İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAZI ALAŞIMLI ÇELİKLERİN YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre Dilektaşlı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAZI ALAŞIMLI ÇELİKLERİN YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre DİLEKTAŞLI
(506111441)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

OCAK 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506111441 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Emre DİLEKTAŞLI**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"BAZI ALAŞIMLI ÇELİKLERİN YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Sakin ZEYTİN Sakarya Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2013**
Savunma Tarihi : **20 Ocak 2014**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli danışman hocam Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.
Deneysel çalışmalarım boyunca bana yol gösteren ve yardımcı olan başta değerli hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU olmak üzere Yrd. Doç Dr. Erdem ATAR'a, Araş. Gör. Yakup YÜREKTÜRK'e teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmamda bana her konuda yardımcı olan Yük. Müh. Amir MOTALLEBZADEH'e, Yük. Müh. Merve DEMİRLEK'e ve mekanik labaratuvarlarında çalışan tüm meslektaşlarıma çok teşekkür ederim.
Tez çalışmamda bana teknik destek sağlayan ŞENMAK MAKİNA ve SANAYİ A.Ş.'ye teşekkürü borç bilirim.
Yüksek lisans eğitimim boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür sunarım.

Ocak 2014

Emre DİLEKTAŞLI
Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **24**
2. BORLAMA VE ÖZELLİKLERİ **3**
2.1 Genel Bakış 3
2.2 Borlama Yöntemi 8
2.2.1 Kutu Borlama 8
2.2.2 Pasta Borlama 10
2.2.3 Sıvı Borlama 10
2.2.4 Gaz Borlama 11
3. BORÜRLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ **15**
3.1 FeB ve Fe_2B Fazı Özellikleri 16
3.2 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması 18
4. BOR TABAKASININ AŞINMA ÖZELLİKLERİ **25**
4.1 Aşınma 25
4.2 Bor Kaplamaların Aşınma Özellikleri 27
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **29**
5.1 Deneylerde Kullanılan Çelikler 30
5.2 Borlama İşlemi 31
5.3 Karakterizasyon Çalışmaları 32
5.4 Aşınma Testi 35
6. DENEYSEL SONUÇLAR **37**
6.1 Karakterizasyon Çalışmaları Sonuçları 37
6.1.1 X-Işınları Difraksiyon Analizi Sonuçları 37
6.1.2 Metalografik Sonuçlar ve Kinetik Hesaplar 39
6.1.3 Borür Tabakasının Sertlik Ölçüm Sonuçları 49
6.2 Bor Tabakasının Aşınma Testleri ve Analizleri 60
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER **63**
KAYNAKLAR **65**
EKLER **69**
ÖZGEÇMİŞ **89**

KISALTMALAR

AISI : Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü
EN : Avrupa Standartı
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD : X- Ray Difraksiyonu
HV : Vickers Sertlik Değeri
$Cr_{eş}$: Krom Eşdeğerliği

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Temel difüzyon proseslerinin karakteristik özellikleri..... 4
Çizelge 2.2 : Farklı kaplama yöntemleriyle kaplanmış malzemelerin sertlikleri 6
Çizelge 3.1 : Borlanmış çeşitli malzemelerin sertlik değerleri ve elde edilen fazlar 13
Çizelge 3.2 : Fe_2B ve FeB fazlarının tipik özellikleri..... 16
Çizelge 5.1 : Deneylerde kullanılan çeliklerin kimyasal analiz sonuçları..... 30
Çizelge 5.2 : Kullanılan çeliklerin krom eşdeğerliği..... 30
Çizelge 5.3 : Borlama işlemi sonrası yapılan metalografik işlemler..... 32
Çizelge 6.1 : Dört çelik için hesaplanan K değerleri. 48
Çizelge 6.2 : Borlanmış çeliklerin aktivasyon enerjilerinin Cr eşdeğerliğiyle değişim grafiği. 48
Çizelge 6.3 : Çalışma sonucunda bulunan aktivasyon enerjisi değerlerinin literatürle karşılaştırılması..... 49
Çizelge 6.4 : Yüksek sıcaklık aşınma deneyine tabii tutulan çeliklerin tabaka kalınlıkları ve faz oranları..... 55
Çizelge 6.5 : Borlama işlemi sonrasında 60 mikrometre tabaka kalınlığı elde edilmiş dört farklı çeliğin farklı sıcaklıklarda yapılan yüksek sıcaklık aşınma deneyi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri..... 56
Çizelge 6.6 : 60 mikrometre tabaka kalınlığına sahip dört çeliğin 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklık aşınma deneyi sonucu oluşan aşınma izi analizi. 58
Çizelge 6.7 : 60 mikrometre tabaka kalınlığına sahip dört çeliğin 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklık aşınma deneyi sonucu oluşan relatif aşınma ve sürtünme katsayısı değerleri…….58
Çizelge A.1 : 850, 900 ve 950 ºC' de 4, 6, ve 8 saat süreyle borlanmış AISI 4140, EN 1.8519, AISI H13, AISI 420 çeliklerinin tabaka kalınlıkları.....73
Çizelge C.1 : 850 ºC'de 4, 6, ve 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin 100, 200, 300, 500, 1000 ve 2000 g yük altında ölçülen vickers sertlik testi sonuçları. 83
Çizelge C.2 : 900 ºC'de 4, 6, ve 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin 100, 200, 300, 500, 1000 ve 2000 g yük altında ölçülen vickers sertlik testi sonuçları. 83
Çizelge C.3 : 950 ºC'de 4, 6, ve 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin 100, 200, 300, 500, 1000 ve 2000 g yük altında ölçülen vickers sertlik testi sonuçları. 84

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Farklı difüzyon prosesleri ile elde edilebilen sertlik değerleri 4
Şekil 2.2 : Katı borlama işleminin şematik gösterimi 9
Şekil 2.3 : Gaz Borlama Ünitesi 11
Şekil 2.4 : Demir – Bor Denge Diyagramı 13
Şekil 3.1 : Borlama işleminin aşınma direncine etkisi a) C45 çeliği 1000 ºC de 3 saat borlanmış b) Titanyum 1000 ºC'de 24 saat borlanmış.....16
Şekil 3.2 : a) Tek fazlı FeB tabakası, b) Tek fazlı Fe_2B tabakası, c) Geçis bölgesi, d) Çift fazlı FeB+Fe_2B tabakası. 17
Şekil 3.3 : Matriste ve borür tabakasındaki bor ve diğer elementlerin, yüzde ağırlık olarak değişimleri. 18
Şekil 3.4 : FeB ve Fe_2B tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi 20
Şekil 3.5 : Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi 21
Şekil 3.6 : Çelik kompozisyonun bor tabaka kalınlığı ve morfolojisine etkisi..... 22
Şekil 3.7 : Karbon miktarı artışına bağlı olarak borür tabakasındaki fazların sertliğinin değişimi 23
Şekil 4.1 : C45 (0.45C) çeliğinin aşınma davranışına 900 ºC ve 3 saatlik borlama işleminin etkisi 27
Şekil 5.1 : Pasta bor methodunun numunelere uygulanmasının gösterimi. 31
Şekil 5.2 : Borlama işleminin gerçekleştirildiği tüp fırın 32
Şekil 5.3 : Lecia DM750M marka optik mikroskop. 32
Şekil 5.4 : Bor tabakası kalınlık ölçümünün tipik görüntüsü 33
Şekil 5.5 : Deney numunelerinin faz analizinin yapıldığı GBC-Australia marka faz XRD cihazı. 34
Şekil 5.6 : Shimatzu, HMV2, Japan marka mikrosertlik cihazı. 35
Şekil 5.7 : CSM Yüksek sıcaklık tribotest cihazı.. 35
Şekil 5.8 : Ball on disc türü aşınma deneyinin tipik görüntüsü. 36
Şekil 5.9 : Hitachi TM-100 taramalı elektron mikroskobu..... 36
Şekil 5.10: Dektak-6M, Veeco marka profilometre cihazı (solda), aşınma izlerinin profilometre cihazında ölçümünün tipik görüntüsü (sağda).....37
Şekil 6.1 : Pasta borlama yöntemi ile 850 ºC'de 4 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.. 38
Şekil 6.2 : Pasta borlama yöntemi ile 900 ºC'de 4 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.. 38
Şekil 6.3 : Pasta borlama yöntemi ile 950 ºC'de 4 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.. 39
Şekil 6.4 : 850 ºC 'de 4 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.. 40
Şekil 6.5 : 850 ºC 'de 6 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.....41

Şekil 6.6 : 850 ºC ‘de 8 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.....41
Şekil 6.7 : 850 ºC de 4, 6, ve 8 saat borlanan dört çeliğin tabaka kalınlık ölçümleri.....42
Şekil 6.8 : 900 ºC ‘de 4 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420. 42
Şekil 6.9 : 900 ºC ‘de 4 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420 43
Şekil 6.10 : 900 ºC ‘de 8 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.. 44
Şekil 6.11 : 900 ºC’de 4, 6, ve 8 saat borlanan dört çeliğin tabaka kalınlık ölçümleri.....44
Şekil 6.12: 950 ºC ‘de 4 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420. 45
Şekil 6.13 : 950 ºC ‘de 6 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420. 45
Şekil 6.14 : 950 ºC ‘de 8 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420. 46
Şekil 6.15 : 950 ºC’de 4, 6, ve 8 saat borlanan dört çeliğin tabaka kalınlık ölçümleri. 47
Şekil 6.16 : 850 ºC’ de 4 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi.. 50
Şekil 6.17 : 850 ºC’ de 6 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi.. 50
Şekil 6.18 : 850 ºC’ de 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi. 51
Şekil 6.19 : 900 ºC’ de 4 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi 51
Şekil 6.20 : 900 ºC’ de 4 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi. 52
Şekil 6.21 : 900 ºC’ de 4 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi. 52
Şekil 6.22 : 950 ºC’ de 4 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi. 53
Şekil 6.23 : 950 ºC’ de 6 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi. 53
Şekil 6.24 : 950 ºC’ de 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi... 54
Şekil 6.25 : AISI 4140 Çeliğinin oda sıcaklığında yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü.....59
Şekil 6.26 : AISI 4140 Çeliğinin oda sıcaklığında yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü.....60
Şekil 6.27 : EN 1.8519 Çeliğinin 300 ºC’de yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü.. 60
Şekil 6.28 : AISI H13 Çeliğinin 300 ºC’de yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü.....61
Şekil 6.29 : AISI H13 Çeliğinin 500 ºC’de yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü.. 61
Şekil 6.30 : EN 1.8519 Çeliğinin 500 ºC’de yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü... 62

Şekil B.1 : 60 μm tabaka kalınlığına sahip AISI 4140 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500℃' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.. 75
Şekil B.2 : 60 μm tabaka kalınlığına sahip EN 1.8519 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500℃' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.. 76
Şekil B.3 : 60 μm tabaka kalınlığına sahip AISI H13 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500℃' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.. 78
Şekil B.4 : 60 μm tabaka kalınlığına sahip AISI 420 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500℃' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.. 79
Şekil D.1 : 850 ˚C'de a) 4, b) 6 ve c) 8 saat sürelerle borlanmış çeliklerin XRD sonuçları.……..83
Şekil D.2 : 900 ˚C'de a) 4, b) 6 ve c) 8 saat sürelerle borlanmış çeliklerin XRD sonuçları.……..84
Şekil D.3 : 950 ˚C'de a) 4, b) 6 ve c) 8 saat sürelerle borlanmış çeliklerin XRD sonuçları.……..85
Şekil E.1 : AISI 4140 çeliğinin tabaka kalınlığının karesinin borlama süresine göre çizimi. 87
Şekil E.2 : AISI 4140 çeliği için büyüme hızı sabitinin borlama süresiyle değişim grafiği.. 87
Şekil E.3 : EN 1.8519 çeliğinin tabaka kalınlığının karesinin borlama süresine göre çizimi. 88
Şekil E.4 : EN 1.8519 çeliği için büyüme hızı sabitinin borlama süresiyle değişim grafiği.. 88
Şekil E.5 : AISI H13 çeliğinin tabaka kalınlığının karesinin borlama süresine göre çizimi. 89
Şekil E.6 : AISI H13 çeliği için büyüme hızı sabitinin borlama süresiyle değişim grafiği.. 89
Şekil E.7 : AISI 420 çeliğinin tabaka kalınlığının karesinin borlama süresine göre çizimi. 90
Şekil E. 8 : AISI 420 çeliği için büyüme hızı sabitinin borlama süresiyle değişim grafiği.. 90
Şekil F.1 : AISI 4140 çeliğinin 900 ºC'de 4 saat borlandıktan (~yaklaşık tabaka kalınlığı 60 μm) sonra 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklık aşınma testi sırasında ölçülen sürtünme katsayısı.. 91
Şekil F.2 : EN 1.8519 çeliğinin 900 ºC'de 4 saat borlandıktan (~yaklaşık tabaka kalınlığı 60 μm) sonra 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklık aşınma testi sırasında ölçülen sürtünme katsayısı.. 91
Şekil F.3 : AISI H13 çeliğinin 950 ºC' de 6 saat borlandıktan (~yaklaşık tabaka kalınlığı 60 μm) sonra 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklık aşınma testi sırasında ölçülen sürtünme katsayısı 92
Şekil F.4 : AISI 420 çeliğinin 950 ºC' de 6 saat borlandıktan (~yaklaşık tabaka kalınlığı 60 μm) sonra 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklık aşınma testi sırasında ölçülen sürtünme katsayısı. 92

SEMBOL LİSTESİ

x	**:** Tabaka Kalınlığı
K	**:** Büyüme Hız Sabiti
t	**:** Süre (sn)
A	**:** Sabit
Q	**:** Aktivasyon Enerjisi
R	**:** Gaz Sabiti
T	**:** Sıcaklık
γ	**:** Östenit
Creş	**:** Krom Eşdeğeri

BAZI ALAŞIMLI ÇELİKLERİN YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞINA BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİSİ

ÖZET

Endüstride kullanılan makine ekipmanlarının kullanım dışı kalmasının başlıca sebebi aşınma kaynaklıdır. Birbirleri ile temas ederek çalışan makina parçalarında meydana gelen aşınma önlem alınmadığında oldukça ciddi ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Aşınma nedeniyle üretilen ürünlerde şekil bozuklukları veya kullanılan kalıplarda kalıp hasarları gibi sorunlar meydana gelebilmektedir. Aşınmaya karşı direnç kazanmak için çeşitli yüzey sertleştirme işlemleri mevcuttur. Yüzey işlemleriyle malzemelerin mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Borlama ısıl işlemi demir esaslı malzemelere uygulanan önemli yüzey sertleştirme ısıl işlemlerinden birisidir. Bu yöntemle demir esaslı malzemelerin yüzeylerinde aşınmaya ve çalışma koşullarına yüksek dayanım gösterebilen sert borür tabakası elde edilebilmektedir. Yapılan çalışmada, plastik ekstrüzyon kalıplarında kullanılan kalıp çeliklerin ömrünü uzatmak için yüzeyler pasta borlama yöntemiyle borlanmış böylece yüzey sertleştirilmesi amaçlanmıştır daha sonra borlanan numuneler yüksek sıcaklık aşınma testlerine tabii tutulmuşlardır.

Bu çalışmada plastik ekstrüzyon kalıplarında kullanılan AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 çeliklerinden imal edilmiş olan borlama numunelerine 850 – 900 ve 950 ºC' de 4 – 6 ve 8 saat sürelerle pasta borlama işlemi uygulanmıştır. Bor kaynağı olarak da " Ekabor – Paste " kullanılmıştır. Borlanan numunelerin optik mikro yapı fotoğrafları çekilmiş borlama şartlarına göre 20 ile 140 μm arasında değişen tabaka kalınlıkları elde edilmiş, daha sonra faz analizi için X-ray difraksiyon analizi yapılmış ve Fe_2B, FeB, CrB fazları tespit edilmiştir. Difüzyon bölgesinin kalınlığı ve yüzey sertliği ölçülmüştür. Bu çalışma için sırasıyla 260, 242, 251 ve 250 $HV_{0,2}$ sertliğinde temin edilen AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 kalite çeliklerinin yüzey sertliği borlama işlemi sonucunda 1800-2200 $HV_{0,2}$ mertebesine kadar çıkmıştır.

Bu çalışma kapsamında farklı sıcaklıklarda ve sürelerde borlanan numunelerde farklı kalınlıklarda bor tabakası oluşmuş, aynı borlama parametreleri için çelik bileşiminde krom miktarındaki artışa bağlı olarak daha ince bor tabakası elde edilmiştir. Bu verilerle yapılan kinetik hesaplamalarda AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 çeliklerde bor tabakası büyüme aktivasyon enerjileri sırasıyla 145.3, 222.9, 270.7, ve 146.5 kj/mol olarak bulunmuştur. Kullanılan çeliklerin ihtiva ettiği krom elementi farklılıklarından ötürü borlama kinetiği değişim göstermiş, çeliklerin içerdiği krom elementi miktarının artmasıyla difuzyon prosesi zorlaşmış böylece tabakaların büyümesi için gereken aktivasyon enerjiside artış olmuştur.

Borlanan çeliklerde 60 μm bor tabakasına sahip olanlar seçileresk oda sıcaklığında 300 °C'de ve 500 ºC' de normal atmosferik koşularda disk üzerinde bilya (ball on disc) tipi aşınma cihazında aşındırılmıştır. İncelenenen malzemelerin borlanmış

yüzeyleri oda sıcaklığında aynı mertebede aşınmış olup relatif aşınma hızı 1.0 olarak alınmıştır. Relatif aşınma hızı 300 °C'de AISI 4140 çeliği için yaklaşık 13,5, AISI H13 çeliği yaklaşık 12,0 AISI 420 çeliği yaklaşık 28,4 ve EN 1.8519 çeliği yaklaşık 47,0 mertebelerine yükselmiştir. İncelenen numunelerin aşınma kaybı aşınma deney sıcaklığın 500 °C'ye artırılmasıyla daha da şiddetli artmıştır. Bu sıcaklıkta en düşük relatif aşınma hızı AISI H13 çeliğinde 20.4 olarak belirlenmiştir.

THE EFFECT OF BORIDING PROCESS ON HIGH TEMPERATURE WEAR BEHAVIOUR OF SOME ALLOY STEELS

SUMMARY

One of the trends in scientific and technical progress on the subject of material is the creation of new materials for industry, further, quality improvement of existing materials. The aim is to provide higher reliability of machines and mechanisms, reducing their weight per unit of power, improving processability of new materials. Solution of the mentioned problems is concerned with the following surface layer characteristics of industrial parts: roughness, hardness and hardening depth, wear and cyclic fatigue resistance. Operational reliability of industrial parts highly depends on their surface. Material of the parts assures their strength and rigidity, while the surface secures necessary tribological, mechanical and cyclic characteristics. Lifetime and reliability increase of the industrial parts provide savings of resources and energy, so various methods of surface treatment are very important for modern technologies.

Tool steels represent an important class of material which distinctive hardness, resistance to abrasion, their ability to hold a cutting edge, and/or their resistance to deformation at elevated temperatures. But they still require further enhancement in wear resistance. This fact has led to the development of a number of surface treatments in order to improve their tribological performance such as nitriding by ion implantation, pulsed plasma nitriding and plasma immersion ion implantation, boronizing. Also, it has been well documented that it is possible to extend the service life of many different parts and components, made of relatively soft substrates which are subjected to corrosion and wear, by means of the use of thin hard films such as oxides, nitrides and carbides applied onto their surfaces.

Different superficial hardening processes are commonly applied to metals. Thermo chemical methods, for which the superficial composition is locally modified, can cause microstructures and mechanical properties that are completely different from those of the basic metal.

Two methods for that are known:

- In the first one, diffusing small atoms in the metal surface leads to the formation of an interstitial solid solution,

- In the second, a chemical reaction between the diffused atoms and those of the basic metal leads to the formation of new compounds in the superficial layer. An example of this process is given by the boronizing treatment.

Boriding or boronizing is a thermochemical surface hardening technique used for boride-type coating that can be applied to a large range of materials (ferrous metals, non-ferrous metals and cermets). Boriding can be performed in numerous ways, including gas boriding, molten salt boriding (with and without electrolysis) pack

boriding and paste boriding. The produced layers provide an extremely high hardness, good tribological properties and anti-corrosion resistance of the treated surfaces. It is a surface treatment process in which boron atoms are diffused into the material surface between 800 and 1100 ºC. A boride layer having hardness of 1600–2000 HV is formed by penetrating and diffusing boron to the surface.

In this study AISI 4140, AISI H13, AISI 420 and EN 1.8519 have been paste borided. Paste boriding process have been applied at 850, 900 and 950 °C for durations of 4, 6 and 8 hours by utilizing commercially available Ekabor-Paste. Before the boriding process the surfaces of the samples were ground, polished and then covered with 5 mm thick boriding paste. In the scope of the present study, depending on the process parameters, structural characterization of the developed boride layers were made by microscopic examinations and x-ray diffraction analyses. Measured thickness of the boride layers were then utilized to calculate the activation energy for growth of the boride with respect to the type of the substrate. Mechanical properties of the borided surfaces were determined by hardness measurements and wear tests. Hardness measurements were conducted on a microhardnes tester under intentation load varied between 100 and 2000 g by utilizing a standard pyrimide indenter. Wear tests were performed on a ball-on disc type wear tester by rubbing an alumina ball under load of 2 N. The diameter of the alumina ball was 6 mm. During wear tests alumina ball followed a circular path on the surfaces of the samples so that the diameter of the circular path was 5,5 mm. Total sliding distance was 250 m. Wear tests were made at room temperature, 300 °C and 500 °C. After the wear tests the wear tracks developed on the surfaces of the samples were analysed by stylus type surface profilometer and examined by a scanning electron microscope.

The result of this investigation can be summarized as follows;

- Thickness of boride increased with increasing of the boriding temperature and bording time, as expected. The largest oride layers was obtained at boriding temperature of 950 ºC after duration of 8 hours as 140.0, 70.2, 65.9 and 130.8 μm for AISI 4140, AISI H13, AISI 420 and EN 1.8519 steels, respectively. The thickness and morphology of boride layers developed under identical boriding parameters varied with respect to the chemical composition of steel. Optical microscope cross-sectional examinations of borided AISI 4140 and EN 1.8519 steels showed characteristic saw-tooth morphology. But for the AISI H13 and AISI 420, the development of the saw-tooth interface was suppressed and a smooth interface was formed. X-ray analysisi revealed that boride layers were consisted of Fe_2B, FeB and CrB phases.

- The growth of boride layers over the examined steels obeyed parabolic kinetics by yieldeing activation energy values as 145.3, 222.9, 270.7 and 146.5 kJ/mol for AISI 4140, AISI H13, AISI 420 and EN 1.8519 steels, respectively.

- Presence FeB layer over the Fe2B layer, as the outermost surface layer, induced higher surface hardness values. Thickening of the FeB layer provided an increase in surface hardness with increasing boriding temperature and time. Boriding temperature and times of 950 ºC and 8 hours, yielded hardness values of 1934, 2197, 2006, 1855 $HV_{0.2}$ on the surfaces of AISI 4140, AISI H13, AISI 420 and EN 1.8519 steels, respectively.

- Wear tests conducted on the examined steels covered with about 60 μm boride layer showed dramatic loss in wear resistance with increasing wear testing temperature, with the exception of AISI H13 steel. At room temperature borided

steels displayed similar wear rates by providing relative wear rate of about 1.0. At 300 ºC the wear rates of the AISI 4140, AISI H13, AISI 420 and EN 1.8519 steels were quantifed as 13.3, 46.2, 11.7 and 28.1, respectively. At 500 ºC relative wear rates were determined as 200.6, 198.8, 20.2, 129.1 for the AISI 4140, AISI H13, AISI 420 and EN 1.8519 steels, respectively.

1. GİRİŞ

Günümüzde seri üretim oldukça önemli bir hale gelmiştir.Seri üretime geçmeyip tek tek parça üretmek artık imkansız hale gelmiş bu nedenle bir çok seri üretim tekniği geliştirilmiştir. Başlıca seri üretim metodu olarak kalıpla üretim tercih edilmektedir. Bu kalıplar sayesinde parçalara nihai şekiller verilmektedir. Kalıp sözcüğü oldukça geniş bir anlama sahip olup teknik açıdan bir çok sayıda özdeş olan ürünü seri olarak üretmeye yarayan parçalara denir. Hemen hemen her sektörün üretim etaplarında çeşitli kalıplardan yararlanılır. Kalıp malzemeleri üretilecek malzemenin özelliklerine göre değişip plastik, çelik ve kompozit gibi çok geniş bir çeşide sahiptir. Plastik, polimer ve kauçuk gibi malzemelere şekil vermek üzere üretilen kalıplarda kullanılan malzemeler plastik kalıp çelikleri olarak sınıflandırılmaktadır. Günümüz kalıp sektöründeki ihtiyaç ve taleplerin artması neticesinde özellikle plastik enjeksiyon kalıplarında kullanılan çeliklerden istenilen özellikler artmaktadır. Yüksek adetlerdeki baskı sayıları, yüksek çevrim hızları, yüksek sertlik ve tokluk, paslanmazlık, yüksek parlatılabilirlik, yüksek sertlik ve aşınma direnci gibi özellikler bunların başında gelmektedir [1]. Plastik kalıp çeliklerinden beklenen temel özellikler sıralanacak olursa temiz ve homojen mikro yapı, kolay işlenebilirlik (ön sertleştirilmiş malzemeler dahil), yüksek aşınma dayanımı, çalışma esnasındaki plastik hammaddenin yüksek basıncına dayanım, çok iyi parlatılabilirlik ve yüksek korozyon direncinden bahsedilebilir. Kalıp çeliklerinin ömrünü artırmak ve maliyetleri düşürmek için bir takım yüzey sertleştirme operasyonları yapılmaktadır. Yüzey sertleştirmenin amacı, metal parçaların yüzeylerinin sertliğini, aşınma direncini, korozyon direncini ve bununla birlikte yorulma ömrünü arttırmaktır [2]. Birçok yüzey sertleştirme işlemi mevcut olup bunlardan başlıcaları sementasyon, karbürleme, nitrürleme,sert krom kaplama, ve borlamadır. Yüzey sertleştirme metotlarından olan borlama işlemi günümüzde sürtünme ile çalısan makine elemanlarında ortaya çıkan problemlere çözüm olarak gelistirilen termo-kimyasal bir islemdir. Ortamdaki bor atomlarının malzeme yüzeyine sıcaklıkla beraber difüzyon

olması ile meydana gelmektedir. Tüm çeliklere, nikel alasımlarına, titanium alasımlarına ve sinterlenmis karbürlere basarılı bir sekilde uygulanabilmektedir [3]. Çelik ve dökme demir çeşitlerinin borlanması işlemi genellikle 840 ºC ile 1050 ºC sıcaklık aralığında yapılır. Borlama ile parça yüzeyinde bir metalik borür tabakası oluşur. Borlama işlemiyle malzeme yüzey setliği 2000$HV_{(0.2)}$ seviyelerine yükseltilir, sertliğin yükselmesine bağlı olaraktan malzemenin aşınma direnci karbürleme ve nitrürleme gibi diğer yüzey işlemleriyle karşılaştırıldığında artar [4].

Bu çalışmanın amacı; AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 kalıp çeliklerinin farklı sıcaklıklar ve sürelerde borlanması, borlama kinetiğinin hesaplanması ve borlama işlemi sonucunda çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışlarının incelenmesi olarak belirlenmiştir.

2. BORLAMA ve ÖZELLİKLERİ

2.1 Genel Bakış

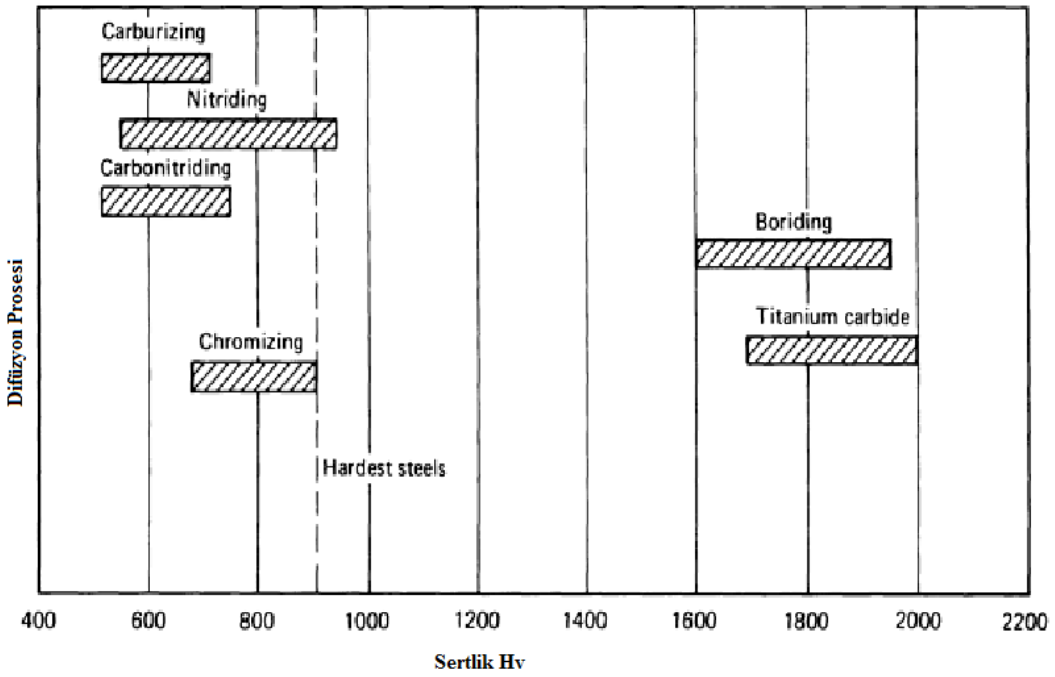
Endüstride makine elemanlarının kullanım dışı kalmasının başlıca sebepleri; aşınma, yorulma, ve korozyondur. Birbirleri ile temas ederek çalışan makina parçalarında meydana gelen aşınma, önlem alınmadığında oldukça ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle aşınmanın bilinmesi ve önlenmesi ya da en azından azaltılabilmesi için gerekli olan tedbirlerin alınması bu kayıpları azaltabilmektedir. Birbiri ile temasta olan yüzeyler hareket ettiklerinde meydana gelen aşınma, gittikçe artan malzeme kaybınıda içererek her iki yüzey için hasar oluşturacaktır. Aşınma, parçalar arasındaki açıklığın artışına, istenmeyen hareket serbestliğine hassasiyet kaybına ve bununla beraber çok daha hızlı aşınmaya ve bazende yorulma kırılmasına neden olabilmektedir. Sadece sıvı veya katı yağlayıcı kullanmakla önlenmeye çalışılan bu probleme şimdilerde tribolojik yaklaşımlarla yüzey işlemleri veya kaplamalar kullanılarak aşınmanın önlenmesi yönündedir. Günümüzde aşınma direncini artırmak için kullanılan bir çok teknik bulunmaktadır. Malzemelerin aşınma dirençlerini artırmak için kullanılan yüzey işlemleri yapılan işlemin türüne göre 3 başlıkta toplanabilir. Bunlar;

1. Difuzif bir yöntemle yüzeyin yapısını ve kompozisyonunu tamamen değiştirip, uygulamanın yapıldığı yüzeyde tamamen farklı bir bileşik oluşturmaktır. Bu difuzyon proseslerine en temel örnek olarak nitrürleme, karbürleme ve borlama verilebilir [5].

2. Yüzeyin mikroyapısını çeşitli ısıl işlem metodlarıyla değiştirmektir. Bunlara örnek olarka indüksiyonla sertleştirme, alevle sertleştirme gösterilebilir.

3. İnce film kaplama metotlarından olan PVD ve CVD teknikleriyle malzemelerin yüzeyine püskürtme yoluyla yüzeyde sert seramik kaplamalar oluşturmaktır [6].

Yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirerek gerçekleştirilen işlemler termo kimyasal difüzyon prosesleri olarak adlandırılırlar. Bu proseslerde karbon, nitrojen ve boron gibi atomların metallere difuze olması yoluyla, malzemelerin yüzey özelliklerini ve bazı mekanik özelliklerini iyileştirmek başlıca amaçtır. Şekil 2.1'de borlama, nitrürleme ve karbürleme işlemlerinin yüzey sertliğine etkisi gösterilmiştir. Çizelge 2.1 de ise karbürleme, nitrürleme ve borlama işlemlerinin proses sıcaklığını, oluşan tabaka kalınlıklarını, ve elde edilen sertlikleri vermektedir.



Şekil 2.1: Farklı difüzyon prosesleri ile elde edilebilen sertlik değerleri [7].

Çizelde 2.1: Temel difüzyon proseslerinin karakteristik özellikleri [7].

Proses	**Proses Sıcaklığı(ºC)**	**Yüzeyden Derinlik(µm)**	**Yüzey Sertliği(Hv)**
KARBÜRLEME			
Toz	815-1090	125-1500(µm)	513-773
Gaz	815-980	75-1500(µm)	513-773
Sıvı	815-980	50-1500(µm)	513-833
NİTRÜRLEME			
Gaz	480-590	125-750(µm)	513-1100
Tuz Banyosu	510-565	25-750(µm)	513-1100
İyon	340-565	75-750(µm)	513-1100
BORLAMA			
Toz	750-1100	10-200(µm)	1450-2250
Pasta	750-1100	10-100(µm)	1450-2250

Dünyanın en büyük bor rezervlerine sahip olan Türkiye, bor minerali ve ticari boratlar üretiminde belirli bir yerde olup jeopolitik konumu ve sahip olduğu diğer değerlerle birlikte düşünüldüğünde stratejik önemde bir kaynağın başında bulunmaktadır. Ancak bu ulusal avantajın en iyi şekilde değerlendirilebilmesi ve dünya ölçüsünde üstün bir rekabet gücü kazanılması için ürün çeşidini artırması veya kullanım alanlarını genişletmesi gerekmektedir [8].

Son yıllarda özellikle demir esaslı alaşımlar üzerine termokimyasal yöntemle bor kaplamalar ilgi odağı olmuştur. Bu şekilde kaplanmış numunelerin yüzeyinde üstün mekanin özellikler elde edilebilmiştir. Borlama işlemi; yüzeyi sertleştirilmiş çeliklere, temperlenmiş çeliklere, takım çeliklerine, paslanmaz çeliklere, dökme demirlere, uygulanabilmektedir.

Bor, periyodik tabloda B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 olan geçiş elementidir. Bor tabiatta serbest halde bulunmaz. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, endüstride birçok bor bileşiğinin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bor, bileşiklerin elektrik iletkenliği azdır. Kristalize bor görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir [9].

Borlama termo-kimyasal işlemle malzeme yüzeyine bor difüzyonun sağlanması, şeklinde tarif edilen bir yüzey sertleştirme ve kaplama işlemidir. Bor atomları ısıl enerji yardımıyla, iş parçası yüzeyindeki metalik latislere yayındırılır ve burada esas malzeme atomlarıyla uygun borürleri oluştururlar. Eğer demir ve çelik türü malzemeler borlanıyorsa, demir borürler oluşur. Günümüzde borlama yüzey sertleştirme amacıyla, aşınma direnci gerektiren makine parçalarında kullanılmaktadır. Çelik malzemelerin borlanması genellikle 850 - 1000 ºC sıcaklık aralığında 2-10 saat surede gercekleştirilmektedir. Borlu tabakanın özellikleri ve kalınlığı; malzeme, işlem sıcaklığı ve suresi gibi değişkenlere bağlıdır. Borlama ile çelik yüzeyinde oluşan tabaka sertliği 2300 Hv'e kadar çıkabilmektedir. Ayrıca sementasyonda olduğu gibi hızlı soğutmaya gerek yoktur. Borlama işleminde, borun yüzeye yayınması sonucu parçanın yüzeyinde bileşik tabaka adı verilen borlu bölge, onun altında yayınma (difüzyon) bölgesi ve iç kısımda da işlemden etkilenmemiş olan çekirdek bölge yer alır. FeB ve Fe_2B olmak üzere iki demir borür fazı oluşur. Bu iki fazın oluşturduğu bileşik tabaka, testere dişi gibi difuzyon tabakası ile birleştiği

gibi oldukça düz bir yapıda da olabilir. Bu durumu çeliğin alaşım elementleri miktarı belirler. Bileşik tabaka Fe_2B, veya $FeB+Fe_2B$ şeklinde oluşur. Ağırlıkça % 16.23 oranında bor içeren, borca zengin FeB fazı diğer demir bor fazlarından daha gevrektir. Ayrıca FeB ile ağırlıkça % 8.93 bor iceren Fe_2B fazları çok farklı ısıl genleşme katsayılarına sahiptir. Bu uyumsuzluğun neticesinde, çift fazlı bileşik tabakalarda çatlak oluşumu ve kabuk gibi kalkma vb hasarlar oluşabilir [10]. Ancak bu durum her zaman geçerli değildir.

Borlama işleminin şu gibi avantajları mevcuttur;

Bor tabakası çok yüksek sertlik ve ergime noktasına sahiptir. Diğer geleneksel sertleştirme işlemleriyle karşılaştırıldığında oluşan tabakanın sertliğide yüksektir. Bu yüksek sertlik değerlerini yüksek sıcaklıklarda korur. Çizelge 2.2 'te farklı kaplama yöntemleriyle kaplanmış malzemelerin sertlikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 2.2: Farklı kaplama yöntemleriyle kaplanmış malzemelerin sertlikleri [7].

Malzeme	**Mikrosertlik kg/mm2 veya HV**
Borided mild steel	1600
Borided AISI H13 die steel	1800
Borided AISI A2 steel	1900
Quenched steel	900
Hardened and tempered H13 die steel	540-600
Hardened and tempered A2 die steel	630-700
High speed steel BM42	900-910
Nitrided steel	650-1700
Carburized low-alloy steels	650-950
Hard chromium plating	1000-1200
Cemented carbides, WC+Co	1160-1820 (30 kg)
$AL_2O_3 + ZrO_2$ ceramic	1738 (30kg)
Sialon ceramic	1569 (30 kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B_4C	5000
Diamond	10000

Borür tabakasının yüksek sertlik değeri ve düşük sürtünme katsayısı değerine sahip olması, aşınma direncinin oldukça yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu özellik, kalıp imalatında ana malzemenin işlenmesi sırasında kolaylık, maliyetinde ucuzluk ve orijinal yapıya göre mekanik özellikler açısından çok daha üstün özellikler sağlamaktadır [11].

Borlama işlemiyle beraber metallerin erozyon ve korozyon direnci alkali ortamlarda dahi yükselmiştir. Bu sayede borlanmış ömrülerin kullanım ömürleri daha uzundur. [7].

Borlanmış yüzeyler yüksek sıcaklıklarda (750-850 ºC) oksidasyona dirençlidir [7]. Borlama işlemi, yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk kaynaklanma eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedirler [7, 11].

Borlama işlemini dezavantajları ise şunlardır;

Borlama işlemi sonunda oluşan tabaka kalınlığının %5 ile %20'si arasında değişen oranlarda malzemenin kalınlığında artış olur. Örneğin 100 μm'lik bir tabaka kalınlığı 5-20 μm 'lik kalınlık artışına sebep olur.

Yüksek hız çeliklerinin sertleştirme sıcaklıkları genellikle 1150 °C'den fazla olduğu için, borlamaya uygun değildir.

Geleneksel takımlarla borlanmış yüzeyleri işlemek pek mümkün değildir. Geleneksel takımlarla işlenen yüzeylerde kırılma veya çatlamalar gözlemlenir. Hassas toleranslar için elmas uçlarla taşlama yapılması gerekmektedir. Bu yüzden borlama işlemi geniş kesitli parçalarda daha çok tercih edilir.

Borlama işlemi yapılmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınç altında (2000 N) sementasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği, dişli üretimine (örneğin vites kutusu) sınırlama getirmektedir.

Borlama işlemi biten takım parçalarına ısıl işlem uygulanacaksa bu işlem borlanmış tabakaların zarar görmemesi için inert gaz atmosferinde yapılmalıdır.

Borlanmış parçalar anlaşılacağı üzere yüksek sertlik, yüksek korozyon ve aşınma dayanımı gereken koşullarda tercih edilmesi bu prosesi daha ekonomik kılacaktır.

2.2 Borlama Yöntemi

Bor kaynağı ve bor sağlayıcı bileşikler katı, sıvı veya gaz fazında olabilirler. Borlama işlemi teknolojide birçok yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler, iki ana grupta toplanmaktadır.

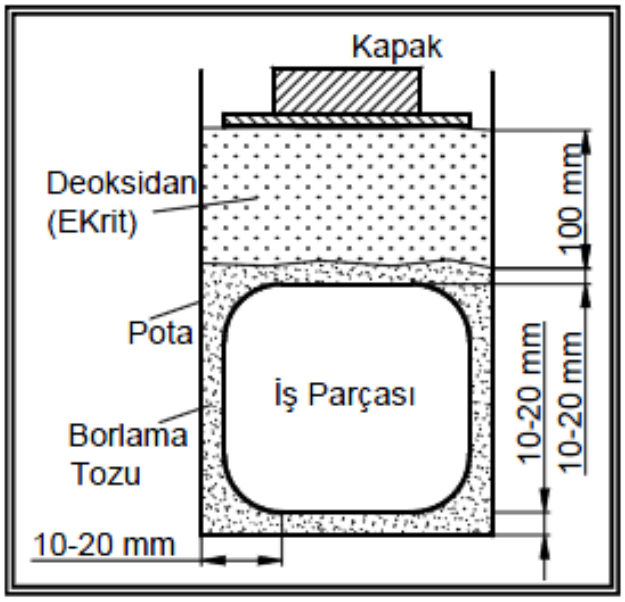
a) Termo-kimyasal yöntemler (kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama ve gaz borlama)

b) Termo-kimyasal olmayan yöntemler (fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey kaplama ve iyon biriktirme).

Bu teknikler içerisinde en çok kullanılanları, termo- kimyasal yöntemlerdir. Termo-kimyasal bor kaplama işlemi, sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonuna dayanan bir kaplama yöntemidir. Termo- kimyasal bor kaplama yöntemleri dört ana grup altında toplanmaktadır [7, 9]. Bunlar yukarıda da belirtildiği gibi kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama ve gaz borlamadır.

2.2.1 Kutu Borlama

Uygulanmasının kolay olması, basit donanım gerektirmesi, ekonomik, güvenli ve kullanılan toz karışımın kimyasal kompozisyonunda değişiklik yapılabilirliği nedeniyle en yaygın borlama tekniğidir. Kutu borlama, borlanacak malzemenin bor verici ortam olan toz karışımı içerisinde belirli sıcaklık ve sürelerde bekletilmesiyle gerçekleştirilir. Katı borlama işleminin şematik gösterimi Şekil 2.2 ’de verilmiştir. Potanın (kutu) içerisinde, hazırlanan toz karışımı borlanacak parçanın etrafını en az 10-20 mm kaplayacak şekilde yerleştirilir. Borlama tozlarının üzerine SiC gibi bir dolgu malzemesi doldurulur. Üst kısma ise hava girişini dolayısıyla oksitlenmeyi engelleyecek şekilde bir kapak kapatılır. Pota hacmi, fırın hacminin % 60’nı geçmemelidir. Bunun nedeni ısıtıcılara yakın olması nedeniyle, potada meydana gelebilecek yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve pota yüzeyindeki malzeme dökülmelerini önlemek ve işlem sırasında yeniden toz ilavesinin (% 20-50) gerektiği durumlarda borlamaya devam edilebilmesi içindir. Yaygın olarak kullanılan bor bileşikleri bor karbür (B_4C), ferrobor ve amorf bordur. Ferrobor ve amorf bor çok iyi bor verici olup, kalın borür tabakası oluştururlar. SiC ve Al_2O_3 çözünmeye yardımcı



Şekil 2.2: Katı borlama işleminin şematik gösterimi.

olur. Aktivatör olarak $NaBF_4$, KBF_4, $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl, Na_2CO_3, BaF_2 ve $Na_2B_4O_7$ kullanılır. Pota olarak alaşımsız çelik, paslanmaz çelik veya alümina kutular kullanılabilmektedir. Borlama kaynağı olarak literatürde verilen toz karışımları şöyledir :

- % 5 B_4C, % 90 SiC, % 5 KBF_4
- % 50 B_4C, % 45 SiC, % 5 KBF_4
- % 85 B_4C, % 15 Na_2CO_3
- % 95 B_4C, % 5 $Na_2B_4O_7$
- % 84 B_4C, % 16 $Na_2B_4O_7$
- Amorf bor (% 95–97), % (3-5) KBF_4
- % (40–80) B_4C, % (20-60) Fe_2O_3
- % 60 B_4C, % 5 B_2O_3 , % 5 NaF, % 30 demiroksit

Boraks içeren katı bor bileşenlerinde serbest bor eşitlik 2.1'deki gibi gerçekleşmektedir.

$$B_4C + Na_2B4O_7 \rightarrow B + CO + Na_2O \qquad \textbf{(2.1)}$$

Genel olarak çelik borlama ortamında 850 – 1000 °C sıcaklıklarda 2 - 24 saat tutularak borlanır. Borlama ortamı, bor kaynağı, aktivatör, dolgu ve deoksidantlardan oluşmaktadır. Aktivatör tabakanın düzenli büyümesine etki eder. Dolgu ve deoksidantlar borlama sıcaklığında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam

oluştururlar. Ayrıca borlama maddelerinin ana malzemeye yapışmasını önlerler [9, 12].

2.2.2 Pasta Borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın zor veya pahalı geldiği durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, %45 B_4C, (200-400 mesh tane boyutu) ve %55 kriyolit (Na_3AlF_6 flaks ilaveli) kullanılırken yada iyi bir bağlama ajanı içinde (bütil asetat içinde çözünmüş nitro selüloz) geleneksel borlama tozu karışımı (B_4C-SiC-KBF_4) kullanılır. Bu yöntemle borlayıcı karışım malzemenin yüzeyine püskürtülürek veya fırçayla sürülerek oluşturulur ve kurutmadan sonra istenilen miktarda kurutulmuş tabaka elde edilir (1-10mm). Sonraki aşamada pasta borlama işlemi yapılmış malzeme 800-1000 ºC lik bir fırında 2-12 saat süreyle ısıtılır [13]. Bu prosesin kutu borlamadan farklı tarafı koruyucu atmosfere ihtiyaç duymasıdır. Koruyucu atmosfer olarak argon veya N_2 gereklidir. Bu proses büyük parçalar ve kısmi borlama gerektirecek parçalar için idealdir [14].

2.2.3 Sıvı Borlama

Bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuza, iş parçasının daldırılması yöntemidir. Daldırma süresi borlama süresidir. Borlama işlemi 900–1100 °C sıcaklıkta ve 2–9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklığın 850 °C nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından borlama imkansız hale gelecektir. Sıvı ortam borlaması sırasında borlanan metal ile redükleyici madde arasında galvanik pil oluşur. Aktif bor oluşumu sırasında metal yüzeyinde katodik bir reaksiyon olurken, redükleyici madde yüzeyinde anodik bir reaksiyon olmaktadır. Bu işlemin oluşması için; borlanacak metal ile redükleyici madde taneleri arasında elektrokimyasal farkın bulunması gerekir. Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama işlemi 670 – 1000 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ortamda borlama, iki ana grupta toplanır;

a) Elektrolitik sıvı borlama ve

b) Elektrolizle sıvı borlama yöntemleridir.

Bu yöntemlerin birçok dezavantajı vardır; Bunlar,

• Tuz kalıntılarının malzeme üzerinde kalması ve ortamda reaksiyona girmeyen

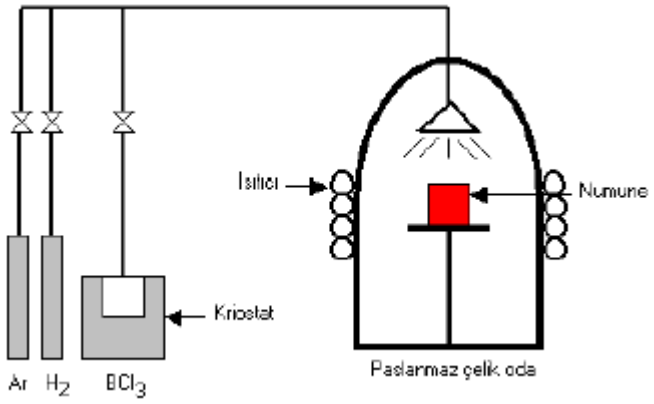
borun varlığı zaman ve para kaybına yol açar.

• Borlama işleminin başarıyla yürütülmesi için banyo viskozitesinin arttırılması gereklidir ve bu sebeple tuz ilavesi yapılmaktadır. Bu da işlemin maliyetini arttırmaktadır.

• İşlem için malzemeyi korozif ortamlardan koruyacak fırınlara ihtiyaç vardır [15].

2.2.4 Gaz Borlama

Gaz Borlama BCl_3, H_2 ve N_2 gaz karışımı atmosferinde yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen borlama prosesidir. Borlama ortamının gaz fazında olduğu borlama işlemidir. Borlama işlemi Ar ve H_2 gazlarının ve bir evapotartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının belirli karısımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesiyle yapılır (Şekil 2.3). İşlem 700 – 950 ^oC sıcaklık aralığında ve 67 Kpa 1:15 BCl_3+H_2 gaz karışımında gerçekleştirilmektedir. Gaz borlamada gazlaştırılabilen BCl_3 (bor halitler), BF_3, B_2H_6 (diboran) ve TEB (trietil boran) gibi bor bileşikleri ve redüktan olarak hidrojen gazı kullanılmaktadır. Gaz borlama işleminde genellikle bor halitler ve diboran kullanılmaktadır.



Şekil 2.3: Gaz Borlama Ünitesi.

Diboran ve bor halitlerin gazları zehirli ve patlayıcıdır; çevreyi kirletici etki yaptığından ticari kullanımı sınırlıdır. Gaz borlamada gaz sirkülasyonu sonucu daha uniform bir bor dağılımı sağlanmakta ve sonradan temizleme gerektirmediği için numune kolay elde edilmektedir.

Gaz borlamanın avantajları :

• Gaz sirkülasyonunun bir sonucu olarak borun daha çok yayılması.

• Katı borlama işlemine göre gelişmis sıcaklık kararlılığı ve elde etme kolaylığı [29].

Gaz borlamanın dezavantajları:

• Trimetil bor, borlama ile birlikte C yayınımına neden olarak tabaka kalitesini bozar.

• Tesisatı pahalıdır.

• Ortam zehirlidir [16].

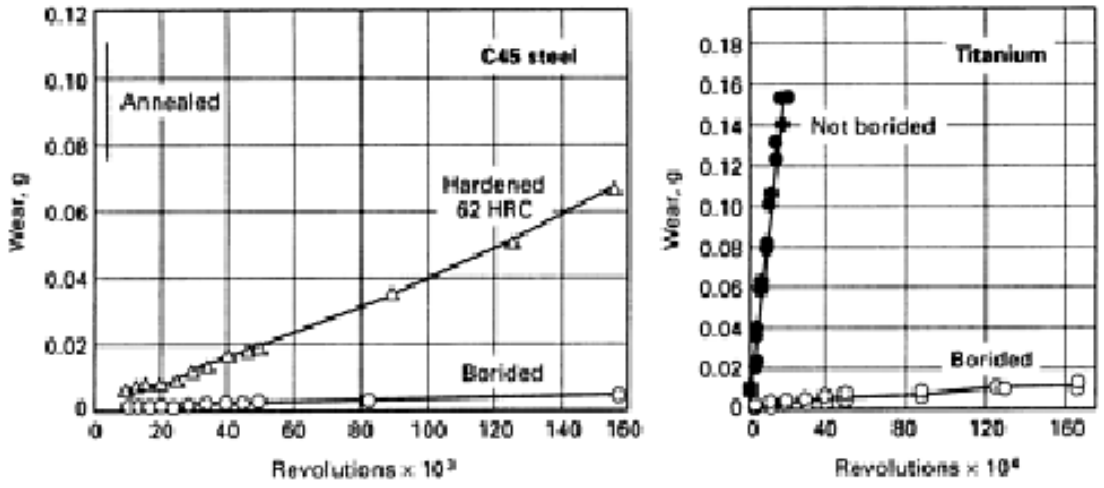
3. BORÜRLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

Borlama yöntemiyle, boron atomlarının metalik malzemenin latis boşluklarına difüzyonu ile intermetalik bor bileşikleri elde edilmektedir. Oluşan bor tabakası tek fazlı ya da birden fazla faz içerebilmektedir. Bor tabakalarının morfolojisi, oluşan fazların çeşidi ve tabakaların büyüme mekanizması borlanan malzemenin kendisiyle ve içerisindeki alaşım elementleriyle doğrudan ilgilidir. Keza oluşan bor tabakasının mikro sertliği elde edilen bor tabakasının çeşidine ve yapısına ayrıca borlanan metalin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Çizelge 3.1 borlanmış çeşitli malzemelerin sertlik değerlerini ve elde edilen fazları göstermektedir.

Çizelge 3.1: Borlanmış çeşitli malzemelerin sertlik değerleri ve elde edilen fazlar. a) 100g load b) 200g load.

Malzeme	**Elde Edilen Fazlar**	**Mikro sertlik Hv kg/mm2**
Fe	FeB	1900-2100
	Fe_2B	1800-2000
Co	CoB	1850
	Co_2B	1500-1600
	Co_3B	700-800
Co-27.5 Cr	CoB	2200 (100g)[(a)]
	Co_2B	1550 (100g)[(a)]
	Co_3B	700-800
Ni	Ni_4B_3	1600
	Ni_2B	1500
	Ni_3B	900
Inco 100	…	1700 (200g)[(b)]
Mo	Mo_2B	1660
	MoB_2	2330
	Mo_2B_5	2400-2700
W	W_2B_5	2600
Ti	TiB	2500
	TiB_2	3370
Nb	NbB_2	2200
	NbB_4	-
Hf	HfB_2	2900
Zr	ZrB_2	2250

Bor tabakalarının diğer geleneksel yüzey sertleştirme işlemlerine göre bir çok avantajı vardır. En belirgin avantajı ise hemen hemen bir çok yüzey sertleştirme operasyonunda daha yüksek sertlikler elde edilir. Bunun yanı sıra genelde düşük yüzey sürtünme katsayısına sahiptir. Bu iki durumun kombinasyonu bor tabakalarını aşınma mekanizmalarına karşı oldukça dirençli kılmaktadır. Şekil 3.1 borlama işlemine tabi tutulmuş C45 çeliğinin ve titanyumun aşınma davranışları gösterilmiştir.



a) **b)**

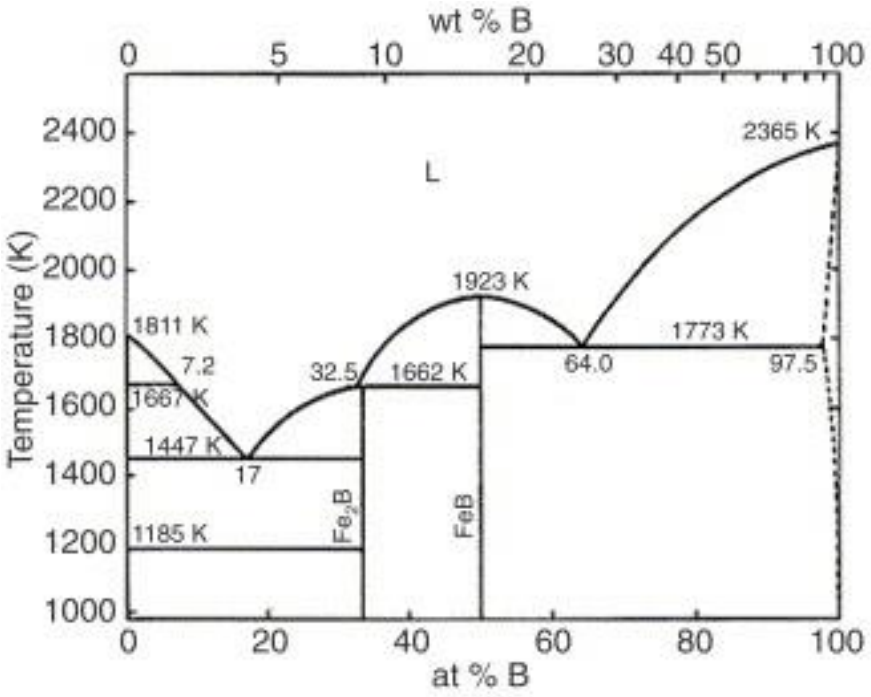
Şekil 3.1: Borlama işleminin aşınma direncine etkisi a) C45 çeliği 1000 ºC de 3 saat borlanmış b) Titanyum 1000 ºC'de 24 saat borlanmış [7].

Elde edilen yüksek sertlik değerleri yüksek sıcaklıklarda (600 – 750 ºC) etkisini sürdürmektedir. Bu durum diğer yüzey sertleştirme işlemlerinden olan nitrürleme kıyasla büyük bir avantaj sağlamaktadır. Oksidasyon dirençleride 850 ºC'ye kadar oldukça yüksektir.

Termo-kimyasal difüzyon prosesi olan borlamayla günümüzde bir çok demir esaslı malzeme aşınmaya karşı dirençli hale getirilmek için borlanmaktadır. Borlama işlemi alaşımsız ve alaşımlı çeliklere yapılabildiği gibi dökme demir ve sinter demirede yapılabilmektedir. Kurşunlanmış ve sülfürlü çelikler yüzeyde çatlak oluşturma ihtimaline karşı, nitrürlenmiş çelikler ise çatlak hassasiyetleri sebebiyle borlama işlemine tabi tutulmamalıdır. Borlama işlemi yapılmış demir esaslı malzemelerde aşınma direnci yüksek, oldukça sert yüzeyler elde edilir. Elde edilen yüzeyler malzemenin alaşım elementi miktarına göre ya testere dişli bir yapıya sahiptir ya da ana malzemeyle düz bir uyum içerisindedir. Borlama işleminden hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, demir-çeliklerde yüzeyde iki çeşit borür fazı

oluşabilmektedir. Bunlar en dış yüzeyde FeB fazı ve FeB fazı ile matris arasında oluşan Fe_2B fazı şeklindedir. Tek FeB fazı oluşmaz sadece Fe_2B fazı veya FeB ve Fe_2B fazlarının beraber olduğu tabakalar oluşmaktadır [17].

Demir alaşımlarında alaşım elementlerinin genellikle atom çaplarına bağlı olarak arayer ve yer alan element olarak eriyebileceği bulunmuştur. Bu gerçekten hareketle, bor a-Fe'de hem yer alan hem de arayer pozisyonunda olabilmektedir. Bor çeliklerde katı halde, ppm mertebesinde çözünmektedir. Borun atom çapı demirin atom çapından %27 daha küçük olduğundan bu element ile katı eriyik yapabilmektedir [12, 18]. Fe-B ikili denge diyagramında, % 7,2 B konsantrasyonuna kadar 1394°C'de γ-Fe'den γ+sıvıya dönüşen bir reaksiyon yer alırken, 911 °C'de γ-Fe+Fe_2B'den α-Fe_2B'e dönüşen bir reaksiyon yer almaktadır. Fe-B denge diyagramı incelenecek olursa (Şekil 2.4), yaklaşık olarak % 17 B bileşiminde α-Fe ile Fe_2B arasında 1174 °C'de bir ötektik reaksiyon, 1389 °C'de sıvı+FeB arsında bir peritektik reaksiyon ve % 33,3 B bileşiminde Fe_2B intermetalik bileşiğinin yer aldığı görülmektedir. Ayrıca, diyagramda görülmeyen dengesiz Fe_3B ve FeB_2 gibi intermetalik bileşiklerin de oluşabildiğine birçok makalede rastlanmaktadır. İncelenen birçok makalede, Fe_2B fazının ergime sıcaklığının 1389-1410°C arasında ve FeB fazının ise 1540-1657 °C arasında yer aldığı görülmektedir [14].



Şekil 3.2: Demir – Bor Denge Diyagramı [19].

3.1 FeB ve Fe_2B Fazı Özellikleri

Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı Fe_2B fazı, çift fazlı Fe_2B + FeB fazları borlama işlemi sonucunda oluşmaktadır. Ana metallae literatürde testere dişi şeklinde adlandırılan tutunma yüzeyleri vardır. Kolonsal bir görünüm sergileyen bu tabakalar gerçekte birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında çatlaklar oluşmaktadır. Bu etki mekanik zorlamalar altında borür tabakasının tabakaların kalkmasına neden olmaktadır. Termal şok veya mekanik etkiler altında ayrılmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir [20]. Ancak termal streslerin optimum seviyelere çekilebilmesiyle mekanik etkilere dayanım artırılabilir. Termal streslerin optimum olduğu durum ise ya tek fazlı Fe_2B fazı ya da doğru oranlarda tabaka kalınlığı elde edilmiş FeB+ Fe_2B çift fazlı yapıdır. Tek fazlı Fe_2B fazını elde etmek kolay bir proses olmadığı için çift fazlı kullanımlarda termal stres hesapları iyi yapılmalıdır. Fe_2B ve FeB fazlarının Çizelge 3.2 'de verilen özellikleri bir çok makalede farklı değerler almaktadır. Bu çizelgede, daha çok belirli makalelerden değerler alınmış olup, yayınlanan diğer makalelerden bazıları referans olarak verilmiştir.

Çizelge 3.2: Fe_2B ve FeB fazlarının tipik özellikleri.

Özellik	Fe2B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merkezli Tetragonal	Ortorombik
Latis Parametresi (Aº)	A= 5.078, c=4.28	A=4.053, b=5.495, c=2.946
Mikrosertlik (GPA)	18-20	19-21
Elastisite Modülü (GPa)	280-295	590
Bor İçeriği (%ağırlıkça)	8.83	16.23
Yoğunluk (gr/cm3)	7.43	6.75
Termal Genleşme Katsayısı (ppm/ºC)	7.65 (200-600 ºC) 4.25 (100-800 ºC)	23 (200-600 ºC)
Ergime Sıcaklığı (ºC)	1389-1410	1540-1657
Termal İletkenllik (W/mk)	30.1 (20 ºC)	12.0 (ºC)
Elektriksel Direnç (106 Ω.cm)	38	80

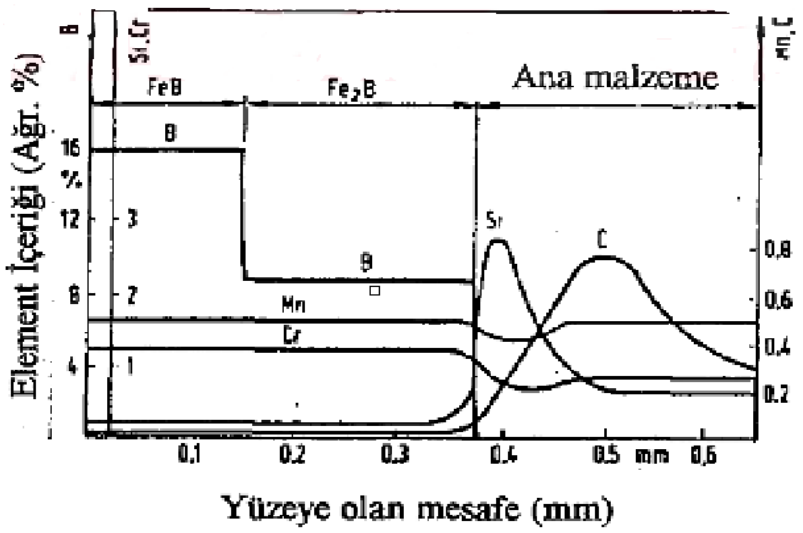
Demir esaslı malzemelerin borlanması ile olusan ferrobor tabaka çesitleri şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.3: a) Tek fazlı FeB tabakası, b) Tek fazlı Fe_2B tabakası, c) Geçis bölgesi, d) Çift fazlı FeB+Fe_2B tabakası

3.2 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması

Demir ve demir esaslı alaşımlı malzemeler borlandığı zaman numune yüzeyi üzerinde bor bileşiği çekirdeklenmekte ve büyümektedir. Bileşik tabaka iki tabakadan oluşmaktadır. Altta $(Fe, M)_2B$ ve onun üzerinde (Fe,M)B tabakası kaplama tabakasının hakim bileşenleri FeB ve Fe_2B borürleridir. Genel olarak tabaka büyümesi borun FeB ve Fe_2B içerisinde difüzyonu ile kontrollü olarak gelişmektedir [21]. Borlama işleminin başlangıç safhasında tane sınırları, dislokasyonlar ve atom boşlukları gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde olduğu kadar, yüzeylerdeki pürüzler ve çizikler gibi makro hataların olduğu metal yüzeyindeki daha reaktif noktalarda da Fe_2B çekirdeği oluşur ve büyür. Bu oluşumu borca daha zengin bileşiklerin çekirdekleşmesi takip eder [22]. Yüksek saflıktaki demirde olduğu gibi, demir-bor reaktifliğinin çok düşük olduğu şartlarda, bu noktalardan sadece bir kaçı reaksiyona girer ve rastgele dağılmış reaksiyon ürünü adacıklar meydana gelir. Ortamın bor potansiyelinin daha yüksek olduğu durumlarda, metal yüzeyindeki daha az reaktif olan noktalarda devreye girerek sürekli bir tabaka oluşur. Bu durum, daha düşük bor potansiyelli ortam ile daha reaktif metal şartlarında da sağlanabilmektedir.

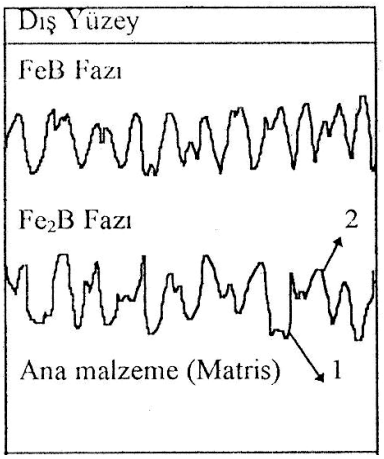


Şekil 3.4: Matriste ve borür tabakasındaki bor ve diğer elementlerin, yüzde ağırlık olarak değişimleri.

Borlama esnasında bor kristallerinin tercih yönü yayınma mekanizmasına bağlıdır. Bor'un yayınma mesafesi, borür tabakasından uzundur. Fakat borür tabakasında bor yoğunluğu çok daha yüksektir (Şekil 3.3). Demir esaslı malzemelerin borlanması esnasında, kolonsal kümeler oluşturan borür kristalleri FeB/Fe_2B ve/veya Fe_2B/FeB ara yüzeylerinde dişe benzer morfolojiler oluşturarak büyümektedirler. Borürlerin kolonsal olarak büyümesi, hacim merkezli tetragonal Fe_2B kristallerinin, [001] yönünde bor atomlarının yayınımı ile açıklanmaktadır. Bu yönün demirde bor yayınımı için en uygun yön olduğu ileri sürülmektedir. Fe_2B tabakasının büyümesi konusunda iki mekanizma ileri sürülmektedir; Difüzyon kanalı büyüme mekanizmasına göre; ortagonal prizma, bor atomlarının yayınmasını kolaylaştıracak en büyük ara kesite sahiptir ve Fe_2B kristalinde, [001] doğrultusunda, bor atomları için bir yayınma kanalı oluşturur. Bor tabakasından borür ve esas metal ara yüzeyine sürekli olarak yayınan bor atomları, borlama tabakası yüzeyine dik doğrultuda Fe_2B kristalleri oluşturur ve bu kristaller kolonsal bir şekilde içeriye doğru büyür [22]. Difüzyon kanalı büyüme mekanizması, Fe_2B'un kuvvetli bir tercihli yönlenmeye sahip olmasına rağmen, Fe_2B/Fe ara yüzeyinde düşük veya ihmal edilebilir bir kolonlaşma göstererek büyümesini veya kristallografik bir tekstürün olmadığı durumda ara yüzeydeki kolonlaşmayı açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu konuda, uçtan büyüme mekanizmasının daha geçerli olduğu ileri sürülmektedir. Uçtan büyüme mekanizmasına göre; ana malzemenin bileşimine ve işlem şartlarına bağlı olarak başlangıçta oluşan Fe_2B çekirdeği iğnesel bir şekilde büyür ve bor gradyanı boyunca yönlenir. Bu durumda Fe_2B çekirdeğinin ucu civarında oluşan bölgesel

yüksek gerilme alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlar[17]. Bu durumda Fe_2B çekirdeğinin ucu civarında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlar. Uçtan büyüme mekanizmasında, şekil 3.4 'de görüldüğü gibi demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan tabaka ile malzeme ara yüzeyindeki kolonsallık 1 noktasında 2 noktasına göre daha yüksektir [14].

Çok fazlı borür tabakaları oluşumunda, FeB'nin büyüme mekanizması, ana malzeme üzerindeki Fe_2B'nin büyüme mekanizmasına (uçtan büyüme) benzeyebilir. Aynı tabaka için FeB/Fe_2B ara yüzeyindeki kolonsallığın Fe_2B/matris ara yüzeyindekinden daha az olması oldukça dikkat çekicidir.



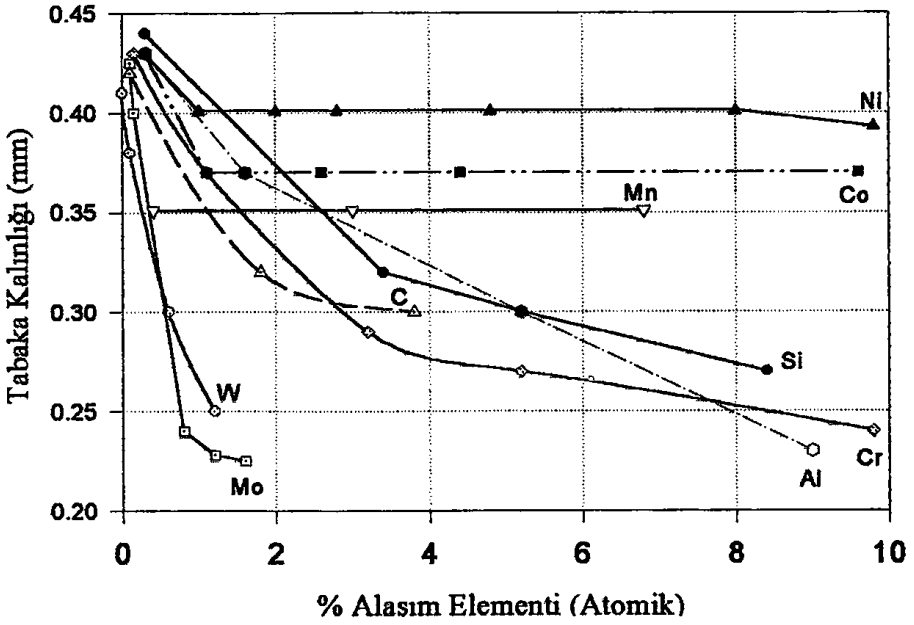
Şekil 3.5: FeB ve Fe_2B tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi.

Bu durum, mevcut fazların mekanik özelliklerindeki farklılıklarla ilişkili olabilir. Fe_2B, nisbeten sünek olan ana malzemede büyüyen bir faz iken FeB, Fe_2B üzerinde yani daha sert bir yapıda büyüyen bir fazdır. Buradan FeB'nin, Fe_2B'den daha sert olabileceği sonucu çıkarılabilir. Bu farklılıklar, bölgesel gerilim oluşumlarına ve/veya ara yüzeylerde kafes distorsiyonlarına sebep olabilir. Borür büyümesinin bir dahili süreç olduğu göz önüne alındığında, yani tepkimelerin tek fazlı tabakalarda Fe_2B/matris ve çok fazlı tabakalarda FeB/Fe_2B ara yüzeylerinde gerçekleştiği düşünüldüğünde, oluşan bileşiklerin dış yüzeylerinin kristal yapılarının düzensiz ve mekanik olarak zayıf olması muhtemeldir [14].

Borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementlerin yeniden dağıldıkları ve bu arada FeB ve Fe2B tabakalarının, karbon ve silisyumu çözündürme yeteneği olmamasından dolayı, bor yayınımı esnasında C ve Si'un borür

tabakasından içeriye doğru itildikleri ve bunun sonucu olarak borür tabakası ile borlanan metal matris arasında "geçiş bölgesi" olarak isimlendirilen bir yapının meydana geldiği bilinmektedir. Geçiş bölgesi, mikroyapı itibarı ile esas malzeme yapısından farklı bir görünüme sahiptir ve borür tabakasına göre daha kalındır. Borür tabakası tarafından karbonun içeriye doğru itilmesi sonucunda geçiş bölgesinde, esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunacağı, çeşitli araştırıcılar tarafından ileri sürülmektedir [23]. Geçiş bölgesinin, borür tabakasından 10-15 kat kadar fazla bir kalınlığa sahip olduğunu tesbit etmiştir. Genel olarak, geçiş bölgesindeki tane boyutu, ana malzeme tane boyutuna göre daha büyük olduğu halde, sinterlenmiş Fe-C alaşımlarında bu bölgede tane büyümesine rastlanmadığı ileri sürülmektedir [14].

Demir esaslı alaşımların termokimyasal yöntemlerle borlanmasında; borür tabakası ve geçiş bölgesinin morfolojosine, tabakadaki fazların cinsine, tabaka ve geçiş bölgesi kalınlığına alaşım elementlerinin değişik etkileri görülür (şekil 3.5). Borür tabakası içerisindeki alaşım elementlerinin cins ve miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerde önemli ölçüde değişiklik görülür. Alaşım elementleri, altlık malzemedeki ana metalin bor elementine karşı olan aktivitesine, yani borun yaynmasına ve reaktifliğine tesir ederek genellikle tabaka kalınlığını azaltıcı yönde etki gösterirler. Alaşım elementleri, borür tabakası içerisinde çözünebilme durumuna göre değerlendirilmelidir. Bunlardan boror tabakası içerisinde az veya kararlı bir şekilde çözünenlerdir (Cr, Ni, Mn gibi). İkincisi ise borür tabakasında çözünürlüğü olmayan (C, Si, Al gibi) elementlerdir [7,24]. Borlanan malzemede alaşım elementleri, atom numaralarına ve çaplarına bağlı olarak reaktiflik gösterirler. Atom numarası demirin atom numarasından küçük olan krom ve mangan ana malzemenin içinden yüzeye doğru yayınırken, nikel ve karbon yüzeyden içeri doğru yayınmaktadır. Karbon çeliklerinin borlanması sonucu genelde yüzeyde kolonsal yapıda büyüyen iki tür borür fazı oluşmaktadır. Oluşan borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, Matrise doğru Fe_2B fazı ve bu fazın altında geçiş zonu yer almaktadır. FeB fazı ile Fe_2B ve Fe_2B ile matris arayüzeyindeki yapı da kolonsal tarzdadır (Şekil 3.6). Ancak, yüksek alaşımlı çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabakası ve büyüme mekanizmasına etkisinden dolayı, arayüzey yapısının kolonsal yerine düz ve kompakt olduğu belirtilmektedir [25, 26].



Şekil 3.6: Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi [7].

Alaşım elementlerinin matris ve borür tabakası içerisindeki çözünürlüklerine bağlı olarak, matrisin yakınında oluşturdukları bileşiklerin borlama mekanizmasını etkilemesinden dolayı borür tabakasının yapısı değişmektedir.

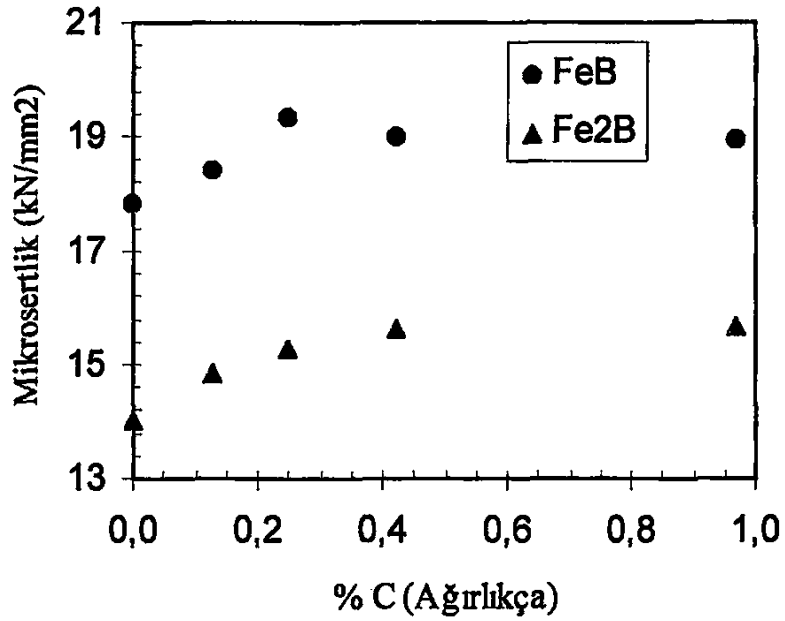


-AISI 1018 Çeliği (%0.20 C) | -AISI 4340 Çeliği (0.4C-1.67Cr-0.84 Ni) | -AISI 304 Çeliği (%18Cr- %8 Ni)

Şekil 3.7: Çelik kompozisyonun bor tabaka kalınlığı ve morfolojisine etkisi [11].

Karbon: Borür tabakasında önemli bir çözünürlüğü olmayan karbon atomları, borür tabakası boyuncada difüzyona uğramaz ve borlama süresince yüzeyden matrise doğru sürüklenirler ve borla birlikte borosementit $Fe_3(B,C)$ şeklinde Fe_2B- matris arayüzeyinde yer alır [7]. Karbon hem borür tabaka yapısına, hemde tabaka/matris arayüzey morfolojisine etki etmketedir [27]. Az ve orta karbonlu çeliklerde borür tabakası kolonsal bir yapıya sahip olurken, yüksek karbonlu çeliklerde borür tabakası/matris arayüzeyinin düz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Nispeten düz bir borür tabakası elde edilen %2 C ihtiva eden çeliklerde, boror tabakası matris ara yüzeyinde (002) düzleminde, Fe_2B fazı büyüme göstermektedir. Yani çelikteki

karbon miktarı arttıkça, borür tabakasındaki Fe_2B fazının kararlılığı artmaktadır [28]. Karbon elementi kaplama tabakası içerisinde çözünmeyip, matrise doğru difuze olmakta ve kaplama tabakasının hemen altındaki geçiş bölgesinde Fe_3C, $Cr_{23}C_6$ gibi karbürlerin oluşmasıan sebep olarak borür tabakasının hemen altında tamamen perlitik bir yapı oluşturmaktadır. Karbon, geçiş bölgesi denilen bu bölgenin yapısını etkilemekte ve daha düzenli ve sert bir yapı oluşmasına neden olmaktadır [25]. Karbon konsantrasyonundaki bu artış çok sert borür tabakasından, yumuşak olan matrise doğru daha dengeli bir geçişi sağlamaktadır. Çeliklerde, borür tabakasında oluşan FeB, Fe_2B fazlarının sertlikleri karbon yüzdesinin artışına bağlı olarak artmaktadır (şekil 3.7). Bu artış % 0.4 C'a akdar devam etmekte, bu değerin üzerinde ise hemen hemen sabit kalmaktadır, Bu durum, FeB, Fe_2B veya diğer borürlerde daha çok karbon çözünürlüğünün mümkün olmamasından kaynaklanmaktadır. Karbon miktarının artışına bağlı olarak, tabaka kalınlığında bir azalmanın olduğu ve bu azalmaya, FeB fazının kararlılığının azalmasının neden olduğu belirtilmektedir [24, 25, 28].



Şekil 3.8: Karbon miktarı artışına bağlı olarak borür tabakasındaki fazların sertliğinin değişimi [25].

Krom: Kromun, atom numarası demirin atom numarasından düşük olduğundan, altlık malzemeden ziyade borür tabakasında daha fazla çözünür ve yüzeye doğru yayınır. Krom da karbon gibi borür tabakasının hem morfolojisine hem de kalınlığına etki etmektedir. %10 ve üzeri Cr içeren çeliklerde kolonsal yapı yerini düzlemsel yapıya bırakmaktadır. Cr içeriğinin artmasıylada oluşan borür tabaka kalınlığı

düşmektedir. Matrisdeki krom miktarı arttıkça borür tabakası/matris arayüzeyinin kolonsal yapıdan düz hale gelmesi, alaşım elementinin borür tabakası içerisinde demir atomlarının yerini alması sebebiyledir [27, 29]. Krom 1000 ºC de FeB fazından ağırlıkça yerini alabilmektedir. Aynı şekilde Fe_2B fazı içerisinde ağırlıkça %17 Cr çözünebilmektedir. Demir esaslı malzemelerde krom, borür tabakasının kalınlığını azaltmaktadır [12, 25]. Bu azalma diğer alaşım elementlerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Literatürde Cr ihtiva eden çeliklerin borlanması sonucu ortaya çıkan borür tabakaları ile ilgili farklı görüşler bulunmaktadır. Carbucicchio ve arkadaşları [27] krom artışına bağlı olarak toplam tabaka kalınlığının değişmediğini buna karşılık FeB miktarının arttığını, Fe_2B miktarının ise azaldığını belirtmektedir. CrB fazının ancak %26 üzeri Cr içeren çeliklerde oluştuğunu söylemiştir. Bindal ve arkadaşları [12] ise düşük krom yüzdelerinde dahi krom borürler tespit ettiğini açıklamıştır. Krom, tabaka boyunca hemen hemen homojen bir dağılım gösterir ve kromlu çeliklerde oldukça düzgün bir geçiş bölgesi oluşur. Krom içeren borür tabakasının sertliği, krom miktarı ile doğru orantılı olarak artar. Çelik içerisinde krom miktarının artışına bağlı olarak, Fe_2B fazına nazaran borca daha zengin olan FeB tabakasının kalınlığı artış göstermektedir. Bunun yanısıra FeB/FeB_x oranı da artmaktadır.

4. BOR TABAKASININ AŞINMA ÖZELLİKLERİ

4.1 Aşınma

Aşınma genellikle, temas eden yüzeylerden mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. Aşınma, katı hal temasında bulunan iki katı yüzeyin birinden veya her ikisinden malzeme kaybı prosesidir. Katı yüzeyler birbirlerine göre kayma veya yuvarlanma hareketi içine girdikleri zaman meydana gelir. İyi tasarlanmış tribolojik sistemlerde, malzeme kaybı çoğunlukla çok yavaş bir prosestir; fakat çok kararlı ve devamlıdır. Bir aşınma sisteminde, tribolojide belirtildiği gibi, sistemde; Ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük ve hareket temel unsurlardır. Aşınma endüstride her alanda karşımıza çıkacak bir olgudur. Aşınmayı belirleyen bazı kriterler vardır [11].

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

Gerek ve yeter şart olarak nitelediğimiz bu beş şartın doğal sonucu olarak aşınma meydana gelmektedir [5]. Literatürde aşınma işlemi farklı çeşitte sınıflandırmaya sokulmuştur. En temel olarak aşınma;

1. Adhezif Aşınma;
2. Abrazif Aşınma;
3. Yorulmalı Aşınma;
4. Korozyonlu Aşınma;
5. Erozyonlu Aşınma;

6. Elektrik arkıyla meydana gelen aşınma şeklinde sınıflandırılabilir.

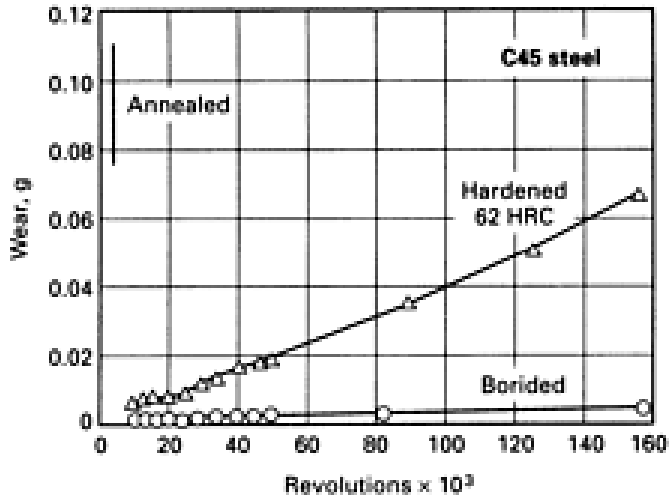
Bu aşınma mekanizmalarından adhezif ve abrazif aşınma şu şekilde tanımlanır;

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhezif aşınma, aşınma mekanizmaları içinde en sık rastlanılan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle hasarları hızlandırıcı etkide bulunmaz. Adhezif aşınma en genel olarak, karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye olan malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir [14, 15, 16]. Adhezif aşınma hasarları genellikle uygun olmayan malzemelerin seçilmesi veya yağlama sisteminin yeterli olmayışı sebebiyle meydana gelir. Adhezif aşınma çoğunlukla sürtme veya sürüyerek aşındırma olarak tanımlanır. Bununla beraber arayüzeydeki hareket, temas noktasında soğuk kaynaklaşma meydana gelebilir. Devam eden kayma, birleşme noktalarının yırtılmasına ve yeni birleşme noktalarının oluşmasına sebep olur.

Abrazif aşınma ise, çizilme veya yırtılma aşınması şeklinde de literatürde tanımlanan abrazif aşınma, sistemde ciddi hasara neden olan önemli bir aşınma mekanizmasıdır. Abrazif aşınma, en genel olarak malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle basınç altında etkileşmesiyle, sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması şeklinde tanımlanabilir. Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma şekli verilebilir [14, 15, 16]. Bu tip aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elemanlı ve üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılır. Abrazif aşınma, daha sert bir malzeme tarafından bir yüzeye yapılan hasar olarak açıklanabilir. Bazen de şiddet derecesine göre kazınma, çizilme veya oyuklanma olarak adlandırılır. Bu tip aşınmanın ortaya çıktığı genelde iki durum vardır: Birinci durumda; sert yüzey, sürtünen iki yüzeyin en sertidir (iki elemanlı abrazyon). Örneğin; taşlama, kesme veya işleme gibi mekanik operasyonlar. İkinci durumda; sert yüzey, üçüncü bir cisimdir. Diğer iki yüzey arasında sıkıştırılmış ve onlardan birini veya her ikisini birden aşındıracak kadar sert, genellikle küçük bir parça aşındırıcı veya taştır (üç elemanlı abrazyon) [21].

4.2 Bor Kaplamaların Aşınma Özellikleri

Bor kaplamalar, oldukça sert kaplamalardır ve yüksek aşınma direncine ihtiyaç duyulan yerlerde, yani tribolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Tribolojik uygulamalarda en çok kullanılan bor kaplamalar, demir borür ve titanyum diborür kaplamalardır. Demir borür kaplamalar, çok yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı sağlayan özelliklerinden dolayı tercih edilmektedirler. Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden ötürü abrasif aşınmaya karşı son derece dirençlidirler. Borür tabakasının kalınlığı işlem şartlarına bağlı olarak 20 μm – 300 μm arasında değişir ve teknik ömründeki artış birkaç kattır. Borlama işlemi sonucunda oluşan yüksek sertlik değerleri ve düşük sürtünme katsayıları bor tabakasını ana aşınma mekanizmalarından olan adhezif, abrezif ve tribo-oksidatif aşınmaya karşı dayanıklı kılmaktadır. Özellikle kalıp yapıcıların tercihi olan borlama işlemi çeliğe nihai şekil ve özellikler verildikten sonra uygulanabilmesi sebebiyle kalıp ömürlerini oldukça uzatmaktadır. Şekil 4.1 C45 çeliğinin borlama işlemi sonucunda abrazif aşınma direncinin değişimini göstermektedir [7].



Şekil 4.1: C45 (0.45C) çeliğinin aşınma davranışına 900 ˚C ve 3 saatlik borlama işleminin etkisi [7].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çelik yüzeylerinin borlama işlemiyle sertleştirilmesi endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Borlama, yüksek performas sergileyen ve oldukça pahalı olan bazı takım çeliklerinin yerine daha ucuz çeliklerin kullanılmasını mümkün kılabilmektedir. Ancak yine de pek çok uygulamalarda takım çelikleri yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. Bu kıymetli çeliklerin performanslarının geliştirilmesi ekonomiye katkı sağlayacaktır. Çeliklerin borlanmasıyla ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar bor tabakasının kinetiğini, oluşan bor tabakası kalınlığını, sertliğini, aşınma direncini, kırılma tokluğunu incelemiş ve farklı borlama yöntemlerinin bu özellikleri nasıl değiştirdiği üzerinde durmuştur. Borlanmış numunelerden beklenen yüksek aşınma direncine karşın borlanmış numunelerin yüksek sıcaklıkta nasıl bir aşınma davranışı göstereceğine dair literatürde bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, dört farklı çeliğin borlanabilirliği, oluşan borür tabakasının morfolojisi ve sertliği, çeliğin kimyasal bileşiminin özellikle çeliklerin ihtiva ettiği Cr elementinin borür tabakası oluşum kinetiğine etkileri ve borlanmış dört çeliğin yüksek sıcaklık aşınma davranışları incelenmiştir.

Kaplanan malzeme olarak AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 çeliği seçilmiştir. Bu çeliklerin seçilmesinde ki başlıca amaç kalıp üreticilerinin sıklıkla tercih ettiği çelikler olmasındandır. Borlama ile bu dört çelikten elde edilen kalıpların ömürlerinin arttırılması temel amaçtır.

Seçilen çelikelere ait numuneler 850 ºC, 900 ºC ve 950 ºC sıcaklıklarda 4, 6 ve 8 saat sürelerde pasta borlama yöntemiyle borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi katı ortamda *Ekabor Paste* ürünüyle pasta borlama olarak argon atmosferinde yapılmıştır. Borlama sonrasında oluşan tabakaların morfolojik incelemeleri optik mikroskop altında yapılmıştır. Borür tabakaların zamanla kalınlık değişimi ve farklı yüklerde yüzey sertlikleri ölçülmüştür. X-ışınları difraksiyon analizi ile borür

tabakası faz analizi yapılmıştır. Yüksek sıcaklık aşınma cihazı ile 25 ºC, 300 ºC ve 500 ºC de elde edilen borür tabakalarının yüksek sıcaklık aşınma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca elde edilen aşınma izlerinin profilometre cihazında genişlik ve derinlik ölçümleri yapılmıştır.

5.1 Deneylerde Kullanılan Çelikler

Deneylerde AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 çelikleri kullanılmıştır. Bu çeliklerin kimyasal analizleri gerçekleştirilmiş olup sonuçları çizelge 5.1 'de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Deneylerde kullanılan çeliklerin kimyasal analiz sonuçları.

Çelik	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
EN 8519	0.318	0.669	0.025	0.012	0.274	0.165	2.520	0.228	0.156
AISI H13	0.424	0.360	0.009	0.001	1.070	0.116	5.190	1.330	0.963
AISI 4140	0.436	0.852	0.009	0.006	0.211	0.180	1.070	0.193	0.003
AISI 420	0.242	0.554	0.001	0.000	0.002	0.241	12.330	0.067	0.076

Bu çalışmada yapılan, borür tabakaların oluşum kinetiği hesabı, kullanılan çeliklerin krom eşdeğerliklerine göre yorumlanmış böylece alaşım elementlerinin aktivasyon enerjisine etkisi incelenmiştir. Krom eşdeğei ise şu şekilde hesaplanmaktadır (eşitlik 5.2);

$$Cr_{eş} = 1 \times (\%\,Cr) + 1 \times (\%\,Mo) + 1{,}5 \times (\%\,Si) + 0{,}5 \times (\%\,Nb) \qquad \textbf{(5.2)}$$

Bu hesapla kullanılan çeliklerin krom eşdeğerliği hesaplanmış ve sonuçlar çizelge 5.2 'de verilmiştir.

Çizelge 5.2: Kullanılan çeliklerin krom eşdeğerliği.

ÇELİK	Krom Eşdeğerliği
AISI 4140	1.67
EN 1.8519	3.30
AISI H13	8.11
AISI 420	14.5

5.2 Borlama İşlemi

Borlama işlemi pasta yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bor kaynağı olarak Ekabor Paste ürünü Argon atmosferinde kullanılmıştır. Borlama işlemi 850 ºC, 900 ºC ve 950 ºC sıcaklıklarda 4, 6, ve 8 saat sürelerle yapılmıştır. Borlama işlemi numunelere 5 mm kalınlığında pasta borun homojen bir şekilde sürülmesiyle yapılmıştır. Bu sebeple numunelerin kalınlığından 5 mm daha kalın, numunelerin içine tam oturduğu kalıplar kullanılmıştır. Kalıbın boş kalan kısımlarına ekabor paste homojen bir şekilde sürülmüştür (şekil 5.1).



Şekil 5.1: Pasta bor methodunun numunelere uygulanmasının gösterimi.

Çelikler borlama işlemi yapılmadan önce 2500 grit zımparaya kadar parlatılmış daha sonra yüzeyi aktif hale getirmek için ultrasonik cihazında aseton ile iki-üç dakika yıkanmıştır. Pasta borun sürüldüğü numuneler borlama sıcaklıklarına çıkılmadan önce pasta borun içerdiği suyu atması için etüvde 1 saat süreyle 120 ºC de kurutulmuştur. Bu aşama çeliklerin parlatılmış ve asteonla yıkanmış yüzeylerinin pasta bordan gelen su yüzünden oksitlenmemesi için önemlidir. Pasta borun içerdiği su hızla uzaklaştırılmaz ise bu su numune yüzeylerinde oksit tabakaları oluşturup borlama işlemini güçleştirebilir. Kurutma işlemi biten numuneler borlanmak üzere tüp fırına yerleştirilmiştir (şekil 5.2). Borlama işlemi biten numuneler oda sıcaklığına kadar fırın içerisinde soğutulmuştur. Soğuyan numuneler daha sonra kalıplardan çıkarılarak yıkandıktan sonra metalografik incelemeler yapılmıştır.



Şekil 5.2: Borlama işleminin gerçekleştirildiği tüp fırın.

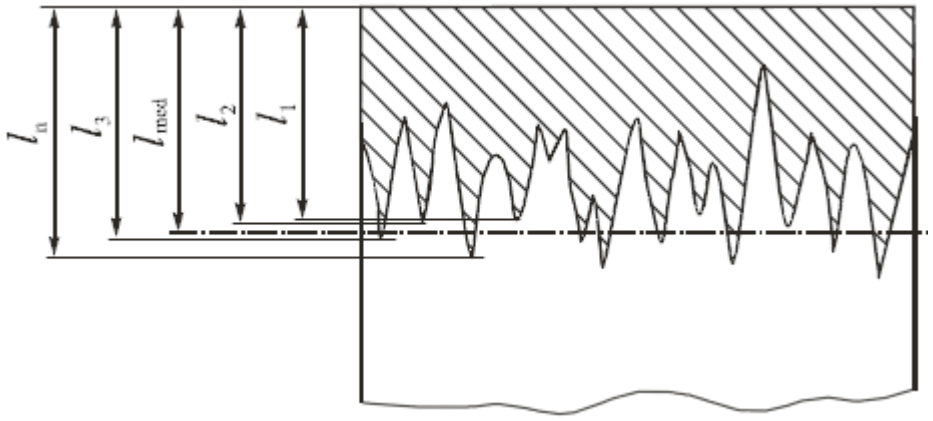
5.3 Karakterizasyon Çalışmaları

Borlama işlemine tabii tutulan numunelerin boyutu çapı 35 mm olan 6 mm yüksekliğinde disk numunelerdir. Borlama işlemi sonrası bakalite alım için kesilen numuneler zımparalanmıştır. Zımpara etabından sonra ise parlatma işlemi yapılmıştır. Çizelge 5.3 zımparalama ve parlatma işlemleri hakkında bilgi içermektedir. Daha sonra %4' lük nitalle dağlanan numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri Lecia DM750M marka optik mikroskop ile yapılmıştır (şekil 5.2).



Şekil 5.3: Lecia DM750M marka optik mikroskop.

Kalınlık ölçümleri ise mikroskobun yazılımında bulunan programla yapılmıştır. Kalınlık ölçümleri yapılırken şu hususa dikkat edilmiştir.



Şekil 5.4: Bor tabakası kalınlık ölçümünün tipik görüntüsü [17].

Şekil 5.4' de görüldüğü üzere tabaka kalınlığı, çekilen kesit fotoğrafından alınan en az beş ölçümün ortalaması şeklinde yapılmaktadır. Çizelge 5.3 ise borlama öncesi yapılan metalografik işlemlerin kısa bir özetidir.

Çizelge 5.3: Borlama işlemi sonrası yapılan metalografik işlemler.

ADIM	1	2	3	4	5	6	7
Aşındırıcı Gücü	240 Grit	320 Grit	400 Grit	800 Grit	1200 Grit	2500 Grit	0.3 Mikron
Aşındırıcı Türü	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	Alumina Suspansiyon
Aşındırıcı Tipi	Zımpara Kağıdı	Zımpara Kağıdı	Zımpara Kağıdı	Zımpara Kağıdı	Zımpara Kağıdı	Zımpara Kağıdı	Chem-Pol
Uzaklaştırıcı	Su	Su	Su	Su	Su	Su	-
Disk Dönüş Hızı	200 RPM	200 RPM	200 RPM	200 RPM	200 RPM	200 RPM	450 RPM
Süre	2 dk	2 dk	2 dk	2 dk	2 dk	2 dk	10 dk

Borür tabakasında yer alan fazların belirlenmesi için kullanılan X – ışınları difraksiyon analizi, analiz edilecek numune üzerine genellikle bakır veya kobalt gibi hedef bir elementten elde edilen Kα karakteristik X – ışını demetinin gönderilmesi esasına dayanmaktadır. Gönderilen ışın demeti numunenin üç boyutlu kristal yapısında difraksiyona uğrayarak, paternler halinde elde edilmektedir. Bu paternler, bileşimi belirli standart malzemelerden elde edilen paternler ile karşılaştırılarak incelenmektedir. Numunelerin yüzeyinde oluşan borür fazlarının tespiti için GBC-

Australia marka X ışınları difraktometreleri kullanılmıştır (Şekil 5.5). Analizde CuKα ışın demetleri kullanılmış, 10º - 90º tarama yapılmış ve dakikada 2 derece taranmıştır.



Şekil 5.5: Deney numunelerinin faz analizinin yapıldığı GBC-Australia marka faz XRD cihazı.

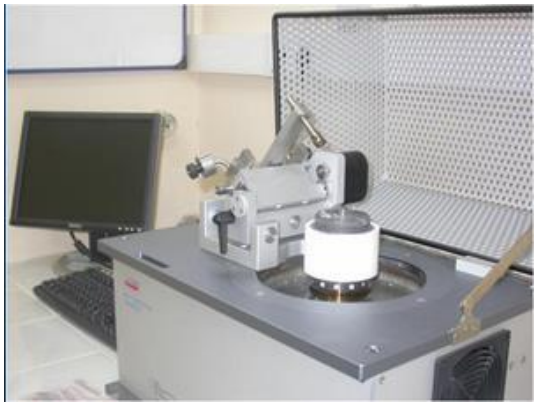
Borlanmış numunelerin sertlik ölçümleri, metalografik olarak parlatıldıktan sonra Shimatzu, HMV2, Japan marka mikrosertlik cihazında (Şekil 5.6) Vickers uç kullanılarak 100, 200, 300, 500, 1000 ve 2000 gr. yük altında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler borür tabakasından yani yüzeyden alınmıştır. Sertlikteki değişim borlanan çeliğin cinsine, borlama süresine ve sıcaklığına bağlı olarak değişim göstermektedir.



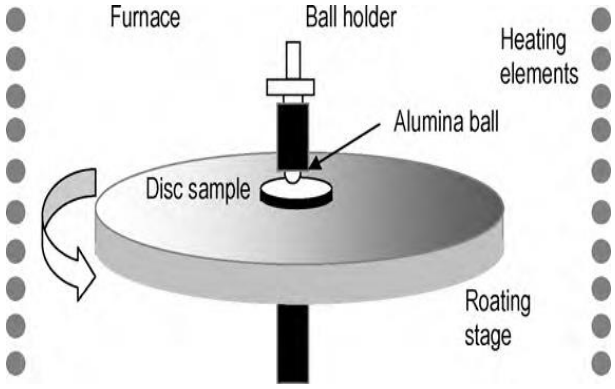
Şekil 5.6: Shimatzu, HMV2, Japan marka mikrosertlik cihazı.

5.4 Aşınma Testi

Borlanmış numunelerin yüksek sıcaklık aşınma deneyleri (Şekil 5.7) CSM High temperature Tribotester, Switzerland ball on disc marka cihazla herhangi bir yağlayıcı olmadan kuru ortamda 6mm çapında alumina aşındırıcı top ile yapılmıştır. Aşınma deneyleri 25, 300 ve 500 ºC' de 2 N yük altında 5 cm/s hızda ve 250 metre mesafe için yapılmıştır. Numuneler istenilen sıcaklığa kadar homojen bir şekilde ısıtıldıktan sonra test başlatılmıştır. Aşınma testinden sürtünme katsayısı verisi elde edilmiştir. Aşınma deneyinden ötürü oluşan aşınma izleride profilometre cihazında incelenerek aşınma izi derinliği ve genişliği hesaplanmıştır. Elde edilen veriler hacim kaybı hesabında kullanılmıştır. Hacim kaybı sonuçları birbiriyle karşılaştırılıp bor tabakaların aşınma karakteristiği hakkında yorum getirilmiştir.



Şekil 5.7: CSM Yüksek sıcaklık tribotest cihazı.



Şekil 5.8: Ball on disc türü aşınma deneyinin tipik görüntüsü.

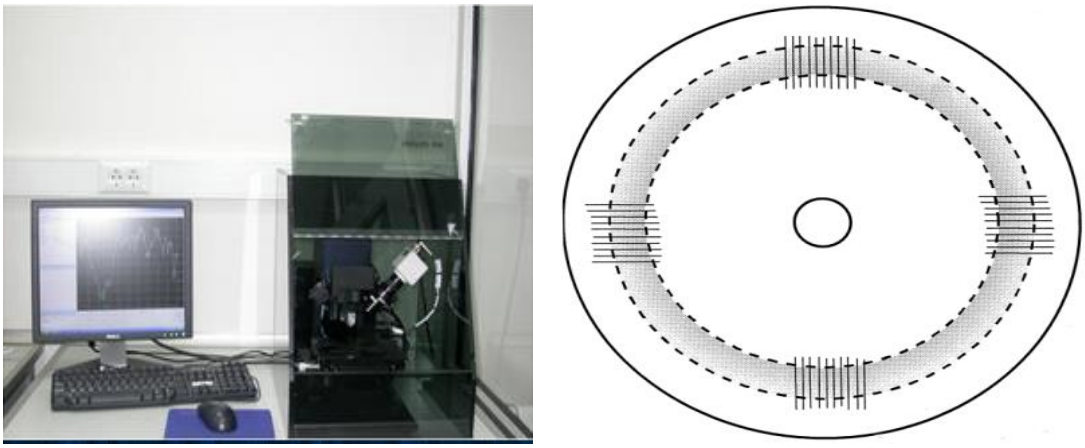
Borlama işlemi tamamlanmış numuneler aşınma deneyi yapıldıktan sonra aşınma izlerinin analizi için taramalı elektron mikroskobuna sokulmuştur. Aşınma izlerinin

incelenmesinde, Hitachi TM – 100 (şekil 5.9) marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 5.9: Hitachi TM-100 taramalı elektron mikroskobu.

Borlandıktan sonra aşınma testi yapılan numunelerin aşınma izleri Dektak-6M, Veeco, USA marka stylus profilometre cihazında ölçülmüştür. Her bir numune için 4 ölçüm yapılmış yapılan ölçümlerin ortalaması alınmıştır ve oluşan izlerin alanları hesaplanmıştır. Ölçüm alım şekli şekil 5.10' da gösterilmiştir.



Şekil 5.10: Dektak-6M, Veeco marka profilometre cihazı (solda), aşınma izlerinin profilometre cihazında ölçümünün tipik görüntüsü (sağda).

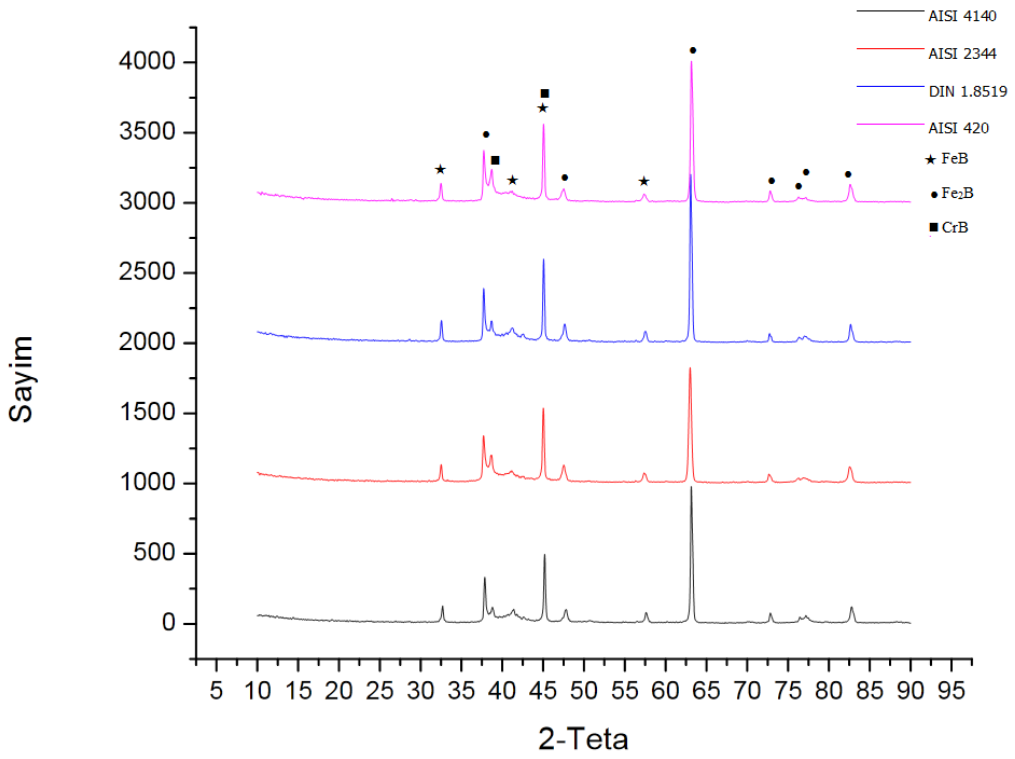
6. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışmada çizelge 5.2 ’de bileşimleri verilen çelikler, farklı sıcaklık ve sürelerde termokimyasal olarak pasta borlama yöntemi ile Ekabor Paste kullanılarak borlanmıştır. Çeliklere sürülen pasta kalınlığı sabit tutulmuş ve her seferinde 5 mm olarak uygulanmıştır. Çeliklerin kimyasal bileşimi ve işlem şartlarına bağlı olarak, mikroyapının ve çeliğin yüzeyinde oluşan borür tabakasının özelliklerinin ve faz dağılımlarının değiştiği görülmüştür. Borlanan bu çeliklerin borür tabaka türleri ve mekanik davranışları; klasik metalografi yöntemleri, X-ışınları difraksiyon analizi, taramalı elektron analizi, mekanik testler (aşınma ve sertlik testi) ve profilometre yardımıyla incelenmiştir.

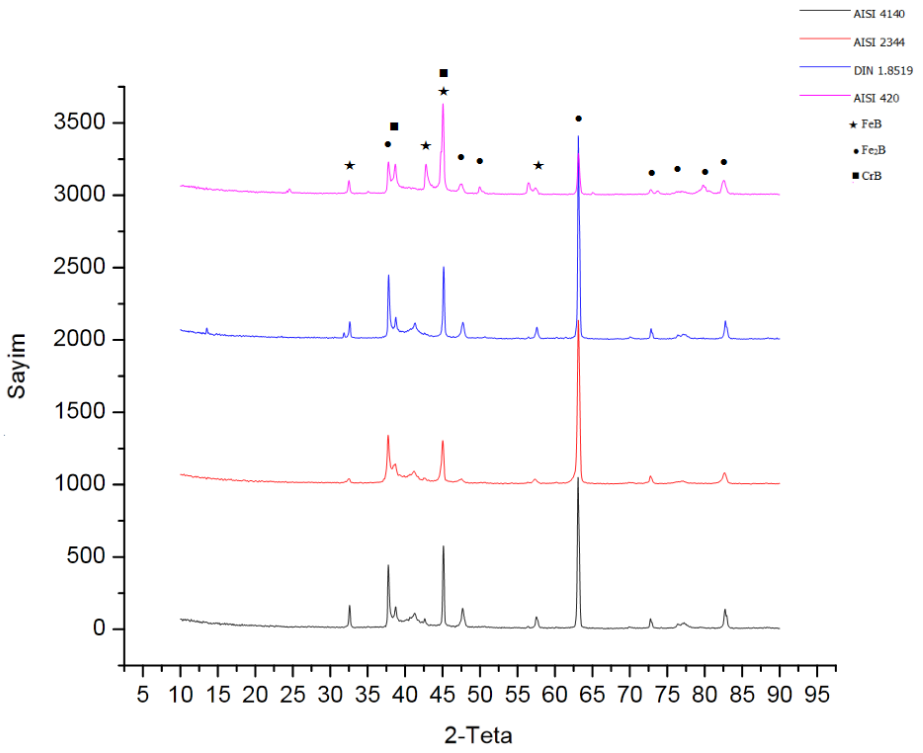
6.1 Karakterizasyon Çalışmaları Sonuçları

6.1.1 X-Işınları Difraksiyon Analizi Sonuçları

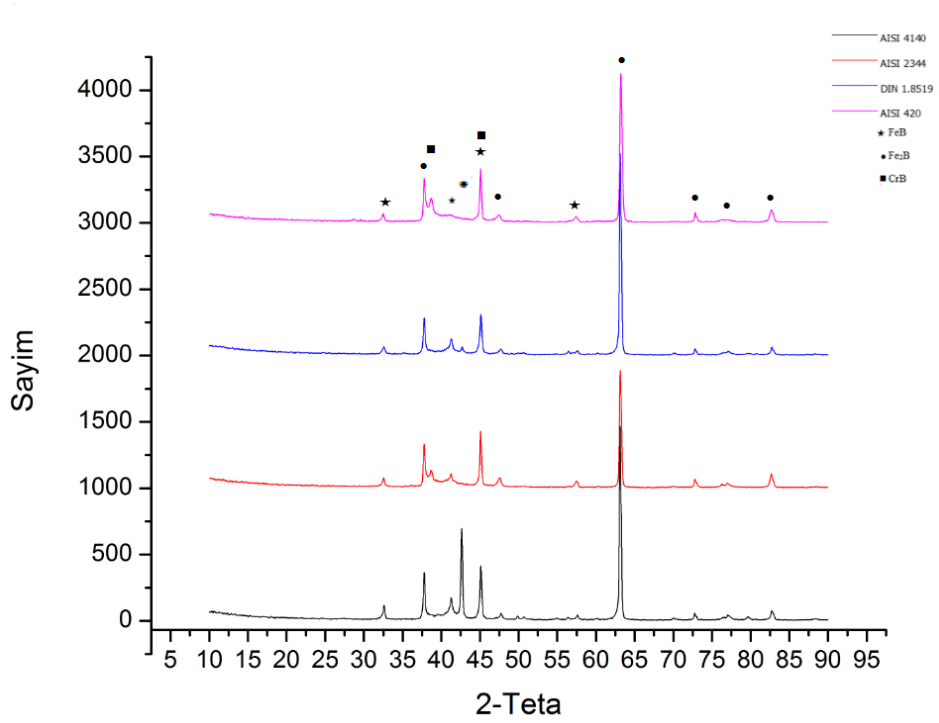
Farklı sıcaklıklarda 4, 6 ve 8 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 çelik numunelerinin yüzeyinde oluşan borür tabakasındaki mevcut fazların tayini için CuKα X – ışınları difraksiyon analizi kullanılmıştır. İncelemeler sonucunda borür tabakasının MB ve M_2B (M= Metal; Fe, Cr) türünde borürlerden oluştuğu gözlenmiştir. Bunlar yapılan tüm deneylerde FeB, Fe_2B, CrB’dir. Herhangi başka bir MB bileşiğine rastlanmamıştır. Deney şartlarına ve borlanan çeliğin türüne göre Fe_2B, FeB miktarları değişmektedir. Oluşan tabakalardan en düşük tabaka kalınlığına sahip AISI 420 çeliği 850 ºC 4 saat borlama şartlarında bile 20 mikron ve üzeri olduğundan altlık malzemeden herhangi bir patern alınamamıştır. Şekil 6.1-3 farklı sıcaklıklarda 4’er saat borlanan numunelerin X – ışınları difraksiyon analiz sonuçlarıdır. Diğer sıcaklıklar yapılan deneylerin X – ışınları analiz sonuçları Ek C’de verilmiştir.



Şekil 6.1: Pasta borlama yöntemi ile 850 ºC'de 4 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.



Şekil 6.2: Pasta borlama yöntemi ile 900 ºC'de 4 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.



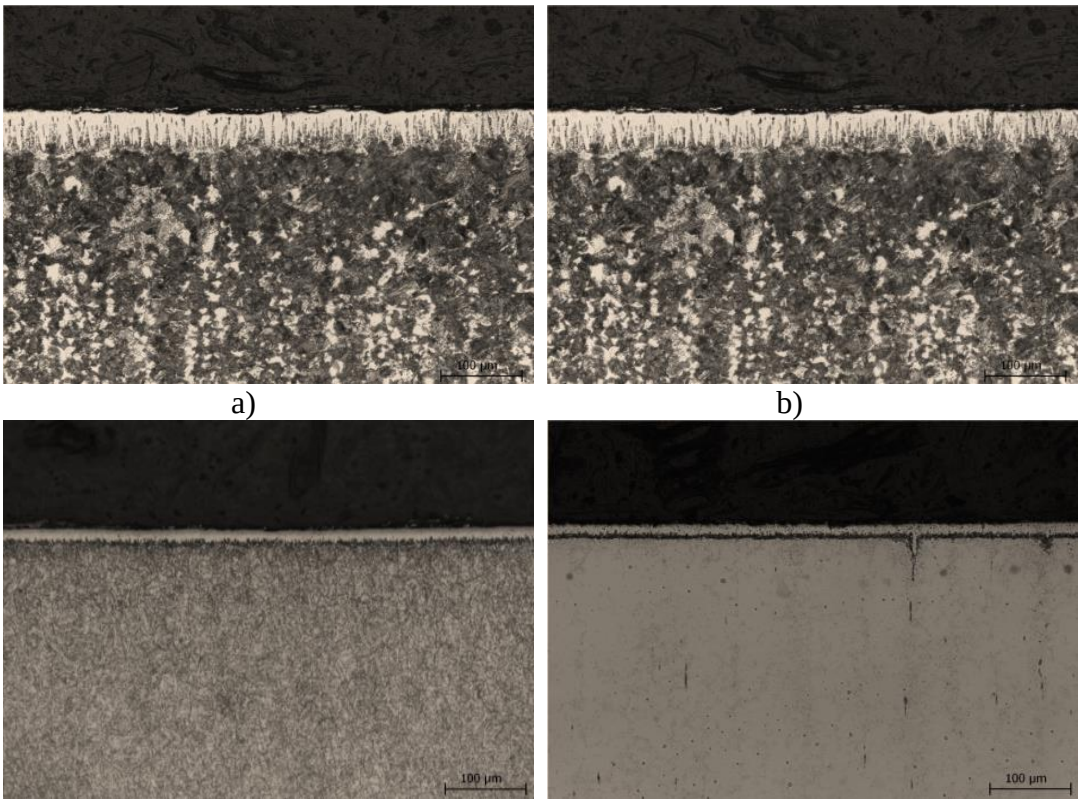
Şekil 6.3: Pasta borlama yöntemi ile 950 ºC'de 4 saat süre ile borlanmış numunelerin borür tabakasının X-ışınları difraksiyon paternleri.

6.1.2 Metalografik Sonuçlar ve Kinetik Hesaplar

850, 900 ve 950 ºC sıcaklıklarda sırasıyla 4, 6, ve 8 saat sürelerle borlanmış çelik numuneler metalografik incelemelere tabii tutulmuştur. Borlama işlemi sonrasında optik incelemelerde, borür tabakasının tüm numunelerde homojen bir kalınlığına sahip olduğu, kolonsallığın ise malzeme bileşimine ve işlem süresine göre farklılık arz etiiği gözlemlenmiştir. Kaplama/matris arayüzey morfolojisinin, AISI H13 ve 420 çeliklerinde düz bir yapı, AISI 4140 ve EN 1.8519 ise kolonsal bir yapı serdilediği; borür tabakası, kapalama/matris arayüzeyi ve matrisin belirgin bir şekilde birbirinden ayrıldığı açıkca görülmüştür. Borlanmış numunelerin mikroyapıları optik metalografi incelemelerinde elde edilen görüntüler şekil 6.4 – 6.12 'de sunulmuştur.

Genel olarak çelikler üzerine yapılan borlama işlemleri sonucunda işlem şartlarına bağlı olarak hem tek fazlı (Fe_2B), hem de çift fazlı (FeB ve Fe_2B) borür tabakalarının meydana geldiği ve bu fazların rahatlıkla birbirinden ayırımının farkedilebildiği ifade edilmiştir [13, 30, 31]. Ayrıca bu iki fazın içerisinde borlanan çeliğin alaşım elementi miktarına ve türüne bağlı olarak bazı metal borürler katı eriyik olarakda bulunabilmektedir. Yapılan çalışma da ise borlama işlemi yapılan numunelerde FeB(koyu gri), Fe_2B(gri) tabakaları görülmüş ayrıca X - ışınları difraksiyonu ile de

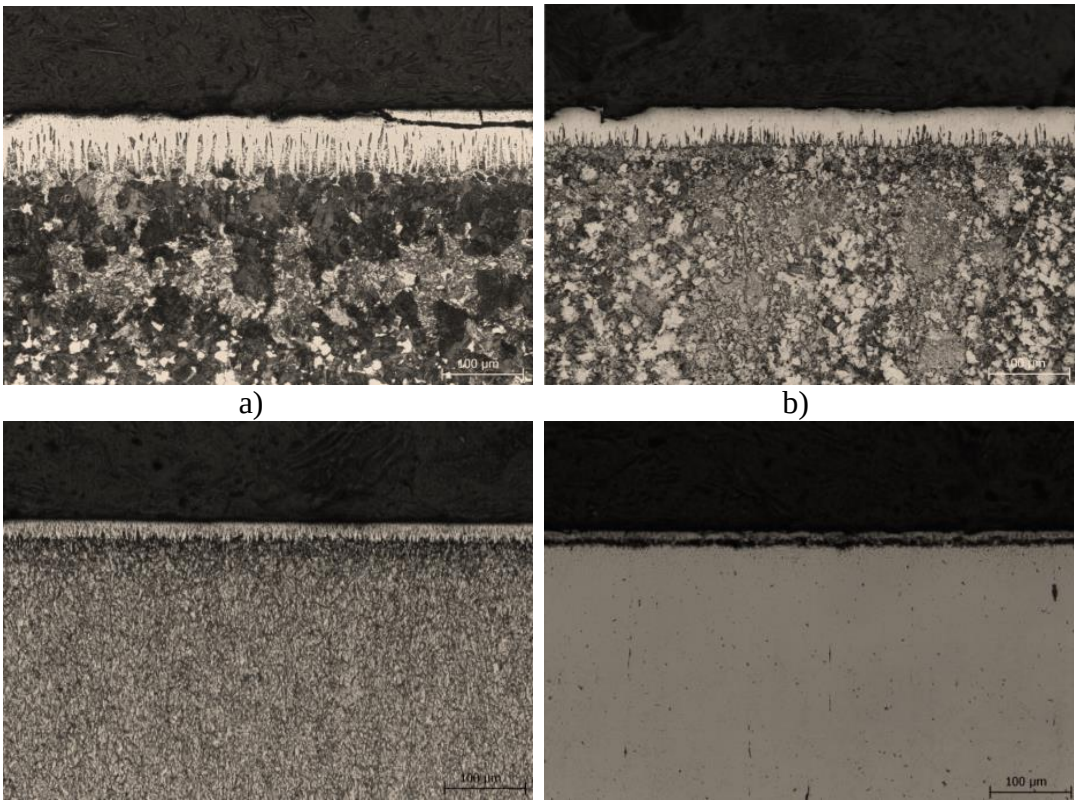
CrB varlığı tespit edilmiştir. AISI 4140 ve EN 1.8519 çeliği üzerinde oluşan borür fazlarının dişli bir yapıda olduğu (saw-toothed) AISI H13 ve AISI 420 çeliklerinin ise daha düz ve kompakt bir yapıda olduğu görülmüştür. Alaşım elementi miktarının artmasıyla bor atomunun yüzeyden içeriye difüzyonu zorlaşmış böylece borür tabakası kalınlığı artış hızı azalmış, tabaka daha düz bir yapıya bürünmüş ve de yüzeyde FeB oluşum miktarı artmıştır. Borlama sıcaklığı ve süresi arttıkça tüm çeliklerde bor tabakası kalınlığı artmıştır.



a) b)

c) d)

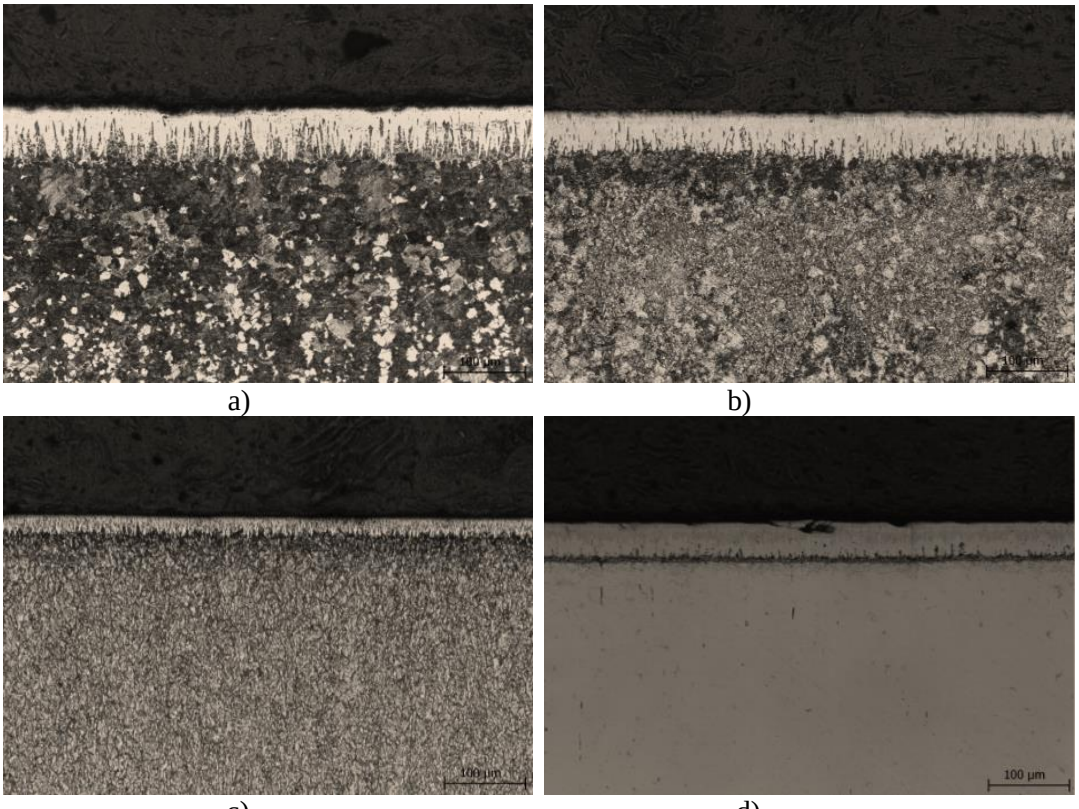
Şekil 6.4: 850 ºC ‘de 4 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.



a) b)

c) d)

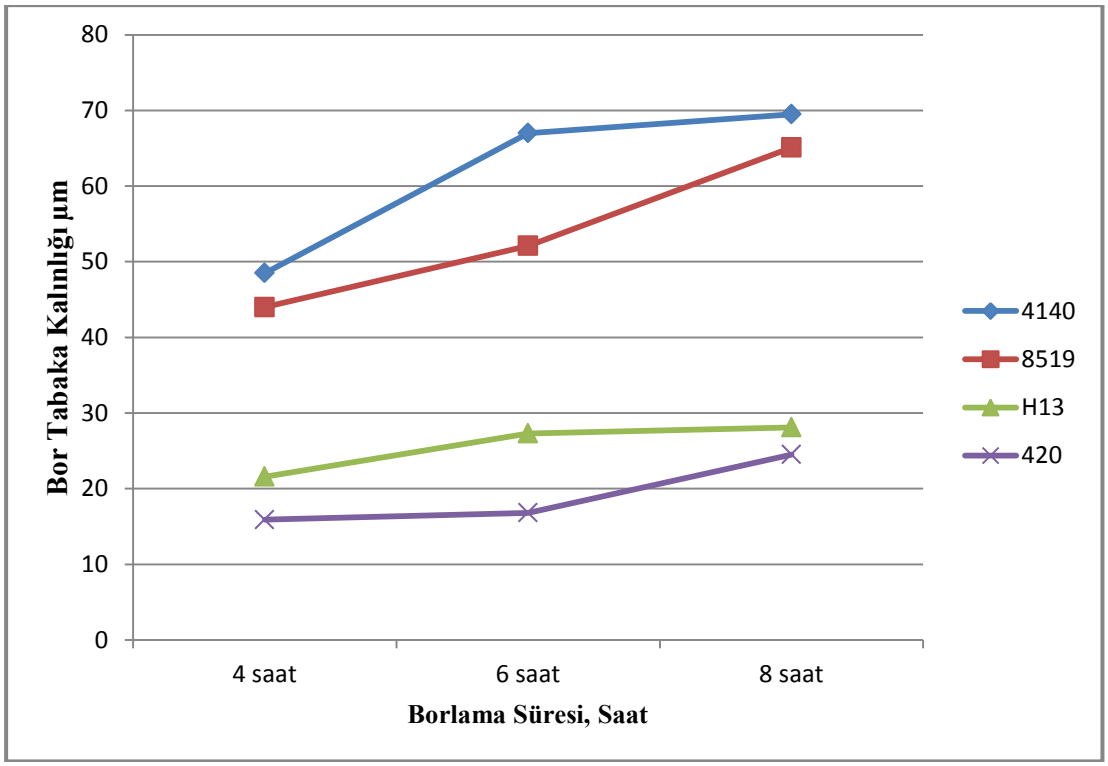
Şekil 6.5: 850 ºC ‘de 6 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.



a) b)

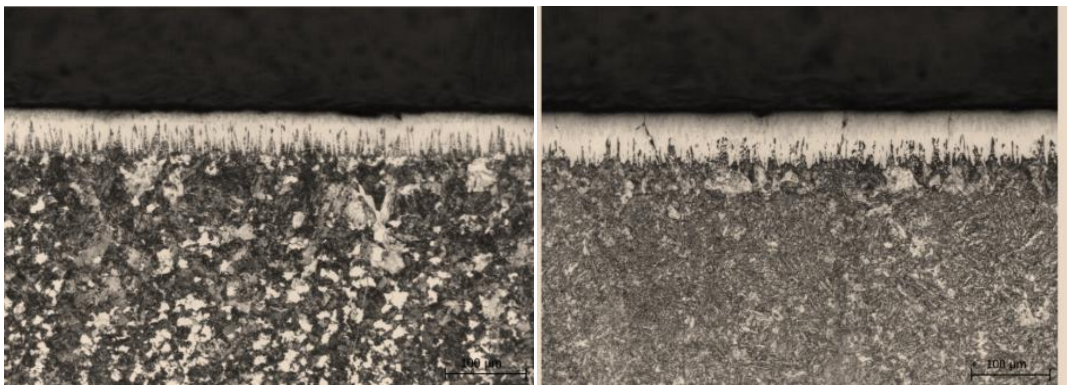
c) d)

Şekil 6.6: 850 ºC ‘de 8 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.



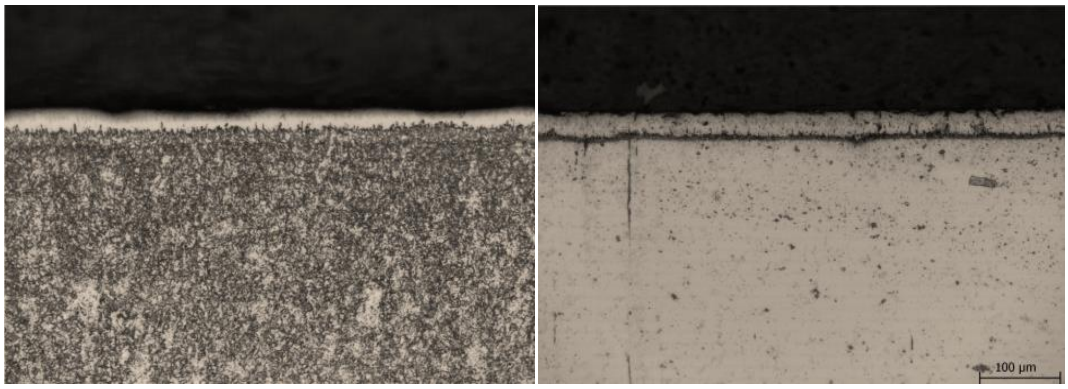
Şekil 6.7: 850 ºC de 4, 6, ve 8 saat borlanan dört çeliğin tabaka kalınlık ölçümleri.

850 ºC'de borlanan numunelerin optik görüntülerine ve tabaka kalınlığı sonuçlarına bakıldığında borlama süresine bağlı olarak tabaka kalınlığında artış gözlemlenmiştir. Aynı şartlarda borlanan numunelerden AISI 4140 çeliğinde en yüksek tabaka kalınlığına erişilmiş ve ayrıca çeliklerdeki alaşım elementi miktarı artışına bağlı olarak tabaka kalınlıklarında azalma olduğu ve kolonsal yapıdan, düz ve kompakt bir yapıya geçiş olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.8 – 6.10'da 900 ºC'de 4, 6, ve 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin optik fotoğrafları verilmiştir.



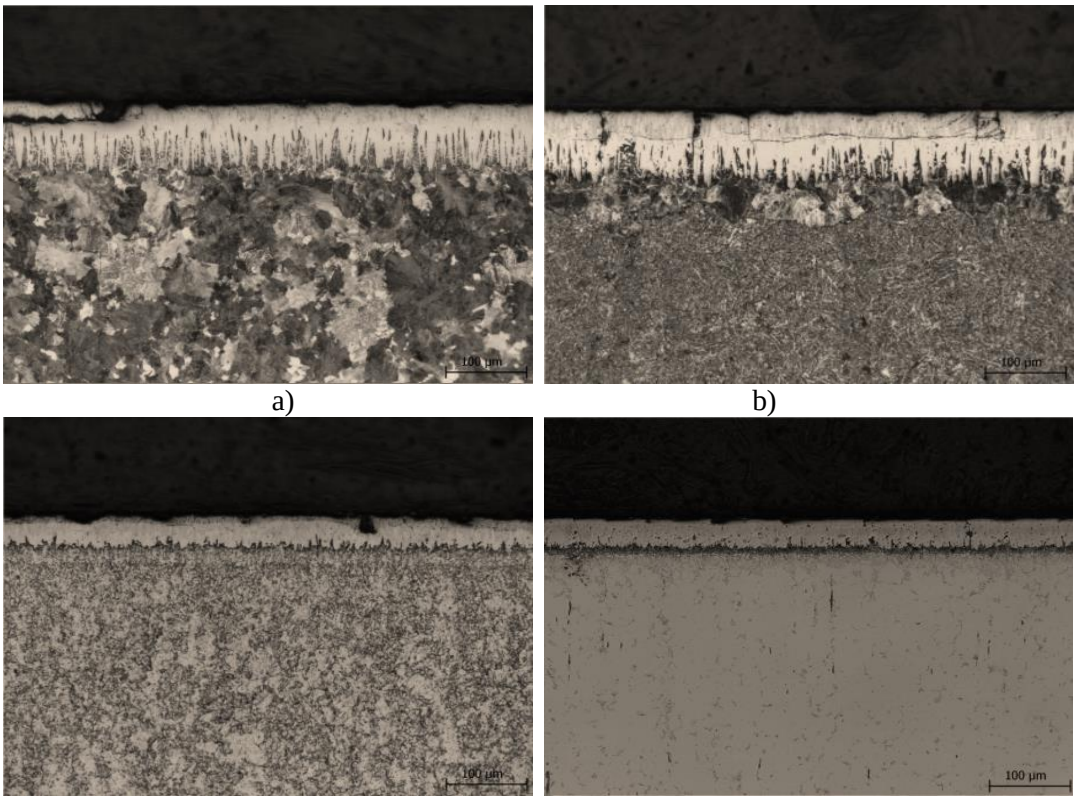
a) b)

Şekil 6.8 : 900 ºC 'de 4 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.



c) d)

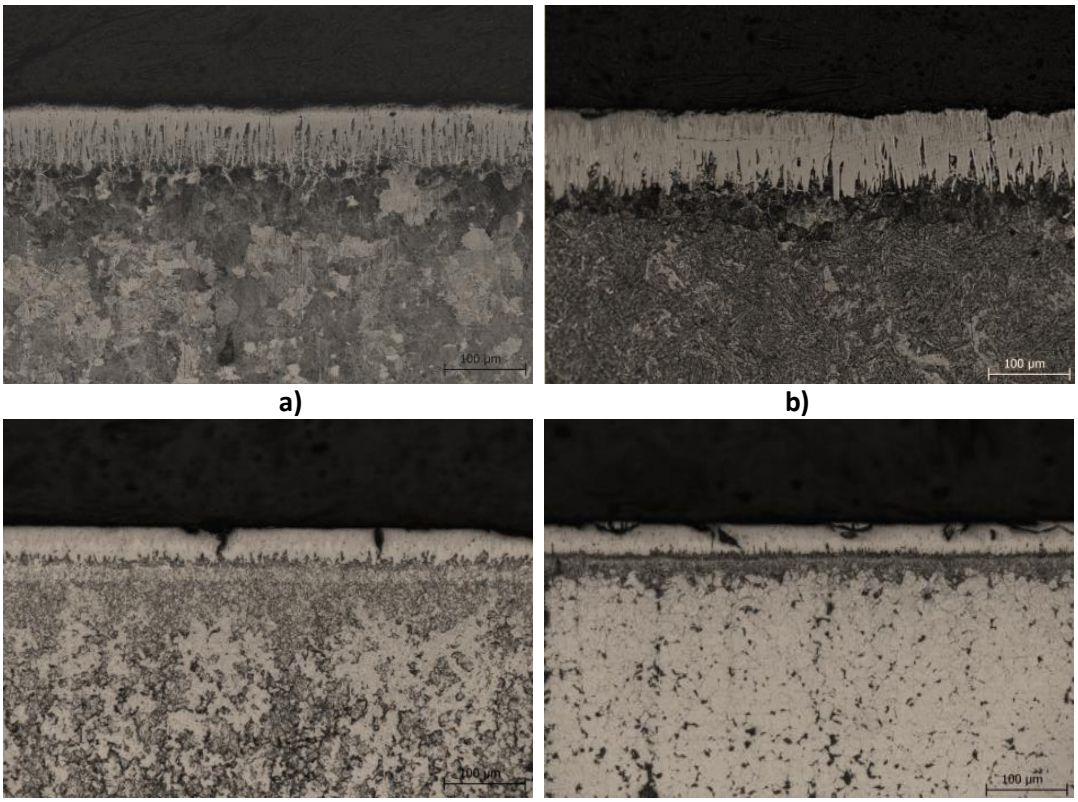
Şekil 6.8 (devamı): 900 ºC ‘de 4 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.



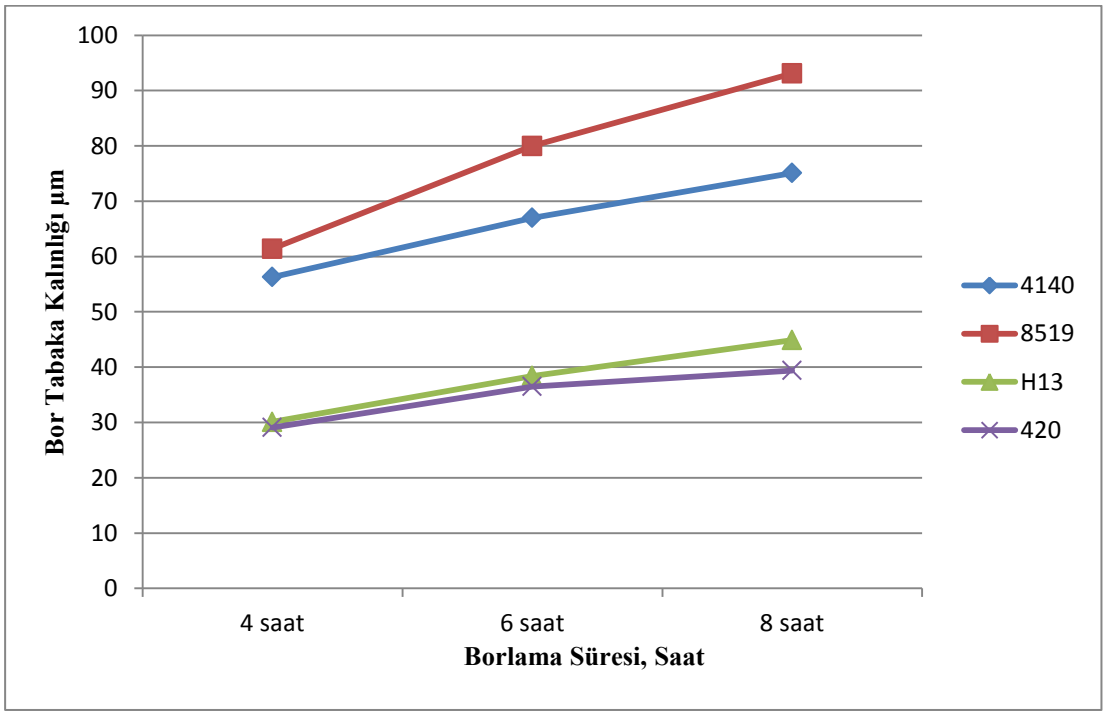
a) b)

c) d)

Şekil 6.9: 900 ºC ‘de 6 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.



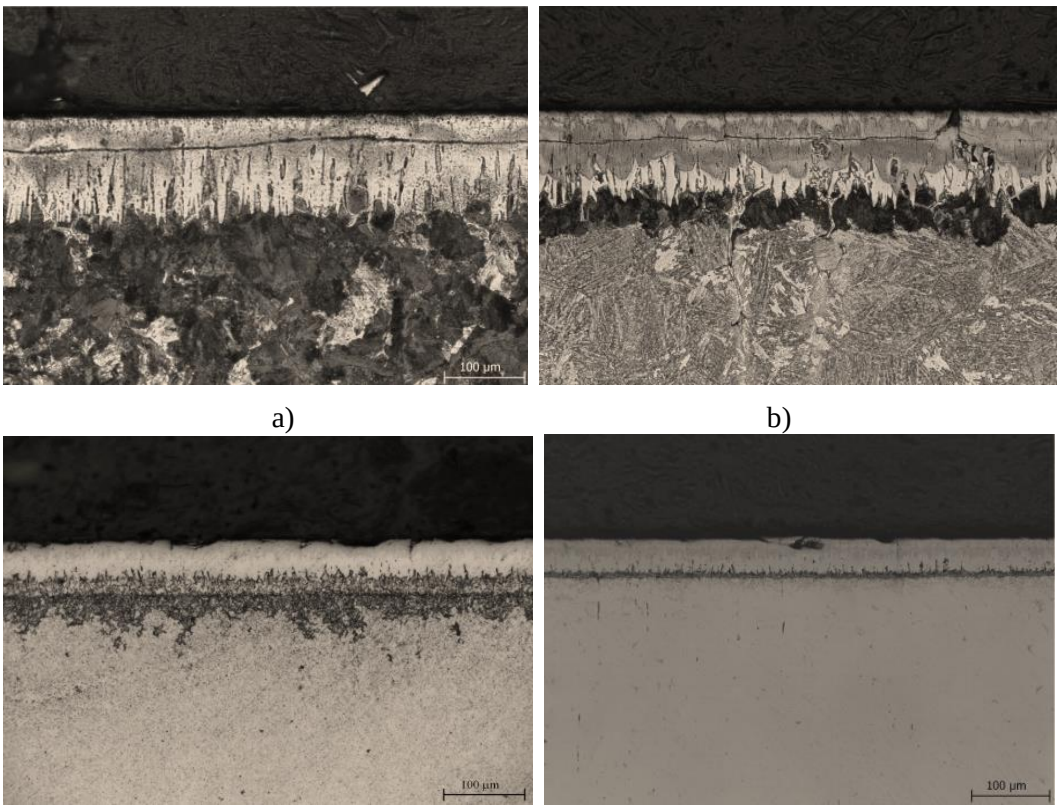
Şekil 6.10: 900 ºC ‘de 8 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.



Şekil 6.11: 900 ºC’de 4, 6 ve 8 saat borlanan dört çeliğin tabaka kalınlık ölçümleri.

950 °C 4, 6 ve 8 saat süre ile borlanan borür tabakalarının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin Şekil 6.12 – 6.14 ’de verilen mikroyapı fotoğrafları

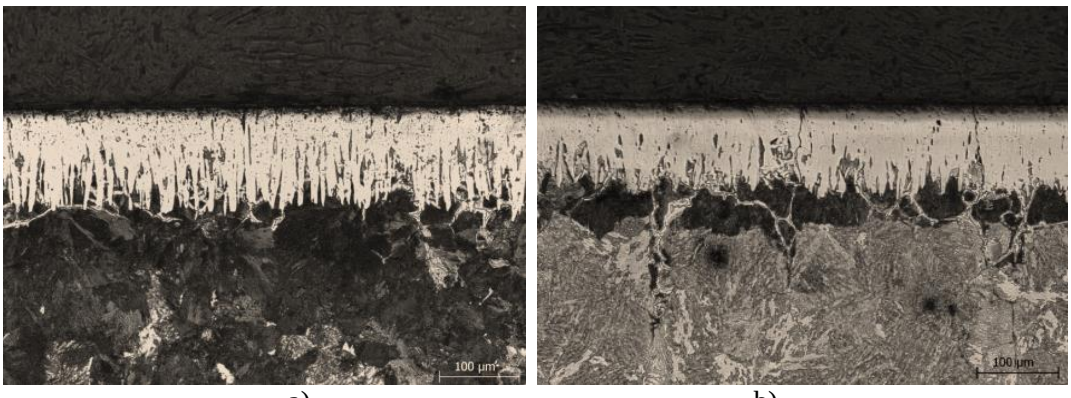
incelendiğinde sürenin ve sıcaklığın artmasıyla borür tabaka kalınlıklarının arttığı görülmektedir.



a) b)

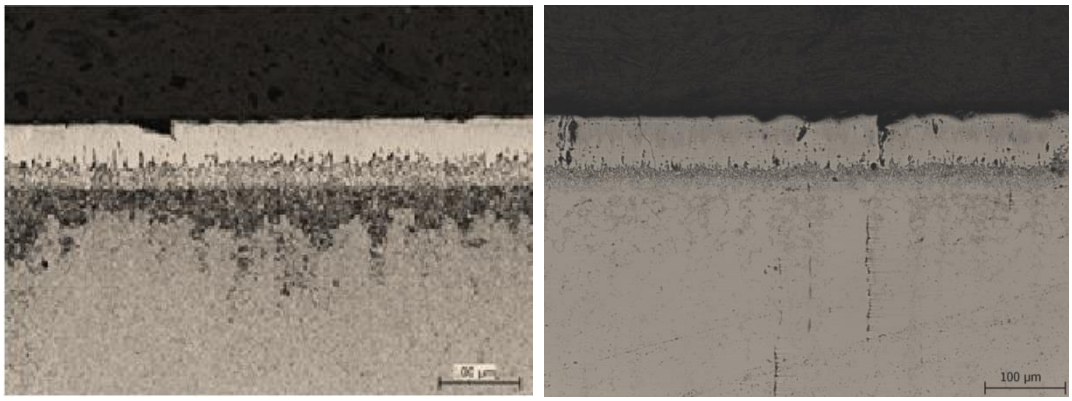
c) d)

Şekil 6.12: 950 ºC ‘de 4 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.



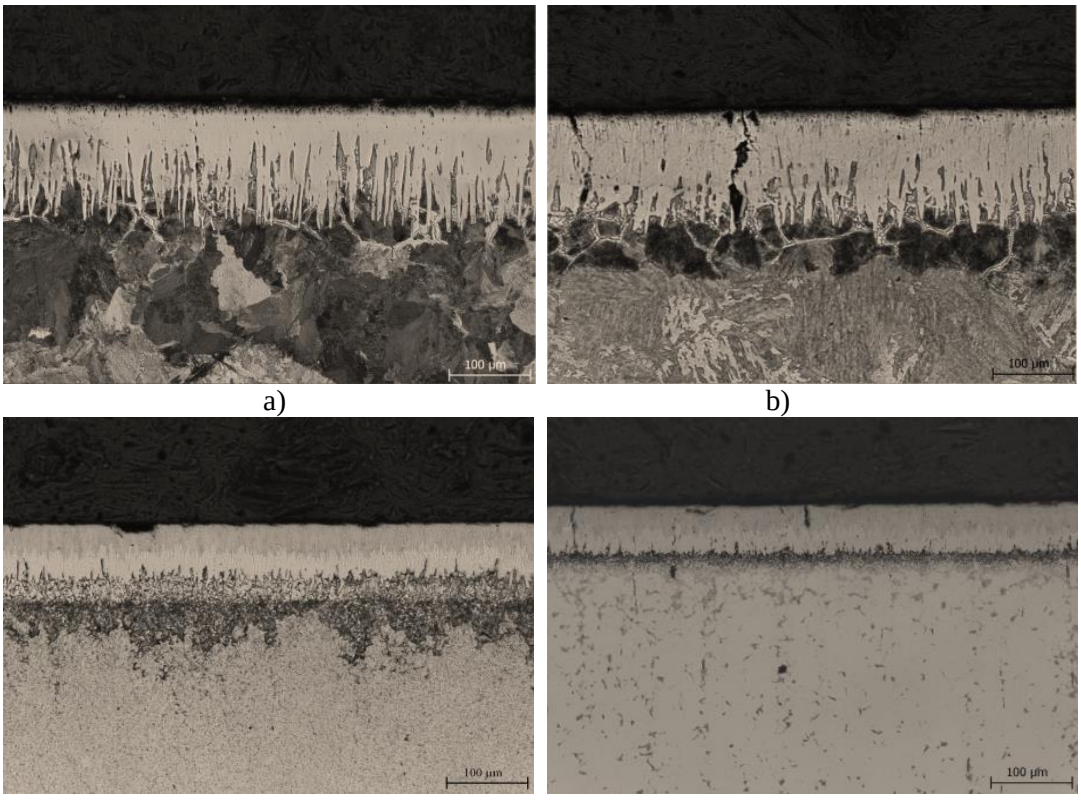
a) b)

Şekil 6.13: 950 ºC ‘de 6 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.



c) d)

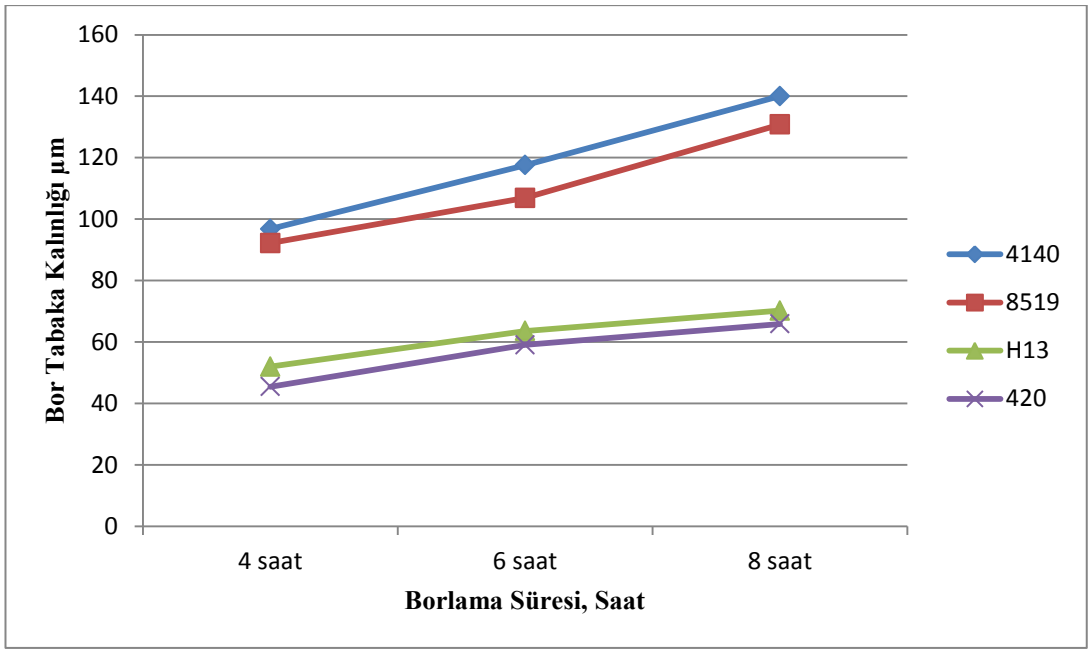
Şekil 6.13 (devamı): 950 ºC ‘de 6 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.



a) b)

c) d)

Şekil 6.14: 950 ºC ‘de 8 saat borlanan çeliklerin optik görüntüsü a) AISI 4140 b) EN 1.8519 c) AISI H13 d) AISI 420.



Şekil 6.15: 950 ºC'de 4, 6, ve 8 saat borlanan dört çeliğin tabaka kalınlık ölçümleri.

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, pasta borlamada genel olarak borür tabaka kalınlıklarının, borlama işleminin yapıldığı sıcaklık ve sürenin artışı ile arttığı tespit edilmiştir. Sonuçlar ayrıca çeliklerin alaşım elementi miktarı arttıkça tabaka kalınlığının azaldığı, tabakaların kolonsal yapıdan daha düz ve kompakt bir yapıya dönüştüğü görülmüştür. Tabaka kalınlıkları Ek A 'da ayrıca verilmiştir.

Kinetik hesapların yapılabilmesi için klasik method olan Arhenius ilişkisinden yararlanılmıştır. Çoğu difüzyon prosesinde kinetic hesaplar yapılarken parabolik yasanın geçerli olduğu varsayılır [30, 32-34]. Bu çalışmada da tabaka kalınlık grafiklerine baktığımızda artış eğiliminin parabolic olduğu gözlemlenmiştir. Burada atomların yer değiştirme eğilimi için bir ölçü olan büyüme hızı sabiti ile sıcaklık arasında üstel bir ilişki mevcuttur (Denklik 6.2).

$$x^2 = K.t \qquad (6.2)$$

x = Tabaka Kalınlığı (m), K = Büyüme Hızı Sabiti (m^2/sn), t = Süre (sn).

Kaplama tabakasının gelişimi için gerekli Aktivasyon Enerjisi (Q) Arhenius bağıntısından bulunmuştur (Denklik 6.3).

$$K = A \cdot e^{(-Q/RT)} \qquad (6.3)$$

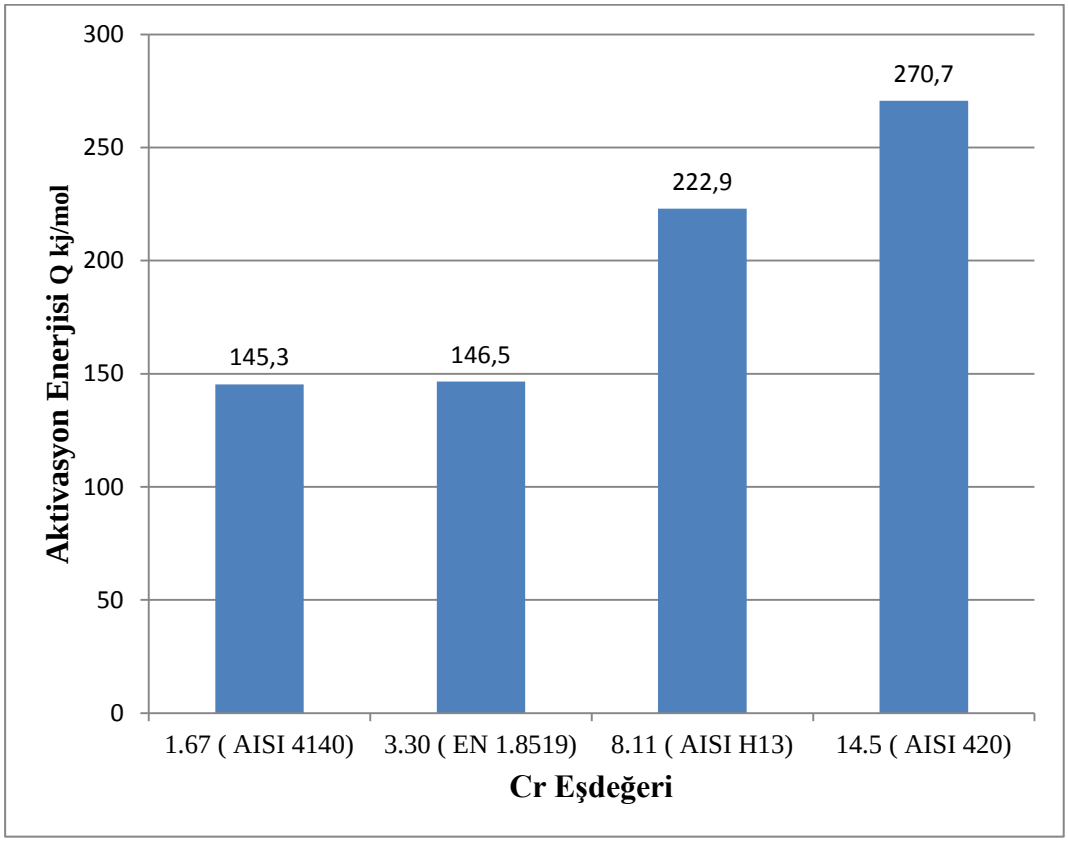
K = Büyüme Hızı Sabiti (m^2/sn), A = Sabit, Q = Aktivasyon Enerjisi (kj/mol), R = Gaz Sabiti (8,3144 j/mol ºK) , T = Sıcaklık (ºK)

Elde edilen bu kinetik verilerden sonra (K, Q, A) pratik açıdan bir sıcaklık ve süre için istenilen tabaka kalınlıkları önceden belirlenebilmektedir. Aktivasyon enerjisi hesabı yapabilmek için öncelikle büyüme hız sabitini bulmak gerekir. Büyüme hız sabiti ise tabaka kalınlığının karesinin zamana göre çizilen grafiğin eğimidir. Büyüme hız sabiti bulunduktan sonra bu sabitin resiprokal borlama sıcaklığına göre lineer grafiği çizildiğinde, çizilen eğrilerin eğimi (-Q/R) 'yi verir. Bulunan değerlerin R gaz sabitiyle çarpılmasıyla borlanan çeliklerin aktivasyon enerjileri bulunmuş olur. Bulunan büyüme hız sabiti (K) değerleri çizelge 6.1 'de verilmiştir. Ayrıca kinetik hesaplamalarda kullanılan grafikler de Ek E'de verilmiştir.

Çizelge 6.1: Dört çelik için hesaplanan K değerleri.

	AISI 4140	**EN 1.8519**	**AISI H13**	**AISI 420**
850 ºC	$x^2 = 20.10^{-14}t$	$x^2 = 2.10^{-14}t$	$x^2 = 3.10^{-14}t$	$x^2 = 2.10^{-14}t$
900 ºC	$x^2 = 30.10^{-14}t$	$x^2 = 3.10^{-14}t$	$x^2 = 7.10^{-14}t$	$x^2 = 6.10^{-14}t$
950 ºC	$x^2 = 70.10^{-14}t$	$x^2 = 7.10^{-14}t$	$x^2 = 20.10^{-14}t$	$x^2 = 20.10^{-14}t$

Çizelge 6.2: Borlanmış çeliklerin aktivasyon enerjilerinin Cr eşdeğerliğiyle değişim grafiği.



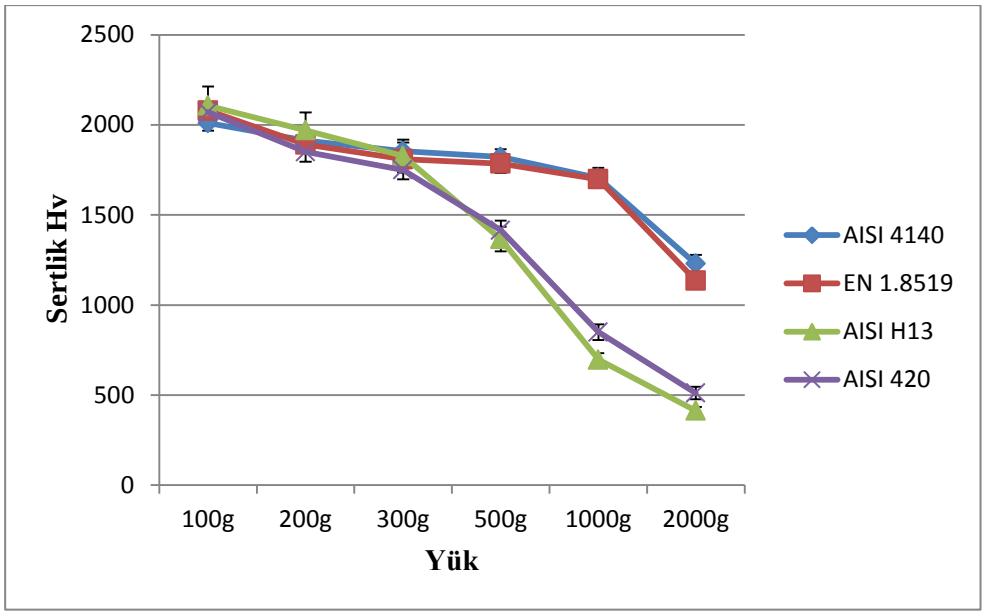
Aktivasyon enerjisinin yüksek olması bor tabakasının oluşumu ve büyümesi için gerekli enerjinin yüksek olması anlamına gelmektedir. Bu çalışmada borlanan numunelerin bor tabakası oluşumları ve kalınlıkları düşünüldüğünde aktivasyon enerjilerinin farklı olması çeliklerin alaşım elementleri ile doğrudan ilişkilidir. Borlanan çeliklerin alaşım elementlerine bakıldığında karbon içerikleri benzerlik göstermektedir. Dört çeliğinde karbon miktarı % 0.3 - 0.4 arasında değişmektedir. Diğer alaşım elementlerine bakıldığında ise krom farklılıkları belirgin şekilde göze çarpmaktadır. Aktivasyon enerjisinin hesaplanan krom eş değerliklerine (çizelge 5.2) göre değişim grafiği çizildiğinde krom miktarının aktivasyon enerjisi üzerindeki etkisi belirgin bir şekilde anlaşılmaktadır (çizelge 6.2). Krom elementi borür tabakası oluşumunda bariyer görevi görüp tabaka oluşumu için gerekli olan aktivasyon enerjisinin yükselmesine sebep olmuştur. Bulunan aktivasyon enerjisi değerleri literatürle karşılaştırıldığında sonuçlarında uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir (çizelge 6.3).

Çizelge 6.3: Çalışma sonucunda bulunan aktivasyon enerjisi değerlerinin literatürle karşılaştırılması.

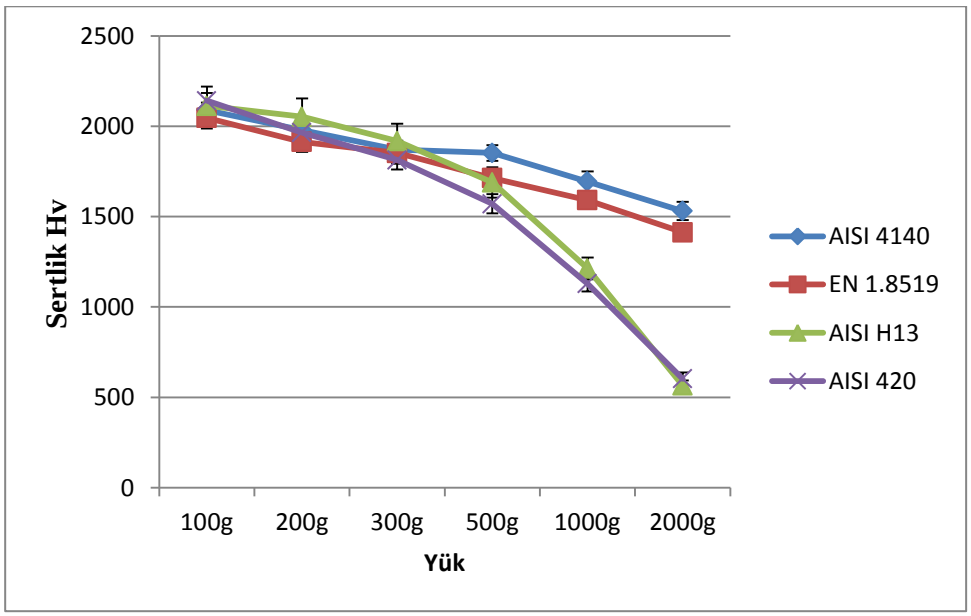
Çelik Türü	**Aktivasyon Enrejisi Q (kj/mol)**	**Referans**
ARMCO Iron	**151**	[32]
AISI 4140	**173**	[35]
AISI 316	**199.5**	[36]
AISI 4140	**145.3**	Şuan ki çalışma
AISI 8519	**146.5**	Şuan ki çalışma
AISI 2344	**222.9**	Şuan ki çalışma
AISI 420	**270.7**	Şuan ki çalışma

6.4 Borür Tabakasının Sertlik Ölçüm Sonuçları

Sertlik ölçümleri, borlanan malzemenin yüzey sertliği ve aşınma gibi mekanik özelliklerine etkisinin ortaya çıkarılması açısından önemlidir. Sertlik ölçümleri, borlanmış numune yüzeyine dik doğrultuda (kesitten) ilerleyerek 100 - 200g yük altında yapılabildiği gibi, giderek artan yük altında direkt yüzeyden de yapılabilmektedir. Her iki sertlik ölçüm methodunda da yüzey metalografik açıdan hazırlanmalıdır. Bu çalışmada farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış dört çeliğin sertlikleri yüzeyden 100, 200, 300, 500, 1000 ve 2000g yük altında ölçülmüştür. Yükün uygulanma süresi 10 saniyedir.

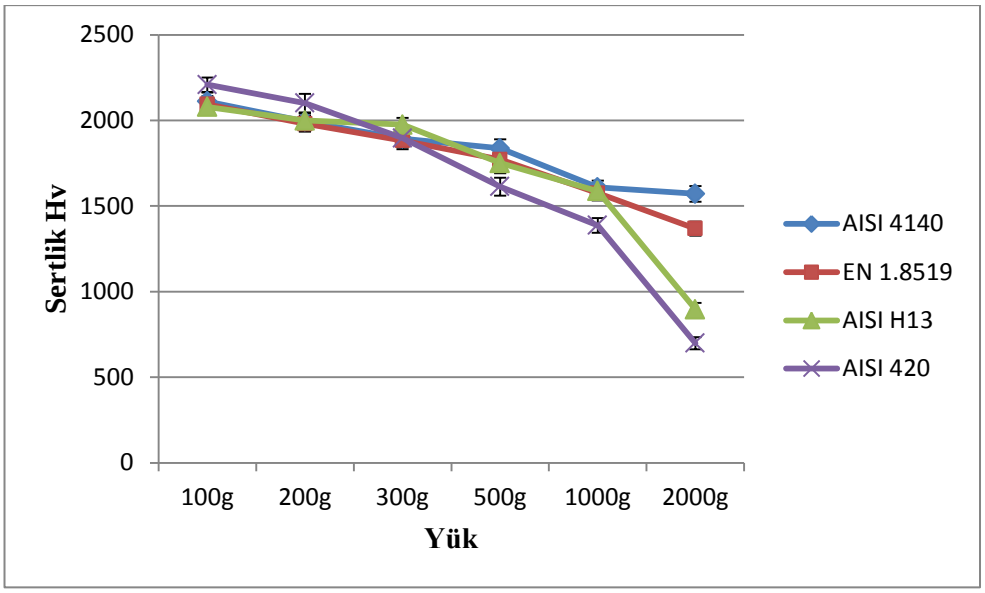


Şekil 6.16: 850 ºC' de 4 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi.



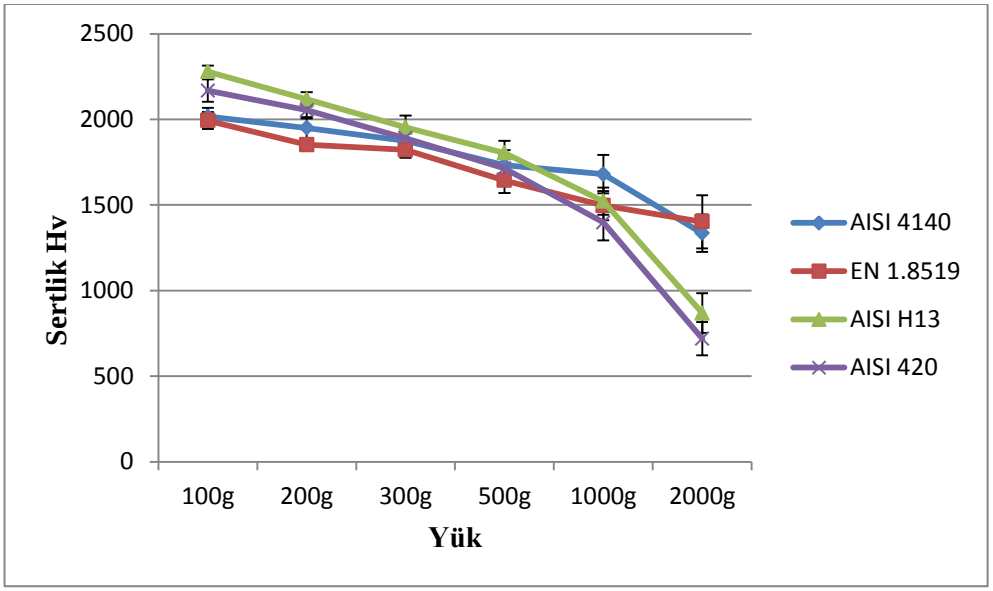
Şekil 6.17: 850 ºC' de 6 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi.

Şekil 6.16-18 'de görüldüğü üzere yükün artmasıyla, hesaplanan sertlik değerinde düşüşler olmaktadır. AISI 420 ve AISI H13 çeliklerinde 850 ºC 'de 4 saat borlama işlemi sonunda tabaka kalınlığı yaklaşık 20 µm civarlarında olduğundan ötürü yükün artmasına tabaka daha fazla dayanamamış kırılmış ve ucun numuneye daha fazla batmasına sebep olmuştur. Bu iki çeliğin yüzeyden alınan sertlik ölçümlerinde yükün



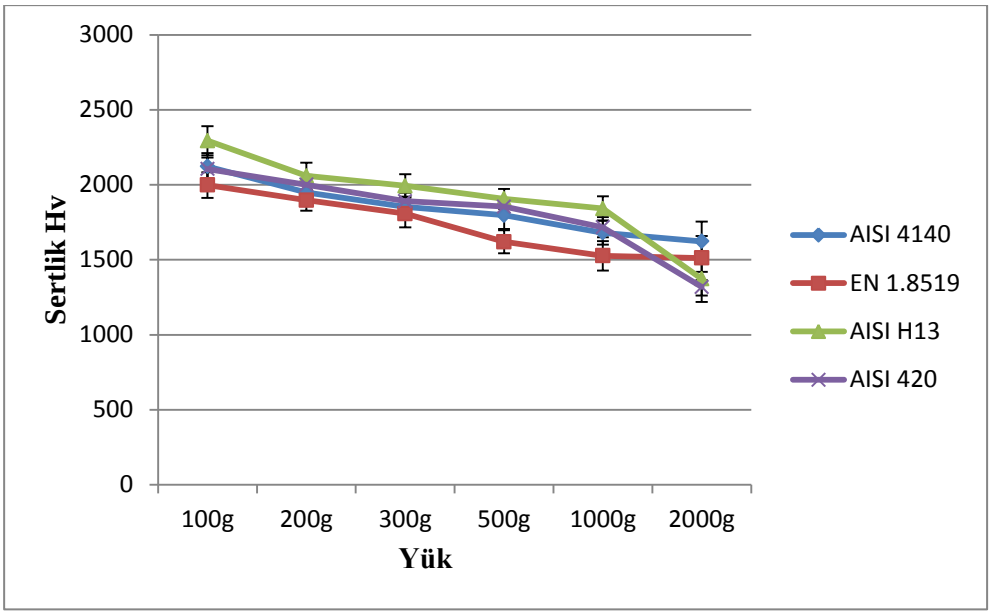
Şekil 6.18: 850 ºC' de 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi.

500 gramı geçmesiyle sertliklerinde düşüşler olmuş ancak 2000 gramda bile altlık malzemeden daha yüksek sertlik değeri vermiştir. Tabaka kalınlığının artmasıyla sertlik dayanımı yüksek yüklerde de oldukça yükselmiştir.



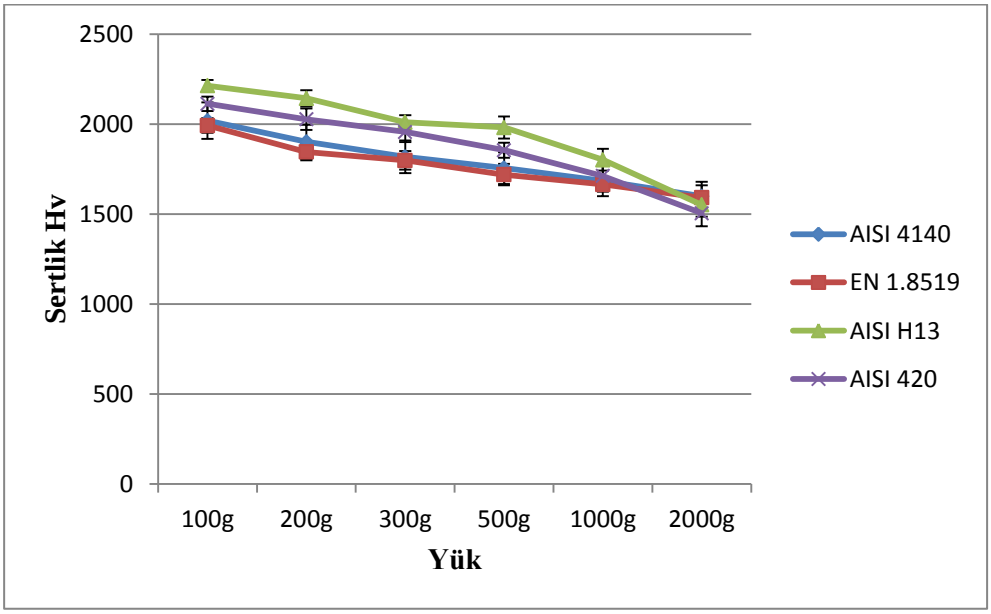
Şekil 6.19: 900 ºC' de 4 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi.

Bunun yanı sıra AISI 420 ve AISI H13 çeliklerinde yüksek alaşım elementinden ötürü Fe_2B fazının gelişimi daha güçtür. Fe_2B fazının büyümesine bariyer gibi davranan bu alaşım elementleri yüzeyde FeB oluşumunu kolaylaştırır. FeB fazının

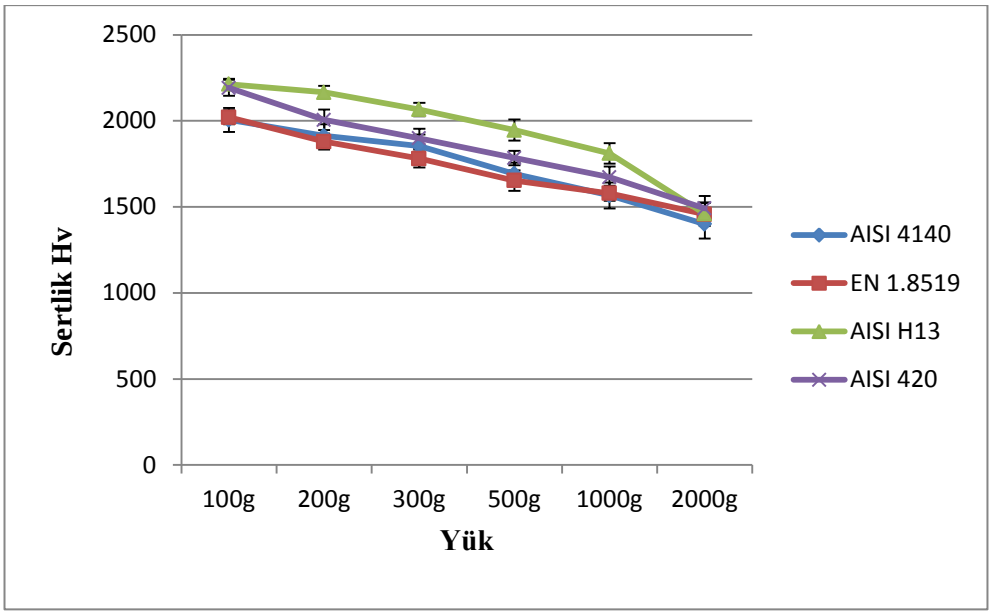


Şekil 6.20: 900 ºC' de 6 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi.

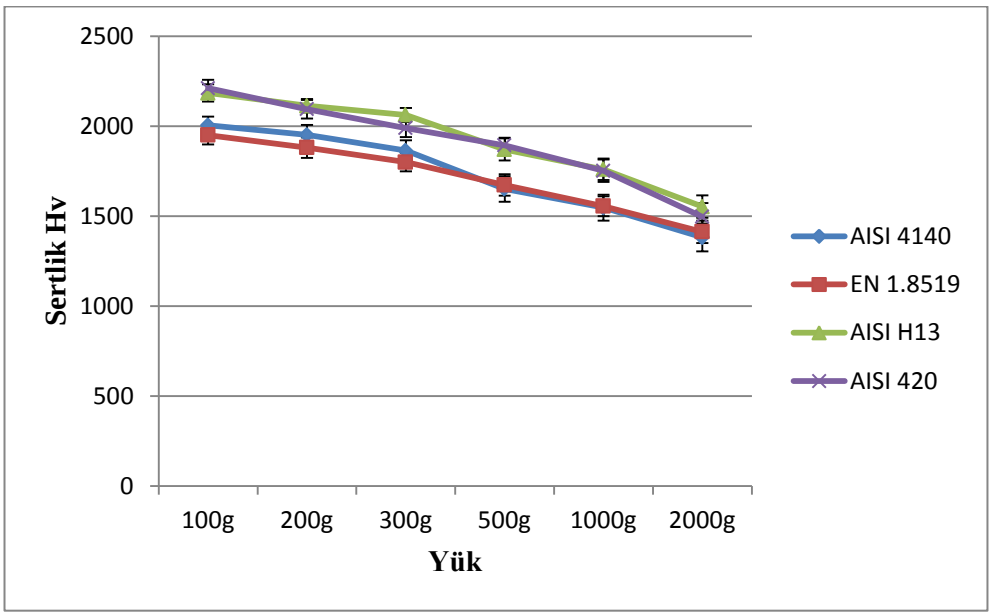
sertliğinin Fe_2B'a göre daha yüksek olmasından ve elde edilen FeB fazının diğer iki çeliğe nazaran borca daha zengin olmasından dolayı bu iki çeliğin sertlik değerleri 100g yük altında AISI 4140 ve EN 1.8519 çeliğinden daha yüksektir. Şekil 6.19 - 24 900 ve 950 ºC'de 4, 6 ve 8 saat borlanan numunelerin sertlik sonuçlarını vermektedir.



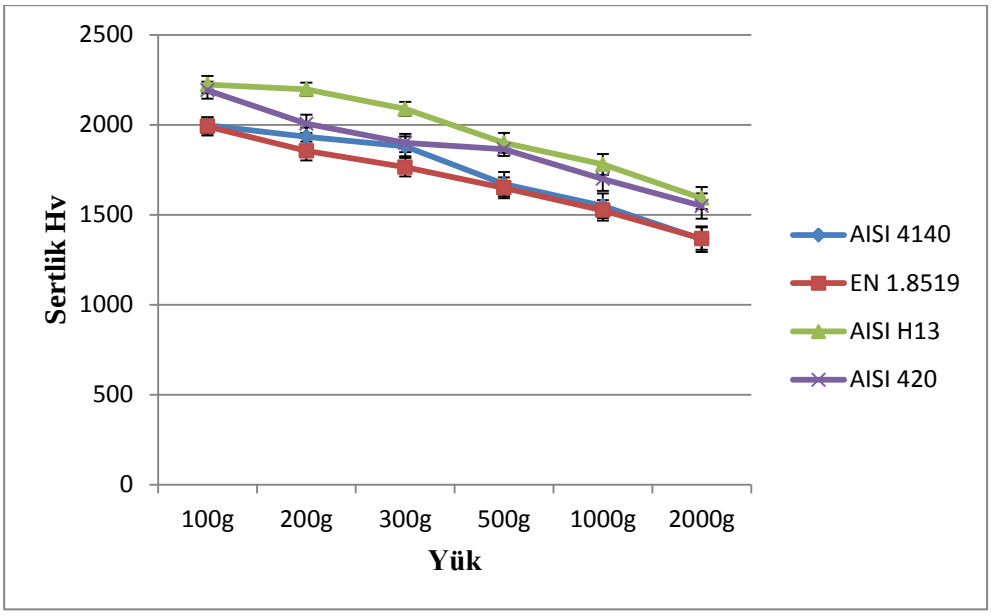
Şekil 6.21: 900 ºC' de 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi.



Şekil 6.22: 950 ºC' de 4 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi.



Şekil 6.23: 950 ºC' de 6 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi.



Şekil 6.24: 950 ºC' de 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin sertliklerinin yük artımıyla değişimi.

6.5 Borür Tabakalarının Aşınma Testleri ve Analizleri

Borür tabakaları yüksek sertliklerinin yanı sıra yüksek aşınma dirençleriyle de bilinmektedir. Deneylerde kullanılan dört çelikte kalıp endüstrisinde kullanılan plastik ekstrüzyon kalıplarının hammaddesidir. Kalıpların kullanım şartlarını düşünecek olursak bu kalıpların aşınma direncinden bahsederken koşulların yüksek sıcaklıkta olduğu unutulmamalıdır. Bu sebepten ötürü bu çalışmada kullanılan dört çeliğe disk üzeri bilya (ball-on-disc) türü aşındırıcıda yüksek sıcaklık aşınma deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın aşınma deneyleri kısmında borlama işlemi yapılmış tüm numuneler yüksek sıcaklık aşınma testine tabii tutulmamıştır. Yüksek sıcaklık aşınma testleri sadece yaklaşık 60 µm (+/- 5 µm) borür tabakası elde edilmiş çeliklerde yapılmış böylece tabaka yapısının yani içerdiği farklı faz miktarlarının (çizelge 6.4) ve tabakaların matrisle uyumunun yüksek sıcaklık aşınma davranışına etkisine yorum getirilmeye çalışılmıştır. Çeliklerin kullanım şartları düşünelerek belirlenen deney sıcaklıkları 25, 300, ve 500 ºC olarak seçilmiştir. CSM (Switzerland) marka yüksek sıcaklık tribotest cihazında 2 N yük altında, yağlayıcısız ortamda aşınma deneyi yapılmıştır. Mesafe olarak 250 metrelik yol, 5.5 santimetre çapında daire çizen bir güzergahta 5 cm/sn hızında alınmıştır. Aşındırıcı yüzey olarak ise 6 mm çapında alumina top kullanılmıştır. Deney sonucunda borür tabakalarının sürtünme katsayıları elde edilmiş ve aşınma izleri profilometre

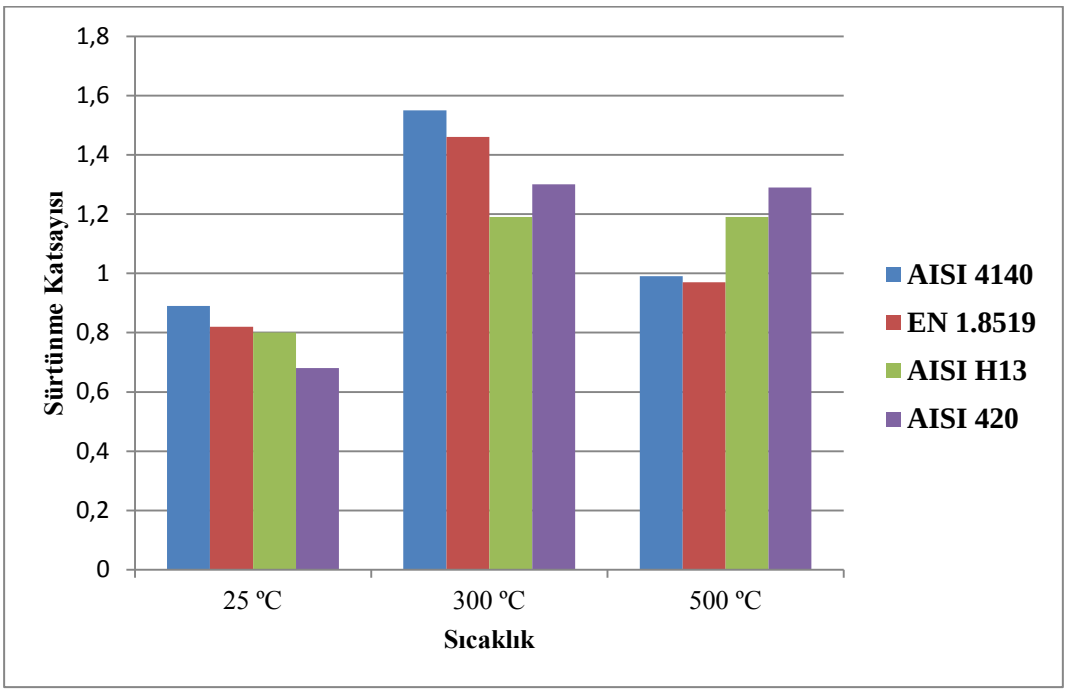
cihazında incelenmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri çizelge 6.4 ’de sunulmuştur. Ayrıca Ek F ’de sürtünme katsayısı grafikleride verilmiştir.

Çizelge 6.4: Yüksek sıcaklık aşınma deneyine tabii tutulan çeliklerin tabaka kalınlıkları ve içerdikleri faz oranları.

Borlama Koşulları / **Çelik-Sıcaklık-Zaman**	**FeB (µm)**	**Fe_2B (µm)**	**Toplam Tabaka Kalınlığı (µm)**	**FeB/Fe_2B**	**FeB/Toplam Tabaka Kalınlığı**
AISI 4140 - 900 ºC - 4 saat	7.1	55.0	62.1	0.15	0,11
EN 1.8519 – 900 ºC – 4 saat	8.5	57.9	66.4	0.13	0,13
AISI H13 - 950 ºC – 6 saat	31.6	30.0	61.6	1.05	0,51
AISI 420 – 950 ºC – 6 saat	38,8	26.6	65.4	1.45	0,59

Çizelge 6.5’de görüleceği üzere sürtünme katsayısı değerleri dört çelik için oda sıcaklığında 0.7-1 değerleri arasında değişirken, 300 ºC ‘de 1.2-1.5 aralığındadır. 500 ºC ‘de ise 1-1.3 aralığında değişmektedir. Yüksek sıcaklık aşınma koşullarında kaplama malzemesinin termal genleşme katsayısı her zaman göz önünde bulundurulmalıdır. FeB ve Fe_2B fazlarının termal genleşme katsayıları sırasıyla 23.0 ($^{\circ}C^{-1}$ x 10^{-6}), 7,6 ($^{\circ}C^{-1}$x10^{-6})’ dır. Bu rakamlar substrate malzemenin termal genleşme katsayısından oldukça farklıdır. Sürtünme katsayısının yüksek sıcaklıklarda artmasının sebebi, bor tabakasındaki farklı fazların termal genleşme farkından dolayı tabakalarda ki termal çatlaklardır. Bu çatlaklar sadece tabakaların içerdiği FeB ve Fe_2B fazlarının termal uyumsuzluğundan değil ayrıca tabakayla matris arasındaki termal uyumsuzluktan da kaynaklanabilmektedir. Çatlaklar faz geçiş bölgelerinde olabildiği gibi, tabaka ile matris ara yüzeyinde de gözlemlenebilmektedir. Bu tabakalar çatladıktan bir süre sonra kopup ortamda aşındırıcı partikül gibi davranıp aşınmayı şiddetlendirir bunun yanı sıra bu kopan kırıntılar sürtünme katsayısınıda yükseltebilir. 500 ºC de ki sürtünme katsayısında ki düşüşün sebebi ise yüksek sıcaklıktan ötürü oluşması muhtemel oksit tabakasıdır.

Çizelge 6.5: Borlama işlemi sonrasında 60 mikrometre tabaka kalınlığı elde edilmiş dört farklı çeliğin farklı sıcaklıklarda yapılan aşınma deneyi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.



Aşınma testi uygulanan dört çeliğin üç farklı sıcaklıktaki aşınma izleri profili profilometre cihazında ölçülmüştür. Oda sıcaklığı, 300 ve 500 ºC' de yapılan testlerin profilometre sonuçları Ek B'de sunulmuştur. Elde edilen grafiklerle aşınma izlerinin genişliği ve derinliği ölçülüp önce $A = \pi ab/4$ formulü ile alan hesabı yapılmış daha sonra bulunan değerin aşınma izinin çevresi $Ç = 2\pi r$ ile çarpılıp hacim kaybı hesaplanmıştır. Bulunan hacim kaybı değerleri, kendi aralarında değerlendirildikten sonra, aşınma direnci hakkında yorum getirilmesini sağlamıştır.

Hacim kaybı hesapları sonuçları ise çizelge 6.6 'de verilmiştir. Yaklaşık tabaka kalınlığı 60 mikrometre olan dört çeliğe oda sıcaklığında yapılan aşınma testleri sonucunda hacim kaybının çok düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Bor tabakasının yüksek sertliği sayesinde numuneler oda sıcaklığında aşınmaya oldukça direnç göstermiş hacim kaybı miktarı 1 – 2 mm^3' ü geçememiştir. 300 ºC'de yapılan deneylerin sonuçlarına bakıldığında ise numuneler oda sıcaklığına nazaran daha çok aşınmıştır. Deneyin yapıldığı sıcaklık hariç aşınma deney parametrelerinin tamamının aynı olduğu halde aşınma kaybının artmasının temel sebebi çeliklerde sıcaklık sebebiyle oluşan termal stres farklılığındandır. Dört çelik içinde içerdikleri 60 µm'lik tabakada FeB ve Fe_2B oranları farklı olduğundan oluşacak termal streslerde farklıdır. FeB ve Fe_2B fazlarının termal genleşme katsayılarının

farklılığından kaynaklanan bu termal stresler, sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Mekanik yükün oluşturduğu stresin yanı sıra oluşan bu termal stresler tabakaların daha çabuk çatlamasına sebep olup, bor tabakasından kopan parçalar aşınmayı daha da şiddetlendirmektedir. Hacim kaybı 300 ºC'de dört çelik için 20 - 70 mm^3 arasında değişmektedir. Bu farklılık ise çelikte oluşan FeB miktarıyla ilişkilendirilebilir. Alaşım elementi miktarının fazla olduğu çeliklerde FeB oluşumu kolaylaşmış bu sert fazın bulunması tabakayı aşınmaya karşı bir nebze daha dirençli hale getirmiştir. Bu fark belirgin bir şekilde 500 ºC'de yapılan testlerde görülmektedir. Yüksek alaşım elementine sahip AISI 420 ve AISI H13 çeliklerinin hacim kaybı miktarları, düşük alaşım elementi miktarına sahip AISI 4140 ve EN 1.8519 çeliklerine nazaran düşüktür. AISI H13 ve AISI 420 çeliklerinin aşınma kaybı sırasıyla 30 – 190 ($x10^{-3}$) mm^3 iken AISI 4140 ve EN 1.8519 çeliklerinin aşınma kaybı 305 ($x10^{-3}$) mm^3 civarındadır. AISI 420 ve AISI H13 çeliklerinin FeB miktarlarının benzer olmasına rağmen AISI 420 çeliğinin aşınma miktarının fazla olması, AISI 420 çeliğinin termal genleşme katsayısının tabakanın termal genleşme katsayısıyla uyumsuzluğunun AISI H13 çeliğine göre daha fazla olmasındandır. Bu farklılık tabakada oluşan termal stres miktarını artırıp çatlamayı ve aşınmayı kolaylaştırmaktadır. İncelenenen malzemelerin borlanmış yüzeyleri oda sıcaklığında aynı mertebede aşınmış olup relatif aşınma hızı AISI 4140 çeliği için oda sıcaklığında 1.0 olarak alınmıştır. Bu kapsamda relatif aşınma hızı değerleri çeliklerin hacim kaybı miktarlarına göre tekrar hesaplanıp çizelge 6.7'de, yapılan aşınma testlerinin kararlı hal sürtünme katsayısı değerleriyle sunulmuştur. Sürtünme katsayısının mesafe ile değişimi grafikleri ise Ek F'de verilmiştir.

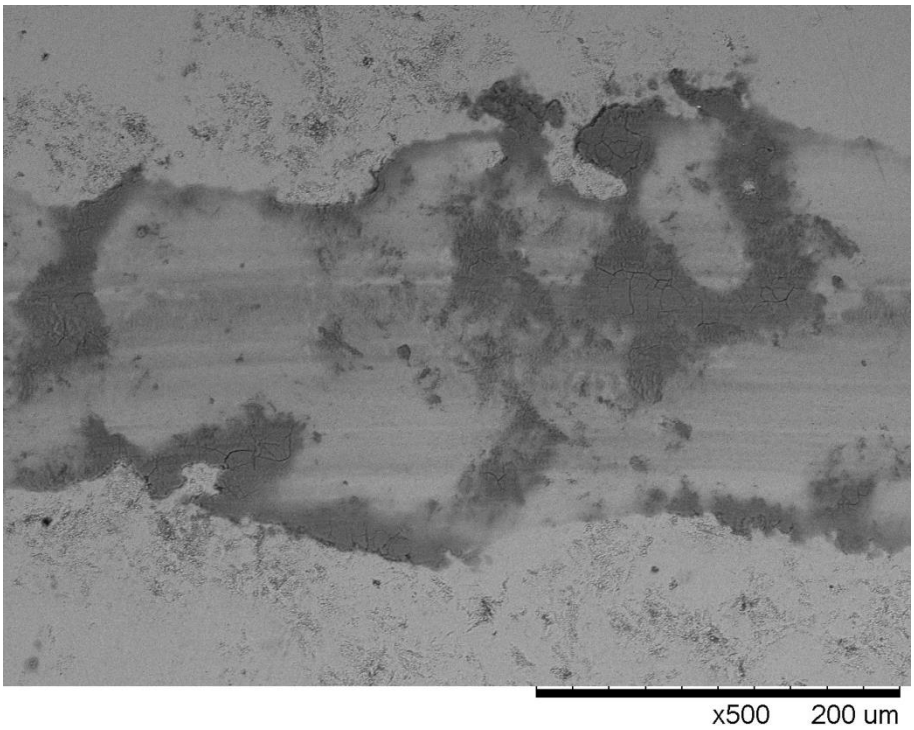
Çizelge 6.6: 60 mikrometre tabaka kalınlığına sahip dört çeliğin 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklık aşınma deneyi sonucu oluşan aşınma izi analizi.

	25 ºC				300 ºC				500 ºC			
	Genişlik (µm)	Derinlik (µm)	Alan (µm)	Hacim Kaybı (10-3 mm3)	Genişlik (µm)	Derinlik (µm)	Alan (µm)	Hacim Kaybı (10-3 mm3)	Genişlik (µm)	Derinlik (µm)	Alan (µm)	Hacim Kaybı (10-3 mm3)
AISI 4140 900º C 4H	188	0.3	44.2	1.52	535	1.4	588.2	20.30	677	16.6	8826.4	305.0
EN 1.8519 900º C 4H	191	0.4	60.0	2.01	373	6.95	2036.0	70.36	679	16.4	8745.8	302.2
AISI H13 950º C 6H	180	0.5	70.6	2.44	471	1.4	517.9	17.89	246	4.6	888.7	30.71
AISI 420 950º C 6H	180	0.3	42.4	1.46	315	6.1	1233	42.6	618	11.7	5678.9	196.25

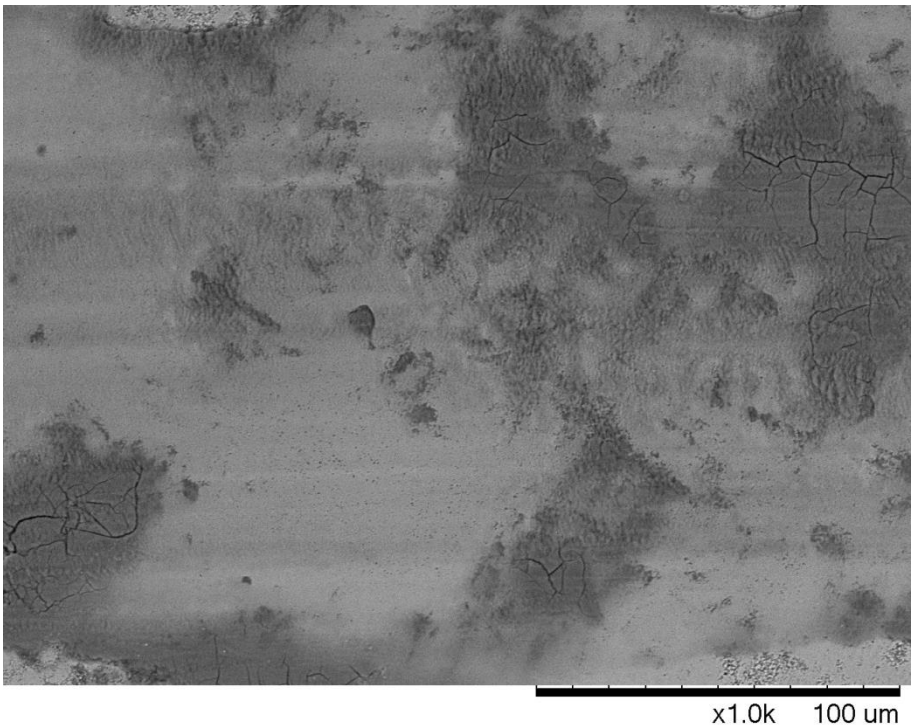
Çizelge 6.7: 60 mikrometre tabaka kalınlığına sahip dört çeliğin 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklık aşınma deneyi sonucu oluşan relatif aşınma ve sürtünme katsayısı değerleri.

Sıcaklık	**25 ºC**		**300 ºC**		**500 ºC**	
-	**Relatif Aşınma Kaybı**	**Sürtünme Katsayısı**	**Relatif Aşınma Kaybı**	**Sürtünme Katsayısı**	**Relatif Aşınma Kaybı**	**Sürtünme Katsayısı**
AISI 4140 900ºC 4H	1,0	0,9	13,3	1,55	200,6	1,0
EN 1.8519 900ºC 4H	1,3	0,8	46,2	1,45	198,8	0,45
AISI H13 950ºC 6H	1,60	0,8	11,7	1,2	20,2	1,2
AISI 420 950ºC 6H	1,0	0,7	28,1	1,3	129,1	1,3

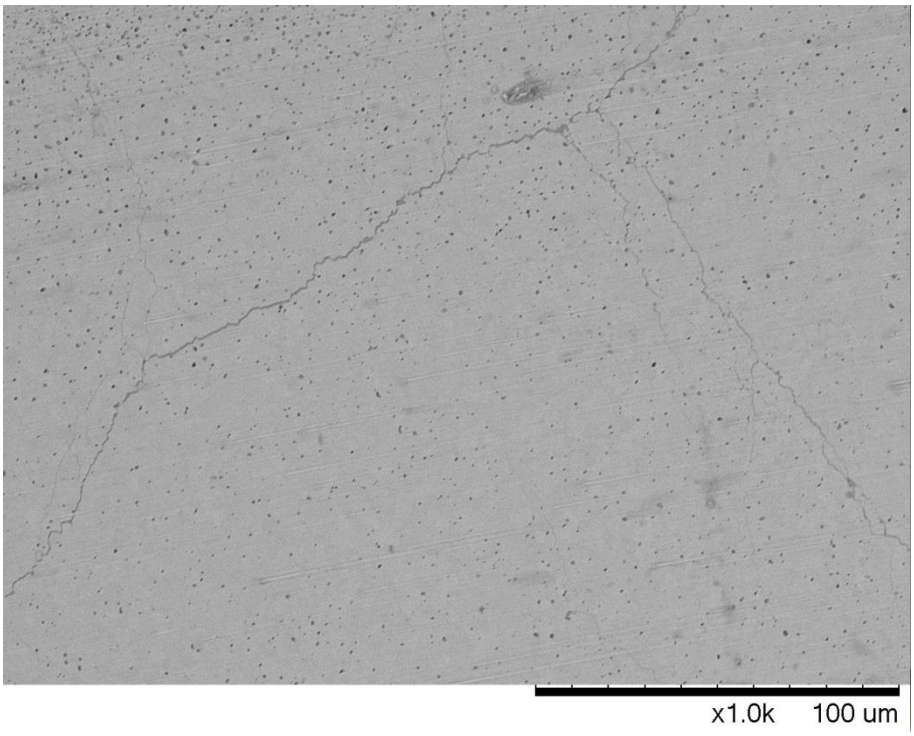
Oda sıcaklığında yapılan aşınma deneyleri sonucunda 60 µm bor tabakası kalınlığına sahip dört çelikte, aşınmaya karşı (içerdikleri fazlar ve oranları ne olursa olsun) benzer direnç göstermişlerdir. Çizelge 6.6 'dan görüleceği üzere çeliklerin hacim kaybı 1-2 ($x10^{-3}$) mm^3 geçmemiştir. Oda sıcaklığı aşınma deneyi sonrasında yapılan aşınma izi SEM karaterizasyonu sonucu şekil 6.25'de gösterilmiştir. Aşındırıcı bilyenin pürüzlülükleri düzleştirdiği gözlemlenmiş, sürtünmeden kaynaklı ani ısınmalardan oluşan lokal (aşınma izindeki siyah bölgeler) bölgelerin oksit olduğu düşünülüp bu oksitlerde çatlaklara rastlanmıştır (Şekil 6.25 – 26). Yüksek sıcaklıkta yapılan deneylerden olan 300 ºC deneyinde ise aşınma izi derinliği artış göstermiştir. Çatlakların oluşturduğu parçalanma durumu söz konusu olup, aşınma mekanizmasıda abrezif aşınma mekanizmasıdır. Gevrek tabakalar kırılıp abrezif aşınma çizgileri oluşturmuşlardır. Aynı zamanda aşınma izlerinde gözenekli yapı görülmüştür.



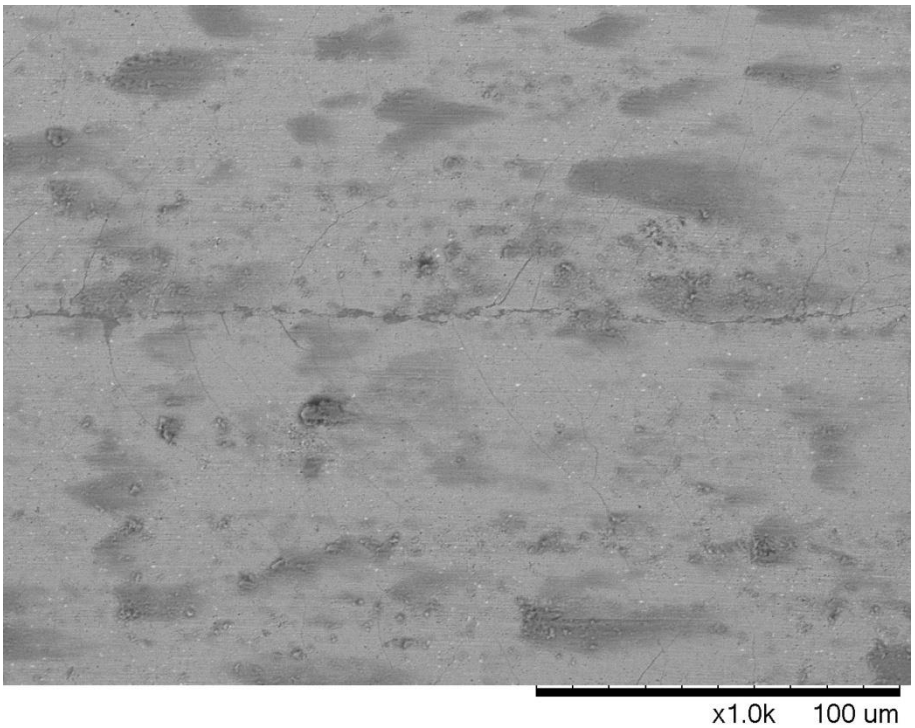
Şekil 6.25: AISI 4140 Çeliğinin oda sıcaklığında yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü.



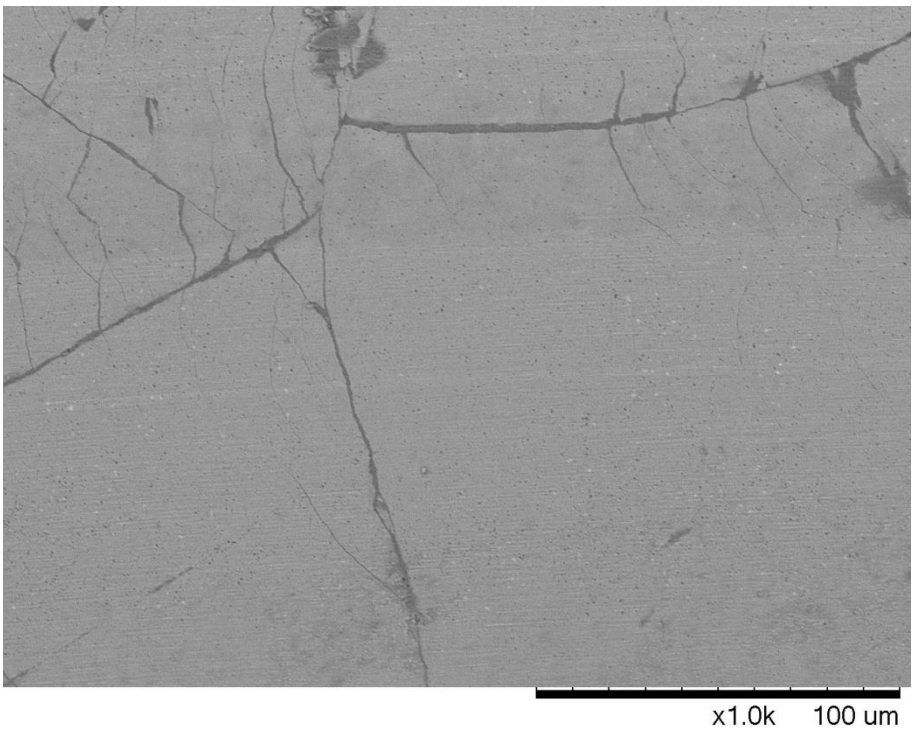
Şekil 6.26: AISI 4140 Çeliğinin oda sıcaklığında yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü.



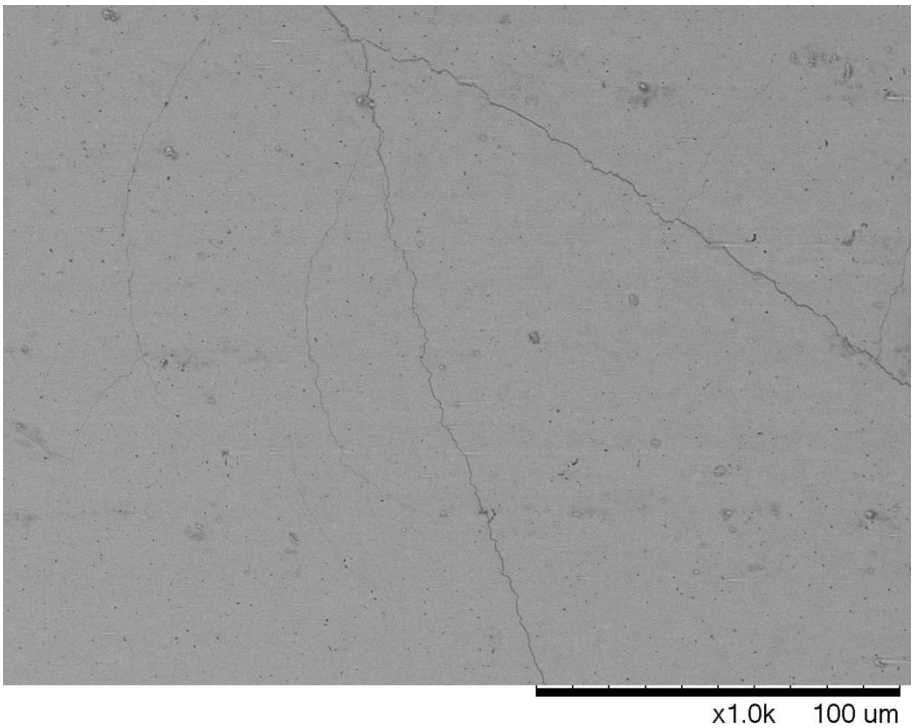
Şekil 6.27: EN 1.8519 Çeliğinin 300 ºC'de yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü.



Şekil 6.28: AISI H13 Çeliğinin 300 ºC'de yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü.



Şekil 6.29: AISI H13 Çeliğinin 500 ºC'de yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü.



Şekil 6.30: EN 1.8519 Çeliğinin 500 ºC'de yapılan aşınma deneyi sonrası aşınma izi görüntüsü.

500 ºC' de yapılan yüksek sıcaklık aşınma deneyinin aşınma izi SEM karakterizasyonu görüntüleri şekil 6.29 – 30' da AISI H13 ve EN 1.8519 çelikleri için verilmiştir. 500 ºC' de yapılan deneylerde aşınma miktarları artış göstermiştir. Profilometre sonuçlarına göre aşınma izi derinliği AISI 4140 ve EN 1.8519 çeliklerinde 16 μm civarındadır. Bu da FeB fazının aşınma bölgesinde kalktığını altta kalan Fe_2B fazınında aşındırıcı bilya ve FeB fazından kopan aşındırıcılar tarafından şiddetli bir şekilde aşındırıldığı düşünülmüştür. AISI H13 çeliğinde FeB fazından kopan parçalar FeB fazını aşındırmaya devam ettiği için aşınmaya karşı daha çok direnç göstermiştir. 500 ºC'de numunelerin aşınma izlerinde oluşan çatlak miktarının arttığı tespit edilmiştir.

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada AISI 4140, EN 1.8519, AISI H13, AISI 420 çelikleri 850, 900, 950 ˚C'de 4, 6 ve 8 saat süreyle pasta borlama yönetemiyle borlanmıştır. Borlanan çeliklere karakterizasyon çalışmaları yapılmış, metalografik ve kinetik açıdan incelenmiştir Sertlik, X - ışınları analizi ve aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma izleri, profilometre ve taramalı elektron mikroskobu cihazlarıyla incelenmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Kullanılan tüm çelik için borlama sıcaklığı ve süresi arttıkça elde edilen bor tabakası kalınlığı artmaktadır. Her bir sıcaklık için bor tabakası kalınlık artışı parabolik kinetik yasasına uygunluk göstermiştir. En yüksek tabaka kalınlığı 139 μm ile AISI 4140 çeliği için 950 ºC' de 8 saat borlama süresiyle elde edilmiştir. En düşük tabaka kalınlığı 18 μm ile 850 ºC' de 4 saat borlama süresiyle AISI 420 çeliğinde elde edilmiştir. Borlama işlemi alaşım elementi miktarı düşük çeliklerde daha kolaydır. Ayrıca alaşım elementi miktarı arttıkça tabakaların matrisle olan kolonsal birleşme şeklinde azalma olmaktadır. Matrisle olan uyum alaşım elementi miktarı arttıkça kolonsal yapıdan daha düz ve kompakt bir yapıya dönüşmektedir. Ayrıca tabakalarda yer yer gözenekli bir yapı mevcuttur. Yapılan XRD incelemelerinde FeB, Fe_2B ve CrB fazları tespit edilmiştir. Tabaka kalınlıkları yüksek olduğu için analizlerde altlık malzemeye rastlanmamıştır.
- Borlama sonrası en yüksek yüzey sertliği değerleri AISI 420 ve AISI H13 çeliklerinde, 2200 $HV_{0.1}$ seviyelerinde ölçülmüştür. Yüksek yüzey sertlik değerleri Fe2B faz tabaksının üzerinde FeB faz tabakasının gelişiminin daha çok olduğu çeliklerde gözlemlenmiştir. Bu çalışmada incelenen diğer iki çelikte (AISI 4140 ve EN 1.8519) ise en yüksek yüzey sertlik değerleri ise 1900 $HV_{(0.1)}$ civarındadır. Aynı parametrelerle yapılan borlama işlemi sonrasında gerçekleştirilen yüzey sertlik ölçümlerinde AISI 420 ve AISI H13 çeliklerinde AISI 4140 ve EN 1.8519 çeliklerine nazaran daha ince bor tabakası oluşmuş ve bunun neticesinde yüksek yüklerde yapılan sertlik ölçümlerinde daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Örneğin

düşük sıcaklık ve sürelerde borlanan 4140 ve 8429 çelikte 2 kg yük altında elde edilen yüzey sertlik değeri 1400 $HV_{2.0}$ seviyelerinde iken aynı koşullarda borlanan AISI 420 ve AISI H13 çeliklerinin yüzey serlikleri 600 $HV_{2.0}$ civarındadır.

- Borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak yapılan bor tabaka kalınlığı ölçüm sonuçları kullanılarak bor tabakası büyüme aktivasyon enerjisi AISI 4140 çeliği 145.3 kJ/mol, EN 1.8519 çeliği 146.5, AISI H13 222.9, AISI 420 çeliği ise 270.7 kj/mol olarak hesaplanmıştır. İncelenen çelikler için yapılan krom eş değeri hesaplamaları çeliklerdeki krom eş değerinin artmasıyla bor tabakası büyüme aktivasyon enerjisini arttırdığını ortaya çıkarmıştır.

- Yapılan yüksek sıcaklık aşınma deneyleri sonucunda dört çeliğin 25, 300 ve 500 ºC'de aşınma deneyi yapılarak sürtünme katsayısı değerleri bulunmuştur. Elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri ile aşınma oranları arasında paralellik görülmemiştir. Oda sıcaklığında dört çeliğinde sürtünme katsayısı değerleri 0.7 - 0.9 arasında değişmektedir. 300 ˚C'de ise 1.3-1.5 arasında değişmekte olup, 500 ºC'de 1-1.2 arasında değişmektedir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan deneylerde sürtünme katsayısı grafikleri daha çok dalgalanma göstermektedir. Bu durum yüksek sıcaklık sebebiyle bor tabakasının yüzeyinde oluşan çatlakların miktarının artmasıyla açıklanabilir.

- Yüzeylerinde yaklaşık 60 µm borür tabakası oluşan çelikler ile oda sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinde çeliklerin aşınma performasında kayda değer bir farklılık gözlenmemiş olup, artan sıcakla aşınma kaybında şiddetli bir artış olmuştur. Borlanmış çeliklerin oda sıcaklığındaki relatif aşınma kaybı 1.0 olarak alındığında 300°C'deki aşınma kaybı AISI 4140 çeliği için 13.3, EN 1.8519 çeliği için 46.2, AISI H13 çeliği için 11.7 ve AISI 420 çeliği için 28.1 olarak bulunmuştur. AISI 4140, EN 1.8519 AISI H13 ve AISI 420 çeliklerinin 500°C 'deki relatif aşınma hızları sırası ile 200.6, 198.8, 20.2, 129.1 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre yüksek sıcaklık aşınma uygulamaları için H13 çeliği borlama prosesine en uygundur. 300°C'deye kadarki aşınma uygulamalarında AISI 4140 çeliği de kullanılabilir.

KAYNAKLAR

[1] **Burgucu S.** (2010) Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Seçim, *Takım Çeliği Dergisi*, İstanbul.

[2] **Çalık A., Delikanlı K., Uzun A.** (2004). Examination of Boronizing Properties of the Ç1035 Steel, *Il. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir.

[3] **Taştan F., Akgün S., Şahin S.** (2009) Analysis Of Effect Of Material Composition To The Properties Of Ferroboron Layer In Boronizing, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük.

[4] **Güneş E., Demirel Ç., Toprak G., Çetin M., Gül F.** (2011). GGG 50 Malzemenin Abrasif Aşınma Davranışına Borlamanın Etkisi, *6th International Advanced Technologies Symposium.* Elazığ.

[5] **Bhushan, B.** (1987). Overview of Coating Materials, Surface Treatments, and Screening Techniques for Triboiogical Applications—Part 1: Coating Materials and Surface Treatments Testing of Metallic and Inorganic Coatings, ASTM STP 947, W. B. Harding and G. A. Di Ban, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

[6] **A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, K. Gołombek, D. Pakuła, J. Mikuła, M. Staszuk, L.W. Żukowska** (2011). Long-term development directions of PVD/CVD coatings deposited onto sintered tool materials, *Archives of Materials Science and Engineering*, Polonya.

[7] **ASM Metals Handbook,** (1991). Heat Treating, Vol. 4, Tenth Edition, ASM International.

[8] **Url -1** < www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/vizyon2023/mm/Ek2h.pdf <

[9] **Uluköy A., Can Ç. A.** (2005). Çeliklerin Borlanmasi, *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences,* Denizli.

[10] **Dursun B,. İpek R., Karaoğlu S.** (2011). Çok Kisa Sureli_ Borlama İşlemi ile Zincir İmalatinda Kullanilan Kılavuzların Aşınma Direncinin Arttirilmasi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüs Dergisi,* Kütahya.

[11] **Ozbek I.** (1999). Borlama Yöntemiyle AISI M50, AISI M52 Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performansının Geliştirilmesi, *Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi,* Sakarya.

[12] **Bindal C.** (1991). Az Alaşimli Ve Karbon Çeliklerinde Borlama İle Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazi Özelliklerinin Tesbiti, *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi,* İstanbul.

[13] **Campos I.** (2005). Effect Of Boron Paste Thickness On The Growth Kinetics Of Fe2B Boride Layers During The Boriding Proces, *Applied Surface Science*, Meksika.

[14] **Başman G.** (2010). AISI 316 L Tipi Paslanmaz Çeliğin Termokimyasal Difüzyon Yöntemi İle Borlanmasinda, Borlama Banyosu Bileşenlerinin Borür Tabakasi Özelliklerine Etkisi, *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi,* İstanbul**.**

[15] **Akray İ. S.** (2007). Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemlerinin Aşinma Direncine Etkisinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi,* İstanbul.

[16] **Barış M.** (2007). Farkli Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasif Aşınma Davranişlarina Etkisinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi,* Ankara.

[17] **Andrijana M., Dragomir K., Radojka M.** (2011). An Investigation Of Boride Layers Growth Kinetics On Carbon Steels, *University Osijek Teknik Dergi*, Hırvatistan.

[18] **Hayashi Y., Sugeno T.** (1970). Nature of Boron in Alpha-Iron, Acta Met. 18: 693-7, Japonya.

[19**] Miki T.,** (2006). Activity Measurement Of The Constituents Iin Molten Fe–B And Fe–B–C Alloys, *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry **30** 449–454*, Japonya.

[20**] Jiang J., (2011).** Preparation Of Fe_2B Boride Coating On Low-Carbon Steel Surfaces And İts Evaluation Of Hardness And Corrosion Resistance, *Surface & Coatings Technology 206 473–478*, Çin.

[21] **Campos I.,** (2012) The Boriding Process Growth Kinetics And Mechanical Characterization Of Boride Layers, *International Iron & Steel Symposium*, Karabük.

[22] **Martini C., Palombarinim G., Carbucicchio M.,** (2004). Mechanism Of Thermochemical Growth Of Iron Borides On Iron, *Journal Of Materials Science **39** 933– 937*, İtalya.

[23] **Keddam M.,** (2011) Simulation Of The Growth Kinetics Of The (FeB/Fe_2B) Bilayer Obtained On A Borided Stainless Steel, *Applied Surface Science, 25 2004-2010,* Amerika.

[24] **Palombarini, G., Carbucicchio M.,** (1984). On The Morphology Of Thermochemically Produced Fe_2B/Fe İnterface, *Journal Of Materials Science Letters, 1984. **3(9)** 791-794*, İtalya.

[25] **Ozbek I.,** (1999). Borlama Yöntemiyle AISI M50, AISI M52 Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performansının Geliştirilmesi, *Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi,* Sakarya.

[26] **Ozbek I.,** (2004). A Mechanical Aspect Of Borides Formed On The AISI 440C Stainless-Steel, *Vacuum **73(3-4)** 643-648*, Sakarya.

[27] **Palombarini, G., Carbucicchio M.,** (1987). Effects Of Alloying Elements On The Growth Of İron Boride Coatings. *Journal of Materials Science Letters **6(10)** 1147-1149*, İtalya.

[28] **Gianoglio, C. Badini C.**, (1986) Distribution Equilibria Of İron And Nickel İn Two Phase Fields Of The Fe-Ni-B System, *Journal of Materials Science, **21(12)** 4331-4334*, İtalya.

[29] **Bergmann, H.W., Brokmeier U.,** (1981). Influence Of Cr, Mn, Co and Ni on the Crystallization Behaviour of $(Fe_{1-x}M_x)_y$ $Metalloid_{1-y}$ Metallic Glasse, *MRS Online Proceedings Library,* Almanya.

[30] **Genel K.,** (2006). Boriding kinetics of H13 steel, *Vacuum, **80(5)** 451-457,* Sakarya.

[31] **Oliveira, C.K.N.,** (2010). Production And Characterization Of Boride Layers On AISI D2 Tool Steel. *Vacuum, **84(6)** 792-796,* Brezilya.

[32] **Campos, I.,** (2003) Kinetic Study Of Boron Diffusion İn The Paste-Boriding Process, *Materials Science and Engineering: A, **352(1-2)** 261-265,* Meksika.

[33] **Keddam, M.,** (2004). A Kinetic Model For The Borided Layers By The Paste-Boriding Process, *Applied Surface Science, **236(1-4)** 451-455,* Amerika.

[34] **Sen, S., Sen U., Bindal C.,** (2005). The Growth Kinetics Of Borides Formed On Boronized AISI 4140 Steel, *Vacuum, **77(2)** 195-202*, Sakarya.

[35] **Campos-Silva, I.,** (2010) Characterization Of AISI 4140 Borided Steels, *Applied Surface Science, **256(8)** 2372-2379,* Meksika.

[36] **Ozdemir, O.,** (2008) An İnvestigation On Boriding Kinetics Of AISI 316 Stainless Steel, *Vacuum, **83(1)** 175-179,* Sakarya.

EKLER

Ek A: 850, 900 ve 950˚C ‘de 4, 6, ve 8 saat süreyle borlanmış dört çeliğin tabaka kalınlıkları.

Ek B: 60 μm tabaka kalınlığına sahip dört çeliğin 25, 300 ve 500 C’ de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.

Ek C: Borlanmış çeliklerin 100, 200, 300, 500, 1000 ve 2000 g yük altında ölçülen vickers sertlik testi sonuçları.

Ek D: Borlanmış çeliklerin XRD sonuçları.

Ek E: Kinetik hesap grafikleri.

Ek F: Dört çeliğin aşınma testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri.

Ek A: 850, 900 ve 950 ºC' de 4, 6, ve 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin tabaka kalınlıkları.

Çizelge A.1: 850, 900 ve 950 ºC' de 4, 6, ve 8 saat süreyle borlanmış AISI 4140, EN 1.8519, AISI H13, AISI 420 çeliklerinin tabaka kalınlıkları.

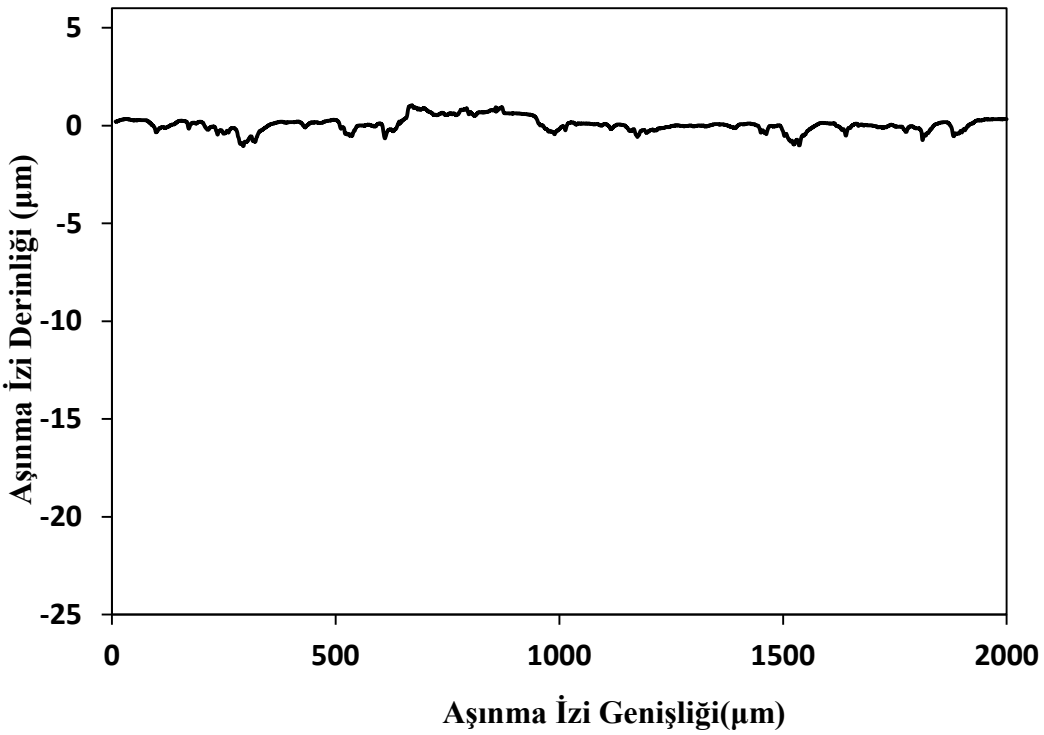
AISI 4140	**850˚C**	**900˚C**	**950˚C**
4 saat	48.5 µm	56.3 µm	96.8 µm
6 saat	67.0 µm	68.2 µm	117.6 µm
8 saat	69.5 µm	75.1 µm	140.0 µm

EN 1.8519	**850˚C**	**900˚C**	**950˚C**
4 saat	44.0 µm	61.4 µm	92.2 µm
6 saat	52.1 µm	80.0 µm	106.9 µm
8 saat	65.1 µm	93.1 µm	130.8 µm

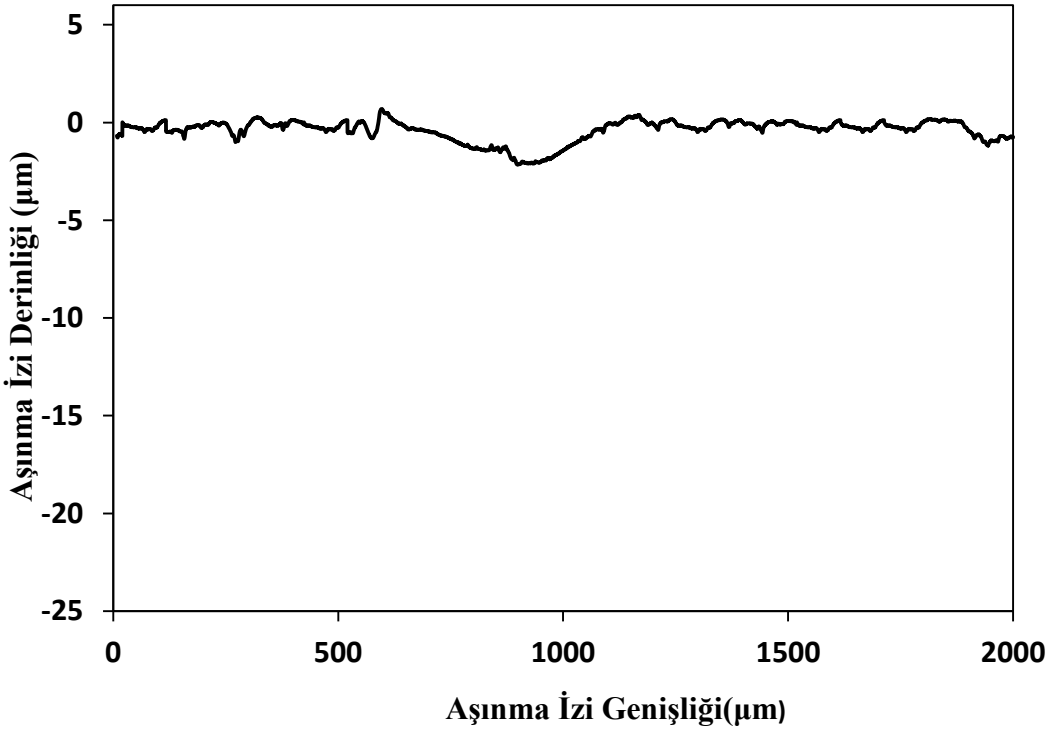
AISI H13	**850˚C**	**900˚C**	**950˚C**
4 saat	22.6 µm	30.1 µm	52.0 µm
6 saat	27.3 µm	38.4 µm	63.6 µm
8 saat	28.1 µm	44.9 µm	70.2 µm

AISI 420	**850˚C**	**900˚C**	**950˚C**
4 saat	15.9 µm	29.1 µm	45.5 µm
6 saat	16.8 µm	36.5 µm	59.1 µm
8 saat	24.5 µm	39.4 µm	65.9 µm

Ek B: 60 µm tabaka kalınlığına sahip dört çeliğin 25, 300 ve 500 ºC' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.

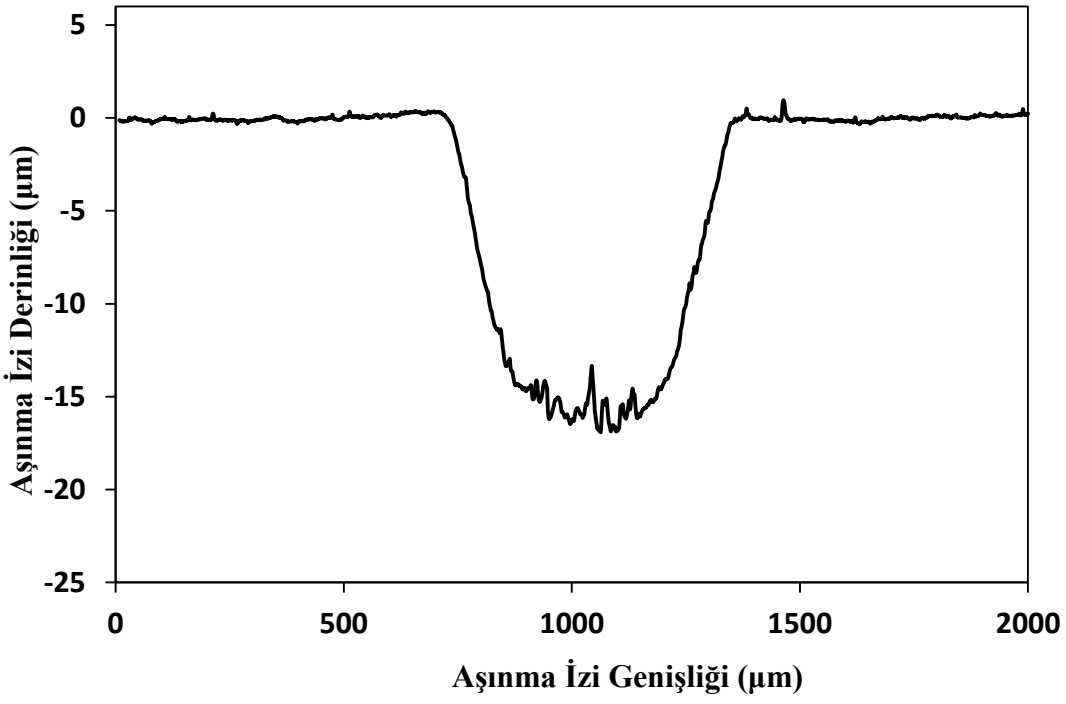


a)



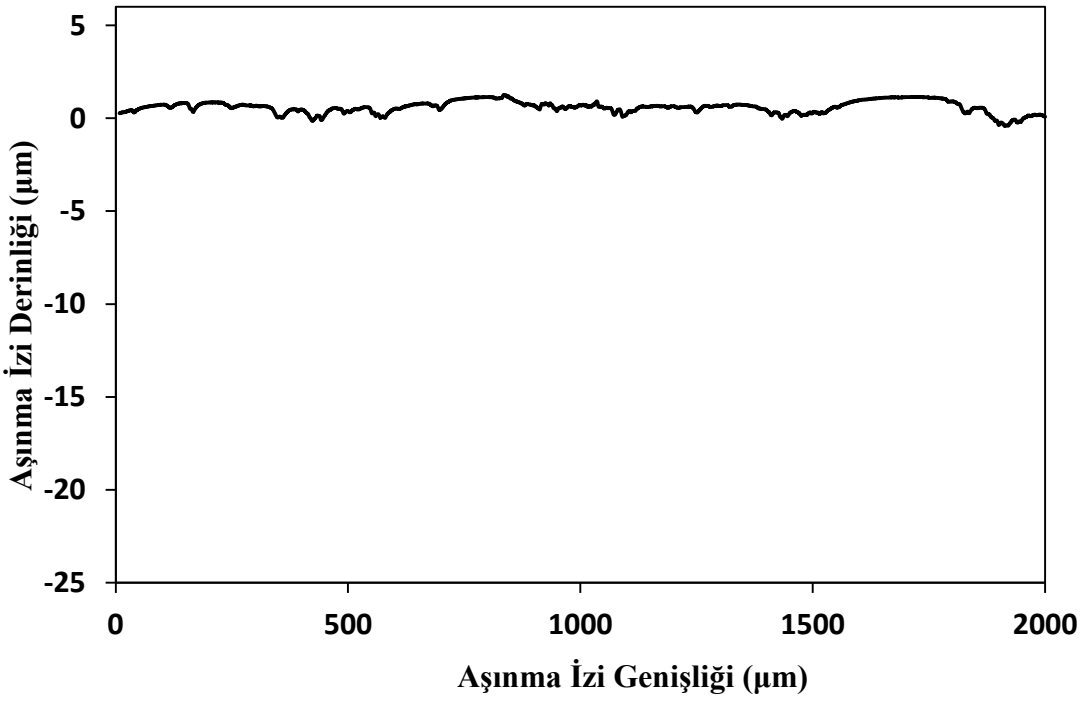
b)

Şekil B.1: 60 µm tabaka kalınlığına sahip AISI 4140 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500 ˚C' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.



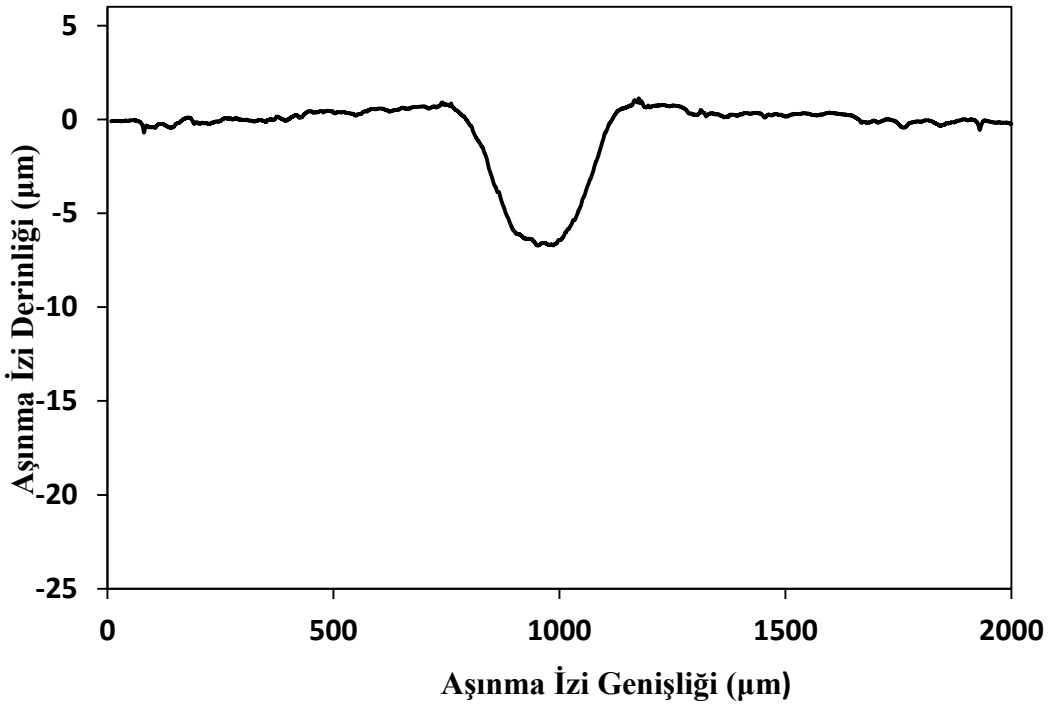
c)

Şekil B.1(devamı): 60 µm tabaka kalınlığına sahip AISI 4140 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500˚C' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.

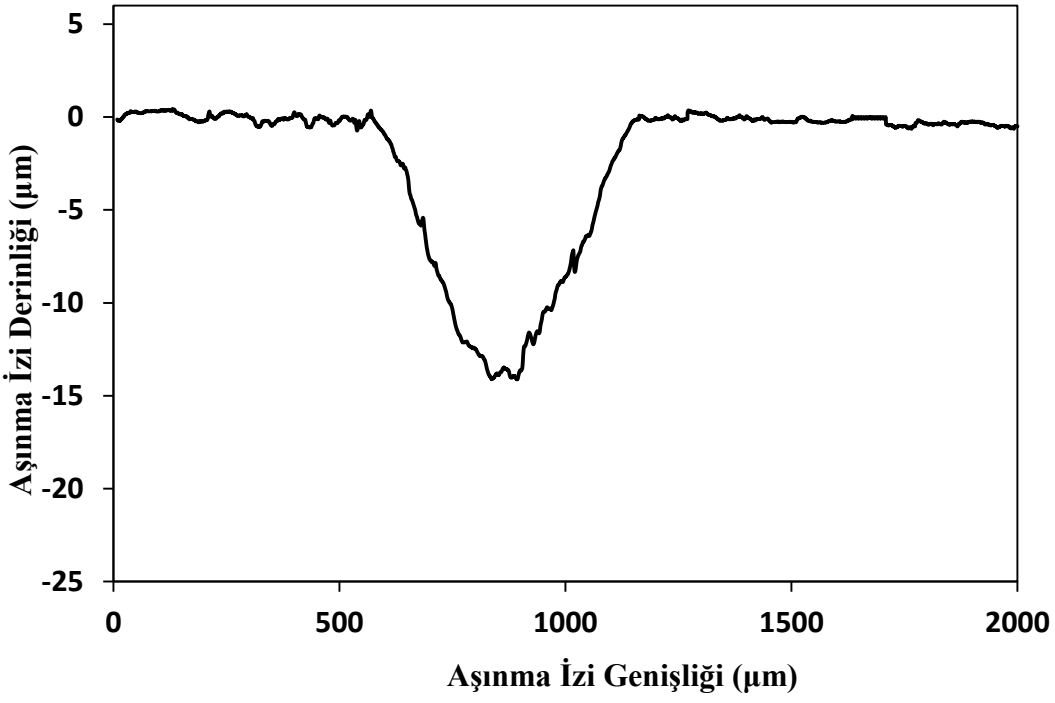


a)

Şekil B.2: 60 µm tabaka kalınlığına sahip EN 1.8519 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500˚C' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.

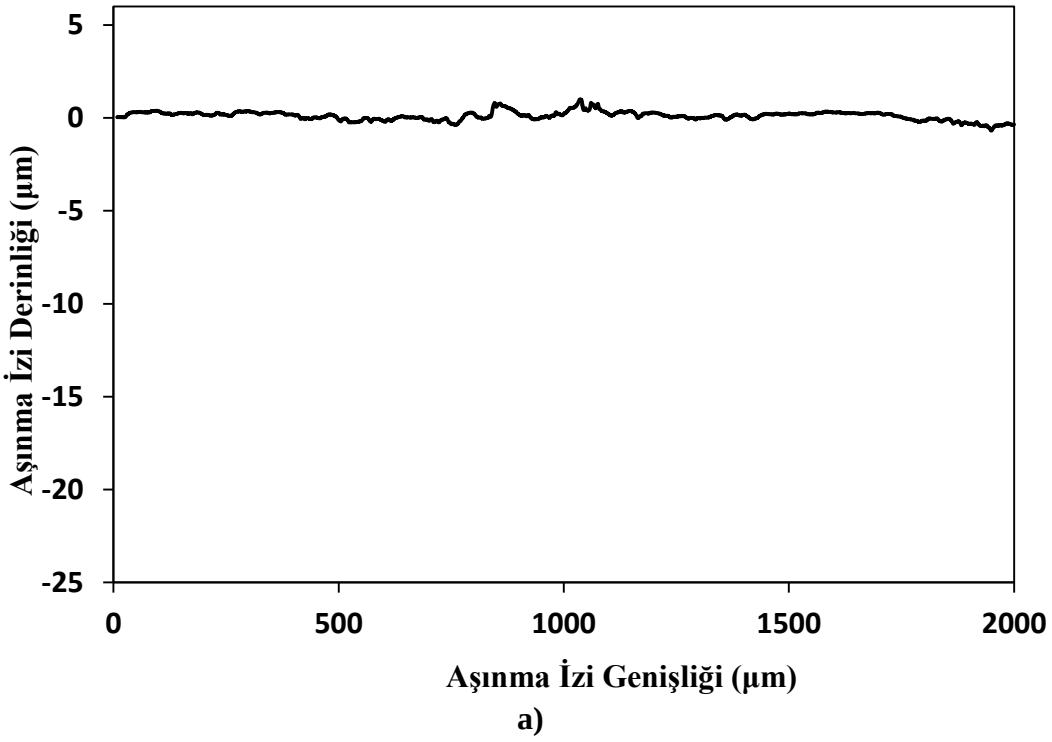


b)

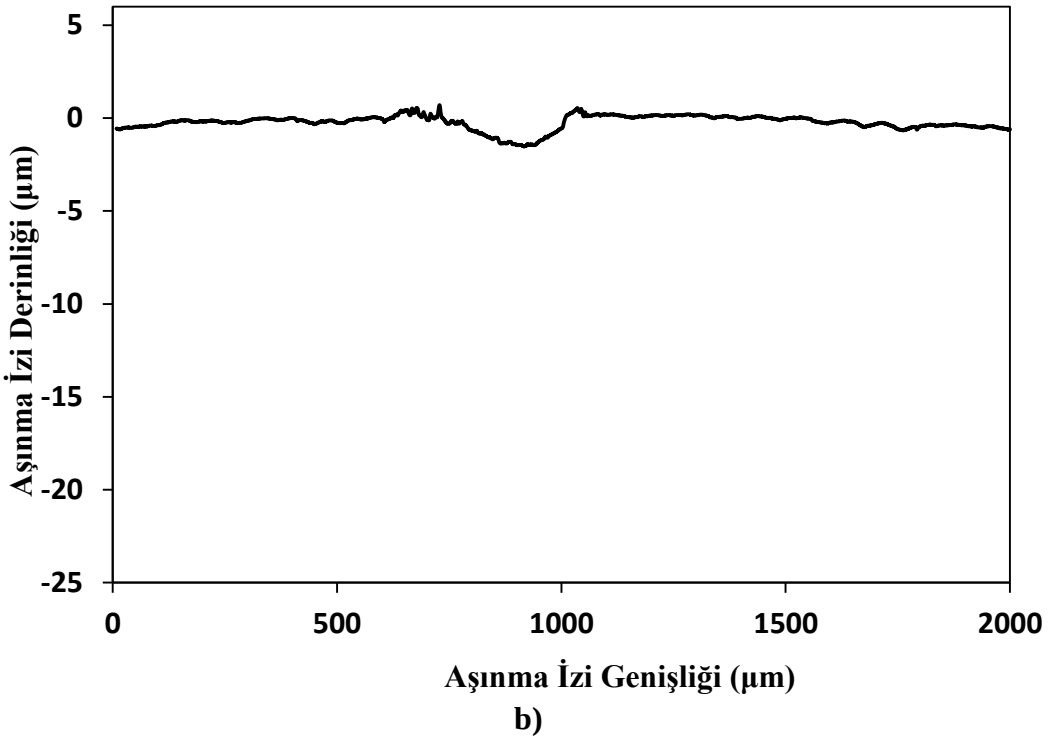


c)

Şekil B.2 (devamı): 60 µm tabaka kalınlığına sahip EN 1.8519 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500 ˚C' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.

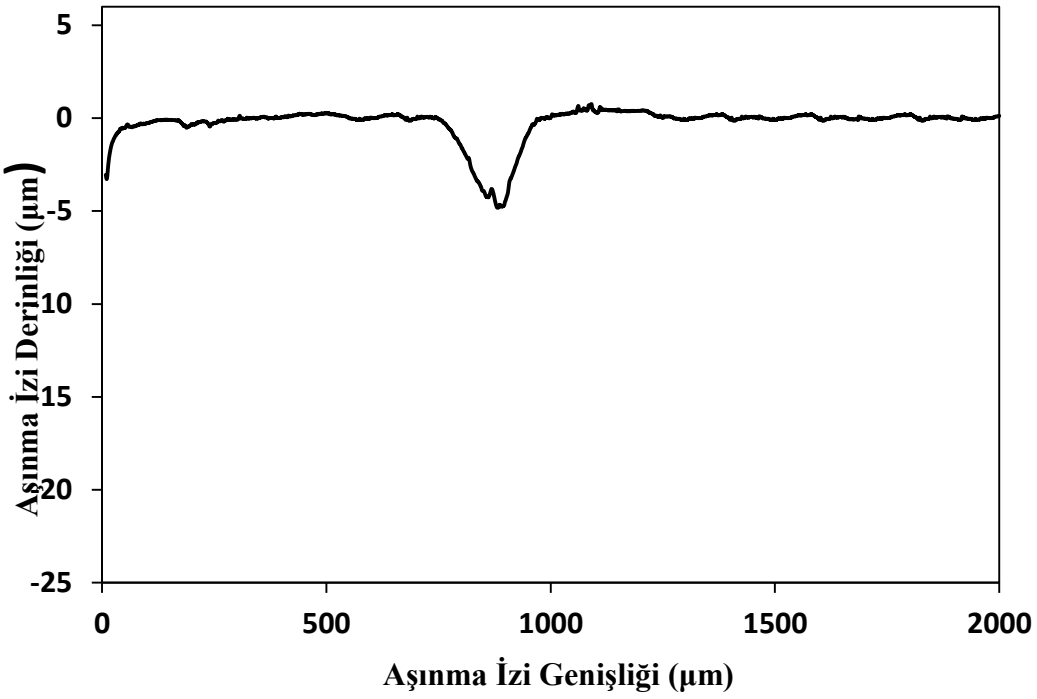


a)



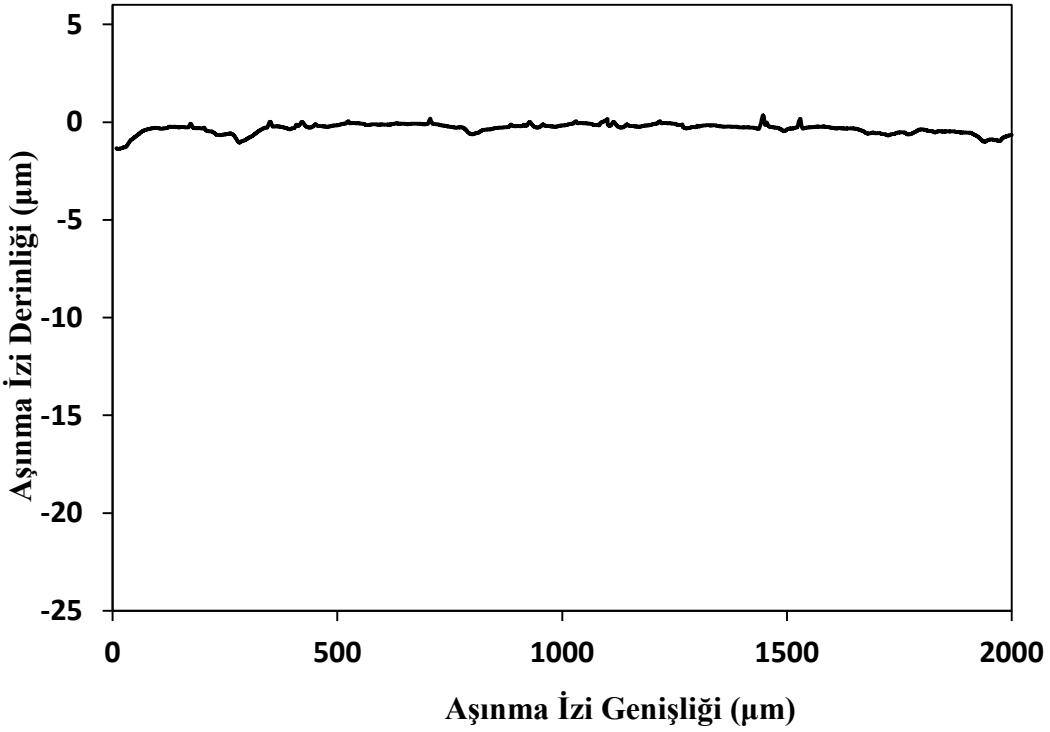
b)

Şekil B.3: 60 µm tabaka kalınlığına sahip AISI H13 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500 ˚C' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.



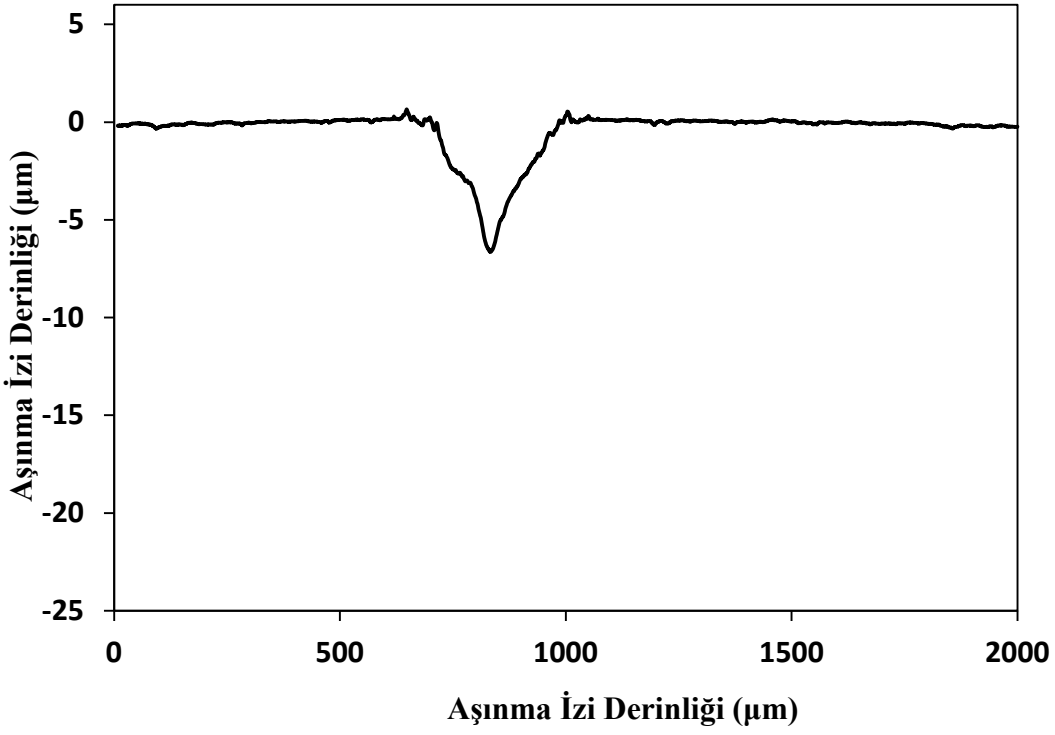
c)

Şekil B.3 (devamı): 60 µm tabaka kalınlığına sahip AISI H13 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500˚C' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.

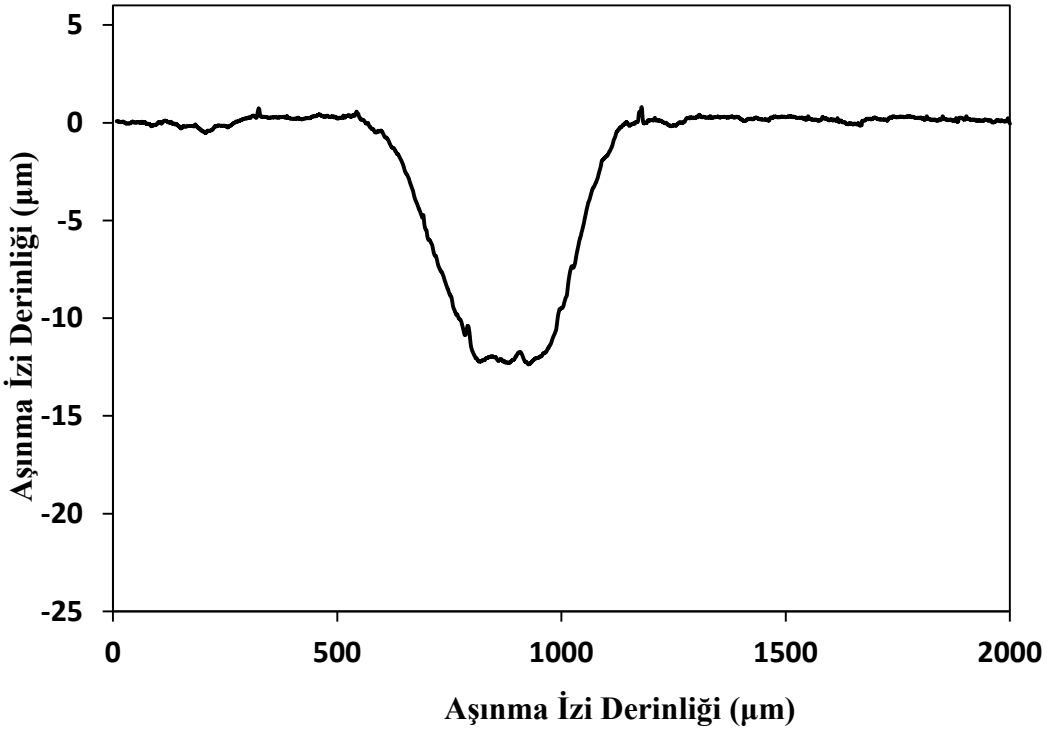


a)

Şekil B.4: 60 µm tabaka kalınlığına sahip AISI 420 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500 ˚C' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.



b)



c)

Şekil B.4 (devamı): 60 µm tabaka kalınlığına sahip AISI 420 çeliğinin a) 25, b) 300 ve c) 500˚C' de yapılmış aşınma testlerinin profil sonuçları.

Ek C: Borlanmış çeliklerin 100, 200, 300, 500, 1000 ve 2000 g yük altında ölçülen vickers sertlik testi sonuçları.

Çizelge C.1: 850 ºC'de 4, 6, ve 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin 100, 200, 300, 500, 1000 ve 2000 g yük altında ölçülen vickers sertlik testi sonuçları.

Çelik Türleri Süre	AISI 4140 4sa-6sa-8sa	EN 1.8519 4sa-6sa-8sa	AISI H13 4sa-6sa-8sa	AISI 420 4sa-6sa-8sa
100g	2010Hv/2089Hv/ 2111Hv	2079Hv/2046Hv /2094Hv	2107Hv/2113H v /2079 Hv	2070Hv/2141H v/2209 Hv
200g	1912Hv/1979Hv/ 1994Hv	1891Hv/1913Hv /1981Hv	1970Hv /2052 Hv /1999 Hv	1850Hv /1965 Hv /2101 Hv
300g	1854Hv/1871Hv/ 1893Hv	1809Hv/1852Hv / 1883Hv	1827Hv/1918 Hv /1975 Hv	1750Hv /1813 Hv /1897 Hv
500g	1822Hv/1852Hv/ 1837Hv	1785Hv/1713Hv/ 1771Hv	1366 Hv /1689 Hv /1751 Hv	1415Hv/157Hv/ 1613 Hv
1000g	1705Hv/1694Hv/ 1609Hv	1698Hv/1591Hv/ 1575Hv	697 Hv /1213 Hv /1587 Hv	849Hv/1129 Hv /1317 Hv
2000g	1229Hv/1531Hv/ 1571Hv	1136Hv/1413Hv/ 1368Hv	416 Hv /566 Hv /896 Hv	511Hv/603Hv/ 699 Hv

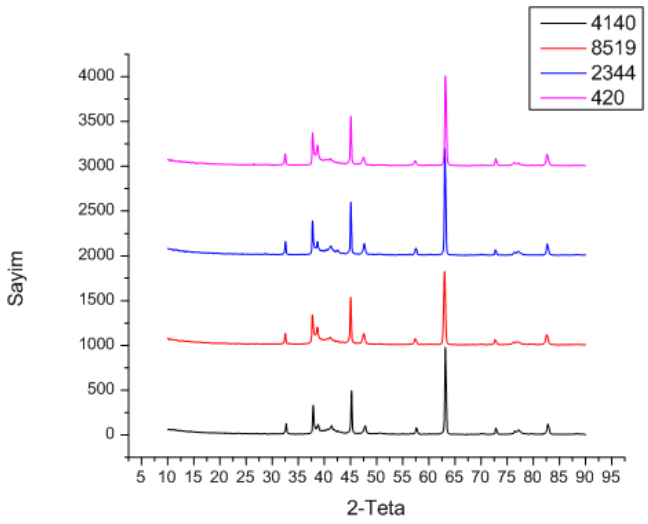
Çizelge C.2: 900 ºC'de 4, 6, ve 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin 100, 200, 300, 500, 1000 ve 2000 g yük altında ölçülen vickers sertlik testi sonuçları.

Çelik Türleri Süre	AISI 4140 4sa-6sa-8sa	EN 1.8519 4sa-6sa-8sa	AISI H13 4sa-6sa-8sa	AISI 420 4sa-6sa-8sa
100g	2016Hv/2122Hv/ 2019Hv	1993Hv/1999Hv /1992Hv	2279Hv/2294H v /2213 Hv	2168Hv/2105H v/2113 Hv
200g	1950Hv/1950Hv/ 1901Hv	1852Hv/1897Hv /1845Hv	2117Hv /2059 Hv /2143 Hv	2054Hv /2001 Hv /2027 Hv
300g	1875Hv/1854Hv/ 1818Hv	1822Hv/1808Hv / 1798Hv	1954Hv/1993 Hv /2011 Hv	1890Hv /1891 Hv /1956 Hv
500g	1732Hv/1797Hv/ 1755Hv	1643Hv/1620Hv/ 1719Hv	1804 Hv /1907 Hv /1981 Hv	1713Hv/1855H v/1855 Hv
1000g	1680Hv/1681Hv/ 1684Hv	1496Hv/1527Hv/ 1665Hv	1522 Hv /1842 Hv /1802 Hv	1397Hv/1717 Hv /1712 Hv
2000g	1335Hv/1623Hv/ 1599Hv	1402Hv/1512Hv/ 1591Hv	868 Hv /1373 Hv /1552 Hv	719Hv/1319Hv/ 1505 Hv

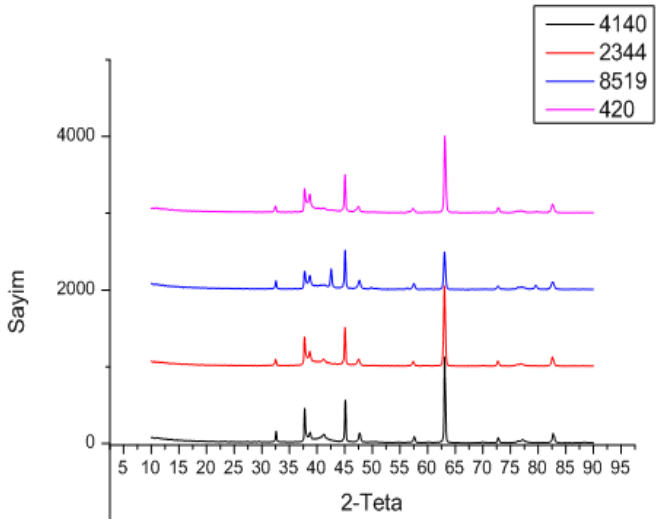
Çizelge C.3: 950 ºC'de 4, 6, ve 8 saat süreyle borlanmış çeliklerin 100, 200, 300, 500, 1000 ve 2000 g yük altında ölçülen vickers sertlik testi sonuçları.

Çelik Türleri Süre	**AISI 4140 4sa-6sa-8sa**	**EN 1.8519 4sa-6sa-8sa**	**AISI H13 4sa-6sa-8sa**	**AISI 420 4sa-6sa-8sa**
100g	2006Hv/2004Hv/ 1997Hv	2021Hv/1950Hv /1991Hv	2213Hv/2184Hv /2224 Hv	2192Hv/2211Hv/2192 Hv
200g	1913Hv/1951Hv/ 1934Hv	1879Hv/1881Hv /1855Hv	2166Hv /2113 Hv /2197 Hv	2006Hv /2094 Hv /2006 Hv
300g	1854Hv/1864Hv/ 1881Hv	1781Hv/1800Hv / 1764Hv	2066Hv/2062 Hv /2088 Hv	1899Hv /1989 Hv /1899Hv
500g	1692Hv/1651Hv/ 1671Hv	1653Hv/1673Hv/ 1650Hv	1946 Hv /1870 Hv /1900 Hv	1784Hv/1893Hv/1864Hv
1000g	1567Hv/1547Hv/ 1550Hv	1579Hv/1555Hv/ 1525Hv	1811Hv /1760 Hv /1780 Hv	1673Hv/1752 Hv /1699 Hv
2000g	1400Hv/1382Hv/ 1365Hv	1457Hv/1413Hv/ 1368Hv	1460 Hv /1553 Hv /1593 Hv	1491Hv/1497Hv/1549Hv

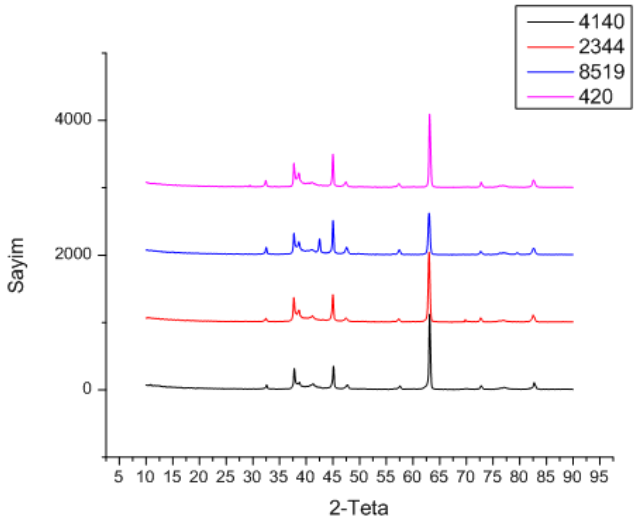
Ek D: 850, 900 ve 950 ˚C'de borlanmış çeliklerin XRD sonuçları.



a)

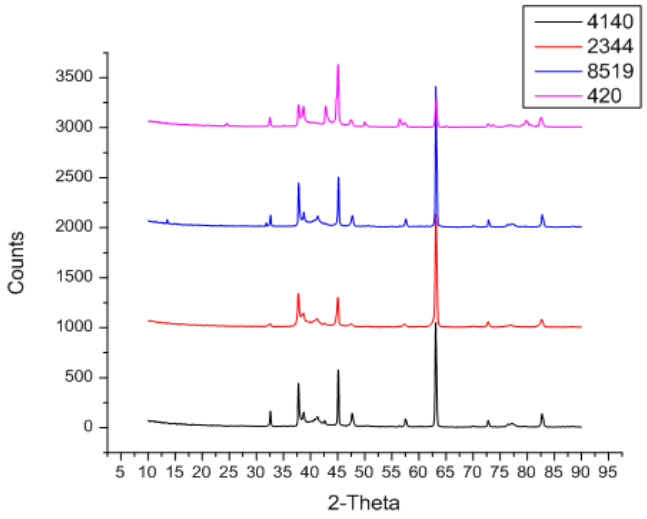


b)

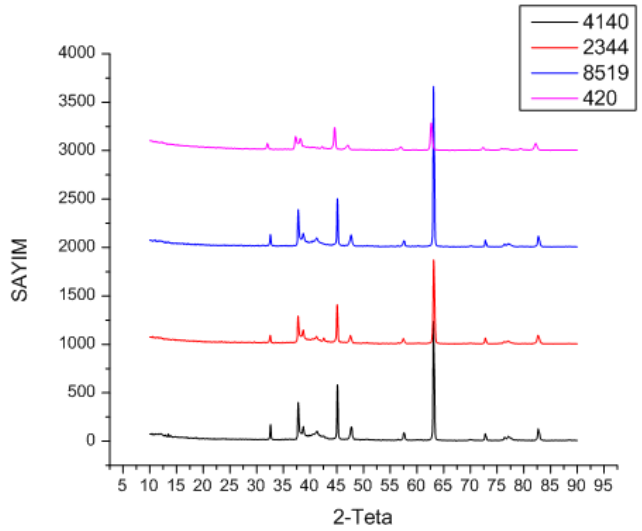


c)

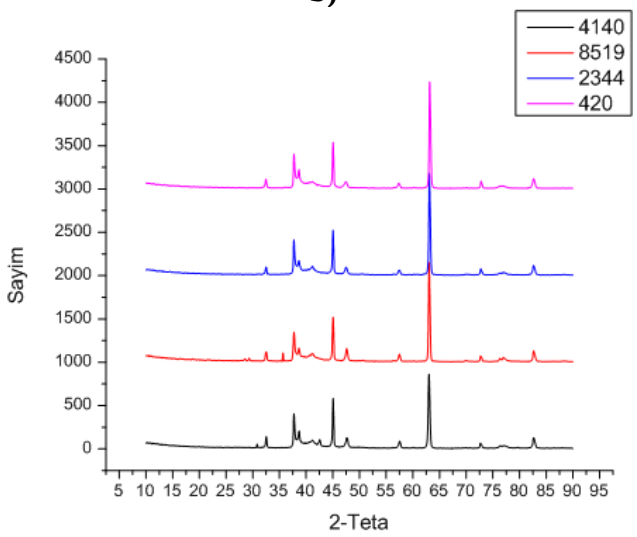
Şekil D.1: 850 ˚C'de a) 4, b) 6 ve c) 8 saat sürelerle borlanmış çeliklerin XRD sonuçları.



a)

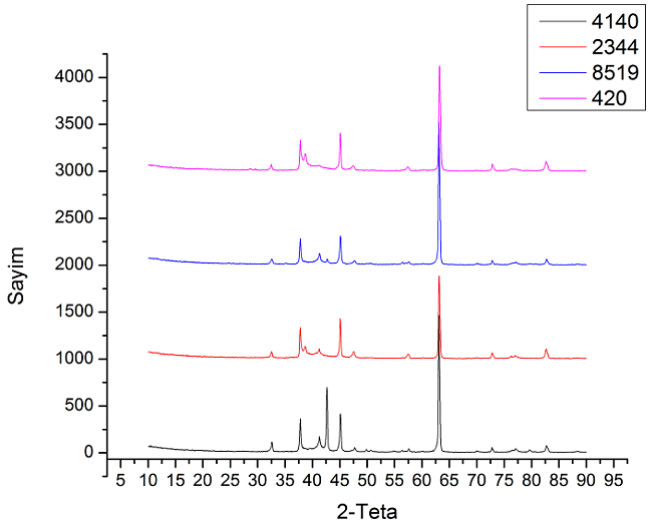


b)

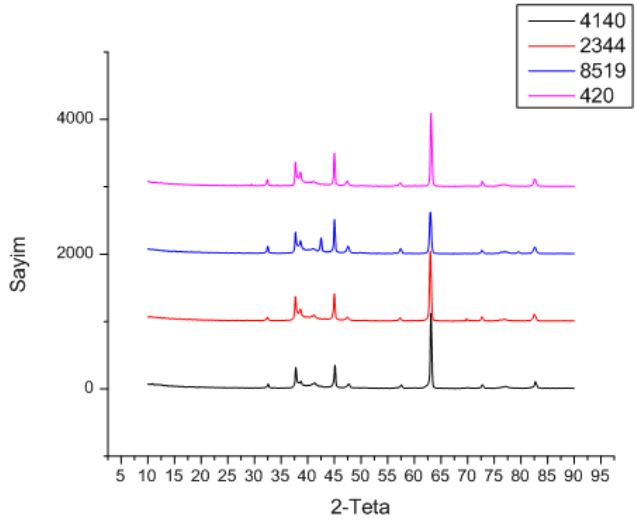


c)

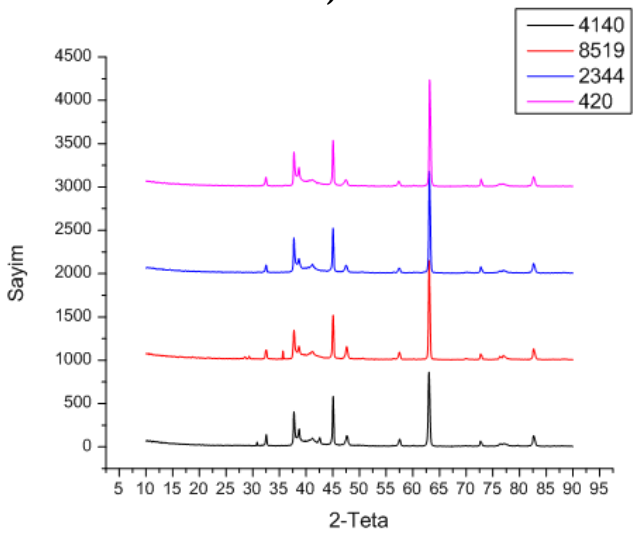
Şekil D.2: 900 ˚C'de a) 4, b) 6 ve c) 8 saat sürelerle borlanmış çeliklerin XRD sonuçları.



a)



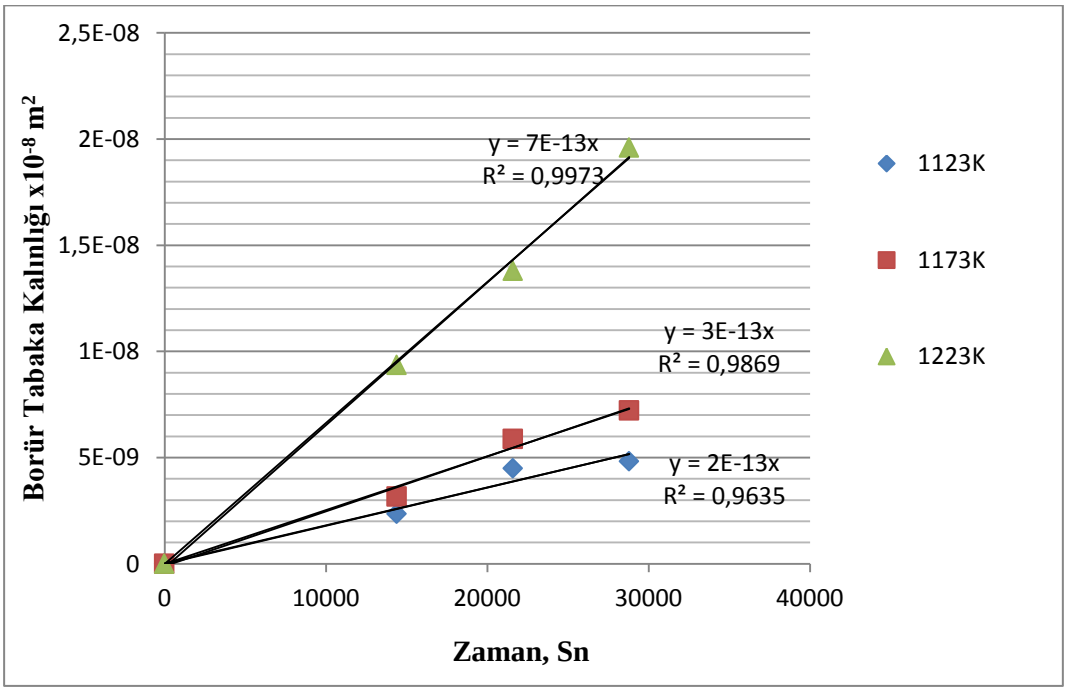
b)



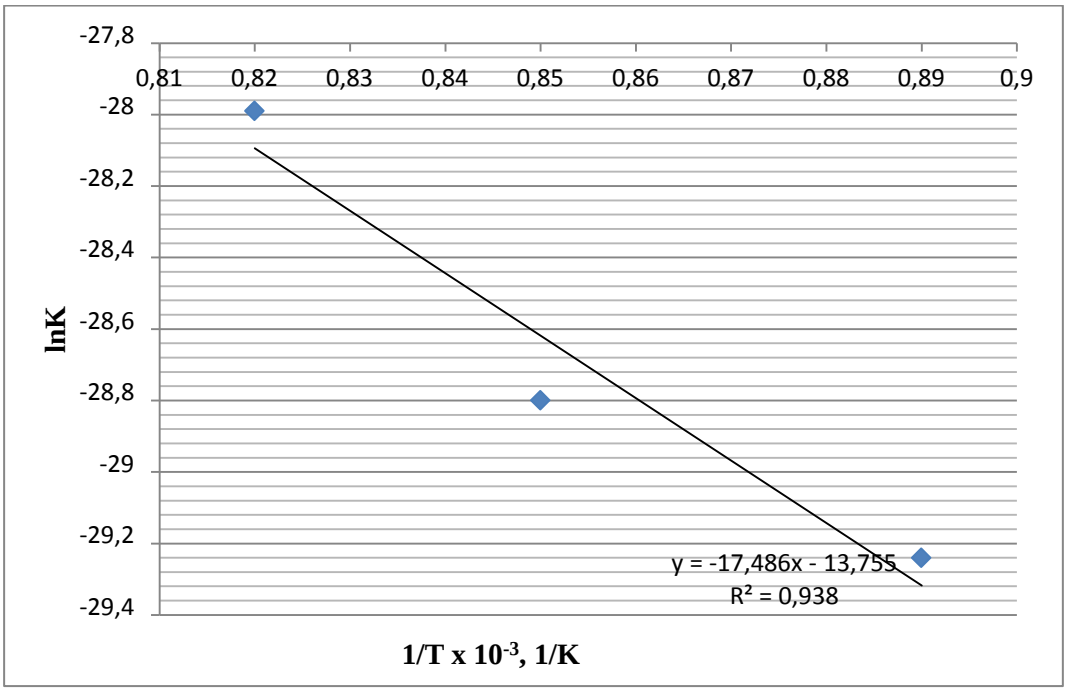
c)

Şekil D.3: 950 ºC'de a) 4, b) 6 ve c) 8 saat sürelerle borlanmış çeliklerin XRD sonuçları.

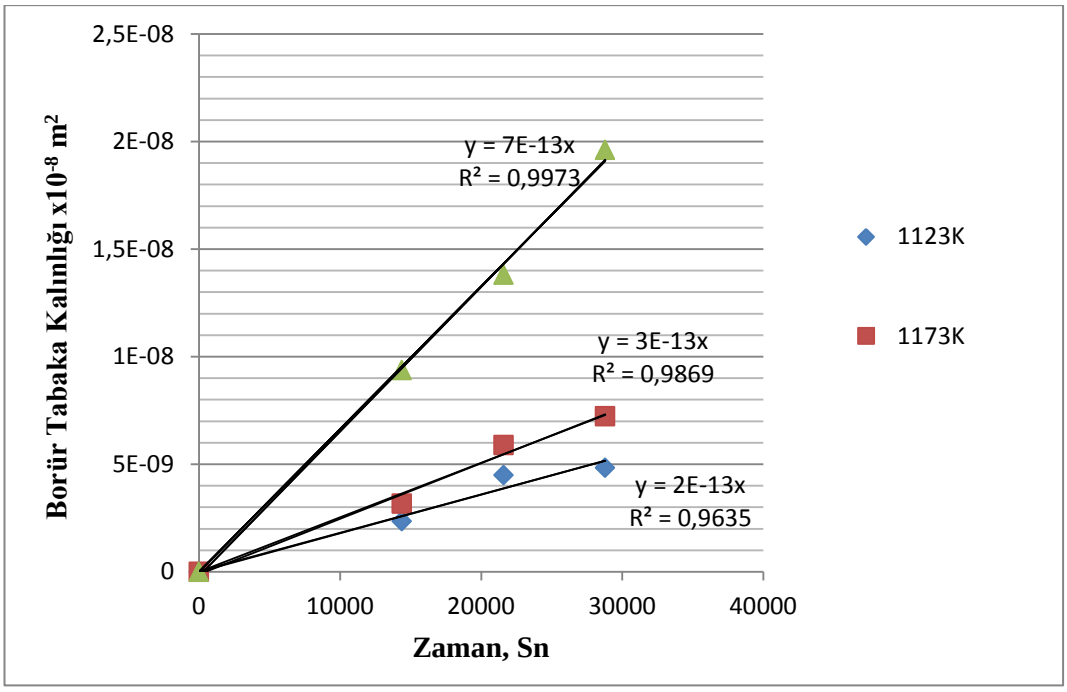
Ek E: Kinetik hesap grafikleri.



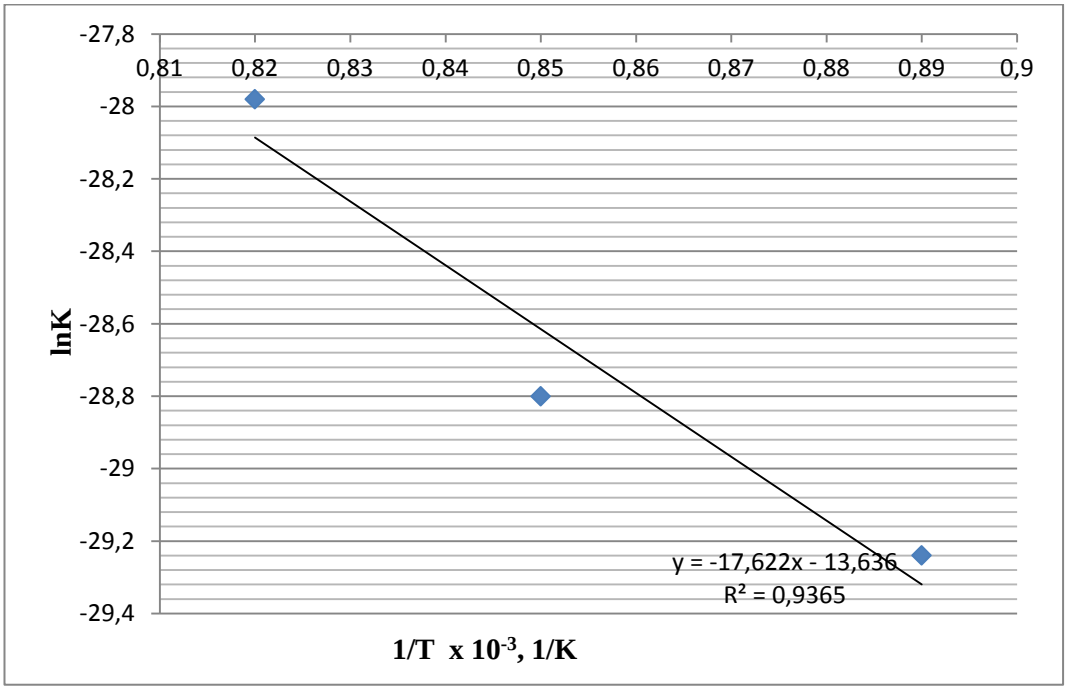
Şekil E.1: AISI 4140 çeliğinin tabaka kalınlığının karesinin borlama süresine göre çizimi.



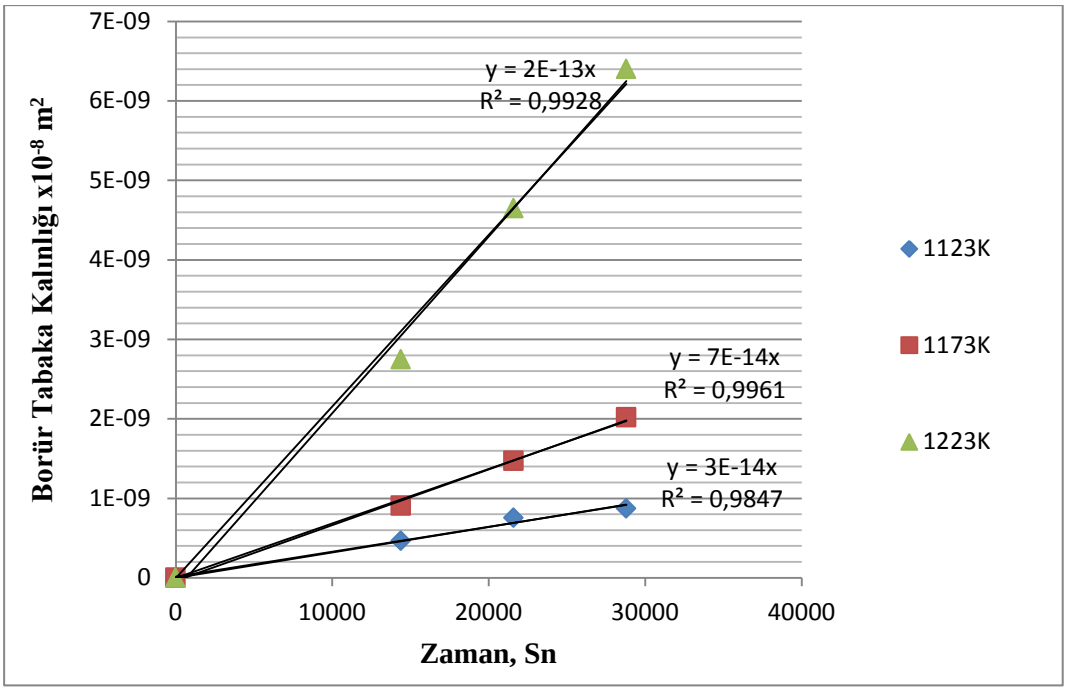
Şekil E.2: AISI 4140 Çeliği için büyüme hızı sabitinin borlama süresiyle değişim grafiği.



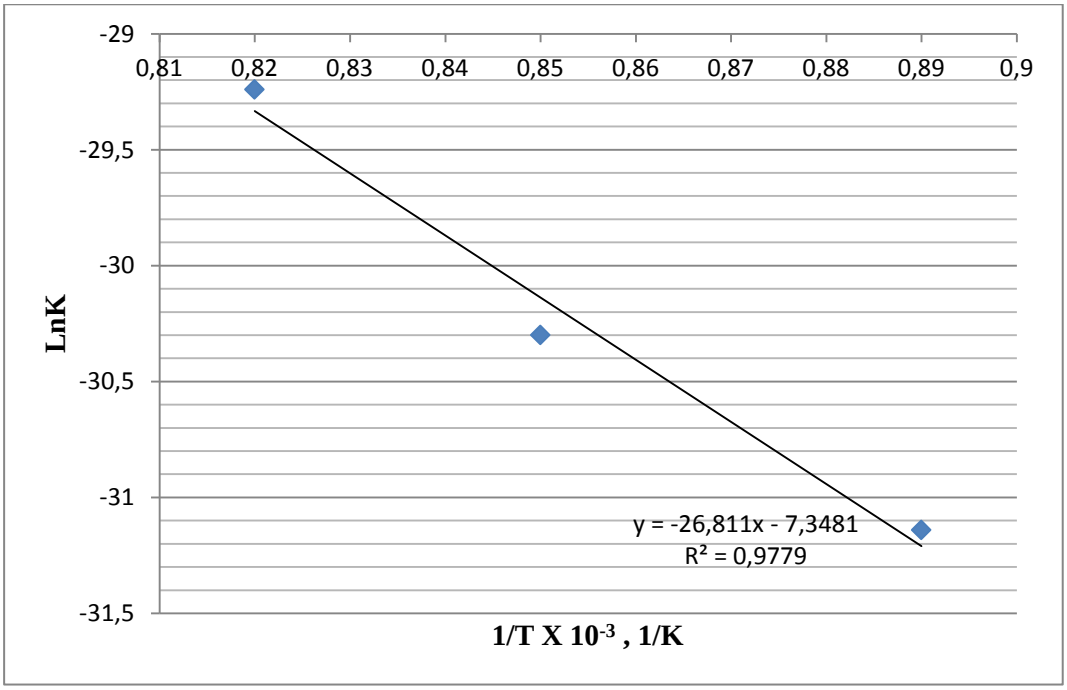
Şekil E.3: EN 1.8519 çeliğinin tabaka kalınlığının karesinin borlama süresine göre çizimi.



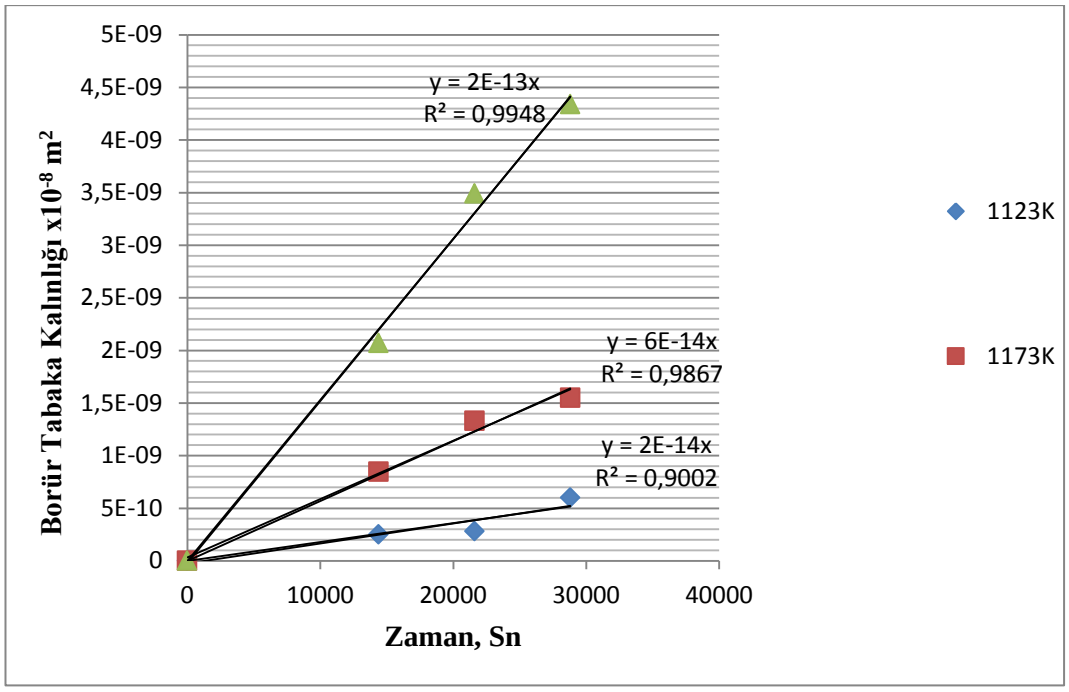
Şekil E.4: EN 1.8519 çeliği için büyüme hızı sabitinin borlama süresiyle değişim grafiği.



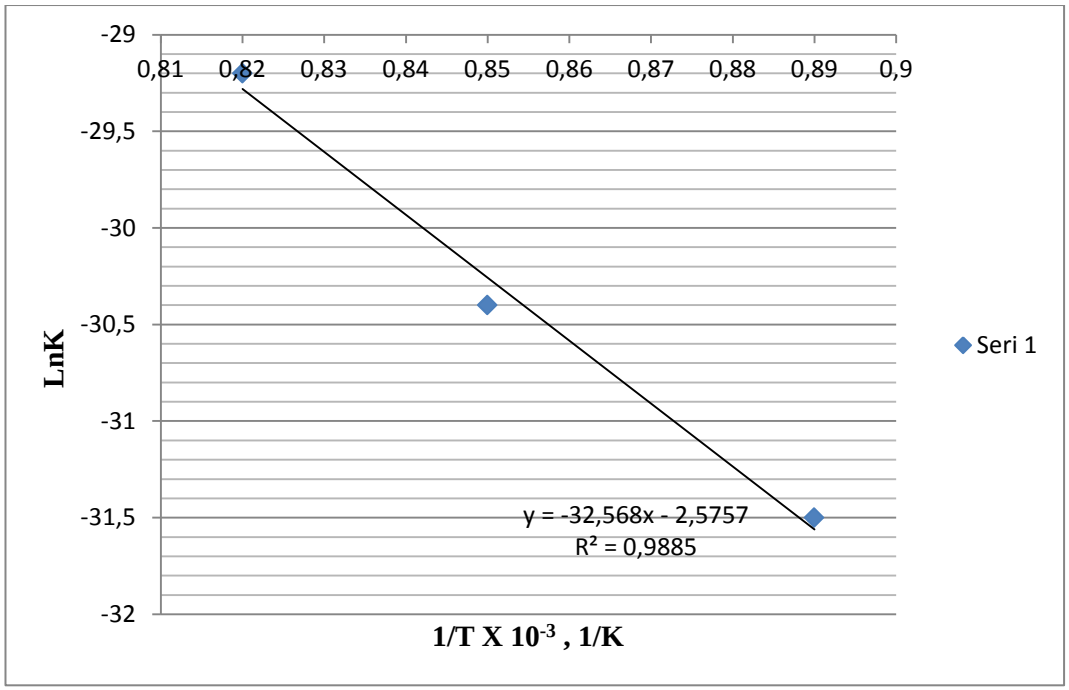
Şekil E.5: AISI H13 çeliğinin tabaka kalınlığının karesinin borlama süresine göre çizimi.



Şekil E.6: AISI H13 çeliği için büyüme hızı sabitinin borlama süresiyle değişim grafiği.

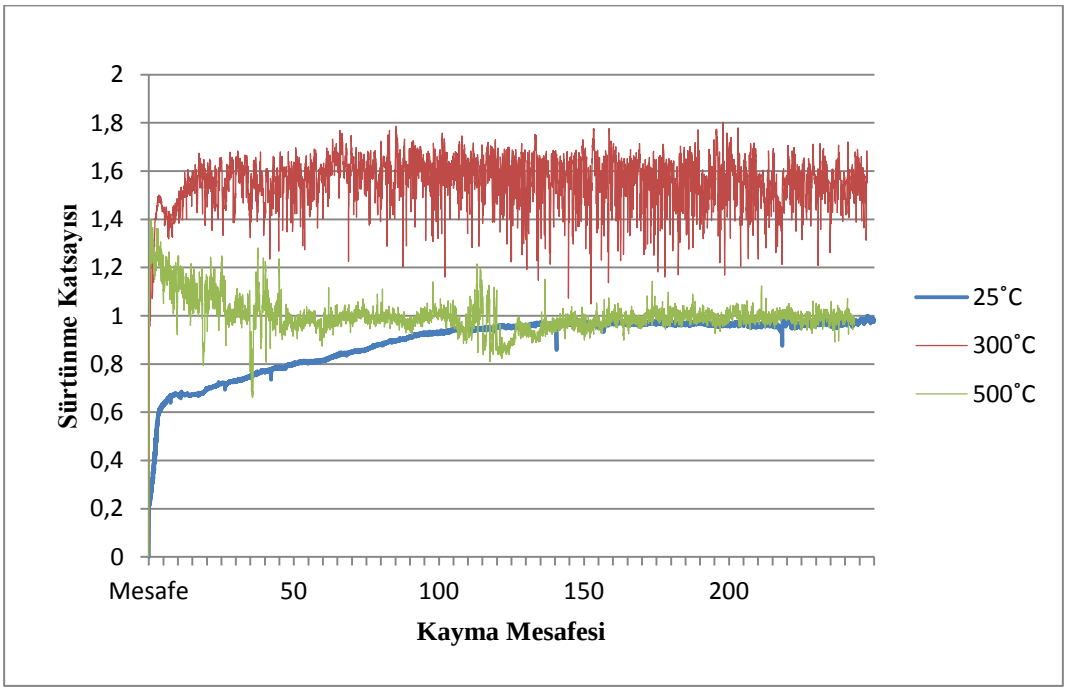


Şekil E.7: AISI 420 çeliğinin tabaka kalınlığının karesinin borlama süresine göre çizimi.

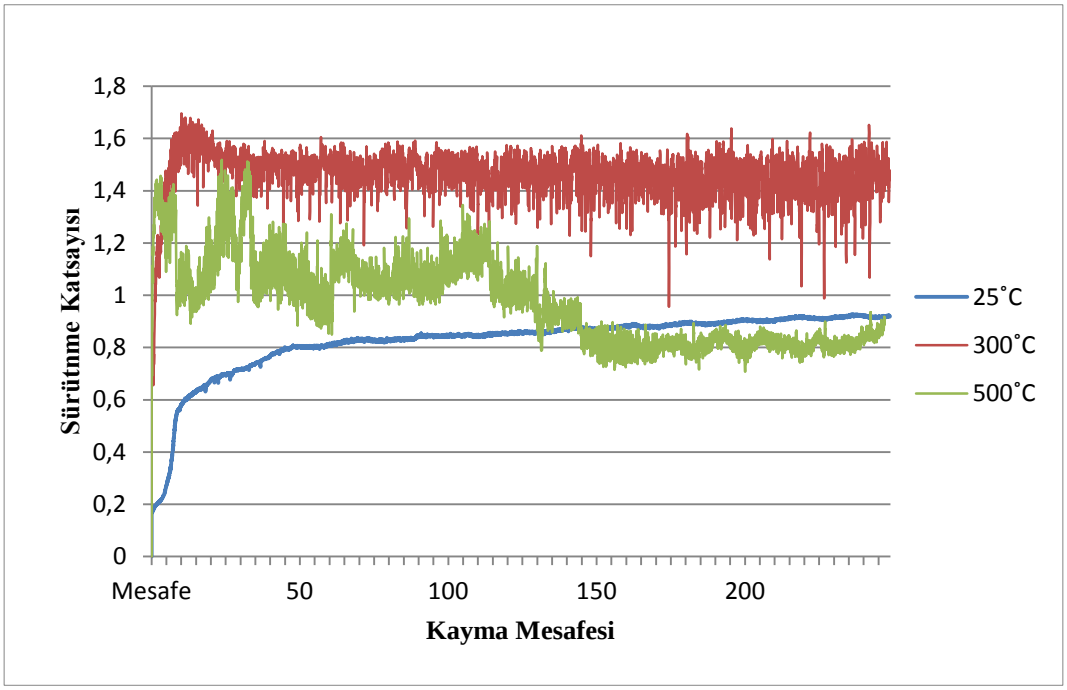


Şekil E.8: AISI 420 çeliği için büyüme hızı sabitinin borlama süresiyle değişim grafiği.

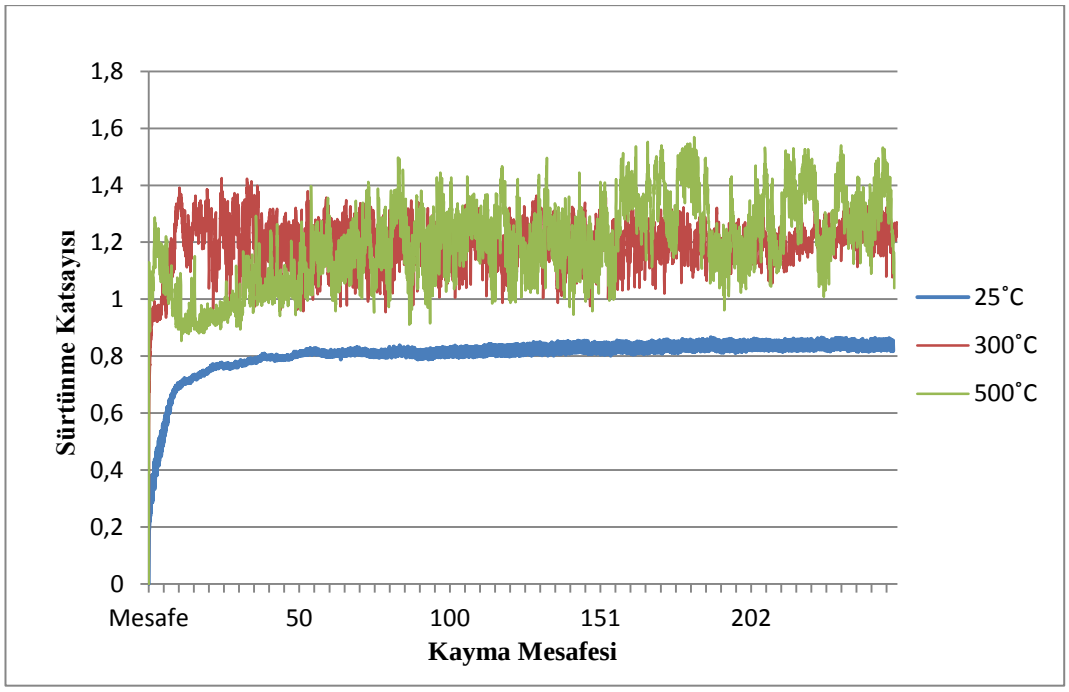
Ek F: Dört çeliğin aşınma testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri.



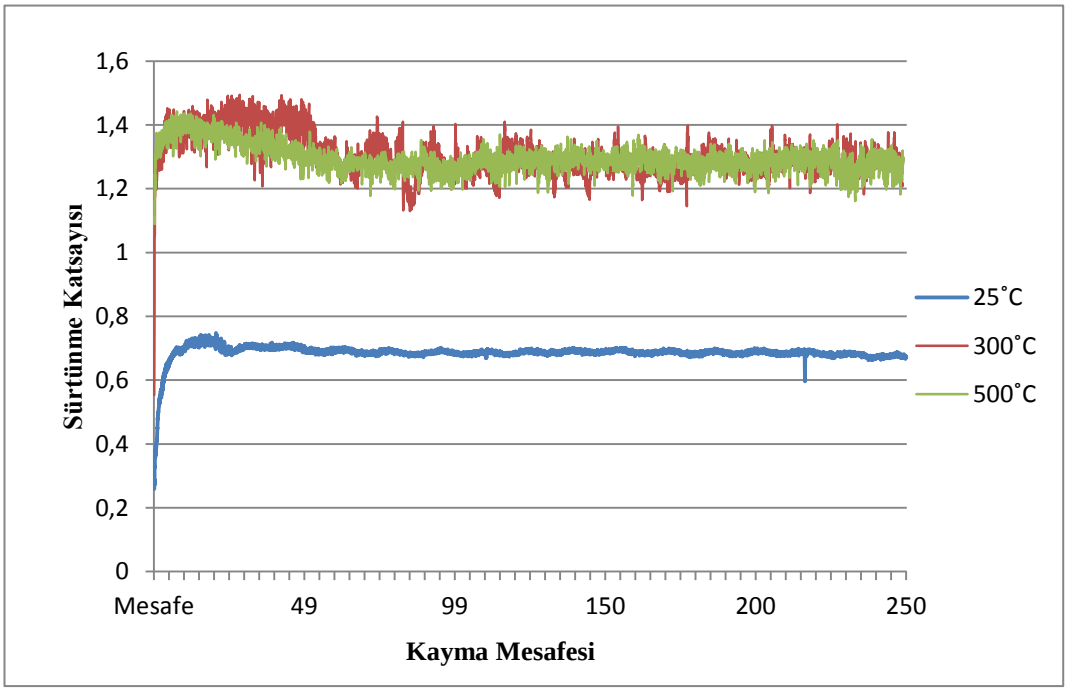
Şekil F.1: AISI 4140 çeliğinin 900 ºC'de 4 saat borlandıktan (~yaklaşık tabaka kalınlığı 60 µm) sonra 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklıkaşınma testi sırasında ölçülen sürtünme katsayısı.



Şekil F.2: EN 1.8519 çeliğinin 900 ºC'de 4 saat borlandıktan (~yaklaşık tabaka kalınlığı 60 µm) sonra 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklık aşınma testi sırasında ölçülen sürtünme katsayısı.



Şekil F.3: AISI H13 çeliğinin 950 ºC' de 6 saat borlandıktan (~yaklaşık tabaka kalınlığı 60 µm) sonra 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklık aşınma testi sırasında ölçülen sürtünme katsayısı.



Şekil F.4: AISI 420 çeliğinin 950 ºC'de 6 saat borlandıktan (~yaklaşık tabaka kalınlığı 60 µm) sonra 25, 300 ve 500 ºC'de yapılan yüksek sıcaklık aşınma testi sırasında ölçülen sürtünme katsayısı.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad:	Emre Dilektaşlı
Doğum Yeri ve Tarihi:	Diyarbakır / 12.09.1988
Adres:	Basın Cad. Özden Sok. 9/8 Basınevleri/Keçiören ANKARA
E-Posta:	edilektasli@itu.edu.tr
Tel No:	05542000507
Lisans:	Anadolu Üniversitesi – Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (09.2006-06.2011)
Yüksek Lisans:	İstanbul Teknik Üniversitesi – Malzeme Mühendisliği (02.2012-02.2014)