6 Borür tabakası kalınlığının hesaplanması	33
Şekil 5.7 Demir-bor denge diyagramı.....	34
Şekil 5.8 Tek ve iki fazlı borür tabakalarının şematik görünüşü	35
Şekil 5.9 FeB ve Fe ₂ B tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi	36
Şekil 5.10 Borür tabakasına alaşım elementleri etkisi	39
Şekil 6.1 Aşınma deney numunelerinin teknik resimleri	41
Şekil 6.2 Metalografik inceleme için kullanılan optik mikroskop.....	43

Şekil 6.3 Aşınma deneyi öncesi ve sonrası yüzey görüntüleri için kullanılan stereo mikroskop	44
Şekil 6.4 X-Işınları difraksiyonu ve kristal yapı (XRD) analiz cihazı	45
Şekil 6.5 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	46
Şekil 6.6 Sertlik ölçümlerinin alındığı mikrosertlik cihazı	47
Şekil 6.7 Deney malzemelerinin ağırlık ölçümünde kullanılan hassas terazi	49
Şekil 6.8 Aşınma deneyi için kullanılan yağ.....	49
Şekil 6.9 Aşınma deneyinde kullanılan aşınma cihazı.....	50
Şekil 6.10 Çelik plaka ve aşındırıcı uçların aşınma deney cihazına yerleştirilmesi	51
Şekil 6.11 Yüzey profilometre cihazı.....	52
Şekil 6.12 Çelik plakaların yüzey profilometre cihazında ölçümlerinin yapılması	52
Şekil 6.13 Borlama işleminde kullanılan borlama fırını	53
Şekil 6.14 Borlama işleminde kullanılan borlama kutusu	54
Şekil 6.15 Borlama işleminde kullanılacak kalıp çeliklerinin paslanmaz çelik kutuya yerleştirilmesi	55
Şekil 6.16 Numunelerin borlama işlemi için kutu fırına yerleştirilmesi.....	55
Şekil 7.1 I kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye %2 nital dağlanmış metal mikroskop görüntüsü	56
Şekil 7.2 I kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye %2 nital dağlanmış optik mikroskop görüntüsü	56
Şekil 7.3 I kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 1 dakika %2 nital dağlanmış metal mikroskop görüntüsü	57
Şekil 7.4 I kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 1 dakika %2 nital dağlanmış optik mikroskop görüntüsü	57
Şekil 7.5 N kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye % 2 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü	58
Şekil 7.6 N kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye % 2 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü.....	58
Şekil 7.7 N kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 1 dakika %2 nital dağlanmış metal mikroskop görüntüsü	59
Şekil 7.8 N kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 1 dakika %2 nital dağlanmış optik mikroskop görüntüsü	59

Şekil 7.9 R kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye %2 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü	60
Şekil 7.10 R kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye % 2 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü	60
Şekil 7.11 R kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 2 dakika % 3 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü	61
Şekil 7.12 R kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 2 dakika % 3 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü	61
Şekil 7.13 C kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye % 2 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü	62
Şekil 7.14 C kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye % 2 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü	62
Şekil 7.15 C kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 3 dakika % 3 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü	63
Şekil 7.16 C kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 3 dakika % 3 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü	63
Şekil 7.17 2311-1 kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye %2 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü	64
Şekil 7.18 2311-1 kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye %2 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü	64
Şekil 7.19 850 °C 4 saat borlanmış C2-B kalıp çeliğinin 20x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü ve tabaka kalınlığı gösterimi	66
Şekil 7.20 850 °C 4 saat borlanmış C2-B kalıp çeliğinin 50x büyütmede alınan objektif metal mikroskop görüntüsü ve tabaka kalınlığı gösterimi	66
Şekil 7.21 850 °C 4 saat borlanmış 2311-2-B kalıp çeliğinin 20x objektif ile alınan optik mikroskop görüntüsü ve tabaka kalınlığı gösterimi	67
Şekil 7.22 Şekil. 850 °C 4 saat borlanmış 2311-2-B kalıp çeliğinin 20x objektif ile alınan optik mikroskop görüntüsü ve tabaka kalınlığı gösterimi	67
Şekil 7.23 850 °C 4 saat borlanmış 2311-2-B kalıp çeliğinin 20x objektif ile alınan optik mikroskop görüntüsü ve tabaka kalınlığı gösterimi	67
Şekil 7.24 C2-B kalıp çeliğinin borlama işlemi sonrası yüzey mesafe-sertlik ölçümü	68

Şekil 7.25 2311-2-B kalıp çeliğinin borlama işlemi sonrası yüzey mesafe-sertlik ölçümü.....	69
Şekil 7.26 850 °C 4 saat borlanmış C2-B kalıp çeliği X-ışınları difraksiyon paterni	70
Şekil 7.27 850 °C 4 saat borlanmış 2311-2-B kalıp çeliği X-ışınları difraksiyon paterni	70
Şekil 7.28 I1 kalıp çeliği aşınma deneyi öncesi yüzey görüntüsü.....	71
Şekil 7.29 I1 kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü	71
Şekil 7.30 I1 kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü	72
Şekil 7.31 N1 kalıp çeliği aşınma deneyi öncesi yüzey görüntüsü	72
Şekil 7.32 N1 kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü.....	72
Şekil 7.33 N1 kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü.....	73
Şekil 7.34 R1 kalıp çeliği aşınma deneyi öncesi yüzey görüntüsü	73
Şekil 7.35 R1 kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü.....	73
Şekil 7.36 R1 kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü	74
Şekil 7.37 C1 kalıp çeliği aşınma deneyi öncesi yüzey görüntüsü	74
Şekil 7.38 C1 kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü.....	74
Şekil 7.39 C1 kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü	75
Şekil 7.40 C2-B kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü.....	75
Şekil 7.41 C2-B kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü	75
Şekil 7.42 2311-1 kalıp çeliği aşınma deneyi öncesi yüzey görüntüsü.....	76
Şekil 7.43 2311-1 kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü	76
Şekil 7.44 2311-1 kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü	76
Şekil 7.45 2311-2-B kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü	77
Şekil 7. 46 2311-2-B kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü	77
Şekil 7.47 Borlama deneyi öncesi ve sonrası C2-B kalıp çeliğine ait yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri.....	80
Şekil 7.48 Borlama deneyi öncesi ve sonrası 2311-2-B kalıp çeliğine ait yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri	80
Şekil 7.49 Aşınma deneyi öncesi deney numunelerine ait dik yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri.....	81
Şekil 7.50 Kuru ortamda yapılan aşınma deneyi sonrası deney numunelerine ait dik yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri.....	82

Şekil 7.51 Yağlayıcı ortamda aşınma deneyi sonrası deney numunelerine ait dik yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri	83
Şekil 7.52 Ra (μm) ortalama pürüzlülük değerinin aşınma deneyi öncesi ve sonrası ölçüm değerleri.....	84
Şekil 7.53 Rz (μm) ortalama pürüzlülük değerinin aşınma deneyi öncesi ve sonrası ölçüm değerleri.....	84
Şekil 7.54 I1 kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği.....	85
Şekil 7.55 I1 kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği	85
Şekil 7.56 N1 kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği	86
Şekil 7.57 N1 kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği	86
Şekil 7.58 R1 kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği.....	87
Şekil 7.59 R1 kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği.....	87
Şekil 7.60 C1 kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği.....	88
Şekil 7.61 C1 kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği.....	88
Şekil 7.62 C2-B kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği	89
Şekil 7.63 C2-B kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği.....	89
Şekil 7.64 2311-1 kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği.....	90
Şekil 7.65 2311-1 kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği	90
Şekil 7.66 2311-2-B kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği.....	91
Şekil 7.67 2311-2-B kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği	91
Şekil 7.68 Yağsız-yaglı aşınma deneyi sırasında ölçülen sürtünme kuvveti değerleri	93
Şekil 7.69 I1 kalıp çeliği yağsız - yağlı aşınma izi profil sonucu	96
Şekil 7.70 N1 kalıp çeliği yağsız - yağlı aşınma izi profil sonucu.....	96
Şekil 7.71 R1 kalıp çeliği yağsız-yaglı aşınma izi profil sonucu.....	97
Şekil 7.72 C1 kalıp çeliği yağsız-yaglı aşınma izi profil sonucu.....	97
Şekil 7.73 C2-B kalıp çeliği yağsız-yaglı aşınma izi profil sonucu.....	98
Şekil 7.74 2311-1 kalıp çeliği yağsız-yaglı aşınma izi profil sonucu	98
Şekil 7.75 2311-2-B kalıp çeliği yağsız-yaglı aşınma izi profil sonucu	99

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1 ASTM tarafından geliştirilmiş bazı test metotları	18
Tablo 5.1 Termokimyasal borlama yöntemlerinin karşılaştırılması	26
Tablo 5.2 Yüzey kaplama işlemlerinin aşınma direnci ve sertlik özelliklerinin karşılaştırılması	29
Tablo 5.3 FeB ve Fe ₂ B fazlarının genel özellikleri.....	35
Tablo 5.4 Fe-B tabakalarının sertlikleri ve ergime noktaları	37
Tablo 5.5 Çelik malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları	37
Tablo 6.1 Çalışmada kullanılan malzemelerin spektral analiz sonuçları.....	41
Tablo 6.2 Aşınma deneylerinde kullanılacak olan plakaların kodlanması	42
Tablo 6.3 Aşınma deneylerinde kullanılacak olan aşındırıcı uçların kodlanması	42
Tablo 7.1 I kalıp çeliğinin kimyasal kompozisyonu	57
Tablo 7.2 N kalıp çeliğinin kimyasal kompozisyonu	59
Tablo 7.3 R kalıp çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	62
Tablo 7.4 C kalıp çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	64
Tablo 7.5 2311 kalıp çeliğinin kimyasal kompozisyonu	65
Tablo 7.6 N-aşındırıcı uç yüzey pürüzlülük ortalama değerleri	78
Tablo 7.7 Çelik plakaların deney öncesi yüzey pürüzlülük ortalama değerleri ve sertlik değerleri	79
Tablo 7.8 Çelik plakaların borlama deneyi sonrası yüzey pürüzlülük ortalama değerleri	79
Tablo 7.9 Çelik plakaların kuru ortamda yapılan aşınma deneyi sonrası yüzey pürüzlülük ortalama değerleri	82
Tablo 7.10 Çelik plakaların yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey pürüzlülük ortalama değerleri.....	83
Tablo 7.11 Yağsız-yaglı aşınma deneyi sırasında ölçülen sürtünme kuvveti değerleri	92
Tablo 7.12 Yağsız aşınma deneyi sonrası hesaplanan aşınma kayıpları.....	94

Tablo 7.13 Yağsız aşınma testi sonrası çelik plakaların aşınma kaybı	95
Tablo 7.14 Yağsız aşınma testi sonrası plakalarda oluşan aşınma kayıplarının karşılaştırılması	100



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde yaygın olarak kullanılan tribolojik sistemlerde aşınma olayı karşılaşılan en büyük problemlerden birisidir. (Erdem, 2006). Üretimi etkileyen önemli faktörlerden biri kalıp aşınmasıdır. Kalıp aşındıkça işleme kalitesi bozulmakta ve parçaların işleme maliyetleri de artmaktadır. Aşınma ve korozyon sebebiyle dünya genelinde her sene yüksek oranlarda malzeme kayıpları olmaktadır. Ekonomik kaybın büyük bir kısmı, makine ve ekipmanların çevresel etkilere maruz kalan mekanik parçalarında oluşan korozyon ve aşınma sebebiyle ortaya çıkmaktadır.

Gelişen teknoloji ile birlikte agresif çalışma koşulları altında makine elemanları ve parçalarında, kullanım yerlerine göre farklı tipte aşınma ve korozyona bağlı malzeme kayıpları görülmektedir (Uzun, 2002). Bu durum malzemenin boyutsal toleranslarını etkilemesinin yanında kullanım ömrünün azalmasına ve işletmelerde bakım, onarım, yedek parça değişimi, hatta kontrolsüz duruşlara dahi neden olmaktadır. Aşınma ve korozyon olaylarının malzeme yüzeyinden başladığı göz önüne bulundurulduğunda kalıp çeliklerinin tamamını pahalı malzemelerden üretmek yerine görece düşük maliyete sahip 1.2311 çeliğinin yüzeyinin tamamını kaplayarak aşınma, korozyon vb. ortam koşullarına karşı dirençli hale getirmek ise soruna ekonomik ve pratik bir yaklaşımdır. Çeliklerin aşınma dirençlerini arttırmak amacıyla birçok çalışma yapılmakta ve çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler; yüzey kaplama, yüzey sertleştirme ve kompozit malzeme üretimi gerçekleştirir. Bu yöntemler arasında ise en ekonomik ve en kolay uygulanabilir olan yöntem olarak yüzey sertleştirme gösterilebilir. Bu yöntemlerinin başında endüstriyel anlamda geniş bir uygulama alanı bulunan borlama işlemi gelir. Borlama işlemi ile karbürleme ve nitrürleme işlemine kıyasla daha fazla yüzey sertliği elde edilmektedir. Makine parçalarında yüzeyin sert ve aşınmaya dayanıklı olması istendiği durumlarda borlama işlemi tercih sebebi olmaya başlamıştır (Özcan, 2012).

Borlama işlemi sonucunda oluşan borür tabakalarının aşınma dirençlerinin oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Bu amaçla çeşitli plastik şekil verme kalıplarında, hareketli makine parçalarında geniş kullanım alanına sahiptir (Yapar, 2003). Tüm bu gelişmeler göz önünde bulundurulduğunda bu tez çalışmasının amaçları:

- Görece düşük maliyetli plastik kalıp çeliğinin (1.2311) borlama işlemi ile mekanik özelliklerinin iyileştirilerek mekanik özellikleri yüksek kalıp çeliği özelliklerine getirilmesini araştırmaktır. Bu amaçla, görece düşük maliyete sahip 1.2311 çeliğinin borlama işlemi sonrası yapısal ve morfolojik incelemeler ile malzemenin mekanik testler (sertlik, aşınma) performansının araştırılmasıdır.
- Ön çalışmalardan elde edilen en iyi yüzey kaplama koşulu ya da koşulları baz alınarak mekanik özelliklerde yarattığı değişimlerin araştırılmasıdır. Borlama işlemini malzemenin aşınma ve sertlik parametreleri ile ilişkilendirilerek aşınan yüzeylerin mekanik özelliklerinde yarattığı değişimlerin belirlenmesi bu aşamanın temel amacını oluşturmaktadır. Bu aşamanın kontrolü mekanik testler daha önce belirtilen aşınma, sertlik ve yüzey pürüzlülük deneyleri ile sağlanacaktır.
- Deneylerden elde edilen verilere göre görece düşük maliyetli, yüksek işleme kabiliyetine sahip 1.2311 çelik malzeme için mekanik değişim ve performans tespiti yapılacaktır.

BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Literatürde farklı alaşım elementi içeriğine sahip çelikler üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde borlama işleminin diğer yüzey kaplama işlemlerine göre farklı üstünlüklere sahip olduğu görülmüştür (Uzun, 2002). Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir.

Şen (1998), AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin yüzey özelliklerinin borlama metodu ile geliştirmesini konusunu araştırmıştır. Sıvı borlama işlemini, farklı süre ve sıcaklıklarda gerçekleştirmiştir. Borlanmış malzemelerin aşınma miktarının 7 kat daha az olduğunu ve aşınma deneyi esnasında sürtünme katsayısı değerlerinin düşük olduğunu tespit etmiştir (Şen, 1998).

Uzun (2002), yüzey sertleştirme yöntemi olan borlama metodu ile çeliklerin aşınma direnci özelliklerini incelemiştir. İki farklı sıcaklık ve iki farklı sürelerde yapılan işlem sonucunda borür tabakalarının dişli bir yapıya sahip olduğu, borlanmış numunelerin 6 kat aşınma direncinde artış gösterdiğini tespit etmiştir (Uzun, 2002).

Yapar (2003), dört farklı çelik için farklı süre ve sıcaklıklarda borlama işlemi uygulamıştır. İşlem sonrasında ise tüm malzemelerde sertlik görüntüleri sonucu malzeme yüzeylerinde ana numunenin sertliğinden 7-9 kat daha yüksek sertlik değerleri olduğunu tespit etmiştir. Sertlik değerlerini malzeme içeriğinde bulunan karbon miktarı ile ilişkilendirmiştir. Ayrıca numunelerin yüzey kısımlarında kolonsal yapıda FeB fazını ve alt kısmında ise Fe₂B fazını elde etmiştir (Yapar, 2003).

Er ve Par (2004), 950°C sıcaklık ve farklı sürelerde sade karbon çeliklere toz borlama metodu uygulamıştır. Borlama işlemiyle malzemelerde oluşan borür tabakalarının kalınlıklarını ve yüzey sertliklerini ölçmünü yapmışlardır. Deneyler sonucunda yüzey sertliklerinin ve aşınma dayanımlarının borlanmamış durumlarına göre 8 - 10 kat arttığını tespit etmişlerdir (Er ve Par, 2004).

Uslu ve diğeri (2007), Ekabor-2 tozu ile farklı sıcaklık ve sürelede toz borlama metodunu kalıp çeliğine uygulamıştır. Yaptıkları analiz sonucunda FeB, Fe₂B, CrB ve MnB fazlarını gözlemlemişlerdir. Borlama işlemi sonrasında sertliğin 4-5 olduğunu kat arttığını tespit etmişlerdir (Uslu ve diğeri., 2007).

Yağcı (2009), 1.3343 çeliğine Ekabor-2 tozu ile farklı sıcaklık ve sürelede toz borlama metodunu uygulamıştır. Borür tabakası fazları (FeB ve Fe₂B) ve geçiş bölgesinin varlığı, mikro yapı incelemeleriyle tespit etmiştir. Yaptığı sertlik ölçümleri sonucunda 1000°C’de 6 saat süre ile borlanan numunede yüzeyden 10 µm mesafede en yüksek değeri elde etmiştir. Borlanmış numunelerin sertliği yüzeyden içeriye doğru ilerledikçe azalmakta olduğu, borlama sıcaklığına ve süresine bağlı olarak, borür tabakasının kalınlığı ise ortalama 14 µm ile 126 µm arasında değişmekte olduğunu gözlemlemiştir. (Yağcı, 2009).

Alparslan (2011), 900 °C sıcaklık ve 6 saat sürede Ekabor-2 tozu ile borlama metodunu iki farklı çeliğe uygulamıştır. Borlanmış numunelerin SEM, XRD ve Mikrosertlik analizlerini yapmıştır. Yapılan analizler sonucunda, her iki numunede de FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğunu tespit etmiştir (Alparslan, 2011).

Demirel (2013), Ekabor-2 tozu ile farklı sıcaklık ve sürelede toz borlama metodunu iki farklı çeliğe uygulamıştır. Borlama süresinin artması ile daha kalın tabaka oluştuğunu gözlemlemiştir. Mikrosertlik ölçümleri sonuçlarında borlama sıcaklığı ve süresinin artırılmasıyla sertlik değerlerinin arttığını, XRD analizi sonucunda da her bir çeliğin yüzeyinde de FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğunu tespit etmiştir (Demirel, 2013).

Güneş ve Yıldız (2015), AISI 210 ve AISI 430 çeliklerine Ekabor-2 tozu ile toz borlama işlemi uygulamıştır. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemini uygulamıştır. Borlanan malzemelerin analizleri sonucunda çeliğin yüzeyindeki bor tabakası analizinde Fe_xBy, Cr_xBy and Ni_xBy bileşenlerini tespit etmiştir. AISI 310 ve

AISI 430 malzemelerinin bor tabakası sertliklerini sırasıyla 1658 - 2284 HV_{0.1} ve 1762 - 2165 HV_{0.1} değerlerinde olduğunu tespit etmiştir (Güneş ve Yıldız, 2015).

Aydın ve diğer (2016), soğuk takım çeliği için farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemi uygulamıştır. Borlanmış malzemelerin optik incelemeleri, sertlik değerleri ve kaplamaların kalınlıkların tespit etmişlerdir. Kaplama tabakasının çift fazlı yapı (FeB+ Fe₂B) şeklinde dişli ile düz yapı arasında bir görünüme sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Kaplama tabakalarının kalınlığının da artan sıcaklık ve süreleri ile arttığını tespit etmişlerdir. 2379 çeliğinin sertlik değerinde yaklaşık 10 kat sertlik artışı olduğu sonucuna varmışlardır (Aydın ve diğer., 2016).

Topuz (2016), soğuk iş takım çeliğine farklı sıcaklık ve farklı sürelerde Ekabor-1TM tozu ile borlama metodu uygulamıştır. Sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak bor tabakası kalınlığında artış olduğunu tespit etmiştir. Borlanan malzemenin analizleri sonucunda FeB ve Fe₂B fazlarının yanında ayrıca çeliğin içerisindeki yüksek miktardaki Mn'den dolayı MnB, Mn₂B ve diğer demir esaslı malzemelerde de rastlanabilen FeB₄₉ fazını da gözlemiştir. Demir esaslı malzemelere borlama işlemi uygulanması sonucunda borür tabakası bölgesinde FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğu gözlemiştir. FeB fazının Fe₂B fazından yüzeye daha yakın oluşmasında Fe₂B fazının içermiş olduğu demir miktarının yüksek olmasından kaynaklandığı tespit etmiştir (Topuz, 2016).

Literatür araştırmaları göstermektedir ki; çeliklerinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi uygulamalarına ait çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Çeliklerin yüzeyinde ve mikroyapısındaki incelemeler; işlem süresi, sıcaklığı ve numunelerin içerdiği alaşım elementine bağlı olarak dişli yapıda farklı difüzyon mesafesinde borür tabakası oluştuğunu göstermektedir. Yüzey sertliğine dair laboratuvar deney sonuçlarına göre işlem süresi, sıcaklığı ve malzemelerin cinsine bağlı bir şekilde değişerek arttığı ve borlama işleminin sonucunda çeliklerin saf haline göre sertlik ve aşınma değerlerinin yüksek değerlerde çıktığı sonuçlarına varılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen verilerin farklı alaşım elementi içeriğine sahip 1.2311 çeliğinin, kutu borlama yöntemi ile yüzey özelliklerine etkisi için önemli referans bilgileri içereceği düşünölmektedir. Kalıplarda kullanılan elik malzemelerin kalıp maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle görece düşük maliyetli alternatif plastik kalıp çeliğinin (1.2311) borlama işlemi sonrası kalıp çeliklerinin sahip olduğu yüksek mekanik özelliklerinin elde edilmesi, kalıp maliyetinin azaltılması ve yüksek performans özelliklerinin elde edilmesi amacıyla bu tez çalışmasının ilgili teknolojik uygulamalara yeni ve farklı yaklaşımlar sunacağı düşünölmektedir. Bu yeni yaklaşımlar, kutu borlama işlemi ile 1.2311 çeliğinin mekanik özelliklerine etkilerini kapsamaktadır.

BÖLÜM ÜÇ

KALIP ÇELİKLERİ

Takım çelikleri kullanım yerlerine göre üretim esnasında meydana gelen ısıya, basınca ve aşınmaya karşı dayanıklı olmaları için geliştirilmiş çeliklerdir. Takım çelikleri genellikle, üretim sırasında yüksek yüklere maruz kalmaktadır. Takımlar bu yüklere kırılmadan, aşınmadan veya deforme olmadan dayanmak zorundadır (Koçak, 2012).

Kalıp çelikleri ise diğer takım çeliklerine göre daha kolay şekil alabilen ve işlemeye daha uygun çeliklerdir. Kalıp çeliklerinin üretim aşamasından sonra yüzey sertleştirme işlemleri ile yüksek yüzey sertliği ve aşınma direnci elde edilebilmektedir. Plastik kalıp çelikleri günümüz endüstrisinde gelişen ihtiyaçlar doğrultusunda ortaya çıkmış yüksek performanslı ve düşük maliyetli takım çelikleridir (Koçak, 2012).

3.1 Plastik Kalıp Çelikleri

Plastik kalıp çelikleri, uygun kimyasal bileşenleri sayesinde aşınma dayanımı, basma mukavemeti yüksek, ısı iletkenlik, parlatılabilirlik ve işlenebilirlik özellikleri çok iyi olan, düşük ya da orta miktarda karbon içeren ayrıca silisyum, mangan, krom, nikel, molibden, vanadyum ve alüminyum gibi alaşım elementlerinin uygun bir şekilde dengelenmesi ile üretilen takım çelikleridir (Alibey, 2010, s.21).

Endüstride en yaygın kullanılan plastik kalıp çelikleri: 1.2738, 1.2311, 1.2312, 1.2316 ve 1.2083 çelikleridir (Koçak, 2012).

Plastik kalıp çeliklerinden beklenen zellikler (Koçak, 2012):

- Kolay işlenebilirlik,
- Sertleştirilebilirlik,
- Yüksek tokluk ve dayanım,
- Parlatılabilirlik,
- Yüksek aşınma dayanımı,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Kalıbın abuk soğutulabilmesi için yüksek ısı iletimi,
- Yüksek korozyon dayanımıdır (Koçak, 2012).

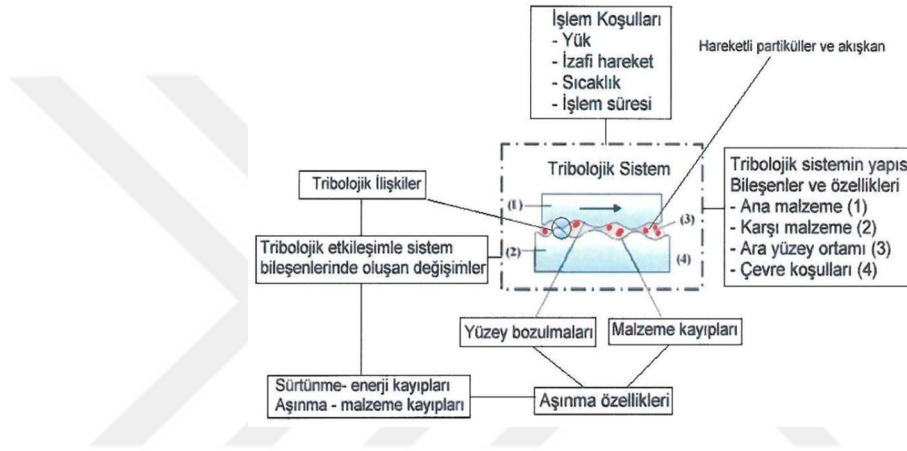
Endüstriyel uygulamalarda beklenen tüm bu özellikleri aynı anda sağlayan tek bir malzeme yoktur. Günümüz endüstrisinde kalıpların çalışma koşulları baz alındığında bu şartlara en uygun malzeme seçimi yapılmaya çalışılmalıdır. Kalıbın alışma koşulları aşağıda listelenen kriterlere göre değerlendirilmelidir:

- Kalıbın üreteceği-basacağı parça adedi (kalıp mr).
- Kalıpta çalışacak plastik malzemelerin özelliği (aşındırıcı, korozif, vb.).
- Parlatmanın gerekli olup olmadığı.
- Yüksek ısı iletimin gerekli olup olmadığı (Koçak, 2012).

BÖLÜM DÖRT

KALIP ÇELİKLERİNDE KARŞILAŞILAN AŞINMA PROBLEMLERİ

İçerisinde sürtünme, aşınma gibi kavramların meydana geldiği sistemlere tribolojik sistem adı verilmektedir. Triboloji; sürtünme, yağlama ve aşınma kavramlarını kapsar. Şekil 4.1’ de DIN 50320 normuna göre tribolojik sistemin şematik gösterimi verilmiştir (Demir, 2012)



Şekil 4.1 DIN 50320 normuna göre tribolojik sistemin şematik gösterimi (Demir, 2012)

4.1 Sürtünmenin Tanımı

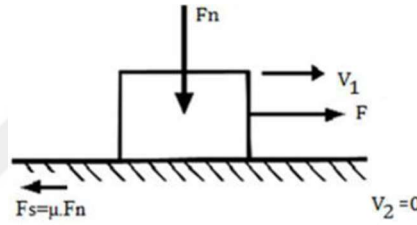
Sürtünme, birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasında yağlayıcı madde bulunup bulunmaması, temas yüzeylerinin pozisyonuna göre üç grupta incelenmektedir (Demir, 2012).

Bunlar:

- Kuru sürtünme
- Sınır (yarı sıvı) sürtünme
- Sıvı (film) sürtünme

4.1.1 Kuru (yağsız) sürtünme

Göreceli hareket eden ve olağan bir (F_n) kuvvetinin etkisinde iki cismin birbirlerine değmesi sonucunda bu bölgelerde harekete karşı $F_s = \mu \cdot F_n$ şeklinde bir sürtünme kuvveti oluşmaktadır (Demir, 2012). Şekil 4.2’de kuru sürtünmenin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.2 Kuru sürtünme modeli şematik gösterimi (Demir, 2012)

4.1.2 Sınır (yarı sıvı) sürtünme

Sınır yağlamada ince bir yağlayıcı film katı filmin üstünü örtmektedir. Burada yağ oluşturulan bileşenlerden biri yağdan ayrılarak metal yüzeyini örter. Sürtünme karakteristiği filmin ve asıl malzemenin özelliklerine göre ortaya çıkar. Yağlayıcı molekülleri yüzeye oksit tabakasından daha iyi tutunduğu için metalik değmeler azalır ve böylece sürtünme katsayısı düşmektedir (Bozacı, 2005).

4.1.3 Sıvı (film) sürtünme

Sıvı sürtünmede iki yüzey arasında oluşan yağlayıcı filminin kalınlığı, en ince olduğu yerde bile, her iki temas yüzeyinin maksimum pürüzlülük yükseklikleri toplamından daha kalınsa bu iki yüzey birbirinden tamamen ayrılmış olur ve metal/metal temas olasılığı ortadan kalkmış olur. Sıvı film yağlama koşullarında sürtünme direnci, yağlayıcı madde kendi tabakaları veya molekülleri üzerinden kayarken harekete gösterilen direnç kadardır (Bozacı, 2005).

Sıvı sürtünme olarak bilinen bu durum yağlayıcının viskozitesine bağlı olup malzeme ve yüzeyden bağımsızdır (Bozacı, 2005).

4.2 Aşınmanın Tanımı

Mevcut yüzeyden aşınmadan kaynaklanan parçaların malzemeden ayrılması sonucu oluşan malzeme kaybı aşınma olayı olarak tanımlanmaktadır (Davis, 2001). Malzemede görülen bir yıpranma olayının aşınma olarak kabul edilebilmesi için aşağıda verilen şartların gerçekleşmesi gereklidir. Bunlar:

- Mekanik bir etkinin olması,
- Sürtünmenin olması,
- Malzemenin üst kısmında kopma ya da ayrılma gerçekleşmesidir (Akkurt, 1992).

Aşınma sisteminin temel elemanları aşağıda sıralanmıştır:

- Ana malzeme (aşınan),
- Karşı malzeme (aşındıran),
- Ara malzeme,
- Yük,
- Göreceli hareket,
- Ortamın koşullarıdır (Erdem, 2006).

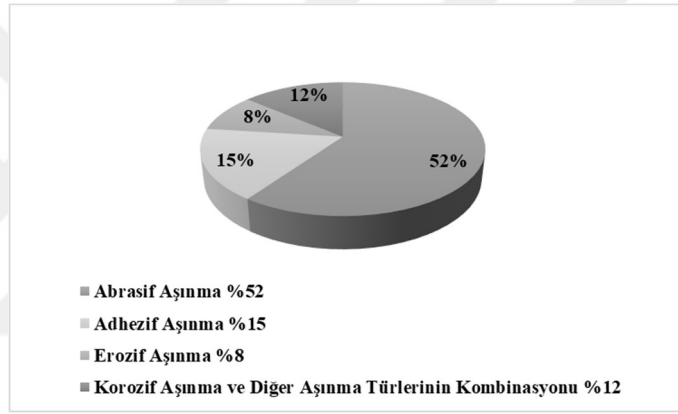
Kalıp içerisinde aşınan malzemenin aşınma özelliklerinin yanı sıra karşı malzemenin de aşındırma etkisi son derece önem arz eder. Bu yüzden aşınan bir malzeme incelenirken aşınmaya etki eden faktörler dikkate alınmalıdır (Yılmaz,2012). Başlıca dikkate alınması gereken faktörler metalurjik ve çalışma koşullarıdır.

4.3 Aşınma Mekanizmaları

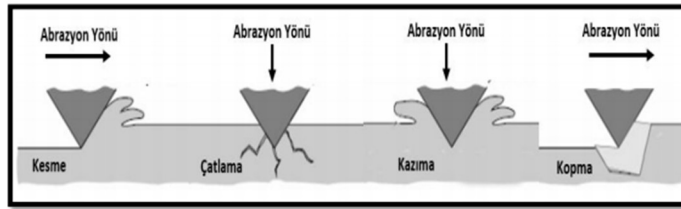
Literatüre bakıldığı zaman aşınma mekanizması türleri; abrasif, adhezif, yorulma, korozyon ve erozyon aşınması olarak sınıflandırılmaktadır.

4.3.1 Abrazif Aşınma

Abrasif aşınma, hareket halinde olan ve yüzeye karşı sert parçacıkların sebep olduğu önemli bir aşınmadır (Davis,2001). Abrasif aşınma, endüstriyel makinelerde ve cihazlarda malzeme kaybının başlıca sebebinin oluşturmaktadır. Şekil 4.3' te endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan aşınma mekanizmalarının oransal gösterimi verilmiştir (Gencel ve diğer., 2011). Şekil 4.4'de ise abrazif aşınma mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan aşınma mekanizmalarının oransal gösterimi (Gencel ve diğer., 2011)

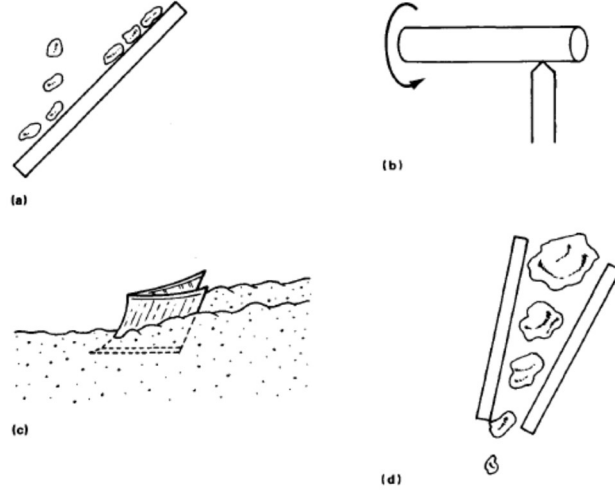


Şekil 4.4 Abrasif aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi (Özcan, 2019)

Temas türüne ve ortamına göre abrasif aşınma olayının şematik olarak gösterimi Şekil 4.5’ te verilmiştir. Eğer iki cismin sürtünmesinden dolayı oluşuyorsa iki elemanlı, sert parçacıkların temas eden yüzeyler arasında serbest bir şekilde hareket etmesi sonucu oluşuyorsa üç cisimli abrasif aşınmadır (Stachowiak ve Batchelor, 1993).

Abrasif aşınmayı önlemek veya aşınma hızını azaltmak için aşağıda yer alan yöntemlere uygulanabilir:

- Yüzey sertliğini arttırmak,
- Abrasif parçacıkları uzaklaştırmak,
- Aşınan parçaları değiştirmek (Sağlam, 2016).

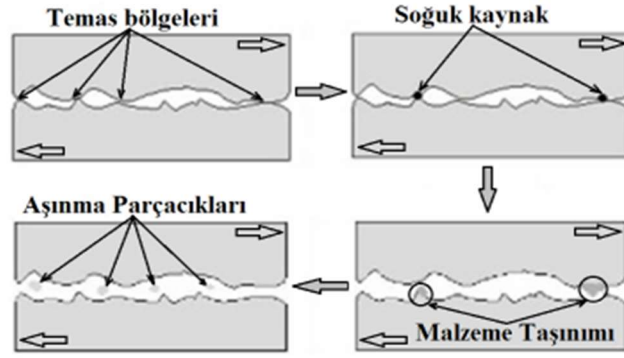


Şekil 4.5 Temas türüne göre abrasif aşınmanın şematik gösterimi (Davis, 2001)

4.3.2 Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma da iki metal bir kuvvet etkisi altında birbirine sürtünürken, yüzeyleri oluşturan küçük tepecikler geçici olarak birbirlerine yapışıp kaynak

oluşturur. Bu tepecikler iki metalin hareketlerine devam etmesi ile koparlar ve küçük parçacıklar serbest kalır. Böylece adhezif aşınma gerçekleşmiş olur. Bu metalik parçacıklar, iki yüzey arasında serbest halde kalabilecekleri gibi metallere birine de bağlı halde bulunabilir (Gür, 2009). Şekil 4.6’ da adhezif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.6 Adhezif aşınma mekanizmasının şematik olarak gösterimi (Varol, 2016)

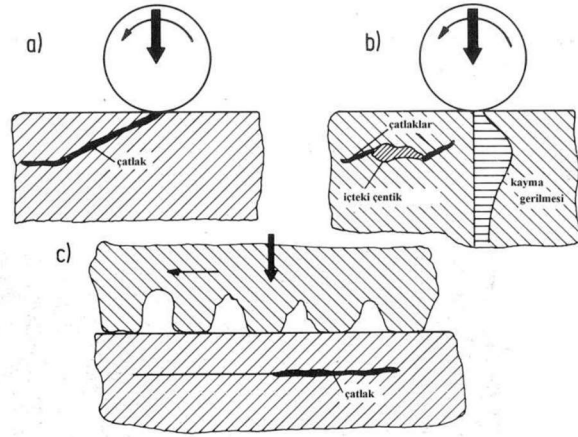
Adhezif aşınmayı önlenmek veya adhezif aşınmayı hızını azaltmak için aşağıda yer alan yöntemlere uygulanabilir:

- Yağlayıcı kullanmak,
- Birbirleri içerisinde çözünemeyen metaller kullanmak,
- Düz yüzeyler kullanmak,
- Metal-metal temasını önlemek (Kayalı ve diğer., 1997).

4.3.3 Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, periyodik zorlanmalar etkisinde zamanla gerçekleşir. Bu durum her zaman yüzeyden başlar. Yüzey, zorlanma etkisine ve gerilmelere maruz kaldığında gerilmelerin neden olduğu mikro çatlaklar sonucunda pul pul şeklinde malzeme ayrılmalarına neden olan yorulma aşınması meydana gelir (Gürleyik, 1980). Şekil 4.7’de yorulma aşınmasının şematik gösterimi verilmiştir.

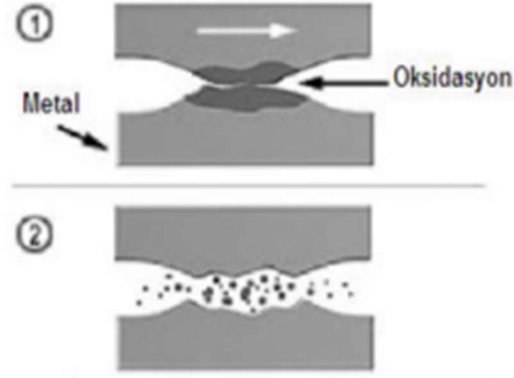
Mekanik gerilmelerden kaynaklanan ve genelde yüzeyde oluşan değişen gerilmelerden dolayı birçok aşınma mekanizmasında yorulma aşınmasının izleri görülmektedir (Turunç, 2015).



Şekil 4.7 Yorulma aşınmasında yüzeyde çatlak oluşumu ve ilerlemesinin şematik gösterimi (Gürleyik, 1980)

4.3.4 Korozi Aşınma

Aynı zamanda tribooksidasyon aşınması adı verilen korozi aşınma mekanizmasında, ana malzeme ile karşı malzeme arasında oluşan tribolojik zorlanmalardan dolayı gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar hakimdir. Özellikle metalik malzeme yüzeylerinde gerçekleşmektedir. Malzeme yüzeylerindeki oksit tabakası aşınmayı azaltmasına rağmen, yüzey tabakalarının tribooksidasyonu sonucunda aşınma hızlanmaktadır. Korozi aşınma olayı, abrasiv ve adhesiv aşınma ile beraber oluşabilmektedir (Kayalı ve diğer., 1997). Şekil 4.8’de korozyon aşınmasının şematik gösterimi verilmiştir.



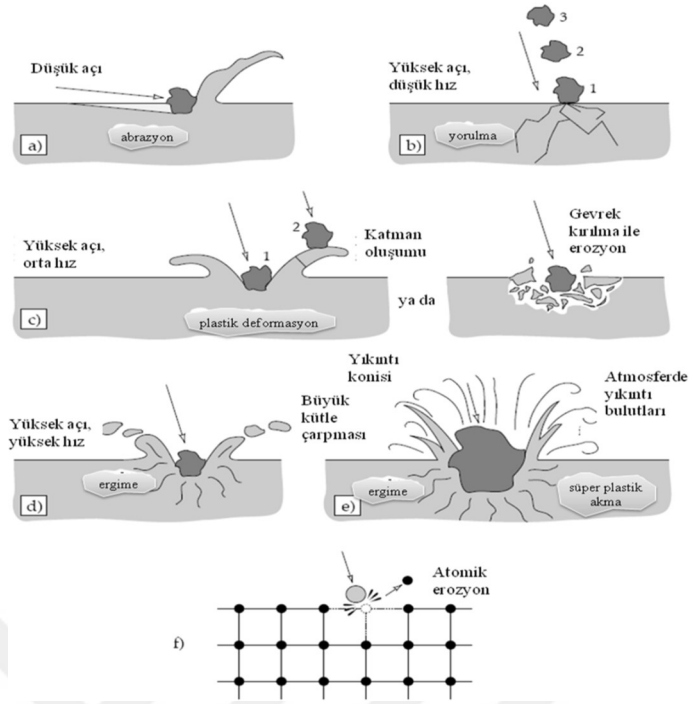
Şekil 4.8 Korozif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi (Taşçı, 1993)

Korozif aşınmayı önlenmek veya korozif aşınma hızını azaltmak için aşağıda yer alan yöntemlere uygulanabilir:

- Malzeme seçimine dikkat etmek,
- Yüzey kaplaması yapmak,
- Ortamın hava ile temasını kesmek (Koç, 2004).

4.3.5 Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınma, partiküllerin özellikleri, boyutu, çarpma açısı ve hızına göre farklı aşınma mekanizmaları içeren aşınmadır (Stachowiak ve Andrew, 2001). Şekil 4.9’da eroziyon aşınma mekanizmasının ayrıntılı şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.9 Eroziyon aşınma mekanizmasının şematik gösterimi (Finnie, 1995)

4.4 Malzeme Aşınmasının Ölçüm Yöntemleri

Bir sistem ve o sisteme ait elemanların sürtünme ve aşınma davranışlarının belirlenebilmesi için yapılan testler, malzeme tasarımı açısından son derece önemlidir. Bir malzemenin sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenebilmesi için yapılan deneyler, gerçek makineler veya model deney ekipmanları kullanılarak yapılmaktadır. Makine üzerinde gerçek şartlarda yapılan deneyler, pahalı olmasının yanı sıra tribolojik etkenler sebebiyle değerlendirmek zordur. Bu sorunları ortadan kaldırmak için bazı model deney yöntemleri geliştirilmiştir (Uzuner, 2001).

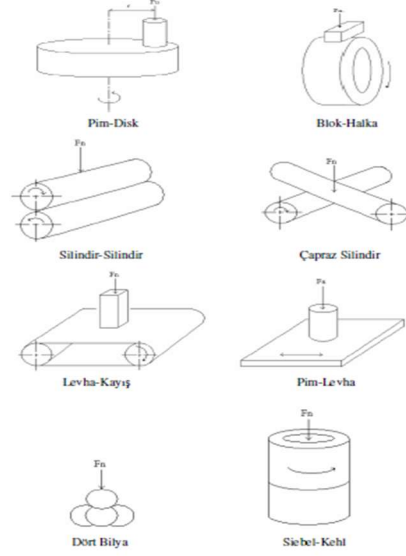
Aşınma deney yöntemleri iki grupta incelenir:

- Yağlayıcı ve kuru bir ortamda ana ve karşı malzemelerinin adhesiv (metal-metal) aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler,
- Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında sadece karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneyler (Aytaç, 2007).

Aşınmayı tanımlayan değişkenler; kuvvet veya basınç, yüzey pürüzlülüğü veya sürtünme katsayısı, sıcaklık, kayma hızı, ortam ve temas şekli sayılabilir. Aşınmanın birçok tipi ve test metodu mevcuttur. ASTM tarafından standartlaştırılmış bazı aşınma test metodları Tablo 4.1’de verilmiştir (Blau ve Budinski, 1999).

Tablo 4.1 ASTM tarafından geliştirilmiş bazı test metodları (Blau ve Budinski, 1999)

Test kodu	Test tipi
D-4172	Yağlayıcı sıvıların aşınma önleme özelliklerinin testi.
D-4170	Yağlayıcı greslerle yıpratma aşınmasının önlenmesi testi.
G-32	Titreşimli kavitasyon erozyon testi.
G-65	Kuru kumlu plastik tekerlekli abrasyon testi.
G-73	Sıvı vuruşlu erozyon testi.
G-76	Gaz jeti kullanılarak katı parçacık çarptırılmasıyla meydana getirilen erozyon testi.
G-77	Yüksek dirençli malzemeler için block-on-ring aşınma testi.
G-81	Çene ezicili öğütücülerin abrasyon testi.
G-99	Pin-on-disc testi.
G-105	Islak kumlu plastik tekerlekli abrasyon testi.
G-132	Pin abrasyon test metodu.
G-133	İleri geri kaymalı aşınma testi.



Şekil 4.10 Aşınma deney sistemleri (Soydan ve Ulukan, 2003; Uzuner, 2001)

4.1.1 Ağırlık Farkı Ölçüm Yöntemi

10^{-4} veya 10^{-5} gr hassasiyetindeki terazi yardımıyla ölçüm yapılmaktadır. Yöntemin ekonomik ve basit oluşu, ölçüm aletin duyarlılığı nedeniyle aşınma kaybı ölçümünde en çok tercih edilen yöntemdir (Korkut, 1997).

4.1.2 Kalınlık Ölçüm Yöntemi

Aşınma esnasında oluşan boyut farkının ölçülmesi ile yapılmaktadır. Hesaplanan hacimsel ölçüm ile birim hacimde oluşan aşınma kaybı bulunur (Gür, 2009).

4.1.3 İz Değişim Ölçüm Yöntemi

Yüzeyde oluşturulan iz boyutunun değişimi ile ölçüm yapılmaktadır. Oluşan iz boyutlarındaki fark mikroskop ile ölçüm yapılarak hesaplanmaktadır (Soydaş, 2006).

4.1.4 Radyo İzotop Ölçüm Yöntemi

Yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α parçacıklarına maruz bırakılmasıyla radyoaktif duruma getirilmesi ile ölçüm yapılmaktadır. Yöntem ekonomik olmayışı sebebiyle sadece özel amaçlar için kullanılır (Gür, 2009).

4.5 Aşınmanın Önlenmesi

Özellikle otomotiv sanayisi, ağır sanayi makine ve sistemlerinde sürekli hareket ve temas halinde pek çok parça sürtünme ve aşınmaya maruz kalmaktadır. Söz konusu bu parçaların teknik servis ömürleri çoğunlukla aşınma dayanımları ile sınırlanır. Sürtünme ve aşınma olayları genellikle parçaların yüzey bölgesinde meydana gelmektedir. Tribolojik etkiler altında çalışan malzemelerin yüzeylerinin sert ve aşınmaya dayanıklı olması gerekmektedir. Bu mekanik özelliklerin aynı parçada, en iyi şekilde koordine edilmesi yüzey modifikasyon ve sertleştirme yöntemleri ile sağlanabilir (Topçu, 2010).

BÖLÜM BEŞ

KALIP ÇELİKLERİNE UYGULANAN YÜZEY MODİFİKASYON İŞLEMLERİ

Birçok yüzey modifikasyon işlemi, yüzey sertliğini arttırmak, aşınma direncini arttırmak, sürtünmeyi azaltmak amacıyla yapılmaktadır. Bu nedenle mekanik özellikleri değiştirmek adına yüzey iyileştirme işlemleri son yıllarda endüstride yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Yeşilçubuk, 2010).

Termokimyasal yöntemler ile yapılan yüzey modifikasyon işlemleri difüzyon esaslı bir prosestir. Termokimyasal işlemler iki grupta incelenir (Caruta, 2005; Pazarlıoğlu, 2006).

Bunlar:

- Ametaller ile yapılan termokimyasal işlemler (nitrürleme, nitrokarbürleme, karbürleme, karbonitrürleme ve borlama)
- Metaller ile yapılan termokimyasal işlemler (alüminyumlama, kromlama, silisyumlama) (Caruta, 2005; Pazarlıoğlu, 2006).

5.1 Nitrürleme

Nitrürleme, metal malzemenin yüzeyine azot yayındırılmasıyla sert nitrür tabakası meydana getirmek amacıyla 500-600°C sıcaklıklar arasında uygulanan yüzey sertleştirme işlemidir. Nitrürleme ile yüzey sertleştirme yöntemi karbürlemeye benzer bir yöntemdir (Copola ve diğer., 2002; Wang ve diğer., 2005).

Nitrürleme yöntemleri üç grupta incelenir:

- Gaz Nitrürleme
- Sıvı Nitrürleme
- Plazma (İyon) Nitrürleme (Copola ve diğer., 2002; Wang ve diğer., 2005).

5.2 Nitrokarbürleme

Nitrokarbürleme, çeliklere azot ve karbonun metalik malzemeler içerisinde yüksek sıcaklıklarda uygulandığı bir yüzey sertleştirme işlemidir (Wang ve diğer., 2004; Jaoul ve diğer., 2005; Mirjani ve diğer., 2008).

5.3 Karbürleme

Karbürleme, demir esaslı malzemelerin yüzeyine karbon yayındırılması ile uygulanan termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir. Karbürlenen parçalar sertleştirildikten sonra yüzeyde sert bir tabaka, iç kısımda ise yumuşak ve tok bir yapı elde edilir. Bu özellik temas yorulması dayanımı ile aşınma direnci istenen makine elemanlarında tercih edilmektedir (Krauss, 1999).

Karbürleme yöntemleri beş grupta incelenir:

- Kutu karbürleme
- Sıvı karbürleme
- Gaz karbürleme
- Plazma karbürleme
- Vakum karbürleme (ASM Handbook Volume 5, 1994).

5.4 Karbonitrürleme

Karbonitrürleme, östenit fazında çeliğe azot ve karbon yayındırılması ile uygulanan bir termokimyasal bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Karbonitrürleme ile yüzey sertleştirme yöntemi karbürlemeye benzer bir yöntemdir (ASM Handbook Volume 5, 1994).

5.5 Borlama

Borlama, bor atomlarının yüksek sıcaklıklarda ısıнын etkisiyle yüzey sertleştirme işlemi yapılacak olan metal malzemenin yüzeyine difüze olmasıyla birlikte asıl metal malzemenin yüzeylerinde bulunan atomlarla borür tabakası meydana getirerek, malzemenin aşınma, sertlik ve korozyon direncini arttırmak amacıyla yapılan difüzyon esaslı bir yüzey sertleştirme işlemidir (Fichtl, 1981). Borlama, işlemi 850 – 1050°C sıcaklıklar arasında 2 - 10 saat sürelerde uygulanmaktadır. Metal yüzeyine bor yayıldırılması gerçekleşir (Gülsün, 2016).

Borlama, alaşımlı ve alaşımsız çeliklere, takım çeliklerine, paslanmaz çeliklere, demir ve demir dışı metal ve alaşımlarına (nikel kobalt, molibden titanyum vb.), dökme demir gibi birçok malzemelere uygulanabilmektedir (Dalar, 2013).

5.6 Borlama Yöntemleri

Borlama yöntemleri 5 ana başlıkta incelenmektedir. Bunlar:

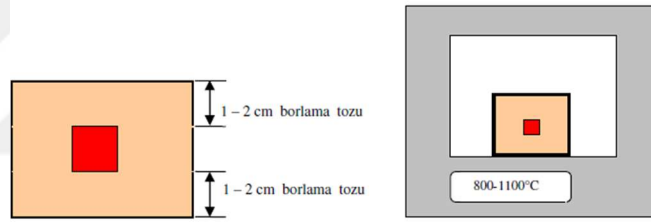
- Kutu Borlama
- Pasta Borlama
- Sıvı Borlama
- Gaz Borlama
- Plazma Borlama

5.6.1 Kutu Borlama

Borlama yöntemi yapılacak malzemenin toz karışım esaslı borlu bir ortamda yaklaşık 850 - 1000°C sıcaklıklarda 2 - 10 saat sürelerde bekletilmesi ile gerçekleşmektedir. Bu işlem soygaz atmosferinde yapılabildiği gibi normal atmosferde de yapılabilir. Borlama ısıl işleminde genellikle sıcaklığa dayanıklı paslanmaz çelik kutu kullanılmaktadır. Bu kutu içerisinde borlama yapılacak

malzemenin etrafı bor tozu ile kaplanır. Ardından üst kısma dolgu malzemesi eklenerek hava geçişi olmayacak şekilde kutu kapatılır ve fırınlama işlemi gerçekleştirilir (Kayalı, 2011). Kutu hazırlama ve kutunun fırında ısıtılmasına ait şematik gösterim Şekil 5.1’de verilmiştir.

Borür tabakasının oluşması için gerekli bor, bor kaynaklarından sağlanmaktadır. Aktivatörler borlama işlemini aktive ederler, demir esaslı malzemelerde Fe ile reaksiyona girerek ilk borür tabakası çekirdeğinin yüzeyde oluşmasını sağlarlar. Bu olaydan sonra borür tabakası aktivatörden bağımsız olarak gelişir ve büyür. Serbest bor konsantrasyonunun istenilen seviyede olması için seyreltici görevindeki kimyasalın ortamda bulunması gerekmektedir. Sistemdeki serbest bor konsantrasyonu (tek fazlı) Fe_2B tabakasının oluşumunu belirlemektedir (Spence, 2005).



Şekil 5.1 Kutu (katı) borlama işleminin şematik gösterimi (Bayça ve Şahin, 2004)

Katı ortamda borlamada kullanılan birtakım borlama bileşikleri % ağırlık olarak aşağıda verilmiştir.

- % 60 B_4C + % 5 B_2O_3 + % 5 NaF + % 30 Demir oksit
- % 50 Amorf bor + % 1 $\text{NH}_4\text{F.HF}$ + % 49 Al_2O_3
- % 100 B_4C
- % (7,5 - 40) B_4C + % (2,5 - 10) KBF_4 + % (50-90) SiC
- % 84 B_4C + %16 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$
- % 95 Amorf bor + % 5 KBF_4
- % 20 B_4C + % 5 KBF_4 + % 75 Grafit
- % (40 - 80) B_4C + % (20 - 60) Fe_2O_3

- % 80 B₄C + % 20 Na₂CO₃
- % 98 [% 75 Al₂O₃ + % 25 (% 30 Al + % 70 B₂O₃)] + % 2 NaF (Özsoy, 1991).

Katı ortamda borlamada kullanılan çeşitli ticari bor sağlayıcı maddelerin özellikleri aşağıda verilmiştir:

Ekabor 1: Tozdur. İyi kalitede yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Genellikle çelik malzemelerde kullanılması uygundur (Gülsün, 2016).

Ekabor 2: Granüllüdür. Çok iyi kalitede yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Düşük alaşımlı çelikler için kullanılması uygundur (Gülsün, 2016).

Ekabor 3: Granüllüdür. İri taneli ve daha iyi yüzey kalitesine sahiptir. Yüksek alaşımlı çelikler için kullanılması uygundur (Gülsün, 2016).

Ekabor HM: Sert metallerin borlanması için özel olarak üretilmiş bir tozdur (Gülsün, 2016).

Ekabor Pasta: Macundur. Metalik malzemelerde kullanılan bir tozdur (Gülsün, 2016).

Kutu borlama yönteminin diğer işlemlere kıyasla birçok üstün avantajları bulunmaktadır. Çeşitli borlama yöntemleri arasında kutu borlama en çok kullanılan yöntemdir (Yu ve diğer., 2005). Tablo 5.1’de karşılaştırılmalı olarak kutu borlamanın diğer termokimyasal borlama yöntemlerine göre üstünlükleri ortaya konulmuştur. Bu tez çalışması bu yönüyle kutu borlamanın diğer yüzey kaplama yöntemlerine göre üstünlüğünü göz önüne alarak alaşım çeliklerinde değişen ortam koşullarına bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişimlere etkisinin tespiti ile ilgili literatüre katkılar sağlayacaktır.

Tablo 5.1 Termokimyasal borlama yöntemlerinin karşılaştırılması (Baştürk ve Erten, 2006)

Katı Borlama	Sıvı Borlama	Gaz Ortamda Borlama	Pasta ile Borlama
Avantajları			
Sistem ucuzdur.	İşlem ucuzdur.	Bor daha kolay metal yüzeye yayılır.	Kısmi borlama yapılabilir.
Özel teknik gerektirmez.	Fazla ihtisas istemez.	Katı borlamaya nazaran iyi sıcaklık kararlılığı.	İşlem süresi toz borlamaya nazaran kısadır.
Kolay elde edilebilir.			
Toz terkibi değiştirilebilir.			
Az ekipman gereklidir ve maliyeti çok düşüktür.			
Dezavantajları			
Yüzeyde bor bileşimi homojen olmayabilir.	Büyük boyutlu parçalara uygulamak zordur.	Sistem pahalıdır.	Borlamadan sonra numuneye macun yapışması dezavantajdır.
	Sistem pahalıdır.	Sistemin patlama tehlikesi olasılığı vardır.	
	850° C’ nin altında borlama yapmak neredeyse imkansızdır.		

5.6.2 Pasta Borlama

Kutu borlama yönteminin uygulama bakımından zaman kaybı ve maliyetli geldiği durumlarda tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde uygulama prosesi hazırlanan borlayıcı çözelti, borlama işlemi uygulanacak olan malzemenin yüzeyine püskürtme veya spreyleme yolu olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilir. Bu teknik ile yapılacak işlemler koruyucu gaz ortamında yapılır (Gülsün, 2016).

5.6.3 Sıvı Borlama

Sıvı ortamda, 900°C'nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde 2-6 saat tutularak, borlama işlemine tabii tutulurak bor difüzyonu gerçekleştirilir (Gülsün, 2016; Yapar, 2003). İşlem normal atmosfer altında yapılır, koruyucu atmosfere gerek yoktur. İşlemden kullanılan cihaz ve donanım basit olduğu gibi, gerekli kimyasal maddeler de ucuzdur. Borlama sonrası parçaların temizlenmesi önemli bir problemdir (Özsoy, 1991).

5.6.4 Gaz Borlama

Borlama ortamının gaz fazında gerçekleştiği işlemdir. Bu işlem için öncelikle gaz formuna getirilmiş bir bor kaynağı ile H₂ ve Ar gazlarının karışımı sağlanır. Bu yöntemde uygulama prosesi elde edilen karışımın malzemeye püskürtülmesi şeklindedir. Gaz ile borlama işlemi için komplike ekipmanlar gereklidir. Bor halojenürlerinin zehirleyici etkilerinin olması ve kimyasal olarak kararsız olmalarından dolayı bu gazlar tehlikeli gazlardır (Dalar, 2013).

5.6.5 Plazma Borlama

Plazma borlama yöntemi, demir ve demir dışı malzemeler için kullanılırlar. Bor kaynağı olarak B₂H₆, BCl₃, B(OCH₃)₃ ve BF₃ yanısıra H₂ ve Ar gazları da bunlarla

birlikte kullanılmaktadır. İşlem, 800-1000 °C sıcaklıklarda $\sim 10^{-2}$ Pa değerinde bir basınçla meydana getirilmiş plazma içerisinde yapılır (Nişli, 2011). Diğer borlama yöntemlerine göre enerjiden yüksek oranda kazanç sağladığı için son yıllarda ön plana çıkmaktadır (Uluköy, 2006; Ünlü ve Yılmaz, 2006).

5.7 Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları

Borlama işlemi ile yapılan yüzey modifikasyonu sonrası malzemenin sertlik ve aşınma direnci özelliklerini artırarak malzemede üstün mekanik özellik sağlanmaktadır. Her işlemin avantaj ve dezavantaj özellikleri olduğu gibi borlama işleminin de avantajları ve dezavantajları vardır.

5.7.1 Borlama İşleminin Avantajları

- Kalıp üretiminde temel malzemenin işlenmesi sırasında kolaylık sağlaması, düşük maliyete sahip olması ve borlama işlemi öncesi özelliklerine göre borlama işleminden sonra sağladığı yüksek mekanik özellikleri ile makine imalatlarında ve otomotiv sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedir (Gülsün, 2016; Uluköy, 2006).

Tablo 5.2’ de borlama işleminin diğer yüzey işlemlerine göre sertlik ve aşınma direnci bakımından üstünlükleri karşılaştırılmalı olarak ortaya konmuştur.

,

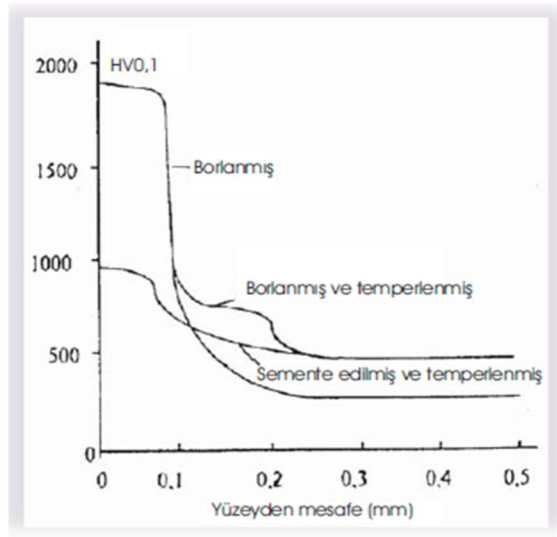
Tablo 5.2 Yüzey kaplama işlemlerinin aşınma direnci ve sertlik özelliklerinin karşılaştırılması (Hunger ve True 1994: Bayça ve Şahin, 2004)

Aşınma Direnci		
<u>Borlama</u>	<u>Nitrasyon</u>	<u>Karbürleme</u>
Farklı sıcaklıklarda yapılan aşınma deneyleri sonucunda, borlanmış yüzeylerin yüksek sıcaklıklarda dahi, karbürlenmiş ve nitrülenmiş yüzeylere göre daha iyi aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir (Hunger ve True 1994).	Farklı sıcaklıklarda yapılan aşınma deneyleri sonucunda, nitrülenmiş yüzeylerin yüksek sıcaklıklarda, borlanmış yüzeylere göre daha kötü aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir (Hunger ve True, 1994).	Farklı sıcaklıklarda yapılan aşınma deneyleri sonucunda, karbürlenmiş yüzeylerin özellikle yüksek sıcaklıklarda, borlanmış yüzeylere göre daha düşük aşınma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir (Hunger ve True, 1994).
Sertlik		
<u>Borlama</u>	<u>Nitrasyon</u>	<u>Karbürleme</u>
Yüksek sıcaklıklarda dahi bor tabakası sertliğini korumaktadır (Bayça ve Şahin, 2004).	Yüksek sıcaklıklarda nitrülenmiş çelikler sertliğini koruyamaz (Bayça ve Şahin, 2004).	Yüzey sertlikleri, borlama yöntemleri ile kıyaslandığında borlanmış yüzeylere göre daha düşük yüzey sertliği değerleri elde edildiği tespit edilmiştir (Budinski,1993).

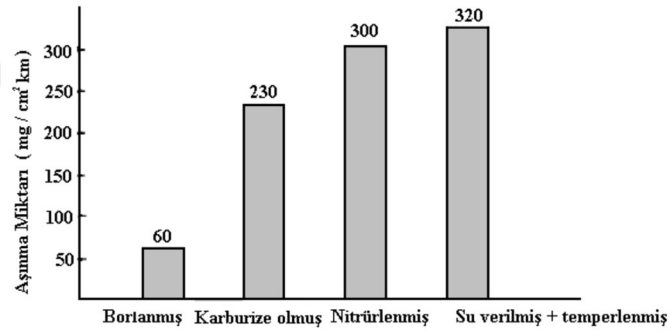
Şekil 5.3'te borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımına ait grafik verilmiştir.

Borlanmış çeliklerin aşınma dirençlerinin diğer sertleştirme yöntemi ile tespit edilen yüzeylere göre daha iyi olduğunu gösteren çalışmaya ait grafik Şekil 5.3'te verilmiştir.

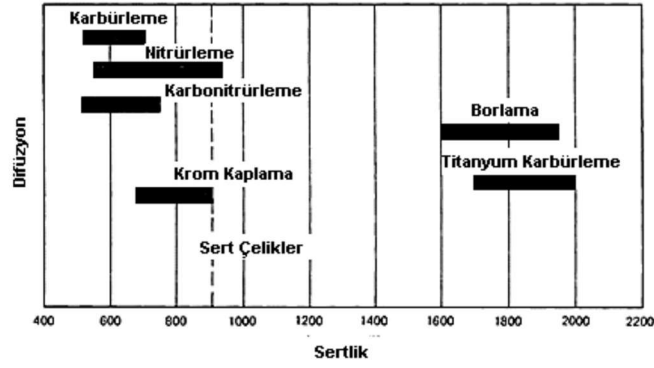
Borlanmış yüzeylerden elde edilen sertlik değerlerinin diğer yüzey modifikasyon işlemlerine göre daha yüksek olduğunu gösteren çalışmaya ait grafik Şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları (Matuschka, 1980)



Şekil 5.3 Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları (Ayer, 2005)



Şekil 5.4 Çeliklerin yüzeylerine farklı difüzyon prosesleri sonucunda elde edilen değişik kaplamaların sertlik değer aralıkları (Sinha, 1982)

5.7.2 Borlama İşleminin Dezavantajları

- Borlama teknikleri esnek değildir. Otomasyonun olmaması, el ile çalışma gerektirmesi en büyük dezavantajlarından biridir (Yapar, 2003).
- Borlanan malzemelerde literatüre bakıldığında zaman % 5 - 20 'si arasında boyutsal artış olmaktadır (Gülsün, 2016).
- Borlama sonrası genellikle çelik malzeme ısıtılma işlemine maruz bırakılır. Bu durumda kaplama yüzeyinin özelliklerinin korunması adına soy gaz atmosferi veya vakum altında çalışmak gerekir (Gülsün, 2016).

5.8 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları

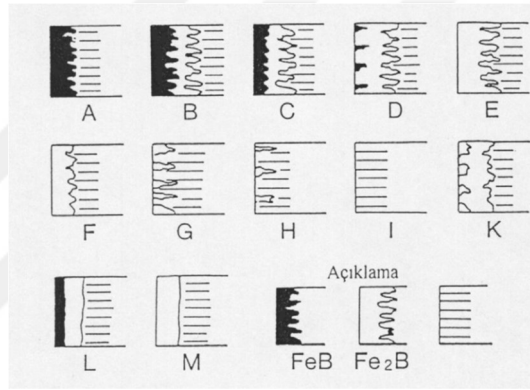
Borlama işlemi ile kaplanan malzemeler, sahip oldukları üstün performansları ile makine, otomotiv, gıda, tekstil, kimya sanayisinde ve daha birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır (Akbayır, 2005). Bor ile kaplanmış malzemelerin endüstride başlıca kullanıldığı alanlar aşağıda sıralanmıştır:

- Savunma Sanayi
- Cam Sanayi
- Makine Sanayi
- Metalürji Sanayi
- Nükleer Sanayi

- Otomobil Sanayi
- Uzay ve Havacılık Sanayi

5.9 Borür Tabakası Çeşitleri ve Bor Tabakası Kalınlığı

Borlu tabakaları karakteristik görünüme sahiptir. Farklı borlama yöntemleri sayesinde farklı yapıda elde edilen borür tabakaları Şekil 5.5'te gösterilmiştir (Matuschka, 1980).



Şekil 5.5 Borür tabakası çeşitleri (Matuschka, 1980)

- A: FeB,
- B: Fe₂B ve FeB,
- C: İki fazlı, ince bir FeB yapısı,
- D: İki fazlı, FeB dişleri izole edilmiş,
- E: Fe₂B, kuvvetli dişler,
- F: Fe₂B, daha az kuvvetli dişler,
- G: Fe₂B dişli yapı,
- H: Fe₂B dişleri çok izole edilmiş yapı,

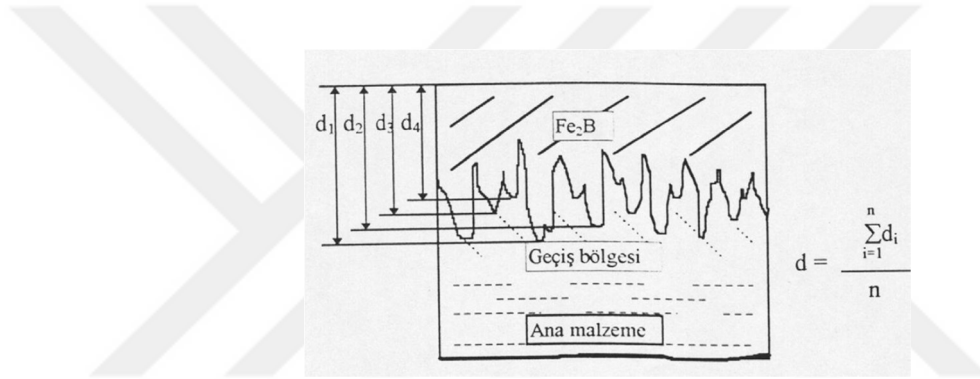
I: Geçiş bölgesi,

K: Bozulmuş yapı,

L: İki fazlı düz bir yapı,

M: Tek fazlı, FeB ve Fe₂B, düz yapı (Matuschka, 1980).

Borür tabakasının kalınlığına ortam ve işlem parametreleri ve alt tabaka malzeme kompozisyonu etki etmektedir (Uluköy ve diğer., 2006). Şekil. 5.6’ da borür tabakasının kalınlığının belirlenmesi gösterilmiştir.



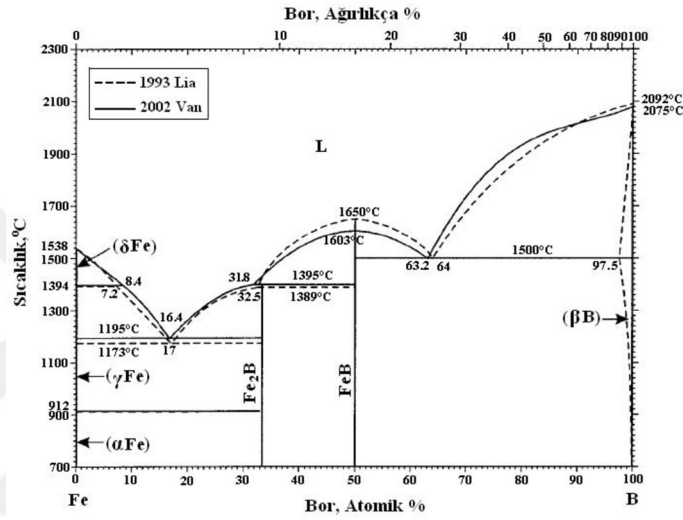
Şekil 5.6 Borür tabakası kalınlığının hesaplanması (Matuschka, 1980)

5.10 Demir – Bor Denge Diyagramı

Alaşım oluşturacak alaşım elementlerin, bir elementin bir metal içinde homojen bir şekilde çözünmesi için uyması gereken kurallar vardır. Bu kurallar bütünü Hume-Rothery kuralları olarak tanımlanmakta ve bu kurallar doğrultusunda, alaşım elementlerinin arayer katı eriyiği ya da yer alan katı eriyiği olarak davranacakları tanımlanmaktadır (Hayashi, ve Sugeno, 1970).

Borun atom çapı, demirin atom çapından %27 daha küçük olduğu için katı eriyik meydana getirebilmektedir (Dilektaşlı, 2014). Şekil 5.7’de Fe-B ikili denge

diyagramında gösterildiği üzere, % 7,2 de bor oranında 1394°C’de meydana gelen reaksiyon peritektik iken, 17 bor oranında 1173°C’de meydana gelen reaksiyon ötektiktir. 911°C’de γ -Fe+Fe₂B fazından α -Fe₂B’ye dönüşüm söz konusudur. Fe-B denge diyagramında görüldüğü üzere % 32,5 bor oranında 1410°C’de Fe₂B fazı oluşurken, 1500-1650°C’de FeB fazı meydana gelmektedir. %63,2 bor oranında ve 1500°C sıcaklıkta ise reaksiyon ötektiktir (Yapar, 2003).



Şekil 5.7 Demir-bor denge diyagramı (Dalar, 2013)

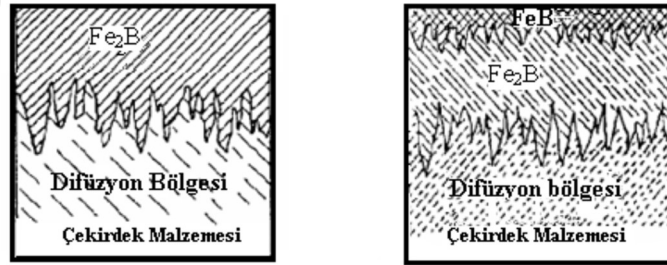
5.10.1 Fe ve Fe₂B Fazı Özellikleri

Demir borür bileşiklerinin oluşması için en uygun yerler; yüzey pürüzlülükleri, tane sınırları, dislokasyon bölgeleri, atomik boşluklar gibi mikro hatalardır (Yapar, 2003). Tablo 5.3’te FeB ve Fe₂B fazlarının genel özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.3 FeB ve Fe₂B fazlarının genel özellikleri (Yapar, 2003)

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal Yapısı	Tetragonal Hacim Merkezli	Ortorombik
Latis Parametresi (Å)	a=5,078, b=4,28	A=4,053, b=5,495, c=2,946
Mikrosertlik (GPa)	18-20	19-21
Elastisite Modülü (GPa)	295	590
Yoğunluk (gr/cm ³)	7,43	6,75
Genleşme katsayısı (Ppm/°C)	4-8	23
Ergime noktası (°C)	1389	1540
İletkenlik katsayısı (W/m, °K)	30	12
Elektriksel Direnç (10 ⁶ Ω.cm)	38	80

Şekil 5.8’de tek ve iki fazlı borür tabakalarının şematik görüntüsü verilmiştir. Dişli yapının mekanik özellikleri daha iyidir. Bunun nedeni ise dişli yapının borür tabakasının ana malzemeye çok daha iyi tutunmasını sağlamasıdır (Özer, 2011).



Şekil 5.8 Tek ve iki fazlı borür tabakalarının şematik görünüşü (Günen, 2012)

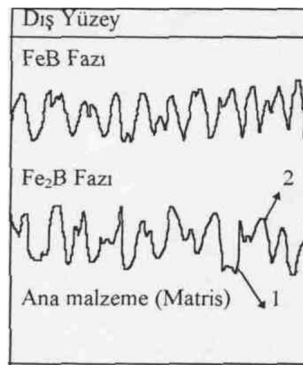
5.11 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması

Bir metalin kaplama işleminin gerçekleştirilmesini iki önemli kavramla açıklamak mümkündür. Bunlar ise işlem sonrası ortaya çıkan tabaka ve malzemenin sahip olduğu özelliklerdir (Soydan 1996).

Demir grubu malzemelerin borlanması sırasında, borür yapıları FeB/Fe₂B ve/veya Fe₂B/FeB ara yüzeylerinde dişli yapı oluşturarak büyür. Malzeme kompozisyonu ve işlem proses koşulları etkisi ile tek veya çok fazlı tabakalar elde edilmesine ve esas malzeme ile tabaka bölgelerinde farklı yapıların olmasına rağmen Fe₂B, ısıtıl işlemlere uygun olması ve FeB'a göre daha az gevrek yapıda olması gibi nedenlerden dolayı daha çok tercih edilmektedir. Fe₂B tabakasının büyümesi iki farklı şekilde ortaya çıkmaktadır (Uzun, 2002, Tabur, 2008; Ersöz 2008):

Difüzyon kanalı büyüme mekanizmasına göre; ortagonal prizma, bor atomlarının yayılımını kolaylaştıracak en büyük ara kesite sahiptir ve Fe₂B kristalinde, [001] boyunca, bor atomları için bir yayılım kanalını oluşturmaktadır. Bor tabakasından borür ve esas metal ara yüzeyine sürekli olarak yayılan bor atomları, borlama tabakası yüzeyine dik olarak Fe₂B kristallerini meydana getirir ve bu kristaller kolonsal bir şekilde içeriye doğru büyüme gösterir (Uzun, 2002, Tabur, 2008; Ersöz 2008).

Uçtan büyüme mekanizmasına göre; ana malzemenin kompozisyonu ve işlem proses koşulları etkisi ile ilk aşamada Fe₂B çekirdeği iğnemsî yapı şeklinde büyür ve bor gradyanı doğrultusunda yönelir. Bu durumda Fe₂B çekirdeğinin ucu etrafında meydana gelen bölgesel yüksek gerilme alanları ve kafes çarpışmaları yapının kolonsal olarak büyümesine neden olur (Uzun, 2002, Tabur, 2008; Ersöz 2008).



Şekil 5.9 FeB ve Fe₂B tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi (Palombarini ve Carbuicchio, 1987)

5.12 Bor Tabakasının Sertlik Özelliği

Borlama işleminin en önemli özelliği sertlik üzerine olup, Tablo 5.4’de FeB yapılarının sertlik değerleri verilmiştir (Günen, 2012).

Tablo 5.4 Fe-B tabakalarının sertlikleri ve ergime noktaları (Arat, 2011)

Malzeme	Oluşan Bileşik	Sertlik (HV)	Ergime Noktası (°C)
Fe	FeB	1900-2100	1390
Fe	Fe ₂ B	1800-2000	1390

5.13 Bor Tabakasının Sürtünme Davranışı

Tablo 5.5’te çelik malzemelerin borlama işlemi uygulanmış ve uygulanmamış durumdaki sürtünme katsayılarına ait değerleri verilmiştir.

Tablo 5.5 Çelik malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları (Bozkurt, 1984)

Malzeme	Sürtünme Katsayısı	
	Borlanmış	Borlanmamış
Düşük Karbonlu Çelik	0,17-0,19	0,58-0,59
Takım Çeliği	0,07-0,04	0,16-0,18
WC + Co Sinter Malzeme	0,19-0,23	0,26-0,27

5.14 Bor Tabakasının Aşınma Davranışı

Tabakanın tek veya çift fazlı olup olmamasına ve oluşum şekline bağlı olarak aşınma dayanımı değişiklik göstermektedir. Aşınma olayı en az Fe₂B tabakasında, en fazla ise sert ancak daha gevrek bir yapı gösteren FeB fazındaki bor tabakasında oluşmaktadır. Bu durum literatürde yapılan deneysel çalışmalar ile de tespit edilmiştir (Yağcı, 2009).

5.15 Alaşım Elementlerinin Borlamaya ve Bor Tabakasına Etkisi

Alaşım elementlerinin malzeme içerisinde ki içeriğine göre tabakanın ve matris malzemenin dişli yapı oluşturma derecesi değişmektedir. Dişli yapıların genellikle, karbonlu çeliklerde ve düşük alaşımlı çeliklerinde ortaya çıktığı grlmektedir. Alaşım elementi miktarı arttığında dişli yapı azalmaktadır (Yağcı, 2009).

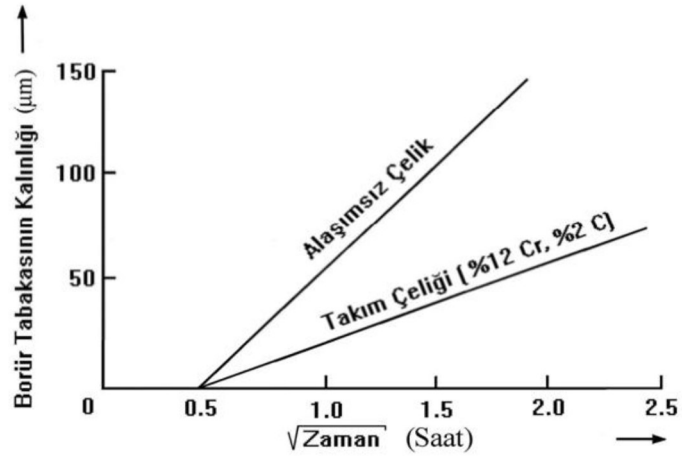
Karbon, hem oluşacak olan bor tabakasına, hem de tabaka/matris arayüzey morfolojisine etki etmektedir. Borür tabakasının hemen altındaki geçiş bölgesinde Fe_3C , $Cr_{23}C_6$, Fe_6C_3 , gibi karbürlerin oluşumuna sebep olur (zer, 2011).

Krom, ana malzemedeki krom oranının artması kromun bor'a olan ilgisinden dolayı zengin reaksiyon oluşumunu sağlar, borit derinliklerini düşürür, kaplama/yüzey arayüzeyini düzleştirerek yumuşatır (Gnen, 2012).

Yüksek nikel elemeti içeren çeliklerde i içe geçmiş dişli yapıda ve bor kalınlığında bir azalma oluşabilmektedir. Bor tabakası altında nikel yoğun bir şekilde birikir, Fe_2B tabakasından girer ve bazı durumlarda FeB tabakasından Ni_3B çökelmesini hızlandırır (Yağcı, 2009).

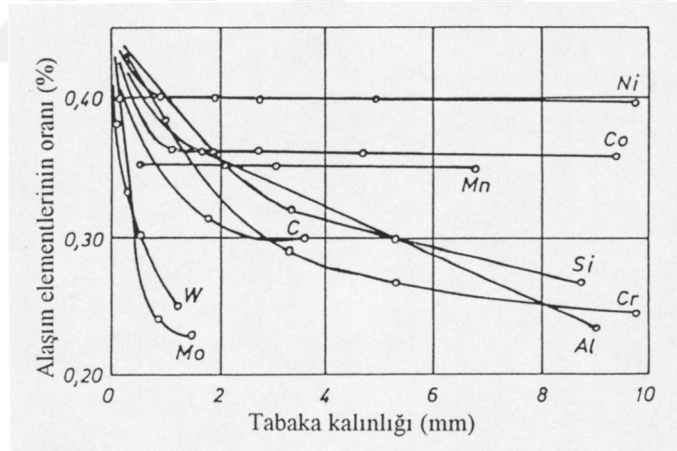
Alüminyum ve silisyum, genellikle difüzyon bölgesinde bulunarak elik içerisinde ferrit fazının meydana gelmesine neden olur. Borür tabakası ile metal arayüzeyinde $FeSi_{0.4}B_{0.6}$ ve Fe_4SiB_2 gibi bileşiklerin oluşmasına sebep olur (Galibois ve diğer., 1980).

şekil 5.9'da borlama işlemi sonrası alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde elde edilen borür tabaka kalınlıklarını gösterilmektedir.



Şekil 5.9 Alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde elde edilen borür tabaka kalınlıkları (Bozkurt, 1984)

Şekil 5.10'da borür tabakasının büyümesine alaşım elementlerinin etkisi gösterilmektedir.



Şekil 5.10 Borür tabakasına alaşım elementleri etkisi (Hunger ve True, 1994)

BÖLÜM ALTI

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında, plastik enjeksiyon kalıplarında mevcut durumda kullanılmakta olan QT (su verilmiş, temperlenmiş) kalıp çelikleri yerine görece düşük maliyetli kalıp çeliklerinin kullanılabilirliği aşınma davranışları ve mekanik özellikleri açısından incelenecektir. Mevcut durumda kullanılan düşük maliyetli C1 kalıp çeliği ve bu kalıp çeliklerine alternatif olarak seçilen görece düşük maliyetli 1.2311 (40CrMnMo7) kalıp çeliğinin basit ve ekonomik bir yüzey modifikasyon yöntemi olan kutu borlama işlemi ile aşınma davranışlarının ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi öngörülmektedir. Kutu borlama parametreleri ve seçilen çeliğin kutu borlama işlemi sonucunda sahip olacağı aşınma davranışına olan etkileri araştırılıp, optimum aşınma dayanımı için parametrelerin belirlenmesi aşamasından sonra performans testleri ile mevcut plastik kalıp çelikleri arasındaki yeri ve kullanılabilirliği değerlendirilecektir.

Bu tez çalışması temelde iki aşamadan oluşmaktadır. Birincisi kalıp çeliklerinin kompozisyonlarına göre aşınma direnci ve sertlik arasında ki ilişkinin araştırılmasıdır. İkincisi dört farklı tipteki plastik kalıp çeliği arasından en düşük maliyetli C1 plastik kalıp çeliğine ve görece düşük maliyetli 1.2311 kalıp çeliğinin kutu borlama işlemi ile borlanabilirliği ve aşınma direncine etkisi araştırılacaktır. Bu amaçlar çerçevesinde deneysel çalışmalar için endüstriden beş farklı plastik kalıp çelik malzemeler tedarik edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler çerçevesinde bulunan sonuçlar, birbirleriyle karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

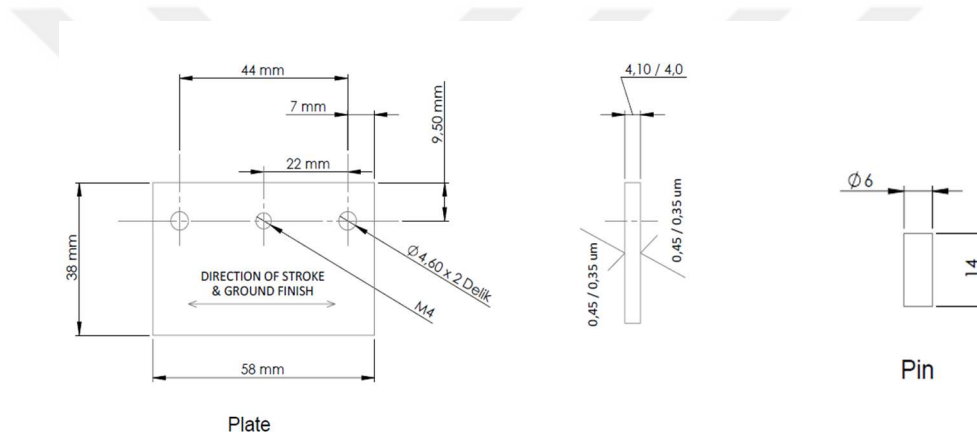
6.2 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Olan Malzemeler ve Spektral Analizleri

Deneyslerde 5 farklı tip kalıp çelik malzeme kullanılmıştır. Tedarik edilen bu malzemelerin kimyasal analizlerini saptamak için spektral analizleri yapılmıştır. Analiz neticesinde elde edilen malzeme bileşimleri Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1 Çalışmada kullanılan malzemelerin spektral analiz sonuçları

Malzeme	C	Mn	Cr	Cu	S	Si	Ni	Mo	P
C1	0,05	1,30	12,5	3,00	0,15	-	-	-	
R1	0,05	1,20	12,6	+	0,12	0,40	+	-	
I1	0,37	1,40	2,00	-	<0,010	-	1,0	0,2	
N1	0,10	2,50	3,00	-	-	0,30	1,0	0,3	
1.2311	0,43	1,46	1,88	0,11	0,001	0,32	-	0,18	0,009

Deneyel çalışmalar için hazırlanan numunelerin teknik resim çizimleri Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Aşınma deney numunelerinin teknik resimleri

6.3 Deney Numunelerinin Kodlandırılması

Aşınma deneyinde kullanılacak olan malzemelerin kodlandırılması Tablo 6.2 ve Tablo 6.3’te verilmiştir.

Tablo 6.2 Aşınma deneylerinde kullanılacak olan plakaların kodlanması

Numune	Numune Kodu	Borlama İşlemi	Zımparalama İşlemi
I1 Kalıp Çeliği	I1	-	-
N1 Kalıp Çeliği	N1	-	-
R1 Kalıp Çeliği	R1	-	-
C1 Kalıp Çeliği	C1	-	-
C2 Kalıp Çeliği	C2-B	✓	-
23111-1 Kalıp Çeliği	2311-1	-	-
2311-2-B Kalıp Çeliği	2311-2-B	✓	-

Tablo 6.3 Aşınma deneylerinde kullanılacak olan aşındırıcı uçların (pin) kodlanması

Numune	Numune Kodu	Borlama İşlemi	Zımparalama İşlemi
NP1 Aşındırıcı Çelik Uç	NP1	-	✓
NP2 Aşındırıcı Çelik Uç	NP2	-	✓
NP3 Aşındırıcı Çelik Uç	NP3	-	✓
NP4 Aşındırıcı Çelik Uç	NP4	-	✓
NP5 Aşındırıcı Çelik Uç	NP5	-	✓
NP6 Aşındırıcı Çelik Uç	NP6	-	✓
NP7 Aşındırıcı Çelik Uç	NP7	-	✓
NP8 Aşındırıcı Çelik Uç	NP8	-	✓
NP9 Aşındırıcı Çelik Uç	NP9	-	✓
NP10 Aşındırıcı Çelik Uç	NP10	-	✓
NP11 Aşındırıcı Çelik Uç	NP11	-	✓
NP12 Aşındırıcı Çelik Uç	NP12	-	✓
NP13 Aşındırıcı Çelik Uç	NP13	-	✓
NP14 Aşındırıcı Çelik Uç	NP14	-	✓

6.4 Deneysel Çalışmalar ve Kullanılan Cihazlar

6.4.1 Optik ve Metal Mikroskop

Endüstriden tedarik edilen kalıp çeliklerinin mikroyapı incelemeleri için Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan Nikon-ECLIPSE marka ME600D model optik mikroskopu kullanılmıştır. Endüstriden metalografik incelemeler için ayrıca numune tedarik edilmiştir. Bu numunelere aşağıda ki işlemler uygulanmıştır.

1. Epoksi kalıba alma
2. Zımparalama ve parlatma
3. Dağlama
4. Mikroyapı incelemesi

Mikroyapı görüntüleri 20x ve 50x objektif kullanılarak alınmıştır.



Şekil 6.2 Metalografik inceleme için kullanılan optik mikroskop (Kişisel arşiv, 2020)

6.4.2 Stereo Mikroskop

Bu tez çalışmasında endüstriden tedarik edilen kalıp çeliklerinin Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan ZEISS marka Stereo Mikroskop ile aşınma deneyi öncesi ve sonrası yüzey görüntülerinin fotoğrafları çekilmiştir. Aşınma deneyi sonrasında malzemelerin aşınma izi görüntülenmiştir.



Şekil 6.3 Aşınma deneyi öncesi ve sonrası yüzey görüntüleri için kullanılan stereo mikroskop (Kişisel arşiv, 2020)

6.4.3 X-Işınları Difraksiyonu ve Kristal Yapı (XRD) Analiz Cihazı

Borlanmış malzemelerin XRD analizleri Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği X Işınları Kırınım Laboratuvarı'nda bulunan RIGAKU marka D/Max-2200/PC model XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir. X-ışını difraksiyon analizi, borlama işlemi sonrası 2311-2-B ve C2-B kalıp çeliklerinin yüzeyinde oluşan borür tabakasının karakterizasyon tespiti için yapılmıştır. Malzemelerde kristal yapının ve oluşan bileşiklerin tespiti için X-ışınları difraksiyon paternlerinden yararlanılmıştır.



Şekil 6.4 X-Işınları difraksiyonu ve kristal yapı (XRD) analiz cihazı (Kişisel arşiv, 2020)

6.4.4 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı

Malzemelerin yüzey topografyasının, yüzey pürüzlülük değerlerinin bilinmesi ve morfolojik kalitenin tespit edilmesi önemlidir. Mühendislik uygulamalarında kullanılan parçalarda birbirleriyle temas eden yüzeylerin pürüzlü olması, yüzeyler arasındaki sürtünmeyi artırır ve bu durum ısı oluşturur. Bunun sonucunda yüzeylerde aşınma meydana gelir ve çalışma verimi azalır. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında kullanılacak olan endüstriden tedarik edilen kalıp çeliklerinin Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Triboloji Laboratuvarı'nda bulunan MITUTOYA XP-2 yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak borlama işlemi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Aynı zamanda aşınma deneyi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Sabit yüzey pürüzlülüğü sağlamak amacıyla aşındırıcı uç (pin) şeklinde tedarik edilen malzemeler tek yönde 80-240-400 gritlik SiC zımpara kağıdı ile zımparalanarak yüzey pürüzlülüğü ölçümü için hazır hale getirilmiştir. Plaka şeklinde tedarik edilen kalıp çeliklerine zımparalama işlemi uygulanmadan kalıplarda kullanılan talaşlı imalat yüzey hali ile yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmıştır.

Deney numunelerinin kalıp aşınmasına karşılık gelen işleme boyu esas alınarak paralel ve dik olarak beş farklı bölgeden eksenleri boyunca ölçüm yapılarak alınan ortalama yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir.



Şekil 6.5 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı (Kişisel arşiv, 2020)

6.4.5 Mikrosertlik Test Cihazı

Endüstriden tedarik edilen I1,N1,R1,C1,2311-1 kalıp çeliklerine, sertlik testinden önce gerekli zımpara işlemleri uygulanmıştır. Zımpara işlemi sırasıyla 240, 400, 800, 1200 gritlik zımpara kağıtları ile yapılmıştır. Zımparalama işlemi uygulandıktan sonra numune yüzeyleri 3 μ m elmas pasta ile parlatma işlemine tabi tutulmuş ve daha sonra etanol ile yüzeyleri temizlenerek kurutulmuştur. Numunelerin sertlik ölçümleri Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan Mikro Vickers SHIMADZU HVM marka mikro sertlik ölçme cihazında 1 kilogram (1 HV) yük altında 10 saniye bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Her deney malzemesi için 5 sertlik ölçümü yapılmıştır ve yapılan bu ölçümlerin ortalama değerleri alınarak, kaydedilmiştir. Borlama işlemine tabi tutulan C2-B 0,025 ve 2311 kalıp çelikleri için borlama işlemi sonrası sertlik ölçümü 0,05 kg yük altında 10 saniye süreyle uygulanmıştır ve numune yüzeylerinin farklı bölgelerinden 3'er kez ölçüm alınmış ve yapılan bu ölçümlerin ortalama değerleri alınarak kaydedilmiştir.

Sertlik deneyleri “ASTM E92-72 Metalik Malzemelerin Vickers Sertliği için Standart Test Yöntemi” standardına göre uygulanmıştır. Numune sertlikleri aşağıda verilen eşitlik kullanılarak yapılmıştır.

$$VSD = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (6.1)$$

Yukarıda verilen eşitlikte F uygulanan yük değerini (N); d izlere ait taban köşegen uzunluk değerlerinin ortalamalarını göstermektedir (Smith, (1990)).



Şekil 6.6 Sertlik ölçümlerinin alındığı mikrosertlik cihazı (Kişisel arşiv, 2020)

6.4.6 Aşınma Test Cihazı

Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Triboloji Laboratuvarı'nda bulunan Plint Tribology marka TE 88 model “pin-on-plate” modunda aşınma deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Endüstriden tedarik edilen kalıp çelikleri kullanılarak yağlı ve yağsız ortamda aşınma deneyi yapılmıştır. Bu tez çalışmasında aşınma testi “Ball on plate” deney modu olarak yapılmıştır. “Ball” olarak endüstriden tedarik edilen aşındırıcı silindirik uç, “plate” olarak çelik plakalar kullanılmıştır.

6.4.6.1 Kuru Ortamda Yapılan Aşınma Deneyi

Aşındırıcı uç olarak kullanılan N-aşındırıcı uç çeliğine karşı sırasıyla I1, N1, R1, C1 çelik plakalar karşı malzeme olarak çalıştırılmıştır. Her bir çelik plaka malzeme için ayrı ayrı N-aşındırıcı uç kullanılmıştır. Kullanılacak olan her bir N- aşındırıcı uç için sırasıyla 80-240-400 gritlik zımpara kağıtları ile yüzey zımparalama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra bu numuneler etanol ile yüzey temizliği yapıldıktan sonra kurutma işlemine tabi tutulmuştur.

Plaka şeklinde tedarik edilen malzemelere zımparalama işlemi uygulanmadan kalıplarda kullanılan talaşlı imalat yüzey hali ile aşınma deneyi yapılmıştır. Hassas terazi ile aşınma deneyi öncesi ve sonrası her bir N-aşındırıcı uç ve plaka numunesinin ağırlıkları gr cinsinden ölçülmüştür. Malzemelerin aşınma deneyi öncesi ve sonrasında ağırlık kayıplarını ölçmek için kullanılan hassas terazinin resmi Şekil 6.7’de gösterilmiştir.

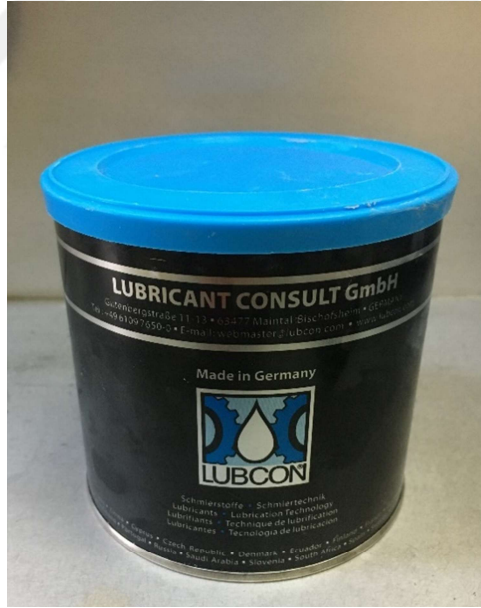
6.4.6.2 Yağlayıcı Ortamda Yapılan Aşınma Deneyi

Hassas terazi ile aşınma deneyi öncesi ve sonrası her bir N-aşındırıcı uç çeliğinin ve her bir çelik plakanın ağırlıkları gr cinsinden ölçülmüştür. Daha sonra çelik plakaların üzerine endüstriden tedarik edilen LUBCON marka Turmotemp II/400 KL + 260°C ‘ye kadar optimum oksidasyon ve termal kararlılık gösteren, düşük buhar basıncı ve yüksek dielektrik özellikleri ile tüm malzemelerle uyumluluk sağlayan toksik ve yanıcı olmayan gres yağ (mekanik parçaların rahatça işlenebilmesi ve aşınmanın önlenmesi için endüstrilerde kullanılan viskokiziteyi arttırıcı yağ) sürülmüştür. İnce bir tabaka halinde yağ sürüldükten sonra çelik plakaların yağlı ağırlıkları gr cinsinden ölçülmüştür. Deney için kullanılan endüstriyel yağın resmi Şekil 6.8’de gösterilmiştir.

Aşınmaya karşı en etkili, basit ve maliyet açısından en ekonomik yöntemlerden biride yağlamadır. Aşınmayı önlemek için kullanılan yağların kayma mukavemetleri düşük olmalı, kullanıldığı yerde korozyif etki yaratmamalı, bu yağlar malzeme yüzeyinde oksit tabakasına sebebiyet vermemelidir (Sarıkaya, 2007).



Şekil 6.7 Deney malzemelerinin ağırlık ölçümünde kullanılan hassas terazi (Kişisel arşiv, 2020)



Şekil 6.8 Aşınma deneyi için kullanılan yağ (Kişisel arşiv, 2020)

Malzemeler aşınma cihazında yer alan tablaya yerleştirildikten sonra parametreler doğrultusunda aşınma deneyi başlatılmıştır. Aşınma cihazının bağlı olduğu Component 2000 programı çalıştırıldıktan sonra stroke değeri 25mm olarak girilmiştir.

Buna göre 50mm yol gidip gelinmiş, 1 turda 100mm yol alınmıştır. Etki eden yük cihazda 10N olarak ayarlanıp sisteme girilmiştir. Bu durum için etki eden nominal yük 89N'dur. Sıcaklık 40 C°, frekans değeri 1.0 Hz'e (1/sn) olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu da dakikada 60 devir motorun dönmesi anlamına gelir. 100 saniyede 10.000 mm yol kat edilmiştir. Aşınma deneyi sonrası malzemelerin yüzey profilometresi ile aşınan yüzeylerin aşınma izlerinin ölçümü yapılmıştır. Daha sonra Stereo Mikroskop ile aşınan yüzeylerin fotoğrafları çekilmiştir.



Şekil 6.9 Aşınma deneyinde kullanılan aşınma cihazı (Kişisel arşiv, 2020)



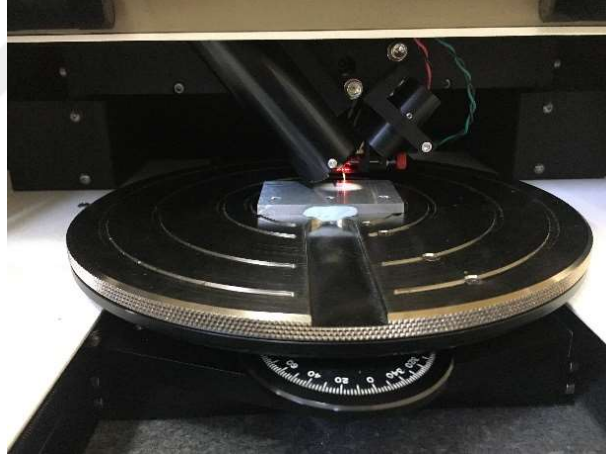
Şekil 6.10 Çelik plaka ve aşındırıcı uçların aşınma deney cihazına yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2020)

6.4.7 Yüzey Profilometresi Ölçüm Cihazı

Bu tez çalışmasında Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan Ambios Technology XP-2 yüksek çözünürlüklü yüzey profilometresi kullanılmıştır. Aşınma deneyi sonrasında her bir çelik plaka için profilometre cihazında aşınma derinlikleri ve aşınma genişlikleri ölçülerek aşınma alanları hesaplanmıştır. Ölçümler, malzeme yüzeyinin 3 farklı bölgesinden yapılmıştır.



Şekil 6.11 Yüzey profilometre cihazı (Kişisel arşiv, 2020)



Şekil 6.12 Çelik plakaların yüzey profilometre cihazında ölçümlerinin yapılması (Kişisel arşiv, 2020)

6.4.8 Kutu Borlama İşlemi

6.6.8.1 Kutu Borlama Fırını

Bu tez çalışmasında, borlama işlemi Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan dijital kontrollü PROTHERM marka kutu fırın kullanılarak yapılmıştır. İşlemlerin yapıldığı fırın Şekil 6.13'te gösterilmektedir.



Şekil 6.13 Borlama işleminde kullanılan borlama fırını (Kişisel arşiv, 2020)

6.6.8.2 Borlama Kutusu

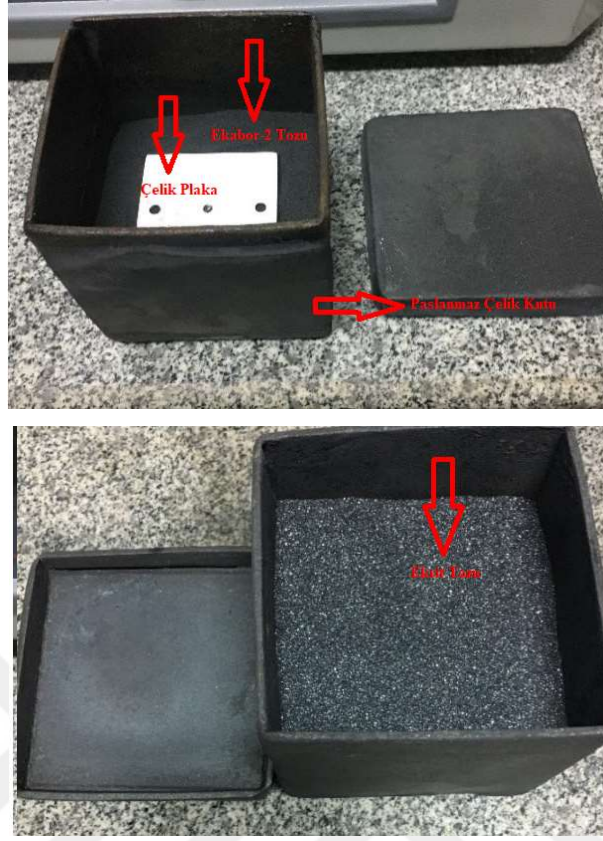
İşlemden kullanılan paslanmaz çelik kutuya ait resim Şekil 6.14'te gösterilmiştir.



Şekil 6.14 Borlama işleminde kullanılan borlama kutusu (Kişisel arşiv, 2020)

Deneyisel çalışmalar için borlanacak kalıp çelikleri plaka şeklinde tedarik edilmiştir. Çelik kutu içerisine Ekabor-2 bor tozu ile beraber toplam 2 adet numune (1 adet 2311-plaka çelik malzeme ve 1 adet C-plaka çelik malzeme) konumlandırılmıştır. Paslanmaz çelik kutu tabanından 2 cm seviyesine kadar endüstriden tedarik edilen ticari Ekabor-II® bor tozu doldurulduktan sonra çelik plakalar kendi arasında ve kutudan en az 2 cm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Her bir çelik plaka malzeme konumlandırıldıktan sonra üzerine tekrardan Ekabor-2 bor tozu ilave edilmiştir. En son çelik malzemelere oksitin ulaşmaması için ticari Ekrit tozu ilave edilmiştir. Borlama işlemi 4 saat süre 850 °C’de gerçekleştirilmiştir.

Bor kaynağı ticari olarak kullanılan Ekabor-2 ve deoksidan olarak kullanılan Ekrit tozu Vezneli A.Ş. tarafından tedarik edilmiştir. Ekabor-2’nin içeriği; B_4C - SiC - KBF_4 şeklindeki bir bor sağlayıcı bileşiktir. Bu bor tozuna ait tane büyüklük boyutları 75 – 106 μm aralığındadır. Ekrit’in içeriği; saf demir ve oksit tutucu bileşenlerden oluşmaktadır. Ekabor-2 ve Ekrit’in bileşen oranları Vezneli A.Ş. (Salihli - Manisa) firması tarafından tarafımıza verilmemiştir.



Şekil 6.15 Borlama işleminde kullanılacak kalıp çeliklerinin paslanmaz çelik kutuya yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2020)



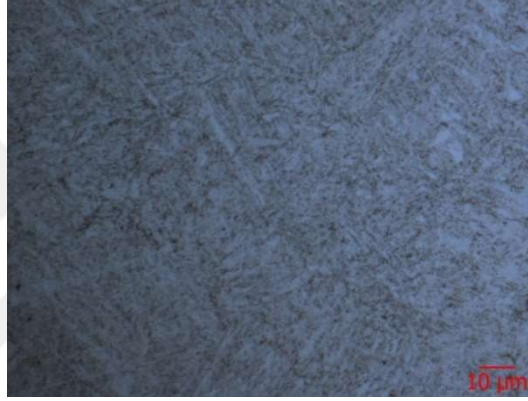
Şekil 6.16 Numunelerin borlama işlemi için kutu fırına yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2020)

BÖLÜM YEDİ

DENEYSEL SONUÇLAR

7.1 Metalografik İnceleme Sonuçları

Numunelerin mikroyapılarını incelemek amacıyla optik ve metal mikroskop aracılığıyla farklı dağlama süreleri ve büyütmelerde görüntüler çekilerek mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.



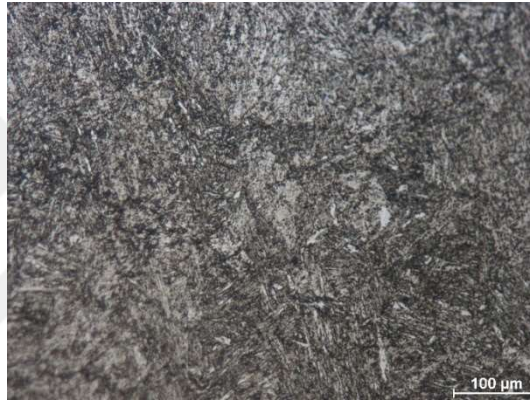
Şekil 7.1 I kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye %2 nital dağlanmış metal mikroskop görüntüsü



Şekil 7.2 I kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye %2 nital dağlanmış optik mikroskop görüntüsü



Şekil 7.3 I kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 1 dakika %2 nital dağlanmış metal mikroskop görüntüsü



Şekil 7.4 I kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 1 dakika %2 nital dağlanmış optik mikroskop görüntüsü

Şekil 7.1’de ve 7.2’de I kalıp çeliğinin az dağlanmış, Şekil 7.3’ ve 7.4’de çok dağlanmış içyapı görüntüsü çekilmiştir. Çelikler, temperlenmiş ve su verilmiş olarak (quenching and tempering, QT) tedarik edildiğinden dolayı çok dağlanmış mikroyapı görüntüsünden yapının temperlenmiş martenzit yapı olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 7.1 I kalıp çeliğinin kimyasal kompozisyonu

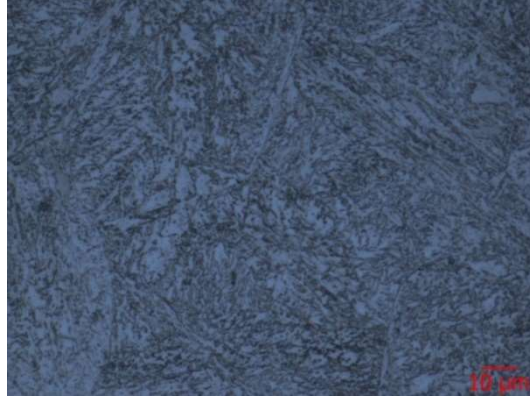
Malzeme	C	Mn	Cr	Cu	S	Si	Ni	Mo	P
II	0,37	1,40	2,00	-	<0,010	-	1,0	0,2	-



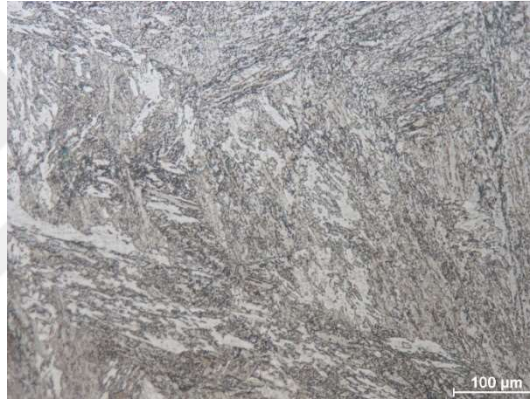
Şekil 7.5 N kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye % 2 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü



Şekil 7.6 N kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye % 2 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü



Şekil 7.7 N kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 1 dakika %2 nital dağlanmış metal mikroskop görüntüsü



Şekil 7.8 N kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 1 dakika %2 nital dağlanmış optik mikroskop görüntüsü

Şekil 7.5 ve 7.6’da N kalıp çeliğinin az dağlanmış, Şekil 7.7 ve 7.8’de çok dağlanmış içyapı görüntüsü çekilmiştir. Dağlama süresindeki farklılık ile matris fazı elde edilmiştir. N kalıp çeliğinin mikroyapısında, ferrit+sementit kümelerinden oluşan Widmanstatten mikroyapısı gözlenmiştir.

Tablo 7.2 N kalıp çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Malzeme	C	Mn	Cr	Cu	S	Si	Ni	Mo	P
N	0,10	2,50	3,00	-	-	0,30	1,0	0,3	-



Şekil 7.9 R kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye %2 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü



Şekil 7.10 R kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye % 2 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü



Şekil 7.11 R kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 2 dakika % 3 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü



Şekil 7.12 R kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 2 dakika % 3 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü

Şekil 7.9 ve 7.10’da R kalıp çeliğinin az dağlanmış, Şekil 7.11 ve 7.12’de çok dağlanmış içyapı görüntüsü çekilmiştir. Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde üç farklı yapı görülmüştür. Birinci yapı az dağlama ile bile belirgin olarak gözlemlenen yapıya dağınık bir şekilde dağılmış yuvarlak noktalar halinde kısa hatlar oluşturan görünümündedir. Dağlama miktarı artınca daha koyu bir şekilde belirginleşmiştir. İkinci yapı, çok dağlanmış yapıda gözlemlenen dağlayıcıdan etkilenmemiş beyaz faz bölgeleridir. Üçüncü yapı ise ana matris yapısıdır.

Tablo 7.3 R kalıp çeliğinin kimyasal kompozisyonu

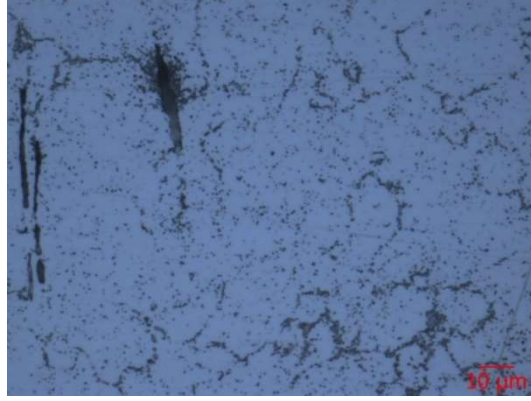
Malzeme	C	Mn	Cr	Cu	S	Si	Ni	Mo	P
R1	0,05	1,20	12,6	+	0,12	0,40	+	-	-



Şekil 7.13 C kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye % 2 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü



Şekil 7.14 C kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye % 2 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü



Şekil 7.15 C kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 3 dakika % 3 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü



Şekil 7.16 C kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 3 dakika % 3 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü

Şekil 7.13 ve 7.14’te C kalıp çeliğinin az dağlanmış, Şekil 7.15 ve 7.16’da çok dağlanmış içyapı görüntüsü çekilmiştir. Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde üç farklı yapı görülmüştür. Birinci yapı az dağlama ile belirgin olarak gözlemlenen yapıda dağınık bir şekilde dağılmış çizgisel hatlar görünümündedir. Dağlama miktarı artınca bu bölgeler daha koyu bir şekilde belirginleşmiştir. İkinci yapı, çok dağlanmış yapıda gözlemlenen dağlayıcıdan etkilenmiş çoğunlukla birinci yapının etrafında yer almakla birlikte nokta nokta dallanma şeklinde ortaya çıkmış faz bölgeleridir. Üçüncü yapı ise ana matris yapısıdır.

Tablo 7.4 C kalıp çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Malzeme	C	Mn	Cr	Cu	S	Si	Ni	Mo	P
C1	0,05	1,30	12,5	3,00	0,15	-	-	-	-



Şekil 7.17 2311-1 kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye %2 nital ile dağlanmış metal mikroskop görüntüsü



Şekil 7.18 2311-1 kalıp çeliğinin 50x objektif ile alınan 30 saniye %2 nital ile dağlanmış optik mikroskop görüntüsü

Şekil 7.17 ve 7.18’te 2311-1 kalıp çeliğinin %2 nital çözeltisinde 30 saniye bekletilerek elde edilen dağlama görüntüsü incelendiğinde 2311-1 kalıp çeliği temperlenmiş ve su verilmiş olarak (quenching and tempering, QT) tedarik edildiğinden dolayı yapının temperlenmiş martenzit yapı olduğu gözlemlenmiştir.

Bu yapıda martenzitin temperlenmesi sonucu ince yapılı ferrit ve perlit taneleri ile oluşan temperlenmiş martenzitik yapı görülmektedir.

Tablo 7.5 2311 kalıp çeliğinin kimyasal kompozisyonu

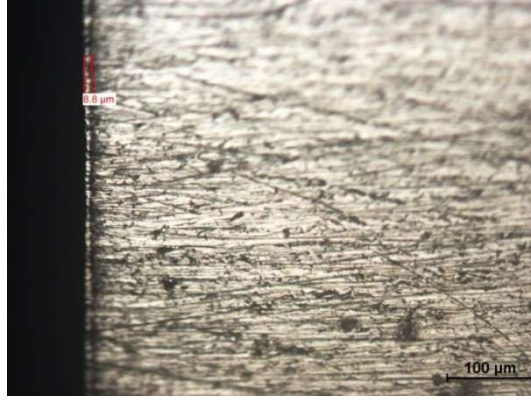
Malzeme	C	Mn	Cr	Cu	S	Si	Ni	Mo	P
1.2311	0,43	1,46	1,88	0,11	0,001	0,32	-	0,18	0,009

7.2 Kutu Borlama Deneyi Sonuçları

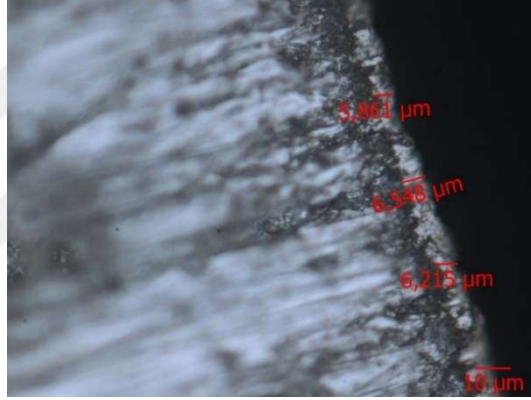
7.2.1 Metalografik İnceleme ve Tabaka Kalınlığı Sonuçları

Borlama işlemine tabi tutulacak C2-plaka ve 2311-2 plaka malzemelerinin zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra %2'lik Nital çözeltisine 30 saniye daldırılarak dağlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Dağlanan numuneler saf alkolle temizlenerek optik mikroskop analizine alınmıştır. Optik ve metal mikroskop ile mikroyapı görüntüleri çekilmiş ve bor tabakası kalınlıkları ölçülmüştür. Optik incelemeler neticesinde borür tabakasının, numuneler üzerinde homojen bir şekilde oluştuğu saptanmıştır. Borür tabakasının kalınlığının, numunelere göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

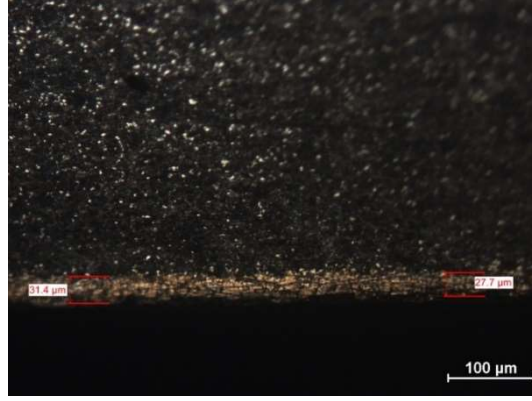
Metalografik olarak hazırlanan ve kesiti incelenen C2-B ve 2311-2-B kalıp çeliğinin kimyasal bileşimine göre oluşan borür tabaka kalınlıkları Şekil 7.19, Şekil 7.20, Şekil 7.21, Şekil 7.22 ve Şekil 7.23'te görülmektedir.



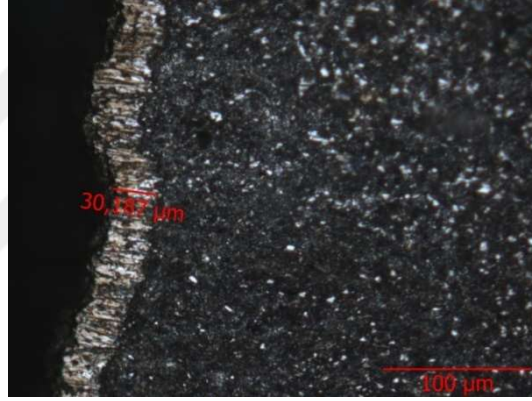
Şekil 7.19 850 °C 4 saat borlanmış C2-B kalıp çeliğinin 20x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü ve tabaka kalınlığı gösterimi



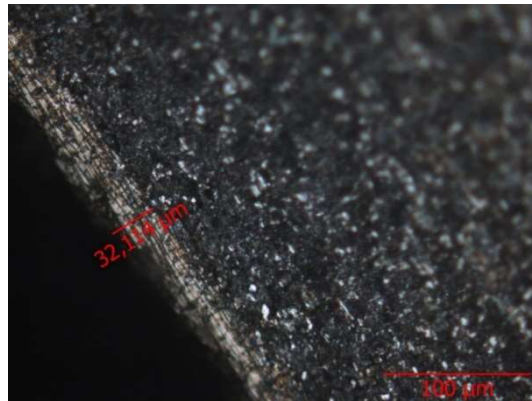
Şekil 7.20 850 °C 4 saat borlanmış C2-B kalıp çeliğinin 50x büyütmede alınan objektif metal mikroskop görüntüsü ve tabaka kalınlığı gösterimi



Şekil 7.21 850 °C 4 saat borlanmış 2311-2-B kalıp çeliğinin 20x objektif ile alınan optik mikroskop görüntüsü ve tabaka kalınlığı gösterimi (Zımparalandıktan sonra borlanmış yüzeyin kesit görüntüsü)



Şekil 7.22 850 °C 4 saat borlanmış 2311-2-B kalıp çeliğinin 20x objektif ile alınan optik mikroskop görüntüsü ve tabaka kalınlığı gösterimi (Zımparalanmadan borlanmış yüzeyin kesit görüntüsü)

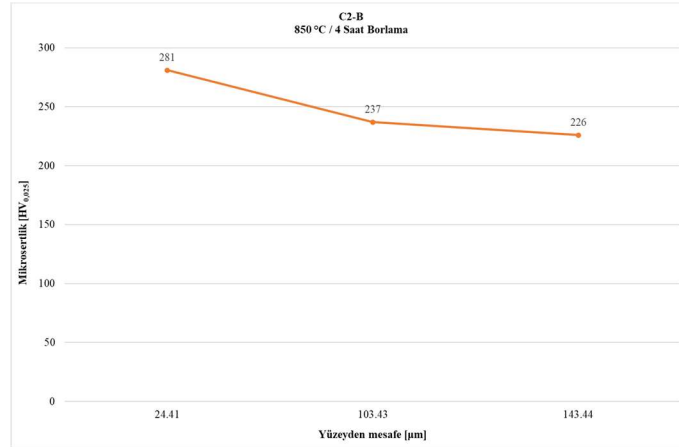


Şekil 7.23 850 °C 4 saat borlanmış 2311-2-B kalıp çeliğinin 20x objektif ile alınan optik mikroskop görüntüsü ve tabaka kalınlığı gösterimi (Zımparalandıktan sonra borlanmış yüzeyin kesit görüntüsü)

850°C’de 4 saat kutu borlama işlemi yapılan kalıp çeliklerinin optik mikroyapıları ve tabaka kalınlığı sonuçları incelendiğinde farklı kalınlıklarda borür tabakası oluşumu gözlemlenmiştir. Bor tabakalarının yapıları incelendiğinde 850°C de 4 saat süresince yapılan borlama işleminde en fazla tabaka kalınlığı 32,114 µm ile 2311-2-B kalıp çeliği malzemesinde, en az tabaka kalınlığı ise 5,861 µm ile C2-B kalıp çeliğinde elde edilmiştir. Oluşan borür tabakasının düz ve daha ince bir yapıda olmasının 2311-2-B ve C2-B kalıp çeliklerinin yüksek oranda alaşım elementi içermesi ve bu elementlerin difüzyon işlemini zorlaştırdığı düşünülmektedir.

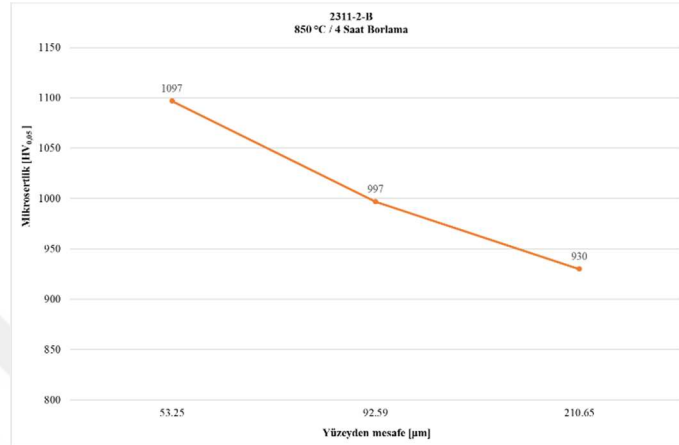
7.2.3 Bor Kaplamanın Sertlik Ölçüm Sonuçları

Metalografik olarak hazırlanan ve kesiti incelenen C2-B ve 2311-2-B kalıp çeliklerinin sertlik ölçümleri 0,05 ve 0,025 gram yük altında 10 saniye bekletilerek mikro sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Borlanan kalıp çelikleri için 3 sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik değerleri Şekil.7.24 ve Şekil 7.25’de verilmiştir.



Şekil 7.24 C2-B kalıp çeliğinin borlama işlemi sonrası yüzey mesafe-sertlik ölçümü

C2-B kalıp çeliğın borlama işlemlı yüzey mesafe-sertlık ölçümü Şekil 7.24’de görölmektedir. Matris sertliğı ise deney öncesi ölçölmüş olup 315 HV₁ değeriindedir. Yüzey-mesafe sertlık ölçümü sonucunda en yüksek sertlık değeri yüzeye en yakın mesafeden alınan 24,41 µm ‘de 281 HV_{0,025} olarak tespit edilmiştir.

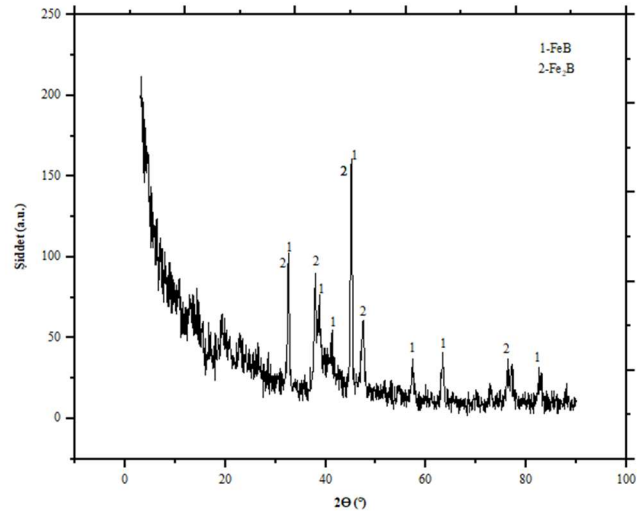


Şekil 7.25 2311-2-B kalıp çeliğının borlama işlemlı yüzey mesafe-sertlık ölçümü

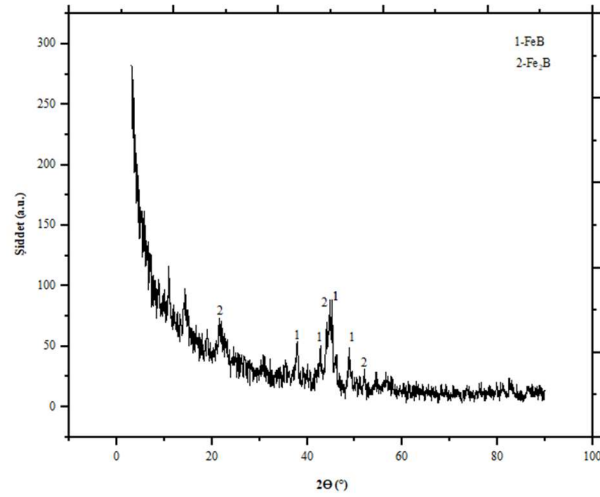
2311-2-B kalıp çeliğın yüzey mesafe-sertlık ölçümü Şekil 7.25’te görölmektedir. Matris sertliğı ise deney öncesi ölçölmüş olup 371 HV₁ değeriindedir. Yüzey-mesafe sertlık ölçümü sonucunda en yüksek sertlık değeri yüzeye en yakın mesafeden alınan en yüksek sertlık değeri yüzeye en yakın mesafeden alınan 53,25 µm ‘de 1097 HV_{0,05} olarak tespit edilmiştir.

7.2.4 Bor Kaplamanın X-Işınları Difraksiyonu ve Kristal Yapı (XRD) Sonuçları

Borlanan C2-B kalıp çeliğının ve 2311-2-B kalıp çeliğının X-ışınları analizi sonucunda FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğı gözlemlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar ve sonuçlar baz alındığında, XRD paternlerinin sonuçlarının literatür ile benzerlikler gösterdiği ve uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Her iki deney numunesine ait analiz sonuçları Şekil 7.26 ve Şekil 7.27’de verilmiştir.



Şekil 7.26 850 °C 4 saat borlanmış C2-B kalıp çeliği X-ışınları difraksiyon paterni



Şekil 7.27 850 °C 4 saat borlanmış 2311-2-B kalıp çeliği X-ışınları difraksiyon paterni

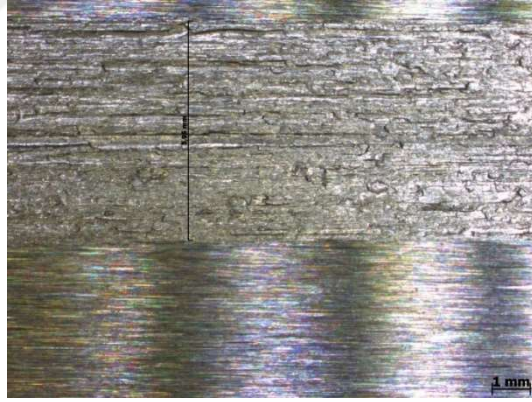
2311-2-B ve C2-B kalıp çeliklerinde elde edilen bor tabakalarının iki farklı fazdan oluştuğu, bu fazların ağırlıklı olarak FeB ve Fe₂B fazları olduğu tespit edilmiştir. İki farklı kalıp çeliği numunesinin kimyasal kompozisyonları birbirinden farklı olduğu için elde edilen XRD paternlerinin bu etkiye bağlı olarak farklı olduğu ortaya konmuştur.

7.3 Aşınan Yüzeylerin İncelenmesi

12x büyütmede çekilen görüntüler sonucunda aşınma izlerinin ortamın kuru ve yağlı olmasına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.



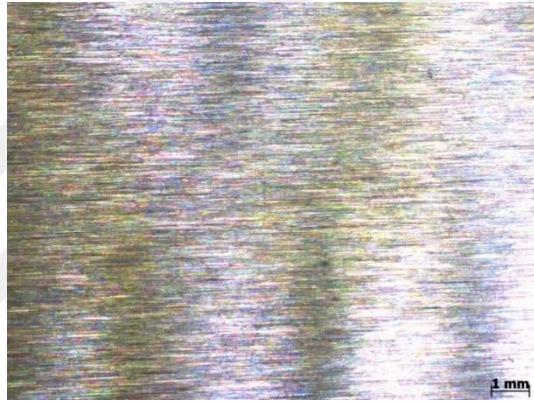
Şekil 7.28 I1 kalıp çeliği aşınma deneyi öncesi yüzey görüntüsü



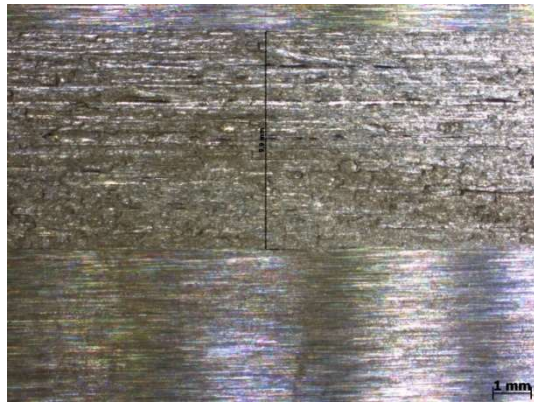
Şekil 7.29 I1 kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (5,95 mm aşınma izi)



Şekil 7.30 I1 kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (0,41 mm aşınma izi)



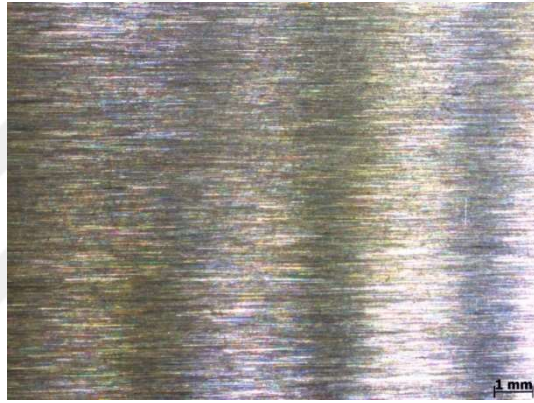
Şekil 7.31 N1 kalıp çeliği aşınma deneyi öncesi yüzey görüntüsü



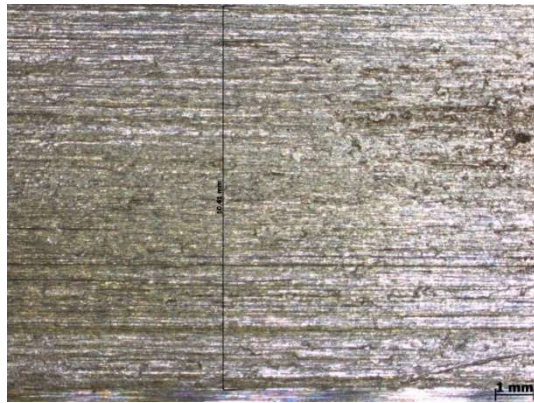
Şekil 7.32 N1 kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (5,90 mm aşınma izi)



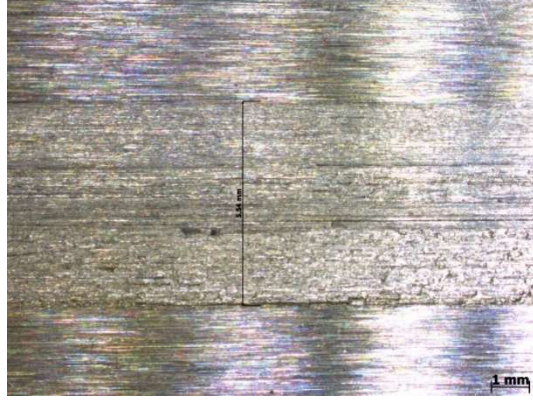
Şekil 7.33 N1 kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (0,46 mm aşınma izi)



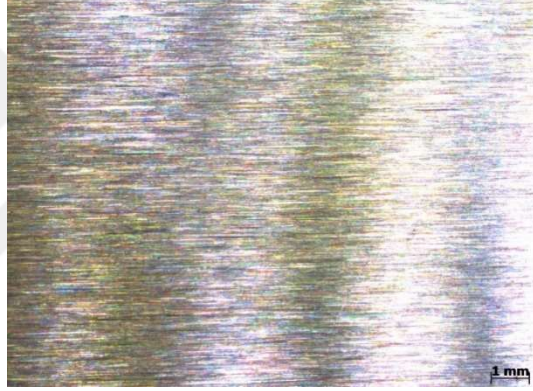
Şekil 7.34 R1 kalıp çeliği aşınma deneyi öncesi yüzey görüntüsü



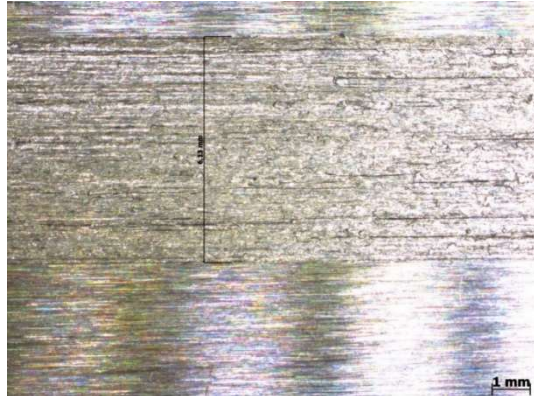
Şekil 7.35 R1 kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (6,00 mm aşınma izi)



Şekil 7.36 R1 kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (5,54 mm aşınma izi)



Şekil 7.37 C1 kalıp çeliği aşınma deneyi öncesi yüzey görüntüsü



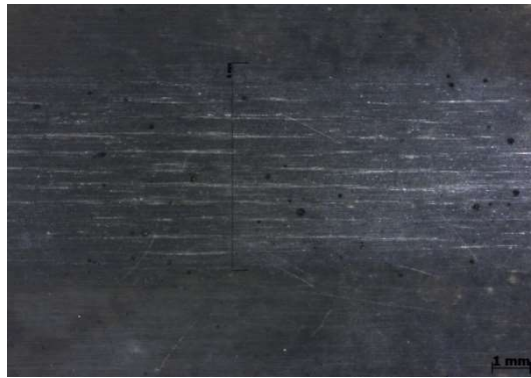
Şekil 7.38 C1 kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (6,00 mm aşınma izi)



Şekil 7.39 C1 kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (0,52 mm aşınma izi)



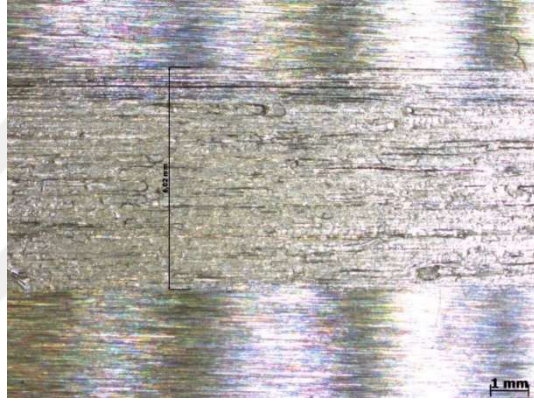
Şekil 7.40 C2-B kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (4,96 mm aşınma izi)



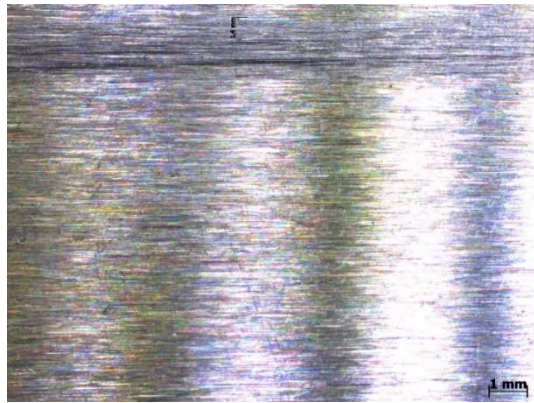
Şekil 7.41 C2-B kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (6,00 mm aşınma izi)



Şekil 7.42 2311-1 kalıp çeliği aşınma deneyi öncesi yüzey görüntüsü



Şekil 7.43 2311-1 kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (6,00 mm aşınma izi)



Şekil 7.44 2311-1 kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (1,60 mm aşınma izi)



Şekil 7.45 2311-2-B kalıp çeliği yağsız aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (2,40 mm aşınma izi)



Şekil 7. 46 2311-2-B kalıp çeliği yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey görüntüsü (2,59 mm aşınma izi)

Yağlayıcı ortamda aşınma deneyi yapılan numunelerin kuru ortamda yapılan aşınma deneyi numunelerine göre aşınma izlerinin daha dar olduğu belirlenmiştir. Borlama işlemi uygulanmış C2-B ve 2311-2-B çelik plakaların borlama işlemi öncesinde kuru ortamda yapılan aşınma deneyi numunelerine göre aşınma izlerinin daha dar olduğu belirlenmiştir. Fakat borlama işlemi uygulanmış C2-B ve 2311-2-B çelik plakaların borlama işlemi uygulanmadan yağlayıcı ortamda yapılan aşınma deneyi numunelerine göre aşınma izlerinin daha geniş olduğu belirlenmiştir. Borlama işlemi uygulanmamış yüzeylerin aşınmaya daha fazla maruz kaldığı ve aşınma izlerinin daha belirgin olduğu görülmektedir.

7.4 Yüzey Kalitesi ve Sertlik Sonuçları

Yüzey pürüzlülük testinde ortalama yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Malzemenin beş farklı noktasından ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin Ra ve Rz değerlerinin ortalaması alınmıştır. Aşırı sapma gösteren veya hatalı olduğu düşünülen deneyler tekrar edilmiştir.

Firma tarafından tedarik edilen aşınma deneyi için aşındırıcı uç (pin) olarak kullanılacak olan N-pin numunelerine, deney sırasında plaka şeklinde tedarik edilen karşı malzeme olarak çalışacak her bir kalıp çeliği için karşı düz bir yüzey sağlamak amacı ile önce kalıba alınıp daha sonra sırasıyla 80,240,400 grit SiC zımpara kağıtları ile zımpara işlemi uygulanmıştır. Daha sonra yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Çelik plakalardan alınan yüzey pürüzlülük ölçümleri, firma tarafından talaşlı imalat sonrası kalıp yüzey işlem kalitesinde tarafımıza ulaştırılan ve talaşlı imalat sonrası kalıp yüzey işlem kalitesindeki plakalardan alınan ölçümlerdir. Bu yüzey işlem kalitesi firma tarafından kalıplarda kullanılan yüzey işlem kalitesidir. Plakalara ait yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları aşağıda ki tablo ve şekillerde verilmiştir.

Tablo 7.6 N-aşındırıcı uç yüzey pürüzlülük ortalama değerleri

Yüzey Pürüzlülük Değerleri	Ra (μm)	Rz (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)
Numune Adı	Paralel Ölçüm (μm)	Paralel Ölçüm (μm)	Dik Ölçüm (μm)	Dik Ölçüm (μm)
N-Pin Aşındırıcı uç	0,538	2,706	0,490	2,916

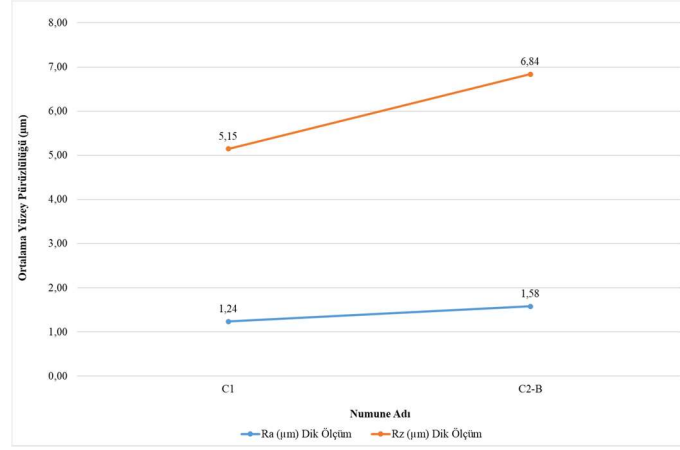
Tablo 7.7 ve 7.8’de borlama işlemi öncesi ve sonrasında çelik plakaların yüzeylerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri yer almaktadır. Borlama işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Burada ki amaç borlama işlemi sonrası yüzeyin işleminden dolayı yüzeyinde kalan tozların malzeme topografyasını ve yüzey işlem kalitesini etkilediğini ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ile ortaya koymaktır.

Tablo 7.7 Çelik plakaların deney öncesi yüzey pürüzlülük ortalama değerleri ve sertlik değerleri

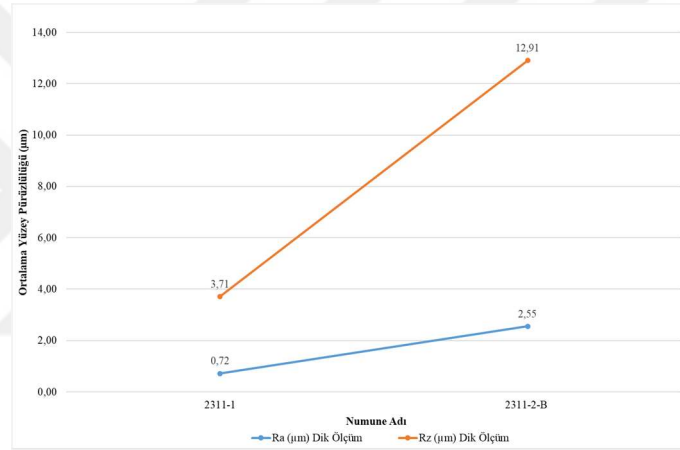
Yüzey Pürüzlülük	Ra (μm)	Rz (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)	Sertlik (HV₁)
Numune Adı	Paralel Ölçüm (μm)	Paralel Ölçüm (μm)	Dik Ölçüm (μm)	Dik Ölçüm (μm)	
I1	0,27	1,22	1,00	4,53	411
N1	0,28	1,33	0,83	4,07	428
R1	0,31	1,38	0,94	4,63	344
C1	0,33	1,31	1,23	5,14	336
C2-B	0,91	4,03	1,58	6,83	766
2311-1	0,34	1,30	0,72	3,71	371
2311-2-B	2,25	13,05	2,55	12,90	1104

Tablo 7.8 Çelik plakaların borlama deneyi sonrası yüzey pürüzlülük ortalama değerleri

Yüzey Pürüzlülük	Ra (μm)	Rz (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)
Numune Adı	Paralel Ölçüm (μm)	Paralel Ölçüm (μm)	Dik Ölçüm (μm)	Dik Ölçüm (μm)
C2-B	0,91	4,03	1,58	6,83
2311-2-B	2,25	13,05	2,55	12,91



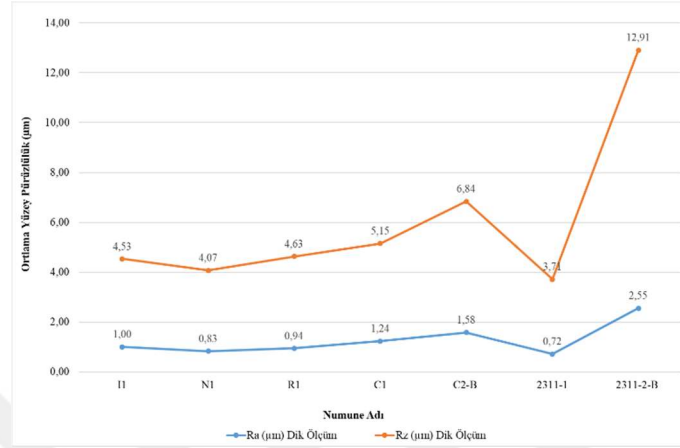
Şekil 7.47 Borlama deneyi öncesi ve sonrası C2-B kalıp çeliğine ait yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri



Şekil 7.48 Borlama deneyi öncesi ve sonrası 2311-2-B kalıp çeliğine ait yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri

C2-B ve 2311-2-B kalıp çeliklerinin borlama işlemi öncesi daha düşük yüzey pürüzlülük değerlerine sahip olduğu, borlama işlemi sonrası yüzeyin borlama işleminden sonra numune yüzeyinde kalan tozların malzeme topografyasını etkilediğini ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 7.47 ve Şekil 7.48’de verilen grafikler ile desteklenmiştir. Borlama işlemi sırasında oluşan reaksiyon hızı bölgelere göre değişmektedir. Malzemenin yüzey pürüzlülüğünü bu durum önemli derecede etkiler. Borlama işlemi esnasında fırın içerisindeki sıcaklığın malzemenin her bölgesine homejen bir biçimde yayılmadığı için bu durum ortaya çıkmaktadır.

Borlama işlemi sonrası elde ettiğimiz iki farklı tip deney numunesi için farklı pürüzlülük değerleri elde etmemiz beklenen bir durumdur.



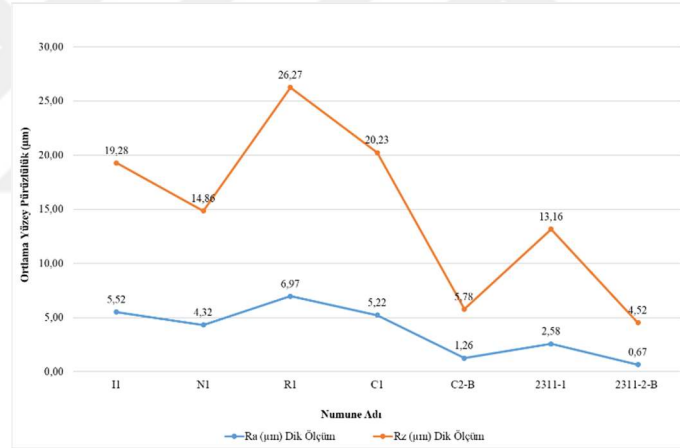
Şekil 7.49 Aşınma deneyi öncesi deney numunelerine ait dik yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri

Kuru ve yağlayıcı ortamda aşınma deneyi yapılacak olan deney numunelerine ait dik yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri Şekil 7.49’da verilmiştir.

Tablo 7.9 ve Tablo 7.10’da kuru ve yağlayıcı ortamda yapılan aşınma deneyi sonrası deney numunelerine ait yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri verilmiştir.

Tablo 7.9 Çelik plakaların kuru ortamda yapılan aşınma deneyi sonrası yüzey pürüzlülük ortalama değerleri

Yüzey Pürüzlülük	Ra (µm)	Rz (µm)	Ra (µm)	Rz (µm)
Numune Adı	Paralel Ölçüm (µm)	Paralel Ölçüm (µm)	Dik Ölçüm (µm)	Dik Ölçüm (µm)
I1	3,03	11,17	5,52	19,27
N1	1,91	8,44	4,31	14,86
R1	2,65	10,14	6,97	26,26
C1	2,67	11,02	5,22	20,23
C2-B	0,56	2,82	1,26	5,78
2311-1	2,26	9,7	2,57	13,16
2311-2-B	0,35	1,82	0,66	4,52

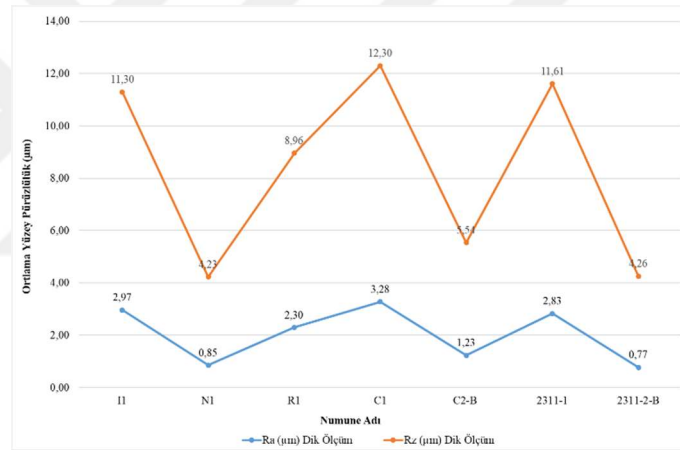


Şekil 7.50 Kuru ortamda yapılan aşınma deneyi sonrası deney numunelerine ait dik yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri

Kuru ortamda yapılan aşınma deneyi sonrası deney numunelerinin aşınan yüzeylerinden yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Şekil 7.50’de görüleceği üzere aşınma deneyi sonrası yüzey pürüzlülük değerlerinde ciddi bir artış olmuştur.

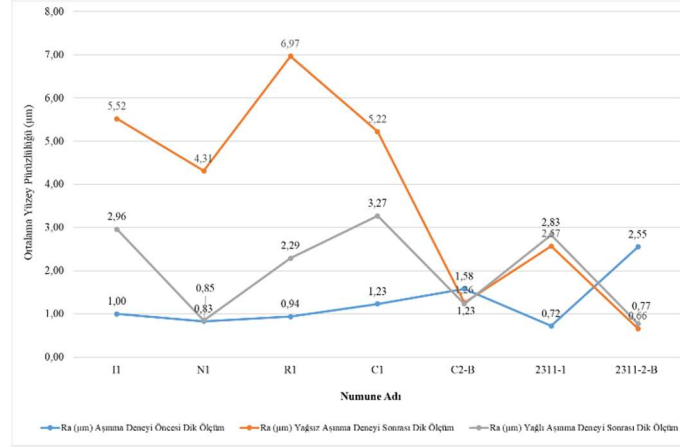
Tablo 7.10 Çelik plakaların yağlı aşınma deneyi sonrası yüzey pürüzlülük ortalama değerleri

Yüzey Pürüzlülük	Ra (μm)	Rz (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)
Numune Adı	Paralel Ölçüm (μm)	Paralel Ölçüm (μm)	Dik Ölçüm (μm)	Dik Ölçüm (μm)
I1	0,43	1,63	2,96	11,29
N1	0,44	1,95	0,85	4,23
R1	0,63	2,44	2,29	8,95
C1	0,56	2,59	3,27	12,3
C2-B	0,64	3,47	1,23	5,54
2311-1	0,22	0,98	2,83	11,6
2311-2-B	0,3	1,59	0,77	4,26

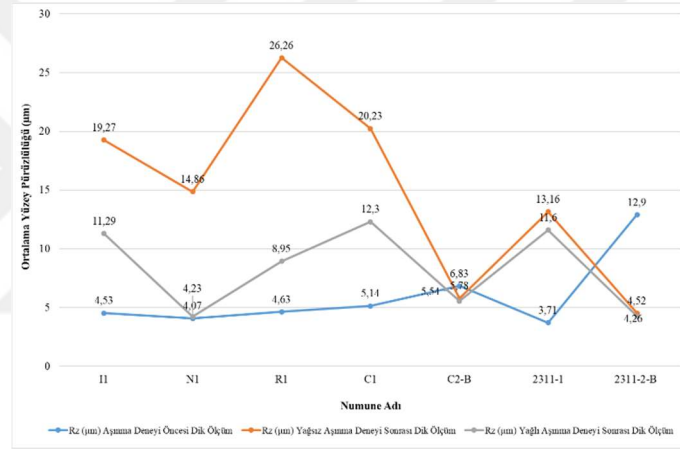


Şekil 7.51 Yağlayıcı ortamda aşınma deneyi sonrası deney numunelerine ait dik yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri

Yağlayıcı ortamda yapılan aşınma deneyi sonrası deney numunelerinin aşınan yüzeylerinden yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Şekil 7.51’de görüleceği üzere aşınma deneyi sonrası yüzey pürüzlülük değerlerinde bir artış olmuştur. Fakat kuru ortamda yapılan aşınma deneyi sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerine göre daha düşük ölçüm değerleri tespit edilmiştir.



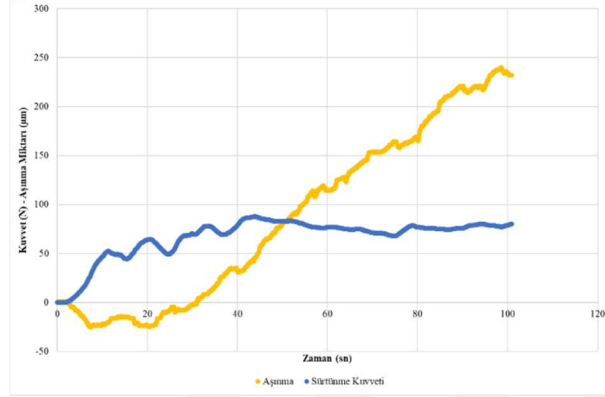
Şekil 7.52 Ra (μm) ortalama pürüzlülük değerinin aşınma deneyi öncesi ve sonrası ölçüm değerleri



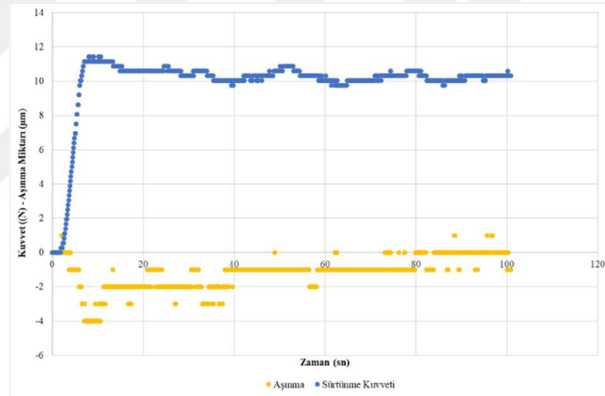
Şekil 7.53 Rz (μm) ortalama pürüzlülük değerinin aşınma deneyi öncesi ve sonrası ölçüm değerleri

Şekil 7.52’de Ra (μm) ortalama pürüzlülük değerinin aşınma deneyi öncesi ve sonrası ölçüm değerleri, Şekil 7.53’te Rz (μm) ortalama pürüzlülük değerinin aşınma deneyi öncesi ve sonrası ölçüm değerleri verilmiştir.

7.5 Aşınma Deneyi Sonuçları

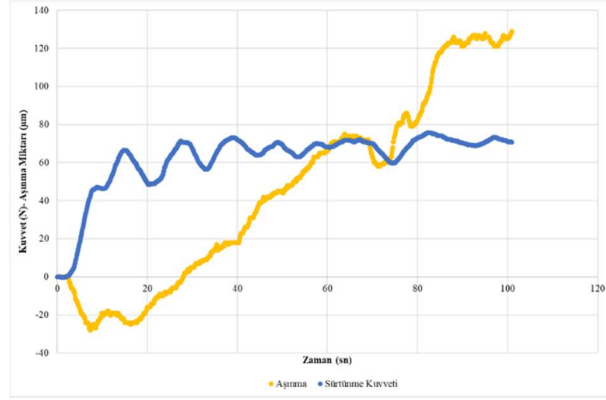


Şekil 7.54 I1 kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği

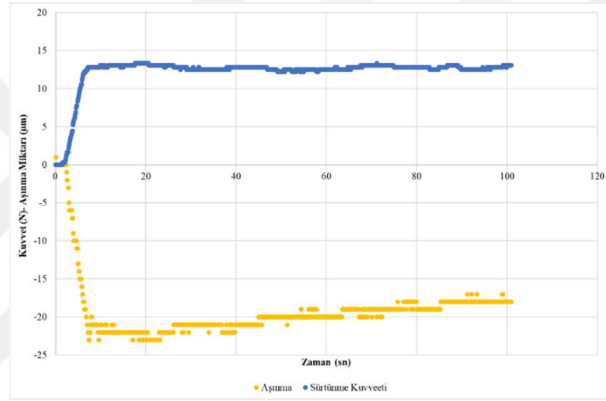


Şekil 7.55 I1 kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği

Şekil 7.54 ve Şekil 7.55'te yer alan grafikler sürtünme kuvveti verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık olarak 100N değerinde iken, yağlı aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık 12N değerindedir. Aşınma verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde aşınma miktarı yaklaşık 270 µm iken, yağlı aşınma testinde aşınma miktarı 5 µm değerindedir. Sürtünme kuvveti-aşınma miktarındaki bu farkın deney numunelerine sürülen yağlayıcının sürtünme ve aşınma davranışına etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

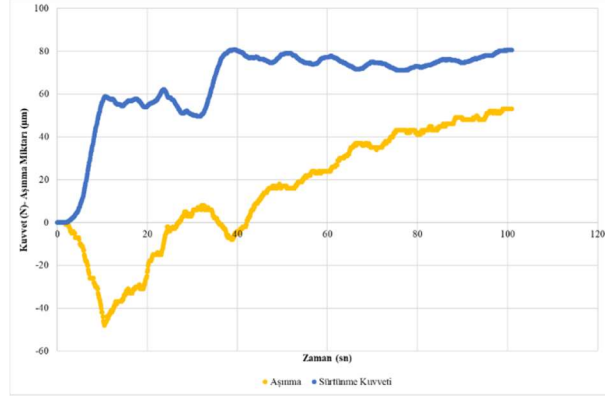


Şekil 7.56 N1 kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği

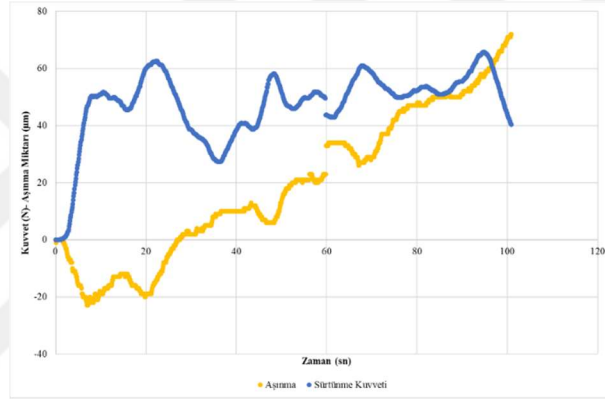


Şekil 7.57 N1 kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği

Şekil 7.56 ve Şekil 7.57'de yer alan grafikler sürtünme kuvveti verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık olarak 80N değerinde iken, yağlı aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık 15N değerindedir. Aşınma verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde aşınma miktarı yaklaşık 160 μm iken, yağlı aşınma testinde aşınma miktarı 25 μm değerindedir. Sürtünme kuvveti-aşınma miktarındaki bu farkın deney numunelerine sürülen yağlayıcının sürtünme ve aşınma davranışına etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

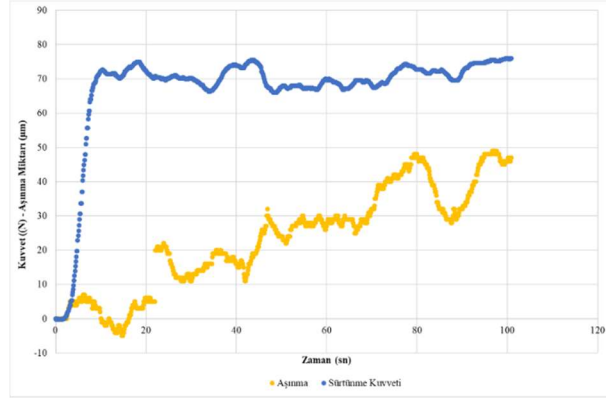


Şekil 7.58 R1 kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği

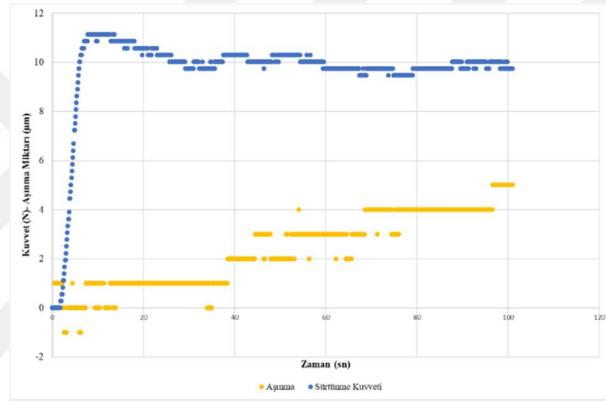


Şekil 7.59 R1 kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği

Şekil 7.58 ve Şekil 7.59'da yer alan grafikler sürtünme kuvveti verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık olarak 80N değerinde iken, yağlı aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık 60N değerindedir. Aşınma verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde aşınma miktarı yaklaşık 100 µm iken, yağlı aşınma testinde aşınma miktarı 90 µm değerindedir. Sürtünme kuvveti-aşınma miktarındaki bu farkın deney numunelerine sürülen yağlayıcının etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

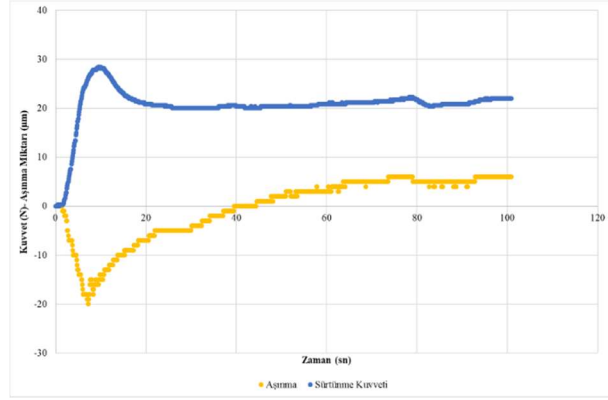


Şekil 7.60 C1 kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği

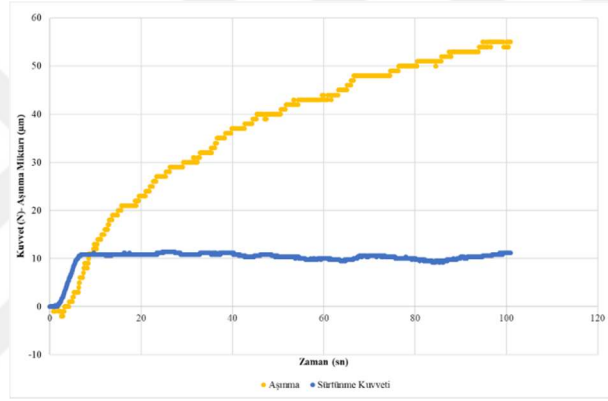


Şekil 7.61 C1 kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği

Şekil 7.60 ve Şekil 7.61’de yer alan grafikler sürtünme kuvveti verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık olarak 80N değerinde iken, yağlı aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık 12N değerindedir. Aşınma verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde aşınma miktarı yaklaşık 55 μm iken, yağlı aşınma testinde aşınma miktarı 6 μm değerindedir. Sürtünme kuvveti-aşınma miktarındaki bu farkın deney numunelerine sürülen yağlayıcının sürtünme ve aşınma davranışına etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



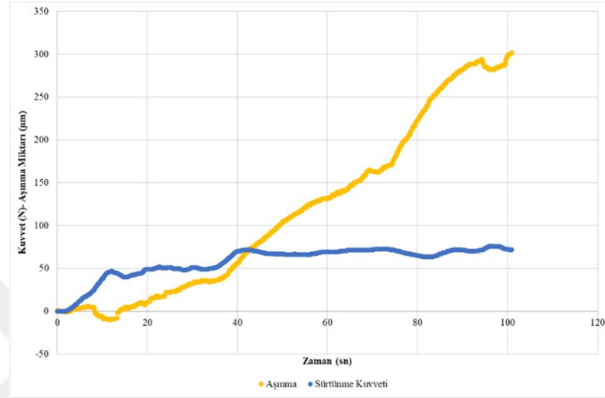
Şekil 7.62 C2-B kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği



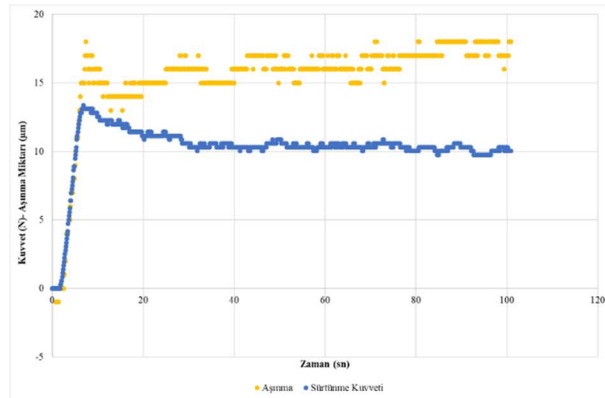
Şekil 7.63 C2-B kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği

Şekil 7.62 ve Şekil 7.63'te yer alan grafikler sürtünme kuvveti verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık olarak 30N değerinde iken, yağlı aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık 10N değerindedir. Aşınma verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde aşınma miktarı yaklaşık 25 μm iken, yağlı aşınma testinde aşınma miktarı 55 μm değerindedir. Grafikten kaynaklanan hatanın ölçüm sırasında deplasman ölçümünde bir hata meydana gelmiş fakat sebebi anlaşılamamıştır.

Borlanmamış C1 kalıp çeliği ve borlanmış C2-B kalıp çeliğinin yağsız aşınma test verileri sürtünme kuvveti açısından değerlendirildiğinde borlanmış numunenin sürtünme kuvveti daha düşüktür. Bu iki kalıp çeliği aşınma miktarı açısından değerlendirildiğinde borlanmış numunenin daha az aşınma miktarına sahip olduğu verilen grafiklerle desteklenmektedir.



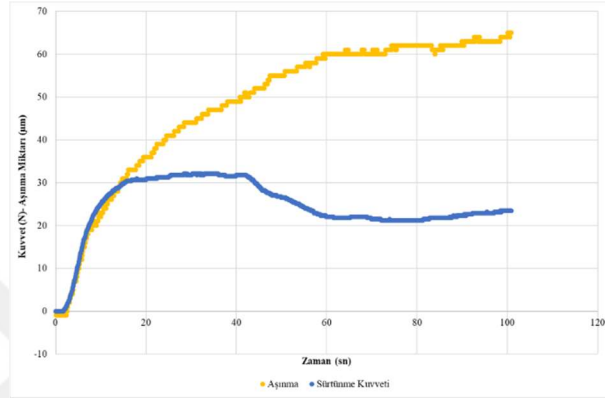
Şekil 7.64 2311-1 kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği



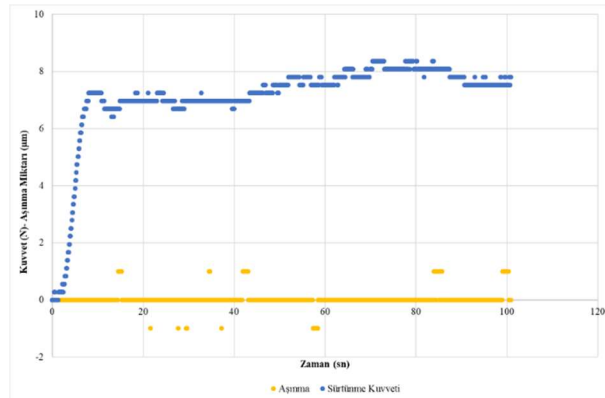
Şekil 7.65 2311-1 kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği

Şekil 7.66 ve Şekil 7.65'te yer alan grafikler sürtünme kuvveti verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık olarak 55N değerinde iken, yağlı aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık 15N değerindedir.

Aşınma verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde aşınma miktarı yaklaşık 300 μm iken, yağlı aşınma testinde aşınma miktarı 20 μm değerindedir. Sürtünme kuvveti-aşınma miktarındaki bu farkın deney numunelerine sürülen yağlayıcının sürtünme ve aşınma davranışına etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 7.66 2311-2-B kalıp çeliği yağsız aşınma-sürtünme kuvveti grafiği



Şekil 7.67 2311-2-B kalıp çeliği yağlı aşınma-sürtünme kuvveti grafiği

Şekil 7.66 ve Şekil 7.67'de yer alan grafikler sürtünme kuvveti verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık olarak 30N değerinde iken, yağlı aşınma testinde sürtünme kuvveti yaklaşık 8N değerindedir.

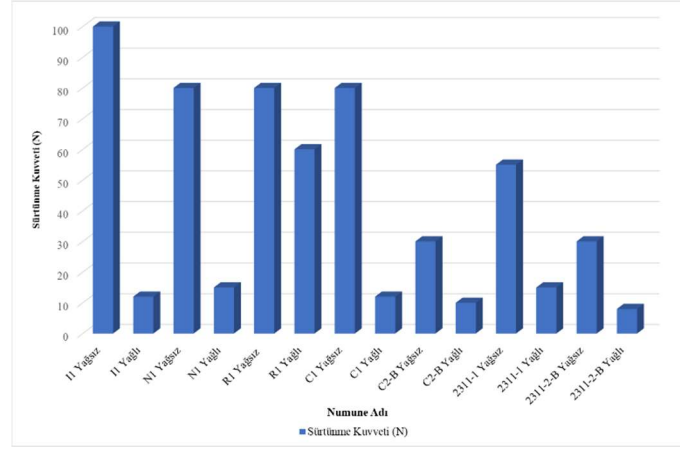
Aşınma verileri açısından değerlendirildiğinde yağsız aşınma testinde aşınma miktarı yaklaşık 65 μm iken, yağlı aşınma testinde aşınma miktarı 2 μm değerindedir. Sürtünme kuvveti-aşınma miktarındaki bu farkın deney numunelerine sürülen yağlayıcının sürtünme ve aşınma davranışına etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Borlanmamış 2311-1 kalıp çeliği ve borlanmış 2311-2-B kalıp çeliğinin yağsız ve yağlı aşınma test verileri sürtünme kuvveti açısından değerlendirildiğinde borlanmış numunenin sürtünme kuvveti daha düşüktür. Bu iki kalıp çeliği aşınma miktarı açısından değerlendirildiğinde borlanmış numunenin daha az aşınma miktarına sahip olduğu verilen grafiklerle desteklenmektedir.

Aşınma sonuçları kendi içlerinde kıyaslanacak olunursa kalıp çeliklerinin yağsız aşınma kayıp farklılıkları, yağlı aşınma kayıp farklılıklarına göre daha fazla olduğu grafikler üzerinden de rahatlıkla anlaşılabilmektedir. Tablo 7.11’de ve Şekil 7.68’de kuru ve yağlayıcı ortamda yapılan aşınma deneyi sırasında ölçülen sürtünme kuvveti değerleri verilmiştir.

Tablo 7.11 Yağsız-yaglı aşınma deneyi sırasında ölçülen sürtünme kuvveti değerleri

Numune Adı	Sürtünme Kuvveti (N)
I1 Yağsız	100
I1 Yağlı	12
N1 Yağsız	80
N1 Yağlı	15
R1 Yağsız	80
R1 Yağlı	60
C1 Yağsız	80
C1 Yağlı	12
C2-B Yağsız	30
C2-B Yağlı	10
2311-1 Yağsız	55
2311-1 Yağlı	15
2311-2-B Yağsız	30
2311-2-B Yağlı	8



Şekil 7.68 Yağsız-yağlı aşınma deneyi sırasında ölçülen sürtünme kuvveti değerleri

Tablo 7.11’de yer alan yağsız aşınma deneyi sırasında ölçülen en yüksek sürtünme kuvveti I1 kalıp çeliğinde, en düşük sürtünme kuvveti C2-B ve 2311-2-B kalıp çeliklerinde tespit edilmiştir. Borlama işlemi uygulanan her iki deney numunesinin de aşınma deneyi sonrası en düşük sürtünme kuvvetine sahiptir.

Tablo 7.11’de yer alan yağlı aşınma deneyi sırasında ölçülen en yüksek sürtünme kuvveti R1 kalıp çeliğinde, en düşük sürtünme kuvveti C2-B ve 2311-2-B kalıp çeliklerinde tespit edilmiştir. Borlama işlemi uygulanan her iki deney numunesinin de aşınma deneyi sonrası en düşük sürtünme kuvvetine sahiptir.

7.5.1 Hassas Terazî ile Ölçülen Aşınma Kayıpları

Sabit frekans değerinde ve sabit yük altında yapılan aşınma testlerinde her bir plaka ve aşındırıcı uç için farklı aşınma kayıpları tespit edilmiştir. Yağlı aşınma testi sonrası ölçülen aşınma kayıpları hesaplanamayacak kadar az değere sahip olduğundan dolayı bu numunelere ait aşınma kayıpları hesaplanamamıştır. Bu yüzden yağlı aşınma testi uygulanan numuneler için ‘Sürtünme Kuvveti (N)-Aşınma Miktarı (μm)’ grafikleri yorumlanmıştır.

Tablo 7.12 Yağsız aşınma deneyi sonrası hesaplanan aşınma kayıpları

Numune Adı	Ağırlık Kaybı (gr)	Aşınma Kaybı (mm ³)	Aşınma Kaybı (μm)	Hassas Terazî Aşınma Miktarı (μm)	Grafik Aşınma Miktarı (μm)
II	0,073	9,372	29,719	254	270
NP1	0,049	6,333	224,109		
N1	0,058	7,462	24,321	147	160
NP3	0,027	3,462	122,489		
R1	0,082	10,449	32,858	99	100
NP5	0,015	1,859	65,781		
C1	0,075	9,551	29,479	37	55
NP7	0,002	0,218	7,712		
C2-B	0,030	3,846	14,912	23	25
NP9	0,002	0,218	7,712		
2311-1	0,076	9,744	30,073	266	300
NP11	0,052	6,654	235,451		
2311-2-B	0,0570	7,308	60,897	61	65
NP13	0,0001	0,013	0,454		

7.5.2 Yüzey Profilometre Sonuçları

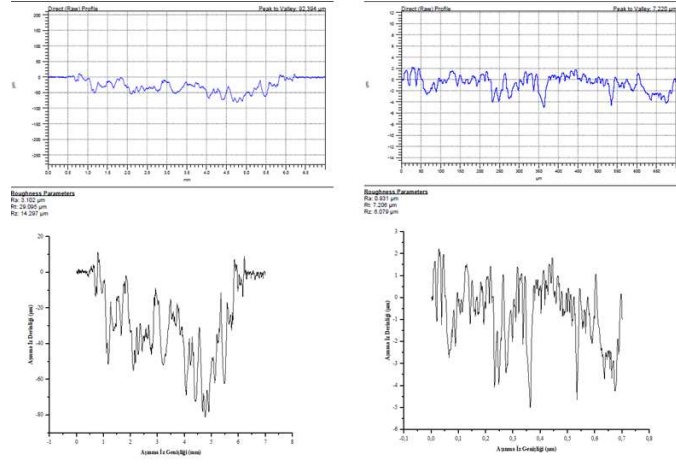
Aşınma testlerinin ardından numune yüzeyleri profilometre ile incelenmiştir. Kuru ortamda aşınma deneyi yapılan numunelerde aşınma derinliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Yağlayıcı ortamda aşınma deneyi yapılan numunelerinde aşınma derinliğinin daha az olduğu görülmektedir. Yağlı aşınma deneyi sonrasında numunelerin yüzeylerinde aşınma izi çok az olduğundan tutarlı bir ölçüm sonucu elde edilememektedir. Aşınma deneyleri sonucunda elde edilen değerler, aşınma izlerinden alınan üç farklı ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Aşınma derinliklerinin ve aşınma iz genişliğinin ortalama değerleri grafiklerle gösterilmiştir

Kuru ortamda aşınma testi uygulanan çelik plakalarda aşınma iz derinliği ve genişliği hesaplanmıştır. Fakat yağlayıcı ortamda aşınma testi yapılan çelik plakalarda oluşan aşınma izlerinin aşınma iz derinliği ve genişliği çok az olduğundan hesaplanamamıştır. Bu numunelere ait aşınma iz profilleri grafiklerle verilmiştir. Tablo 7.13'te yağsız aşınma testi sonrası çelik plakaların aşınma kaybı verilmiştir.

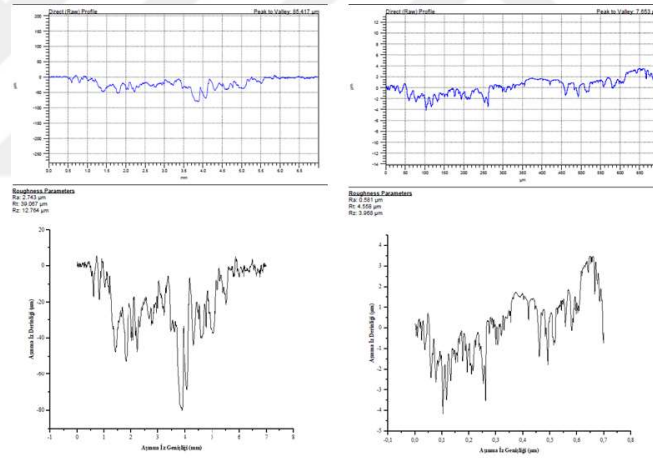
Tablo 7.13 Yağsız aşınma testi sonrası çelik plakaların aşınma kaybı

Numune Adı	Aşınma Derinliği Ortalaması (mm x μm)	Aşınma iz boyu (μm)	Aşınma Kaybı (mm^3)
I1	180,220	53000	9,551
N1	144,12	52000	7,494
R1	208,000	53000	11,024
C1	190,23	54000	10,272
C2-B	489,000	52000	25,428
2311-1	183,500	54000	9,909
2311-2-B	169,000	50000	8,450

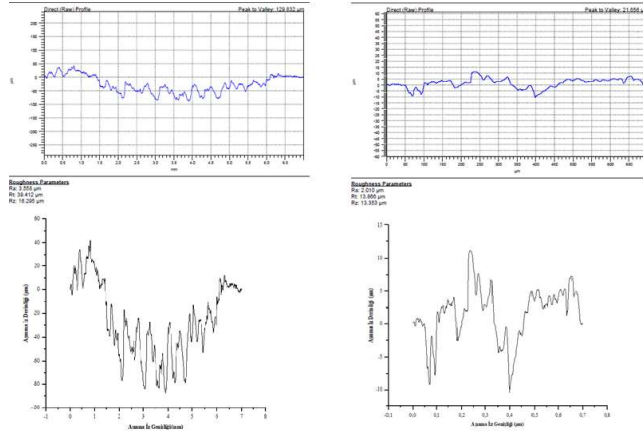
Yağsız ve yağlı aşınma testi sonrası çelik plakalardan alınan aşınma derinliği ortalamasına en yakın olan ölçümlere ait grafikler aşağıda yer almaktadır.



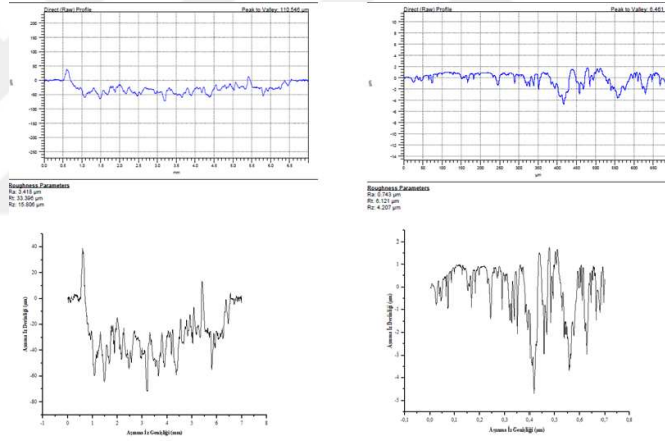
Şekil 7.69 I1 kalıp çeliği yağsız - yağlı aşınma izi profil sonucu



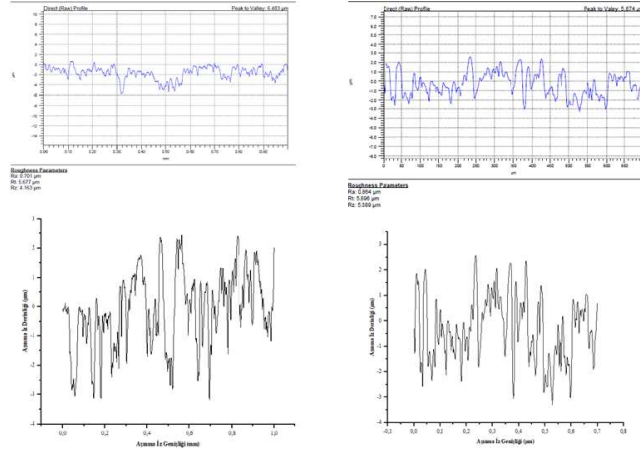
Şekil 7.70 N1 kalıp çeliği yağsız - yağlı aşınma izi profil sonucu



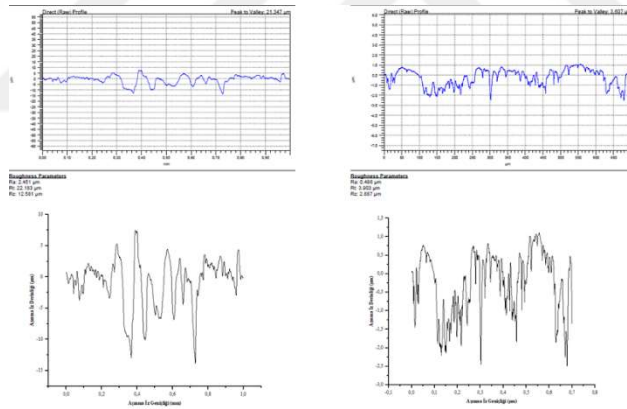
Şekil 7.71 R1 kalıp çeliği yağsız-yaglı aşınma izi profil sonucu



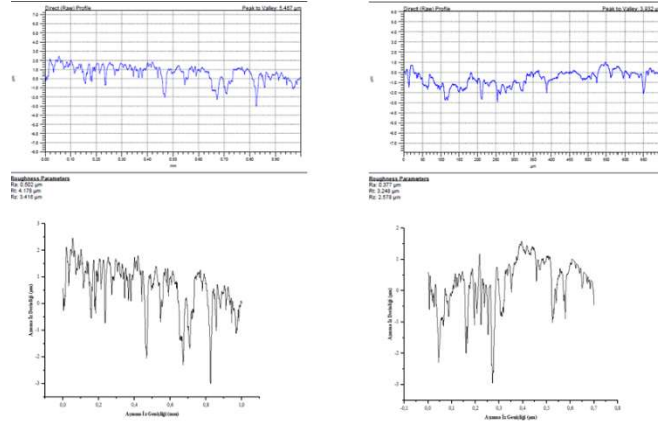
Şekil 7.72 C1 kalıp çeliği yağsız-yaglı aşınma izi profil sonucu



Şekil 7.73 C2-B kalıp çeliği yağsız-yagli aşınma izi profil sonucu



Şekil 7.74 2311-1 kalıp çeliği yağsız-yagli aşınma izi profil sonucu



Şekil 7.75 2311-2-B kalıp çeliği yağsız-yagli aşınma izi profil sonucu

Şekil 7.69'dan Şekil 7.75'e kadar olan görüntülerde profilometre cihazında yağlı aşınma deneylerinde yağın aşınmaya ve yüzey pürüzlülüğüne olan olumlu etkisi gösterilmeye çalışılmıştır. Aşınma izi boyunca probun aşınma izlerine dik kat ettiği mesafedeki mikrometre cinsinden yüzey girinti ve çıkıntılarının azaldığı ve yüzeyin hasarının engellendiği görülmektedir.

7.5.3 Aşınma Kayıplarının Karşılaştırılması

Yağsız aşınma testi sonrası plakalarda oluşan aşınma kayıplarının hassas terazi ve profilometre ile ölçülen sonuçları Tablo 7.14'de verilmiştir.

Tablo 7.14 Yağsız aşınma testi sonrası plakalarda oluşan aşınma kayıplarının karşılaştırılması

Plaka Yağsız Aşınma Kayıpları (mm ³)		
Numune Adı	Hassas Terazi ile ölçülen aşınma kaybı (mm ³)	Profilometre ile ölçülen aşınma kaybı (mm ³)
I1	9,37	9,55
N1	7,46	7,49
R1	10,44	11,02
C1	9,55	10,27
C2-B	3,84	25,42
2311-1	9,74	9,90
2311-2-B	7,30	8,45

Borlama işlemi uygulanmamış kalıp çeliklerinin kendi arasında aşınma deneyi sonuçlarına bakıldığı zaman, en çok hacimce kayıp, R1 kalıp çeliğinde, en az hacimce kayıp N1 kalıp çeliğinde görülmüştür.

Borlama işlemi uygulanmış ve borlama işlemi uygulanmamış kalıp çeliklerinin aşınma deneyi sonuçlarına bakıldığı zaman, en çok hacimce kayıp hassas terazi ve profilometre aşınma kaybı ölçümlerine göre R1 kalıp çeliğinde görülmüştür. En az hacimce aşınma kaybı hassas terazi ölçümüne göre borlama işlemi uygulanmış C2-B kalıp çeliğinde, profilometre aşınma kaybı ölçümüne göre N1 kalıp çeliğinde görülmüştür.

4 farklı kalıp çeliğine alternatif geliştirilen görece düşük maliyetli ve borlanmış 2311-2-B kalıp çeliği hassas terazi aşınma kaybı ölçümünde hacimce en az aşınma kaybına sahiptir. Profilometre ile ölçülen aşınma kaybı N1 kalıp çeliğine çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

BÖLÜM SEKİZ

GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Yapmış olduğumuz çalışmanın birinci aşamasında ticari çeliklerin içerdikleri alaşım elementi içeriğine bağlı aşınma davranışı, sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda;

1) Yapılan çalışmalar sonucunda içeriğinde Cr oranı yüksek kalıp çeliklerinin aşınma direncinin daha düşük olduğu görülmüştür. Ancak malzeme içeriğinde nikel ve molibden gibi alaşım elementi bulunduran çeliklerin aşınma dirençlerinin yüksek olduğu ve aşınma kaybının az olduğu deney sonuçları ile gösterilmiştir. Nikel ve molibden elementi ilavesi çeliğin aşınma dayanımını olumlu yönde etkilediği yapılan literatür çalışmalarında da yer almaktadır. Kimyasal içerikler göz önüne alındığında N1 ve I1 kalıp çeliklerinin kimyasal içeriklerinde bulunan nikel ve molibden miktarı aşınma kaybını olumlu yönde etkilemiştir. Yapılan aşınma deneyi sonucunda N1 ve I1 kalıp çeliklerinde en az hacim kaybı görülmüştür.

2) 5 farklı alaşım elementi içeriğine sahip kalıp çeliklerinde malzemelerin sahip oldukları sertliklerine paralel olarak, yüksek sertliğe sahip olan N1 kalıp çeliğinin hacimce en az aşınma kaybı sergilediği belirlenmiştir. Buna göre en düşük sertlik değerine sahip sırasıyla R1, C1 ve 2311-1 kalıp çeliklerinin hacimce en fazla aşınma kaybı sergilediği belirlenmiştir.

3) 5 farklı kalıp çeliğine uygulanan yağsız aşınma deneyi sonrası en yüksek sürtünme kuvveti I1 kalıp çeliğinde, en düşük sürtünme kuvveti 2311-1 kalıp çeliğinde gözlemlenmiştir. Yağlı aşınma deneyi sonrası en yüksek sürtünme kuvveti R1 kalıp çeliğinde, en düşük I1 ve C1 kalıp çeliğinde görülmüştür.

4) Kuru ortamda yapılan aşınma deneyi sonucunda numunelerin yüzey pürüzlülük değerinde en yüksek artış R1 kalıp çeliğinde tespit edilmiştir.

Yağlayıcı ortamda yapılan aşınma deneyi sonucunda numunelerin yüzey pürüzlülük değerinde en yüksek artış C1 kalıp çeliğinde tespit edilmiştir.

5) Yağlayıcı ortamda yapılan aşınma deneylerinde numunelerin daha az aşındığı verilen sürtünme kuvveti-aşınma miktarı grafiklerinde tespit edilmiştir.

Yapmış olduğumuz çalışmanın ikinci aşamasında ise iki farklı tip kalıp çeliğinin borlama sonuçları kıyaslanmıştır. Bu incelemeler sonucunda;

1) C2-B ve 2311-2-B kalıp çeliklerinde farklı kalınlıklarda borid katmanları elde edilmiştir. Numunelerin içerdiği yüksek alaşım elementleri ve bileşim farklılıkları nedeniyle borid katman kalınlıkları nispeten ince olarak elde edilmiştir.

2) 850 °C'de 4 saat kutu borlama işlemi uygulanan C2-B ve 2311-2-B kalıp çeliklerinde FeB ve Fe₂B faz pikleri tespit edilmiştir.

3) Borlama işlemi uygulanan C2-B ve 2311-2-B kalıp çeliklerinin borlama işlemi sonrasında sertliklerinde artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda borlama işlemi sonrası elde edilen yüksek mekanik özellikler sayesinde bu iki kalıp çeliğinin yağsız aşınma kayıplarında ve sürtünme kuvvetlerinde borlama işlemi sonrası azalma tespit edilmiştir.

BÖLÜM DOKUZ

SONUÇLAR

- Yapılan çalışmalar sonucunda içeriğinde Cr bulunduran kalıp çeliklerinin aşınma direncinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Nikel ve molibden elementi ilavesi çeliğin aşınma dayanımını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

- Yüzeyden itibaren mesafe artmaya başladıkça, sertlik değeri de düşmeye başlamaktadır. C2-B kalıp çeliğinin 24,41 μm 'de 281 HV_{0,05} iken, 53,25 μm 'de 2311-2-B kalıp çeliğinin sertlik değeri 1097 HV_{0,025} olarak ölçülmüştür. 1.2311 kalıp çeliği için ilk durumda sertlik ölçümü 371 HV₁ iken, borlama işlemi sonrası sonra yüzeye en yakın sertlik değeri 1097 HV_{0,05} ölçülmüştür. İlk durumdaki sertlik ölçümü C2-B kalıp çeliği için 315 HV₁ iken, borlama işlemi sonrası yüzeye en yakın değerde sertlik değeri 281 HV_{0,05} ölçülmüştür. İki sertlik birbirinden farklı yüklerde ölçülse de borlama işlemi sonrasında C2-B kalıp çeliğinde sertlik de düşüş gözlemlenmiştir.

- Yağsız ve yağlı aşınma deneyi sonrası en düşük sürtünme kuvveti C2-B ve 2311-2-B kalıp çeliklerinde gözlemlenmiştir.

- C2-B ve 2311-2-B kalıp çeliğine aynı sıcaklık ve sürede uyguladığımız borlama işlemi sonrası, borlama işlemi uygulanmadan yapılan aşınma deneyine göre hacimce daha az ağırlık kaybı olduğu tespit edilmiştir.

- Hassas terazi ve profilometre ile ölçülen hacimce en yüksek aşınma kaybı R1 kalıp çeliğinde, en az aşınma kaybı ise hassas terazi ile ölçülen C2-B kalıp çeliğinde, profilometre ile ölçülen N1 kalıp çeliğinde görülmüştür.

- Bu tez çalışmasının temel amacı olan görece düşük maliyetli 2311 kalıp çeliğinin borlama işlemi ile aşınma kaybı yaklaşık %20 oranında bir azalma göstermiştir.

- Borlama işlemi uygulanmamış 4 farklı ticari kalıp çeliğine karşı borlama işlemi uygulanmış 2311 kalıp çeliğinde hassas terazi ile ölçülen hacimce en az aşınma kaybı görülmüştür. Profilometre ile ölçülen hacimce 2311 kalıp çeliğinin aşınma kaybı N1 kalıp çeliğinin aşınma kaybına çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

- 2311-1 kalıp çeliğinin işlenme kabiliyeti ile işleme maliyeti daha düşük takımlarla kolay işlenebilirliği sayesinde endüstride kullanılan kalıplarda ekstra bir maliyete sebebiyet vermeyecektir. 5 farklı kalıp çeliklerinin içerisinde, günümüz sanayisinde malzeme seçimi kriterleri göz önünde bulundurulduğunda (sertlik-aşınma-maliyet) borlanmış 2311-2-B kalıp çeliğinin görece düşük maliyete sahip olması ve belirlenen borlama işlemi parametreleri ile plastik kalıp çeliği endüstrisinde kullanılan yüksek mekanik özelliklere sahip kalıp çeliklerine göre daha iyi aşınma direnci ve sertlik performansı göstermesinden dolayı uygun öneri olarak belirlenmiştir.

- Kalıp çeliklerinde kullanılan malzemelerin kalıp maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle görece düşük maliyetli alternatif plastik kalıp çeliğinin (1.2311) borlama işlemi ile kaplanması sonrası kalıp çeliklerinin sahip olduğu yüksek mekanik özelliklerinin elde edilmesi ve kalıp maliyetinin azaltılması, yüksek performans özelliklerinin elde edilmesiyle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Kalıp için kalıp seçiminde 1.2311 çeliğinin önerilmesinin nedenleri şu şekildedir:

- 2311 çeliğini kullanarak kalıp maliyetinde düşüş, (%10)
- Kalıp işleme maliyetinde düşüş ve kolaylık,
- Borlama ile yüzeyin mekanik özelliklerinin artırılması, (Yaklaşık olarak %20 artış sağlanması)
- Dolaylı olarak bakım / onarım, duruş, ıskarta maliyetlerinde azalma ve yıllık ilave kar eldesi,

➤ Kalıp servis ömrünü maksimize ederek kalıp çeliği kullanımının azaltılması ve işletme çelik satınalma, işleme maliyetlerinden kazanım. (Daha düşük kalite çelik kullanılmasına rağmen yapılacak ısıt işlemler sonrası proseste kullanılacak çelik toplam maliyet kazancının tahmini olarak %200’ler seviyesinde olacağı öngörülmektedir. (Yaklaşık olarak 50.000 Euro / Yıl)

Bu tez çalışması kapsamında yapılan aşınma testleri için literatürden farklı olarak aşındırıcı uç olarak silindirik uç kullanılmıştır. Sabit frekans değerinde ve sabit yük altında yapılan pin-on-plate aşınma testlerinde her bir plaka ve aşındırıcı uç için farklı aşınma kayıpları tespit edilmiştir. Aşınma kayıpları hassas terazi kaybı ve aynı zamanda aşınma deneyleri sonrası aşınma izlerinin iz derinlikleri ölçülerek irdelenmiştir. Farklı tip alaşım içeriğine sahip kalıp çeliklerinin adhezif aşınmaya karşı davranışları incelenmiştir. Ayrıca kullanılan çeliklerin yüzeylerin kaliteleri ve pürüzlülüklerin incelenmesi için yüzey analizi tespitleri yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- Akbayır, Ö. (2005). *Katı ortamda borlanmış aısı 1030 çeliğinde işlem parametrelerinin yüzey ve aşınma özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Akkurt, M. (1992). *Makine Elemanları* (2. Baskı) . İstanbul: İTÜ Matbaası.
- Alibey, İ. (2010). *Kalıp malzemelerinin uygulama alanlarına göre sınıflandırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Arat, M. (2011). *Paslanmaz çelik 310 ve 316 metalinin plazma borlama ve nitrürleme metodu ile mekanik özelliklerinin geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- ASM International Handbook Committee, (1994). *ASM Metals Handbook, surface engineering, volume 5*. Ohio: ASM International.
- ASM, Handbook,(1992). *Friction, lubrication and wear technology, volume 18*. Ohio:ASM International.
- Aydın S., Yapıcı A., Kanca E., Günen A., ve Kurt B., (2016). 1.2379 Çeliğinin borlanması. *Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı*, 328-331.
- Aytaç, A. (2007). *A356 Alüminyum alaşımının yarı katı işlemle üretimi ve aşınma davranışlarının incelenmesi*. Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Ayter, T. (2005). *Borlama işleminin çeliklerin yüzey kalitesi ve aşınma davranışına etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
- Baştürk, S., ve Erten, M. (2006). Borlama ile yüzey sertleştirme çalışmaları. *Mühendis ve Makine*, 47(563), 57-74.
- Bayça, S.U. ve Şahin, S. (2004). Borlama. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 532, 51-59.
- Blau, P.J. ve Budinski, K.G. (1999) Development and use of ASTM standards for wear testing. *Wear*, 225-229 (2), 1159-1170.

- Bozacı, A. (2005). *Makina Elemanları*. İstanbul: Çağlayan Kitabevi.
- Bozkurt, N. (1984). *Bor yayınımlı ile çeliklerde yüzey sertleştirme*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Budinski K.G. (1993). The wear of diffusion treated surfaces. *Wear*, 162-164, 757-762.
- Caruta B.M. (2005). *Thin films and coatings: New Research*, Novi Science Publisher, NewYork: Novi Science Publisher.
- Copola C.J. , Avram I. , M.C. Terzzoli M.C, Duhalde S. , Morales C. ,Pe´rez T. , Audebert F. , Delaporte PH. ve Sentis M., (2002). Influence of laser parameters on the nitriding of low carbon steel, *Applied Surface Science*, 197–198, 896–903.
- Dalar, A. (2013). *Borlanmış dişli çeliklerin aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Davis J.R. (2001). Surface engineering for corrosion and wear resistance. United States of America: ASM International.
- Demir, A. (2012). *Farklı çeliklerin yorulma aşınmasında malzeme sertliğinin aşınma üzerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Demirel, Ç. (2013). *AISI 8640 ve GS 60 Çelik malzemelerin abrasif aşınma ve korozyon davranışına borlama işleminin etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Dilektaşlı E. (2014). *Bazı alaşımlı çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışına borlama işleminin etkisi*. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Er, Ü., ve Par, B. (2004). Bor yayınımlı yüzeyi sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 çeliklerinin abrasif aşınma dayanımlarının incelenmesi. *Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17 (1), 1-12.

- Erdem, S. (2006). *Yüksek karbon içeriğine sahip, yüksek kromlu, manganlı ve alaşımsız düşük karbonlu çeliklerin aşınma davranışlarının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Ersöz, A. (2008). *Elektrokimyasal borlama ile çeliklerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Eyre T.S. (1975). Effect of boronising on friction and wear of ferrous metals. *Wear*, 33, 383-397.
- Fichtl, W. (1981). Boronizing and its practical applications. *Materials in Engineering*, 2, 276-286.
- Finnie, I. (1995). Some reflections on the past and future of erosion. *Wear*, 186, 1-10.
- Galibois, A., Boutekno, O. ve Voyzele, B., (1980). Mechanisma deformation des couches borurees sur les aciers a haut, carbone-II, technique des poudes, *Acta Metalurgia*, 28, 1765-1771.
- Gencel, O., Gok, M., S. ve Brostow W., (2011). Effect of metallic aggregate and cement content on abrasion resistance behaviour of concrete. *Materials Research Innovations*, 15, (2), 116-122.
- Gunes, I. ve Yıldız I. (2015). Rate of growth of boride layers on stainless steels. *Oxidation Communications* 38, 4A, 2189–2198.
- Gülsün, K. (2016). *Yüzey borlanmış ve farklı matriks yapılı küresel grafitli dökme demirin aşınma özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Balıkesir.
- Günen, A. (2012). *Nano bor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan östenitik paslanmaz çeliğin mekanik özellikler ve korozyon davranışının araştırılması*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Gür A.K. (2009). *Plazma (PTA) yöntemiyle düşük karbonlu çeliğin yüzey modifikasyonuna koruyucu gazların etkisi*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

- Gürleyik M.Y. (1980). *Yıkama aşındırması. Mühendis ve Makine*, 311, (25-34), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Hayashi, Y. ve Sugeno, T. (1970). Nature of boron in a iron. *Acta Metallurgica*, 18, 693-697.
- Hunger, H.-J. ve True, G. (1994). Boronizing to produce wear-resistant surface layers, *Heat Treatment of Metals*, 2, 31-39.
- Jaoul C. , Belmonte T., Czerwec T., ve David N., (2005). Nitrocarburizing treatments using flowing afterglow processes. *Applied Surface Science*, 252,8360–836.
- Kayalı, E., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y. ve Çimenoglu, H. (1997). *Hasar analizi seminer notları*. İstanbul: TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası.
- Kayalı, Y. (2011). *Borlanmış AISI 316 L paslanmaz çeliğin korozyon ve aşınma davranışlarının incelenmesi*. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Koç, R. (2004). *Vagon boji bagalarına alternatif polimer malzemelerin deneysel incelenmesi*. Doktora Tezi (yayımlanmamış), Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Koçak H. (2012). *Takım çelikleri kitabı*. İstanbul: Bolokur Teknik Yayıncılık.
- Korkut M.H. (1997). *Ferritik paslanmaz çeliklerin mikro yapısı ve aşınması üzerine karbür yapıcı elementlerin etkilerinin araştırılması*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Krauss, G. (1999). Martensite in steel: Strength and structure, *Materials Science and Engineering*, 273–275, 40–57.
- Matuschka A.G. (1980). *Boronizing*. München: Carl Hanser Verlag.
- Mirjani M., Shafyei A. ve Ashrafizadeh F., (2008). Plasma and gaseous nitrocarburizing of C60W steel for tribological applications. *Vacuum*, 83,1043–1048.

- Nişli, G. (2011). *Bortemperlenmiş AISI 1040 çeliğinin yüzey özelliklerinin ve aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Özcan, H. (2012). *32CrMoV çeliğinin aşınma direncini arttırmak için yeni bir ısıtım işlem metodunun geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Özcan, M. (2019). *Haddehane tufalinin polimer matrisli kompozit üretiminde kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Bartın.
- Özer, M. (2011). *Üç farklı çeliğe katı borlama işlemi yapılmasının içyapı ve sertlik üzerine etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Özsoy, A. (1991). *Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş sonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi*. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Palombarini, G.ve Carbucichio, M. (1987). *Growth of boride coatings on iron. Journal of Material Science Letters* 6, 415-416.
- Pazarlıoğlu, S.S. (2006). *Çeliklerin Niobyum borür kaplanması ve özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Sağlam, G. (2016). *Çelik dişli sondaj matkaplarının borlama yöntemi ile takım ömrünün uzatılması*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Bartın.
- Sarıca, B. (2005). *Farklı kalite çeliklere uygulanan yüzey kaplama işlemlerinin aşınma davranışlarına etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Sinha A.K. (1982). First five years experience with the maxi-probe EMR-16 system for deep mineral exploration. *Geophysics*, 47, 432-433.
- Soydan, Y. (1996). *Katı ortamda bor yayınımları ile sertleştirilen çelik yüzeylerinin kuru kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Soydan, Y. ve Ulukan L. (2003). Triboloji: sürtünme, aşınma, yağlama bilimi ve teknolojisi. *Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi Teknolojik Yayınlar Serisi* No: 1, Sakarya: Tagem Kopisan Yayınevi.
- Soydan, Y., Koksall, S., Demirer, A., ve elik, V., (2008). Sliding friction and wear behavior of pack-boronized AISI 1050, 4140, and 8620 steels. *Tribology Transactions*, 51, 74-81.
- Soydaş, S. (2006). *niversal aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Spence, T. W. ve Makhlof, M.M. (2005). Characterization of the operative mechanism in potassium fluoborate activated pack boriding of steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 127-136.
- Stachowiak, G.W. ve Batchelor, A.W. (1993). *Engineering Tribology*, Tribology Series, 24, Elsevier.
- Stachowiak, G.W. ve Batchelor, A.W. (2001). *Engineering tribology*. US: Butterworth Heinemann.
- Şahin, S. (1999). *Katı borlama yöntemi ile ferrobor üretimi ve özelliklerinin belirlenmesi*. Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
- Şen, Ş. (1998). *Termokimyasal borlama işlemiyle AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 eliklerinin yüzey performanslarının geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Tabur, M. (2008). *Bor karbür kaplanmış AISI 8620 ve Hardox 400 eliklerinin abrasiv aşınma davranışlarının incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Taşçı, A. (1993). *Borlanmış eliklerin aşınma ve korozyon dayanımları*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Topçu, Ş. (2010). *Farklı Şartlarda plazma nitrrlenmi çeliklerin aşınma davranışının belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

- Topuz, P. (2016). DIN 1.2842 Çeliğinin borlanması ile oluşan borür tabakası üzerine borlama sıcaklık ve süresinin etkileri. *Bor Dergisi*, 1(1),15-19.
- Turunç D.U. (2015). *Farklı kimyasal bileşimlerdeki sert dolgu aşınma plakalarının özelliklerinin incelenmesi, geliştirilmesi ve optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Uluköy, A. ve Can, A.Ç. (2006). Çeliklerin borlanması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2),189-198.
- Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O., Bindal, C., (2007). Evaluation of borides formed on AISI P20 steel. *Materials and Design* 28, 55–61.
- Uzun H.A. (2002). *Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Uzuner, H. (2001). *Polimerlerin sürtünme ve aşınma davranışları*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Ünlü, B.S ve Yılmaz S.S, (2006). Bor ve borlamanın kullanım alanları. *Mühendis ve Makina* 47(552),48–54.
- Varol, T. (2016). *Nanopartikül takviyeli bakır esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin üretimi ve karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Wang J., Zhang G., Sun J., Bao Y., Zhuang L. ve Wen H., (2005). Low temperature nitriding of medium carbon steel, *Vacuum*, 80,855–859.
- Wang L. , Kim D.S. , Nam K.S., Kim M. ve Kwon S.C., (2004). Microstructure of electroplated hard chromium coatings after plasma nitrocarburizing, *Surface and Coating Technology* 190,151– 154.
- Yağcı, M.A. (2009). *Borlanmış AISI M2 çeliğinin metalografik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

Yapar, U. (2003). *Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Yeşilçubuk, A. (2010). *Enjeksiyon kalıplarında kullanılan sıcak iş takım çeliklerinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Yılmaz Ö.İ. (2012). *Otomotiv sac şekillendirme kalıplarında kullanılan malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.

Yu L.G., Chen X.J., Khor K.A. ve Sundararajan G. (2005). FeB/Fe₂B phase transformation during sps pack-boriding: Boride layer growth kinetics. *Acta Materialia*, 53, (8), 2361-2368